

ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 1ΗΣ ΑΠΡΙΛΙΟΥ 1997

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΑΤΣΑΝΙΩΤΗ

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ-X
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΕΠΙΣΤΕΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΛΟΥΣ κ. Ν. Γ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΥ

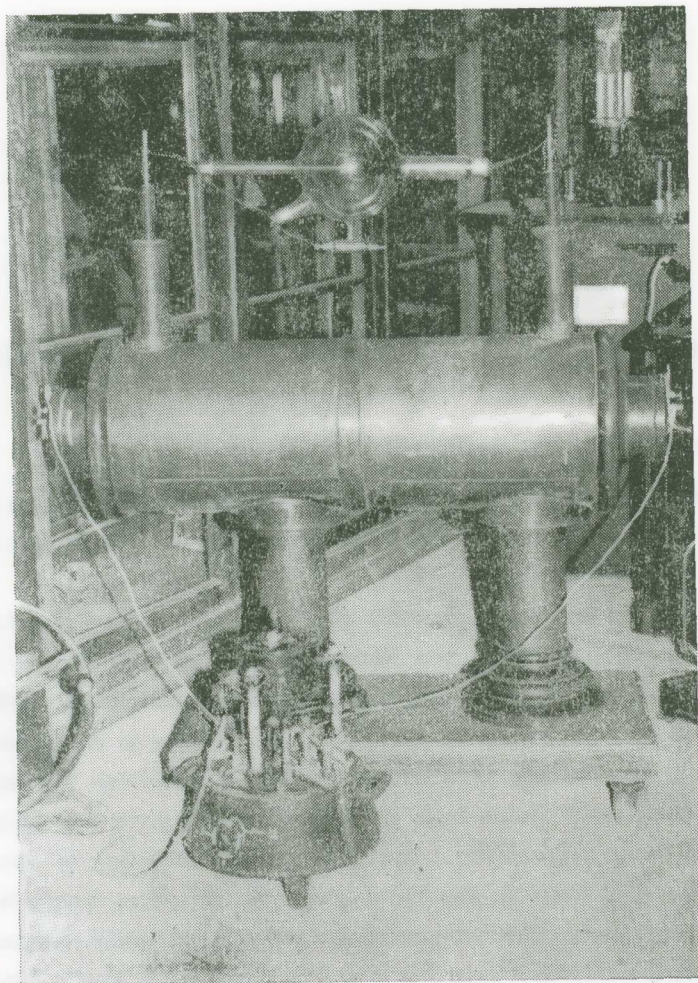
Κύριε πρόεδρε, κύριοι Ἀκαδημαῖκοί, κυρίες καὶ κύριοι,

Τὸ θέμα στὸ ὁποῖο ἔχω τὴν τιμὴ νὰ σᾶς ξεναγήσω κατὰ τὰ ἐπόμενα 45 λεπτά, πιστεύω ὅτι ἐκτὸς τοῦ ἐπιστημονικοῦ ἐνδιαφέροντος ποὺ ἀναμφισβήτητα παρουσιάζει ἔχει καὶ ἄρκετὰ εὐρύτερο ἐνδιαφέρον.

Ἡ ὀπτική τῶν ἀκτίνων-X εἶναι ὁ κλάδος τῆς φυσικῆς ποὺ ἀσχολεῖται μὲ τὴν διάδοση τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας τῆς φασματικῆς περιοχῆς τῶν ἀκτίνων-X διὰ τῆς ὕλης. Πάνω σ' αὐτὴ στηρίζεται σήμερα πλῆθος μεθόδων καὶ τεχνικῶν ἔρευνας, βασικῆς καὶ ἐφαρμοσμένης, ποὺ διεξάγεται σὲ διεπιστημονικὲς ἐγκαταστάσεις, τὶς γνωστὲς ἐγκαταστάσεις παραγωγῆς ἀκτινοβολίας συγχρότρου. Οἱ ἐγκαταστάσεις αὐτὲς ἐξελίσσονται μὲ ταχύτατους ρυθμοὺς καὶ ἀποτελοῦν ἐκτὸς τῶν ἄλλων τὸ δοκιμαστήριο ἰδεῶν καὶ μεθόδων γιὰ τὴ μετεξέλιξη τῆς πολιτικοοικονομικῆς δομῆς τῆς ἐρευνητικῆς προσπάθειας τῆς γνωστῆς μέχρι πρόσφατα ὡς ἔρευνας «μικρῆς κλίμακας», σὲ διεπιστημονικὲς πολυεθνικὲς καὶ πολυέξοδες συνεργασίες.

