

ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

Διαλέξεις Υυ. Ν. Denisyuk

Μετάφραση - επιμέλεια: Α. ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ
Καθ. Φυσικής Τ.Ε.Ι. Αθήνας

Ανοιχτά
Ακαδημαϊκά
Μαθήματα στο ΤΕΙ
Αθήνας

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Η ολογραφία αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο στη σύγχρονη οπτική, έχει πολλές εφαρμογές που εκτείνονται σχεδόν σε όλους τους κλάδους της σύγχρονης επιστήμης. Στην Ελληνική βιβλιογραφία δύσκολα συναντά κανείς ένα βιβλίο με αποκλειστικό θέμα την ολογραφία. Συνήθως οι αναφορές που γίνονται είναι ελάχιστες και τις περισσότερες φορές έχουν ένα καθαρά περιστασιακό χαρακτήρα ανάλογα με τη θεματολογία του συγκεκριμένου βιβλίου.

Η παρούσα έκδοση ασχολείται με το συγκεντρωμένο υλικό σειράς διαλέξεων για την οπτική ολογραφία που πραγματοποίησε ο Yu. N. Denisjuk και πρωτοκυκλοφόρησαν σε ολοκληρωμένη μορφή στη ρωσική γλώσσα το 1978 από το Ινστιτούτο S. I. Vanilov του Leningrad. Η προσφορά του συγγραφέα στην εξέλιξη της ολογραφίας είναι ιδιαίτερα σημαντική και παγκόσμια αποδεκτή. Ο Yu. N. Denisjuk πρότεινε το 1976 το ολόγραμμα της μονής δέσμης με το οποίο απλοποιείται σημαντικά η ολογραφική διάταξη. Η απλοποίηση αυτή βοήθησε στην ραγδαία αύξηση του αριθμού των εργαστηρίων που ασχολήθηκαν με την ολογραφία.

Το βιβλίο αποτελείται από πέντε κεφάλαια που έχουν ένα ημιαυτόνομο χαρακτήρα. Κάθε κεφάλαιο διαθέτει πληθώρα σχημάτων που είναι εντελώς απαραίτητα στη διαπραγμάτευση ενός δύσκολου θέματος όπως η ολογραφία. Στο τέλος υπάρχει το κεφάλαιο των συμπερασμάτων καθώς επίσης και εκτενέστατη αναφορά στις σύγχρονες πρακτικές εφαρμογές της ολογραφίας.

Τα κεφάλαια είναι σχεδόν απαλλαγμένα από μαθηματικές έννοιες και αλγεβρικές σχέσεις. Δίνεται έτσι ιδιαίτερη έμφαση στη φυσική που συμμετέχει για τη σωστή περιγραφή των φαινομένων. Η απουσία μαθηματικών σε συνδυασμό με τη πληρότητα αντιμετώπισης των βασικών εννοιών που αφορούν την ολογραφία καθιστούν τη παρούσα έκδοση ένα χρήσιμο βοήθημα για αναγνώστες οι οποίοι ενώ έχουν ενδιαφέρον για την ολογραφία ταυτόχρονα στερούνται των κατάλληλων εκείνων γνώσεων για τη πλήρη "μαθηματικοποιημένη" περιγραφή της.

Η απόδοση στην Ελληνική γλώσσα έγινε από ένα κείμενο στα Αγγλικά στο οποίο είχε ήδη μεταφραστεί το πρωτότυπο. Το γεγονός αυτό καθιστά προφανώς δυσκολότερη την πραγματοποίηση του αρχικού στόχου που δεν ήταν άλλος από τη πιστή μεταφορά στα Ελληνικά των διαλέξεων ενός προικισμένου δάσκαλου της ολογραφίας όπως ο Yu. N. Denisjuk. Σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε να αποδοθεί το κείμενο σε γλώσσα απλή με ταυτόχρονη διατήρηση της υπάρχουσας επιστημονικής ακρίβειας προς αποφυγήν παρανοήσεων.

Εύχομαι τα λάθη και οι παραλείψεις που αναμφίβολα θα υπάρχουν στη πρώτη αυτή προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν ανώδυνα. Οι αναγνώστες -που είναι και οι τελικοί κριτές μιας τέτοιας προσπάθειας- ας δώσουν την ευκαιρία με τα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους να διαμορφωθεί καλλίτερα το περιεχόμενο μιας νέας έκδοσης.

Αθήνα, Μάιος 1994 Α. ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

Περιεχόμενα

ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	0
ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	3
ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΣΥΝΙΣΤΟΥΝ ΤΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	3
1. Η εικόνα ενός αντικειμένου και οι τρόποι της αναπαράστασής του	3
2. Στοιχεία από τη κυματική θεωρία του φωτός	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΗ	22
1. Η χαρτογράφηση της σύστασης του φάσματος ακτινοβολίας μέσω διαγράμματος, στάσιμων, σταθερών κυμάτων (Η διαδικασία Lippmann της φωτογράφησης σε φυσικά χρώματα).....	22
2. Σχέση μεταξύ της δομής οπτικού ειδώλου και τιμών πεδίου σε επιφάνεια.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	33
ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΣ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	33
Εισαγωγή.....	33
1. Χαρακτηριστικές ιδιότητες απεικόνισης δισδιάστατου τμήματος διαγράμματος στάσιμου κύματος	33
2. Χαρακτηριστικές ιδιότητες απεικόνισης τρισδιάστατου διαγράμματος στάσιμου κύματος (Διαδικασία ολογραφίας που απασχολεί τρισδιάστατη καταγραφή).....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....	47
Εισαγωγή.....	47
1. Επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού καταγραφής στο ολόγραμμα.....	47
2. Επίδραση των ιδιοτήτων σύμφωνης πηγής καταγραφής στο ολόγραμμα	53
3. Ιδιότητες μετασχηματισμού ολογράμματος.....	58
4. Μερικές ειδικές ιδιότητες ολογραμμάτων	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
Μέθοδοι ολογραφίας και προοπτικές των πρακτικών εφαρμογών της	71
Αναφορές	85
Βιβλία ολογραφίας.....	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ

ΣΥΝΙΣΤΟΥΝ ΤΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ

ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

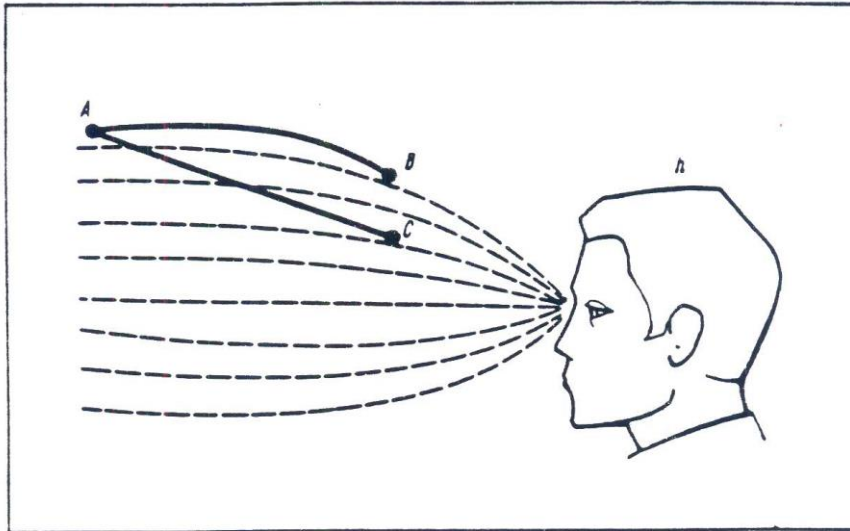
1. Η εικόνα ενός αντικειμένου και οι τρόποι της αναπαράστασής του

Οι γιατροί και οι εξερευνητές των σπηλαίων είναι καλά ενημερωμένοι στο ότι η παραμονή για μερικές μέρες σε πλήρη σκοτάδι μπορεί να οδηγήσει σε μη αντιστρεπτή απώλεια της όρασης. Είναι ακόμη προφανές ότι κάθε μέρα, κάθε λεπτό της συνειδητής ζωής ο άνθρωπος αποδέχεται και ταξινομεί τις εικόνες από το περιβάλλον σύμπαν που φθάνουν σ' αυτόν μέσω του φωτός. Έτσι, η κατασκευή του οφθαλμού του δεν ανταποκρίνεται σε κάθε διάρκεια έκθεσης στο σκοτάδι. Ο βαθμός της ανθρώπινης προσαρμοστικότητας στο φως είναι μακριά από το να περιοριστεί στο αναφερθέν φυσιολογικό φαινόμενο. Πράγματι, η κατασκευή του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο τρόπος σκέψης, όλες οι αντιλήψεις για το σύμπαν που μας περιβάλλει είναι σε άμεση σχέση με τους νόμους που κυριαρχούν στο φως, αυτό το απροσδιόριστο "υλικό" και στους τρόπους της αλληλεπίδρασής του με την ύλη.

Με σκοπό την λήψη μιας παραστατικότερης εικόνας του πόσο οι αντιλήψεις μας εξαρτώνται από το φως, ας προσπαθήσουμε για λίγο να δημιουργήσουμε μια νοερή εικόνα ενός σύμπαντος όπου το φως δεν διαδίδεται κατά μήκος ευθείας γραμμής αλλά ταξιδεύει κατά μήκος κάποιων καμπύλων όπως φαίνεται στις διακεκομμένες καμπύλες του σχήματος 1.

Ο κάτοικος h ενός τέτοιου σύμπαντος θεωρεί όλες τις καμπύλες γραμμές που ταυτίζονται με τη πορεία των ακτινών (για παράδειγμα την καμπύλη AB) σαν τέλεια ευθεία διότι κάθε τέτοια καμπύλη προβάλλεται σε ένα σημείο στο τελικό επίπεδο του προσώπου. Ταυτόχρονα όμως ο ίδιος παρατηρητής h αντιλαμβάνεται την ευθεία γραμμή AC σαν καμπύλη. Η μεταβολή αυτή της γεωμετρίας προκαλεί ουσιαστικές αλλαγές στους νόμους της Μηχανικής: σώματα που δεν επηρεάζονται από δυνάμεις ακολουθούν εξεζητημένες τροχιές, ενώ μεταβάλλονται επίσης και τα σχήματα των σωμάτων. Έτσι υποθέτοντας μια αλλαγή στους νόμους διάδοσης του φωτός παρουσιάζεται ένα σύμπαν γεμάτο από αφύσικες και διαστρεβλωμένες εικόνες.

Φυσικά η εικόνα δεν δημιουργείται μόνο με το φως. Ο οφθαλμός και ο εγκεφάλος παίζουν σημαντικότερο ρόλο στη δημιουργία της εικόνας. Έτσι εξηγείται γιατί στο υποθετικό αυτό σύμπαν όλα φαίνονται στρεβλωμένα. Είμαστε δημιουργήματα των οποίων ο εγκεφάλος αποδέχεται για εκατομμύρια χρόνια ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα.

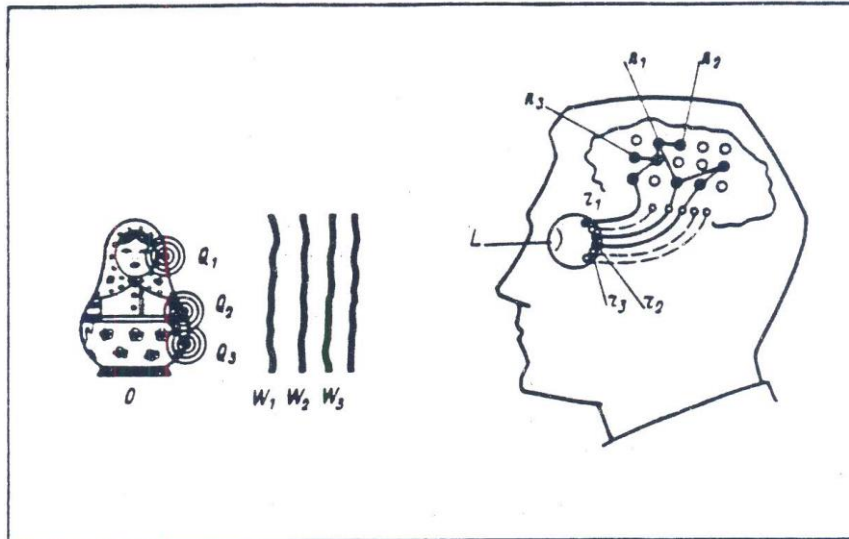


Σχήμα 1. Σε υποθετικό σύμπαν η καμπύλωση των φωτεινών ακτίνων "αλλοιώνει" την αντίληψη της όρασης

Ο αυτόχθων κάτοικος ενός τέτοιου υποθετικού σύμπαντος δεν φαίνεται να υποφέρει από καμία ασυνέπεια. Ο εγκέφαλός του θα αποδεχτεί αυτόματα όλες τις ιδιαιτερότητες της διάδοσης του φωτός και θα δημιουργήσει τις εικόνες των παρατηρουμένων αντικειμένων που θα είναι το ίδιο κατανοησίμες συγκρινόμενες με τις εικόνες που τώρα ο εγκέφαλός μας αντιλαμβάνεται. Οι δυνατότητες του εγκεφάλου προς αυτή την κατεύθυνση διασαφηνίζονται πολύ παραστατικά από τεστ στο οποίο ο άνθρωπος με τη βοήθεια γυαλιών αναγνωστηρίου μετατρέπει (αντιστρέφει) την εικόνα [1,2]. Για έναν άνθρωπο που φορά τέτοια γυαλιά για πρώτη φορά ότι τον περιβάλλει φαίνεται άνω - κάτω και του είναι τελικώς αδύνατο να προσανατολιστεί στο χώρο. Εν τούτοις φορώντας αυτά τα γυαλιά συνεχώς ο εγκέφαλός του μαθαίνει να αποδέχεται την ιδιαιτερότητα του να ζεις σ' ένα αντεστραμμένο κόσμο και σε μερικές μέρες η αντίληψή του επανέρχεται πίσω στη κανονική. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι γενεές έμβιων οργανισμών μπορούν επιτυχώς να αποδεχτούν στη πορεία της εξέλιξης ασύγκριτα περισσότερο σημαντικές οπτικές εκτροπές του περιβάλλοντος.

Η εξάρτηση της σκέψης στους νόμους του φωτός είναι τόσο πλήρης και απολύτως αποδεκτοί, έτσι ώστε να θεωρούνται και αυτονόητοι. Στη καθημερινή ζωή ποτέ δεν διαφοροποιούμε το αντικείμενο από την εικόνα του και θεωρούμε το τελευταίο σαν ένα είδος εκμαγείου από το αντικείμενο το οποίο είναι σε θέση να υπάρχει ξεχωριστά και ανεξάρτητα από το πρωτότυπο.

Είναι γεγονός πως οι φυσικές διαδικασίες που συνοδεύουν τη καταγραφή μιας εικόνας μεταφέρουν και την πληροφορία της δομής των αντικειμένων. Εν τούτοις κανένα αντίγραφο -με τη συμβατική του έννοια- δεν δημιουργείται στο μεταξύ. Όλες αυτές οι πορείες μπορούν να παρουσιαστούν σαν μια αλυσίδα διαδοχικών γεγονότων σε κάθε κρίκο της οποίας περιέχεται η πληροφορία του αντικειμένου κωδικοποιημένη με τη δικιά της μοναδική μέθοδο (σχήμα 2).



Σχήμα 2. α διαδοχικά στάδια στη μεταφορά της οπτικής πληροφορίας από το αντικείμενο στο παρατηρητή.

Επί του αντικειμένου η εικόνα κωδικοποιείται με συγκεκριμένες ταλαντώσεις των ατόμων και των ηλεκτρονίων Q_1, Q_2, \dots . Στο χώρο ανάμεσα στο αντικείμενο και τον οφθαλμό η εικόνα μεταφέρεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (H.M.) με μια συγκεκριμένη κυματική δομή W_1, W_2, \dots . Στον αμφιβληστροειδή η εικόνα παρουσιάζεται από μια συγκεκριμένη διέγερση φωτοευαίσθητων υποδοχέων r_1, r_2, \dots και τέλος στον εγκεφαλικό φλοιό αυτή η εικόνα αποκρυπτογραφείται από ένα συγκεκριμένο σύστημα διεγερμένων νευρώνων n_1, n_2 . Έτσι, με την εξαίρεση του αμφιβληστροειδή μπορούμε και αντιλαμβανόμαστε οτιδήποτε μοιάζει με το αντικείμενο όσον αφορά την εξωτερική του εμφάνιση. Πραγματικά, ο φακός σχηματίζει τα είδωλα των αντικειμένων στον αμφιβληστροειδή. Βέβαια τα είδωλα αυτά αν και γνώριμα δεν σημαίνουν ακόμη τίποτε. Ο εγκέφαλός μας επιφορτίζεται να αναγνωρίσει τα συγκεκριμένα αντικείμενα αναλύοντας τα φωτεινά διαγράμματα των ειδώλων του αμφιβληστροειδή. Έτσι, ανεξάρτητα από την φύση της υπάρχουσας συσχέτισης μεταξύ του ειδώλου και του αντικειμένου το διάγραμμα αυτό πάντα για μας θα ταυτίζεται απόλυτα με το αρχικό αντικείμενο.

Ας επιστρέψουμε όμως στην αλυσίδα των γεγονότων μέσω των οποίων η εικόνα ενός αντικειμένου γίνεται αντιληπτή σε μας και ας αναφέρουμε έναν αριθμό από σπουδαία χαρακτηριστικά γνώρισμα που αφορούν αυτή τη διαδικασία. Πρώτον είναι προφανές ότι η πορεία που συνοδεύει την μεταφορά εικόνας υποδιαιρείται φυσικά σε δύο εντελώς ξεχωριστές κατηγορίες: την αντικειμενική φυσική διαδικασία που υπάρχει έξω από την συνείδησή μας και την υποκειμενική "φυσιολογική" πορεία που συμβαίνει μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό. Η αντικειμενική διαδικασία εμπεριέχει τα φαινόμενα που συμβαίνουν στο αντικείμενο και στο H.M. πεδίο που αναπτύσσεται στο χώρο που περιβάλλει το αντικείμενο. Η υποκειμενική διαδικασία είναι αυτή που συμβαίνει στον αμφιβληστροειδή και στον φλοιό του εγκεφάλου.

Η ουσιώδης ιδιαιτερότητα της αλυσίδας των γεγονότων που μνημονεύονται βρίσκεται σε ένα ακόμη σπουδαίο χαρακτηριστικό. Κάθε διαδοχικός κρίκος της αλυσίδας επιτρέπει και λιγότερη ποσότητα πληροφορίας να διέλθει από ότι υπήρχε στο προηγούμενο στάδιο. Είναι προφανές ότι το αντικείμενο περιέχει την μέγιστη ποσότητα πληροφορίας, ενώ το πεδίο, ο

αμφιβληστροειδής και ο φλοιός του εγκεφάλου αποτελούν τα διαδοχικά στάδια μιας μείωσης της αρχικής πληροφορίας του παρατηρούμενου αντικειμένου.

Τελικά παρατηρώντας την διαδικασία μέσω της οποίας η πληροφορία της εικόνας μεταφέρεται, είναι εύκολο να αναληφθούμε πως από το αντικείμενο μέσω του Η.Μ. πεδίου και μετά στον οφθαλμό και τον εγκέφαλο επιτρέπεται η δυνατότητα δημιουργίας της εικόνας χωρίς καθόλου να συμμετέχει αυτό το ίδιο το αντικείμενο. Έτσι είναι αρκετό να αναδημιουργηθούν σε ένα από τα στάδια της μνημονεύομενης αλυσίδας σήματα εκ ταυτότητος ίδια με αυτά που δημιουργήθηκαν από το αντικείμενο. Ας διερευνήσουμε τώρα αυτή τη δυνατότητα με περισσότερη λεπτομέρεια.

Απαιτείται κάποιος χρόνος για να ανακτήσουμε την πληροφορία γύρω από το αντικείμενο από την εικόνα που αντιστοιχεί σ' αυτό. φυσικά όσο περισσότερος είναι ο όγκος της πληροφορίας που θέλουμε να επιτύχουμε μ' αυτό το τρόπο τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που απαιτείται για ανάλυση της εικόνας και συνεπώς και απαιτούμενος χρόνος να διατηρηθεί αυτή η εικόνα στη μνήμη. Εν τούτοις αυτοί οι μηχανισμοί εννορατικής μνήμης του εγκεφάλου έχουν από μόνες τους κάποια φυσικά όρια. Έτσι ο άνθρωπος άρχισε να κάνει τις πρώτες προσπάθειες δημιουργίας συστημάτων μνήμης μεγάλης διάρκειας ήδη από τα πρώτα στάδια του μετασχηματισμού των αισθητηρίων του οργάνων.

Γενικά υπάρχουν πολλές δυνατότητες στο τομέα της απομνημόνευσης εικόνας. Σήματα που προέρχονται από πραγματικά αντικείμενα μπορούν να αντικατασταθούν από πανομοιότυπα σήματα ενός αντίστοιχου προσομοιωτή πρακτικά σε κάθε στάδιο από τα προαναφερόμενα γεγονότα που περιγράφουν τον τρόπο που μεταφέρεται η πληροφορία μιας εικόνας. Αντίστοιχα οι μέθοδοι δημιουργίας της εικόνας μπορούν επίσης να υποδιαιρεθούν σε αντικειμενικούς και υποκειμενικούς γεγονόσ που εξαρτάται από το σε ποιο κρίκο αντικειμενικό ή υποκειμενικό έλαβε χώρα μια τέτοια αντικατάσταση. Οι αρχαίοι αρχίζουν να δημιουργούν την εικόνα με τεχνικές απομνημόνευσης και με τους δύο τρόπους που προαναφέρθηκαν.

Η περισσότερο προφανής και απόλυτη μέθοδος επαναδημιουργίας της εικόνας του αντικειμένου είναι η αντικατάσταση του αρχικού αντικειμένου με κάποιο πανομοιότυπο του. Η γλυπτική τέχνη ανέλαβε αποκλειστικά την ανάπτυξη μιας τέτοιας διαδικασίας. Αναμφίβολα μια τέτοια μέθοδος είναι αντικειμενική γιατί σ' αυτή τη περίπτωση της διαδικασίας το περιβάλλον σύμπαν είναι αντιγραφόμενο και η αίσθηση του αντικειμένου αναπαράγεται ανεξάρτητα από την οπτική συσκευή παρατήρησης. Οφειλόμενο στο γεγονός ότι σ' αυτή τη περίπτωση ο περισσότερο πληροφοριακός κρίκος της αλυσίδας μέσω της οποίας η εικόνα μεταφέρεται είναι αντιγράψιμη, η τέχνη της γλυπτικής από πρώτες αρχές είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να δημιουργήσει την πιο τέλεια αναπαράσταση του αντικειμένου. Εν τούτοις είναι αναγκαίο να γίνει συγκεκριμένη προσπάθεια με σκοπό την αναπαραγωγή κάθε ποσότητας πληροφορίας και αυτή είναι η αιτία που η τέχνη της γλυπτικής είναι ουσιαστικά η πιο επίπονη και σύνθετη διαδικασία κατοχύρωσης μιας εικόνας. Δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει το γεγονός ότι οι μέθοδοι δημιουργίας γλυπτών μορφών δεν έχουν υποστεί καμία πραγματική μεταβολή για σειρά αιώνων πολιτισμικής ανάπτυξης. Ακόμη και σήμερα δεν έχει ανακαλυφθεί καμία συσκευή που να καταγράφει

και να αναπαράγει πιστά γλυπτές τρισδιάστατες μορφές - όπως η κάμερα μπορεί να κάνει - χωρίς την ανθρώπινη συμμετοχή.

Τα σχέδια που βρέθηκαν σε τοίχους σπηλαίων, τα πετρογλυφικά που σκαλίστηκαν στους βράχους της Karelia και πολλά άλλα όμοια αρχαιολογικά ευρήματα αποδεικνύουν το γεγονός ότι χιλιάδες χρόνια πριν οι αρχαίοι μας πρόγονοι βρήκαν ένα τρόπο καταγραφής εικόνας με το να απεικονίζουν την τρισδιάστατη μορφή σε δισδιάστατη επιφάνεια. Αυτή η πορεία ανάπτυξης της απομνημόνευσης εικόνας ολοκληρώθηκε με την ζωγραφική τέχνη και αρκετά αργότερα με τη φωτογραφία η οποία και δεν απέφερε ουσιαστικές αλλαγές στα βασικά αξιώματα της ζωγραφικής.

Αντίθετα από την προφανή του απλότητα, ο μηχανισμός δημιουργίας μιας παραίσθησης που ενυπάρχει σε μια επίπεδη εικόνα είναι αρκετά σύνθετος. Πράγματι εάν μπορούσαμε να αποστερήσουμε τις προκατανοήσιμες αντιλήψεις και την σχεδόν έμφυτη συνήθεια της αναγνώρισης αντικειμένων από την επίπεδη αναπαράστασή τους σε εικόνα θα ήταν αξιοπερίεργο να γνωρίζαμε ποιά μέρη του αντικειμένου απεικονίζονται στην ζωγραφική και τι είναι κοινό μεταξύ μιας μικρής επίπεδης φωτογραφίας και ενός μεγάλου τρισδιάστατου αντικείμενου που απεικονίζεται στη φωτογραφία αυτή.

Για να βρει κανείς τις σωστές απαντήσεις σ' αυτά τα ερωτήματα πρέπει πρώτα να επανεξετάσει την διάταξη της ανθρώπινης συσκευής για όραση. Ο οφθαλμός συνίσταται ως γνωστόν από φακό που προβάλλει τις φωτεινές εικόνες των αντικειμένων στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή. Πλήθος από φωτούποδοχείς που συνίσταται από ραβδία και κωνία είναι κατάλληλα διατεταγμένοι στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή. Αυτοί οι φωτούποδοχείς καταγράφουν την κατανομή της φωτεινής έντασης στην εικόνα του αντικείμενου που δημιουργείται από τον φακό. Η εικόνα αναλύεται στις νευρικές απολήξεις του αμφιβληστροειδή και στη συνέχεια στα κέντρα όρασης του εγκεφάλου. Ο φακός του οφθαλμού σχηματίζει ένα τριών διαστάσεων είδωλο, το οποίο όμως λόγω της επιπεδότητας του αμφιβληστροειδή τελικά καταγράφεται η φωτεινή κατανομή της έντασης μόνο στο επίπεδο επί του οποίου βρίσκονται οι φωτούποδοχείς δηλαδή τα ραβδία και κωνία.

Έτσι σε κάθε δεδομένη στιγμή μπορούμε να δούμε καθαρά και εστιασμένα μόνο εκείνα τα αντικείμενα που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο του τρισδιάστατου χώρου. Με σκοπό τώρα να εστιάσουμε την προσοχή μας σε άλλα επίπεδα του χώρου είναι αναγκαίο να μεταβάλλουμε την προσαρμογή του οφθαλμού δηλαδή να μεταβληθεί κατάλληλα η ακτίνα καμπυλότητας του φακού του. Η οπτική διακριτική ικανότητα του οφθαλμού είναι επίσης αρκετά περιορισμένη. Στη καλύτερη των περιπτώσεων είναι σε θέση να διακρίνει αντικείμενα με μέγεθος τουλάχιστον 1mm στην απόσταση περίπου του ενός μέτρου. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο οφθαλμός αδυνατεί να καταγράψει μια σπουδαία χαρακτηριστική ιδιότητα όπως η φάση ταλάντωσης του Η.Μ. πεδίου και περιορίζεται μόνο στη καταγραφή της έντασής του.

Έτσι ο οφθαλμός κυρίως λόγω της χαρακτηριστικής κατασκευής του αγνοεί πολλά στοιχεία από την πληροφορία που αφορά το αντικείμενο και μεταφέρεται σε αυτόν μέσω του φωτός. Είναι προφανές ότι κάτω απ' αυτές τις συνθήκες το έργο της αναπαραγωγής της εικόνας που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος όσον αφορά την ομοιότητα με το αρχικό

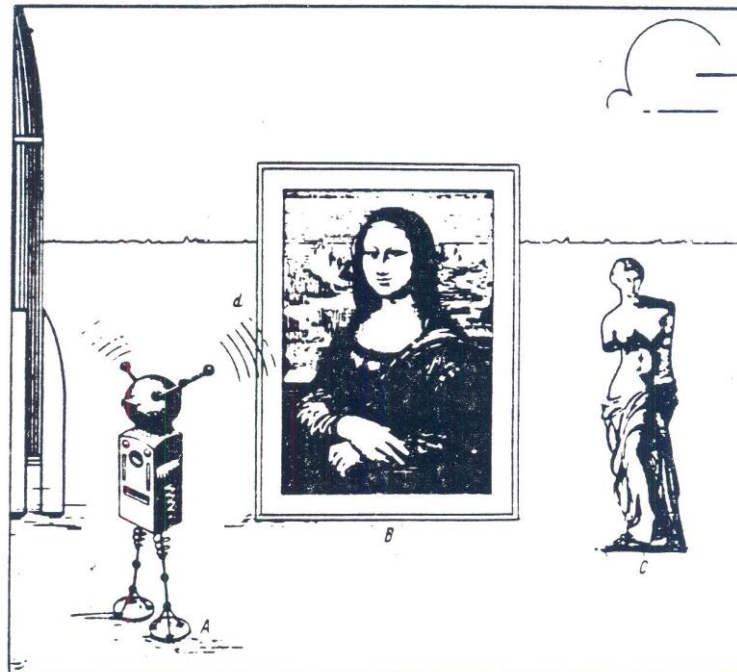
αντικείμενο είναι αναγκαστικά αρκετά απλοποιημένη. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι δεν χρειάζεται να αναπαράγουμε πλήρως την πληροφορία για το αντικείμενο που εμπεριέχεται στο πεδίο που περιβάλλει αυτό το αντικείμενο με σκοπό τη δημιουργία μιας οπτικής αίσθησης. Θεωρείται εντελώς επαρκές να αναπαραχθεί το σχετικά μικρό ποσό της πληροφορίας που μπορεί να καταγραφεί από τον οφθαλμό. Η κατάσταση εν προκειμένω μοιάζει με αυτή όπως στη πορεία της δημιουργίας των προσομοιώσεων του ηλίου που χρησιμοποιούνται για φωτοηλεκτρικές συσκευές. Εάν μία τέτοια συσκευή ανταποκρίνεται στην ορατή μόνο περιοχή του φωτός, ένας καλός σχεδιαστής δεν χρειάζεται να κάνει ένα αντίστοιχο προσομοιωτή που να αναπαράγει το ίδιο καλά την ηλιακή ακτινοβολία στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος.

Η ιδέα της επίπεδης εικόνας που έγινε αντιληπτή από τους αρχαίους προγόνους είναι μία λύση του προβλήματος της δημιουργίας της πιο απλής σχεδίασης ενός προσομοιωτή ικανού να αναπαράγει την εικόνα αντικειμένου στον ανθρώπινο οφθαλμό. Ισχύει χωρίς ποτέ να αναφέρεται πως αυτή η ανακάλυψη έχει ένα καθαρά εμπειρικό χαρακτήρα. Η ολοκληρωμένη μελλοντική δραστηριότητα των καλλιτεχνών που σκοπεύουν στη τελειοποίηση της τεχνικής στη ζωγραφική ήταν επίσης κυρίως εμπειρική. Τελικώς, σαν αποτέλεσμα της ανάπτυξης αυτής της τεχνικής βρέθηκαν οι κανόνες δημιουργίας των ειδώλων στον αμφιβληστροειδή. Αξίζει να σημειωθεί ότι μερικοί από τους σύγχρονους καλλιτέχνες παραμορφώνουν τις εικόνες τους με ένα τέτοιο τρόπο σαν να επιτρέπουν αυτές τις διορθώσεις που πραγματοποιούνται στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Για παράδειγμα αυτοί οι ζωγράφοι μεγεθύνουν τα πολύ μακρινά αντικείμενα έξω από κάθε αναλογία.

Το επόμενο στάδιο στην ανάπτυξη της τεχνικής της επίπεδης εικόνας ήταν η τέχνη της φωτογραφίας. Ο μηχανισμός της δημιουργίας της αίσθησης του αντικειμένου που ενυπάρχει στη φωτογραφία είναι όμοιος με αυτόν του πίνακα ζωγραφικής από τον καλλιτέχνη. Η φωτογραφική επίσης εκτύπωση αναπαράγει στον αμφιβληστροειδή την κατανομή της έντασης του φωτός που θα προσέπιπτε στον αμφιβληστροειδή από το ίδιο, το αρχικό αντικείμενο. Φυσικά είναι ενδιαφέρον να γνωρίζουμε με ποιό τρόπο οι φυσικές αντικειμενικές διαδικασίες στη προετοιμασία της φωτογραφικής εκτύπωσης μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε έναν προσομοιωτή που επηρεάζει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης όρασης τόσο ουσιαστικά. Η απάντηση σε μια τέτοια ερώτηση είναι ιδιαίτερα απλή. Τα χαρακτηριστικά κατασκευής της φωτογραφικής μηχανής είναι όμοια με αυτά του ανθρώπινου οφθαλμού. Ο ρόλος του φακού του οφθαλμού αντιστοιχεί με τον αντικειμενικό φακό της μηχανής ενώ η φωτογραφική πλάκα υποκαθιστά τον αμφιβληστροειδή. Είναι προφανές πως αυτή η ομοιότητα κατασκευής οδηγεί στην ομοιότητα των αποτελεσμάτων καταγραφής. Με άλλα λόγια η φωτογραφική μηχανή καταγράφει ένα μεγάλο μέρος από την πληροφορία που οφείλεται στο αντικείμενο και γίνεται αποδεκτή στον οφθαλμό. Μόνο γι' αυτό το γεγονός, και όχι σαν αποτέλεσμα της "ομοιότητας" η φωτογραφική εικόνα φαίνεται σε εμάς σαν να μοιάζει με το αντικείμενο.

Εφ' όσον η φωτογράφιση μοιάζει με τη διαδικασία που συμβαίνει στον ανθρώπινο οργανισμό αυτή όπως και η τέχνη της ζωγραφικής θα πρέπει, χωρίς καμιά αμφιβολία, να καταχωρηθούν στη κατηγορία των υποκειμενικών μεθόδων. Με σκοπό να αντιληφθούμε το πραγματικό χάσμα που χωρίζει τις υποκειμενικές μεθόδους από τις αντίστοιχες αντικειμενικές, ας φανταστούμε προς στιγμή πως κάποια έργα τέχνης επαφίενται στα χέρια

μερικών εξωγήινων δημιουργημάτων A των οποίων τα αισθητήρια όργανα όρασης είναι θεμελιωδώς διαφορετικά απ' αυτά του ανθρώπου (σχήμα 3). Ας υποθέσουμε ακόμα πως αυτά τα εξωγήινα πλάσματα μπορούν να "δουν" με τη βοήθεια ενός φωτεινού εντοπιστή d που ανιχνεύει το σχήμα των αντικειμένων στο χώρο. Προφανώς τα πλάσματα αυτά δεν μπορούν να αντιληφθούν τα αριστουργήματα της ζωγραφικής B και θα μελετούν για πολύ ώρα άσκοπα τα επίπεδα κομμάτια του καμβά τοποθετημένα σε πλαίσια. Όσον αφορά το γλυπτό C που παριστά την αντικειμενική μέθοδο της εικόνας που αναπαράγεται αυτά τα πλάσματα θα την αποδεχτούν μονομιάς και θα είναι μάλιστα σε θέση να κατανοήσουν τη σωστή αντίληψη επί της εξωτερικής εμφάνισης ενός ανθρώπου που παρατηρεί ένα γλυπτό.



Σχήμα 3. Η διαφορά μεταξύ υποκειμενικής και αντικειμενικής μεθόδου δημιουργίας της οπτικής αντίληψης.

Η συμβατική φωτογραφία είναι αναμφίβολα μια ατελής απεικόνιση των αντικειμένων. Η ατέλειά της γίνεται προφανής ακόμα και όταν πρόκειται για το μηχανισμό σκόπευσης. Είναι εντελώς επαρκές να μεταβάλλουμε το σημείο όρασης ή την προσαρμογή του οφθαλμού για να αντιληφθούμε πως εν προκειμένω έχουμε κάποια προβολή του αντικειμένου στο επίπεδο όχι όμως και το ίδιο το αντικείμενο. Την ίδια στιγμή ένας μπορεί να θεωρήσει την ιδέα της επίπεδης καταγραφής του αντικειμένου το οποίο μπορεί να μοιάζει με το σωστά φωτισμένο είδωλο ανεξάρτητη από τον αποδέκτη. Το είδωλο αυτό θα εμφανίζεται πλήρως ταυτόσημο με το πρωτότυπο για κάθε μέθοδο αποδοχής της φωτεινής εικόνας.

Πραγματικά εάν αναλογιστούμε πως η πλήρης πληροφορία που δεχόμαστε από το φως εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του Η.Μ. πεδίου, τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι εάν ήταν δυνατόν να καταγράψουμε και μετά να αναδημιουργήσουμε αυτό το πεδίο με όλες του τις λεπτομέρειες, ο οφθαλμός ή κάθε συσκευή παρατήρησης δεν θα ήταν σε θέση να διακρίνει ένα τέτοιο δημιουργηθέν πεδίο από το πραγματικό πεδίο που διασκορπίζεται από το αντικείμενο. Το πεδίο αυτό μπορεί να καταγράψει την ύπαρξη της εικόνας που δημιουργεί η πλήρης απεικόνιση της αρχικής παρουσίας του αντικειμένου. Ο μηχανισμός

σαρώνει συγκεκριμένη επιφάνεια P κατά μήκος ζιγκ-ζαγκ διαδρομής e καταμετρώντας το πεδίο στην επιφάνεια που ήδη μνημονεύτηκε. Οι καταγραφές της ακίδας καταχωρούνται στη μονάδα μνήμης M .

Γνωρίζοντας τους νόμους διάδοσης του πεδίου είναι υποθετικά δυνατόν να υπολογίσουμε συγκεκριμένες παραμέτρους του αντικειμένου με βάση τις ενδείξεις της ακίδας. Ο παρατηρητής h επίσης καταγράφει το $H.M.$ πεδίο και ο εγκέφαλός του έχει δεσμευτεί στο να εκτελέσει συγκεκριμένες λειτουργίες. Εν τούτοις ο εγκέφαλος είναι ένα περισσότερο εξειδικευμένο εργαλείο από κάθε υπολογιστική συσκευή, δεν χρειάζεται να αναφέρει τις ενδιάμεσες λειτουργίες στον κάτοχό του αλλά αποφέρει σ' αυτόν τα τελικά αποτελέσματα με ένα απλό και προφανή τρόπο. Ο παρατηρητής απλά "βλέπει" το αντικείμενο και αυτό γίνεται με ένα τέτοιο τρόπο που είναι συνεπές με τη πραγματική παρουσία αυτού του αντικειμένου.

Ας αναφερθούμε τώρα στη φύση του "γεγονότος της παρουσίας" με περισσότερη λεπτομέρεια. Η αυστηρή αντιμετώπιση περιέχει πολλά γεγονότα. Ένα από τα πιο γοητευτικά είναι το γεγονός της προοπτικής. Όταν ο παρατηρητής είναι στο σημείο h μπορεί να δει τη κούκλα και το σαμοβάρι μόνο, ενώ δεν βλέπει τη σκούπα που βρίσκεται κρυμμένη πίσω από τη κούκλα. Με σκοπό να δει τη σκούπα ο παρατηρητής θα πρέπει να μετακινηθεί από το σημείο h στο σημείο h_1 και να δει έτσι πίσω από τη κούκλα. Η εξήγηση για μια τέτοια θεώρηση πίσω από το αντικείμενο είναι αρκετά απλή. Η δομή του πεδίου στα σημεία h και h_1 είναι διαφορετική οφειλόμενη στο γεγονός ότι στο νέο σημείο υπάρχει επιπλέον φως που οφείλεται στη σκούπα. Είναι προφανές λοιπόν ότι οι κάπως διαφορετικές εικόνες (εν προκειμένω οι εικόνες της κούκλας με τη σκούπα και χωρίς αυτήν) θα αντιστοιχούν σε διαφορετικά $H.M.$ πεδία.

Ένας παρόμοιος μηχανισμός δημιουργεί το γεγονός της στερεοσκοπικής όρασης ο οποίος και δημιουργεί την εντύπωση της τρισδιάστατης εικόνας. Όταν ο παρατηρητής βλέπει το αντικείμενο και με τους δύο οφθαλμούς ταυτόχρονα, καταγράφει διαφορετικά $H.M.$ πεδία σε δύο διαφορετικά σημεία και βλέπει κάπως αντίστοιχες διαφορετικές εικόνες. Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται κατάλληλα αυτές τις διαφορές και εξάγει την πληροφορία περί της σχετικής απόστασης των αντικειμένων από τον παρατηρητή.

Τελικά η σκηνή που παρατηρείται γίνεται αρκετά περισσότερο παραστατική από το παιχνίδισμα των πολύ λαμπερών σημείων. Στη περίπτωση του σχήματος 4 το παιχνίδισμα αυτό συνίσταται στη μετακίνηση των σημείων αυτών πάνω στην λαμπερή επιφάνεια του σαμοβάρι τη στιγμή που ο παρατηρητής κινείται από το σημείο h στο σημείο h_1 . Αυτό το γεγονός δικαιολογείται επίσης από τη διαφορά στη δομή των $H.M.$ πεδίων στα αντίστοιχα σημεία h και h_1 .

Ο συνδυασμός του φαινομένου της προοπτικής, η τρισδιάστατη εμφάνιση και το παιχνίδι των λαμπερών σημείων συνιστά το αποκαλούμενο "γεγονός παρουσίας" δηλαδή ο παρατηρητής πιστεύει πραγματικά ότι αντικρίζει τα πρωτότυπα αντικείμενα.

Τώρα ας υποθέσουμε ότι η τιμή του κυματικού πεδίου του φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο καταγράφεται με κάθε λεπτομέρεια σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο F έστω με κάποια μέθοδο. Ας υποθέσουμε ακόμα ότι η καταγραφή H που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο

αυτή αναπαράγει τις τιμές του πεδίου ξεκινώντας από το επίπεδο καταγραφής και εξωτερικώς στη διεύθυνση της διάδοσης του φωτός (σχήμα 4β). Σαν αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το πεδίο του αντικειμένου O (κύματα W_1, W_2, W_3) να αναδημιουργείται στη πλήρη τρισδιάστατη μορφή του στα αριστερά της επιφάνειας καταγραφής H . Το αρχικό αντικείμενο απουσιάζει σ' αυτή την περίπτωση.

Η ομοιότητα μεταξύ του αληθινού πεδίου που δημιουργεί το αντικείμενο και του πεδίου που δημιουργείται με τη βοήθεια της καταγραφής H θα προκαλέσει την ίδια ακριβώς αίσθηση στο παρατηρητή. Λόγω του ότι ο παρατηρητής h' βρίσκεται μπροστά από τη καταγραφή H επηρεάζεται από το ίδιο πεδίο όπως και ο παρατηρητής h όταν βρισκόταν μπροστά από το πραγματικό αντικείμενο. Έτσι ο παρατηρητής h' θα "δει" ακριβώς την ίδια εικόνα της κούκλας η οποία είχε ειπωθεί από τον παρατηρητή h (ο οποίος και είδε την πραγματική κούκλα). Κάθε προσπάθεια να διαφοροποιηθεί αυτή η εικόνα από την αληθινή εικόνα του αντικειμένου μετακινώντας το σημείο παρατήρησης προς το σημείο h_1 , είναι αποτυχημένη. Στο νέο σημείο παρατήρησης το πεδίο θα καταγραφεί πλήρως ταυτισμένο με το πεδίο που δημιουργείται αντίστοιχα από το αντικείμενο σ' αυτό το σημείο. Όπως προαναφέρθηκε η εικόνα της κούκλας με την μερικώς κρυμμένη σκούπα αντιστοιχεί στο πεδίο του αντικειμένου στο σημείο h_1 αυτό εξηγεί το πώς ο παρατηρητής εντυπωσιάζεται με το να βλέπει "πίσω" από μια κούκλα η οποία ουσιαστικά δεν είναι παρούσα.