Ἡ σύντομη κατὰ περίπτωσιν ἀναφορὰ στὴν ἱστορία τοῦ πεδίου ὑπαγορεύεται ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι μόνον ἐρευνητικὰ πεδία τὰ ὁποῖα ἔχουν κλείσει τὸν κύκλο τῆς ἐξελίξεώς τους περιγράφονται πλήρως ἀπὸ τὰ τελευταῖα τους ἐπιτεύγματα, κάτι ποὺ δὲν συμβαίνει μὲ τὴν ὀπτικὴ τῶν ἀκτίνων-X, ἥ ὁποία ἐπ' οὐδενὶ λόγῳ ἔχει κλείσει τὸν κύκλο της. Ἐτσι, ἀρχίζω μὲ ἓνα ἀπόσπασμα ἐνὸς ἐγγράφου τόσο παλίου ὅσο καὶ οἱ ἀκτίνες-X, τὴν ἐκθεση πεπραγμένων τοῦ Καθηγητῆ Φυσικῆς τοῦ Ἐθνικοῦ Πανε-

πιστημίου, Τιμολέοντος Ἀργυρόπουλου. Στὴν ἐκθεση αὐτή, τὴν ὁποία συνέταξε τὴν 1η Ὀκτωβρίου τοῦ 1897 (παράρτημα Α), μόλις 21 μῆνες ἀπὸ τὴν ἀνακάλυψη τῶν ἀκτίνων-Χ καὶ 4 μῆνες ἀπὸ τὴ συνθηκολόγησι τοῦ ἀτυχοῦς πολέμου τοῦ 1897, ἀναφέρει ὅτι εἶχε ἤδη ἐγκαταστήσει μιὰ διάταξη παραγωγῆς ἀκτίνων-Χ «διὰ τῶν



Σχῆμα 1. Φωτογραφία διατάξεως παραγωγῆς ἀκτίνων-Χ ἡ ὁποία εὗρίσκεται στὸ Μουσεῖο τοῦ κτιρίου τοῦ Χημείου, Σόλωνος 104 καὶ ἡ ὁποία εἶχε τεθεῖ, κατὰ πᾶσα πιθανότητα, σὲ λειτουργίαν τὸ 1897. Ἀποτελεῖται ἀπὸ τὴ λυχνία Crookes, τὸ πηνίο Ruhmkorff καὶ τὸ διακόπτη Ὑδραργύρου.

ύπαρχουσών ἐν αὐτῷ συσκευῶν» καὶ τὴν εἶχε θέσει σὲ λειτουργία γιὰ τὸν ἐντοπισμὸ «βολίδων εἰς τραυματίας». Ἡ συσκευή¹ ποὺ εἶχε τεθεῖ σὲ λειτουργία ἀπὸ τὸ 1897, εἶναι, κατὰ πᾶσα πιθανότητα, αὐτὴ τοῦ σχήματος 1, ποὺ εὐρίσκεται σήμερα στὸ Μουσεῖο στὸ κτίριο τοῦ Χημείου, Σόλωνος 104, καὶ δὲν ὑπολείπεται σὲ τίποτε ἀπὸ τὶς τότε σύγχρονες διατάξεις σὲ ὁποιοδήποτε ἄλλο σημεῖο τοῦ τότε ἐπιστημονικοῦ κόσμου, ὁ ἴδιος δὲ ὁ καθηγητὴς Ἀργυρόπουλος ἡσχολεῖτο μὲ τὶς τότε πλέον σύγχρονες ἐφαρμογές τῶν ἀκτίνων-Χ.

Σήμερα οἱ συνθῆκες ἔχουν μεταβληθεῖ ὥρδην, ὥστε, οὐδεὶς ἀσχολούμενος μὲ ἀκτίνες-Χ νὰ δύναται νὰ ἐπαναλάβει τοὺς ἰσχυρισμοὺς τοῦ ἀείμνηστου Ἀργυρόπουλου. Τὰ σύγχρονα συστήματα παραγωγῆς ἀκτίνων-Χ, οἱ ἐγκαταστάσεις τρίτης γενιᾶς ἀκτινοβολίας συγχρότρου, δὲν ὑπερβαίνουν τὶς δώδεκα σὲ ὅλον τὸν κόσμον, εἶναι δαπανηρὲς τόσο ὡς πρὸς τὴν κατασκευὴ ὅσο καὶ στὴ λειτουργία τους, ἡ δὲ ὑπαρξή τους ἐκτὸς τῶν ἐπιστημονικῶν ἀναγκῶν ἱκανοποιεῖ καὶ ἄλλες. Ὡς ἐπιπρόσθετα κίνητρα γιὰ τὴ χρηματοδότησή τους θὰ πρέπει νὰ θεωρηθοῦν, ἡ βελτίωση πλήθους ποικίλων ἄλλων τεχνικῶν καὶ ἡ συντήρηση ἑνὸς σημαντικοῦ ἀριθμοῦ βιομηχανικῶν καὶ βιοτεχνικῶν τεχνολογικῆς αἰχμῆς, μικροῦ ὅμως ἐμπορικοῦ ἐνδιαφέροντος. Καὶ τοῦτο διότι ἡ κατασκευὴ δακτυλίων συσσωρεύσεως ἡλεκτρονίων ὑψηλῶν ἐνεργειῶν μεγάλης πυκνότητας ρεύματος καὶ σταθερότητας ἀφ' ἑνὸς καὶ ὀπτικῶν συστημάτων ὑψηλῶν ἐπιδόσεων ἀφ' ἑτέρου, ὥτοῦν ὅλες τὶς σύγχρονες τεχνολογίες, ἀπὸ τὶς δομικὲς κατασκευὲς μέχρι τὴ μικροηλεκτρονική, στὰ ὄριά τους, συμβάλλοντας στὴν ἐξέλιξή τους, ἐνῶ συγχρόνως δοκιμάζονται πρωτοποριακὲς γι' αὐτὲς ιδέες.

Θέματα ποὺ μέχρι πρὶν μερικὰ χρόνια ἦταν ἀσχολία θεωρητικῶν Φυσικῶν ἀσχολουμένων μὲ κομψοὺς καὶ πρωτότυπους ὑπολογισμοὺς ἀκαδημαϊκοῦ μόνον ἐνδιαφέροντος, βρῆκαν ἐφαρμογές σὲ βασικὲς συσκευές, ποὺ ἀποτελοῦν τὴν ὑπόδομή τῶν ἐγκαταστάσεων αὐτῶν, π.χ. οἱ ὑπολογισμοὶ τῆς κίνησης σχετικιστικῶν ἡλεκτρονίων σὲ χωρικὰ περιοδικὰ μαγνητικὰ πεδία ἀποτελοῦν τὴ βάση γιὰ τὴν κατασκευὴ τῶν ἐλιτρόχων μεγάλης καὶ μικρῆς περιόδου (wiggler καὶ undulator).

Μία τῶν ἐγκαταστάσεων τρίτης γενιᾶς τῆς ἀκτινοβολίας συγχρότρου, ἡ Εὐρωπαϊκὴ Ἐγκατάσταση Ἀκτινοβολίας Συγχρότρου (ΕΕΑΣ)², ἡ ὁποία θὰ μπορούσε νὰ ἔχει δηλωτικὴ ἐπιγραφή «Οἱ Εὐρωπαῖοι πλὴν Ἑλλήνων», εὐρίσκεται στὴν Grenoble

1. Τὴ φωτογραφία αὐτὴ καθὼς ἐπίσης τὸ ἀντίγραφο τοῦ ἐγγράφου τοῦ καθηγητῆ Ἀργυρόπουλου ἔθεσε εἰς τὴ διάθεση τοῦ γράφοντος ὁ λέκτορας τοῦ τμήματος Φυσικῆς τοῦ Πανεπιστημίου Ἀθηνῶν κ. Χρ. Συμεωνίδης.

2. Κατὰ ἀντιστοιχία ESRF (European Synchrotron Radiation Facility).

της Γαλλίας αν και χρηματοδοτείται για δώδεκα χρόνια από δώδεκα Ευρωπαϊκές χώρες³, είναι μία μη διακρατική συνεργασία που λειτουργεί υπό νομικό καθεστώς Γαλλικής εταιρείας. Το κόστος κατασκευής της ανέρχεται στα 2.6 δισεκατομμύρια Γαλλικά Φράγκα και το κόστος λειτουργίας της μέχρι το 1998 υπολογίζεται στο 1 δισεκατομμύριο Γαλλικά Φράγκα. Ο δακτύλιος συσσωρεύσεως έχει περίμετρο 845 m, ή ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι 6 GeV, το δέ ρεύμα είναι 200 mA με ένα χρόνο ζωής το οποίο δύναται να φθάσει σε 60h, κατά δε το πρώτο εξάμηνο του 1997 έχουν προγραμματισθεί 3569 πειραματικές βάρδιες, στις 23 εξόδους ακτινοβολίας.