Ταυτόχρονα με τα φαινόμενα της προοπτικής που λαμβάνουν χώρα κατά τις μετακινήσεις των σημείων παρατήρησης, επίσης αναπαράγεται το παιχνίδισμα των λαμπερών σημείων στην επιφάνεια του σαμοβάρι. Οφειλόμενο στη ταυτόχρονη αναπαραγωγή του πεδίου μπροστά από τους οφθαλμούς του παρατηρητή, δημιουργούνται στερεοσκοπικά γεγονότα και ο παρατηρητής θα έχει την εντύπωση ότι η σκηνή που παρακολουθεί είναι τριών διαστάσεων. Ο παρατηρητής που μελετά αυτή τη "φωτογραφία" θα αναλύσει αυτές τις εντυπώσεις και θα καταγράψει την παρουσία της καινούργιας εικόνας O' που είναι απόλυτα ταυτόσημη με το πρωτότυπο.

Η διάδοση του φωτός στο χώρο είναι πέρα από κάθε αμφιβολία μια αντικειμενικά φυσική διαδικασία και έτσι η μέθοδος της αναπαραγωγής εικόνας με την προσομοίωση του πεδίου είναι επίσης αντικειμενική. Για παράδειγμα εφ' όσον η καταγραφή H δημιουργεί επακριβώς το πεδίο, τα αποτελέσματα της καταγραφής και των δύο πεδίων πρέπει να είναι ταυτόσημα είτε παρατηρούνται μέσω του οφθαλμού είτε μετρούμενα μέσω μετρητικών οργάνων όπως η ακίδα Z που διασαφηνίζεται στο σχήμα 4β. Με τη σάρωση του πεδίου που δημιουργείται από τη καταγραφή H η ακίδα θα καταγράψει την ίδια σειρά σημάτων με αυτή που προέρχεται από το απ' ευθείας πεδίο που οφείλεται στο αντικείμενο O . Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτών των μετρήσεων είναι δυνατόν να καθοριστούν με μεγάλη ακρίβεια και οι μικρότερες λεπτομέρειες της δομής του αντικειμένου που όμως απουσιάζει.

Για πολλές τεχνικές εφαρμογές αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, από τη δημιουργία της παρουσίας του αντικειμένου στον ανθρώπινο εγκέφαλο έως την ακρίβεια και την αντικειμενικότητα της πληροφορίας που απαιτεί η σύγχρονη μηχανολογία.

Έτσι η ακριβής αναπαραγωγή του $H.M.$ πεδίου που ανακλάται από ένα αντικείμενο οδηγεί σε μια επαναδημιουργία της εικόνας του αντικειμένου που φαίνεται να είναι όμοια με το

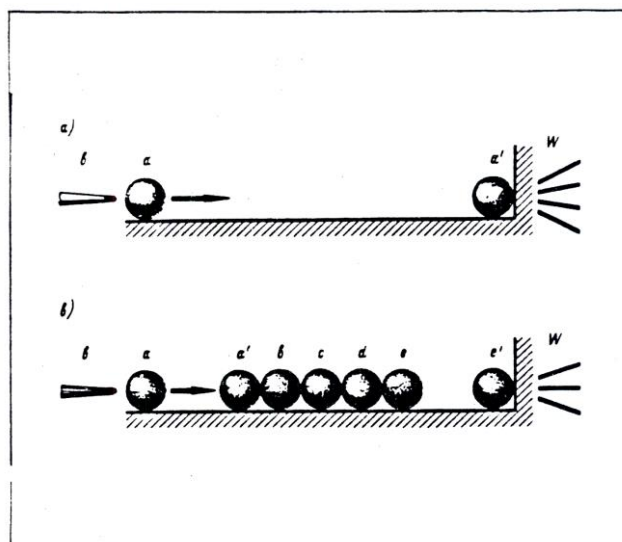
αντικείμενο όχι μόνο για τον οφθαλμό αλλά και για κάθε άλλη συσκευή που επιτυγχάνει πληροφορία μέσω της καταγραφής των πεδίων.

Η μέχρι τώρα περιγραφείσα κατάσταση δεν θα πρέπει καθόλου να θεωρείται μία ακαδημαϊκού χαρακτήρα προσέγγιση. Το ολόγραμμα είναι μια καινοτομία στην επιστήμη της σύγχρονης οπτικής, δημιουργεί την αίσθηση της παρουσίας ενός αντικειμένου αξιοποιώντας βασικές αρχές. Με σκοπό την κατανόηση του ειδικού μηχανισμού της καταγραφής ενός ολογράμματος και την επαναδημιουργία Η.Μ. πεδίων είναι αναγκαίο να εξοικειωθούμε με μερικούς βασικούς κανόνες στη διάδοση του φωτός.

2. Στοιχεία από τη κυματική θεωρία του φωτός

Αξιωματικά η δυνατότητα αναπαραγωγής του πεδίου φωτός που διασκορπίζεται από ένα αντικείμενο προέρχεται από τη μελέτη του Δανού Christian Huygens με τίτλο "Traite de la Lumiere" που δημοσιεύτηκε το 1690. Αντίθετα από τον Newton που υπέθεσε ότι το φως μεταφέρεται από σωματίδια που κινούνται στο κενό χώρο, ο Huygens υπεστήριξε ότι το φως είναι μία διαταραχή που διαδίδεται μέσω ενός συγκεκριμένου ενδιάμεσου μέσου που ονόμασε αιθέρα. Αν και η υπόθεση αυτή του Huygens είναι γνωστή σαν "κυματική θεωρία του φωτός" ο ίδιος ο Huygens ποτέ δεν χρησιμοποίησε άμεσα την έννοια του κύματος. Η ουσία της ιδέας του, και η διαφορά της από την σωματιδιακή θεωρία του φωτός του Newton μπορεί να περιγράψει από το παρακάτω παράδειγμα (σχήμα 5).

Σύμφωνα με τη σωματιδιακή θεωρία του Newton, το σωματίδιο που μεταφέρει το φως από τη πηγή προς ένα παρατηρητή συμπεριφέρεται όπως η σφαίρα α μπιλιάρδου, η οποία κάτω από τη δράση της πηγής μεταβιβάζει ώθηση από τη στέκα β καθώς κινείται από τη θέση α στη θέση α' προς τον τοίχο W στον οποίο και μεταφέρει τον παλμό της (σχήμα 5α).

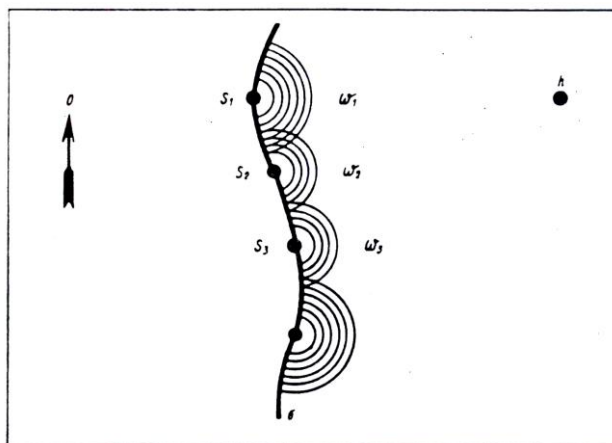


Σχήμα 5. Συγκριτικό παράδειγμα συμπεριφοράς για τη σωματιδιακή και κυματική θεωρία διάδοσης του φωτός.

Σύμφωνα με τη κυματική θεωρία του Huygens, η πορεία μετάδοσης του φωτός από τη πηγή προς το δέκτη - παρατηρητή είναι όμοια όμως λίγο περισσότερο σύνθετη όπως στην ασυνήθιστη κατάσταση του σχήματος 5β. Εδώ η αρχική σφαίρα α μεταφέρει τον παλμό στη σφαίρα β και ακινητοποιείται στη θέση α'. Η σφαίρα β με τη σειρά της μεταφέρει το παλμό στη σφαίρα γ κ.ο.κ. Τελικά, στο τέλος αυτής της διαδικασίας όλες οι σφαίρες καθίστανται ακίνητες με εξαίρεση την τελευταία ε που αναπηδά από τη σειρά των σφαιρών με την ταχύτητα της πρώτης σφαίρας α και γίνεται αποδεκτή από τον τοίχο W.

Ανεξάρτητα από το γεγονός πως το τελικό αποτέλεσμα και των δύο διαδικασιών που μνημονεύτηκαν είναι εκ ταυτότητας το ίδιο, η σωματιδιακή και η κυματική φύση των μηχανισμών μεταφοράς της διαταραχής μέσω του χώρου είναι ουσιαστικά διαφορετική. Εκείνο που είναι επίσης σημαντικό είναι ότι προφανώς οι πιθανές τους συνέπειες θα είναι διαφορετικές. Πραγματικά, δεν είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς πως η σωματιδιακή θεωρία διατείνεται πως ο παλμός μεταφέρεται από ένα κινούμενο σωματίδιο ενώ σύμφωνα με τη κυματική θεωρία τα σωματίδια δεν κινούνται αλλά μόνο η ενέργεια μεταδίδεται. Εντούτοις για τη συγκεκριμένη περίπτωση της πλήρους κυματικής θεωρίας θεωρείται σημαντικό πως η διαταραχή που αντιστοιχεί στο φως μεταφέρεται μέσω στοιχείων του χώρου σαν να υπήρχαν συγκεκριμένοι ενδιάμεσοι δεσμοί. Στο παράδειγμα του σχήματος 5β οι σφαίρες β, γ και δ παίζουν το ρόλο αυτών των δεσμών. Ο ρόλος τέτοιων δεσμών στο τρισδιάστατο χώρο πραγματοποιείται από τις επιφάνειες δύο διαστάσεων που μεταφέρουν το πεδίο φωτός.

Έτσι η διαδικασία διάδοσης του πεδίου στο χώρο μοιάζει με τη πορεία που ήδη αναφέρθηκε όπου η πληροφορία της εικόνας μεταφέρεται διαδοχικά μέσω αλυσίδας που συνίσταται από τους εξής διαδοχικούς κρίκους: Από το αντικείμενο προς το πεδίο φωτός, από το πεδίο φωτός στον αμφιβληστροειδή, από τον αμφιβληστροειδή στον εγκέφαλο. Ήδη αναφέρθηκε ότι το γεγονός, της ύπαρξης επιτυχίας στη μετάδοση εικόνας επιβεβαιώνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής της εικόνας μέσω προσομοίωσης των σημάτων που αντιστοιχούν στην εικόνα σε μια από τους κρίκους της παραπάνω αλυσίδας. Δεν θα πρέπει να εκπλήσσει πώς η ίδια ιδέα οφείλεται στον Christian Huygens 300 χρόνια πριν όπου ο Δανός επιστήμονας την εφάρμοσε αποκλειστικά στη κυματική θεωρία. Η ουσία αυτής της ιδέας που είναι γνωστή σήμερα σαν "Η αρχή Huygens" διατυπώνεται ως εξής: Το πεδίο φωτός σε κάθε σημείο του χώρου (για παράδειγμα η τιμή του πεδίου που οφείλεται στο αντικείμενο Ο στο σημείο h) μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα άθροισμα δράσεων, από δευτερογενείς πηγές S₁, S₂, S₃,... που βρίσκονται σε κάθε τυχαία επιφάνεια σ και εκπέμπουν με ένταση ανάλογη της τιμής του πλάτους του κυρίως κύματος σ' αυτή την επιφάνεια (σχήμα 6).



Σχήμα 6. Η αρχή του Huygens στη δημιουργία μετώπων κύματος στο χώρο.

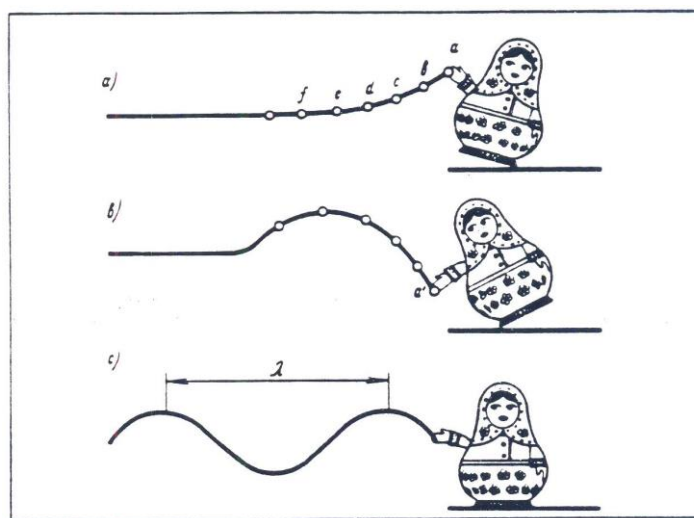
Πράγματι! το αξίωμα του Huygens υποδηλώνει άμεσα τη βασική ιδέα της ολογραφίας. Το άμεσο συμπέρασμα αυτού του αξιώματος είναι ότι εάν οι τιμές του πεδίου αναπαράγονται σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια (δηλαδή σε έναν από τους κρίκους της αλυσίδας μέσω της οποίας το πεδίο διαδίδεται) τότε αυτό το πεδίο θα αναπαράγεται σε όλο τον υπόλοιπο τρισδιάστατο χώρο (δηλαδή σε όλους τους υπολειπόμενους κρίκους). Για το παράδειγμα του σχήματος 6 το πεδίο του αντικειμένου O αναπαράγεται στην επιφάνεια σ . Αυτό το πεδίο διατηρεί την δυνατότητα αναπαραγωγής του στη διεύθυνση της διάδοσης του φωτός στο πλήρη τρισδιάστατο χώρο δηλαδή και δεξιότερα της επιφάνειας σ .

Ο περιορισμός του προβλήματος της αναπαραγωγής ενός πεδίου που οφείλεται σε τρισδιάστατο αντικείμενο στο χώρο στην αναπαραγωγή των τιμών αυτού του πεδίου σε κάποια επιφάνεια απλοποιεί τη κατάσταση ουσιαστικά. Εν τούτοις ακόμη και η αναπαραγωγή των πεδίων επιφάνειας αποδείχτηκε ό-, τι είναι μια αληθινά σύνθετη διαδικασία. Στη γενική περίπτωση το πρόβλημα δεν έχει ακόμη λυθεί πλήρως μέχρι σήμερα. Δηλαδή, δεν γνωρίζουμε ακόμη μεθόδους που θα μπορούσαν να αναπαράγουν επακριβώς το πεδίο του ηλιακού φωτός που διασκορπίζεται από διάφορα αντικείμενα στη φύση. Και αυτό είναι δύσκολο κατανοήσιμο. Το φυσικό φως περιέχει ένα γιγαντιαίο ποσό πληροφορίας από γεγονότα που συμβαίνουν στον Ήλιο και ταυτόχρονα γεγονότα που συμβαίνουν στην επιφάνεια των αντικειμένων που διασκορπίζουν αυτό το φως. Η σύγχρονη φυσική μπορεί να καταγράψει το πεδίο φωτός αποκλειστικά και μόνο στη περίπτωση όπου το φως αυτό εκπέμπεται από μια σταθερή πηγή και έτσι δεν μεταφέρει χρονικά εξαρτώμενη πληροφορία, και όταν επίσης αυτό το φως έχει ανακλαστεί από "παγωμένα" αντικείμενα των οποίων η επιφάνεια δεν υφίσταται καμία απολύτως μεταβολή.

Οι μονότονες, χρονικά αμετάβλητες περιοδικές ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων που ακτινοβολούν αντιστοιχούν στην απουσία μεταβολών στη πηγή που ακτινοβολεί. Αυτή η πηγή είναι γνωστή σαν μονοχρωματική πηγή και είναι σε θέση να εκπέμπει αυτά τα καθαρά κύματα χωρίς τη βοήθεια των οποίων ο Huygens επινόησε τη κυματική θεωρία του φωτός. Ας περιγράψουμε τη διαδικασία σχηματισμού κύματος σ' ένα παράδειγμα όπου κύματα διαδίδονται κατά μήκος σχοιניού του οποίου όμως το ένα άκρο είναι δεμένο στη προαναφερθείσα κούκλα (σχήμα 7). Όταν η κούκλα ανυψώνει το άκρο α του σχοινιού, αυτό

το άκρο κάνει και το τμήμα β του σχοινοῦ να το ακολουθήσει. Με τη σειρά του το τμήμα β του σχοινοῦ κάνει το τμήμα c να ακολουθήσει το ίδιο και ούτω καθ' εξής (σχήμα 7α). Σ' αυτή τη διαδικασία η φάση κίνησης για κάθε επόμενο τμήμα του σχοινοῦ καθυστερεί σε σχέση με το προηγούμενο, διότι η διαταραχή διαδίδεται κατά μήκος του σχοινοῦ με πεπερασμένη ταχύτητα. Σαν ένα αποτέλεσμα αυτής της καθυστέρησης η παρακάτω διαδικασία λαμβάνει χώρα: όταν η κούκλα χαμηλώνει το άκρο του σχοινοῦ α στη νέα θέση α', τα απομακρυσμένα τμήματα του σχοινοῦ d, e και f θα συνεχίζουν την προς τα πάνω κίνηση λόγω αδράνειας, ενώ τα τμήματα του σχοινοῦ β και c που γειτονεύουν με το α αρχίζουν ήδη την προς τα κάτω κίνηση. Έτσι δημιουργήθηκε ένα συγκεκριμένο κύμα που ταξιδεύει κατά μήκος του σχοινοῦ (σχήμα 7β). Εάν η κούκλα διατηρήσει μονότονα την κίνηση του σχοινοῦ – γίνει έτσι μια σύμφωνη πηγή - το σχοινί θα πάρει το σχήμα ενός συστήματος από λόφους και κοιλίες που ταξιδεύουν και είναι άπειροι αριθμητικά. Οι λόφοι και οι κοιλίες αρχίζουν να κινούνται σε συμφωνία με το χέρι της κούκλας. Έτσι προσδιορίστηκε ένα στάσιμο κύμα. Η ακτινοβολία που διαδίδεται με τη βοήθεια ενός τέτοιου κύματος λέγεται μονοχρωματική. Βασικό στοιχείο που χαρακτηρίζει μια μονοχρωματική ακτινοβολία είναι το μήκος κύματος λ δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών λόφων.

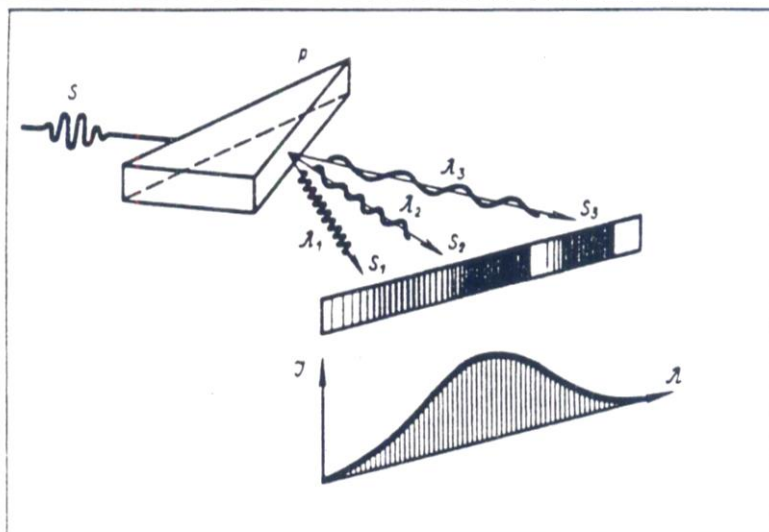
Απόλυτα, αυστηρά μονοχρωματικό φως - από ορισμού - δεν υπάρχει στη φύση διότι όπως προαναφέρθηκε, διάφορα γεγονότα αναμειγνύονται με το σταθερό υπόδειγμα ταλαντώσεων της πηγής που ακτινοβολεί. Παρ' όλα αυτά οι μαθηματικοί είναι γνώστες των μετασχηματισμών Fourier. Σύμφωνα με αυτούς κάθε συνάρτηση μπορεί να παρουσιάσει αρμονικές σε ανάπτυγμα. Το φως μπορεί να συμπεριφερθεί παρόμοια, δηλαδή είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί η όποια τυχαία ταλάντωση του πεδίου σαν ένα άθροισμα των επιμέρους μονοχρωματικών συνιστωσών. Η εξάρτηση της έντασης κάθε μιας αρμονικής σε σχέση με το μήκος κύματος καλείται φάσμα εκπομπής.



Σχήμα 7. Μηχανικό ανάλογο δημιουργίας διαταραχής, ημιτονοειδούς μονοχρωματικής κύμανσης.

Η ανάπτυξη των ταλαντώσεων του πεδίου σε αρμονικές συνιστώσες δεν είναι με καμιά έννοια μια απλή μαθηματική αφαίρεση αλλά συμμορφώνεται με την ουσία των φυσικών διαδικασιών που συμβαίνουν στο κυματικό πεδίο. Ο Newton ήταν ο πρώτος που πραγματοποίησε το πείραμα αποσύνθεσης της ορατής λευκής ακτινοβολίας σε φάσμα το

1666, βιβλιογραφία "Καινούργια θεωρία περί φωτός και χρωμάτων". Η γενική σχηματική παρουσίαση του πειράματος Newton είναι γνωστή (σχήμα 8). Η ακτινοβολία λευκού φωτός S που χαρακτηρίζεται από ένα καθορισμένο σύνολο ταλαντώσεων του κυματικού πεδίου προσπίπτει στο γυάλινο πρίσμα P . Το πρίσμα έχει την ιδιότητα να αναλύει - στην ουσία να διαθλά - διαφορετικά τις διαφορετικές μονοχρωματικές συνιστώσες. Σαν αποτέλεσμα η λευκή ακτινοβολία αναλύθηκε σε μια γνήσια βεντάλια από έγχρωμες ακτινοβολίες S_1, S_2, S_3, \dots που αντιστοιχούν στις σχεδόν μονοχρωματικές συνιστώσες με διαφορετικά μήκη κύματος $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$



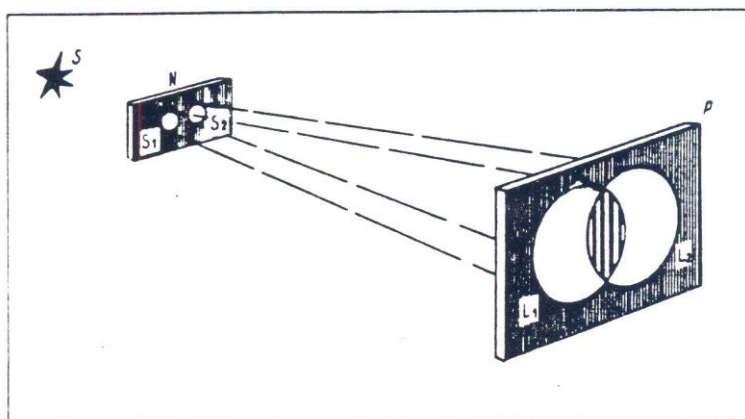
Σχήμα 8. Πείραμα Newton ανάλυσης του φωτός σε μονοχρωματικές συνιστώσες με τη βοήθεια του πρίσματος P .

Αυτές οι ακτίνες διαδίδονται σε διαφορετικές διευθύνσεις που σχηματίζουν ένα φωτεινό πρότυπο του φάσματος ακτινοβολίας της φωτεινής πηγής S . Στο κάτω μέρος του προηγούμενου σχήματος παρουσιάζεται το μαθηματικό φάσμα ζωγραφισμένο με βάση αυτά τα δεδομένα δηλαδή η γραφική εξάρτηση της κατανομής της έντασης των μονοχρωματικών συνιστωσών J σε σχέση με το μήκος κύματος λ .

Έχοντας αναλύσει το λευκό φως σε έγχρωμο φάσμα, ο Newton πραγματικά συνέλαβε την μονοχρωματική ακτινοβολία στην αγνή μορφή της για πρώτη φορά στην ιστορία (την οποία και αποκάλεσε ο ίδιος σαν ενιαία-απλή ακτινοβολία). Έχοντας συμπληρώσει αυτά τα πειράματα κατέληξε πως αν και το φως διαδίδεται μέσω σωματίων η διαδικασία της διάδοσης συσχετίζεται επίσης με ένα συγκεκριμένο κύμα. Η πιο συγκεκριμένη υπόθεση συσχετισμού του μονοχρωματικού φωτός με κύμα εκφράστηκε από τον Leonhard Euler (1754). Εν συνεχεία ο Thomas Young επέκτεινε την πορεία αυτή. Στη πορεία της ανάπτυξης μιας τέτοιας υπόθεσης ο Young ανακάλυψε ένα από τα βασικά ζητήματα: την ύπαρξη του φαινομένου της συμβολής με το φως (1807). Καθώς σ' αυτό το φαινόμενο - μαζί με το Αξίωμα του Huygens - είναι θεμελιακά βασισμένη η ολογραφία, θα αναφερθεί το πείραμα του Young με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Η διάταξη του πειράματος Young που αποδεικνύει την δυνατότητα της συμβολής των φωτεινών κυμάτων ήταν πολύ απλή (σχήμα 9). Μια πηγή μονοχρωματικού φωτός S φωτίζει

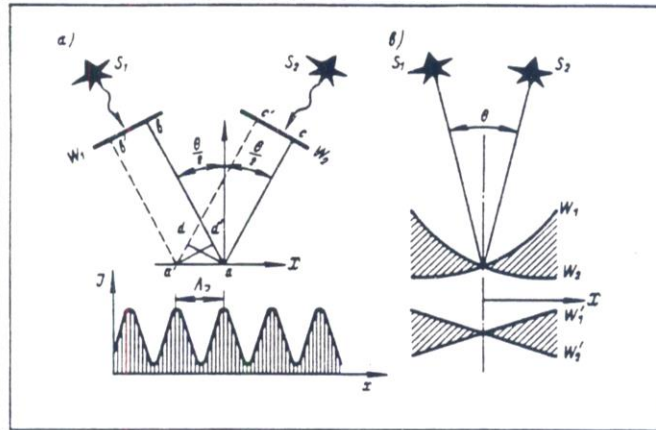
αδιαφανές πέτασμα N που φέρει δύο ανοίγματα S_1 και S_2 που παίζουν το ρόλο δευτερογενών πηγών. Η πηγή S_1 , δρα ανεξάρτητα, δημιουργώντας ομοιόμορφα φωτισμένο κύκλο L_1 στο λευκό πέτασμα P.



Σχήμα 9. Πείραμα συμβολής Young του μονοχρωματικού φωτός της πηγής S.

Όμοια η πηγή S_2 δημιουργεί το κύκλο L_2 . Εν τούτοις όταν και οι δύο πηγές φωτίζουν ταυτόχρονα το πέτασμα ένα αρκετά απροσδόκητο φαινόμενο λαμβάνει χώρα: η περιοχή όπου οι κύκλοι L_1 και L_2 έχουν επικάλυψη ο ένας με τον άλλο εμφανίζεται διαγραμματισμένη από ένα σύστημα μαύρων λουρίδων δηλαδή φως εξαφανίζει φως. Αυτό το γοητευτικό φαινόμενο εύκολα εξηγείται εάν κάποιος επικαλεστεί το γεγονός πως το φως διαδίδεται με τη βοήθεια κυμάτων. Εκείνο λοιπόν που συμβαίνει είναι πως οι αποστάσεις που χωρίζουν τις σκοτεινές περιοχές του πετάσματος από τις πηγές S_1 και S_2 είναι τέτοιες ώστε το φως απ' αυτές τις πηγές φθάνει στο πέτασμα πάντα με αντίθετη φάση. Δηλαδή ο λόφος της κύμανσης που προέρχεται από τη πηγή S_1 συμπίπτει με τη κοιλία της κύμανσης από τη πηγή S_2 και αντίστροφα, φυσικά αυτές οι δύο ίσες και αμοιβαία αντίθετες απομακρύνσεις αλληλοεξουδετερώνονται και έτσι το φως απουσιάζει πάντοτε σ' αυτές τις περιοχές. Στις φωτισμένες περιοχές του πετάσματος τα κύματα που προέρχονται από τις πηγές S_1 και S_2 πάντα φθάνουν εν φάση. Έτσι σ' αυτή τη περίπτωση ο λόφος της κύμανσης από την πηγή S_1 συμπίπτει πάντα με τον λόφο της κύμανσης από τη πηγή S_2 . Αποτέλεσμα είναι οι ταλαντώσεις του πεδίου σ' αυτά τα σημεία να αυξάνουν την έντασή τους.

Αυτή η πορεία εφαρμοσμένη όμως στη περίπτωση της συμβολής επίπεδου κύματος εξηγείται με κάποια λεπτομέρεια στο σχήμα 10α. Γενικά, τα μέτωπα κύματος από μια σημειακή πηγή, δηλαδή οι επιφάνειες όπου οι ταλαντώσεις του πεδίου χαρακτηρίζονται από την ίδια φάση παριστάνουν σφαίρες των οποίων τα κέντρα καμπυλότητας βρίσκονται στο σημείο της πηγής.



Σχήμα 10. Γωνιακοί συσχετισμοί στη συμβολή δύο μετώπων κύματος.

Η περίπτωση των επιπέδων κυμάτων αντιστοιχεί σε πηγές που απέχουν πάρα πολύ μακριά, έτσι η ακτίνα καμπυλότητας της σφαίρας γίνεται άπειρα μεγάλη. Δύο τέτοια μέτωπα κύματος που προέρχονται από τις πηγές S_1 και S_2 και απέχουν άπειρη απόσταση συμβολίζονται στο σχήμα με τα γράμματα W_1 και W_2 .

Εάν υποθέσουμε πως οι αποστάσεις των διακεκριμένων πηγών S_1 και S_2 από τα μέτωπα κύματος W_1 και W_2 που αντιστοιχούν σ' αυτές τις πηγές είναι ίσες, τότε γίνεται προφανές ότι τα συμβαλλόμενα κύματα φθάνουν με την ίδια φάση στο σημείο a που ισαπέχει των μετώπων W_1 και W_2 . Εν προκειμένω δηλαδή οι λόφοι και οι κοιλίες αμφοτέρων των κυμάνσεων φθάνουν την ίδια χρονική στιγμή. Το πλάτος της ταλάντωσης του πεδίου από κορυφή σε κορυφή σ' αυτό το σημείο πρέπει να είναι μέγιστο. Ας αναφέρουμε τώρα τις συνθήκες άθροισης των ταλαντώσεων σε ένα συγκεκριμένο γειτονικό σημείο a' . Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς πως οι αποστάσεις που χωρίζουν αυτό το σημείο από τα μέτωπα κύματος W_1 και W_2 έχουν αλλάξει σε σύγκριση με τη προηγούμενη περίπτωση. Φέρνοντας τις καθέτους από τα σημεία a και a' στις ευθείες γραμμές $a'c'$ και ab βρίσκουμε πόας η απόσταση μεταξύ του σημείου a' και του W_1 , έχει ελαττωθεί κατά τον παράγοντα $ad' = aa' \sin \theta/2$ ενώ η απόσταση μέχρι το μέτωπο W_2 έχει αυξηθεί κατά την τιμή $a'd = ad'$. Συνολικά λοιπόν η διαφορά δρόμων από τις πηγές S_1 και S_2 στο σημείο όπου μελετάται η συμβολή θα μεταβληθεί κατά την τιμή:

$$\delta = 2aa' \cdot \sin \theta/2 \quad (1)$$

Εάν η μετατόπιση aa' είναι τέτοια ώστε η διαφορά δρόμων δ γίνει ίση με $\lambda/2$ είναι προφανές ότι οι ταλαντώσεις των πηγών S_1 και S_2 θα φθάνουν επίσης στο σημείο μετατοπισμένες κατά $\lambda/2$ δηλαδή θα βρίσκονται σε αντίθετη φάση. Έτσι οι λόφοι των κυμάτων W_1 , θα ταυτίζονται με τις κοιλίες των W_2 με αποτέλεσμα τα κύματα να αλληλοεξουδετερώνονται. Η ένταση του φωτός στο συγκεκριμένο σημείο θα είναι μηδέν. Εάν η μετατόπιση είναι τέτοια ώστε η διαφορά δρόμων είναι ίση με ένα μήκος κύματος τότε τα κύματα θα φθάνουν εν φάσει σ' αυτό το σημείο και έτσι το πλάτος της ταλάντωσης θα γίνει πάλι μέγιστο.

Με αυτή τη μέθοδο ας εξετάσουμε διαδοχικά όλα τα σημεία που βρίσκονται στον άξονα x που είναι κάθετος στη διχοτόμο της γωνίας θ . Θα προσδιορίσουμε σ' αυτή τη περίπτωση τη

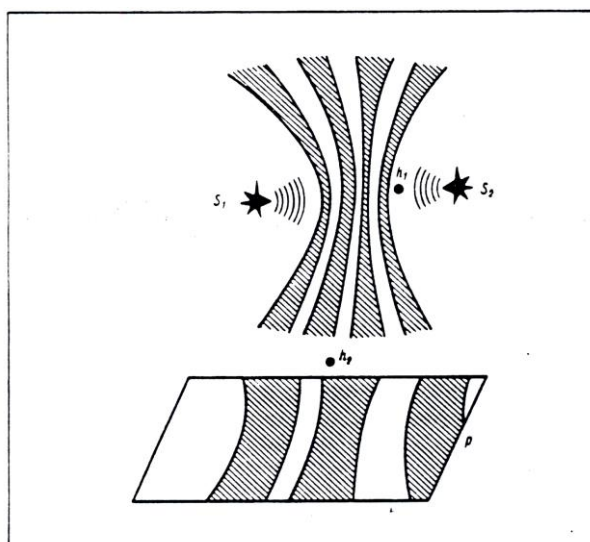
κατανομή της έντασης του διαγράμματος συμβολής των πηγών S_1 και S_2 (κάτω τμήμα του σχήματος 10). Η βασική παράμετρος του διαγράμματος συμβολής είναι η περίοδος Λ δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών έντασης. Με σκοπό να υπολογιστεί αυτή η τιμή είναι αρκετό να εξισώσουμε τη διαφορά των οπτικών δρόμων δ της σχέσεως (1) με το μήκος κύματος λ . Αντικαθιστώντας στην (1) το δ με λ και προσδιορίζοντας την τιμή της χωρικής περιόδου Λ (δηλαδή θεωρώντας πως $\alpha\alpha'=\Lambda$) θα καταλήξουμε πως στη περίπτωση της συμβολής των δύο επιπέδων κυμάτων η χωρική περίοδος του διαγράμματος συμβολής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda=2 \Lambda \sin \theta / 2 \quad (2)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ των συμβαλλομένων κυμάτων. Όταν οι συμβαλλόμενες πηγές απέχουν πεπερασμένη απόσταση όπως στη περίπτωση του πειράματος Young η κατανομή έντασης του διαγράμματος συμβολής είναι πιο σύνθετο χαρακτήρα. Εν τούτοις σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί σαν μία αρμονική της οποίας η χωρική περίοδος προσδιορίζεται από τη σχέση (2). Η αιτία ενός τέτοιου ισχυρισμού συνίσταται στο εξής γεγονός: Το πάχος της "σφήνας" που προσδιορίζεται μεταξύ των σφαιρικών κυμάτων W_1 και W_2 (σκιασμένη περιοχή του σχήματος 10β) είναι σε πρώτη προσέγγιση ανάλογο εν μέρει με τη διαφορά των πηγών S_1 και S_2 ενώ μεταβάλλεται με την απόσταση x μέσα σε αρκετά μεγάλα όρια όμοια με το πάχος της σφήνας που προσδιορίζεται μεταξύ δύο επίπεδων μετώπων W_1' και W_2' (σχήμα 10β).

Εν τούτοις το φαινόμενο της συμβολής δεν περιορίζεται φυσικά μόνο στο επίπεδο πέτασμα. Φως συμβάλλει με φως παντού όπου οι συμβαλλόμενες ακτίνες συναντώνται και γενικά το διάγραμμα συμβολής είναι τριών διαστάσεων. Το επίπεδο πέτασμα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα του Young είναι ένας κάποιος αποδέκτης μόνο. Έτσι καταδεικνύεται η κατανομή της έντασης του φωτεινού πεδίου σε ένα από τα επίπεδα του χώρου.

Το χωρικό διάγραμμα συμβολής καλείται συνήθως στάσιμο κύμα. Ένας τυπικός σχηματισμός στάσιμου κύματος δημιουργείται σαν αποτέλεσμα συμβολής της ακτινοβολίας δύο σύμφωνων (δηλαδή συμφασικών) πηγών S_1 και S_2 . Παρουσιάζεται στο σχήμα 11 μια τομή του στάσιμου κύματος με επίπεδο που διέρχεται από τις πηγές. Τα σκιασμένα μέρη του σχήματος 11 αντιστοιχούν στα σημεία όπου η ένταση του πεδίου είναι η μέγιστη. Τέτοιες περιοχές ονομάζονται κοιλίες στάσιμων κυμάτων. Οι κοιλίες διαχωρίζονται από τους δεσμούς όπου η ένταση του πεδίου είναι η ελάχιστη. Οι δεσμοί και οι κοιλίες δημιουργούν ένα σύνθετο σύστημα επιφανειών στο χώρο και κάθε τέτοια επιφάνεια έχει τις ίδιες συνθήκες συμβολής σε κάθε της σημείο. Συνεπώς κάθε επιφάνεια κοιλίας όπως επίσης και κάθε επιφάνεια δεσμού είναι ο γεωμετρικός τόπος σημείων που θα ισαπέχουν από τις πηγές S_1 και S_2 . Γενικά στη περίπτωση του σχήματος 11 οι δεσμοί και οι κοιλίες σχηματίζουν ένα σύστημα πα- ρεμβαλλομένων υπερβολοειδών εκ περιστροφής.



Σχήμα 11. Διάγραμμα δημιουργίας στάσιμου κύματος. Το στάσιμο αυτό κύμα είναι αποτέλεσμα χωρικής συμβολής μονοχρωματικών ακτινοβολιών από δύο σύμφωνες πηγές S_1 και S_2 .

Γενικά οι επιφάνειες κοιλιών έχουν και πιο σύνθετες μορφές όμως η γενική τάση που προαναφέρθηκε διατηρείται. Η απόσταση μεταξύ αυτών των επιφανειών είναι η ελάχιστη στη περιοχή όπου οι συμβαλλόμενες δέσμες διαδίδονται μετωπικά. Σε διευθύνσεις δηλαδή όπου η γωνία θ είναι ίση με 180° , περιοχή σημείου h_1 στο σχήμα 11. Σε συμφωνία με τη σχέση (2) αυτή η απόσταση ανέρχεται στο μισό μήκος κύματος του φωτός (στη περίπτωση ορατού φωτός αυτή η τιμή είναι κατά προσέγγιση ίση με $0.25 \mu\text{m}$). Η απόσταση μεταξύ των επιφανειών κοιλίας αυξάνει σημαντικά στις περιοχές όπου οι συμβαλλόμενες δέσμες διαδίδονται σχεδόν προς την ίδια διεύθυνση (δηλαδή όπου η γωνία θ είναι μικρή, περιοχή σημείου h_2 του σχήματος 11). Οι αιτίες που υπογραμμίζουν αυτή την ομοιότητα είναι αρκετά απλές. Στις περιοχές όπου οι δέσμες διαδίδονται σε μετωπικές - διευθύνσεις δηλαδή σε περιοχές μεταξύ των πηγών S_1 και S_2 μία μικρή μετατόπιση του σημείου παρατήρησης h_1 δημιουργεί σημαντική μεταβολή στη διαφορά δρόμων $S_1 h_1 - S_2 h_1$ του σημείου h_1 προς τις πηγές S_1 και S_2 . Στις περιθωριακές περιοχές h_2 του διαγράμματος στάσιμων κυμάτων όπου οι συμβαλλόμενες δέσμες ταξιδεύουν προσεγγιστικά προς την ίδια διεύθυνση η παραπάνω διαφορά μεταβάλλεται αντίστοιχα σε σημαντικά μικρότερο ποσοστό. Συγκρίνοντας τα σχήματα 9 και 11 γίνεται αντιληπτό πως ο Young στο πείραμά του ουσιαστικά παρατήρησε την κατανομή της φωτεινής έντασης στο μέρος εκείνο του διαγράμματος των στάσιμων κυμάτων που τέμνονται από επίπεδο P παράλληλο προς την ευθεία που συνδέει τις πηγές S_1 και S_2 στη περιοχή όπου η γωνία μεταξύ των συμβαλλόμενων δεσμών είναι αρκετά μικρή. Αυτό το μέρος παρουσιάζεται σε αξονική προβολή στο κάτω τμήμα του σχήματος 11.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΗ

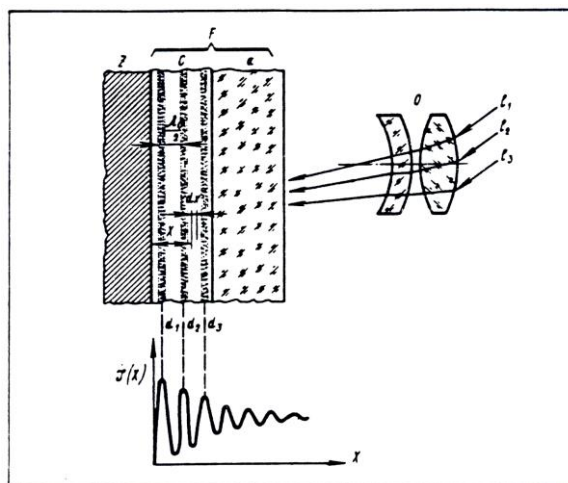
1. Η χαρτογράφηση της σύστασης του φάσματος ακτινοβολίας μέσω διαγράμματος, στάσιμων, σταθερών κυμάτων (Η διαδικασία Lippmann της φωτογράφισης σε φυσικά χρώματα)

Θεωρώντας την ολογραφία σαν τη μέθοδο που βασίζεται στην ιδιότητα της φωτογραφικής καταγραφής στάσιμων μετώπων κύματος έτσι ώστε να αναπαράγονται τα κυματικά πεδία με όλες τις έμφυτες παραμέτρους συμπεριλαμβανόμενης και της φασματικής σύνθεσης, θα πρέπει να αποδεχτούμε πως το πρώτο ολογραφικό γεγονός είχε ήδη ανακαλυφθεί από Γάλλους επιστήμονες όπως A. Becquerel [3] και ο N. Niepce [4] κατά την γέννηση της τέχνης της φωτογραφίας. Ο σύντροφος και συμπατριώτης τους Gabriel Lippmann περιέγραψε θεωρητικά τη φύση αυτού του φαινομένου [5].

Ο A. Becquerel κατέγραψε φωτογραφικά εικόνες σε φωτογραφικές πλάκες με φωτοευαίσθητη επίστρωση τοποθετημένη σε στιλβωμένη και επαργυρωμένη επιφάνεια. Φαινόταν όμως ιδιαίτερα παράξενο πως αυτές οι πλάκες μπορούσαν να αναπαράγουν πιστά το χρώμα του καταγραφόμενου αντικείμενου χωρίς καμία χρωστική ουσία. Η θεωρητική εξήγηση του φαινομένου αυτού αναπτύχθηκε αργότερα από τον G. Lippmann στη βάση εκτεταμένης, παράλληλης πειραματικής δουλειάς. Ο Gabriel Lippmann απέδειξε πως η αιτία αυτού του φαινομένου εξηγείται ως εξής: Σ' ένα σταθερό στερεό, δομημένο όμως από λεπτές διακριτές επιστρώσεις δημιουργείται διάγραμμα μετώπων κύματος επί της στιλβωμένης, επαργυρωμένης επιφάνειας κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Αυτό το διάγραμμα αποτυπώνεται στο φωτοπαθές στρώμα επίστρωσης σε σημαντικό βάθος. Κατά τη φωτογραφική εκτύπωση η ακτινοβολία του λευκού φυσικού φωτός συμβάλλει με τα στάσιμα διαγράμματα κύματος που είναι αποτυπωμένα στα φωτοπαθή στρώματα με ένα τέτοιο τρόπο ώστε η φωτογραφική εικόνα επιλέγει από το λευκό φως - και αντανακλά πίσω - μόνο την ακτινοβολία τέτοιων μονοχρωματικών συνιστωσών οι οποίες ήταν ήδη καταγεγραμμένες σ' αυτό.