Το σχήμα 2 δείχνει τη χρονική εξέλιξη των πηγών ακτίνων-X, με βάση τη λαμπρότητα των πηγών σε $\text{ph/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{BW}$ ή όποια, αφού κατά τα πρώτα 80 χρόνια αυξήθηκε κατά ένα συντελεστή της τάξεως του χίλια, από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 μέχρι σήμερα αυξήθηκε 10^{13} φορές. Η βελτίωση της λαμπρότητας των πηγών είχε κατ' αρχήν ως αποτέλεσμα την επανεξέταση ασθενών φαινομένων, τα οποία εύρισκοντο στην περιοχή της στατιστικής αξιοπιστίας και την καθιέρωση πειραματικών μεθόδων, οι οποίες με τις προηγούμενες συνθήκες δεν ήταν πρακτικά εφαρμόσιμες λόγω του μεγάλου χρόνου που θα απαιτούσε η εφαρμογή τους. Η αύξηση όμως της λαμπρότητας δεν είναι η μόνη βελτίωση των πηγών ακτίνων-X, διότι από την εισαγωγή ήδη της πρώτης γενιάς των εγκαταστάσεων συγχρότρου για την παραγωγή ακτίνων-X, η ακτινοβολία είναι γραμμικά πολωμένη στο επίπεδο της τροχιάς των ηλεκτρονίων⁴. Η δεύτερη γενιά αυξάνει τη λαμπρότητα της πηγής και συγχρόνως επιτυγχάνει δέσμες με πόλωση κατά δύο άξονες⁵, δηλαδή με όλες τις καταστάσεις πολώσεως γραμμικής, κυκλικής και έλλειπτικής. Η έμπειρία που αποκτήθηκε συνετέλεσε στην κατασκευή της τρίτης γενιάς με ένθετες διατάξεις, ή οποία δεν υπερέχει μόνο ως προς τη λαμπρότητα αλλά και ως προς το ότι η πόλωση της δέσμης ρυθμίζεται κατά βούληση⁶ και το σημαντικότερο παράγονται οίονει σύμφωνες δέσμες με μήκος χωρικής και χρονικής συμφωνίας⁷ τέτοιο που επιτρέπει την αξιοποίηση της φάσεως του κύματος. Είναι η πρώτη φορά που αξιοποι-

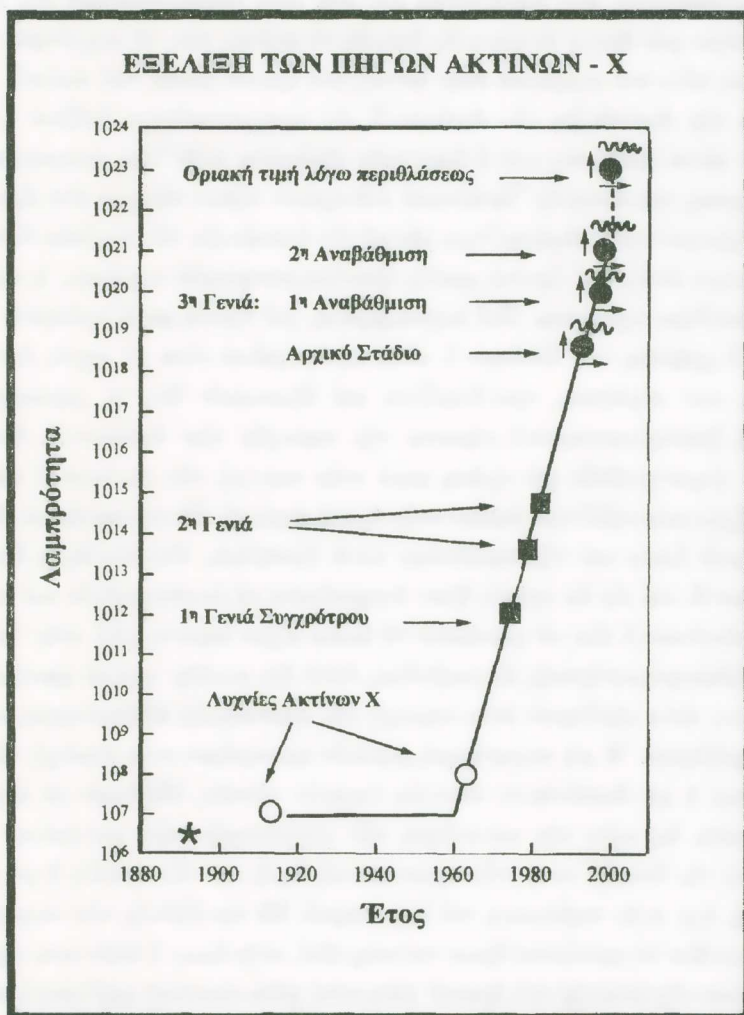
3. 'Αγγλία, Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, 'Ιταλία, Δανία, 'Ελβετία, 'Ισπανία, Νορβηγία, 'Ολλανδία, Σουηδία, Φιλανδία.