Ο Gabriel Lippmann επινόησε έτσι μια μέθοδο έγχρωμης φωτογραφίας βασισμένη σ' αυτές τις πρωτοποριακές ιδέες. Αν και αυτή η μέθοδος δεν βρήκε τότε καμία πρακτική εφαρμογή είναι εν τούτοις αρκετά ενδιαφέρουσα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποσαφήνιση συγκεκριμένων φαινομένων. Το σχηματικό διάγραμμα που περιγράφει τη μέθοδο Lippmann παρουσιάζεται στο σχήμα 12. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο αντικείμενο (ακτίνες ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3) εστιάζεται από τον φωτογραφικό φακό Ο στη φωτογραφική πλάκα F η οποία είναι έτσι τοποθετημένη ώστε η εικόνα να προβάλλεται στο

φωτοπαθές στρώμα C μέσω γυάλινου υποστηρίγματος α. Ο ανακλαστήρας από υδράργυρο Z είναι σταθερά τοποθετημένος από την αντίθετη πλευρά του φωτοπαθούς στρώματος.



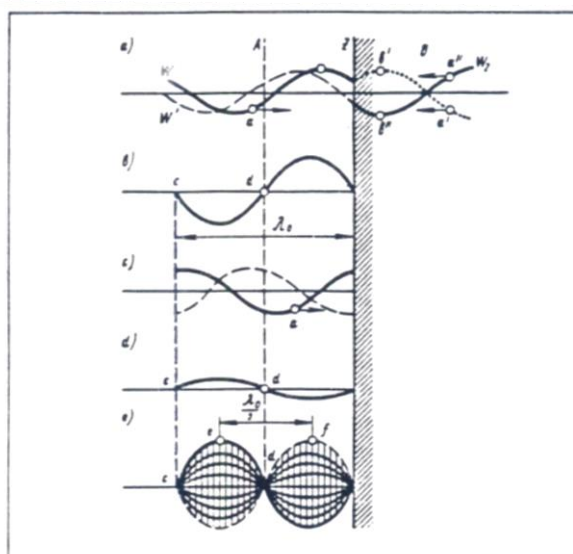
Σχήμα 12. Μέθοδος Lippmann στη δημιουργία έγχρωμης φωτογραφίας.

Η φωτογραφική πλάκα προετοιμάζεται με τη βοήθεια μιας ειδικής διαδικασίας που επίσης αναπτύχθηκε από τον Lippmann. Η πλάκα έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα με ιδιότητες διαπερατού φωτοευαίσθητου στρώματος. Αυτές οι φωτογραφικές πλάκες είναι γνωστές με το όνομα πλάκες Lippmann και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ακόμη και σήμερα. Διερχόμενη μέσω του διαφανούς φωτοευαίσθητου στρώματος C η ακτινοβολία από το αντικείμενο ανακλάται πίσω από τον ανακλαστήρα υδραργύρου Z. Σαν αποτέλεσμα της αθροιστικής συνύπαρξης της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτινοβολίας ένα στάσιμο φωτεινό κύμα σχηματίζεται μπροστά από την επιφάνεια του ανακλαστήρα υδραργύρου. Οι κοιλίες αυτού του στάσιμου κύματος d_1, d_2, d_3 αναπαριστούν ένα σύστημα παράλληλων επιπέδων προς την επιφάνεια ανάκλασης και χωρίζονται το ένα από το άλλο σε αποστάσεις ίσες με το μισό μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δηλαδή σε απόσταση περίπου ίση με το $1/4$ του μm . Εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική τότε η συγκέντρωση του φωτός στις κοιλίες ελαττώνεται τόσο γρήγορα λόγω αυξανόμενης απόστασης από την επιφάνεια ανάκλασης και τελικά σε συγκεκριμένη απόσταση η κατανομή της φωτεινής έντασης γίνεται ομοιόμορφη. Η τυπική εξάρτηση της έντασης J του στάσιμου κύματος από την απόσταση x από τον ανακλαστή παρουσιάζεται στο κάτω τμήμα του σχήματος 12.

Μετά την έκθεση και την εμφάνιση που ακολούθησε στη φωτογραφική πλάκα, ο μεταλλικός άργυρος περιορίζεται μόνο στις περιοχές των επιπέδων που υπάρχουν κοιλίες, και έτσι δημιουργείται ένας αριθμός από παράλληλα επίπεδα "κάτοπτρα" μέσα στο στρώμα της φωτοπαθούς επίστρωσης. Αυτές οι ανακλαστικές επιφάνειες χωρίζονται σε αποστάσεις $\lambda_0/2$ που είναι ίσες με το μισό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας στην οποία η φωτογραφική πλάκα έχει ήδη εκτεθεί. Ένα τέτοιο περιοδικό σύστημα κατόπτρων διατηρεί ένα υψηλό βαθμό ανακλαστικότητας μόνο για ακτινοβολίες μήκους κύματος λ_0 δηλαδή μόνο για μια φασματική συνιστώσα που έχει καταγραφεί στη φωτογραφική πλάκα κατά τη διάρκεια της έκθεσης, ενώ οι ακτινοβολίες με άλλα μήκη κύματος διέρχονται μέσω του συστήματος των «κατόπτρων» ανεπηρέαστες - ανεμπόδιστες. Σαν αποτέλεσμα εάν η φωτογραφία που δημιουργήθηκε με ένα τέτοιο τρόπο φωτιστεί με ακτινοβολία από πηγή

λευκού φωτός με συνεχές φάσμα θα επιλέξει απ' αυτή την ακτινοβολία και θα ανακλά πίσω μόνο εκείνες τις μονοχρωματικές συνιστώσες που έλαβαν μέρος στη διαδικασία καταγραφής. Συνεπώς θα αναπαραχθούν μόνο τα σωστά χρώματα του αντικειμένου που έχουν ήδη καταγραφεί στη φωτογραφία.

Ας αναφέρουμε πιο λεπτομερειακά τον ειδικό μηχανισμό καταγραφής και αναπαραγωγής της φασματικής σύστασης της ακτινοβολίας με τη βοήθεια της φωτογραφικής πλάκας Lippmann. Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η διαδικασία σχηματισμού ενός στάσιμου κύματος, που συμβαίνει σαν αποτέλεσμα της συμβολής ενός προσπίπτοντος κύματος W και του κύματος W' που ανακλάται πίσω από τον ανακλαστήρα Z . Το προσπίπτον κύμα (που συμβολίζεται με έντονη, συνεχή γραμμή στο σχήμα 13α) διαδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά στο κενό χώρο A κατά τη διεύθυνση που δείχνει το βέλος και διέρχεται από το σημείο a . Με σκοπό να προσδιοριστεί η μορφή του κύματος που ανακλάται από το επίπεδο Z είναι αναγκαίο να απεικονίσουμε την εικόνα του προσπίπτοντος W στο χώρο B πίσω από το "γυαλί παρατήρησης" πάντα σε συμφωνία με τους συμβατικούς κανόνες. Έτσι θα διαπιστώσουμε πως το σημείο a' είναι συμμετρικό του σημείου a , το σημείο β' είναι συμμετρικό του β κ.ο.κ. Το κατοπτρικό είδωλο του κύματος W που προσδιορίστηκε έτσι παρουσιάζεται σαν τμήμα καμπύλης από τελείες. Το είδωλο του προσπίπτοντος κύματος κινείται αντίθετα του αρχικού με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που συμβαίνει σε όλα τα κατοπτρικά είδωλα.



Σχήμα 13. Διαδοχικά στάδια σχηματισμού στάσιμου κύματος σε χώρο μπροστά από το επίπεδο κάτοπτρο Z .

Επιπρόσθετα με όλα τα παραπάνω είναι αναγκαίο να σημειωθεί πως λόγω του γεγονότος ότι η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του μεταλλικού κατόπτρου πρέπει να είναι μηδέν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο που αποκαλείται "απώλεια μισού μήκους κύματος" δηλαδή η φάση του κύματος που ταξιδεύει στο χώρο πίσω από το "γυαλί παρατήρησης" πρέπει να έχει αντίθετη φάση με το αρχικό κύμα. Μια τέτοια συνέπεια που προέρχεται από τη γενική ηλεκτροδυναμική θεωρία φαίνεται τελείως φυσική. Έχουμε ακόμη συνηθίσει στην ιδέα ότι στο χώρο πίσω από το γυαλί παρατήρησης κάθε τι συμβαίνει με την αντίθετη φορά. Αναφορικά με τη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να μεταβάλλουμε το πρόσημο των

ταλαντώσεων δηλαδή η θέση α' θα πρέπει να μετατραπεί στη θέση α' , η θέση β' στη θέση β'' κ.ο.κ.

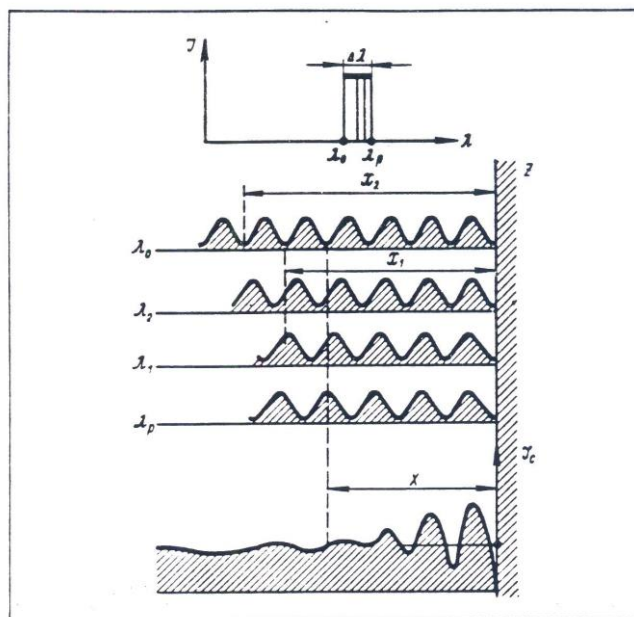
Το κύμα W_z που προσδιορίστηκε σε συμφωνία με τις προαναφερθείσες απαιτήσεις απεικονίζεται στο χώρο πίσω από το γυαλί με τη βοήθεια συνεχούς καμπύλης. Εξερχόμενο από τον πίσω χώρο Β στον πραγματικό χώρο Α το κύμα W_z σχηματίζει το ανακλώμενο κύμα W' . Αυτό το κύμα συμβολίζεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 13α. Ας προσπαθήσουμε τώρα να προσδιορίσουμε το συνιστάμενο κύμα στο χώρο μπροστά από το κάτοπτρο. Γι' αυτό το σκοπό πρέπει να προσθέσουμε τις επιμέρους απομακρύνσεις του προσπίπτοντος κύματος W και του κύματος W' που ανακλάται από το κάτοπτρο. Το αποτέλεσμα αυτής της δράσης φαίνεται στο σχήμα 13β. Εάν μελετήσουμε αυτή την εικόνα εύκολα θα φανεί πως το πλάτος της ταλάντωσης είναι μηδέν στα σημεία α και δ που απέχουν από το επίπεδο Z αποστάσεις που είναι υποπολλαπλάσιες του μισού μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα συμβαίνοντα σε ένα επόμενο χρονικό στιγμιότυπο φαίνονται στο σχήμα 13c και 13d. Το σημείο α του κύματος W έχει μετατοπιστεί πιο κοντά προς το κάτοπτρο ενώ επίσης και το ανακλώμενο κύμα έχει αλλάξει και εμφανίζεται με διακεκομμένες γραμμές. Εν τούτοις η συνολική ταλάντωση στα σημεία ϵ και δ είναι πάντοτε ίση με μηδέν όπως άλλωστε και πριν.

Το αποτέλεσμα της επιπρόσθεσης όλων των διαδοχικών φάσεων του αλληλεπιδρόντος κύματος W με το κάτοπτρο Z παρουσιάζεται στο σχήμα 13e. Όπως συνεπάγεται από το σχήμα οι τιμές του πεδίου στο χώρο μπροστά από το κάτοπτρο υφίσταται όλες τις φάσεις από την σταθερή παχιά καμπύλη στη διακεκομμένη με ένα τέτοιο τρόπο ώστε στους δεσμούς (σημεία ϵ και δ) οι τιμές του πεδίου είναι πάντα μηδέν, αλλά στις κοιλίες (σημεία ϵ και δ) το πλάτος της ταλάντωσης του πεδίου είναι πάντα το μέγιστο. Η δομή ενός τέτοιου κύματος χαρακτηρίζει ένα πλήρες, στάσιμο κύμα. Το σχήμα 14 περιγράφει μία περισσότερο σύνθετη περίπτωση στην οποία το στάσιμο κύμα δημιουργείται όχι από μία μονοχρωματική συνιστώσα μόνο αλλά από μια ακτινοβολία που έχει μία συνεχή κατανομή φάσματος σε διάστημα μηκών κύματος $\Delta\lambda$, από το μήκος κύματος στο μήκος κύματος λ_p . Κάθε μία μονοχρωματική συνιστώσα μιας τέτοιας ακτινοβολίας σχηματίζει ένα στάσιμο κύμα όταν αλληλεπιδρά με το κάτοπτρο. Αυτό το σχήμα περιγράφει την κατανομή των διαγραμμάτων της έντασης (τετράγωνα του πλάτους) των στάσιμων κυμάτων που αντιστοιχούν σε τέσσερις μονοχρωματικές συνιστώσες της ακτινοβολίας. Δηλαδή οι οριακές τιμές των μηκών κύματος του φάσματος λ_0 και λ_p επιλέχθηκαν έτσι ώστε $\lambda_p = \lambda_0 + \lambda_0/7$ και δύο ενδιάμεσα μήκη κύματος λ_1 και λ_2 .

Το κάτω τμήμα του σχήματος περιγράφει την κατανομή της έντασης του τελικού στάσιμου κύματος που επιτυγχάνεται από την επιπρόσθεση των εντάσεων των στάσιμων κυμάτων που αντιστοιχούν στις επιμέρους μονοχρωματικές συνιστώσες. Όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές όλων των στάσιμων κυμάτων πολύ πλησίον της επιφάνειας του κατόπτρου πρακτικά ταυτίζονται. Εν μέρει αυτό το γεγονός είναι το αποτέλεσμα των συνοριακών συνθηκών που απαιτούν το πρώτο ελάχιστο να ταυτίζεται με σημείο της επιφάνειας του κατόπτρου. Όπως επίσης αυτό είναι και το αποτέλεσμα των μικρών μεταβολών του μήκους κύματος στο μελετούμενο φασματικό διάστημα. Εύκολα κατανοεί κανείς πως στη περιοχή πλησίον του κατόπτρου όπου το ελάχιστο και το μέγιστο

του στάσιμου κύματος ταυτίζεται, το τελικό στάσιμο κύμα πρέπει να χαρακτηρίζει σημαντικές διαμορφώσεις έντασης. Εν τούτοις όσο η απόσταση από το κάτοπτρο αυξάνει τα μέγιστα μερικών μονοχρωματικών συνιστωσών μετατοπίζονται προς τα ελάχιστα άλλων και έτσι το βάθος του τελικά διαμορφούμενου στάσιμου κύματος ελαττώνεται βαθμιαία. Τελικά σε κάποια απόσταση X το ελάχιστο του στάσιμου κύματος που δημιουργείται από μια εξωτερική μονοχρωματική συνιστώσα του φάσματος ταυτίζεται με το μέγιστο που δημιουργείται από άλλη συνιστώσα και έτσι η ολική ένταση γίνεται ίση με κάποια μέση τιμή J_c . Στο σχήμα 14 το 4ο ελάχιστο που αντιστοιχεί στη συνιστώσα λ_0 ταυτίζεται με το 4ο μέγιστο της συνιστώσας λ_p . Απ' αυτήν την απόσταση και μετά οι διαμορφώσεις του στάσιμου κύματος πρακτικά εξαφανίζονται. Πρακτικά σε απόσταση X_1 το 5ο ελάχιστο λ_0 ταυτίζεται με το 5ο μέγιστο λ_1 , σε απόσταση X_2 το 6ο ελάχιστο λ_0 ταυτίζεται με το 6ο μέγιστο λ_1 , κ.ο.κ.



Σχήμα 14. Δημιουργία στάσιμου κύματος από ακτινοβολία με συνεχή κατανομή φάσματος σε χώρο μπροστά από επίπεδο κάτοπτρο Z.

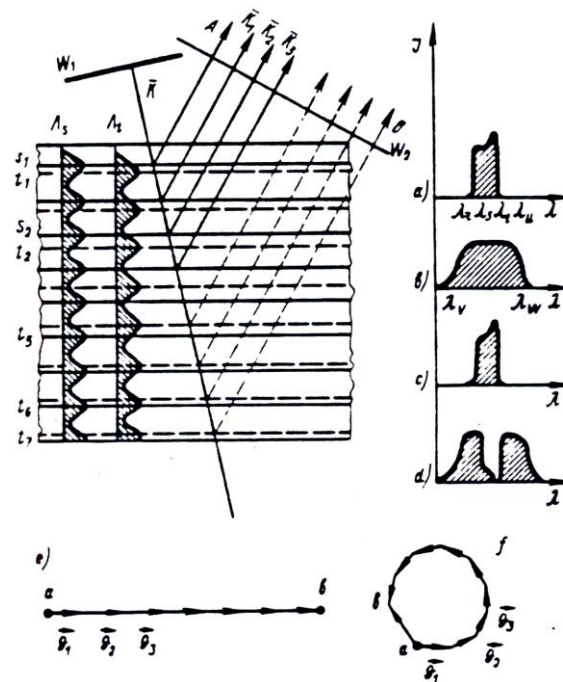
Γενικά είναι δυνατό να υπολογιστεί το εύρος X του διαγράμματος στάσιμου κύματος που εξαρτάται από το πλάτος $\Delta\lambda$ του φασματικού διαστήματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κάτοπτρο. Προς τούτο είναι αναγκαίο η απόσταση έως το n -ιστό ελάχιστο του στάσιμου κύματος που δημιουργείται από ακρότατη μονοχρωματική συνιστώσα του φάσματος να είναι ίση με την απόσταση του n -ιστού μέγιστου του στάσιμου κύματος που δημιουργείται από το άλλο ακρότατο μονοχρωματικής συνιστώσας. Αφού εκτελεστούν οι στοιχειώδεις αριθμητικοί υπολογισμοί τελικά καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$X = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda}$$

Ας υπολογίσουμε τώρα το εύρος του διαγράμματος στάσιμου κύματος μέσα στο φωτοπαθές στρώμα της φωτογραφίας Lippmann με την υπόθεση πως είναι αναγκαίο - για παράδειγμα - να καταγραφεί η πράσινη περιοχή του φάσματος που περιορίζεται από $\lambda_0 =$

0.48 μm έως $\lambda_p = 0.53 \mu\text{m}$ θεωρώντας $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ και $\Delta\lambda = 0.05 \mu\text{m}$ υπολογίζεται ότι το εύρος του διαγράμματος στάσιμου κύματος είναι ίσο με 1.25 μm .

Ας διερευνήσουμε το μηχανισμό με τον οποίο η φωτογραφία Lippmann αναπαράγει τη φασματική σύσταση της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο φωτοπαθές της στρώμα (σχήμα 15). Ας υποθέσουμε πως η καταγραμμένη φωτογραφία προέρχεται από συνεχές φάσμα ακτινοβολιών στην περιοχή του διαστήματος μηκών κύματος από λ_v σε λ_w (σχήμα 15α). Όπως ήδη έχει αναφερθεί κάθε μονοχρωματική συνιστώσα της καταγραφόμενης ακτινοβολίας δημιουργεί μία αρμονική κατανομή πυκνότητας μεταλλικού αργύρου μέσα στην περιοχή του φωτοπαθούς επιστρώματος της φωτογραφικής πλάκας.



Σχήμα 15. Μηχανισμός αναπαραγωγής φασματικής σύστασης της ακτινοβολίας με τη μέθοδο Lippmann.

Δυο τέτοιες αρμονικές πυκνοτήτων Λ_s και Λ_t που αντιστοιχούν στις μονοχρωματικές συνιστώσες με μήκη κύματος λ_s και λ_t αυθαίρετα επιλεγμένες από την περιοχή του φάσματος παρουσιάζονται στο σχήμα με συνεχή γραμμοσκίαση. Με σκοπό την απλοποίηση της αναφοράς, ας αντικαταστήσουμε κάθε αρμονική πυκνότητα με ένα σύστημα κατοπτρικών διαστρωμάτων που διέρχονται απ' εκείνα τα σημεία όπου η πυκνότητα του αργύρου είναι η μεγίστη. Δηλαδή εκεί όπου βρίσκονται οι κοιλίες του στάσιμου κύματος. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι αρμονικές Λ_s σαν ένα σύστημα επίπεδων κατόπτρων s_1, s_2, \dots που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $\lambda_s/2$, ενώ οι αρμονικές Λ_t ποριστούν ένα άλλο σύστημα κατόπτρων t_1, t_2, \dots που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $\lambda_t/2$.

Η φωτογραφία Lippmann θα πρέπει τώρα να φωτιστεί από ακτινοβολία με συνεχές φάσμα στην περιοχή μηκών κύματος από λ_v έως λ_w με σκοπό την εξασφάλιση των συγκεκριμένων οπτικών φαινομένων (διάγραμμα β). Ας αναφερθούμε στην αλληλεπίδραση της μιας αρμονικής πυκνότητας που παρουσιάζεται από ένα σύστημα επιστρώσεων s_1, s_2, s_3, \dots με τη μονοχρωματική συνιστώσα λ_s της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σ' αυτή την αρμονική. Το επίπεδο κύμα W_1 αυτής της ακτινοβολίας διαδίδεται στην διεύθυνση του

διανύσματος K και όταν διέρχεται μέσω του φωτοπαθούς επιστρώματος της φωτογραφίας F ανακλάται διαδοχικά από τους ανακλαστές s_1, s_2, s_3, \dots σχηματίζοντας έτσι ένα σύστημα από κύματα που διαδίδονται κατά μήκος των παράλληλων πορειών $K_1, K_2, K_3 \dots$. Τα ανακλώμενα μέτωπα κύματος είναι κάθετα στη κοινή διεύθυνση της διάδοσής των και επιπροστίθενται αμοιβαία στη συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας AB .

Ας εξετάσουμε τώρα την συμβολή που δημιουργείται κατά την επιπρόσθεση των ανακλώμενων κυμάτων από τις επιστρώσεις s_1, s_2, s_3, \dots . Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να συγκρίνουμε τις φάσεις των ταλαντώσεων που αντιστοιχούν σ' αυτά τα κύματα στην επιφάνεια κάθε αυθαίρετα επιλεγμένου μετώπου κύματος W_2 . Δηλαδή, θα πρέπει να καθορίζουμε εάν αυτές οι ταλαντώσεις διέρχονται διά του μέγιστου ή του ελάχιστου των πμών τους την ίδια χρονική στιγμή. Υποθέτουμε πως η φάση των ταλαντώσεων που δημιουργούνται από το ανακλώμενο κύμα στο στρώμα s_1 είναι το σημείο μηδέν για τις μετρήσεις των φάσεων. Εάν αγνοηθούν φαινόμενα που οφείλονται στη κλίση των ακτινών τότε συνεπάγεται από το διάγραμμα πως το κύμα που ανακλάται από το επόμενο στρώμα s_2 καταφθάνει στο επίπεδο W_2 με καθυστέρηση σε σχέση με το ανακλώμενο κύμα από το s_1 . Η τιμή αυτής της καθυστέρησης αντιστοιχεί με το διπλάσιο της απόστασης που χωρίζει τα δύο στρώματα s_1 και s_2 . Καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει μήκος κύματος λ_s και η απόσταση μεταξύ των s_1 και s_2 είναι ίση με $\lambda_s/2$ είναι προφανές πως η αμοιβαία απόκλιση των κυμάτων που ανακλώνται από τα s_1 και s_2 είναι ακριβώς ίση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λ_s . Δεν είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς πως η μετατόπιση κατά ένα μήκος κύματος ουσιαστικά δεν αλλάζει τίποτε, και έτσι συμπεραίνουμε πως τα ανακλώμενα κύματα από τις επιστρώσεις s_1 και s_2 είναι αυστηρώς συμφασικά. Όμοια τα ανακλώμενα κύματα από s_3 και s_4 καθώς κινούνται σε σχέση με το ανακλώμενο κύμα από s_1 σε απόσταση ίση με υποπολλαπλάσιο του μήκους κύματος παραμένουν σύμφωνα σε σχέση μ' αυτό και μεταξύ τους. Έτσι τα κύματα που ανακλώνται από τις επιστρώσεις $s_1, s_2, s_3 \dots$ είναι συμφασικά και γι' αυτό ενισχύονται όταν προστίθενται. Φάνηκε λοιπόν πως η αρμονική πυκνότητα του μεταλλικού αργύρου που δημιουργείται από ακτινοβολία με μήκος κύματος λ_s συντονίζεται μόνο με την δική της μονοχρωματική συνιστώσα και ανακλά έτσι αυτή την ακτινοβολία σε αντίθετη όμως διεύθυνση.

Η διαδικασία της επιπρόσθεσης της ακτινοβολίας με μήκος κύματος λ_s που ανακλάται από τις επιστρώσεις των αρμονικών πυκνότητας που αντιστοιχούν σ' αυτή την ακτινοβολία φαίνεται γραφικά στο διάγραμμα e όπου οι ταλαντώσεις που αντιστοιχούν στο κάθε κύμα που προστίθενται παρουσιάζονται σαν διανύσματα $g_1, g_2, g_3 \dots$. Μετατόπιση της ταλάντωσης κατά ένα πλήρες μήκος κύματος αντιστοιχεί σε μια πλήρη περιστροφή για το κάθε διάνυσμα. Συνεπώς στη συγκεκριμένη περίπτωση τα διανύσματα $g_2, g_3 \dots$ ενώ περιστρέφονται με μία, δύο ή περισσότερες πλήρεις περιστροφές παραμένουν πάντα παράλληλα στο διάνυσμα g_1 και έτσι προστίθεται με ένα τέτοιο τρόπο ώστε το μήκος του τελικού διανύσματος ab είναι ίσο με το άθροισμα των μηκών των συνιστωσών. Δηλαδή η σύσταση των ανακλώμενων κυμάτων από τις αρμονικές επιστρώσεις οδηγεί εν προκειμένω σε μια σημαντική προσαύξηση του τελικά ανακλώμενου κύματος.

Τώρα ας υποθέσουμε ακτινοβολία με μήκος κύματος λ_t δηλαδή μια τυχαία μονοχρωματική συνιστώσα που δεν συμμετέχει στην δημιουργία των συγκεκριμένων αρμονικών να

προσπίπτει στις επιστρώσεις $s_1, s_2, s_3 \dots$ των αρμονικών που δημιουργούνται από την ακτινοβολία με μήκος κύματος λ_s . Βασισμένοι στο γεγονός πως η γεωμετρική διάταξη πορείας της ακτίνας δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος, τα ανακλώμενα κύματα από τις στρώσεις $s_2, s_3 \dots$ φθάνουν ακόμη και σ' αυτή τη περίπτωση στην επιφάνεια W_2 με μετατοπίσεις $\lambda_s, 2\lambda_s \dots$. Αλλά οι αμοιβαίες μετατοπίσεις των συμβαλλόμενων κυμάτων δεν είναι τώρα υποπολλαπλάσιες του μήκους κύματος λ_1 με αποτέλεσμα τέτοια κύματα να μην είναι συγχρονισμένα και έτσι να αλληλοεξουδετερώνονται. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται γραφικά στο διάγραμμα f. Διανύσματα g_1, g_2, \dots αντιστοιχούν στις ταλαντώσεις των κυμάτων που πρόκειται να αθροιστούν σ' αυτή την περίπτωση μέσω των ποσοτήτων που δεν είναι υποπολλαπλάσια σε μια πλήρη διανυσματική περιστροφή. Αποτέλεσμα είναι η τιμή του συνολικού διανύσματος $\alpha\beta$ να ελαττώνεται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση e. Εάν το πάχος του φωτοπαθούς επιστρώματος είναι αρκετό ο αριθμός των ανακλώντων στρωμάτων s_1, s_2, \dots είναι μεγάλος και τα ανακλώμενα σε αυτά κύματα πρακτικά αλληλοεξουδετερώνονται. Έτσι η πυκνότητα των αρμονικών μεταλλικού αργύρου που δημιουργείται από ακτινοβολία με μήκος κύματος λ_s , αφήνει την ακτινοβολία να διέρχεται για μήκη κύματος που διαφέρουν από την λ_s . Εν τούτοις εάν αυτή η ακτινοβολία που δεν αλληλεπιδρά με τις αρμονικές λ_s έχει επίσης καταγραφεί στη φωτογραφική πλάκα τότε θα εντοπίσει τις δικές της αρμονικές (π.χ. στρώματα $t_5, t_6, t_7 \dots$) που την ανακλούν σε αντίθετη διεύθυνση.

Έτσι η φωτογραφία Lippmann επιλέγει και ανακλά τις ιδιαίτερες μονοχρωματικές συνιστώσες από το συνεχές φάσμα της πηγής με αποτέλεσμα αυτή η φωτογραφία να αναπαράγει ολόκληρο το φάσμα που έχει καταγραφεί στην επιφάνειά της. Οι μονοχρωματικές συνιστώσες που δεν έχουν καταγραφεί στη φωτογραφία, διέρχονται απ' αυτήν ανεπηρέαστες (τα φάσματα της ανακλώμενης και διερχόμενης ακτινοβολίας μέσω της φωτογραφίας παρουσιάζονται στα διαγράμματα c και d).

Η μέθοδος της έγχρωμης φωτογραφίας που αναπτύχθηκε από τον Lippmann δεν βρήκε καμία πρακτική εφαρμογή παρ' όλη την κομψότητα και την αντικειμενικότητά της. Εκτοπίστηκε έτσι από την αποκαλούμενη φωτογραφία τριών χρωμάτων η οποία όμως είναι αυστηρά υποκειμενική μέθοδος. Αυτή η μέθοδος δεν αναπαράγει την πιστή φασματική σύσταση της ακτινοβολίας αλλά αντί αυτού την έγχρωμη αίσθηση που συμβαίνει στο ανθρώπινο οφθαλμό όταν κοιτά ένα δεδομένο αντικείμενο.

Η μεγάλη όμως επιτυχία των ερευνών Lippmann ήταν η θεωρητική και πειραματική απόδειξη της ιδιότητας των σταθερών διαγραμμάτων στάσιμου κύματος να αναπαράγουν την φασματική σύσταση της ακτινοβολίας. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το θεωρητικό μέρος των ερευνών Lippmann είναι ακόμη και σήμερα επίκαιρο. Πράγματι, ο Lippmann απέδειξε πως η συνολική αυτή διαδικασία αποτελεί ένα διπλό μετασχηματισμό Fourier. Στο πρώτο στάδιο το φάσμα της προσπίπτουσας καταγράφεται όπως ο μετασχηματισμός Fourier με τη μορφή φωτεινής κατανομής έντασης του στάσιμου κύματος. Στο δεύτερο στάδιο ένας επιπλέον μετασχηματισμός Fourier επανορθώνει το αρχικό φάσμα. Όσον δε αφορά το πειραματικό μέρος των ερευνών Lippmann θα πρέπει να αναφερθεί πως η ιδιόρρυθμη διαδικασία δημιουργίας των φωτοευαίσθητων πλακών Lippmann που ήταν στην αφάνεια για περίπου 50 χρόνια επιτυχώς επανήλθαν στην επικαιρότητα και σήμερα

αυτές οι πλάκες είναι ένα από τα βασικότερα εργαλεία της ολογραφίας μαζί βέβαια με την τεχνική του laser.

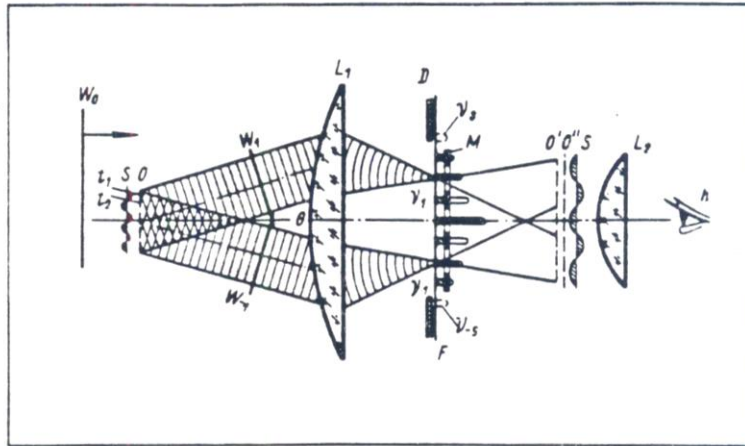
2. Σχέση μεταξύ της δομής οπτικού ειδώλου και τιμών πεδίου σε επιφάνεια

(Η θεωρία δημιουργίας ειδώλου στο μικροσκόπιο όπως αναπτύχθηκε από τον E. Abbe)

Η αναπαραγωγή της φασματικής σύστασης του φωτεινού κύματος δεν είναι βέβαια το κύριο γεγονός της ολογραφίας. Η ανάπτυξη της ολογραφίας συνήθως χρονολογείται από την εποχή όπου αναπτύχθηκε η μέθοδος της αναπαραγωγής της χωρικής διαμόρφωσης του κυματικού πεδίου. Αυτό διότι η διαμόρφωση του κυματικού πεδίου φαίνεται να περιέχει τη πληροφορία για το είδωλο του αντικειμένου. Η μελέτη "Die Lehre von der Biiidentstehung im Mikroskop" του Γερμανού οπτικού - φυσικού Ernst Abbe φανέρωσε τον τρόπο για διερευνήσεις που οδηγούν στη λύση του προβλήματος. Ο Abbe ήταν ο πρώτος που υπολόγισε ποσοτικά τη σχέση μεταξύ της μορφής του αντικειμένου και της χωρικής διαμόρφωσης του κυματικού πεδίου της ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από αυτό [6],

Ο Abbe απέδειξε τους συλλογισμούς του μαθηματικά χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς Fourier σαν ένα βασικό εργαλείο που αναπαριστά τη σύνθετη χωρική κατανομή του φωτός στην επιφάνεια του αντικειμένου σαν άθροισμα χωρικών αρμονικών συνιστωσών. Ο Abbe επίσης απέδειξε πως η πορεία δημιουργίας του ειδώλου σ' ένα συμβατικό οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να αναπαραχθεί σαν ένας διπλός μετασχηματισμός Fourier. Στο πρώτο στάδιο, το πρότυπο του χωρικού φάσματος του αντικειμένου δημιουργείται στο μπροστά εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού σαν αποτέλεσμα της συμβολής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από διάφορα σημεία του αντικειμένου. Στο δεύτερο στάδιο, ένας επιπλέον μετασχηματισμός Fourier πραγματοποιείται σαν αποτέλεσμα συμβολής του φωτός που ακτινοβολείται από διάφορα σημεία του εστιακού επιπέδου. Αυτοί οι δύο διαδοχικοί μετασχηματισμοί Fourier οδηγούν στην αποκατάσταση της αρχικής συνάρτησης, δηλαδή τελικά οδηγούν στην εμφάνιση του ειδώλου που αφορά το αντικείμενο.

Το γενικό διάγραμμα της παρατήρησης με τη βοήθεια του μικροσκοπίου παρουσιάζεται στο σχήμα 16. Σύμφωνα με τη γεωμετρική οπτική οι πορείες που συμβαίνουν σε μια τέτοια παρατήρηση περιγράφονται με τον εξής τρόπο: Κύμα W_0 της ακτινοβολίας που φωτίζει το αντικείμενο είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος από το αντικείμενο O . Ο αντικειμενικός φακός του μικροσκοπίου L_1 προβάλλει το διάγραμμα της φωτεινής κατανομής του αντικειμένου σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο όπου σχηματίζεται το είδωλο O' του αντικειμένου. Αυτό το είδωλο είναι μεγεθυμένο σύμφωνα με τους κανόνες που ισχύουν κατά το σχηματισμό του ειδώλου με τη βοήθεια φακού. Παρατηρητής ή παρατηρεί αυτό το είδωλο μέσω του προσοφθάλμιου φακού L_2 ακριβώς όπως θα μπορούσε να κάνει μέσω ενός απλού μεγεθυντικού φακού.



Σχήμα 16. Διάγραμμα δημιουργίας του ειδώλου σε οπτικό μικροσκόπιο με τη βοήθεια της θεωρίας του Abbe.

Σύμφωνα με τον Ernst Abbe αυτή η διαδικασία θυμίζει τα εξής: κύμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας W_0 είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος από το αντικείμενο O . Το διάγραμμα της κατανομής του πεδίου σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου διαμορφωμένο μ' αυτό τον τρόπο μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μία ανάπτυξη σε χωρικές αρμονικές. Σύμφωνα με την αρχή Huygens κάθε σημείο σ' αυτή τη χωρική αρμονική επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερογενή πηγή που εκπέμπει. Εκείνο που συμβαίνει είναι ότι η ακτινοβολία που εκπέμπεται απ' όλα τα σημεία της χωρικής αρμονικής προστίθενται και δημιουργούν επίπεδα κύματα στο χώρο π.χ. η αρμονική S δημιουργεί τα κύματα W_1 και W_{-1} . Ο αντικειμενικός L_1 του μικροσκοπίου εστιάζει τα επίπεδα κύματα σαν ζεύγη σημείων στο εστιακό επίπεδο F (δηλαδή τα κύματα W_1 και W_{-1} είναι εστιασμένα στα σημεία V_1 και V_{-1}). Το άθροισμα των φωτεινών σημείων όλων των χωρικών αρμονικών δημιουργεί το φωτεινό πρότυπο του χωρικού φάσματος του αντικειμένου. Στο σχήμα 16 το διάγραμμα της κατανομής για τη φωτεινή ένταση σ' αυτό το φάσμα συνδυάζεται με το εστιακό επίπεδο F . Κάθε συμμετρικό ζεύγος σημείων ενός τέτοιου φάσματος αντιστοιχεί σε κάθε χωρική αρμονική του αντικειμένου, π.χ. τα ζεύγη σημείων V_1 και V_{-1} μπορεί να θεωρηθούν σαν δύο σύμφωνες πηγές ακτινοβολίας που η συμβολή τους αναδημιουργεί την αρχική αρμονική ένταση κατανομής στο επίπεδο του ειδώλου (αυτή η διαδικασία παρουσιάστηκε λεπτομερειακά στο σχήμα 10β). Ιδιαίτερα, τα σφαιρικά κύματα που ακτινοβολούνται από τα σημεία V_1 και V_{-1} δημιουργούν αρμονική S' σαν αποτέλεσμα συμβολής. Έτσι κάθε χωρική αρμονική στο επίπεδο των ειδώλων αντιστοιχεί σε χωρική αρμονική της ανάλυσης του πεδίου από το αντικείμενο. Τέτοιες δευτερογενείς αρμονικές αναδημιουργούν την αρχική κατανομή του πεδίου αφού όμως πρώτα αθροιστούν, δηλαδή το είδωλο O' του αντικείμενου.

Ο Abbe ανέπτυξε την θεωρία του με σκοπό να εξηγήσει το μηχανισμό του θεμελιώδους περιορισμού της διακριτικής ικανότητας του μικροσκοπίου. Έτσι η ύπαρξη ενός τέτοιου περιορισμού μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι αρμονικές που διαθέτουν πολύ μικρή χωρική περίοδο σχηματίζουν επίπεδα κύματα που όμως διαδίδονται σε τόσο μεγάλες γωνίες ώστε η ακτινοβολία τους δεν μπορεί να εισέλθει στον αντικειμενικό φακό του μικροσκοπίου. Δηλαδή κύματα που δημιουργούν τα σημεία V_s και V_{-s} , περιορίζονται από το άνοιγμα του διαφράγματος D του μικροσκοπίου.

Προς απόδειξη της εγκυρότητας της θεωρίας του ο Abbe πραγματοποίησε το εξής πείραμα. Διάλεξε ένα περιοδικό σύστημα από σχισμές t_1, t_2 για να παίξει το ρόλο ενός μέρους από το παρατηρούμενο αντικείμενο. Το φωτεινό πρότυπο του χωρικού αυτού φάσματος του αντικειμένου (ένα σύστημα από διακριτές κορυφές χωρισμένες σε ίσα διαστήματα) σχηματίστηκε στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού του μικροσκοπίου σε πλήρη συμφωνία με την θεωρία του. Έχοντας τώρα κλείσει τις περιττές τάξεις του φάσματος με τη βοήθεια της γρίλιας M ο Abbe συνέθεσε ένα νέο χωρικό φάσμα που αντιστοιχεί σε μια άλλη συνάρτηση της κατανομής του πεδίου εξαρτώμενη από τις συντεταγμένες. Για την αναγνώριση της κατανομής του πεδίου αντιστοιχεί σε φράγμα περίθλασης που έχει ένα διπλάσιο αριθμό διαγραμμίσεων ανά χιλιοστό. Το είδωλο ενός τέτοιου ανύπαρκτου φράγματος περίθλασης εμφανίστηκε στο επίπεδο του προηγούμενου ειδώλου σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία του. Το πείραμα που εκτέλεσε ο Abbe δημιούργησε πολύ μεγάλη εντύπωση όχι μόνο στους συγχρόνους του αλλά και στις μελλοντικές γενεές των οπτικών. Αυτό επίσης το πείραμα έπεισε και τους τελευταίους που αμφέβαλαν για την εγκυρότητα της θεωρίας του.

Εύκολα εν τούτοις φαίνεται πως το πείραμα που επινοήθηκε από τον Abbe εκτείνεται αρκετά μακρύτερα σε ότι αφορά τον αρχικό σκοπό του δηλαδή την απλή επιβεβαίωση της αρχικής του θεωρίας. Απέδειξε την δυνατότητα συνθέσεως αυθαιρέτου - ειδώλου ελέγχοντας τις παραμέτρους του κυματικού πεδίου. Ο έλεγχος της διακριτικής ικανότητας του μικροσκοπίου ήταν μόνο η αρχή. Ο Γερμανός φυσικός H. Boersch ήταν ο πρώτος που έκανε ένα σαφή διαχωρισμό των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την θεωρία Abbe. Ο Boersch πρότεινε να σταματήσει η πρακτική της χρησιμοποίησης κάθε αντικειμενικού φακού και έτσι να σχηματίζονται τα είδωλα των αντικειμένων σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο με την επαναδημιουργία της κυματικής κατανομής πεδίου που αντιστοιχεί σ' αυτά. Με την προτυποποίηση του επιπέδου κύματος πεδίου μέσω πλέγματος που είχε έναν αριθμό από προκατασκευασμένα ανοίγματα χαραγμένα σ' αυτό και εισάγοντας διαφορές φάσεων στην ακτινοβολία με τη βοήθεια επιπέδων λεπτών φύλλων μίκας, ο H. Boersch πραγματοποίησε μια σύνθεση από είδωλα πλεγμάτων από συγκεκριμένους κρυστάλλους. Αργότερα αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Άγγλο φυσικό William Bragg, ο οποίος πρότεινε την δημιουργία τέτοιων πλεγμάτων με τη βοήθεια της φωτογραφίας [8]. Παρ' όλα αυτά οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον H. Boersch και W. Bragg μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση ειδώλων μόνο από απλά αντικείμενα. Οι επιστήμονες αυτοί ασχολήθηκαν κυρίως με κρυστάλλους που έχουν μια συγκεκριμένη συμμετρία. Για περισσότερο σύνθετα αντικείμενα που απαιτούν την ανάγκη υπολογισμού και αναπαραγωγής ενός υπερβολικά σύνθετου διαγράμματος κατανομής πλατών και φάσεων, ήταν αδύνατο να γίνει από τις μεθόδους που υπήρχαν τότε(*) . Η κυρίαρχη σημασία αυτών των πειραμάτων συνίσταται στη δημιουργία των βάσεων πάνω στις οποίες ο Dennis Gabor "έχτισε" την ολογραφική του μέθοδο.