4. Αυτό υποδεικνύεται στο σχήμα με το όριζόντιο βέλος.

5. Αυτό υποδεικνύεται στο σχήμα με τα δύο βέλη.

6. N. Γ. 'Αλεξανδρόπουλος και Είρ. Θεοδωρίδου-Καραδήμα, Συμπυκνωμένη ύλη και ακτίνες-X, 'Ιωάννινα 1996.

7. A. Q. R. Baron, A. I. Chumakov, H. F. Grünstendel, H. Grünstendel, L. Niesen and R. Rüffer, Phys. Rev. Lett., 77, 4808 (1996).



Σχήμα 2. Χρονολογική εξέλιξη των πηγών ακτίνων-X, χαρακτηριζόμενη από τη λαμπρότητά τους σε $\text{ph/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0,1\% \text{ B.W.}$, από της ανακαλύψεώς τους μέχρι σήμερα.

α) Οι κενοί κύκλοι υποδηλώνουν λυχνίες ακτίνων-X που παράγουν γραμμικές μη πολωμένες ακτίνες επικαθήμενες σε συνεχές υπόστρωμα. β) Τα τετράγωνα παριστάνουν τους δακτυλίους πρώτης και δεύτερης γενιάς χωρίς και με ένθετες διατάξεις, οι οποίες παράγουν ασύμφωνες ακτίνες-X συνεχούς φάσματος πολωμένες και γ) Οι γεμάτοι κύκλοι υποδηλώνουν δακτυλίους τρίτης γενιάς με ένθετες διατάξεις ελιτρόχου μεγάλης και μικρής περιόδου, που παράγουν εκτός των άλλων και σύμφωνες δέσμες. Τα βέλη υποδεικνύουν την πόλωση κατά το επίπεδο της τροχιάς των ηλεκτρονίων και κάθετα σ' αυτό, ή δε κυματική μορφή υποδεικνύει σύμφωνο δέσμη. Ο άστερίσκος υποδηλώνει τις λυχνίες Crookes.

οὐνται οἱ πληροφορίες πού περιέχονται καὶ στὰ τρία χαρακτηριστικὰ τοῦ κύματος πού περιγράφει μιὰ δέσμη ἀκτίνων- X , δηλαδή τὸ πλάτος του, τὴ συχνότητά του καὶ τὴ φάση του, κάτι πού συμβαίνει στὴν ὀπτική τοῦ ὁρατοῦ φωτὸς πρὸ πολλοῦ.