(*) Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έγινε δυνατό να αναγεννηθεί πάλι αυτή η τεχνική. Σήμερα έχει αναπτυχθεί αυτή η διαδικασία με το όνομα "Kinoform".

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΣ ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή

Πριν προχωρήσουμε από τα θεμελιώδη φαινόμενα στην ολογραφία είναι αναγκαίο να τονιστεί το γεγονός ότι η ολογραφία δεν μπορεί να ταξινομηθεί μεταξύ των μηχανολογικών επιτευγμάτων, δηλαδή δεν είναι μία ανθρώπινη σύνθετη επινοήση γνωστών φυσικών νόμων που σκοπό έχει να επιτύχει ένα θετικό προσχεδιασμένο αποτέλεσμα. Λαμβάνοντας την ουσία της, η ιστορία για την ανάπτυξη της ολογραφίας είναι μια αλυσίδα διαδοχικών ανακαλύψεων των διαφορετικών πλευρών ενός και του αυτού φαινομένου που υπάρχει αντικειμενικά στον υλικό κόσμο που μας περιβάλλει. Αυτό το φαινόμενο αποκαλύπτει την εκπληκτική δυνατότητα των κυματικών πεδίων να απεικονίζουν τα υλικά αντικείμενα με τέτοιο βαθμό αντικειμενικότητας ο οποίος πρώτη φορά επιτυγχάνεται και έτσι εξηγείται γιατί η επιστημονική αξία του μπορεί να συναγωνιστεί την σημαντικότητα για παράδειγμα του φαινομένου της συμβολής για το φως. Είναι γεγονός πως αυτό το φαινόμενο που περιλαμβάνει τη βάση της ολογραφίας και των εφαρμογών της δεν έχει ακόμα ονομαστεί. Αυτή η ανωνυμία μπορεί να αποδοθεί μερικώς στη μικρή ηλικία της ολογραφίας. Εν τούτοις και η υπερβολική πρακτικότητα που χαρακτηρίζει το μεγάλο ενδιαφέρον σε γεγονότα εις βάρος της αρχικής αιτίας επίσης συμμετέχει σ' αυτή την αδικία. Αφήνοντας κατά μέρος το αντικείμενο της ορολογίας ας αναφερθούμε στην ανάπτυξη της ουσίας του φαινομένου αυτού.

1. Χαρακτηριστικές ιδιότητες απεικόνισης δισδιάστατου τρήματος διαγράμματος στάσιμου κύματος

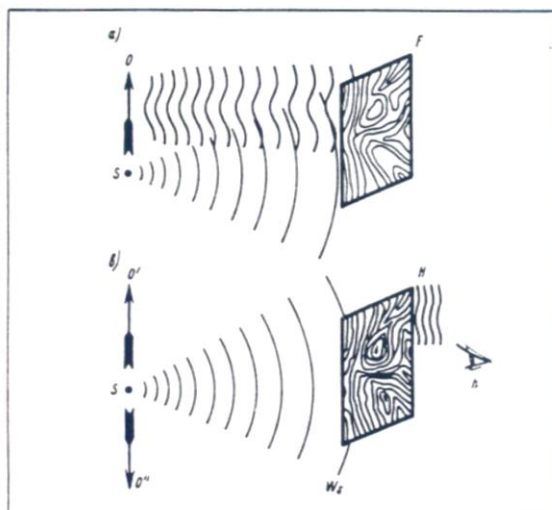
Η ιστορία έναρξης της ολογραφίας περιγράφεται πολύ γενικά ως εξής: δουλεύοντας στο πρόβλημα της βελτίωσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ο Άγγλος φυσικός Dennis Gabor αντιμετώπισε αναγκαστικά την βελτίωση της ποιότητας της εικόνας που ελαττώνεται σημαντικά από την αποκαλούμενη σφαιρική εκτροπή των φακών για ηλεκτρόνια. Σε πρώτη αντιμετώπιση αυτή η δυσκολία δεν φαίνεται να είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας. Είναι γνωστό πως η σφαιρική εκτροπή αντιμετωπίζεται με επιτυχία κατά ένα σχετικά απλό τρόπο. Εν τούτοις η οπτική δέσμης ηλεκτρονίων κυριαρχείται από κάπως διαφορετικούς νόμους, και η σφαιρική εκτροπή σ' αυτή τη περίπτωση δεν μπορεί να διορθωθεί βάσει αξιωματών. Το θεώρημα που αναφέρεται σ' αυτή τη περίπτωση ήταν να αντιμετωπιστεί αυτό το σημείο.

Με σκοπό να υπερνικήσει αυτό το πρόβλημα ο Denis Gabor θέλησε να κατασκευάσει ένα ακριβές αντίγραφο του κύματος ηλεκτρονίου εντός της οπτικής περιοχής του φάσματος

έτσι ώστε να διορθώσει το σφαιρικό σφάλμα αυτού του αντιγράφου αργότερα με τη βοήθεια συμβατικών μεθόδων της οπτικής. Ήταν για τη λύση αυτού του πολύ συγκεκριμένου αλλά και πολύ τυπικού προβλήματος για το οποίο προτάθηκε η ολογραφική μέθοδος το 1948 [9,10,11].

Ο όρος "ολόγραμμα" προτάθηκε από τον ίδιο τον D. Gabor. "Holos" σημαίνει πλήρες, ολόκληρο στα ελληνικά ενώ "gramma" σημαίνει η δυνατότητα γραφής. Το ολόγραμμα είναι λοιπόν μια πλήρης καταγραφή. Αυτός ο όρος υπονοεί αμφότερα την πλήρη καταγραφή των κυματικών πεδίων όπως και την περιεκτική καταγραφή της πληροφορίας για τα αντικείμενα. Οι δύο αναπαραστάσεις είναι αμφότερες σωστές. Το ολόγραμμα αναπαράγει ακριβή πεδία κυμάτων και αυτά τα κύματα όταν αναπαράγονται δίνουν εικόνες των αντικειμένων απίστευτης λεπτομέρειας. Ο όρος ολογραφία εισήχθη αρκετά αργότερα από τον Αμερικανό ερευνητή D. Stroke.

Ο τρόπος του συλλογισμού του Gabor ήταν πολύ απλός. Εάν ένα σύνθετο γενικώς άγνωστο πεδίο κύματος ακτινοβολίας διασκορπίζεται από κάποιο αντικείμενο O και επιπροστεθεί πάνω στην ακτινοβολία ενός απλού προκαθορισμένου κύματος που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή S (το κύμα αναφοράς), τότε δημιουργείται ένα διάγραμμα συμβολής που είναι ταυτόσημο με το διάγραμμα που επιτυγχάνεται στο πείραμα Young (σχήμα 17α). Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο διαγραμμάτων βρίσκεται στην υπερβολικά μεγαλύτερη περιπλοκή της δομής του ενός απ' αυτά. Εν τούτοις η γενική ιδέα του διαγράμματος συμβολής διατηρείται. Οι φωτεινές λουρίδες αντιστοιχούν σε περιοχές όπου οι φάσεις των κυμάτων αντικειμένου - αναφοράς είναι όμοιες ενώ οι σκοτεινές λουρίδες αντιστοιχούν σε περιοχές όπου αυτές οι φάσεις διαφέρουν. Ας υποθέσουμε τώρα πως αυτό το διάγραμμα συμβολής καταγράφεται στη φωτογραφική πλάκα F η οποία υφίσταται αντίστροφη εμφάνιση με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε περιοχές όπου οι φωτεινές λουρίδες υπήρχαν η πλάκα καθίσταται διαφανής, ενώ στις περιοχές των σκοτεινών λουρίδων η πλάκα καθίσταται μαύρη και ως εκ τούτου αδιαπέραστη. Τώρα ας αναφερθούμε στη διαδικασία της επαναδημιουργίας (σχήμα 17β). Εάν το προηγούμενο ολόγραμμα εκτεθεί στην ακτινοβολία από το κύμα αναφοράς S θα αφήσει να περάσουν μόνο τα τμήματα του κύματος αναφοράς που ταιριάζουν με τη φάση του κύματος του αντικειμένου και αυτό διότι το ολόγραμμα είναι διαπερατό σ' εκείνες τις περιοχές όπου οι φάσεις των κυμάτων αντικειμένου και αναφοράς συμπίπτουν. Εκείνα τα τμήματα από το κύμα αναφοράς που διαφέρουν φασικά από το κύμα του αντικειμένου θα απορροφηθούν από το ολόγραμμα.



Σχήμα 17. Γεωμετρική διάταξη της αρχικής ιδέας του D. Gabor. Δημιουργία διαγραμμάτων συμβολής και η διαδικασία επαναδημιουργίας του κυματικού πεδίου.

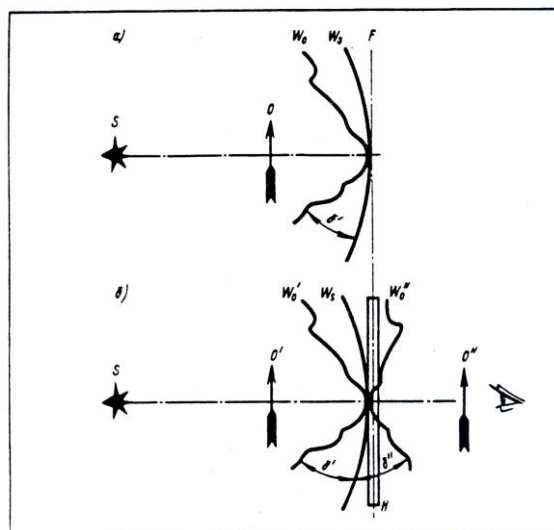
Έτσι περιορίζοντας όλη την επιπλέον ροή από το κύμα αναφοράς το ολογράμμα αναπαράγει την κατανομή των φάσεων που ταιριάζουν απόλυτα με την κατανομή των φάσεων που προέρχεται από την ακτινοβολία και διασκορπίζεται από το αντικείμενο. Αυτή η αναπαραγωγή προέρχεται περίπου από το μισό συνολικό εμβαδόν του ολογράμματος. Η εναπομένουσα περιοχή του ολογράμματος όπου και το κύμα αναφοράς απορροφάται χαρακτηρίζει τις μηδενικές τιμές του κυματικού πεδίου. Διότι ακόμη, ο βαθμός αμαύρωσης του ολογράμματος εξαρτάται από τη διάρκεια της έκθεσης, το πλάτος του κύματος του αντικειμένου επίσης αναδημιουργείται επιπρόσθετα με την αναπαραγωγή της φάσης. Όπως προαναφέρθηκε σύμφωνα με το αξίωμα Huygens η αναπαραγωγή του πεδίου σε κάθε επιφάνεια δηλαδή σε μια από τους κρίκους της αλυσίδας οδηγεί στην αναπαραγωγή του πεδίου σε όλους τους εναπομείναντες κρίκους, δηλαδή στο πλήρη τρισδιάστατο χώρο στα δεξιά του ολογράμματος (σχήμα 17β). Ο παρατηρητής h που αντιλαμβάνεται το επαναδημιουργηθέν πεδίο θα δει το είδωλο O στην ίδια θέση όπου βρισκόταν το αντικείμενο τη στιγμή της λήψης. Αυτό το είδωλο είναι πρακτικά αδύνατον να διακριθεί από το αρχικό αντικείμενο.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως το διάγραμμα του σχήματος 17 υποστηρίχθηκε από τους Αμερικανούς ερευνητές E. Leith και J. Upatnieks αρκετά αργότερα από τη δημοσίευση της μελέτης του Gabor. Αυτό το διάγραμμα αναφέρθηκε εδώ σε συνδυασμό με τη μελέτη Gabor με μοναδικό σκοπό να αποσαφηνιστεί πιο παραστατικά ο μηχανισμός της δράσης του κύματος αναφοράς. Στην πραγματικότητα ο Dennis Gabor χρησιμοποίησε κάπως διαφορετικά και λιγότερο δραστικά τη μέθοδο της ολογραφικής καταγραφής. Βέβαια σ' εκείνους τους χρόνους δεν υπήρχε ισχυρή μονοχρωματική ακτινοβολία και έτσι ήταν μόνο μία διάταξη που μπορούσε πρακτικά να πραγματοποιηθεί. Σ' αυτή τη διάταξη εφαρμόστηκε η αποκαλούμενη ευθυγράμμιση της ακτινοβολούσας πηγής, του αντικειμένου και του ολογράμματος (σχήμα 18). Σ' αυτή τη περίπτωση η φωτογραφική πλάκα F καταγράφει τη σκιά του μικρού αντικειμένου O που φωτίζεται από τη σημειακή πηγή ακτινοβολίας S (σχήμα 18α). Η διαδικασία καταγραφής του ολογράμματος ολοκληρώνεται πραγματικό σ' αυτό το στάδιο. Εν τούτοις αυτό το "πολύ απλό" πείραμα περιέχει μια πολύ σπουδαία και

σημαντική λεπτομέρεια. Όταν η πηγή S είναι τόσο μικρή και μονοχρωματική η διαδικασία σχηματισμού σκιάς δεν είναι τόσο απλή όπως συνήθως φανταζόμαστε ότι είναι. Πράγματι η σκιά σ' αυτή τη περίπτωση είναι αποτέλεσμα συμβολής της διασκορπισμένης από το αντικείμενο (κύμα W_0) ακτινοβολίας με τη μοναδική ακτινοβολία αναφοράς της πηγής S που προσπίπτει στη φωτογραφική πλάκα διερχόμενη από το αντικείμενο (κύμα W_s). Το διάγραμμα που έτσι δημιουργείται θυμίζει είδος δαντέλας και η ομοιότητά του με το αντικείμενο είναι πάρα πολύ μικρή.

Το σχήμα 18α παρουσιάζει τη διαδικασία δημιουργίας ενός τέτοιου ολογράμματος. Το ολόγραμμα H εκτίθεται και εμφανίζεται ενώ στη συνέχεια τοποθετείται στην ίδια θέση που κατείχε κατά τη διαδικασία της έκθεσης, τώρα υφίσταται την ακτινοβολία από τη σύμφωνη σημειακή πηγή S . Όταν αυτή η ακτινοβολία συναντήσει το ολόγραμμα διαμορφώνεται από το διάγραμμα του με ένα τέτοιο τρόπο -όπως προαναφέρθηκε- ώστε αναπαράγεται πίσω από το ολόγραμμα κύμα W_0 της διασκορπισμένης από το αντικείμενο ακτινοβολίας. Συνεπώς σχηματίζεται το είδωλο O' του αντικειμένου που είναι ταυτόσημο με το πρωτότυπο.

Εν τούτοις η περισσότερο λεπτομερειακή διερεύνηση αποκαλύπτει το γεγονός πως κατά την διάρκεια της διαδικασίας δημιουργίας ένα ακόμη συγκεκριμένο γεγονός έλαβε χώρα που δεν είχε συμπεριληφθεί στην αρχική εκτίμηση. Επιπρόσθετα του πραγματικού ειδώλου O' σχηματίζεται και ένα φανταστικό O'' . Το φανταστικό είδωλο σχηματίζεται σε θέση μεταξύ του παρατηρητή h και του πραγματικού ειδώλου O' . Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί σ' αυτά τα δύο είδωλα επιπροστίθενται με τελικό αποτέλεσμα αμφότερα να παραμορφώνονται σημαντικά.



Σχήμα 18. Η ευθυγραμμισμένη ολογραφική διάταξη του D. Gabor. Στο φιλμ H αποτυπώνεται η φυσική "σκιά" του αντικείμενου O .

Η παρουσία του φανταστικού ειδώλου είναι η άμεση συνέπεια της γενικής ανεπάρκειας της μεθόδου αναπαραγωγής φάσης μέσω του περιορισμού των τμημάτων "επί πλέον ροής" της δέσμης αναφοράς. Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς την αιτία αυτής της ατέλειας. Όταν αναφερθήκαμε στο φαινόμενο της συμβολής (σχήμα 10) αποδείξαμε πως το αποτέλεσμα της επιπρόσθεσης των κυμάτων εξαρτάται από την απόσταση που διανύουν αυτά τα

κύματα μέχρις ότου συναντήσουν το ένα το άλλο. Σ' αυτή την περίπτωση η αντίστοιχη σχέση ισχύει επίσης με αποτέλεσμα το διάγραμμα στο ολόγραμμα δηλαδή το διάγραμμα συμβολής των κυμάτων W_0 και W_s καθορίζεται πλήρως από τις αποστάσεις δ' μεταξύ αυτών των κυμάτων (σχήμα 18α). Εν τούτοις δεν είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς πως είναι δυνατόν να δημιουργηθεί το κύμα W_0'' το οποίο θα διαχωρίζεται από το W_s σε αποστάσεις που θα είναι ίσες με αυτές που διαχωρίζουν το W_s από το W_0' με τη μόνη διαφορά πως αυτό το νέο κύμα θα κινείται στη κορυφή του κύματος W_s ενώ το προηγούμενο κύμα W_0' θα καθυστερεί πίσω του. Το διάγραμμα συμβολής των κυμάτων W_s και W_0' καθορίζεται πλήρως από τις αποστάσεις δ' μεταξύ αυτών των κυμάτων (σχήμα 18β). Το διάγραμμα συμβολής των W και W_0'' θα διαφέρει απ' αυτό των κυμάτων W και W_0' μόνο κατά την κατανομή φάσεων, γεγονός που οφείλεται στο ότι η φωτογραφική πλάκα δεν αντιδρά στη φάση της ακτινοβολίας. Έτσι θα συμπεριφέρεται εντελώς πανομοιότυπα και στα δύο διαγράμματα συμβολής. Συμβαίνει λοιπόν δύο δυνατές τιμές του κυματικού πεδίου να αντιστοιχούν στο ίδιο ολογραφικό διάγραμμα. Φυσικά, το ολόγραμμα δεν μπορεί να επιλέξει τη μία μόνο τιμή και έτσι επαναδημιουργεί και τα δύο πεδία ταυτόχρονα.

Η αρχή της δημιουργίας του φανταστικού ειδώλου παρουσιάζεται στο σχήμα 18β. Εύκολα διαπιστώνεται πως το μέτωπο κύματος W_0'' είναι ένα κατοπτρικό από ανάκλαση του W_0' στο σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s του κύματος αναφοράς. Φυσικά όλα τα στοιχεία των πεδίων που σχηματίζονται από τις κυμάνσεις W_s και W_0'' περιέχουν τα είδωλα O' και O'' τα οποία και επίσης συσχετίζονται με αυτή την κατοπτρική μεταστροφή. Αυτή συνεπάγεται τα εξής: Με σκοπό να δημιουργήσουμε το φανταστικό είδωλο O'' είναι αναγκαίο να απεικονιστεί το αντικείμενο O στο σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στο κάτοπτρο [11]. Όμοια το φανταστικό είδωλο μπορεί να δημιουργηθεί για την περίπτωση που αφορά το σχήμα 17.

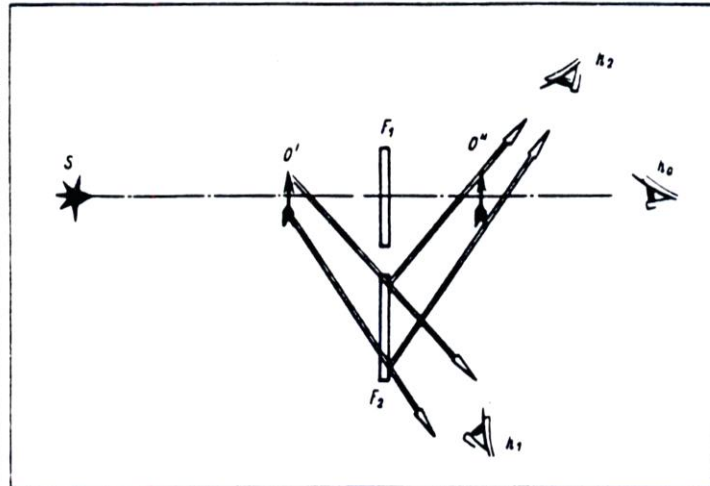
Πέρα από την αμφιβολία της αναπαραγωγής του κυματικού πεδίου και του γεγονότος του φανταστικού ειδώλου που συσχετίζεται με αυτή, η μέθοδος Gabor υπέφερε επίσης και από άλλες ατέλειες. Εν προκειμένω με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου ένας μπορεί να καταγράψει μόνο διαπερατά αντικείμενα όπως λεπτές γραμμές οι οποίες και πρακτικά δεν αφήνουν πολύ σκιά. Το κύμα αναφοράς απουσιάζει στη σκιασμένη περιοχή και φυσικά το ολόγραμμα δεν καταγράφεται σ' αυτή την περιοχή. Τώρα όπως φαίνεται από το σχήμα 18α η μέθοδος Gabor επίσης περιέχει την καταχώρηση του αντικειμένου που φωτίζεται μέσω της μεθόδου "contre - jour" των φωτογράφων δηλαδή με την κάμερα στραμμένη απέναντι από τη φωτεινή πηγή. Εφ' όσον το ολόγραμμα αναπαράγει ότι έχει καταγραφεί σε αυτό, η αναπαραγόμενη εικόνα παρουσιάζεται σ' αυτή την περίπτωση σαν ένα μαύρο περίγραμμα ενάντια σ' ένα φωτεινό υπόβαθρο. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου υστερεί επίσης λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων του πραγματικού και του φανταστικού ειδώλου που προκαλούνται από την αμοιβαία συμβολή όπως επίσης και από μερικές άλλες διαδικασίες.

Όλες αυτές οι ατέλειες περιορίζουν σημαντικά το σκοπό της μεθόδου εφαρμογής. Έτσι εξηγείται ότι ενώ είχε αναπτυχθεί για σχεδόν μια δεκαετία σαν διαδικασία ανάπτυξης κυρίως σε εφαρμογές λύσης προβλημάτων στη μικροσκοπία με ηλεκτρόνια και ακτίνες - X, δεν υπήρχε τότε η παραμικρή υπενθύμιση της δυνατότητας να επιτευχθούν σταθερές

οπτικές εικόνες φυσικών αντικειμένων. Πέραν αυτών, ανεξάρτητα απ' όλους τους περιορισμούς και τις αδυναμίες αυτής της μεθόδου είναι ο Gabor που αναγνωρίζεται σαν ο θεμελιωτής της ολογραφίας. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να θεωρείται απόλυτα δικαιολογημένο. Το βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της ολογραφικής μεθόδου είναι η χρήση του κύματος αναφοράς και ο Gabor ήταν ο πρώτος που κατέγραψε το κυματικό πεδίο με τη βοήθειά του.

Δύο αμερικανοί ερευνητές ο Leith E.N. και ο Upatnieks J. [12,13,14] έκαναν το επόμενο πολύ σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη της ολογραφίας. Στα 1962 - 1964 πρότειναν μια νέα μέθοδο καταγραφής του διαγράμματος συμβολής σε μέσα καταχώρησης δύο διαστάσεων. Η βασική ουσία της προτεινόμενης μεθόδου από τους δύο επιστήμονες εμπεριέχεται στο εξής: όπως ήδη προαναφέρθηκε στη μέθοδο Gabor το πραγματικό και το φανταστικό είδωλο βρίσκονται επ' ευθείας σε σχέση με τον παρατηρητή. Έτσι ο παρατηρητής έβλεπε το ένα είδωλο να επιπροστίθεται στο άλλο και λόγω της αμοιβαίας συμβολής των κυματικών πεδίων που αντιστοιχούν σ' αυτά τα είδωλα και τα δύο υφίστανται σημαντική παραμόρφωση. Στην προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας βελτίωσης της ποιότητας της εικόνας στις ολογραφικές συσκευές με σκοπό την ορατή απεικόνιση της εικόνας ραντάρ, που δημιουργείται από την αποκαλούμενη "πλάγια - παρατήρηση", οι Leith E.N. και Upatnieks J. πρότειναν μία αρκετά απλή αλλά σημαντική βελτίωση της μεθόδου Gabor. Απομάκρυναν την φωτογραφική πλάκα από την περιοχή σκίασης του αντικειμένου (θέση F, του σχήματος 19) και την τοποθέτησαν στην πλάγια περιοχή (θέση F2) [12]. Πραγματοποιώντας αυτό κέρδισαν δύο πράγματα ταυτόχρονα. Πρώτον, το αντικείμενο δεν σκίαζε πλέον το κύμα αναφοράς, έτσι έγινε δυνατή η καταγραφή κάθε αντικειμένου και όχι μόνο εκείνων που ήταν πρακτικά απαλλαγμένα από κάθε σκιά. Δεύτερον, και ίσης σπουδαιότητας με το πρώτο: οι ακτινοβολίες από το πραγματικό και το φανταστικό είδωλο παύουν να επιπροστίθενται και έτσι εξαφανίζεται η παραμόρφωση. Το τελευταίο αυτό σχόλιο χρειάζεται κάποια επιπλέον επεξήγηση. Αναφέροντας γενικά, τα δύο είδωλα O' και O'' παραμένουν στις παλιές τους θέσεις όμως, οι φωτεινές ακτίνες που σχηματίζουν αυτά τα είδωλα (σχήμα 19) υφίστανται έναν χωρικό διαχωρισμό. Οι ακτίνες του πραγματικού ειδώλου ακολουθώντας τη διαδρομή από το θ' μέσω του ολογράμματος F2 στον παρατηρητή h_1 ενώ οι ακτίνες του φανταστικού ειδώλου ακολουθούν τη διαδρομή από το F2 μέσω του O'' στον παρατηρητή h_2 . Μια τέτοια διάταξη επιτρέπει στον παρατηρητή να παρατηρεί τα είδωλα O' και O'' ξεχωριστά όταν μετακινείται από το σημείο h_1 στο σημείο h_2 .

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως η πρώτη εργασία των Leith E.N. και Upatnieks J. από τον κατάλογο των εργασιών τους που αναφέρονται εδώ, ακολούθησε τη τύχη της μελέτης του Gabor. Δεν κατάφερε αρχικά να έχει κάποια ανταπόκριση στους επιστημονικούς κύκλους παραμένοντας στην αφάνεια. Έτσι, όλο και περισσότερο η ιδέα της άμεσης εξάρτησης της απόδοσης της πλήρους διαδικασίας από το βαθμό διαχωρισμού του πεδίου άμεσα εμφανίζεται στη μελέτη του Gabor.



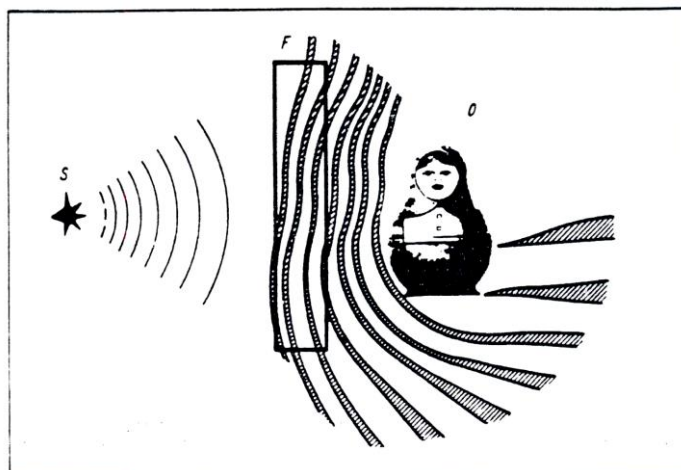
Σχήμα 19. Η μη ευθυγραμμισμένη ολογραφική διάταξη των E.N. Leith και J. Upatnieks είναι η βελτιωμένη εξέλιξη της αρχικής διάταξης Gabor.

Όμως το 1964 αυτοί οι ίδιοι συγγραφείς δημοσίευσαν μια εργασία που θεωρείται το κρίσιμο σημείο καμπής στην ιστορία της ανάπτυξης της ολογραφίας. Στην εργασία τους αυτή οι Leith E.N. και Upatnieks J. εφάρμοσαν στη πρώτη τους διάταξη μια νέα αυστηρά μονοχρωματική πηγή φωτός - το laser - και έτσι πέτυχαν μια σταθερή εικόνα ενός αυθαίρετα επιλεγμένου αντικειμένου. Πιόνια από σκάκι τοποθετημένα στο επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν σαν ένα τέτοιο αντικείμενο. Βέβαια η δυνατότητα επίτευξης ολογραφικών ειδώλων που δεν ξεχωρίζουν από τα πρωτότυπα και η δυνατότητα ανάπτυξης της τεχνικής που δημιουργεί μια απόλυτη αίσθηση πραγματικής παρουσίας αντικειμένου ήταν ήδη γνωστή. Πιο συγκεκριμένα αυτές οι δυνατότητες άρχισαν να εμφανίζονται και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ολογραφικής διαδικασίας που απασχολεί την καταγραφή σε μέσα τριών διαστάσεων [15]. Με τα ίδια μέσα οι Leith E.N. και Upatnieks J. ήταν οι πρώτοι που δημιούργησαν τέτοιες εντυπωσιακές εικόνες και έτσι απέδειξαν τη δυνατότητα για άμεσες πρακτικές εφαρμογές. Η επιτυχία τους έκανε πολύ μεγάλη εντύπωση στη κοινή γνώμη και λειτούργησε σαν καταλύτης που ενθάρρυνε μία περισσότερο έντονη ανάπτυξη της μεθόδου. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως τα πρώτα 16 χρόνια της ανάπτυξης της ολογραφίας, από το 1948 στο 1964 σηματοδεύτηκαν από τη δημοσίευση σ' αυτό το αντικείμενο περίπου 30 εργασιών ενώ στον πρώτο μόνο χρόνο-μετά τη δημοσίευση αυτής της σημαντικής μελέτης ο αριθμός των δημοσιευμένων σχετικών εργασιών ξεπέρασε τις 100.

2. Χαρακτηριστικές ιδιότητες απεικόνισης τρισδιάστατου διαγράμματος στάσιμου κύματος (Διαδικασία ολογραφίας που απασχολεί τρισδιάστατη καταγραφή)

Το 1958 ο Yu. N. Denisjuk έκανε ερευνητικές μελέτες που σκοπό είχαν την ανάπτυξη οπτικής διάταξης για εικόνα που μπορούσε να αναπαράγει μια απόλυτη οπτική εντύπωση της πραγματικής παρουσίας των αντικειμένων που απεικονίζει. Στη πορεία της εργασίας του ο συγκεκριμένος ερευνητής καλλιέργησε επίσης την ιδέα της καταγραφής του κυματικού πεδίου με τη βοήθεια της ανάμιξης του στο κύμα αναφοράς. Αρχικά ενεργώντας στις απαιτήσεις του αξιώματος Huygens, ο Yu. N. Denisjuk προσπάθησε να καταγράψει το τρισδιάστατο διάγραμμα συμβολής με μεταγενέστερη αναπαραγωγή της τιμής του πεδίου στο συγκεκριμένο επίπεδο με τη βοήθεια αυτού του διαγράμματος. Εδώ ο Yu. N. Denisjuk ακολούθησε τον τρόπο σκέψης του Gabor αν και τελικά διαφοροποιούμενος από τη μέθοδο του Gabor στη νέα μέθοδο η δέσμη αναφοράς διαδίδεται αντίθετα από τη δέσμη του αντικειμένου. Αυτή η συνθήκη προκάθρισε τα επόμενα στάδια πορείας της ερευνητικής αυτής εργασίας.

Αληθινά, όπως προαναφέρθηκε το διάγραμμα συμβολής χαρακτηρίζεται γενικά από μια τρισδιάστατη υφή. Αυτό εκτείνεται όχι μόνο στην περίπτωση της συμβολής κυμάτων από δύο σημειακές πηγές όπως αναφέρθηκε στο σχήμα 9 αλλά επίσης και στην περίπτωση όπου το απλού σχήματος κύμα αναφοράς συμβάλλει με το σύνθετο κυματικό πεδίο ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα αυθαίρετο αντικείμενο. Το σχήμα 20 αποδίδει μία προσεγγιστική διασαφήνιση του σχηματοποιημένου στάσιμου κύματος που δημιουργείται σ' αυτή την περίπτωση. Όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα, οι επιφάνειες των κοιλιών του στάσιμου κύματος έχουν ροή που χαρακτηρίζει το αντικείμενο δημιουργώντας μια δομή που μοιάζει με το κυματικό διάγραμμα της επιφάνειας του νερού που περιβάλλει ένα κινούμενο πλοίο. Στην περιοχή μεταξύ φωτεινής πηγής και αντικειμένου όπου το κύμα της φωτεινής πηγής και το ανακλώμενο από το αντικείμενο κύμα ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις το διάγραμμα στάσιμου κύματος είναι έντονα συμπιεσμένο και η απόσταση μεταξύ των επιφανειών των κοιλιών είναι περίπου ίση με το μισό του μήκους κύματος, γεγονός που οφείλεται στο ότι η γωνία θ των ευθειών διεύθυνσης της διάδοσης των κυμάτων είναι ίση με 180° (σχέση 2). Καθώς το διάγραμμα στάσιμου κύματος εκτείνεται στην πλευρική περιοχή, η απόσταση μεταξύ των κοιλιών αυξάνει. Η ιδέα της ολογραφικής καταγραφής από ένα κύμα μετωπικής διάδοσης εμπεριέχει την τοποθέτηση της φωτογραφικής πλάκας F μεταξύ της φωτεινής πηγής S και του αντικειμένου O, σε περιοχή όπου η απόσταση μεταξύ των επιφανειών που χαρακτηρίζουν τις κοιλίες είναι η μικρότερη δυνατή. Δεν είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς πως εάν ένα επίπεδο διάγραμμα συμβολής πρόκειται να καταγραφεί, δηλαδή εάν θελήσουμε να καταγράψουμε το επίπεδο τμήμα ενός διαγράμματος στάσιμου κύματος, είναι αναγκαίο το πάχος του φωτοπαθούς επιστρώματος να είναι σημαντικά μικρότερο συγκρινόμενο με την απόσταση που διαχωρίζει τις επιφάνειες των κοιλιών. Λόγω του γεγονότος ότι η απόσταση μεταξύ των κοιλιών στην περίπτωση όπου οι δέσμες συγκρούονται μετωπικά είναι περίπου $0.1 \mu\text{m}$, το πάχος του φωτοπαθούς επιστρώματος της φωτογραφικής πλάκας πρέπει να είναι της τάξεως του κλάσματος ενός εκατοστού του μικρού (μm). Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός τέτοιου φωτογραφικού υλικού απεδείχθη άκαρπη και έτσι το πρόβλημα φάνηκε προς στιγμή να μην έχει ελπίδα λύσης.

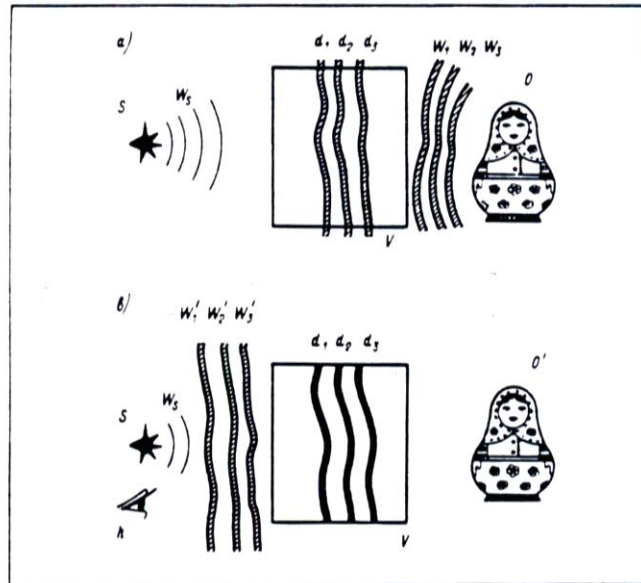


Σχήμα 20. Διάγραμμα χωρικού στάσιμου κύματος που περιβάλλει το αντικείμενο O όταν σ' αυτό προσπέσει μονοχρωματική ακτινοβολία από πηγή S . Η καταγραφή πραγματοποιείται στο διαπερατό ολογραφικό φιλμ F .

Σήμερα είναι γνωστό πως όλες αυτές οι δυσκολίες μπορούσαν εύκολα να ξεπεραστούν έχοντας χρησιμοποιήσει το διερχόμενο κύμα αναφοράς αντί αυτό της μετωπικής σύγκρουσης. Όπως ήδη μνημονεύτηκε και προηγούμενα η περίοδος του διαγράμματος στάσιμου κύματος μπορεί να γίνει οσοδήποτε μεγάλη είναι επιθυμητή σε αυτή την περίπτωση. Εν τούτοις σ' εκείνα τα χρόνια ο Yu. N. Denisyuk δεν ήταν γνώστης της έρευνας Gabor και έτσι δεν ήταν ενήμερος αυτής της δυνατότητας.

Τελικώς έγινε μια υπόθεση πως το τριών διαστάσεων διάγραμμα περιέχει επίσης πληροφορία για τη φάση και το πλάτος του κυματικού πεδίου. Φάνηκε έτσι πως ήταν εντελώς φυσικό η πληροφορία σ' αυτές τις παραμέτρους να περιέχεται μέσα στις παράξενες συστροφές και τις μεταβολές της έντασης των επιφανειών που αντιστοιχούν στις κοιλίες των στάσιμων κυμάτων.

Διάφορες εκδοχές της θεωρίας όπως και ένα πείραμα απέδειξε ως αληθινή αυτή την υπόθεση [15-17]. Σαν αποτέλεσμα βρέθηκε πως οι χαρακτηριστικές ιδιότητες μέρους ενός δισδιάστατου στάσιμου κύματος δεν ήταν τίποτε άλλο παρά μια πολύ αδύνατη λάμψη από ανάκλαση των ιδιοτήτων καταγραφής του πλήρους τρισδιάστατου διαγράμματος. Στο σχήμα 21α παρουσιάζεται η διαδικασία καταγραφής ενός τρισδιάστατου ολογράμματος. Αντικείμενο O υπόκειται σε έκθεση από μονοχρωματική ακτινοβολία της πηγής S . Η ακτινοβολία διασκορπίζεται από το αντικείμενο (κύματα W_1, W_2, \dots) και συμβάλλει με αυτήν που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή (κύμα W_s) δημιουργώντας έτσι ένα σταθερό διάγραμμα στάσιμου κύματος (οι επιφάνειες των κοιλιών σημειώνονται με d_1, d_2, d_3, \dots). Ένας ορισμένος όγκος V γεμάτος με διαπερατό φωτοπαθές υλικό τοποθετείται μέσα στο πεδίο στάσιμων κυμάτων. Μετά την έκθεση και την μετέπειτα χημική επεξεργασία, σχηματίζεται μια δομή εντός αυτού του όγκου. Η πυκνότητα της δομής διαμορφώνει κατάλληλα την κατανομή του φωτός εντός του στάσιμου κύματος.



Σχήμα 21. Οι διαδικασίες της καταγραφής και της επαναδημιουργίας των μετώπων κύματος στο χώρο.

Τώρα ας αναφερθούμε στο θέμα της επαναδημιουργίας (σχήμα 21 β). Ας υποθέσουμε πως το τρισδιάστατο πρότυπο στάσιμου κύματος που επιτεύχθηκε φωτίζεται από την πηγή S. Εν τούτοις αυτή τη φορά η φωτεινή πηγή δεν πρέπει αναγκαστικά να είναι μονοχρωματική διότι για το σκοπό της επαναδημιουργίας ενός τρισδιάστατου ολογράμματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και συμβατική πηγή λευκού φωτός. Η εικόνα που αποκαλύπτεται στη διάρκεια του φωτισμού ενός τρισδιάστατου ολογράμματος είναι πράγματι εντυπωσιακή. Η ανακλώμενη ακτινοβολία από ένα τέτοιο ολόγραμμα δίνει μία πάρα πολύ ακριβή αναπαραγωγή όλων των παραμέτρων του κυματικού πεδίου, δηλαδή πρακτικά του πλάτους, της φάσης και της φασματικής σύστασης. Ο παρατηρητής βλέποντας αυτό το ακριβές αντίγραφο του πεδίου πιστεύει πως στο χώρο πίσω από το ολόγραμμα υπάρχει ένα μοναδικά έγχρωμο χωρικό είδωλο για το οποίο δεν μπορεί να διακρίνει καμία διαφορά από το πρωτότυπο, σε ότι αφορά την εξωτερική του εμφάνιση. Λανθασμένα είδωλα και παραμορφώσεις δεν υφίστανται σ' αυτή την περίπτωση. Το αντικείμενο μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα χωρίς να συναντά την απαίτηση της απουσίας σκιάς. Το είδωλο μοιάζει όπως ένα συμβατικό κατοπτρικό είδωλο και δεν είναι ένα μαύρο περίγραμμα επί ενός λαμπερού υπόβαθρου. Τέτοιου είδους ολογράμματα διακρίνονται και από την ικανότητά τους να αναπαράγουν χρώμα. Επιλέγουν από το λευκό φως και ανακλούν πίσω την ακτινοβολία συγκεκριμένης φασματικής σύστασης.

Το πρότυπο δράσης του τρισδιάστατου ολογράμματος μπορεί να εξηγηθεί με πέντε τουλάχιστον διαφορετικούς τρόπους. Η πιο απλή εξήγηση είναι όμοια με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στην αναφορά της περίπτωσης των δύο διαστάσεων. Βασίζεται στο γεγονός πως σε συμφωνία με την προηγούμενη αίσθηση της ιδέας της συμβολής οι επιφάνειες κοιλίων στάσιμου κύματος περιέχουν εκείνα μόνο τα σημεία στο χώρο όπου οι φάσεις της ακτινοβολίας του κυματικού πεδίου που ανακλάται από το αντικείμενο και αυτές που προσπίπτουν στο αντικείμενο ταυτίζονται. Από πρώτη εκτίμηση ένας τέτοιος ισχυρισμός φαίνεται εσφαλμένος. Πράγματι, εάν οι τιμές των κυμάτων αντικειμένου και αναφοράς συμπίπτουν σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια, τότε σύμφωνα με την αρχή

Huygens αυτά τα πεδία πρέπει επίσης να ταυτίζονται και σε όλο τον υπόλοιπο χώρο. Την ίδια στιγμή είναι προφανές πως τα πεδία του αντικειμένου και της πηγής είναι αυθαίρετα και δεν εξαρτώνται καθόλου το ένα από το άλλο.