Μέχρι τὴν ἀνακάλυψη τῶν ἀκτίνων- X , ὡς πραγματικότητα ὀρίζετο ὅ,τι ὑπέπιπτε στὶς πέντε αἰσθήσεις καὶ ὁ ἐρευνητὴς εὕρισκετο στὴν ἴδια μειονεκτική θέση ὅπως ὁ μύωπας περιπατητὴς Ἰαπωνικοῦ ἀνθισμένου κήπου πάσχων ἀπὸ ἀχρωματοψία. Ἡ «ἀχρωματοψία» θεραπεύθηκε μὲ τὴν ἀνακάλυψη τῶν ἀκτίνων- X τὸ 1896, καὶ τῶν ἄλλων ἐκτὸς τοῦ ὁρατοῦ φωτὸς ἡλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων, ἡ «μυωπία» ὅμως θεραπεύθηκε πρόσφατα. Πιὸ συγκεκριμένα, γιὰ πρώτη φορὰ πρόσφατα ὁ ἐρευνητὴς καὶ ὁ χρήστης τῶν ἀκτίνων- X εἶναι ἐφοδιασμένοι τόσο μὲ πηγές ὅσο καὶ μὲ ἀνιχνευτές, πού παράγουν, προσδιορίζουν καὶ ἀξιοποιοῦν ὅλα τὰ χαρακτηριστικὰ μεγέθη τοῦ ἡλεκτρομαγνητικοῦ κύματος τῆς περιοχῆς τῶν ἀκτίνων- X . Εἶναι ἔτσι δυνατό νὰ παρατηρηθοῦν γιὰ πρώτη φορὰ στὴν περιοχὴ τῶν ἀκτίνων- X φαινόμενα τὰ ὁποῖα εἶχαν μελετηθεῖ πρὸ πολλοῦ στὴν ὁρατὴ περιοχὴ. Μὲ τὰ φαινόμενα τῆς περιθλάσεως κατὰ Laue καὶ τῆς σκεδάσεως κατὰ Compton, ἐθεμελιώθη ἡ δυϊκὴ ὑφή τῶν ἀκτίνων- X καὶ ὡς ἐκ τούτου ἦταν ἀναμενόμενο νὰ παρατηρηθοῦν καὶ στὴν περιοχὴ τῶν ἀκτίνων- X ὅλα τὰ φαινόμενα τὰ ὁποῖα εἶχαν παρατηρηθεῖ στὴν ὁρατὴ περιοχὴ τῆς ἡλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας. Αὐτὸ δὲν συνέβη· μερικὰ φαινόμενα παρατηρήθηκαν, ἄλλα εὐρέθησαν στὴν περιοχὴ τῆς στατιστικῆς ἀβεβαιότητας καὶ ἄλλα δὲν παρατηρήθηκαν. Ἡ μὴ παρατήρηση μερικῶν φαινομένων στὴν περιοχὴ τῶν ἀκτίνων- X , ὅπως ἡ μὴ διαπίστωση ὀπτικῶς ἐνεργῶν οὐσιῶν, ὀδήγησαν σὲ ἐσφαλμένα συμπεράσματα ὡς πρὸς τὴν κατανόηση τῶν μηχανισμῶν τῶν φαινομένων αὐτῶν, ἀποδίδοντας τὴν ὑπαρξὴ τους στὴν κρυσταλλικὴ δομὴ καὶ τὴν ὑπαρξὴ ἢ μὴ κέντρου συμμετρίας, π.χ. στὴν περίπτωση τοῦ διχρωϊσμοῦ. Μὲ τὴν ἐξέλιξη τῶν πειραματικῶν δυνατοτήτων ὅλα τὰ φαινόμενα ἔχουν παρατηρηθεῖ, πλην ὅμως ἡ ἐπέκταση τῆς ἰσχύος τῶν μοντέλων τῆς ὀπτικῆς τοῦ ὁρατοῦ φάσματος μόνο ποιοτικὴ περιγραφὴ τῶν φαινομένων ἐπιτυγχάνει μέχρι σήμερα.

Οἱ κυριότερες τεχνικὲς πού συγκροτοῦν τὴν σύγχρονη ὀπτικὴ τῶν ἀκτίνων- X εἶναι: α) Ἀκτινογραφία ἀντιθέσεως φάσεως, β) Φασματοσκοπία κοκκωδῶν εἰδῶλων ἢ ἄλλιῶς Φασματοσκοπία συσχετισμοῦ φάσεως, γ) Περίθλαση σὲ μικρὲς γωνίες, δ) Μικροκρυσταλλογραφία ἀκτίνων- X , ε) Μικροσκοπία ἀκτίνων- X , στ) Μικροανάλυση, ζ) Ἀναβαθμισμένη φασματοσκοπία ἀκτίνων- X , η) Ἀναβαθμισμένη κρυσταλλογραφία ἀκτίνων- X , θ) Σκέδαση ἀκτίνων- X σὲ μικρὲς γωνίες καὶ ι) Τοπογραφία ἀκτίνων- X .

Τὰ στοιχεῖα τῶν ὀπτικῶν διατάξεων τῶν ἀκτίνων- X εἶναι: α) Οἱ πηγές, κλασικὲς λυχνίες καὶ δακτύλιοι συσσωρεύσεως, β) Κρύσταλλοι, μεγάλης ποικιλίας ὕλι-

κῶν, διαστάσεων καὶ σχημάτων, γ) Ἀνιχνευτές, δ) Κάτοπτρα, μονοκρυστάλλων καὶ πολλαπλῶν στρωμάτων, ε) Φακοὶ περιθλάσεως Bragg-Fresnell, καθὼς ἐπίσης καὶ φακοὶ διαθλάσεως, στ) Τριχοειδεῖς κυματοδηγοὶ καὶ θ) Πλακίδια λ/n . Τὰ τελευταῖα τρία στοιχεῖα ἐμπλούτισαν πρόσφατα τὴν ὀργανοθήκη τῶν ἐρευνητῶν καὶ περιγράφονται συνοπτικὰ στὴ συνέχεια.