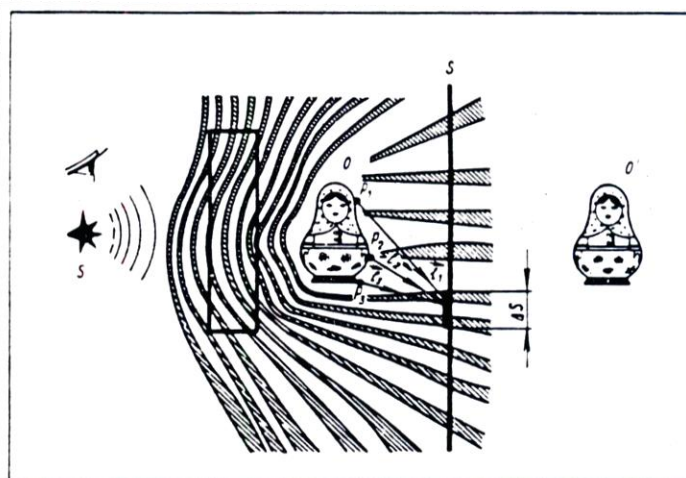
Η πιο προσεκτική διερεύνηση όμως αποκαλύπτει πως δεν υπάρχει αντίφαση με το αξίωμα του Huygens. Σε αυτή την περίπτωση η σύμπτωση των οριακών συνθηκών στις επιφάνειες κοιλιών είναι ακόμα κάπως ασυμπλήρωτη, διότι η προσπίπτουσα στο αντικείμενο ακτινοβολία (κύμα αναφοράς) και η αντίστοιχη ανακλώμενη από το αντικείμενο διαπερνούν τις επιφάνειες κοιλιών σε αμοιβαία αντίθετες διευθύνσεις. Είναι εντελώς φυσικό να υπάρξει η ιδέα πως ήταν δυνατό να αντιστραφεί η κατεύθυνση του κύματος αναφοράς στα σημεία των συγκεκριμένων επιφανειών δηλαδή εκεί όπου οι φάσεις του ταυτίζονται με τις φάσεις της ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από το αντικείμενο. Τότε οι συνοριακές συνθήκες των κυμάτων στις επιφάνειες θα πρέπει να ταιριάζουν απόλυτα και το κύμα αναφοράς θα μετασχηματίζεται στο κύμα της ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από το αντικείμενο.

Το τριών διαστάσεων ολόγραμμα επιτελεί αυτή ακριβώς τη διαδικασία. Μετά τη χημική επεξεργασία, όπου ο μεταλλικός άργυρος εναποτίθεται στις εκτεθειμένες περιοχές του φωτοπαθούς επιστρώματος, οι επιφάνειες κοιλιών μετασχηματίζονται σε ιδιόμορφους καμπύλους καθρέπτες. Κατά τη διάρκεια της επαναδημιουργίας, όταν το κύμα αναφοράς αλληλεπιδρά με ένα τέτοιο κάτοπτρο, η κατεύθυνση της διάδοσης της ακτινοβολίας αντιστρέφεται. Αυτή η ενέργεια επιτελείται ακριβώς στις περιοχές όπου οι φάσεις του αντικειμένου και του κύματος αναφοράς συμπίπτουν, έτσι η ακτινοβολία του κύματος αναφοράς αρχίζει την κίνησή του με την ίδια φάση όπως ακριβώς ήταν στο κύμα που διασκορπίστηκε από το αντικείμενο.

Έτσι, ακόμα και μία μόνο ξεχωριστή επιφάνεια κοιλιών να καταγραφεί στο ολόγραμμα, μετασχηματίζει το κύμα αναφοράς στο κύμα της ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από το αντικείμενο. Όσον αφορά ολόκληρο το σύστημα των κατοπτρικών επιφανειών που ακολουθούν το ένα το άλλο, ο ρόλος του περιορίζεται στην αναπαραγωγή της φασματικής σύστασης της ακτινοβολίας όμοια με τη διαδικασία που συμβαίνει στη μέθοδο Lippmann της έγχρωμης φωτογραφίας. Δηλαδή από το συνεχές φάσμα της προσπίπτουσας στο ολόγραμμα το σύστημα των κατοπτρικών επιφανειών επιλέγει και ανακλά πίσω μόνο τις μονοχρωματικές συνιστώσες που έχουν ήδη καταγραφεί σ' αυτό κατά τη διάρκεια της έκθεσης.

Κλείνοντας συμπερασματικά την αναφορά για δισδιάστατες και τρισδιάστατες καταγραφές θα πρέπει να αναφερθεί πως η περισσότερο πλήρης πληροφορία του κύματος του αντικειμένου περιέχεται εις το άπειρο στερεό διάγραμμα στάσιμου κύματος που περιβάλλει το αντικείμενο (σχήμα 22). Με τη βοήθεια του φωτογραφικού πρότυπου γ' αυτό το διάγραμμα είναι δυνατόν να αναδημιουργηθούν πρακτικά όλες οι παράμετροι του κυματικού πεδίου που διασκορπίζονται από το αντικείμενο δηλαδή το πλάτος, η φάση καθώς και η φασματική του σύσταση. Αυτή είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα του τρισδιάστατου διαγράμματος στάσιμου κύματος που παρουσιάζει το κύριο φαινόμενο της ολογραφίας. Οι υπόλοιποι μέθοδοι που προέρχονται απ' αυτό θεωρούνται ιδιαίτερες περιπτώσεις. Μια τέτοια συμπεριλαμβανόμενη σχέση των ολογραφικών μεθόδων

εκπηγάζει από την πολύ σημαντική ιδιότητα του συγκεκριμένου διαγράμματος να επιδέχεται διάσπαση χωρίς να ζημιώνεται η αρτιότητα της εικόνας που αναπαράγεται από το αρχικό ολόγραμμα. Αυτό σημαίνει, πως η πλήρης εικόνα του αντικειμένου καταχωρείται όχι μόνο σε όλο το διάγραμμα των τρισδιάστατων στάσιμων κυμάτων αλλά και σε κάθε ξεχωριστό του τμήμα το ίδιο καλά. Συγκεκριμένα το περιορισμένο τμήμα του όγκου V του διαγράμματος (σχήμα 22) κάνει επίσης δυνατή την επαναδημιουργία του τρισδιάστατου σχηματισμού του πεδίου και της φασματικής του σύστασης. Ο περιορισμός του όγκου καταγραφής έχει-σαν μοναδικό αποτέλεσμα την ελάττωση της ακρίβειας αναπαραγωγής των παραμέτρων του πεδίου. Επιπλέον μια μάλλον πιστή καταγραφή των κυματικών πεδίων περιέχει το ίδιο καλά όχι μόνο στο τριών διαστάσεων στοιχείο αλλά και στα επίπεδα μέρη του διαγράμματος στάσιμου κύματος (π.χ. τμήμα S του σχήματος 22). Εντούτοις η επίπεδη καταγραφή είναι αρκετά φτωχή και ασαφής, γεγονός που δηλώνεται από την παρουσία του φανταστικού ειδώλου. Επιπρόσθετα μια τέτοια καταγραφή δεν αναπαράγει την φασματική σύσταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ολόγραμμα κατά την διάρκεια της έκθεσης. Η αναφορά αυτής της ιδιότητας του ολογράμματος να διαχωρίζεται χωρίς να βλάπτεται η εικόνα μπορεί να συνεχιστεί περαιτέρω. Εκείνο που συμβαίνει είναι πως η εικόνα ολόκληρου του αντικειμένου περιέχεται σε κάθε τμήμα του επίπεδου μέρους του διαγράμματος στάσιμου κύματος (περιοχή $\Delta\epsilon$ του σχήματος 22). Έτσι ένας μπορεί να διαχωρίσει ένα επίπεδο ολόγραμμα σε πολλά μέρη αλλά η ολοκληρωμένη εικόνα του αντικειμένου θα είναι ακόμη ορατή μέσω καθενός τμήματος από το ολόγραμμα. Αυτή η αδυναμία επηρεασμού του ολογράμματος, για καταστροφή μοιάζει μεν μυστηριώδης σε πρώτη αντιμετώπιση όμως εξηγείται αρκετά απλά. Κάθε σημείο της επιφάνειας του αντικειμένου διασκορπίζει την ακτινοβολία σε όλες τις κατευθύνσεις. Σαν αποτέλεσμα, στη διαδικασία καταγραφής ακτινοβολία από όλα τα σημεία του αντικειμένου προσπίπτει στο τμήμα $\Delta\epsilon$ του ολογράμματος (δηλαδή για την περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 22 ακτίνες ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 καταγράφουν τα είδωλα των σημείων P_1, P_2, P_3 του αντικειμένου στο τμήμα $\Delta\epsilon$ του ολογράμματος). Στη διαδικασία της επαναδημιουργίας αυτή η ακτινοβολία αποκαθίσταται και έτσι η εικόνα ολόκληρου του αντικειμένου μπορεί να γίνει ορατή μέσα από κάθε μικροσκοπικό τμήμα του ολογράμματος.

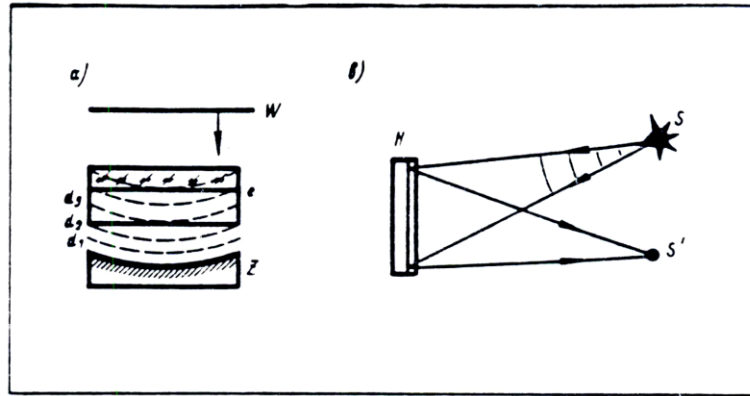


Σχήμα 22. Η πληροφορία κατανέμεται διασκορπισμένη σε όλη την επιφάνεια του ολογραφικού φιλμ.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η τρισδιάστατη καταγραφή δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην καταχώρηση των δεσμών μετωπικής σύγκρουσης και πως η κυρίαρχη φύση μιας τέτοιας καταγραφής δεν είναι μόνο μια αυθαίρετη θεωρητική αλήθεια. Πραγματικά, είναι η δύο διαστάσεων καταγραφή που αποτελεί σπάνια εξαίρεση αν και πρακτικά πρωτοεμφανίστηκε στη διαδικασία της απεικόνισης ακουστικών πεδίων και πεδίων ραδιοφωνικών ζωνών. Αληθινά είναι εύκολο να υπολογιστεί με τη βοήθεια της σχέσεως 2 πως η χωρική περίοδος του διαγράμματος συμβολής που καταχωρείται στο ολόγραμμα είναι της τάξεως του 1 μm εάν το μήκος κύματος λ της ορατής ακτινοβολίας θεωρηθεί περίπου ίσο με 0.5 μm και η γωνία θ που ορίζεται μεταξύ της δέσμης αναφοράς και αυτής του αντικειμένου είναι ίση με 30°. Μία λογική τιμή για το πάχος του φωτοπαθούς επιστρώματος της φωτογραφικής πλάκας είναι τουλάχιστον 6 μm . Αυτή η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων φωτοπαθούς επιστρώματος και διαγράμματος συμβολής αρκεί ώστε να αποτρέπει πλήρως τη δημιουργία του φανταστικού ειδώλου ακόμα και στην περίπτωση που το ολόγραμμα καταγράφεται με τη μέθοδο που επινόησαν οι E. Leith και J. Upratnieks.

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε στο ολόγραμμα σαν μια συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιείται προκειμένου να αναπαραχθεί το κυματικό πεδίο που σκεδάζεται από το αντικείμενο. Εν τούτοις μια τέτοια εξήγηση είναι κάπως ανεπαρκής, είναι σημαντικά ευρύτερη η ιδέα που προσπαθούμε να προσδιορίσουμε. Στην πραγματικότητα τα κυματικά πεδία μπορούν να αναπαραχθούν το ίδιο καλά όχι μόνο από ένα ολόγραμμα αλλά και από άλλες διατάξεις. Για παράδειγμα, τα κυματικά πεδία μπορούν να αναπαραχθούν με τη βοήθεια ενός συστήματος πηγών ακτινοβολίας που ελέγχεται φασικά. Το ολόγραμμα αναπαράγει κατάλληλα τα κυματικά πεδία με τον δικό του ιδιαίτερο τρόπο που οφείλεται στην ανάκλαση της ακτινοβολίας από κάποιο υλικό δημιουργήμα. Με αναφορά αυτόν το μηχανισμό δράσης το ολόγραμμα μπορεί να καθοριστεί περισσότερο σαν ένα οπτικό ισοδύναμο του αντικειμένου δηλαδή σαν ένα δημιουργήμα που δρα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που το αντικείμενο θα αντιδρούσε. Απ' αυτή την άποψη η βασική αιτία της ομοιότητας μεταξύ του ολογράμματος και του αντικειμένου συνίσταται στο γεγονός πως το υλικό ολόγραμμα απεικονίζει βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του υλικού αντικειμένου και σαν συνέπεια αυτού αναπαράγει τα κυματικά πεδία.

Τέτοιες σκέψεις καταλήγουν στα παρακάτω συμπεράσματα. Για παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί πως το ολόγραμμα ενός αντικειμένου όπως ένας κοίλος καθρέπτης πρέπει να είναι κατά ένα μεγάλο βαθμό ένας καθρέπτης από μόνος του. Η διαδικασία επίτευξης ενός τέτοιου ολογράμματος παρουσιάζεται στο σχήμα 23α. Το αντικείμενο που είναι το κοίλο κάτοπτρο Z υφίστανται την έκθεση του μονοχρωματικού κύματος W. Η ακτινοβολία ανακλάται από το κάτοπτρο και προστιθέμενη με την προσπίπτουσα δημιουργεί ένα σύστημα στάσιμων κυμάτων d_1, d_2, d_3, \dots στην περιοχή μπροστά από το κάτοπτρο. Αυτό το σύστημα των στάσιμων κυμάτων εκτυπώνεται στο φωτοπαθές επίστρωμα της φωτογραφικής πλάκας e. Το ολόγραμμα που επιτυγχάνεται μ' αυτό τον τρόπο αποκαλύπτει τις οπτικές ιδιότητες του αρχικού κάτοπτρου όπως ήδη έχει αποδειχθεί και πειραματικά [16]. Ιδιαίτερα, εάν η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη πηγή S κατευθύνεται στο ολόγραμμα H το τελευταίο θα επενεργήσει σαν κοίλο κάτοπτρο και θα εστιάσει την ακτινοβολία στο είδωλο S' της πηγής (σχήμα 23β).



Σχήμα 23. Η συμπεριφορά ολογράμματος ενός κοίλου κατόπτρου Z.

Η πιο λεπτομερειακή ανάλυση που διαχειρίστηκε τα αποκαλούμενα αντικείμενα φάσης έδειξε πως το τρισδιάστατο ολόγραμμα αποκαλύπτει πραγματικά μια τάση αντιγραφής της δομής του αντικειμένου. Αυτή η διαδικασία γίνεται προφανής μόνο εάν το αντικείμενο και το ολόγραμμα απεικονιστούν στον αποκαλούμενο χώρο συχνότητας όπως είναι ο μετασχηματισμός Fourier στην πυκνότητα αρμονικών [18]. Εντούτοις ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι προσαρμοσμένος να πιστοποιεί τα είδωλα στο συμβατικό χώρο και έτσι το ολόγραμμα (το ίδιο το ολόγραμμα και όχι το είδωλο που επαναδημιουργείται απ' αυτό) δεν φαίνεται όμοιο με το αντικείμενο στους οφθαλμούς μας.

Η ιδιότητα του ολογράμματος να αντιγράφει την δομή αντικειμένου είναι μια από τις πιο αναπάντεχες απόψεις στην ανάπτυξη της ιδέας του "ειδώλου". Εκείνο που πραγματικά συμβαίνει είναι πως το ολόγραμμα αποτελεί ένα μοναδικό αντίγραφο του αντικειμένου ^αι μπορεί έτσι να θεωρηθεί σαν μια τάση στην ανάπτυξη της γλυπτικής. Προς το παρόν είναι αρκετά δύσκολο να προβλέψουμε πόσο μακριά μπορεί να πάει η αναλογία μεταξύ της ολογραφίας και της γλυπτικής και εάν θα είναι δυνατόν στο μέλλον να επιτυγχάνουμε πανομοιότυπα αντίγραφα μ' αυτό τον τρόπο. Εν τούτοις, σ' αυτό το στάδιο είναι προφανές ότι η σύγχρονη επιστήμη έχει απλά προσεγγίσει επιφανειακά την πολύ σημαντική ικανότητα των αντικειμένων να είναι ανακλαστικά μαζί με όλες τις ιδιότητές τους και πως αυτή η ικανότητα διεισδύει σε μεγάλα βάθη της υλικής δομής.

Με όρους τις ιδέες που αναφέρθηκαν είναι δυνατόν να δοθεί η δεύτερη κάπως διαφορετική εξήγηση του πρωταρχικού φαινομένου που βρίσκεται στη βάση της ολογραφίας. Αυτό προσδιορίζεται σαν μια ιδιότητα του τρισδιάστατου διαγράμματος στάσιμου κύματος που σχηματίζεται γύρω από το αντικείμενο να αναγράφει τα δομικά χαρακτηριστικά του.

Εν τούτοις, ακόμη και αυτή η ευρεία εξήγηση είναι αρκετά ανεπαρκής στο να συμπεριλάβει το συγκεκριμένο φαινόμενο εντός των ορίων του. Εκείνο που συμβαίνει είναι πως τα στάσιμα κύματα δεν είναι οι μοναδικοί προνομιακοί κάτοχοι των ιδιοτήτων απεικόνισης. Η ένταση των κινούμενων κυμάτων κατέχει επίσης ανάλογες ιδιότητες [19]. Συγκεκριμένα, είναι γνωστό πως εάν τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που συμμετέχει στη συμβολή (δηλαδή αυτή των W_1 και W_2 κυμάτων) διαφέρουν, το διάγραμμα συμβολής που σχηματίζεται έτσι, θα μετακινείται στο χώρο με μια δεδομένη ταχύτητα. Εάν υποθέσουμε πως το αντίστοιχα ταξιδεύον υλικό δημιουργήμα σχηματίζεται σε χώρο κυμάτων τέτοιας

έντασης που ταξιδεύουν, τότε είναι εύκολο να αποδειχθεί πως μια τέτοια δομή μετατρέπεται από τις συνιστώσες που συμβάλλουν (π.χ. κύμα W_1) ακριβώς στη δεύτερη συνιστώσα (κύμα W_2) αξιοποιώντας τη διαφορά στα μήκη κύματός τους. Εάν για παράδειγμα το μήκος κύματος του W_1 , είναι λ_1 και αυτό του W_2 , λ_2 τότε το κύμα W_1 μετά την ανάκλαση από το πρότυπο της έντασης οδεύοντος κύματος θα αλλάξει έτσι ώστε το μήκος κύματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας να ισούται με λ_2 δηλαδή με το μήκος κύματος της δεύτερης συνιστώσας W_2 που συμβάλλει. Μελετώντας αυτή την περίπτωση, γίνεται αποδεκτό πως είναι πιο σωστό όταν αναφερόμαστε στις χαρακτηριστικές ιδιότητες απεικόνισης των κυμάτων έντασης και στις θεμελιώδεις αρχές της ολογραφίας, να εννοούμε όχι μόνο τα στάσιμα κύματα αλλά και τα αντίστοιχα οδεύοντα. Εν τούτοις η περίπτωση των οδεύοντων κυμάτων είναι κυρίως θέμα της μη γραμμικής οπτικής και βρίσκεται αρκετά μακριά από το παρόν πλαίσιο της ολογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

ΟΛΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή

Κάθε εφαρμογή της ολογραφίας, βασίζεται σε κάποιο ειδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του ολογράμματος που αποκαλύπτει αυτή ή την άλλη δυνατότητα που είναι ανέφικτη με τις μεθόδους της κλασικής οπτικής όπως για παράδειγμα η δυνατότητα αντιστροφής των μετώπων κύματος. Ο όρος "ιδιότητες ολογράμματος" αναφέρεται επίσης και στην επίδραση που ασκείται στο ολόγραμμα από τις παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου φωτογραφικού υλικού, από τις πηγές ακτινοβολίας που καταγράφουν και επαναδημιουργούν και από τη γεωμετρία του χρησιμοποιούμενου οπτικού συστήματος για καταγραφή και επαναδημιουργία. Αυτές οι τελευταίες ιδιότητες είναι συγκεκριμένου ενδιαφέροντος για πρακτικούς σκοπούς όχι μόνο διότι έτσι είναι δυνατόν να επιλεγούν οι σωστές διατάξεις για το πείραμα, αλλά και επίσης διότι ανοίγουν νέες προοπτικές στη διερεύνηση των φωτογραφικών υλικών και των πηγών ακτινοβολίας. Μερικές απ' αυτές τις ιδιότητες, όπως η δυνατότητα διαχωρισμού ενός ολογράμματος σε τμήματα χωρίς να θιγεί η ακεραιότητα της αναπαραγόμενης εικόνας αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ας αναφερθούμε τώρα σε μερικές άλλες συγκεκριμένες ιδιότητες του ολογράμματος που συμμετέχουν συχνά σε πρακτικές εφαρμογές.

1. Επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού καταγραφής στο ολόγραμμα

Οι ιδιότητες του ολογράμματος προσδιορίζονται με όρους που εξασφαλίζουν την ενεργό αντίληψη των πρακτικών μεθόδων δημιουργίας του. Έτσι, ευχάριστο παραμένει το γεγονός πως και οι πιο σημαντικές ιδιότητες του υλικού καταγραφής εμφανίζουν μια ουσιαστική ανεξαρτησία επηρεασμού στο σχηματισμό της αναπαραγόμενης εικόνας από το

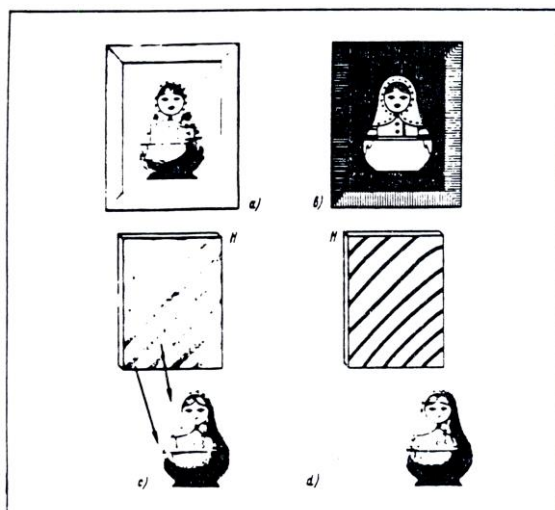
ολόγραμμα. Αυτή η σημαντική ιδιότητα του ολογράμματος ήταν αργή και διακριτική στην αποκάλυψή της και ήταν αποτέλεσμα σειράς ερευνών που πραγματοποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές. Ο Denis Gabor ανέπτυξε την θεωρία της ολογραφίας που σκόπευε να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση της διαδικασίας καταγραφής πλάτους. Σ' αυτή τη διαδικασία το διάγραμμα συμβολής αποτυπώνεται στη φωτογραφική πλάκα σαν μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης του φωτός. Η βασική απαίτηση αυτής της θεωρίας ήταν πως το χρησιμοποιούμενο υλικό για τη καταγραφή του ολογράμματος πρέπει να εμφανίζει ένα αρνητικό ηλίκιο κοντράστ γ (δηλαδή το ολόγραμμα πρέπει να είναι μια θετική εικόνα) το οποίο πρέπει να είναι ίσο ακριβώς με $1/2$.

Η διαδικασία της ολογραφίας δημιουργούσε όμως αποτελέσματα που απαιτούσαν τη συνθήκη: $\gamma = -1/2$. Έπρεπε βεβαίως να ικανοποιούνται συνθήκες από την εμπειρία μεθόδων στη τέχνη της φωτογραφίας. Εν τούτοις ο Gabor κατέγραψε τα ολογράμματά του σαν αρνητικά, και έτσι ανέτρεψε κατά ένα πολύ περίεργο τρόπο τις απαιτήσεις της δικής του θεωρίας.

Η έρευνα που ακολούθησε αποκάλυψε πως η εικόνα του αντικειμένου μπορεί να δημιουργηθεί ακόμη και όταν η καταγραφή έχει ένα γνήσιο χαρακτήρα φάσης δηλαδή όταν το ολόγραμμα είναι διαπερατό και επηρεάζει μόνο τη φάση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σ' αυτή την περίπτωση η μεταβολή της φάσης μπορεί να προκληθεί είτε από τη μεταβολή του παράγοντα διάθλασης του φωτογραφικού υλικού, ή από τη μεταβολή του ανάγλυφου του [20].

Επίπεδα αλλά και τρισδιάστατα ολογράμματα μπορούν να ανακλούν το ίδιο καλά. Σ' αυτή την περίπτωση το ολόγραμμα μπορεί να καταγραφεί με τη διαμόρφωση του παράγοντα ανάκλασης ή με την αλλαγή του ανάγλυφου της ανακλώμενης επιφάνειας [15, 21]. Επιπλέον το ολόγραμμα μπορεί να καταγραφεί με τη μεταβολή των ιδιοτήτων πόλωσης του μέσου καταγραφής [22].

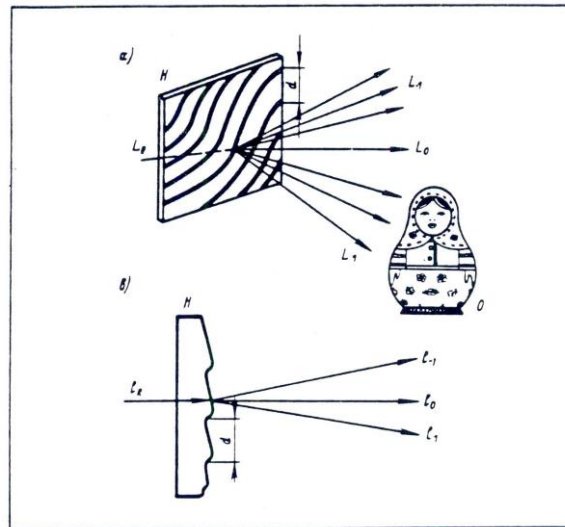
Σε όλες τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν η μοναδική συνέπεια προέρχεται από τη μεταβολή των ιδιοτήτων του φωτογραφικού υλικού και είναι η δημιουργία της αποκαλούμενης ψευδούς εικόνας και η ύπαρξη επιπρόσθετου διαχεόμενου φωτός. Η επαναδημιουργούμενη εικόνα του αντικειμένου από το ολόγραμμα δεν μεταβάλλει σ' αυτές τις περιπτώσεις τον σχηματισμό της. Γενικά κάποιος μπορεί να ισχυριστεί πως το ολόγραμμα συμπεριφέρεται σε σχέση με το μέσο στο οποίο έχει καταγραφεί σχεδόν όμοια με την συμβατική δισδιάστατη εικόνα. Είναι γνωστό γεγονός πως η δισδιάστατη εικόνα μπορεί να ζωγραφιστεί με λάδι, να σκαλιστεί σε πέτρα ή και να βαφεί με χρώμα, αλλά η σημασία της εικόνας δεν θα αλλάξει ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνισή της. Έτσι ο άνθρωπος θα πιστοποιήσει τα αντικείμενα που απεικονίζονται σ' αυτή την εικόνα κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες. Το ολόγραμμα μπορεί επίσης να καταγραφεί με κάθε άλλη διαφορετική μέθοδο (σχήμα 24). Η μοναδική απαίτηση για το χρησιμοποιούμενο φωτογραφικό υλικό είναι ότι οι οπτικές ιδιότητες πρέπει αναμφίβολα να μεταβάλλονται σε σχέση με την τιμή της έντασης του πεδίου επηρεάζοντας το ολόγραμμα τη στιγμή της έκθεσης. Εν τούτοις αυτή η απαίτηση είναι τόσο γενική ώστε σχεδόν κάθε ομοιόμορφο φωτοευαίσθητο μέσο μπορεί και να την ικανοποιεί.



Σχήμα 24. Συγκριτικές διαφορές της συμπεριφοράς ενός ολογράμματος σε σχέση με τη φωτογραφία.

Η αιτία αυτής της μικρής εξάρτησης του σχηματισμού της εικόνας που καταγράφεται στο ολόγραμμα από τη μεταβολή των ιδιοτήτων του φωτογραφικού υλικού καταγραφής μπορεί γενικά να δικαιολογηθεί με τον ακόλουθο τρόπο.

Η δομή ενός ολογράμματος μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί σαν ένα φράγμα περίθλασης. Αυτό το φράγμα αποτελείται από τις συστρεφόμενες γραμμές που έχουν μεταβλητό βήμα d . Η εικόνα O που ήταν καταχωρημένη στο ολόγραμμα σχηματίζεται από τις ακτίνες L_1 που αποτελούν τις περιθλώμενες ακτίνες πρώτης τάξεως στο σχηματισμό του συγκεκριμένου φράγματος περίθλασης (σχήμα 25α). Εν τούτοις το σχήμα του μετώπου κύματος της περιθλώμενης ακτινοβολίας καθορίζεται μόνο από τη διαφορά δρόμου των ακτινών που ανήκουν σε διαφορετικές προσπτώσεις δηλαδή εξαρτάται μοναδικά από το βήμα και το σχήμα των συστροφών. Ο τρόπος της πρόσπτωσης δεν επηρεάζει καθόλου το σχηματισμό του κύματος. Αυτή η διαδικασία μπορεί παραστατικότερα να επεξηγηθεί από το παράδειγμα του επίπεδου φράγματος με σταθερό βήμα d (σχήμα 25β). Οι γωνίες διάδοσης της ακτινοβολίας που περιθλάται σ' αυτό το φράγμα ℓ_1 και ℓ_{-1} εξαρτώνται από το βήμα φράγματος και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ενώ το προφίλ πρόσπτωσης επηρεάζει μόνο το πηλίκο της έντασης στις διάφορες τάξεις. Η ίδια ακριβώς διαδικασία συμβαίνει στο ολόγραμμα: Η μεταβολή των ιδιοτήτων του φωτογραφικού υλικού προκαλεί τη μεταβολή στο προφίλ των προσπτώσεων στη δημιουργούμενη περιοδική δομή που είναι το αποτέλεσμα καταγραφής του διαγράμματος συμβολής της δέσμης αναφοράς με αυτήν του αντικειμένου. Η χωρική περίοδος της πρόσπτωσης σε επανάληψη και το σχήμα της γραμμής κατά μήκος της πρόσπτωσης δεν αλλάζει σ' αυτή την περίπτωση. Συνεπώς ο σχηματισμός της επαναδημιουργούμενης εικόνας από το ολόγραμμα παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος.



Σχήμα 25. Το φαινόμενο της περίθλασης σε οπτικό φράγμα σταθεράς d .

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αναφερθούν οι ειδικές εφαρμογές όπου συμμετέχει αυτή η χαρακτηριστική ιδιότητα του ολογράμματος δηλαδή η δυνατότητα να διατηρεί την αντικειμενικότητα καταγραφής ανεξάρτητα από τις επιμέρους ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου φωτογραφικού υλικού. Στην πραγματικότητα αυτή η ιδιότητα ενυπάρχει στη βάση όλων των πρακτικών εφαρμογών που σχετίζονται με την επιστήμη και την τεχνολογία όπου το ολόγραμμα χρησιμοποιείται σαν το μοναδικής ακρίβειας εργαλείο μέτρησης.

Το απρόσβλητο της αναπαραγόμενης από το ολόγραμμα εικόνας σε σχέση με τον τύπο του φωτογραφικού υλικού δεν σημαίνει πως και οι ιδιότητες του ολογράμματος δεν επηρεάζονται καθόλου από το φωτογραφικό υλικό. Ο χαρακτήρας της απόκρισης του φωτογραφικού υλικού, δηλαδή ο "εσωτερικός" του τρόπος διαμόρφωσης από την ακτινοβολία, επηρεάζει σημαντικά τη λαμπρότητα της αναπαραγόμενης εικόνας και το ποσό της ανεπιθύμητης διαχεόμενης ακτινοβολίας που διαστρεβλώνει την κατανομή αυτής της λαμπρότητας. Οι παράμετροι της αναπαραγόμενης εικόνας επηρεάζονται επίσης σημαντικά από την διακριτική ικανότητα του φωτογραφικού υλικού.

Ας αναφερθούμε τώρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επίδραση της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού στο ολόγραμμα. Γενικά, η διακριτική ικανότητα του φωτογραφικού υλικού περιέχει τη δυνατότητά του για τη σωστή απεικόνιση των ελάχιστων λεπτομερειών της κατανομής της έντασης του πεδίου φωτός. Σαν ορισμός, η διακριτική ικανότητα εκφράζεται από τον αριθμό των γραμμών που περιέχονται σε ένα χιλιοστό (mm). Η τιμή αυτή καθορίζει τη μέγιστη χωρική συχνότητα της περιοδικής (ακριβέστερα - αρμονικής) κατανομής έντασης που μπορεί να καταγραφεί στο φωτογραφικό, υλικό. Εν τούτοις η απόκριση του φωτογραφικού υλικού - κατά κανόνα - εξαρτάται από τη χωρική συχνότητα με ένα αρκετά περίπλοκο τρόπο και έτσι ένας μόνο αριθμός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο της διακριτικής ικανότητας. Η καμπύλη που δείχνει τη σχέση της απόκρισης του φωτογραφικού υλικού από τη χωρική συχνότητα είναι αναμφίβολα το περισσότερο πλήρες χαρακτηριστικό γνώρισμα της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού.

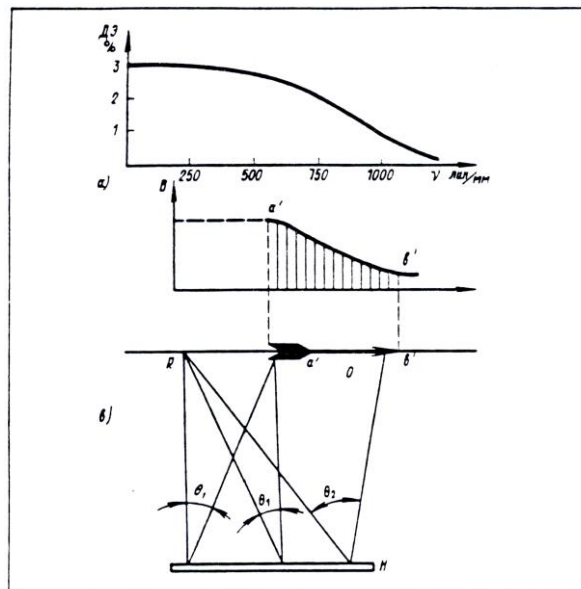
Εν τούτοις ακόμη και αυτό το χαρακτηριστικό είναι κάπως απροσδιόριστο καθ' ότι η απόκριση του φωτογραφικού υλικού μπορεί να παίρνει τη μορφή της μεταβολής από το βάθος της διαμορφούμενης αμαύρωσης (μεταβολή του κοντράστ), μεταβολή στο βάθος της ανάγλυφης φάσης, μεταβολή στο βάθος του παράγοντα διαμόρφωσης διάθλασης κ.ο.κ. Η επίδραση του περιορισμού της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού θα επηρεάζει το ολόγραμμα διαφορετικά σε κάθε μια από τις μοναδικές περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Ο μόνος σωστός τρόπος να ληφθεί υπόψη η διακριτική ικανότητα κάτω απ' αυτές τις συνθήκες είναι να υπολογιστεί η εξάρτηση των πιο σπουδαίων παραγόντων του προβλήματος στην καταγραφόμενη ένταση της συχνότητας χωρικής κατανομής. Η αύξηση της λαμπρότητας της αναπαραγόμενης εικόνας είναι μεγάλης σπουδαιότητας στην τέχνη της ολογραφίας, και έτσι η αποκαλούμενη απόδοση σκέδασης του ολογράμματος αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά σ' αυτή την περίπτωση. Η απόδοση σκέδασης ενός ολογράμματος ορίζεται σαν το πηλίκο μεταξύ της φωτεινής ροής που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της ωφέλιμης εικόνας προς την ολική φωτεινή ροή που προσπίπτει στο ολόγραμμα.

Η εξάρτηση της απόδοσης σκέδασης του ολογράμματος από τη χωρική συχνότητα της έντασης πεδίου που καταγράφεται παίζει το ρόλο του κορυφαίου χαρακτηριστικού της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού στην τέχνη της ολογραφίας. Η προσεγγιστική καμπύλη αυτής της εξάρτησης παρουσιάζεται στο σχήμα 26α. Γνωρίζοντας αυτή την εξάρτηση είναι εύκολο να προσδιοριστούν οι αλλαγές που προκαλούνται στην επαναδημιουργούμενη εικόνα από τον περιορισμό της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού. Ας αναφερθούμε στη φύση αυτών των αλλαγών στο συγκεκριμένο παράδειγμα του αποκαλούμενου ολογράμματος Fourier. Πρώτα απ' όλα ας αναφέρουμε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου ολογραμμάτων.

Ο όρος ολόγραμμα - Fourier συνήθως χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η πηγή αναφοράς R και το αντικείμενο O βρίσκονται σε επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια του ολογράμματος H στη διαδικασία καταγραφής του (σχήμα 26β). Το ολόγραμμα Fourier αυτού του τύπου έχει ένα ιδιαίτερο γνώρισμα που αφορά τη γωνία πρόσπτωσης θ μεταξύ της δέσμης που προέρχεται από δεδομένο σημείο α του αντικειμένου και της δέσμης αναφοράς R να είναι κατά προσέγγιση σταθερή σε όλη την επιφάνεια του ολογράμματος. Λαμβάνοντας τώρα υπόψη το γεγονός ότι η χωρική περίοδος του διαγράμματος συμβολής δύο κυμάτων εξαρτάται μόνο από τη γωνία πρόσπτωσής τους και το μήκος κύματος (σχέση 2) ένας μπορεί να συμπεράνει πως στην περίπτωση του ολογράμματος Fourier σε κάθε σημείο του αντικειμένου αντιστοιχεί μια αρμονική κατανομή φωτεινής έντασης στην επιφάνεια του ολογράμματος που χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη χωρική περίοδο. Για περισσότερη ακρίβεια, η φωτεινή κατανομή στην επιφάνεια ενός τέτοιου ολογράμματος συσχετίζεται με την φωτεινή κατανομή στην επιφάνεια του αντικειμένου με τον μετασχηματισμό Fourier.

Τώρα ας υποθέσουμε πως το ολόγραμμα Fourier που καταγράφεται στο φωτογραφικό υλικό, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη εξάρτηση της απόδοσης σκέδασής του από τη χωρική συχνότητα (σχήμα 26α) και ότι αυτό το ολόγραμμα επαναδημιουργείται από τη δέσμη αναφοράς R. Όπως ήδη προαναφέρθηκε μια συγκεκριμένη χωρική συχνότητα του ολογράμματος αντιστοιχεί σε κάθε σημείο του αντικειμένου (δηλαδή τα σημεία α και β του

σχήματος 26β). Συνεπώς στη διαδικασία της επαναδημιουργίας το είδωλο κάθε σημείου θα αποθηκευτεί με μια συγκεκριμένη τιμή της απόδοσης σκέδασης που είναι τυπική γι' αυτό το σημείο. Έχοντας καθορίσει αυτή την τιμή με τη βοήθεια της συγκεκριμένης εξάρτησης του ίδιου σχήματος μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση της κατανομής λαμπρότητας στην επαναδημιουργούμενη εικόνα. Εάν λάβουμε υπ' όψη το γεγονός πώς σε συμφωνία με τη σχέση 2 η τιμή της χωρικής συχνότητας σε δεδομένο σημείο του αντικειμένου είναι σχεδόν ανάλογη της γωνίας θ και έτσι της απόστασης μεταξύ του σημείου και της πηγής αναφοράς R τότε γίνεται προφανές πως η κατανομή της λαμπρότητας στο είδωλο που αναπαράγεται από το ολόγραμμα διαμορφώνεται από τη συνάρτηση εξάρτησης της απόδοσης σκέδασης από τη συχνότητα (επάνω τμήμα του σχήματος 26β). Έτσι γενικά ο περιορισμός της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού οδηγεί στη μείωση της λαμπρότητας του αναπαραγόμενου ειδώλου καθώς η απόσταση από τη δέσμη αναφοράς αυξάνει. Τα σημεία του αντικειμένου που βρίσκονται σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από τη δέσμη αναφοράς αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές χωρικής συχνότητας και έτσι δεν εμφανίζονται στο φωτογραφικό υλικό. Αυτά τα σημεία δεν θα αναπαραχθούν στην επαναδημιουργούμενη εικόνα.



Σχήμα 26. Ο συσχετισμός της διακριτικής ικανότητας του ολογραφικού φιλμ με τη ποιότητα της επαναδημιουργούμενης εικόνας σε όρους μετασχηματισμών Fourier.

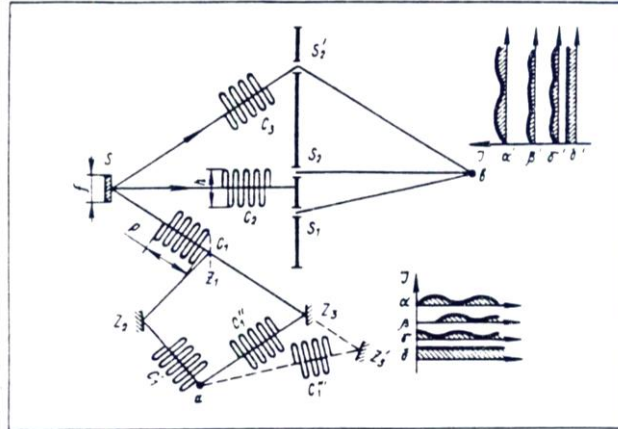
Αξίζει να σημειωθεί πως σε αντίθεση με τη συμβατική φωτογραφία όπου οι περιορισμοί στη διακριτική ικανότητα του φωτογραφικού υλικού οδηγούν στον περιορισμό της απεικόνισης των ελάχιστων λεπτομερειών της εικόνας, οι περιορισμοί στη διακριτική ικανότητα της ολογραφίας οδηγούν στον περιορισμό του πεδίου όρασης μέσω του οποίου παρουσιάζεται η εικόνα. Η διακριτική ικανότητα του φωτογραφικού υλικού δεν επηρεάζει εν προκειμένω άμεσα τη διακριτική ικανότητα της εικόνας.

2. Επίδραση των ιδιοτήτων σύμφωνης πηγής καταγραφής στο ολόγραμμα

Στην ολογραφία η σπουδαιότερη ιδιότητα της ακτινοβολούσας πηγής είναι ο βαθμός συμφωνίας της. Γενικά, η συμφωνία μπορεί να οριστεί σαν η δυνατότητα των ταλαντώσεων από διαφορετικά κυματικά πεδία να επιδέχονται αμοιβαία συμβολή. Αξιωματικά οι περιορισμοί που επηρεάζουν το σκοπό του φαινομένου συμβολής καθορίζονται από τον περιορισμό των κυματοσυρμών που εκπέμπονται από τα διεγερμένα άτομα.

Συμβατικά, η συμφωνία διακρίνεται σε χρονική (διαμήκη) και χωρική (εγκάρσια). Το διάγραμμα που διευκρινίζει αυτή τη διάκριση παρουσιάζεται στο σχήμα 27. Κάθε άτομο της πηγής S εκπέμπει την ακτινοβολία του στη διάρκεια περιορισμένου χρονικού διαστήματος. Σαν αποτέλεσμα οι κυματοσυρμοί C_1 , C_2 , C_3 σχηματίζονται στο χώρο. Αυτοί χαρακτηρίζονται: στη διαμήκη διεύθυνση από την απόσταση P που είναι το γινόμενο της ταχύτητας του φωτός επί τη διάρκεια της εκπομπής, στην εγκάρσια διεύθυνση από συγκεκριμένη διάσταση h που εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της πηγής f. Γενικά, ο περιορισμός του κυματοσυρμού στη διαμήκη διεύθυνση περιορίζει το βαθμό της χρονικής συμφωνίας της πηγής, ενώ ο περιορισμός στην εγκάρσια περιορίζει το βαθμό της αντίστοιχης χωρικής συμφωνίας. Αμφότερα και τα δύο φαινόμενα επιδεινώνουν τις συνθήκες συμβολής της εκπεμπόμενης από τη πηγή ακτινοβολίας.

Πρώτα απ' όλα ας εξετάσουμε τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη χρονική συμφωνία. Γενικά η χρονική συμφωνία προσδιορίζει τη σταθερότητα των ταλαντώσεων στο χρόνο σε ένα δεδομένο σημείο του πεδίου, δηλαδή η σταθερότητα των διαφορών στις φάσεις που αντιστοιχεί στην έναρξη και στη λήξη ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος Δt . Ο βαθμός ευστάθειας αυτής της φασικής διαφοράς μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του εξής πειράματος: Το ημιδιαπερατό κάτοπτρο Z_1 τοποθετείται στο προς διερεύνηση σημείο του πεδίου. Το κάτοπτρο αυτό διαχωρίζει τη δέσμη σε δύο συνιστώσες. Στη συνέχεια αυτές οι δύο συνιστώσες επανασυναντώνται εκ νέου στο σημείο α με τη βοήθεια των κατόπτρων Z_{12} και Z_3 και οι συνθήκες για συμβολή ελέγχονται σ' αυτό το σημείο. Εν τούτοις το διάγραμμα συμβολής δεν συμβαίνει σ' όλες τις περιπτώσεις. Πράγματι, εάν η διαφορά δρόμου των $Z_1 Z_2$ και $Z_1 Z_3$ δεν υπερβαίνει το μήκος P του κυματοσυρμού τότε τα διαχωριζόμενα μέρη του ίδιου κυματοσυρμού C_1' και C_1'' θα συναντηθούν στο σημείο α. Σ' αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία των συμβαλλόντων κυμάτων ταιριάζει φασικά και έτσι ένα σταθερό διάγραμμα συμβολής εμφανίζεται στο σημείο α (Η κατανομή της έντασης σ' ένα τέτοιο διάγραμμα παρουσιάζεται στο διάγραμμα α). Εάν η διαφορά δρόμου υπερβαίνει το μήκος P του κυματοσυρμού δηλαδή όταν το κάτοπτρο Z_3 τοποθετηθεί στη θέση Z_3' τα διαχωριζόμενα μέρη C_1' και C_1'' του κυματοσυρμού θα φθάσουν στο σημείο α σε διαφορετικό χρόνο. Σ' αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία ενός από αυτούς τους κυματοσυρμούς θα συμβάλλει με την ακτινοβολία κάποιου άλλου κυματοσυρμού. Καθώς όμως οι φάσεις ταλάντωσης διαφορετικών κυματοσυρμών είναι ανεξάρτητοι, τα διαγράμματα συμβολής (καμπύλες β και γ) θα είναι μετατοπισμένες σε διαφορετικές τιμές. Κατά μέσο όρο ο παρατηρητής καταγράφει μια συγκεκριμένη ομοιόμορφη κατανομή, στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί η καμπύλη δ του σχήματος 27.



Σχήμα 27. Διάγραμμα διάταξης για τη διάκριση της χρονικής από τη χωρική συμφωνία μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

Έτσι η συμβολή συμβαίνει μόνο όταν οι συνιστώσες του ίδιου διαχωριζόμενου κυματοσυρμού συναντηθούν στο ίδιο σημείο του χώρου. Είναι προφανές πως η περίπτωση όπου η "κεφαλή" του ενός κυματοσυρμού συναντά την "ουρά" του άλλου αντιστοιχεί στη μέγιστη διαφορά δρόμου όπου η συμβολή είναι ακόμη δυνατή. Δεν είναι δύσκολο να καταλάβει κανείς πως αυτή η διαφορά που καλείται μήκος συμφωνίας είναι ίση με το μήκος P του κυματοσυρμού.

Τώρα ας ασχοληθούμε με φαινόμενα που σχετίζονται με τη χωρική συμφωνία. Γενικά η χωρική συμφωνία προσδιορίζει το βαθμό συγχρονισμού των ταλαντώσεων του πεδίου στο χώρο, δηλαδή η σταθερότητα της διαφοράς φάσεων σε δύο αυθαίρετα σημεία. Ο βαθμός σταθερότητας αυτής της διαφοράς μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του εξής πειράματος: Η ακτινοβολία στα δύο σημεία S_1 και S_2 που βρίσκονται σε κάθετο επίπεδο προς τη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης απομονώνεται από το κυματικό πεδίο με τη βοήθεια των ανοιγμάτων στο διάφραγμα. Εάν η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων S_1 και S_2 είναι μικρότερη από το εγκάρσιο μέγεθος h του κυματοσυρμού τότε η ακτινοβολία από τον ίδιο κυματοσυρμό φθάνει στο σημείο β που ισαπέχει των S_1 και S_2 . Σαν αποτέλεσμα ένα σταθερό διάγραμμα συμβολής εμφανίζεται σ' αυτό το σημείο (κατανομή α' στο αντίστοιχο διάγραμμα).

Εάν το άνοιγμα S_2 μετατοπιστεί στη θέση S_2' έτσι ώστε η νέα απόσταση μεταξύ S_1 και S_2' υπερβαίνει το μήκος h τότε διαφορετικοί κυματοσυρμοί που δεν συσχετίζονται φασικά θα συμβάλλουν στο σημείο β . Σαν αποτέλεσμα, το διάγραμμα συμβολής που σχηματίζεται στη περιοχή του σημείου β θα μεταβάλλει συνεχώς τη θέση του. Κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος αυτό το διάγραμμα έχει τη μορφή β' , μετά μετατοπίζεται στη μορφή γ' κ.ο.κ. Όλες αυτές οι μεταβολές συμβαίνουν τυχαία με συχνότητα μεταβολής κυματοσυρμού δηλαδή πολύ συχνά και έτσι σ' αυτή την περίπτωση ο παρατηρητής καταγράφει μια κάπως ομαλοποιημένη κατανομή έντασης δ' .

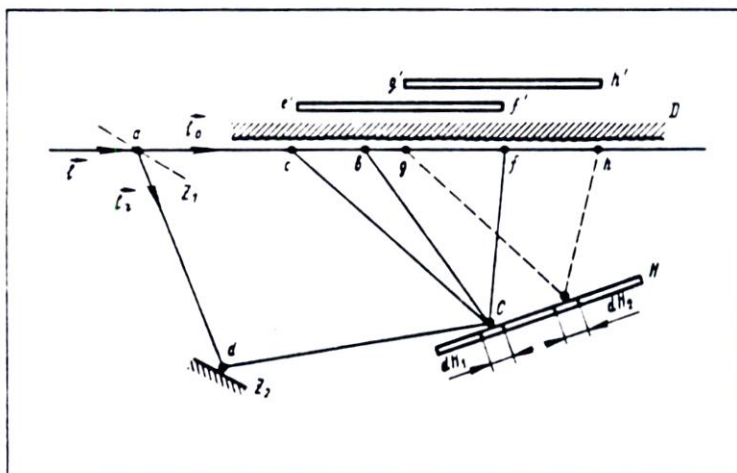
Η επίδραση των ιδιοτήτων συμφωνίας της ακτινοβολίας στη καταγραφόμενη εικόνα από το ολόγραμμα εκφράζεται με πολύ περίπλοκο τρόπο εάν αντιμετωπιστεί γενικά. Το πρόβλημα μπορεί κάπως να απλοποιηθεί εάν κάποιος προσπαθήσει να απομονώσει τα γεγονότα που

συσχετίζονται με την χρονική απ' αυτά της χωρικής συμφωνίας. Πρώτα απ' όλα ας αναφερθούμε στην επίδραση που οφείλεται στη χρονική συμφωνία [23]. Είναι προφανές να αναμένεται πως η χρονική συμφωνία θα επηρεάζει την μεταβολή των ιδιοτήτων της καταγραφόμενης εικόνας στη διαμήκη διεύθυνση κατά μήκος της δέσμης που φωτίζει το αντικείμενο διότι ο περιορισμός του κυματοσυρμού κατά βάθος αντιστοιχεί σ' αυτή την περίπτωση. Έχοντας αυτό κατά νου ας αναφερθούμε στη διαδικασία καταγραφής κάποιου ιδανικού αντικειμένου. Επίπεδο διάχυσης D υφίσταται την έκθεση μιας ολισθαίνουσας φωτεινής δέσμης και θεωρείται σαν ένα τέτοιο ιδανικό αντικείμενο στην περίπτωσή μας.

Το γενικό σχηματικό διάγραμμα που διευκρινίζει το πείραμα που αποκαλύπτει την επίδραση της χρονικής συμφωνίας της ακτινοβολίας καταγραφής στο ολόγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 28. Η δέσμη σύμφωνης πηγής ℓ διαχωρίζεται από ένα ημιδιαπερατό κάτοπτρο Z_1 σε δύο συνιστώσες. Μια απ' αυτές τις συνιστώσες ℓ_o κατευθύνεται όπως ολισθαίνουσα δέσμη κατά μήκος της επίπεδης επιφάνειας του πετάσματος διάχυσης D ενώ η δεύτερη συνιστώσα ℓ_r χρησιμοποιείται σαν δέσμη αναφοράς και κατευθύνεται στο ολόγραμμα H με τη βοήθεια του κατόπτρου Z_2 . Η δέσμη ℓ_o που ολισθαίνει κατά μήκος του πετάσματος διασκορπίζεται συνεχώς από την τραχεία αυτή επιφάνεια και η ακτινοβολία διασκορπίζεται απ' όλα τα σημεία του πετάσματος προσπίπτουσα στην περιοχή dH του ολογράμματος όπου και συναντά τη δέσμη αναφοράς ℓ_r . Εν τούτοις όπως ήδη διαπιστώθηκε η συμβολή είναι δυνατή μόνο όταν η διαφορά δρόμου των συμμετασχόντων δεσμών δεν υπερβαίνει το μήκος συμφωνίας L της πηγής. Εν προκειμένω είναι αναγκαίο η διανυόμενη απόσταση από τη δέσμη αντικειμένου abc να διαφέρει απ' αυτήν της αναφοράς adc κατά ποσό που δεν υπερβαίνει το μήκος συμφωνίας L . Αλλιώς δεν θα είναι δυνατό για την ακτινοβολία που διασκορπίζεται από κάθε σημείο του πετάσματος D να δημιουργήσει το διάγραμμα συμβολής στο σημείο C . Αυτή η συνθήκη ικανοποιείται μόνο απ' εκείνα τα σημεία του πετάσματος που βρίσκονται εντός των ορίων μιας συγκεκριμένης περιοχής ef . Η διάσταση αυτής της περιοχής καθορίζεται από την απαίτηση πως ο δρόμος aec είναι μικρότερος συγκρινόμενος με αυτόν τον adc κατά την τιμή L , ενώ αντίστοιχα ο δρόμος afc τον υπερβαίνει κατά την ίδια τιμή. Τα σημεία του πετάσματος που ανήκουν έξω από τα όρια αυτής της περιοχής δεν δημιουργούν κανένα διάγραμμα συμβολής και συνεπώς δεν καταγράφονται στο ολόγραμμα. Σαν αποτέλεσμα ο παρατηρητής βλέποντας την επαναδημιουργούμενη εικόνα από το ολόγραμμα θα δει τη φωτεινή διαδρομή της δέσμης $e'f'$ της οποίας το μήκος επακριβώς συμμορφώνεται με το μήκος συμφωνίας της ακτινοβολούσας πηγής. Η πιο λεπτομερειακή διερεύνηση αποκαλύπτει πως οι ιδιότητες συμφωνίας της ακτινοβολούσας πηγής δεν επηρεάζουν μόνο το μήκος της φωτεινής διαδρομής. Μπορεί να αποδειχθεί πως η κατανομή φωτεινότητας κατά μήκος της προαναφερθείσας φωτεινής διαδρομής διαμορφώνει την αποκαλούμενη συνάρτηση χρονικής συμφωνίας της πηγής.

Μελετώντας τυχαία αντικείμενα η επίδραση της χρονικής συμφωνίας στην αναπαραγόμενη εικόνα περιορίζεται στην διαμόρφωση της φωτεινότητας του ειδώλου κατά βάθος από την συνάρτηση της χρονικής συμφωνίας που αφορά την ακτινοβολία καταγραφής. Εάν αυτοπεριοριστούμε σε απλοποιημένες επαναδιατυπώσεις και αντιλήψεις τότε μπορούμε να αναφέρουμε πως εάν η χρησιμοποιούμενη πηγή διαθέτει περιορισμένη χρονική συμφωνία τότε το ολόγραμμα μπορεί να καταγράψει είδωλο αντικειμένων που βρίσκονται

σε συγκεκριμένη απόσταση κατά βάθος. Η τιμή αυτής της απόστασης προσδιορίζεται από το μήκος συμφωνίας της χρησιμοποιούμενης πηγής.

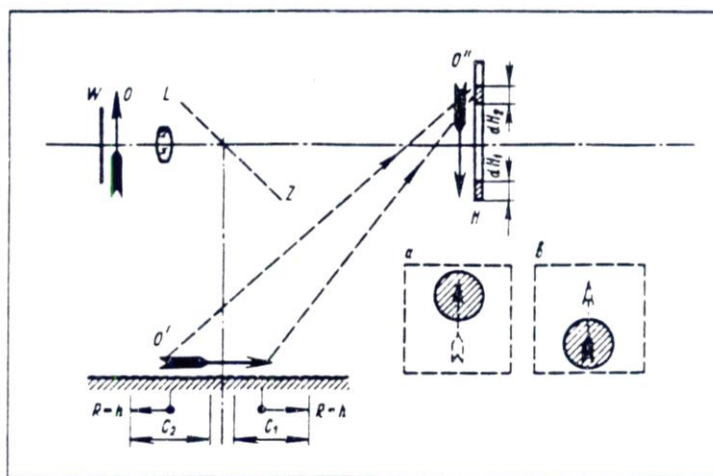


Σχήμα 28. Η επίδραση της χρωμικής συμφωνίας στη καταγραφή του ολογράμματος.

Ας αναφερθούμε περιληπτικά στα γεγονότα που σχετίζονται με την παρατήρηση του ειδώλου της φωτεινής διαδρομής της δέσμης l_0 μέσω διαφορετικών περιοχών του ολογράμματος. Ας επιλέξουμε ένα συγκεκριμένο τμήμα dH_2 του ολογράμματος που χαρακτηρίζεται από την δέσμη αναφοράς της οποίας η διαδρομή υπερβαίνει την διαδρομή του τμήματος dH_1 . Σ' αυτή την περίπτωση η απαίτηση της διαφοράς δρόμων για τις συμβαλλόμενες δέσμες να μην υπερβαίνει το μήκος συμφωνίας θα ικανοποιείται από εκείνα τα εσωτερικά σημεία που βρίσκονται στη νέα περιοχή gh . Η νέα αυτή περιοχή είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την προηγούμενη ef . Συνεπώς στη διαδικασία επαναδημιουργίας της εικόνας ο παρατηρητής που αντιλαμβάνεται την εικόνα μέσω του νέου τμήματος dH_2 του ολογράμματος θα δει πως η φωτεινή διαδρομή έχει μετατοπιστεί από τη θέση $e'f'$ στη νέα $g'h'$. Γενικά φαίνεται σαν η εικόνα του τμήματος της φωτεινής διαδρομής δέσμης να είναι μια φωτογραφία του κυματοσυρμού που έχει καταγραφεί στην πορεία της πτήσης του. Το ολόγραμμα καταγράφει ακόμη και την κίνηση του κυματοσυρμού: εάν μετακινήσουμε τη ματιά μας κατά μήκος του ολογράμματος θα δούμε το είδωλο του κυματοσυρμού να "πετά" κατά μήκος της δέσμης.

Το διάγραμμα που διασαφηνίζει το πείραμα και αποκαλύπτει την επίδραση της χωρικής συμφωνίας της πηγής στο ολόγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 29 [24]. Το κύμα W της ακτινοβολίας της πηγής χαρακτηρίζεται από ένα ορισμένο διάγραμμα κατανομής της χωρικής συμφωνίας. Αυτό το διάγραμμα εδώ συμβολίζεται από το βέλος O . Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί στο κύμα W διαχωρίζεται από το ημιδιαπερατό κάτοπτρο Z σε δύο συνιστώσες: συνιστώσα αντικειμένου l_0 και συνιστώσα αναφοράς l_1 . Φακός L τοποθετείται μπροστά από το ημιδιαφανές κάτοπτρο Z και απεικονίζει την κατανομή πεδίου O στο διαχεόμενο, διασκορπιζόμενο πέτασμα D σε σχήμα ειδώλου O' και στο ολόγραμμα H σε σχήμα ειδώλου O'' . Ας αναφέρουμε τις συνθήκες καταγραφής του ολογράμματος σε συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής του dH_1 που αντιστοιχεί στο επάνω άκρο του βέλους O'' . Το τμήμα dH_1 εκτίθεται στην ακτινοβολία που διασκορπίζεται από όλα τα σημεία του πετάσματος D . Εν τούτοις εάν η χωρική συμφωνία της ακτινοβολίας που

καταγράφει είναι περιορισμένη τότε το διάγραμμα συμβολής σχηματίζεται από την ακτινοβολία που διασκορπίζεται μόνο από κάποια συγκεκριμένη περιοχή του πετάσματος. Για παράδειγμα η ακτινοβολία από τα σημεία του πετάσματος που αντιστοιχούν στο άκρο του βέλους του ειδώλου O' θα συμβάλλουν με τη δέσμη αναφοράς δημιουργώντας το είδωλο αυτού του άκρου βέλους στο τμήμα dH_1 εφ' όσον το πεδίο σ' αυτό το σημείο είναι σύμφωνο σε σχέση με τον εαυτό του σε κάθε πλάτος του κυματοσυρμού. Όμοια η δέσμη αναφοράς θα συμβάλλει με την ακτινοβολία απ' όλα τα σημεία του πετάσματος που βρίσκονται στη περιοχή C_1 της οποίας η ακτίνα R είναι ίση με το πλάτος h του κυματοσυρμού. Τα σημεία του πεδίου έξω από τα όρια της περιοχής C_1 δεν θα είναι σύμφωνα σε σχέση με το σημείο πεδίου που αντιστοιχεί στο άκρο του βέλους και έτσι η ακτινοβολία τους δεν θα συμβάλλει με τη δέσμη αναφοράς στη περιοχή dH_1 .



Σχήμα 29. Η επίδραση της χωρικής συμφωνίας της ακτινοβολίας στο ολόγραμμα.

Έτσι το ολόγραμμα θα καταγράψει μόνο το είδωλο εκείνων των σημείων του πετάσματος που βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής C_1 . Ο παρατηρητής της επαναδημιουργούμενης εικόνας ενός τέτοιου ολογράμματος μέσω του τμήματος dH_1 που αντιστοιχεί στο άκρο βέλους θα δει το είδωλο εκείνων των σημείων του πετάσματος που είναι σε συμφωνία σε σχέση με το άκρο του βέλους. Η περιοχή του πετάσματος εντός της οποίας η φωτεινότητα του επαναδημιουργούμενου ειδώλου θα διαφέρει από το μηδέν στο σχήμα 29α παρουσιάζεται γραμμοσκιασμένη.

Εάν εξεταστούν οι όμοιες συνθήκες καταγραφής στο τμήμα dH_2 του ολογράμματος που αντιστοιχεί στο άκρο του βέλους, τότε θα αποκαλυφθεί πως ο παρατηρητής εξετάζοντας αυτή την περιοχή θα καταγράψει το είδωλο στο μέρος C_2 του πετάσματος όπου το κέντρο τοποθετείται στο πίσω άκρο του βέλους. Γενικά κάποιος μπορεί να ισχυριστεί πως το καταγραφόμενο ολόγραμμα εν προκειμένω είναι ένα μοναδικό πορτραίτο της χωρικής συμφωνίας συνάρτησης του κύματος W . Είναι δυνατό να απεικονισθεί το είδωλο όλων των σημείων του κύματος W που είναι σε συμφωνία με το ορισμένο σημείο αυτού του κύματος εάν ο παρατηρητής κοιτάξει στο πέτασμα D μέσω σημείου ολογράμματος που αντιστοιχεί στο προαναφερθέν σημείο του κύματος W .

Φυσικά η επίδραση της χωρικής και της χρονικής συμφωνίας της αναπαραγόμενης εικόνας από ένα ρεαλιστικό ολόγραμμα είναι αρκετά περισσότερο σύνθετη απ' αυτή που

περιγράφηκε προηγούμενα στις ακραίες της περιπτώσεις. Γενικά κάποιος μπορεί να ισχυριστεί ότι οι περιορισμοί στο βαθμό της χρονικής και της χωρικής συμφωνίας οδηγούν στη διαμόρφωση της λαμπρότητας της ολογραφικά αναπαραγόμενης εικόνας αμφότερα και σε βάθος και σε εγκάρσια αίσθηση. Η μετατόπιση του σημείου παρατήρησης της αναπαραγόμενης εικόνας προκαλεί τη μετατόπιση του διαγράμματος διαμόρφωσης.

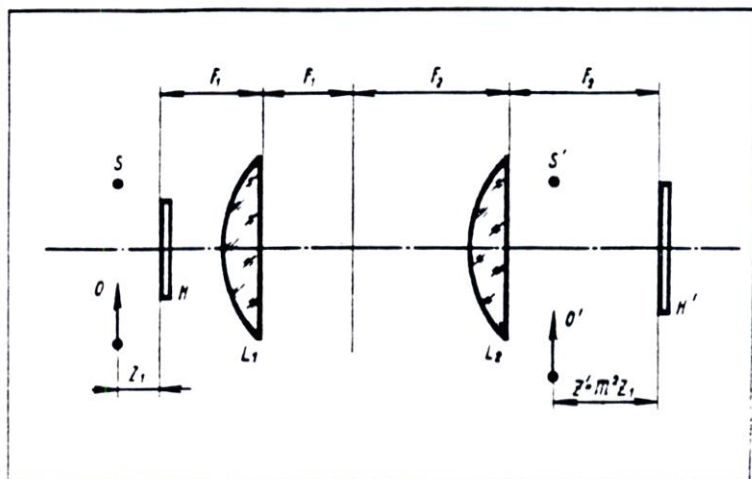
3. Ιδιότητες μετασχηματισμού ολογράμματος

Οι αποκαλούμενες ιδιότητες μετασχηματισμού ενός ολογράμματος παίζουν σημαντικό ρόλο στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές που προέρχονται από την τέχνη της ολογραφίας. Αυτές οι ιδιότητες αντιπροσωπεύουν την ικανότητα της επαναδημιουργούμενης από ολόγραμμα εικόνας να μεταβάλει τις διαστάσεις της και τη θέση της όταν η θέση και το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης πηγής μεταβληθούν. Το ίδιο γεγονός συμβαίνει και όταν η κλίμακα του ολογράμματος μεταβληθεί. Θα πρέπει να τονιστεί πως μόνο τα ολογράμματα δύο διαστάσεων διατηρούν τις ιδιότητες μετασχηματισμού στην πλήρη τους μορφή. Τα τρισδιάστατα ολογράμματα αναπαράγουν το είδωλο του αντικειμένου μόνο όταν η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται για την επαναδημιουργία είναι ακριβώς η ίδια που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της ολογραφικής καταγραφής. Όσον αφορά τη μεταβολή της κλίμακας στην τρισδιάστατη ολογραφική καταγραφή δεν υπάρχει λόγος αναφοράς της στο μέτρο που είναι υπερβολικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί μια τέτοια ενέργεια.

Το γεγονός της μεταβολής της γεωμετρίας για την αναπαραγόμενη εικόνα με την αλλαγή των παραμέτρων της καταγραφούσης πηγής πρωτουπολογίστηκε από τον Dennis Gabor ο οποίος και σχηματοποίησε τις βασικές κανονικότητες τέτοιων μετασχηματισμών [9, 10], Η πλήρης θεωρία των ιδιοτήτων μετασχηματισμού του ολογράμματος αναπτύχθηκε αργότερα από ένα πλήθος επιστημόνων [25, 26]. Εν τούτοις εν προκειμένω δεν θα αναφερθούμε στη μάλλον ογκώδη θεωρία και αντί αυτού θα αυτοπεριοριστούμε στη βασική περιγραφή της φυσικής που εμφανίζει το φαινόμενο αυτό.

Περιγράφοντας τις ιδιότητες των μετασχηματισμών της επαναδημιουργούμενης από το ολόγραμμα εικόνας, θα πρέπει να σημειωθεί πως οι ομοιότητες τους είναι γενικά ανάλογες με αυτές των μετασχηματισμών που επιτυγχάνονται με τη βοήθεια των φακών, εκτός από τις περιπτώσεις που σχετίζονται με τη μεταβολή μήκους κύματος της καταγραφούσης πηγής. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι λογικό να χρησιμοποιούμε διάφορους συνδυασμούς βοηθητικών φακών για την καλύτερη επεξήγηση των ιδιοτήτων μετασχηματισμού του ολογράμματος.

Ας αξιοποιήσουμε την παραπάνω μέθοδο για να εξετάσουμε τους μετασχηματισμούς που προκαλούνται από την αλλαγή της θέσης για τη φωτεινή πηγή καταγραφής [10] (σχήμα 30). Ας υποθέσουμε πως συγκεκριμένο ολόγραμμα H αναπαράγει το είδωλο O_2 αντικειμένου σε διαδικασία επαναδημιουργίας με την πηγή S_2 . Είναι αναγκαίο να καθοριστεί το σχήμα του ειδώλου όταν το ολόγραμμα επαναδημιουργηθεί από πηγή S_1 που είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την S_2 . Ας τοποθετήσουμε λεπτό αρνητικό φακό L_1 που μεταφέρει το είδωλο του σημείου S_1 στο σημείο S_2 μπροστά από το ολόγραμμα. Ένας θετικός φακός L_2 που είναι ίσος και αντίθετος με τον L_1 θα πρέπει να τοποθετηθεί πίσω από το ολόγραμμα. Συνολικά

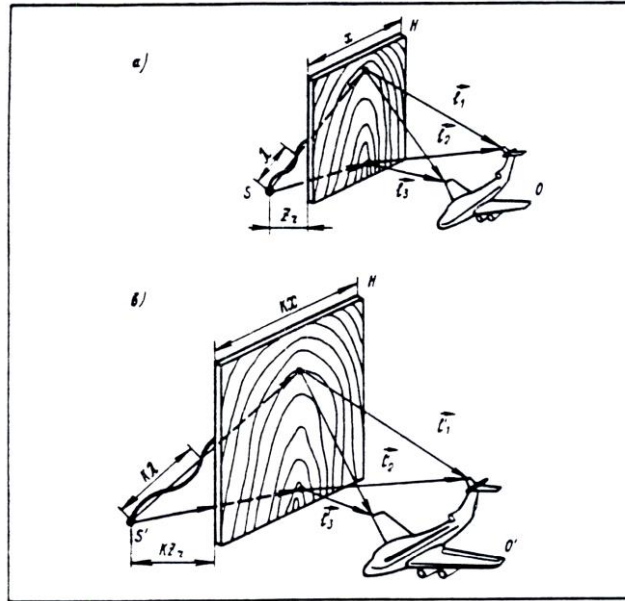


Σχήμα 31. Η οπτική διάταξη αναστροφικού τηλεσκοπικού συστήματος φακών.

Εάν ολόγραμμα H τοποθετηθεί στην είσοδο ενός τηλεσκοπικού συστήματος θα επιτευχθεί το είδωλό του H' μεγεθυμένο M φορές εις την έξοδο του τηλεσκοπίου. Οι εναπομένουσες πεδιακές συνιστώσες μετασχηματίζονται ταυτόχρονα με το ολόγραμμα: η πηγή αναφοράς S μετασχηματίζεται στην S' , αντικείμενο O στο είδωλο O' . Σ' αυτή τη διαδικασία όλες οι συντεταγμένες πηγής και αντικείμενου που βρίσκονται στο κάθετο επίπεδο προς τον οπτικό άξονα είναι μεγεθυμένες M φορές, οι αποστάσεις από το αντικείμενο και την πηγή αναφοράς προς το ολόγραμμα θα έχουν μεγέθυνση M^2 φορές.

Έτσι η μεγέθυνση της επαναδημιουργούμενης γεωμετρίας αντιστοιχεί στην M - τάξεως μεγέθυνση του ολογράμματος δηλαδή η θέση της πηγής, του αντικείμενου και οι διαστάσεις του αντικείμενου αυξάνουν M φορές στην εγκάρσια διεύθυνση και M^2 φορές στην αντίστοιχη διαμήκη.

Ο μετασχηματισμός της αναπαραγόμενης εικόνας που προκαλείται από τη μεταβολή του μήκους κύματος της ακτινοβολίας εύκολα εξηγείται με όρους απλών συσχετισμών κλίμακας. Πραγματικά, εάν αυξηθούν όλοι οι γεωμετρικοί παράγοντες της διαδικασίας επαναδημιουργίας ταυτόχρονα υπό την ίδια σταθερά K δηλαδή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λ , οι διαστάσεις του ολογράμματος H (αυξάνοντας αντίστοιχα τις διαστάσεις της δομής του) και τη γεωμετρία της θέσης της πηγής S σε σχέση με το ολόγραμμα, το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 32α και 32β. Είναι προφανές πως οι γωνίες σκέδασης των ακτινών στο μεγεθυμένο ολόγραμμα θα παραμένουν αμετάβλητες διότι τα γεγονότα σκέδασης καθορίζονται από το πηλίκο μεταξύ του μήκους κύματος και των διαστάσεων της στοιχειώδους δομής στην οποία πραγματοποιείται η σκέδαση. Συνεπώς ο πλήρης συσχετισμός για τις δέσμες ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 που σχηματίζουν την επαναδημιουργούμενη εικόνα θα υφίστανται ένα μετασχηματισμό κλίμακας ίδιας αναλογίας K . Η επαναδημιουργούμενη εικόνα O' θα έχει αντίστοιχα μεγέθυνση ίδιας αναλογίας.



Σχήμα 32. Οι επιπτώσεις της μεταβολής του μήκους κύματος της ακτινοβολίας στην αναπαραγόμενη εικόνα.

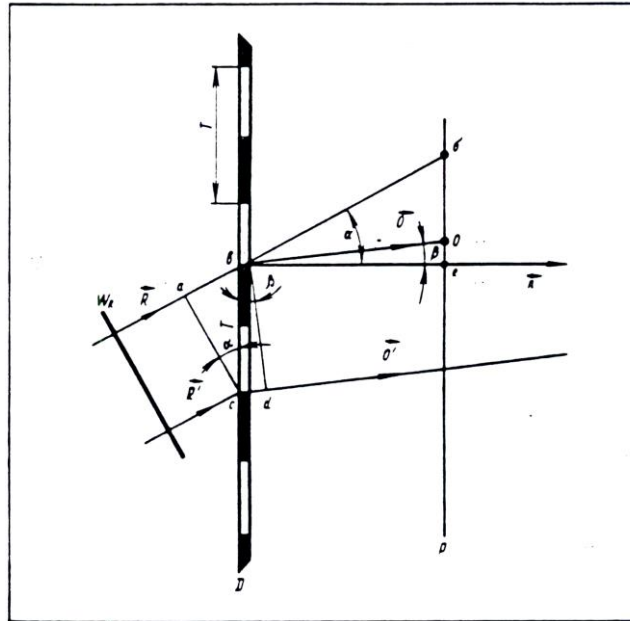
Ένας μπορεί να διαπιστώσει πως οι συντελεστές της μεγέθυνσης της εικόνας S' αυτή τη περίπτωση είναι ίσοι στη διαμήκη και την εγκάρσια κατεύθυνση, συγκρίνοντας με την περίπτωση του μετασχηματισμού της γεωμετρικής οπτικής όπου ο συντελεστής της διαμήκους μεγέθυνσης ισούται με το τετράγωνο της αντίστοιχης εγκάρσιας.

Οι περιπτώσεις μετασχηματισμού των σχημάτων 31 και 32 είναι πολύ απλές στα αποτελέσματά τους. Εν τούτοις καθ' ένας από αυτούς συσχετίζεται με μια ταυτόχρονη μεταβολή διαφόρων παραμέτρων π.χ. στο τελευταίο παράδειγμα το μήκος κύματος, η κλίμακα του ολογράμματος και η θέση της πηγής μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Χρησιμοποιώντας τις αναφερόμενες περιπτώσεις σε διαδοχική σειρά είναι δυνατόν να διαχωριστεί η επίδραση από όλες αυτές τις παραμέτρους και να διαπιστωθεί μεμονωμένα ο τύπος της αναπαραγόμενης εικόνας μετά από μία αυθαίρετη μεταβολή του μήκους κύματος, της κλίμακας του ολογράμματος και της θέσης της πηγής. Εν τούτοις μια τέτοια πορεία είναι ιδιαίτερα περίπλοκη.

Αναπτύχθηκε ερευνητικά μία λογικά διασαφητική μέθοδος δημιουργίας της επαναδημιουργούσης εικόνας. Αυτή η μέθοδος βασίζεται ουσιαστικά στην αντίληψη του "ίχνους αντικειμένου", που είναι ένας σίγουρα αμετάβλητος εξειδικευμένος σχηματισμός για καθένα σημείο του ολογράμματος. Σε σχέση με την ακρίβεια, αυτή η μέθοδος προσαρμόζεται πλήρως στη χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την ανάπτυξη των γενικών σχέσεων του υπό μελέτη μετασχηματισμού [25],

Οι θεμελιώδεις αρχές αυτής της μεθόδου είναι αρκετά απλές. Η διαδικασία διαχωρισμού της δέσμης αναφοράς σε ένα σύστημα από ακτίνες που σχηματίζουν το είδωλο μπορεί να θεωρηθεί σαν αποτέλεσμα σκέδασης της δέσμης αναφοράς σε ένα σύστημα οπτικών φραγμάτων. Κάθε φράγμα δημιουργεί μια φωτεινή ακτίνα που κατευθύνεται σε ένα από τα σημεία του αντικειμένου. Ας αναφέρουμε λεπτομερειακά τη διαδικασία σκέδασης της δέσμης αναφοράς R στη δέσμη αντικειμένου O σε ένα απ' τα φράγματα D που διαθέτει χωρική περίοδο T (σχήμα 33). Είναι γνωστό πως η επαναδημιουργούμενη εικόνα από το

ολόγραμμα σχηματίζεται από πρώτης τάξεως σκεδαζόμενες δέσμες, δηλαδή από τις φωτεινές ακτίνες που η διαφορά των δρόμων τους όταν σκεδάζονται σε γειτονικά στοιχεία του φράγματος είναι ίση με το μήκος κύματος λ . Από την γεωμετρία του σχήματος 33 φαίνεται πως οι ακτίνες R και R' που ανήκουν στο ίδιο κύμα αναφοράς WR σκεδάζονται σε γειτονικά στοιχεία φράγματος σε ακτίνες αντικειμένου O και O' και αποκτούν τη διαφορά δρόμου εις βάρος των δρόμων ab και cd . Συνεπώς η συνθήκη για το σχηματισμό του σκεδαζόμενου κύματος πρώτης τάξεως μπορεί να διατυπωθεί υπό την ακόλουθη μορφή: $ab - cd = \lambda$.



Σχήμα 33. Η σκέδαση της δέσμης αναφοράς σε οπτικό φράγμα περίθλασης χωρικής περιόδου T.

Εκφράζοντας τα τμήματα ab και cd μέσω του βήματος T του φράγματος και α , β είναι οι σχηματιζόμενες γωνίες μεταξύ της δέσμης αναφοράς, της δέσμης αντικειμένου και της καθέτου η στην επιφάνεια D καταλήγουμε στη σχέση:

$$T \cdot (\sin \alpha - \sin \beta) = \lambda \quad (4)$$

Εάν οι γωνίες α και β είναι μικρές τότε τα ημίτονα μπορούν να αντικατασταθούν με τις εφαπτόμενες και έτσι προκύπτει η παρακάτω σχέση:

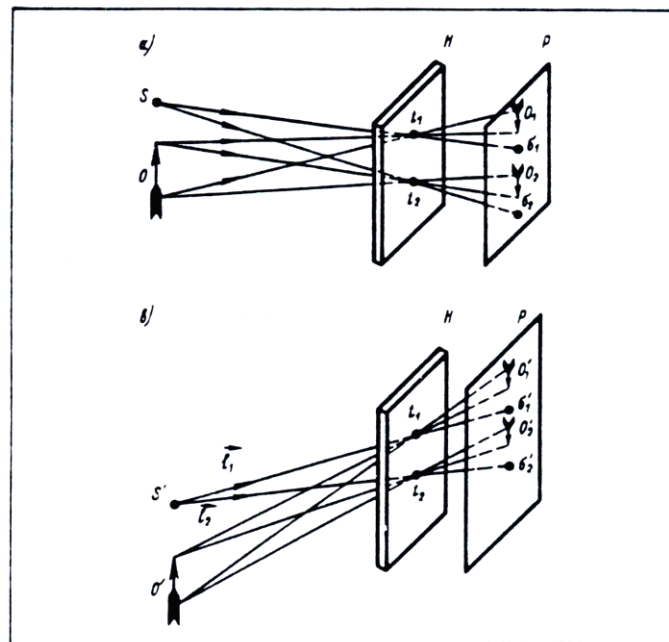
$$\tan \alpha - \tan \beta = \lambda / T \quad (5)$$

Ας ζωγραφίσουμε ένα ορισμένο βοηθητικό επίπεδο P παράλληλο προς την επιφάνεια του φράγματος και ας προεκτείνουμε τη δέσμη αναφοράς R και αυτή του αντικειμένου O έως το επίπεδο αυτό. Από τη σχέση (5) συνεπάγεται πως η απόσταση μεταξύ των σημείων τομής (σημεία σ και O στο σχήμα 33) δεν εξαρτάται από την προσπίπτουσα γωνία της δέσμης αναφοράς στο φράγμα και προσδιορίζεται από τη δομή του φράγματος (βήμα T) και από το μήκος κύματος λ .

Εάν η επιτυγχάνομενη κανονικότητα εφαρμοστεί στο ολόγραμμα μπορεί να διατυπωθεί ο επόμενος κανόνας για τη δημιουργία της επαναδημιουργούμενης εικόνας. Ας υποθέσουμε πως το είδωλο ενός συγκεκριμένου αντικειμένου O (σχήμα 34α) καταγράφεται στο

ολογράμμα Η με τη βοήθεια της φωτεινής πηγής αναφοράς S. Ας δημιουργήσουμε πρόσθετο επίπεδο P που είναι παράλληλο προς το επίπεδο του ολογράμματος και ας φέρουμε ακτίνες από τα σημεία του αντικειμένου και της πηγής αναφοράς μέσω ενός σημείου t_1 του ολογράμματος. Τα σημεία τομής αυτού του συστήματος ακτινών και του επιπέδου P δημιουργούν ένα συγκεκριμένο σχηματισμό στο επίπεδο. Αυτός ο σχηματισμός παρουσιάζει το "ίχνος του αντικειμένου" (σημεία σ_1 και O_1 στο σχήμα 34α). Το "ίχνος του αντικειμένου" αντιστοιχεί στην εμφάνιση του αντικειμένου και της πηγής αναφοράς όταν αυτά θεωρούνται από το σημείο εκείνο του ολογράμματος που αντιστοιχεί σ' αυτά. Η ίδια διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί για τη δημιουργία του "ίχνους του αντικειμένου" για άλλο σημείο του ολογράμματος π.χ. το σημείο t_2 .

Στη διαδικασία της επαναδημιουργίας της εικόνας που αντιστοιχεί στη νέα θέση της πηγής αναφοράς S' ακτίνες ℓ_1, ℓ_2 της πηγής αναφοράς κατευθύνονται μέσω των ίδιων σημείων t_1 και t_2 του ολογράμματος (σχήμα 34β). Μετά από αυτό ο σχηματισμός του κάθε ίχνους για το αντικείμενο που είχε ήδη επιτευχθεί μετακινείται από την προηγούμενη θέση του κατά ένα τέτοιο τρόπο ώστε το ίχνος της δέσμης αναφοράς (σημεία σ_1 και σ_2) να συμπέσουν με τα νέα σημεία τομής της δέσμης αναφοράς με το επίπεδο P (σημεία σ_1 και σ_2).



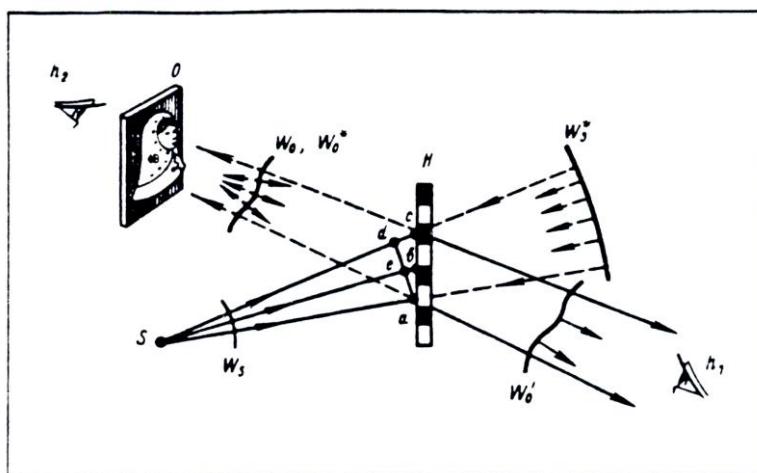
Σχήμα 34. Μέθοδος επαναδημιουργίας της εικόνας χρησιμοποιώντας τον αμετάβλητο συσχετισμό του ίχνους αντικειμένου.

Έτσι οι νέες θέσεις για τα ίχνη του αντικειμένου βρίσκονται κάτω από τις συνθήκες επαναδημιουργίας οι οποίες όμως έχουν αλλάξει. Στη συνέχεια ζωγραφίζονται οι ακτίνες από τα αντίστοιχα σημεία του ίχνους του αντικειμένου (άκρα για τα βέλη O_1' και O_2') μέσω του σημείου του ολογράμματος στο οποίο ανήκει αυτό το ίχνος (σημεία t_1 και t_2). Η θέση των σημείων της επαναδημιουργούμενης εικόνας O' βρίσκεται στα σημεία τομής αυτών των ακτινών.

Η μέθοδος δημιουργίας του ειδώλου μέσω της μεταβολής του μήκους κύματος και της ολογραφικής κλίμακας περιγράφεται το ίδιο καλά από τη σχέση 5. Εύκολα γίνεται κατανοητό πως το δεξιό μέλος της σχέσης 5 είναι ανάλογο της απόστασης μεταξύ των σημείων του ίχνους. Έτσι η κλίμακα του ίχνους αυξάνει αντίστοιχα όταν το μήκος κύματος αυξάνει και μειώνεται όταν αυξάνουν οι διαστάσεις του ολογράμματος.

4. Μερικές ειδικές ιδιότητες ολογραμάτων

Ας αναφερθούμε τώρα σε μερικές ιδιότητες ολογραμάτων οι οποίες ανοίγουν νέες προοπτικές και δίνουν δυνατότητες που δεν επιτυγχάνονται με τις συμβατικές τεχνικές της οπτικής. Πρώτα απ' όλα σημαντική θεωρείται η ιδιότητα της δυνατότητας αντιστροφής του μετώπου κύματος δηλαδή η δυνατότητα να στέλνεις ανάστροφα κύματα πίσω προς το αντικείμενο. Γενικά η ουσία αυτού του φαινομένου συνίσταται εις τα ακόλουθα: Ας υποθέσουμε πως το κυματικό πεδίο ενός ορισμένου αντικειμένου O π.χ. το ανάγλυφο που αναπαριστά την ρώσικη κούκλα καταγράφεται στο ολόγραμμα H με τη βοήθεια της σημειακής πηγής S (σχήμα 35).



Σχήμα 35. Η δυνατότητα της αντιστροφής του μετώπου κύματος με τη βοήθεια ολογράμματος.