Οἱ φακοὶ περιθλάσεως ἀκτίνων- X ἢ ἄλλως φακοὶ Bragg-Fresnell⁸ ποὺ ἐστίαζουν καὶ μονοχρωματίζουν δέσμες ἀκτίνων- X βασίζονται στὴν ιδιότητα τοῦ συστήματος ὁμοκέντρων κυκλικῶν ζωνῶν, τοῦ αὐτοῦ ἐμβανοῦ, ἐναλλάξ διαφανῶν καὶ ἀδιαφανῶν νὰ συμπεριφέρεται ὡς συγκεντρωτικὸς φακὸς κατὰ τοὺς ὑπολογισμοὺς τοῦ Fresnell⁹ (παράρτημα Β) καὶ τὴν ἀνάκλαση κατὰ Bragg. Ἐνας φακὸς Bragg-Fresnell κατασκευάζεται ἀπὸ ἓνα λεπτὸ πλακίδιο μονοκρυστάλλων π.χ. Ge^{10} ἐπὶ τοῦ ὁποίου ἔχουν χαραχθεῖ ἓνας ἀριθμὸς ὁμοκέντρων κυκλικῶν αὐλάκων διαφόρου πλά-

8. A. Snigirev, I. Snigireva, P. Engström, S. Lequien, A. Ruvorov, Y. Hartman, P. Chevalier, M. Idic, F. Legrand, G. Soullie, S. Engrand, Rev. Sci. Inst. 66, 1461 (1995).

9. 170 χρόνια πρὶν, τὸ 1818, ὅταν ἡ μελέτη τῆς ὕψης τοῦ φωτός, κυματικὴ ἢ μή, ἦταν ἡ ἐρευνη αἰχμῆς, ὁ Fresnell λαμβάνει μέρος σὲ ἓναν διαγωνισμό τῆς Γαλλικῆς Ἀκαδημίας, σχετικὸ μὲ τὸ θέμα, ὑποστηρίζοντας τὴν κυματικὴ ὕψη. Ἡ Ἑλλανόδικος ἐπιτροπὴ ἀποτελεῖτο ἀπὸ τοὺς Pierre Laplace, Jean B. Biot, Simeon D. Poisson, Dominique F. Arago καὶ τὸν Joseph L. Gay-Lussac. Τὸ πῶνημα τοῦ Fresnell ὑπὸ τὸν τίτλο «Mémoire Courronnée» τὸ ὁποῖο καὶ ἔλαβε τὸ πρῶτο βραβεῖο, εὗρε πολέμιον τὸν Poisson, ὁ ὁποῖος δὲν ἀποδέχτο τὴν κυματικὴ ὕψη τοῦ φωτός. Ὁ Poisson στὴν προσπάθειά του νὰ ἀποδείξει τὸ ἐσφαλμένο τῶν παραδοχῶν τοῦ Fresnell προέκτεινε τοὺς ὑπολογισμοὺς τοῦ Fresnell καὶ κατέληξε στὸ συμπέρασμα ὅτι στὸ κέντρο τῆς σκιᾶς μιᾶς μικρῆς σφαίρας θὰ πρέπει νὰ ὑπάρχει ἓνα φωτεινὸ σημεῖο. Αὐτὸ τὸ θεώρησε ὡς καίριο κτύπημα γιὰ τοὺς ὑπολογισμοὺς τοῦ Fresnell, γιὰτὶ δὲν ἤξερε τὴν πειραματικὴ παρατήρηση τοῦ Maraldi τὸ 1723, ὅπως καὶ τὸν Arago, ὁ ὁποῖος ἐπανάλαβε τὸ πείραμα καὶ ἀπεδείχθη τὸ ἀληθὲς τῆς θεωρίας τοῦ Fresnell, τὸ δὲ φωτεινὸ σημεῖο στὸ κέντρο τῆς σκιᾶς εἶναι γνωστὸ σήμερα ὡς σημεῖο τοῦ Poisson. Ἐνα ἀπὸ τὰ συμπεράσματα τῆς θεωρίας τοῦ Fresnell εἶναι ὅτι ἓνα σύστημα συγκεντρωτικῶν δακτυλίων διαδοχικὰ διαφανῶν καὶ ἀδιαφανῶν, τοῦ αὐτοῦ ἐμβανοῦ γνωστοῦ ὡς «Πλακίδιο ζωνῶν» ἀποτελεῖ ἓνα συγκεντρωτικὸ φακὸ ἐστιακῆς ἀποστάσεως.