Εάν ένα τέτοιο ολόγραμμα καταγράφεται από το σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s της ίδιας πηγής αναφοράς S , το ολόγραμμα θα αναπαράγει το κυματικό πεδίο του αντικειμένου δηλαδή κύμα W_0' που διαδίδεται από το αντικείμενο και αντιστοιχεί στην προέκταση του οδεύοντος κύματος W_0 που καταγράφηκε στο ολόγραμμα. Παρατηρητής h_1 που δέχεται αυτό το κυματικό πεδίο θα δει στο χώρο το είδωλο του αντικειμένου O .

Τώρα ας υποθέσουμε πως το ίδιο ολόγραμμα H επαναδημιουργείται από ένα σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s^* που όμως συγκλίνει στη πηγή αναφοράς S . Εκείνο που συμβαίνει σ' αυτή την περίπτωση είναι ότι το ολόγραμμα H θα αναπαράγει κύμα W_0^* το οποίο είναι συζυγές του κύματος W_0 που καταγράφηκε στο ολόγραμμα δηλαδή πρόκειται για μέτωπο κύματος που ταυτίζεται σχηματικά με το W_0 αλλά διαδίδεται σε αντίθετη κατεύθυνση απ' αυτό.

Τα μέτωπα κύματος των απ' ευθείας και συζυγών κυμάτων W_0 και W_0^* είναι σχεδιασμένα στο σχήμα 35 από μια κοινή καμπύλη διότι το ένα με το άλλο ταυτίζεται. Οι

διευθύνσεις διάδοσης παρουσιάζονται από τα διανύσματα δέσμης. Τα διανύσματα δέσμης του απ' ευθείας κύματος συμβολίζονται σαν συνεχείς γραμμές ενώ αυτά του αντίστροφου κύματος με διακεκομμένες γραμμές.

Τώρα ας αναφερθούμε λεπτομερειακά στο μηχανισμό του ενδιαφέροντος αυτού φαινομένου. Όπως ήδη μνημονεύτηκε προηγούμενα το ολόγραμμα αναπαράγει στην επιφάνειά του την φασική κατανομή της ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από το αντικείμενο. Αυτή η αναπαραγωγή επηρεάζεται αφήνοντας ελεύθερα μόνο εκείνα τα τμήματα του κύματος αναφοράς που ταιριάζουν απόλυτα με τη φάση της δέσμης του αντικειμένου.

Ο προσδιορισμός της συνάρτησης φασικής κατανομής επί συγκεκριμένης επιφάνειας περιέχει τον καθορισμό του βαθμού καθυστέρησης των ταλαντώσεων σε όλα τα σημεία της επιφάνειας που ελήφθησαν σε σχέση με ένα συγκεκριμένο σημείο αναφοράς. Έστω τώρα συγκεκριμένο σημείο α που βρίσκεται στο διαπερατό τμήμα του ολογράμματος και χρησιμεύει σαν σημείο αναφοράς. Όπως φαίνεται από το σχηματικό διάγραμμα οι φάσεις ταλάντωσης όλων των υπόλοιπων διαπερατών τμημάτων μπορούν να προσδιοριστούν από το μέγεθος των τμημάτων που καθορίζουν την απόσταση του τμήματος από τη πηγή αναφοράς S σε σχέση με την απόσταση του σημείου αναφοράς α . Εν προκειμένω η φάση του σημείου β χαρακτηρίζεται από το τμήμα $\beta\epsilon$, η φάση του σημείου γ από το τμήμα $\gamma\delta$ κ.ο.κ.

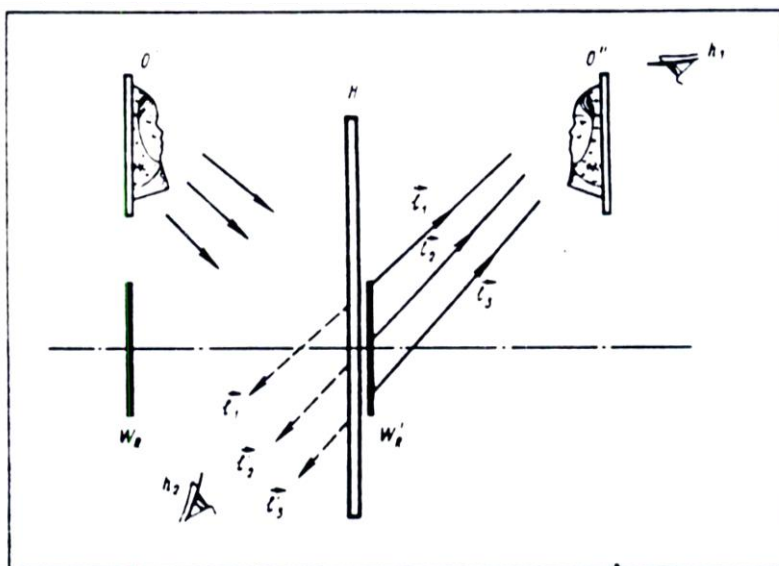
Τώρα ας αναφερθούμε στην περίπτωση όπου το ολόγραμμα επαναδημιουργείται από το σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s^* που συγκλίνει στο σημείο S . Εύκολα συνάγεται πως τα μεγέθη των τμημάτων που χαρακτηρίζουν τη φασική κατανομή στο ολόγραμμα θα παραμείνουν σταθερά σ' αυτή την περίπτωση, αλλά θα αποκτήσουν αντίθετο πρόσημο. Πράγματι εάν στη διαδικασία επαναδημιουργίας του μετώπου του κύματος που εκπέμπεται από τη πηγή S τα τμήματα $\epsilon\beta$ και $\delta\gamma$ χαρακτηρίζουν την καθυστέρηση της ταλάντωσης στα σημεία β και γ σε σχέση με το σημείο αναφοράς α , τα ίδια τμήματα στη περίπτωση της επαναδημιουργίας από το συγκλίνον προς τη πηγή μέτωπο κύματος θα χαρακτηρίζουν το πόσο προηγείται η ταλάντωση στα σημεία γ και β σε σχέση με την ταλάντωση στο σημείο αναφοράς α . Αυτό διότι το σφαιρικό μέτωπο κύματος W_s^* πρώτα φθάνει στα σημεία γ και β και μετά διέρχεται από το σημείο α . Έτσι στη διαδικασία επαναδημιουργίας με το συζυγές κύμα η φασική κατανομή επί της ολογραφικής επιφάνειας αποκτά αντίθετο πρόσημο. Εύκολα γίνεται κατανοητό πως οι νέες οριακές συνθήκες αντιστοιχούν στο επαναδημιουργηθέν μέτωπο κύματος W_o^* που ταιριάζει στο σχήμα του μετώπου W_o που καταγράφηκε στο ολόγραμμα αλλά διαδίδεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει πως τα τμήματα του μετώπου κύματος W_o που προηγούνται αντιστοιχούν σ' αυτά που καθυστερούν στο W_o^* και αντιστρό- φως.

Ο παρατηρητής h_2 που βλέπει το σχηματιζόμενο είδωλο από το συζυγές μέτωπο κύματος θα δει μια πολύ ενδιαφέρουσα εικόνα. Εάν στη περίπτωση της απ' ευθείας επαναδημιουργίας ο παρατηρητής h_1 βλέπει το εμπρός ανάγλυφο του προσώπου της κούκλας, ο παρατηρητής h_2 θα δει το είδωλο του ίδιου προσώπου αλλά αυτό το πρόσωπο θα φαίνεται σαν να εικονίζεται από τα μέσα. Για παράδειγμα, εάν ο παρατηρητής h_1 είδε το ανάγλυφο είδωλο ενός προσώπου όπου η μύτη της κούκλας προεξέχει προς τα εμπρός, ο

παρατηρητής h_2 θα δει το είδωλο ενός κοίλου προσώπου όπου η μύτη της κούκλας θα απεικονίζεται σαν βαθούλωμα. Σαν ολότητα, ένα τέτοιο είδωλο γνωστό με το όνομα "ψευδοσκοπικό" έχει την εμφάνιση ενός καλουπιού που δημιουργείται από την αποτύπωση του πρωτότυπου σε ένα πλαστικό υλικό.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η δημιουργία ψευδοσκοπικών ειδώλων απέχει πολύ από το να είναι η κύρια πρακτική συνέπεια του φαινομένου αντιστροφής του μετώπου κύματος. Αυτό το φαινόμενο γενικά αξιοποιείται στις εφαρμογές που σχετίζονται με τις παρατηρήσεις μέσω ετερογενών μέσων.

Το ολόγραμμα δημιουργεί επίσης ψευδοσκοπικό είδωλο και σε άλλη περίπτωση. Όπως ήδη έχει προαναφερθεί το δισδιάστατο ολόγραμμα δημιουργεί δύο ειδών είδωλα, το πραγματικό και το φανταστικό. Το φανταστικό είδωλο είναι το ψευδοσκοπικό. Πράγματι αν υποθέσουμε πως το είδωλο του αντικείμενου O (εν προκειμένω το εμπρός τμήμα του προσώπου της ίδιας κούκλας) ήταν κατεγραμμένο στο ολόγραμμα H (σχήμα 36). Με σκοπό να απλοποιηθεί το θέμα αν υποθέσουμε πως το επίπεδο κύμα W_R που προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του ολογράμματος χρησιμεύει σαν δέσμη αναφοράς. Εάν το ολόγραμμα επαναδημιουργείται από ένα επίπεδο κύμα τότε το πραγματικό είδωλο O' εμφανίζεται στη περιοχή όπου βρισκόταν νωρίτερα το αντικείμενο O . Με σκοπό την εύρεση του φανταστικού ειδώλου είναι αναγκαίο (όπως ήδη έχει μνημονευθεί στο σχήμα 18) να δημιουργηθεί το κύμα αναφοράς W_R' πλησίον της ολογραφικής επιφάνειας και στη συνέχεια να απεικονιστεί το αντικείμενο O' αυτό το κύμα όπως O' ένα κάτοπτρο. Όταν αυτή η διαδικασία συμπληρωθεί θα έχουμε επιτύχει το φανταστικό είδωλο O'' .

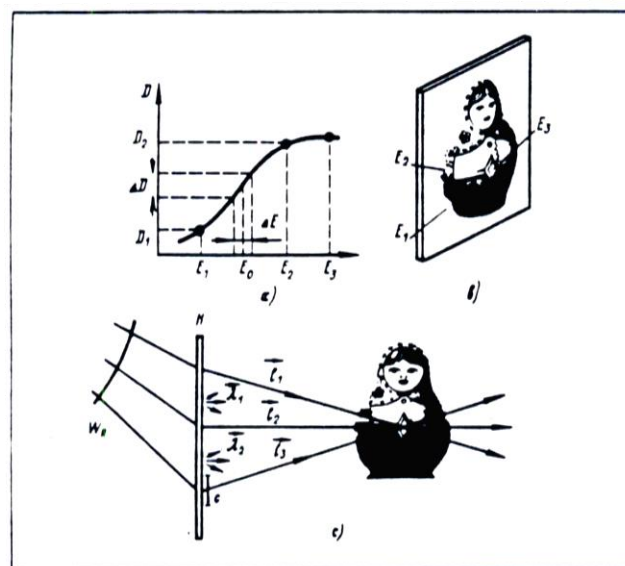


Σχήμα 36. Διάταξη δημιουργίας ψευδοσκοπικών ειδώλων στο χώρο.

Το γεγονός πως η ιδέα κάτοπτρο χρησιμοποιείται στη διαδικασία της δημιουργίας φανταστικού ειδώλου δεν σημαίνει πως αυτό το είδωλο θα έχει τη συνηθισμένη συμβατική του εμφάνιση. Η θέση του φανταστικού ειδώλου στο χώρο προσδιορίζεται αληθινά από την κατοπτρική μετατροπή του αντικείμενου, εν τούτοις οι φωτεινές ακτίνες ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ_3 που δημιουργούν το είδωλο ακολουθούν την κατεύθυνση αντίθετης φοράς απ' αυτή των

ακτίνων l_1', l_2', l_3' που έπρεπε να αντιστοιχούν στο κατοπτρικό είδωλο O'' . Από το σχήμα 36 συνεπάγεται πως η μεταβολή στη κατεύθυνση της ακτίνας αντιστοιχεί στη μετατροπή από το ορθοσκοπικό είδωλο στο αντίστοιχο ψευδοσκοπικό.

Μια από τις πλέον χαρακτηριστικές ιδιότητες της ολογραφικής απεικόνισης συνίσταται στο γεγονός πως μπορεί να αναπαράγει τις διαβαθμίσεις φωτεινότητας ενός αντικειμένου εντός μιας πολύ μεγάλης δυναμικής περιοχής. Για παράδειγμα ένα τέτοιο είδωλο αναπαράγει αμφότερα τις φωτεινές αλλά και τις σημαντικά σκοτεινές λεπτομέρειες του αντικειμένου χωρίς παραμορφώσεις. Στη συμβατική φωτογραφία η δυναμική παραγωγή της φωτεινότητας του αντικειμένου περιορίζεται από την αποκαλούμενη φωτογραφική ανεκτικότητα του υλικού. Η ούτως αποκαλούμενη Hurter και Driffield καμπύλη (H και D καμπύλη) του φωτογραφικού υλικού παρουσιάζεται στο σχήμα 37α.



Σχήμα 37. συγκριτική κατανομή της φωτεινότητας στο είδωλο σε φωτογραφία - ολογραφία.

Η καμπύλη αυτή εμφανίζει τη σχέση μεταξύ της οπτικής πυκνότητας αμαύρωσης D του φωτογραφικού φιλμ με τον λογάριθμο E του χρόνου έκθεσης. Οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί από τη φωτογραφική ανεκτικότητα του υλικού παραμορφώνουν την κατανομή της φωτεινότητας του φωτογραφικού ειδώλου και επηρεάζουν ειδικά την αναπαραγωγή των φωτεινών λεπτομερειών του αντικειμένου. Για παράδειγμα μια συμβατική φωτογραφία δεν είναι δυνατόν να αναπαράγει τον πιθανό σπινθηρισμό της κρεμαστής διαμαντένιας πόρπης στο λαϊμό της κούκλας (σχήμα 37β).

Πράγματι εάν οι διαβαθμίσεις της φωτεινότητας όλων των περιοχών της κούκλας περιορίζονται εντός του τμήματος της H και D καμπύλης στη περιοχή φωτεινότητας από E_1 σε E_2 όπου η οπτική πυκνότητα D εξαρτάται από το φωτισμό. Το εντόνου σπινθηρισμού σημείο της κρεμαστής πόρπης με φωτεινότητα E_3 θα αντιστοιχεί στο τμήμα κόρου της H και D καμπύλης. Έτσι το "θερμό" σημείο θα αναπαραχθεί στη φωτογραφία με τον ίδιο ακριβώς τρόπο των λεπτομερειών όπως σε περιοχές της κούκλας όπου η αντίστοιχη φωτεινότητα E_2 είναι σημαντικά φτωχότερη.

Απ' την άλλη μεριά το ολόγραμμα συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά (σχήμα 37c). Ακόμη και όταν η ανεκτικότητα του φωτογραφικού υλικού είναι πολύ περιορισμένη το ολόγραμμα είναι σε θέση να αναπαράγει πιστά τις λεπτομέρειες περιοχών στις οποίες η φωτεινότητα υπερβαίνει τη μέση φωτεινότητα του αντικειμένου κατά χιλιάδες φορές. Η αιτία γι αυτό είναι ιδιαίτερα απλή. Στη διαδικασία καταγραφής ολογράμματος η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από κάθε λεπτομέρεια του αντικειμένου κατανέμεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του ολογράμματος. Έτσι μια σχετικά μικρή διαμόρφωση ΔΕ επικεντρωμένη σε ορισμένη μέση τιμή φωτεινότητας E_0 αντιστοιχεί σε μία πολύ ικανοποιητική φωτεινή απεικόνιση των λεπτομερειών του αντικειμένου. Μια τέτοια διαμόρφωση δεν αντιστοιχεί στο φωτογραφικό υλικό σε τμήμα κόρου της καμπύλης και έτσι η ομοιομορφία της φωτεινότητας του αντικειμένου με την απόκριση του υλικού διατηρείται σε λογικά όρια.

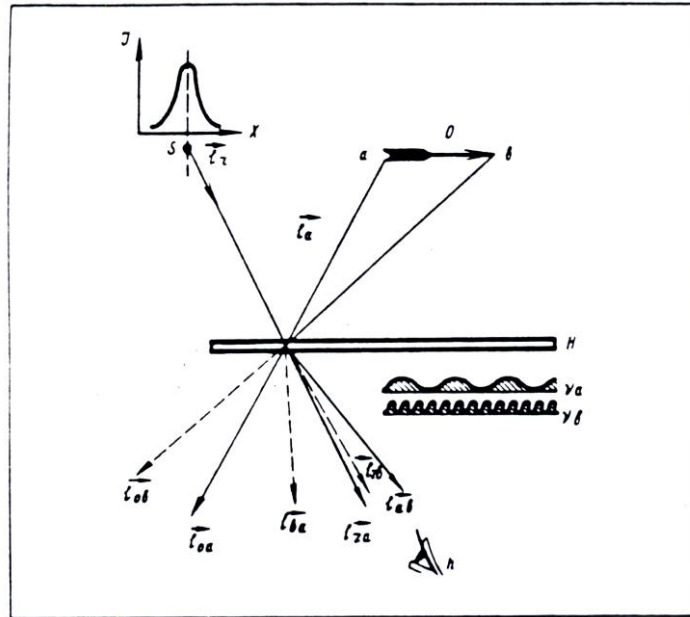
Στη διαδικασία της επαναδημιουργίας του ολογράμματος κάθε λεπτομέρεια του ειδώλου (π.χ. η κρεμαστή πόρπη του σχήματος 37c) σχηματίζεται από την συλλεγόμενη ακτινοβολία απ' όλη τη περιοχή του ολογράμματος (φωτεινές ακτίνες l_1, l_2, l_3). Αποτέλεσμα είναι η φωτεινή ροή που κατευθύνεται στη λεπτομέρεια αυτή του ειδώλου να είναι αρκετά μεγαλύτερη στο σχετικά χαμηλό επίπεδο της καταγραφομένης διαμόρφωσης. Εν προκειμένω η δυναμική περιοχή της κατανομής της φωτεινότητας του ολογραφικά αναπαραγόμενου ειδώλου περιορίζεται από το εναπομένον υπόβαθρο. Αυτό το υπόβαθρο προέρχεται, για παράδειγμα από τη σκέδαση στη κοκκώδη δομή του φωτογραφικού υλικού (φωτεινές ακτίνες l_1, l_2 στο σχήμα 37c).

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η ιδιότητα του ολογράμματος να αναπαράγει επακριβώς την ευρύτερη περιοχή της φωτεινότητας του αντικειμένου είναι μεγάλης σπουδαιότητας στη τεχνική της απεικόνισης. Ιδιαίτερα, το ολογραφικό πορτραίτο εντυπωσιάζει τον παρατηρητή πρώτα απ' όλα από την αναπαραγωγή της φυσικής λάμψης στα μάτια, και μόνο μετά απ' αυτό συγκεντρώνει κανείς τη προσοχή του σε άλλα χωρικά γεγονότα.

Ένα πολύ ενδιαφέρον και σπουδαίο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ολογραφικής διαδικασίας είναι η σχετική αδυναμία επηρεασμού στη καταστροφή και σε ατέλειες του φωτογραφικού υλικού που χρησιμοποιείται για την ολογραφική καταγραφή. Ο μηχανισμός ερμηνείας του μη επηρεασμού είναι αρκετά απλός. Κάθε σημείο της αναπαραγόμενης εικόνας σχηματίζεται από φωτεινές ακτίνες που προέρχονται απ' όλα τα τμήματα του ολογράμματος (για παράδειγμα το είδωλο της κρεμαστής πόρπης στο σχήμα 37c σχηματίζεται από τις l_1, l_2, l_3 φωτεινές ακτίνες). Εάν ένα τμήμα του ολογράμματος καταστραφεί για παράδειγμα το τμήμα c η διαδικασία σχηματισμού στερείται από τις ακτίνες που προέρχονται μόνο απ' αυτό (σ' αυτή τη περίπτωση η ακτίνα l_3) ενώ όλες οι παραμένουσες ακτίνες l_1, l_2 εστιάζονται ανεπηρέαστες στο είδωλο όπως και πριν.

Ας αναφερθούμε τώρα στις ιδιότητες του ολογράμματος που αποκαλύπτονται όταν το ολόγραμμα επαναδημιουργείται από τη δέσμη του αντικειμένου. Αυτή η αναφορά θα βασιστεί σε παράδειγμα που απασχολεί τα ολογράμματα Fourier. Έτσι υποθέτουμε πως στη διαδικασία καταγραφής το αντικείμενο O και η πηγή αναφοράς S είναι διατεταγμένες σε ένα επίπεδο παράλληλο προς την επιφάνεια του ολογράμματος (σχήμα 38). Όπως ήδη

προαναφέρθηκε σ' αυτή τη περίπτωση σε κάθε σημείο του αντικειμένου (δηλαδή σημεία α και β) αντιστοιχεί η δική του αρμονική δομής ολογράμματος (V_α και V_β).



Σχήμα 38. Διαδικασία δημιουργίας του ολογράμματος από τη δέσμη του αντικειμένου.

Τώρα ας υποθέσουμε πως το ολόγραμμα που καταγράφηκε μ' αυτό το τρόπο επαναδημιουργείται όχι από τη πηγή αναφοράς S αλλά από αυτό το ίδιο το αντικείμενο O (φυσικά το αντικείμενο θα πρέπει να φωτιστεί από κάποια σύμφωνη ακτινοβολία). Η πρώτη διαπίστωση είναι πως σ' αυτή τη περίπτωση το ολόγραμμα πρέπει να αναπαράγει το είδωλο της πηγής αναφοράς S . Εν τούτοις αυτή η εντύπωση είναι κάπως ανακριβής. Θα αποδείξουμε πως το δισδιάστατο ολόγραμμα δεν διαθέτει αυτού του είδους την αντιστρεπτικότητα. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να αναφερθεί η αλληλεπίδραση των διακεκριμένων σημείων του αντικειμένου με τη δομή του ολογράμματος. Η ακτινοβολία από το σημείο a αλληλεπιδρά με τις δικές της αρμονικές V_α που είναι αποτέλεσμα συμβολής της ακτινοβολίας αυτής με αυτή της πηγής S , και διαχωρίζεται σε δύο δέσμες - μηδενικής τάξεως $l_{\alpha\alpha}$ και δέσμη $l_{\gamma\alpha}$ που πραγματικά αντιστοιχεί στο επαναδημιουργούμενο είδωλο της πηγής αναφοράς S . Εν τούτοις η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το σημείο a θα αλληλεπιδρά επίσης με άσχετη αρμονική έχουσα υψηλότερη συχνότητα V_β που σχηματίστηκε από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία του σημείου β και της πηγής S . Η γωνία εκτροπής της δέσμης l_α σ' αυτή τη περίπτωση θα υπερβαίνει την απαιτούμενη τιμή για τη δημιουργία της δέσμης $l_{\gamma\alpha}$ της πηγής αναφοράς και έτσι θα εμφανιστεί νέα ακτίνα $l_{\alpha\beta}$. Αυτή η ακτίνα δεν συμμετέχει στη διαδικασία καταγραφής του ολογράμματος. Όμοια, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το σημείο β δημιουργεί μηδενικής τάξης ακτίνα $l_{\beta\beta}$ ακτίνα $l_{\gamma\beta}$ που συμπίπτει με τη δέσμη αναφοράς l_γ και κάποια νέα ακτίνα $l_{\beta\alpha}$ που δεν καταγράφεται στο ολόγραμμα. Η ακτινοβολία όλων των υπόλοιπων σημείων του αντικειμένου μετασχηματίζονται σύμφωνα με τον ίδιο κανόνα.

Σαν αποτέλεσμα της πλήρους διαδικασίας που αναφέρθηκε, το ολόγραμμα φαίνεται να αναπαράγει την πηγή αναφοράς όμως επιπρόσθετα αναπαράγει και ένα μεγάλο αριθμό από αφυπνιζόμενες ακτίνες οι οποίες δεν καταγράφονται στο ολόγραμμα. Έτσι ο παρατηρητής h που καταγράφει την ακτινοβολία του αναπαραγόμενου ολογράμματος θα δει ένα λαμπερό σημείο S που όμως περιβάλλεται από το φωτεινό "νέφος" των αφυπνιζόμενων ακτινών. Αυτό το σημείο θα βρίσκεται στη προηγούμενη θέση της πηγής αναφοράς. Η τυπική κατανομή της έντασης σε ένα τέτοιο είδωλο παρουσιάζεται στην επάνω περιοχή του προηγούμενου σχήματος. Μπορεί να αποδειχθεί πως η κατανομή αυτή ταιριάζει με την αποκαλούμενη συνάρτηση αυτοσυσχετισμού του αντικειμένου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέθοδοι ολογραφίας και προοπτικές των πρακτικών εφαρμογών της

Η ολογραφία έχοντας ήδη αποκτήσει το κατάλληλο επιστημονικό κύρος, εισβάλλει βαθμηδόν στη καθημερινή μας ζωή. Οι στόχοι των πιθανών εφαρμογών της είναι αναρίθμητοι και δεν είναι να απορεί κανείς πως στην ουσία η ολογραφία είναι μια υπερβολικά πολύπλευρη μέθοδος συνεισφοράς της γνώσης του κόσμου που μας περιβάλλει. Η ολογραφία μπορεί να ενισχύσει το ίδιο καλά σχεδόν όλες τις περιοχές της ανθρώπινης δράσης, περιοχές που εκτείνονται από τη γλωσσολογία έως τις έρευνες των διαδικασιών που πραγματοποιούνται στο θερμοπυρηνικό πλάσμα. Η ολογραφία είναι μια μέθοδος που δεν διαθέτει σήμερα μια σημαντική, κορυφαία εφαρμογή ακριβώς όπως για παράδειγμα ο φακός στην οπτική. Ο φακός που χρησιμοποιείται σε μικροσκόπια, κινηματογραφικές κάμερες, τηλεσκόπια, κιάλια και μια πληθώρα άλλων συσκευών στις οποίες παίζει ουσιαστικό ρόλο. Η αφθονία δυνατοτήτων κάνει την παρουσίαση μιας αρκετά πλήρους περίληψης των πρακτικών εφαρμογών της ολογραφίας ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα. Έτσι θεωρήθηκε πιο πρόσφορο να περιορίσουμε αυτή τη περίληψη στη περιγραφή των μεθόδων που στηρίζονται όλες αυτές οι εφαρμογές. Οι ολογραφικές μέθοδοι μαζί με τις ιδιότητες του ολογράμματος και τις κανονικότητές του, θεωρούνται ότι είναι οι τρεις βασικές συνιστώσες αυτής της νέας επιστήμης που βρίσκεται σε εξέλιξη.

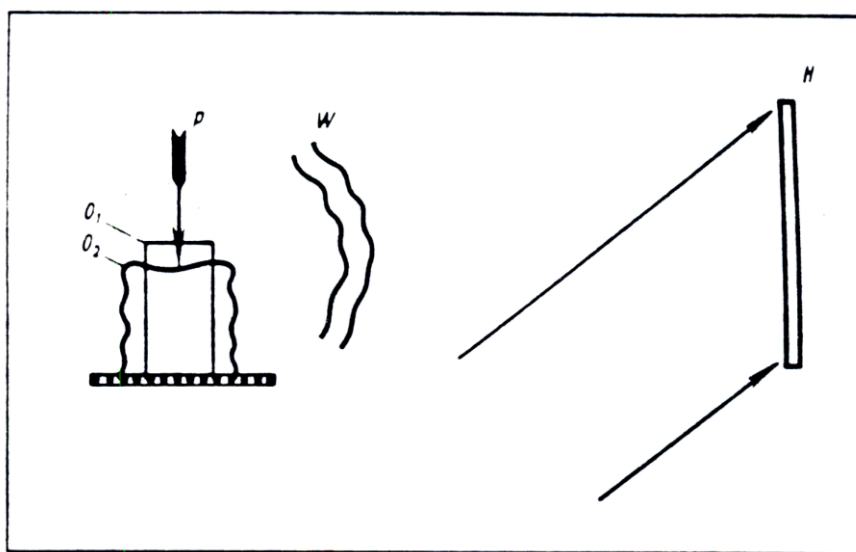
Όλες οι εφαρμογές της ολογραφίας μπορούν συμβατικά να ταξινομηθούν σε δύο πολύ μεγάλες κατηγορίες: εφαρμογές που σχετίζονται με την επίτευξη των τρισδιάστατων εικόνων που αποσκοπούν στην αίσθηση της όρασης και εφαρμογές στις οποίες το ολόγραμμα χρησιμοποιείται σαν το μοναδικό όργανο μιας μετρητικής διαδικασίας.

Οι σχετικές εφαρμογές με τις μετρήσεις βασίζονται στην υπερβολική αντικειμενικότητα της ολογραφικής καταγραφής. Αυτή η ιδιότητα ενυπάρχει στην ολογραφία και μάλιστα δηλώνει την παρουσία της ακόμη και σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει πραγματική ανάγκη γι' αυτό. Ιδιαίτερα όταν παρατηρούνται οι τριών διαστάσεων ολογραφικές εικόνες που σήμερα πολύ συχνά εκτίθενται σε εκθέσεις ένας πρέπει πάντα να θυμάται πως σε αντίθεση με τη φωτογραφική εκτύπωση το ολόγραμμα ενός για παράδειγμα αγαλατιδίου από πορσελάνη καταγράφει και τις πιο μικρές λεπτομέρειες της κατασκευής του. Τέτοιες λεπτομέρειες είναι μικρορωγμές, μικροανωμαλίες στα χείλη ή και στην επιφάνεια της τάξεως του ενός μικρού (μm), υπερβολικά λεπτές λεπτομέρειες της φασικής κατανομής του φωτός σε ολόκληρη την επιφάνεια της πορσελάνης κτλ.

Η βασική φιλοσοφία των εφαρμογών που σχετίζονται στην επίτευξη εικόνων που προσβλέπουν στην αίσθηση της όρασης συνίσταται από το γεγονός πως ένα ολόγραμμα χρησιμοποιείται σαν ένα μοναδικό είδος πληροφορίας - εισόδου στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Ο εγκέφαλος φαίνεται πως είναι κατασκευασμένος να λειτουργεί με ένα αρκετά ιδιόρρυθμο τρόπο. Σε αντίθεση με τους σύγχρονους υπολογιστές λειτουργεί με όρους εικόνων και έτσι απαιτεί η πληροφορία εισόδου να είναι μορφοποιημένη σε καθορισμένη εικόνα. Για παράδειγμα ένας πιλότος στη φάση της προσγείωσης μπορεί να εφοδιαστεί από

όλες εκείνες τις πληροφορίες που απαιτούνται γι' αυτό. Τέτοιες είναι: ύψος, ταχύτητα προσέγγισης, γωνίες υψώματος, απόσταση από το διάδρομο προσγείωσης κτλ. Όμως ο πιλότος δεν θα μπορέσει να προσγειώσει το αεροσκάφος του εάν ενισχυθεί μόνο με τέτοια αριθμητικά δεδομένα. Αντίθετα εάν όλες αυτές οι αριθμητικές τιμές μετατραπούν σε μια τεχνητή αναπαράσταση του διαδρόμου προσγείωσης απεικονίζοντας τον με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που φαίνεται από τον ιπτάμενο πιλότο στις ίδιες συνθήκες πτήσης τότε η διαδικασία της προσγείωσης δεν θα είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Ας αναφερθούμε τώρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις εφαρμογές όπου η ολογραφία αξιοποιείται σαν μετρητικό όργανο. Ένα από τα πιο τυπικά χαρακτηριστικά αυτής της περιοχής εφαρμογών είναι και η αποκαλούμενη ολογραφική συμβολομετρία [28, 29], Η γενική ιδέα αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 39.



Σχήμα 39. Διάταξη ολογραφικής συμβολομετρίας.

Με αυτή τη μέθοδο σε μια και μοναδική φωτογραφική πλάκα Η καταγράφεται ένα ολόγραμμα του αντικειμένου στην αρχική του κατάσταση O_1 και ένα ολόγραμμα του ίδιου αντικειμένου στη τελική κατάσταση O_2 το οποίο για παράδειγμα μπορεί να αντιστοιχεί στο παραμορφούμενο αντικείμενο από την επίδραση κάποιου φορτίου P. Όταν το ολόγραμμα εκτεθεί με ένα τέτοιο τρόπο, εμφανιστεί και επαναδημιουργηθεί, αμφότερα τα είδωλα επαναδημιουργούνται ταυτόχρονα. Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί σ' αυτά τα είδωλα συμβάλλει και οι παραμορφώσεις αποκαλύπτονται μέσω χαρακτηριστικών κροσσών συμβολής. Η ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων αντιστοιχεί σε οπτικά μήκη κύματος, δηλαδή μερικά δέκατα του μm ή και ακόμη καλύτερη.

Προς το παρόν η μέθοδος της ολογραφικής συμβολομετρίας συναντάται ευρύτατα σε περιοχές όπως μηχανολογία, όπου χρησιμοποιείται για να ερευνησει τις ατέλειες διαφόρων τμημάτων, ακουσική όπου χρησιμοποιείται στην έρευνα των ταλαντώσεων των διαφραγμάτων, στην αεροδυναμική όπου γίνεται μελέτη των συνθηκών ροής διαφόρων σωμάτων και σε πολλές άλλες περιοχές εφαρμογής. Στο σχήμα 40 παρουσιάζεται ένα ολογραφικό συμβολογράφημα ενός πλάσματος Z - ακίδας. Το συμβολογράφημα

καταγράφει τη φάση αναπτυσσόμενης εκφόρτισης. Στην εκφόρτιση αυτή δεν έχουν ακόμη επηρεασθεί οι κεντρικές περιοχές της κοιλότητας.

Υπάρχει ακόμη μια πολύ σπουδαία κατεύθυνση στην ανάπτυξη των ολογραφικών εφαρμογών. Αυτή σχετίζεται με το σχεδιάσμά οπτικών στοιχείων που κατέχουν ειδικές χαρακτηριστικές ιδιότητες. Όπως και προηγούμενα αναφέρθηκε η ολογραφική καταγραφή αποκτά ένα τέτοιο βαθμό αντικειμενικότητας ώστε το ολόγραμμα ενός κοίλου κατόπτρου συμπεριφέρεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και το ίδιο το κάτοπτρο. Αποκτά δηλαδή τη δυνατότητα να συγκλίνει [16] το φως. Αυτή η ιδιότητα της αντικειμενικότητας του ολογράμματος χρησιμοποιείται στη τεχνολογία δημιουργίας στοιχείων σύγκλισης για διάφορους σκοπούς [30].

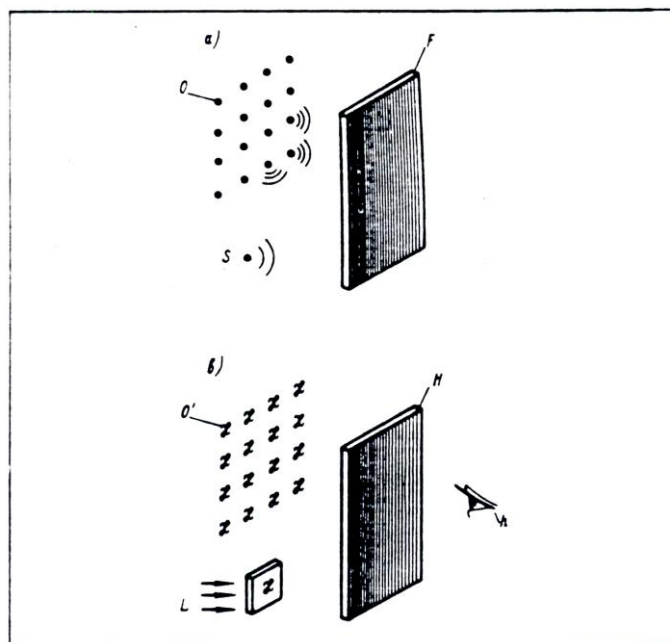


Σχήμα 40. Ολογραφικό συμβολογράφημα πλάσματος με ακίδα.

Σε μερικές περιπτώσεις το στοιχείο σύγκλισης είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε η θέση του σημείου σύγκλισης να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος δηλαδή εισάγεται το αποκαλούμενο φαινόμενο του χρωματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται στην ειδική επιλογή των στοιχείων σύγκλισης στη διάταξη καταγραφής. Τέτοια στοιχεία καταγραφής είναι εν προκειμένω τα φράγματα περίθλασης. Τα ολογραφικά φράγματα περίθλασης χαρακτηρίζονται από την απουσία των αποκαλούμενων αστιγματικών φαινομένων, από το χαμηλό επίπεδο θορύβου και από άλλες εξ ίσου χρήσιμες ιδιότητες. Σήμερα η γαλλική εταιρεία "Joben Ivon" προηγείται τεχνολογικά σ' αυτό το τομέα της ανάπτυξης. Αυτή κατασκευάζει φασματικές διατάξεις ακρίβειας που βασίζονται αποκλειστικά στη χρησιμοποίηση τέτοιων φραγμάτων σκέδασης [31].

Η αποκαλούμενη πολλαπλασιαστική ολογραφική μονάδα που χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική και σε μερικούς άλλους τομείς μπορεί να αξιοποιηθεί σαν ένα εντυπωσιακό παράδειγμα των δυνατοτήτων που προσφέρει η ολογραφία στη περιοχή παραγωγής των οπτικών συστημάτων [32], Ένα γενικό διάγραμμα που αποσαφηνίζει τους

τρόπους παραγωγής και χρησιμοποίησης ενός τέτοιου στοιχείου παρουσιάζεται στο σχήμα 41.

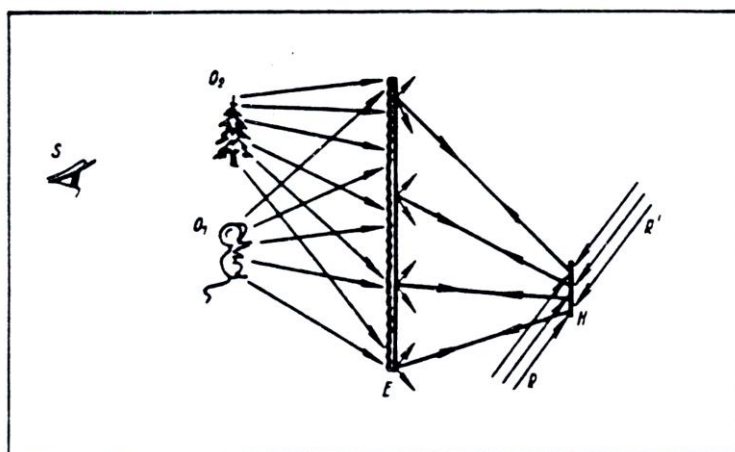


Σχήμα 41. Ολογραφικός γεννήτορας. Το ολόγραμμα Η μετατρέπει την ακτινοβολία L μέσω του διαπερατού αντικειμένου Η στη διατεταγμένη διάταξη των ειδώλων Ο'.

Στο 41α παρουσιάζεται το στάδιο της παραγωγής. Μια ολογραφική πλάκα F χρησιμοποιείται για να καταγράψει το ειδικό αντικείμενο O με τη βοήθεια της σημειακής πηγής αναφοράς S. Το αντικείμενο συνίσταται από μια κανονικοποιημένη σειρά μεμονωμένων σημείων. Στο στάδιο της επαναδημιουργίας το προς πολλαπλασιασμό αντικείμενο τοποθετείται στη θέση όπου πριν βρισκόταν η σημειακή πηγή. (Σ' αυτή την περίπτωση το αντικείμενο είναι μια διαπερατή επιφάνεια η οποία φέρει το γράμμα H και φωτίζεται από τη δέσμη των ακτίνων L). Σε αντιστοιχία με τις φωτογραφικές συνθήκες κάθε σημείο αυτού του αντικειμένου απεικονίζεται μέσω ενός ολογράμματος H σε μια κανονική σειρά διατεταγμένων σημείων. Συνολικά το ολόγραμμα αναπαράγει μια κανονικοποιημένη σειρά O' που συνίσταται από τα είδωλα του αντικειμένου που έτσι πολλαπλασιάστηκε. Τέτοια ολογραφικά στοιχεία πολλαπλασιασμού μπορούν να θεωρούνται σαν ένας γενικευμένος φακός. Σε αντίθεση με τον συμβατικό φακό που μετασχηματίζει το σημείο του χώρου του αντικειμένου στο σημείο του χώρου του ειδώλου, ένα τέτοιο στοιχείο μετασχηματίζει το σημείο του χώρου του αντικειμένου σε μια σειρά σημείων στο χώρο του ειδώλου.

Μια από τις εξυπνότερες, σπουδαίες εφαρμογές της ολογραφίας είναι η χρησιμοποίηση της για τον περιορισμό των παραμορφώσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της απεικόνισης των αντικειμένων μέσω οπτικής ετερογενών μέσων (όπως παραμορφωμένα οπτικά συστήματα, γυάλινα πετάσματα, ετερογενής ατμόσφαιρα κ.α.). Διάφορες θεμελιωδώς διαφορετικές μέθοδοι-έχουν ήδη αναπτυχθεί προς αυτή τη κατεύθυνση. Το διάγραμμα μιας απ' αυτές που βασίζεται στην αρχή της αντιστροφής των φωτεινών ακτίνων μέσω ολογράμματος παρουσιάζεται στο σχήμα 42 [33]. Το φως από τα αντικείμενα O₁ και O₂ της σκηνής διέρχεται μέσω ενός οπτικού ετερογενούς μέσου π.χ. η γυάλινη πλάκα

διάχυσης E. Αρχικά υπάρχει η εκτίμηση πως η πληροφορία του αντικειμένου που περιέχεται στην ακτινοβολία είναι αμετάκλητα χαμένη μετά τη διέλευση μέσω ενός τέτοιου γυαλιού. Σε κάθε περίπτωση ένας μπορεί να διακρίνει μόνο ένα ομοιόμορφο υπόβαθρο αντί τα αντικείμενα. Με σκοπό να επανορθωθεί η διαχεόμενη από τη γυάλινη πλάκα εικόνα, η ακτινοβολία καταγράφεται στο ολόγραμμα H με τη βοήθεια της δέσμης αναφοράς R. Το ολόγραμμα αυτό εμφανίζεται και στη συνέχεια τοποθετείται στην αρχική του θέση σε σχέση με τη γυάλινη πλάκα διάχυσης. Τότε το ολόγραμμα φωτίζεται από την ακτινοβολία R' που είναι η συζυγής της R στην οποία και οφείλεται η διαδικασία της καταγραφής. Οι δέσμες διερχόμενες μέσω του ολογράμματος αντιστρέφονται και η ακτινοβολία ανακατασκευής διερχομένη μέσω ετερογενούς οπτικού μέσου στην αυστηρά αντίθετη κατεύθυνση αποκτά φασικές διαφορές με αντίθετο πρόσημο. Σαν αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις που εισάγονται από τη γυάλινη πλάκα περιορίζονται και τα είδωλα O_1 και O_2 διακριτών αντικειμένων σχηματίζονται στο άκρο της εξόδου.

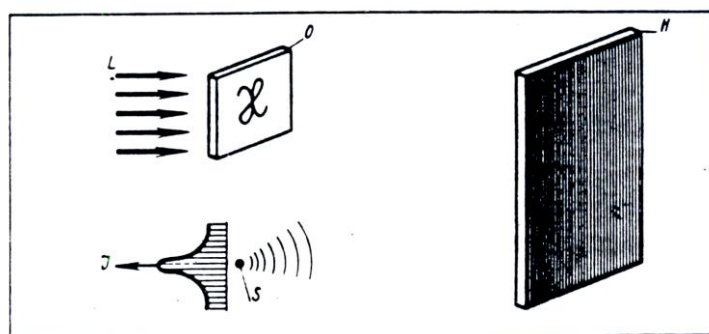


Σχήμα 42. Διάγραμμα περιορισμού των ατελειών στη δημιουργία ειδώλου μέσω της αντίστροφης πορείας των φωτεινών ακτινών.

Τώρα ας αναφερθούμε στις ολογραφικές εφαρμογές της αναλογικής και ψηφιακής τεχνικής του υπολογιστή. Εννοιολογικά οι θεμελιακές αρχές των ολογραφικών εφαρμογών σ' αυτή τη περιοχή είναι αρκετά βαθιές και προφανώς οφείλονται στο γεγονός πως οι διαδικασίες της μάθησης και της απεικόνισης είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό συγγενικές "εξ αίματος". Η ολογραφία είναι η περισσότερο αμερόληπτη και τέλεια μέθοδος απεικόνισης του έξω κόσμου ακόμη γνωστή σε μας και όσο μπορεί κανείς να αναμένει προσέφερε ένα αριθμό από σημαντικές δυνατότητες στο πεδίο της αντιληπτικότητας των διαφόρων λογικών ενεργειών. Η κορυφή της ολογραφικής ανάπτυξης σ' αυτό το πεδίο σηματοδεύτηκε από την ευρύτατα γνωστή μελέτη του Αμερικανού ερευνητή Van Heerden που προώθησε την υπόθεση πως η διαδικασία που συμβαίνει στον ανθρώπινο εγκέφαλο μοιάζει κατά πολύ με αυτή που λαμβάνει χώρα σε ένα τρισδιάστατο ολόγραμμα [34]. Εν τούτοις δεν θα αναφερθούμε εδώ σ' ένα τόσο σύνθετο θέμα αλλά αντί αυτού θα μας απασχολήσουν οι ολογραφικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε συσκευές που προσδοκούν ταυτοποίηση εικόνων όπως και σε υπολογιστικές μονάδες μνήμης.

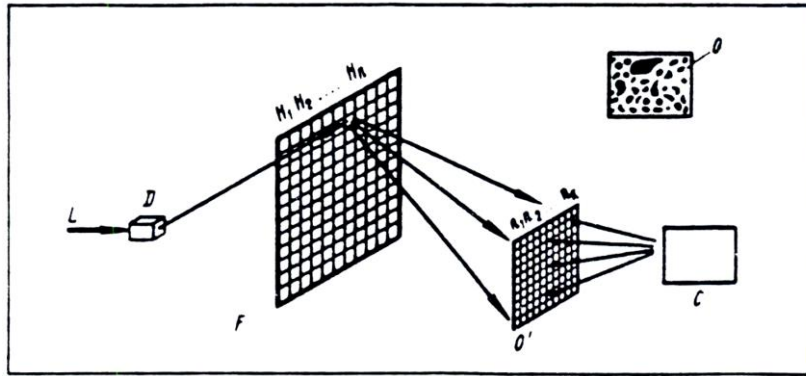
Η μέθοδος ταυτοποίησης εικόνας που βασίζεται στη χρήση συγκεκριμένου ολογραφικού φίλτρου υποστηρίζεται σε αρκετές ερευνητικές εργασίες [35], Το στοιχειώδες διάγραμμα αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 43. Η διαδικασία προπαρασκευής του

φίλτρου περιορίζεται στις ακόλουθες ενέργειες. Το είδωλο του αντικειμένου O που θα πρέπει να ταυτοποιηθεί αργότερα μέσα από άλλα παρόμοια αντικείμενα καταγράφεται στο ολόγραμμα H με τη βοήθεια της πηγής αναφοράς S . (Σ' αυτή τη περίπτωση σαν αντικείμενο χρησιμοποιείται διαφανής επιφάνεια που φέρει το γράμμα H πάνω της και φωτίζεται από φωτεινή ακτινοβολία L). Η διαδικασία ταυτοποίησης περιορίζεται στην αποκατάσταση του εκτιθέμενου και εμφανιζόμενου ολογραφικού φίλτρου από την ακτινοβολία των αντικειμένων που υφίσταται την ταυτοποίηση. Εάν απλοποιήσουμε δραματικά το συλλογισμό μας, τότε μπορούμε να μελετήσουμε τη περίπτωση όπου το ολόγραμμα ακτινοβολείται από αυτό το ίδιο το αντικείμενο που είναι ήδη καταγεγραμμένο. Το ολόγραμμα θα επαναδημιουργήσει το είδωλο της σημειακής πηγής S αξιοποιώντας την αντιστρεπτότητά του (δηλαδή εν προκειμένω όταν το ολόγραμμα υφίσταται την ακτινοβολία του γράμματος H). Εάν το ολόγραμμα φωτιστεί από την ακτινοβολία κάθε άλλου όμοιου αλλά όχι ίδιου αντικειμένου δεν θα δημιουργήσει το είδωλο της σημειακής πηγής. Έτσι όταν φωτεινό σημείο εμφανιστεί στο πεδίο οράσεως αυτό υποδηλώνει το γεγονός της παρουσίας του αντικειμένου που είναι προς αναζήτηση και μας ενδιαφέρει. Θα πρέπει να εξειδικεύσουμε εδώ πως όπως έχει ήδη αναφερθεί (σχήμα 38) το δισδιάστατο ολόγραμμα δεν διαθέτει την απόλυτη αντιστρεπτότητα. Με αυτή την έννοια και κατά τη διάρκεια της ταυτοποίησης εμφανίζεται μια συγκεκριμένη κηλίδα διάχυσης αντί του σημείου S . Η κατανομή της έντασης αυτής της κηλίδας περιγράφεται από την αποκαλούμενη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του αντικειμένου. (Το διάγραμμα της κατανομής έντασης σε μια τέτοια κηλίδα παρουσιάζεται σαν μια γραμμοσκιασμένη καμπύλη στο σχήμα 43).



Σχήμα 43, Απόλυτη ταυτοποίηση ειδώλου με τη βοήθεια ολογραφικού φίλτρου.

Το στοιχειώδες διάγραμμα μονάδας ολογραφικής μνήμης ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή παρουσιάζεται στο σχήμα 44 [36], Όταν η πληροφορία καταγραφεί στη φωτογραφική πλάκα F ένα σύστημα από μικρά ολογράμματα H_1, H_2, \dots, H_n εκτυπώνονται. Κάθε μεμονωμένο ολόγραμμα αυτού του τύπου περιέχει μια σελίδα μνήμης. Η περιεχόμενη πληροφορία σε κάθε σελίδα κωδικοποιείται σαν εικόνα που χαρακτηρίζεται από τη κατανομή της έντασης σε συγκεκριμένο επίπεδο O . Η προσεγγιστική άποψη μιας τέτοιας κατανομής απεικονίζεται στο επάνω τμήμα του ίδιου σχήματος.



Σχήμα 44. Στοιχειώδες διάγραμμα μονάδας ολογραφικής μνήμης.

Η πληροφορία εξάγεται από τη μνήμη με τον ακόλουθο τρόπο. Καθ' όσον ο υπολογιστής στέλνει τη κατάλληλη εντολή, δέσμη L από σύμφωνη ακτινοβολία κατευθύνεται σε συγκεκριμένο ολόγραμμα H_n με τη βοήθεια της μονάδας εκτροπής D. Αυτό το ολόγραμμα περιέχει μια σελίδα πληροφορίας που απαιτείται για τη λύση του δοθέντος προβλήματος. Το ολόγραμμα επαναδημιουργεί το είδωλο αυτής της σελίδας στο επίπεδο O. Κατόπιν η κατανομή έντασης σ' αυτό το είδωλο διαβάζεται από συστοιχία φωτοαποδεκτών και τροφοδοτείται η είσοδος του υπολογιστή C. Όταν χρειαστεί να επανασυλλεγεί μια άλλη σελίδα πληροφοριών η γωνία εκτροπής της δέσμης μεταβάλλεται και ένα άλλο αντίστοιχο ολόγραμμα επαναδημιουργείται. Οι συνθήκες καταγραφής των ολογραμμάτων είναι έτσι επιλεγμένες ώστε οι επαναδημιουργούμενες εικόνες των σελίδων να προβάλλονται επακριβώς στη μια και την αυτή σειρά των φωτοαποδεκτών.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την ολογραφική μνήμη συνίσταται στο σχετικά μεγάλο όγκο πληροφορίας που διατηρούν και στις περιορισμένες δυνατότητες να εισαχθεί οιαδήποτε αλλαγή στη καταγραφή. Οι σύγχρονοι υπολογιστές κατέχουν δομή η οποία δεν είναι ακόμη επαρκώς εναρμονισμένη ώστε να αξιοποιήσει μνήμη με τέτοιες δυνατότητες. Είναι πολύ πιθανό στο μέλλον να αναπτυχθούν υπολογιστές που θα εκτελούν ακαριαία πλήθος μαθηματικών πράξεων μέσω της εξαγωγής των αποτελεσμάτων από τη μνήμη τους. Σ' αυτή τη σύνδεση εμπεριέχεται ένα βασικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη της ολογραφίας που εκμεταλλεύεται την δυνατότητα καταγραφής σε τρισδιάστατα μέσα. Αυτή η κατεύθυνση της ανάπτυξης υπόσχεται σημαντικές προόδους στη περιοχή της αυξανόμενης ποσότητας της πληροφορίας που καταγράφεται [34].

Ένα σημαντικό τμήμα των ολογραφικών πρακτικών εφαρμογών ανήκει στην αποκαλούμενη μη-οπτική ολογραφία. Αυτή περιέχει κυρίως την ραδιο-ολογραφία και την ακουστική ολογραφία. Η ολογραφία σας ακτίνες - X, στην υπέρυθρη και την υπεριώδη περιοχή του φάσματος όπως επίσης και η ολογραφία με δέσμες ηλεκτρονίων είναι σήμερα σημαντικά λιγότερο ανεπτυγμένες.

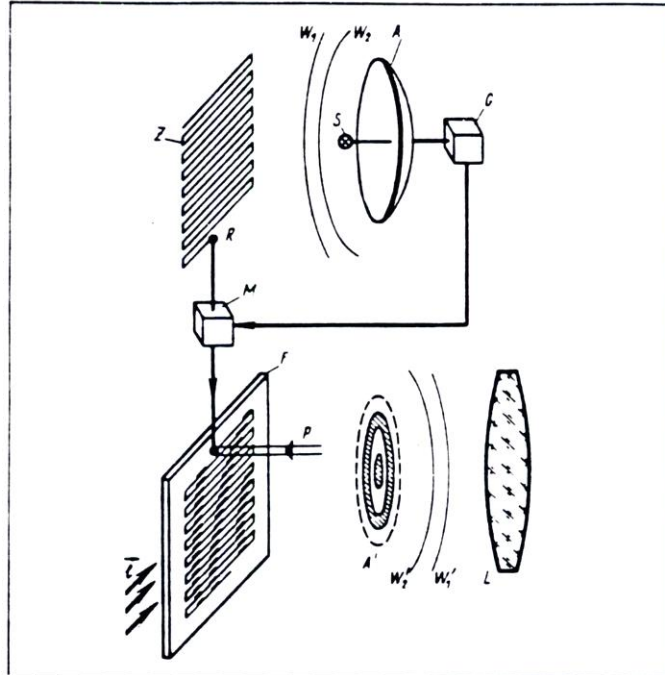
Η καταμέτρηση της κατανομής του πεδίου πλάτους - φάσης στο άνοιγμα της κεραίας στην V.H.F. ζώνη του φάσματος μπορεί να θεωρηθεί σαν το κατάλληλο παράδειγμα των μη οπτικών ολογραφικών εφαρμογών [37], Σ' αυτή την περίπτωση το πρόβλημα περιγράφεται ως εξής: Με σκοπό τη λήψη απ' ευθείας μετρήσεων του διαγράμματος ακτινοβολίας

μεγάλης κεραίας είναι αναγκαίο να διατρέξουμε το κυματικό πεδίο της κεραίας σε πολύ μακρινή απόσταση και σε πολύ ευρεία επιφάνεια. Είναι σημαντικά όμως ευκολότερο να μετρηθεί η κατανομή των πλατών και των φάσεων στο άνοιγμα της κεραίας και στη συνέχεια να υπολογιστεί η τιμή του πεδίου στη πολύ μακρινή ζώνη με βάση τα δεδομένα που ήδη ελήφθησαν. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί ακόμη περισσότερο αξιοποιώντας ολογραφικές μεθόδους. Σ' αυτή τη περίπτωση η μικρογραφία ενός διαγράμματος V.H.F. πεδίου που δημιουργείται από τη κεραία, "χτίζεται" στην οπτική περιοχή του φάσματος και οι μετρήσεις της κατευθυντικότητας λαμβάνονται επί αυτού του νέου διαγράμματος.

Το γενικό διάγραμμα καταγραφής ολογράμματος του πεδίου στο άνοιγμα της κεραίας παρουσιάζεται στο σχήμα 45. Οι παραγόμενες από τον ταλαντωτή G ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις εκπέμπονται στο διάστημα από τον πομπό S μετατρέπόμενες αργότερα σε μια κατευθυνόμενη δέσμη κυμάτων (W_1, W_2) από την κεραία A. Το V.H.F. πεδίο πλησίον στο άνοιγμα της κεραίας διατρέχει ένα συγκεκριμένο δρόμο Z από το δέκτη R. Τα καταγραφόμενα σήματα από το δέκτη τροφοδοτούν τη μονάδα μίξης M. Ταυτόχρονα οι ταλαντώσεις από τον ταλαντωτή G που εν προκειμένω χρησιμοποιούνται σαν δέσμη αναφοράς στη σύγκριση των φάσεων των σημάτων του δέκτη R τροφοδοτούν την ίδια μονάδα μίξης μέσω ενός διαφορετικού καναλιού. Το σήμα που δημιουργείται από τη συμβολή των σημάτων του δέκτη R και αυτών του ταλαντωτή G ανιχνεύεται και ενισχύεται για τη διαμόρφωση της φωτεινότητας της στενής δέσμης P που διατρέχει τη φωτογραφική πλάκα F στο χρόνο κίνησης του δέκτη R που διατρέχει το πεδίο στο άνοιγμα της κεραίας. Μ' αυτό τον τρόπο καταγράφεται το ολόγραμμα του πεδίου της κεραίας. Εάν ένα ολόγραμμα που επιτυγχάνεται με ένα τέτοιο τρόπο αναλυθεί στη σύμφωνη δέσμη φωτός F θα διατηρήσει το διάγραμμα του πεδίου στο άνοιγμα της κεραίας A' όπως επίσης και το διάγραμμα του πεδίου που δημιουργείται στο χώρο από τη κεραία (κύματα W_1' και W_2'). Εάν τώρα η ακτινοβολία αυτού του πεδίου απεικονιστεί με τη βοήθεια φακού L είναι δυνατόν να επιτευχθεί το διάγραμμα της κατανομής έντασης του πεδίου της κεραίας στις πολύ μακρινές περιοχές της εστίασης του φακού.

Τέλος ως αναφερθούμε στην προσφορά της ολογραφίας στη τέχνη της απεικόνισης. Η ιδέα της δυνατότητας να αξιοποιηθεί η ολογραφική μέθοδος για τη δημιουργία μιας εντελώς νέας τεχνικής απεικόνισης που αναπαράγει την απόλυτη αίσθηση της οπτικής πραγματικότητας των αντικειμένων που απεικονίζει αναφέρθηκε από την πρώτη στιγμή της αντίστοιχης έρευνας το 1962. Το πρώτο ολόγραμμα που απεικόνιζε ένα φυσικό αντικείμενο (σκάκι) πραγματοποιήθηκε από τους E. Leith και J. Upatnieks το 1964 [14]. Από τότε η τέχνη της ολογραφικής απεικόνισης έχει κυρίως αναπτυχθεί σε δύο κατευθύνσεις: στη κατεύθυνση δημιουργίας των αποκαλούμενων ολογραμμάτων θέασης και στη κατεύθυνση της ανάπτυξης μεθόδου που είναι γενικά γνωστή με το όνομα σύνθετη ολογραφία.

Σαν ορολογία το "ολόγραμμα θέασης" αφορά ολόγραμμα φυσικών αντικειμένων που πρόκειται να εκτεθούν σε εκθέσεις και σε μουσεία όπως επίσης και τα καλλιτεχνικά ολογράμματα - αντίγραφα καλλιτεχνικών έργων - που διακοσμούν το εσωτερικό δημοσίων κτιρίων ή και αυτό των ιδιωτικών διαμερισμάτων. Επιπρόσθετα η ολογραφία-πορτραίτο μπορεί επίσης να ταξινομηθεί στη κατηγορία των ολογραμμάτων θέασης.



Σχήμα 45. Διάγραμμα καταγραφής V.H.F. πεδίου της κεραίας A μέσω ολογράμματος.

Ουσιαστικά η τεχνική της δημιουργίας των ολογραμμάτων θέασης έχει υποστεί πολύ λίγες και ασήμαντες αλλαγές τα τελευταία χρόνια. Σε χώρες όπως Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, Αγγλία και Γαλλία τα ολογράμματα χρησιμοποιούν την ολογραφική καταγραφή κυρίως σε δισδιάστατα μέσα. Τα έτσι δημιουργούμενα ολογράμματα αξιοποιούν την μονοχρωματική ακτινοβολία των λυχνιών εκκένωσης ατμών Hg. Στη Σοβιετική Ένωση τα ολογράμματα θέασης χρησιμοποιούν κυρίως την ολογραφική καταγραφή σε τρισδιάστατα μέσα. Τέτοια ολογράμματα αξιοποιούν τους συμβατικούς λαμπτήρες πυράκτωσης οι οποίοι είναι πολύ εξυπηρετικοί στη πράξη.

Σήμερα η ολογραφία θέασης αναπτύσσεται παράλληλα με τις εξελίξεις των laser και των φωτογραφικών υλικών. Αποτέλεσμα της όχι θεαματικής αλλά καθημερινής ενασχόλησης είναι η σημαντική αύξηση των διαστάσεων των ολογραμμάτων θέασης έως και μερικά μέτρα, έτσι αυτά τα ολογράμματα εμφανίζουν πολύ εντυπωσιακές τρισδιάστατες εικόνες. Τέτοια ολογράμματα παρουσιάζονται παντού σε εκθέσεις αλλά και σε μουσεία που είναι κατάλληλα οργανωμένα γι' αυτό το σκοπό [38, 39].

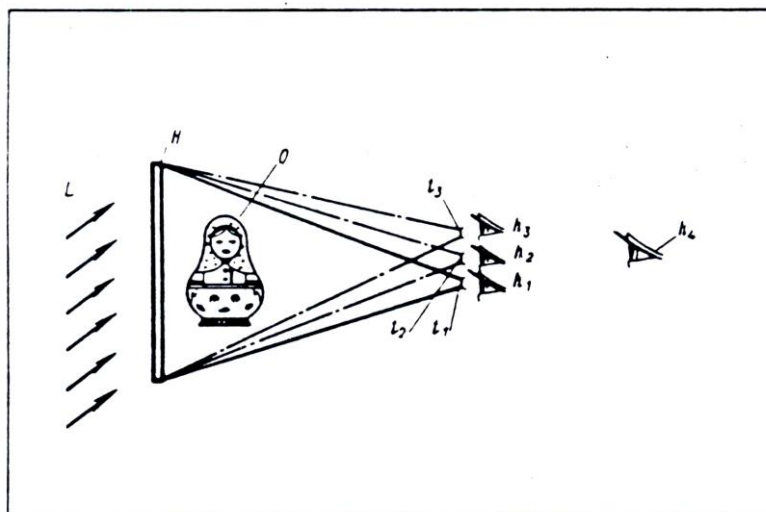
Τα ολογράμματα αυτής της κατηγορίας καταγράφονται συνήθως με τη βοήθεια των laser από εκκενώσεις αερίων. Σ' αυτή τη περίπτωση η καταγραφή είναι δυνατή μόνο κάτω από τη συνθήκη αποκλεισμού και της ελαχιστότατης μετακίνησης του αντικείμενου σε σχέση με τη φωτογραφική πλάκα. Με σκοπό την επίτευξη αυτών των συνθηκών το ολογραφούμενο αντικείμενο όπως και όλο το ολογραφικό set-up στηρίζονται σε στέρα αντικραδασμική πλάκα. Σ' αυτή τη περίπτωση τρισδιάστατα μεταλλικά στερεά ή κεραμικό κ.α. χρησιμοποιούνται σαν αντικείμενα προς ολογράφηση.

Μια από τις πιο φιλόδοξες τεχνικές στην ολογραφία είναι η εφαρμογή της ολογραφικής τεχνικής με παλμικό laser. Η χρήση αυτής της τεχνικής κάνει δυνατή την καταγραφή πρακτικά κάθε αντικείμενου χωρίς την ανάγκη εφοδιασμού με αντικραδασμικές πλάκες

διότι κανένα αντικείμενο δεν μπορεί πρακτικά να μετακινηθεί σε παρατηρούμενη απόσταση κατά τη διάρκεια της υπερβολικά σύντομης αναλαμπής του laser. Αυτή η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα να καταγραφούν τρισδιάστατα πορτραίτα γεγονόσ που την κάνει ακόμα πιο ενδιαφέρουσα. Το πρώτο ολογραφικό πορτραίτο αυτού του είδους οφείλεται στον L.D Siebert [40] και έγινε το 1968. Παρόμοια έρευνα έχει γίνει επίσης πρόσφατα το ίδιο καλά στη Σοβιετική Ένωση [41].

Παρ' όλα αυτά η μετέπειτα πορεία της τεχνικής των ολογραφικών πορτραίτων ήταν κάπως στάσιμη, γεγονός που οφειλόταν αφ' ενός μεν στις ατέλειες των παλμικών laser και αφ' ετέρου στην επιδείνωση των χαρακτηριστικών των φωτογραφικών υλικών κάτω από συνθήκες έκθεσης παλμικού χαρακτήρα.

Τελείως πρόσφατα έγιναν πολύ δημοφιλή τα rainbow ολογράμματα - ολογράμματα ουράνιου τόξου - στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αν και αυτά τα ολογράμματα καταγράφονται σε δισδιάστατα μέσα, επιτρέπουν όμως την επαναδημιουργία τους από συνεχές φάσμα φωτεινής πηγής [42]. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου ολογράμματος επεξηγείται στο σχήμα 46. Αντιγράφοντας την εικόνα ενός ολογράμματος σε κάποιο άλλο, μέσω μιας στενής οριζόντιας σχισμής είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένα ολόγραμμα Η αυτού του τύπου. Αυτό στη διαδικασία της επαναδημιουργίας του από ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος π.χ. κόκκινη από laser He-Ne θα αποκαταστήσει απ' όλες τις ακτίνες που σχηματίζουν το είδωλο του αντικειμένου Ο μόνο αυτές που διέρχονται από τη στενή οριζόντια σχισμή t_1 . Εάν ένα τέτοιο ολόγραμμα φωτισθεί από ακτινοβολία συνεχούς φάσματος τότε η κόκκινη συνιστώσα αυτής της ακτινοβολίας θα αποκαταστήσει τις ακτίνες που σχηματίζουν το είδωλο του αντικειμένου Ο ενώ διέρχονται μέσα από την οριζόντια σχισμή t_1 . Η πράσινη συνιστώσα του φάσματος εκτρέπεται από το ολόγραμμα, σε μικρότερη γωνία και θα σχηματίσει τις ακτίνες από το είδωλο του ίδιου αντικειμένου και διέρχονται μέσω της σχισμής t_2 που είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω σε σχέση με τη σχισμή t_1 . Η μπλε συνιστώσα θα αποκαταστήσει το είδωλο του αντικειμένου μεταξύ των ακτινών που διέρχονται μέσω της σχισμής t_3 . Σαν αποτέλεσμα ο παρατηρητής h_1 οι οφθαλμοί του οποίου βρίσκονται στην ευθεία του ίχνους t_1 θα δει το κόκκινο είδωλο ενώ στη θέση h_3 θα δει το αντίστοιχο μπλε. Εν τούτοις εάν ο παρατηρητής h_4 τοποθετηθεί αρκετά μακριά από τα είδωλα των σχισμών t_1 , t_2 , t_3 θα δει το επάνω μέρος του αντικειμένου Ο μέσω της μπλε ζώνης, τη μεσαία πράσινη περιοχή και τη βάση μέσω της κόκκινης περιοχής. Την ίδια λοιπόν στιγμή, το αντικείμενο εμφανίζεται ζωγραφισμένο με όλα τα χρώματα του ουράνιου τόξου (rainbow).

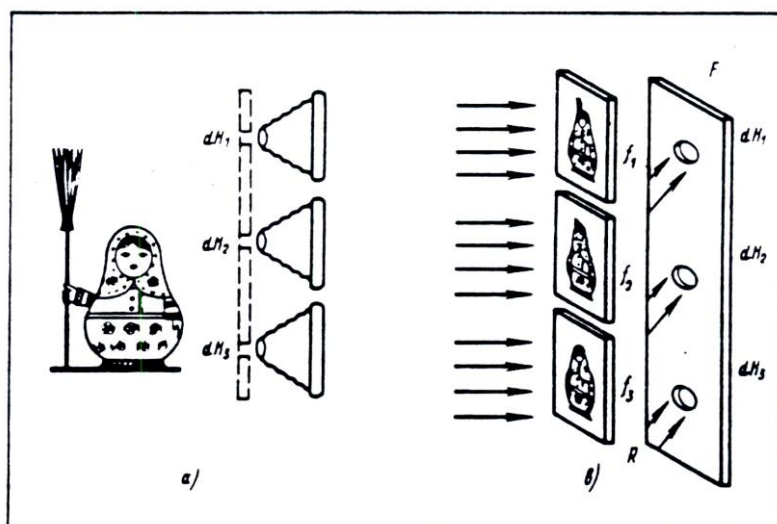


Σχήμα 46. Η αρχή της λειτουργίας των ολογραμμάτων Rainbow.

Η σημαντικότερη ανεπάρκεια της συμβατικής ολογραφίας θέασης είναι η ανάγκη να φωτιστεί το αντικείμενο με σύμφωνο φως από laser. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες είναι δυνατόν να καταγραφεί ένα αγαλματίδιο, ένα πορτραίτο ή και ακόμα μια συγκεκριμένη περιοχή σε ένα μικρό δωμάτιο, όμως είναι εντελώς αδύνατο κάτω απ' αυτές τις συνθήκες να καταγραφεί ένα εξωτερικό φυσικό θέμα όπως κτίρια ή και τοπία. Το 1967 ο Αμερικανός ερευνητής Pole R.V. πρότεινε την καλούμενη σύνθετη ολογραφική τεχνική [43] που συνδυάζει κατάλληλα την ολογραφία και τη μέθοδο της ολοκληρωτικής φωτογραφίας που ανέπτυξε ο Lippmann [44], χρησιμοποιώντας αυτή τη τεχνική ένας μπορεί να επιτύχει ολογράμματα που αναπαράγουν τη τρισδιάστατη εικόνα αντικειμένων που φωτίζονται από φυσικό φως.

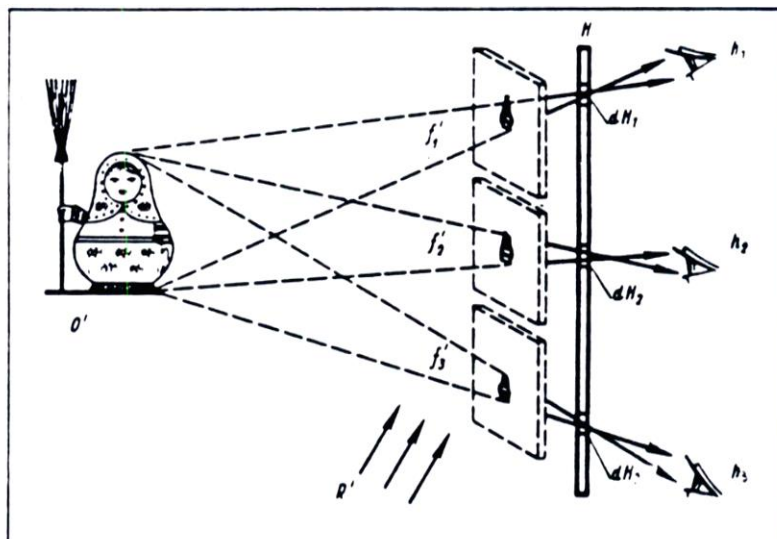
Η ουσία της σύνθετης ολογραφικής τεχνικής εξηγείται διαγραμματικά στα σχήματα 47, 48. Στο στάδιο της φωτογράφισης το σκηνικό καταγράφεται με τη βοήθεια συμβατικών φωτογραφικών μεθόδων από πολλά ανεξάρτητα σημεία παρατήρησης dH_1 , dH_2 , dH_3 ... (σχήμα 47α). Σαν αποτέλεσμα επιτυγχάνεται ένα πλήθος φωτογραφιών. Αυτές οι φωτογραφίες παριστάνουν διάφορες όψεις f_1 , f_2 , f_3 του απεικονιζόμενου σκηνικού όπως αυτοκαταγράφεται από διάφορες πλευρές. Για παράδειγμα στη περίπτωση που αναφερόμαστε η φωτογραφία f_3 δείχνει την κούκλα σε στάση όπου κρύβει τη σκούπα ενώ η φωτογραφία f_1 παρουσιάζει την ίδια κούκλα στην οποία η άκρη της σκούπας διακρίνεται επάνω από το κεφάλι της.

Στο στάδιο της δημιουργίας του σύνθετου ολογράμματος οι φωτογραφίες που απεικονίζουν διαφορετικές θεωρήσεις του ίδιου σκηνικού εκτυπώνονται στη φωτογραφική πλάκα F σαν ολογράμματα dH_1 , dH_2 , dH_3 με τη βοήθεια της δέσμης laser R (σχήμα 47β). Ενώ η αμοιβαία θέση των τμημάτων dH_1 , dH_2 , dH_3 στην οποία τα ολογράμματα εκτυπώνονται είναι κατάλληλα επιλεγμένη ώστε να ταιριάζει ακριβώς με την αμοιβαία θέση των σημείων από τα οποία οι αντίστοιχες θεωρήσεις του απεικονιζόμενου σκηνικού ήταν καταγεγραμμένες.



Σχήμα 47. Διαδικαστικά στάδια δημιουργίας ενός σύνθετου ολογράμματος.

Η αρχή της δημιουργίας της οπτικής απάτης για το αντικείμενο με τη βοήθεια του σύνθετου ολογράμματος εξηγείται στο σχήμα 48. Το ολόγραμμα επαναδημιουργείται από τη δέσμη R' της οποίας η διεύθυνση συμπίπτει με αυτή της δέσμης αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της φωτογραφικής διαδικασίας. Κάθε τμήμα του ολογράμματος αποκαθιστά τη προοπτική του αντικειμένου που είχε καταγραφεί σ' αυτό. Πιο συγκεκριμένα το ολογραφικό τμήμα dH_1 αποκαθιστά το είδωλο της προοπτικής f_1 του αντικειμένου, το ολογραφικό τμήμα dH_2 την προοπτική αντικειμένου f_2 κοκ. Το γεγονός ότι η θέση των ολογραφικών τμημάτων με τις καταγραφόμενες προοπτικές ταυτίζονται με τις θέσεις των σημείων από τα οποία αυτές οι προοπτικές καταγράφονται έχει σαν συνέπεια όταν ο παρατηρητής κινείται σε σχέση με την επιφάνεια του σύνθετου ολογράμματος να παρατηρεί τέτοια μεταβολή στην προοπτική θέασης η οποία αντιστοιχεί επακριβώς σε εκείνη τη μεταβολή της προοπτικής κατά τη διαδικασία θέασης του πραγματικού αντικειμένου. Εν προκειμένω στη περίπτωση που αναφερόμαστε ο παρατηρητής της θέασης h_3 θα δει το είδωλο της προοπτικής f_3 του αντικειμένου που αποκαθίσταται από το τμήμα dH_3 . Εάν ο παρατηρητής μετακινηθεί στη θέση h_2 θα δει το είδωλο της προοπτικής f_2 μέσω του ολογραφικού τμήματος dH_2 . Αυτό το είδωλο θα διαφέρει κάπως από το είδωλο που είχε παρατηρηθεί από το σημείο h_3 . Όπως φαίνεται και από το σχήμα η προοπτική f_2 χαρακτηρίζεται από την άκρη της σκούπας που μόλις διακρίνεται επάνω από το κεφάλι της κούκλας. Στη προοπτική f_1 η σκούπα προεξέχει ακόμη περισσότερο. Η σωστή ομαλή μεταβολή στη προοπτική παρατήρησης του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της αλλαγής του σημείου παρατήρησης σε σχέση με το σύνθετο ολόγραμμα κάνει μεγάλη εντύπωση στο παρατηρητή που βλέπει συνολικά το πραγματικό αντικείμενο.



Σχήμα 48. Η οπτική αντίληψη στη χρήση ενός σύνθετου ολογράμματος.

Η σύνθετη τεχνική της προπαρασκευής σύνθετων ολογραμμάτων είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, ενώ τα είδωλα που δημιουργούνται σήμερα απ' αυτά τα ολογράμματα απέχουν πολύ από το να είναι τέλεια. Εν τούτοις δεν υπάρχει αμφιβολία πως αυτή η μέθοδος ανοίγει τεράστιες προοπτικές για την εισαγωγή της ολογραφίας και στο ενδιαφέρον πλοοστάσιο των καλλιτεχνικών σπουδών.

Η απαίτηση της καταγραφής του σκηνικού που απεικονίζεται στο εξωτερικό φως δεν είναι το ένα και μοναδικό πρόβλημα που συναντά κανείς στη διαδικασία ανάπτυξης της τρισδιάστατης κινούμενης εικόνας ή της τηλεόρασης. Είναι εξ' ίσου σημαντικό να βρεθούν οι τρόποι περιορισμού του πλεονασμού πληροφορίας της ολογραφικής καταγραφής. Η ουσία του προβλήματος πλεονασμού συνίστανται στα κάτωθι: Όπως ήδη προαναφέρθηκε ακόμη και στη απλή συμβατική ολογραφία θέασης στο ολόγραμμα καταγράφονται τα αντικείμενα μαζί με όλες τις ελαχιστότατες λεπτομέρειες της κατασκευής τους π.χ. ακόμη και η δομή των πόρων στο ανθρώπινο δέρμα. Αυτή η ογκώδης πληροφορία η οποία είναι εντελώς άχρηστη για τον παρατηρητή, απαιτεί σημαντική αύξηση της διακριτικής ικανότητας του φωτογραφικού υλικού που χρησιμοποιείται σαν φιλμ. Στη περίπτωση της τηλεόρασης, απαιτείται αντίστοιχο άνοιγμα της ζώνης συχνοτήτων του κυκλώματος της τηλεόρασης. Η ελάττωση της πλεονάζουσας ολογραφικής καταγραφής είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα του οποίου η λύση είναι πολύ πιθανό να βρεθεί ερευνώντας την ακρίβεια της απεικόνισης του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης της σκηνής [45].

Ανεξάρτητα από τη πολυπλοκότητα των προβλημάτων που συναντώνται στη διάρκεια της ανάπτυξης των τρισδιάστατων κινούμενων εικόνων στη τηλεόραση και ανεξάρτητα από τα τεχνικά προβλήματα που διατυπώνονται από τη πορεία καταγραφής των ολογραμμάτων θέασης είμαστε βέβαιοι ότι βρισκόμαστε στο κατώφλι του ερχομού της τεχνικής της ολογραφικής απεικόνισης. Η τεχνική αυτή θα αναπαράγει την απόλυτη αίσθηση όρασης της πραγματικότητας των αντικειμένων που απεικονίζονται. Η ευρύτατη εισαγωγή μιας τέτοιας τεχνικής στη καθημερινή πρακτική θα μεταβάλει τον τρόπο της ζωής μας και την ψυχολογία της επερχόμενης γενιάς σε σημαντικό βαθμό, ενώ θα αποτελέσει τεράστια προσφορά στην

ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η επιτυχία σ' αυτό τον τομέα όπως και οι επιδιώξεις όλων των άλλων ολογραφικών εφαρμογών εξαρτάται κατά μεγάλο μέρος από τη πορεία ανάπτυξης του σημαντικότερου εργαλείου της μοντέρνας οπτικής, δηλαδή του laser.

Αναφορές

1. Stratton D.M. *Physiol. Rev.* 3, 611 (1896).
2. Stratton D.M. *Physiol. Rev.* 4, 463 (1897).
3. Becquerel A. *Annales de Chimie et de Physique* 3 me serie, t. 22, 25, 42.
4. Niepce N. *Comt. rend.l' Academie des Sciences, Paris*, 1851 bis 1866.
5. Uppman G. *Journ. de Phys.* 3, 97 (1894).
6. Abbe E. *Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop*. Braunschweig, 1910.
7. Boersch H. *Techn. Phys.* 19, 337 (1938).
8. Bragg W. *Nature* 149, 470 (1942).
9. Gabor D. *Nature* 161, 777 (1948).
10. Gabor D. *Proc. Roy. Soc. (London)* A197, 454 (1949).
11. Gabor D. *Proc. Phys. Soc.* B64, 449 (1951).
12. Leith E.N., Upatnieks J. *J. Opt. Soc. Am* 52, 1124 (1962).
13. Leith E.N., Upatnieks J. *J. Opt. Soc. Am* 53, 1377 (1963).
14. Leith E.N., Upatnieks J. *J. Opt. Soc. Am* 54, 1295 (1964).
15. Denisyuk Yu. N. *DAN (Academy of Sciences Reports) UUSR*, 144, 6, 1275 (1962).
16. Denisyuk Yu. N. *Optica i Spectr. (Optics and Spectroscopy)*, 15, 523 (1963).
17. Denisyuk Yu. N. *Optica i Spectr. (Optics and Spectroscopy)*, 18, 275 (1965).
18. Sukhanov V.I., Denisyuk Yu. N. *Optica i Spectr. (Optics and Spectroscopy)*, 28, 126 (1970).
19. Denisyuk Yu. N. *Zurnal technitsheskoi Fisiki (Jour, of Techn. Physics)* XLIV, 131 (1974).
20. Cathey W.T. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55, 457 (1965).
21. Rigler A. K. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55, 1693 (1965).
22. Kakitshashvily Sh. D. *Quantum Electronics USSR*, I, N 6, 1435 (1974).
23. Staselco D.L., Denisyuk Yu. N., Smirnov. A.G. *Optica Spectroscopia (Optics and Spectroscopy)*, XXVI, 413 (1969).
24. Staselco D.L., Denisyuk Yu. N. *Optica i Spectroscopia (Optics and Spectroscopy)*, XXVIII, 324 (1970).
25. Meier R.W. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55, 987 (1965).
26. Champagne E.B. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 57, 51 (1967).
27. Denisyuk Yu. N., Galperin A.D. *Optica i Spectroscopia (Optics and Spectroscopy)*, XXVII, 176 (1969).
28. Powell R.L., Stetson K.A. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55, 1593 (1965).

29. Alecsandrov E.B., Bontsh - Bruevitsh A.M. Zhurnal Technitsheskoi Fisiki (Journ. of Techn. Physics) 37, 360 (1967).
30. Mclauley D.G., Simpson C.B., Murbach W.i. Appl. Opt. 12, 2, 232 (1973).
31. Labeyrie A., Flemmand I., Optics Commun. 1, 5, (1969).
32. Groh G., Appl. Opt. 7, 1643 (1968).
33. Kogelnik H., Pennington K.S. Jour. Opt. Soc. Amer. 58, 273 (1968).
34. Van Heerden P.I. Appl. Opt. 2, 393 (1965).
35. Vander Lugt A., Rotz F.B., Klooster A. Jr. Optical Information Processing ed. I.T. Tippet et al Gambridge Mass (1965).
36. Smits F.M., Gallaher L.E. Bell. Syst. Tech. Journ. 46, 1267 (1967).
37. Bachrach L.D., Kurotshkin A.P. DAN USSR (Academy of Sciences Reports) 171, N6, 1309 (1966).
38. Benton S.A. Applied Optics 14, 12, 2795 (1975).
39. Kramer H. Applied Optics 14, 12, 2796 (1975).
40. Siebert L.D. Proc. IEEE 56, 7, 1242 (1968).
41. Staselco D.I., Denisyuk Yu. N., Smirnov A.G. Zh.N.I.P.F.I.K. (Journal of Scientific and Applied Photography and Cinematography) N2, 147 (1970).
42. Benton S.A., Mingace H.S. Appl. Opt. 9, 12, 2812 (1970).
43. Pole R.V. Appl. Phys. Letters 10, N 1, 20-22 (1967).
44. Lippmann G.C.R. Acad. Sci. 146, 446 (1908).
45. Denisyuk Yu. N. Zhurnal Technitsheskoi Fisiki (Journ. of Techn. Physics) XLV N 12, 2574 (1975).

Βιβλία ολογραφίας

1. R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin. Optical Holography. Academic Press. New York and London (1971).
2. G.W. Stroke. An Introduction to Coherent Optics and Holography. Academic Press. New York and London (1966).
3. Y. Ch. Vienot, P. Smigielski, H. Royer. Holographie Optique Developments Applicatios. Dunod Paris (1971).
4. Yu. I. Ostrovsky, "Holography and Its Application". Mir Publishers Moscow (1977).

Το έργο «ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑΣ» έχει βασιστεί στις διαλέξεις του Yu. N. Denisyuk, όπου για την επαναχρησιμοποίηση τους παραχωρήθηκε άδεια από τον ίδιο το δημιουργό η οποία επισυνάπτεται παρακάτω.



IOFFE
PHYSICO-
TECHNICAL
INSTITUTE

Russian Academy of Sciences

26, Politekhnicheskaya,
St.Petersburg 194021, Russia
Phone (812) 247 9311, 247 2255
Telex 121453 FTIAN SU
Facsimile (812) 247 1017

October 10, 1994

Dr.Athanassios E.Aravantinos
Physics Department,Technological
Educational Institute of Athens
122 Ag.Spiridonos Str.
122 10 Egaleo
Athens-Greece

Dear Dr.Aravantinos,

Please excuse me for such a long delay in replying to your letter. In fact, I came back to town only in the end of September.

It was extremely pleasant to me to see my lectures translated into Greek. Thank you very much for the very high appreciation of my lectures and for the work you have done when translating them into Greek.

Some words about my possibilities. Since 1954 I have been working in the Vavilov State Optical Institute on the problems of holography. Since 1988 my main place of work is Ioffe Physico-Technical institute where I am working on the problems of holography, too. At the same time I retain also the position of the Head of the laboratory of holography at the Vavilov Institute.

Thank you very much for your kind proposal to collaborate with you and the Royal College of Art in London through the EEC program. I suspect though I am not sure that from the formal point of view we are now the participants of one and the same project in the frame of the INITAG-94. Indeed, Professor P.Boone from the Gent University informed me that the project "Holography for the Pices of Art and Culture" has won the Grant of the European Society. The other participant (besides Belgium and Russia) is Dr.V.B.Markov from Ukrain. I was told that Greek scientists also participate in this project. I would be very grateful to you if you could explain to me the situation with the Greek part of the project.

Of course, we would be very glad to collaborate with you independently from your position to the mentioned project. In particular, in the Vavilov State Optical Institute we have developed the method for registering the portraits of people when using the green pulse of the neodimium glass laser (VN-2 Portrait Camera). The small version of this device can be used in archeology for registering holographic copies of small objects in the process of excavation (VN-4 Camera). In the Ioffe Physico-Technical Institute my colleague, Dr.V.B.Konstantinov has developed the special camera for holographic interferometry (Camera "Regina"). This camera can be also used for the investigation in many fields of art science and technology. Some information on pulsed holographic cameras and camera "Regina" is enclosed.

I am looking forward to finding some possibility to collaborate with you.

Best regards

 Yu. Denisyuk

P.S. The best means of the communication with us is e-mail:
denis@holo.pti.spb.su