$$f = \frac{R_1^2}{\lambda}$$

Τὸ συμπέρασμα αὐτὸ ποὺ κατέληγε σὲ διάταξη γνωστὴ καὶ ὡς «φακὸς περιθλάσεως» διότι ἡ ἐστίαση βασίζεται στὸ φαινόμενο τῆς περιθλάσεως καὶ ὅχι τῆς διαθλάσεως στὸ ὁποῖο βασίζονται οἱ κοινοὶ φακοί, ἀποτελοῦσε ἐπὶ τόσα χρόνια ἓνα παράδειγμα κομφῶν μαθηματικῶν ὑπολογισμῶν χωρὶς πρακτικὸ ἀποτέλεσμα. Αὐτὸ ὀφείλετο στὸ ὅτι τὸ πλάτος τῶν δακτυλίων πρέπει νὰ εἶναι συγκρίσιμο μὲ τὸ μῆκος κύματος τῆς ἀκτινοβολίας, περιορισμὸς ποὺ ἐπέτρεπε κατασκευὲς τέτοιων φακῶν μόνο στὴν περιοχὴ τῶν μικροκυμάτων.

10. Ἐνας τέτοιος φακὸς ποὺ ἀναφέρεται στὴ δημοσίευση τῶν A. Snigirev et al. Optic. Comm. (1996) ἔχει διαστάσεις: ἡ ἀκτὶνα τῆς ἐσωτάτης ζώνης εἶναι $R_1 = 3.9 \mu\text{m}$, τὸ πλάτος τῆς ἐξωτά-

τους που επέχουν τη θέση των διαφανών ζωνών του συστήματος ζωνών Fresnell. Η παράλληλος δέσμη των ακτίνων προσπίπτει επί του πλευρικού τοιχώματος της αΐλακος και ανακλάται κατά Bragg και συγκλίνει στην κυρία έστια. Το ύψος της αΐλακος επιλέγεται έτσι ώστε να πληροούνται οι συνθήκες ενισχυτικής συμβολής τόσο στο χεῖλος όσο και στον πυθμένα των τοιχωμάτων της αΐλακος.

Οι απαιτήσεις για έστιαση των ισχυρών δεσμών μικρής διατομής ακτίνων-X στις έγκαταστάσεις συγχρότρου, συνδυαζόμενες με τις δυνατότητες της σύγχρονης μικρομηχανικής και την ύπαρξη τελείων λεπτών κρυστάλλων, όδηγησε στην κατασκευή εύχρηστων φακών Bragg-Fresnell που χρησιμοποιούνται και στη σύγχρονη μικροσκοπία των ακτίνων-X.

Έκτος των φακών περιθλάσεως που χρησιμοποιούνται εύρέως στις εγκαταστάσεις συγχρότρου, στο πειραματικό στάδιο εύρίσκονται και οι φακοί διαθλάσεως για ακτίνες-X. Η αρχή των φακών αυτών σκιαγραφείται στο σχήμα 3α, όπου ένας αμφίκυκλος φακός με δείκτη διαθλάσεως μικρότερο του δείκτη του μέσου στο οποίο εύρίσκεται, αποτελεί ένα συγκεντρωτικό φακό. Όλα τα υλικά, ως γνωστόν, παρουσιάζουν δ.δ. για τις ακτίνες-X μικρότερο της μονάδας κατά περίπου 10^{-5} . Έτσι, εάν η καμπυλότητα ενός αμφίκυκλου φακού είναι μεγάλη, δημιουργείται ένας συγκεντρωτικός φακός¹¹ όπως δείχνει το σχήμα 3β. Ελάττωση της έστιακής απόστασεως επιτυγχάνεται με σύστημα όμοιων φακών με κοινό άξονα συμμετρίας, όπως δείχνει το σχήμα 3γ, που πραγματοποιείται όταν σε ένα φύλλο στοιχείου μικρού Ζ άνοιχθεῖ μιὰ σειρά από μικρές τρύπες. Η ανάγκη δημιουργίας δεσμών ακτίνων-X ύψηλης ροής και διατομής της τάξεως μερικών μm^2 όδηγησε επίσης στην αναζήτηση κυματοδηγών μικρομετρικών διαστάσεων για ακτίνες-X. Τέτοιοι κυματοηγοί¹² έχουν κατασκευασθεῖ αποτελούμενοι από τριχοειδεῖς υάλινους σωλήνες με τους οποίους έχουν επιτευχθεῖ ροές της τάξεως $10^8 \text{ph/s}/\mu\text{m}^2/\text{mA}$ σε δέσμες διατομής $2\mu\text{m}$ και ζώνης διελεύσεως 2×10^{14} .

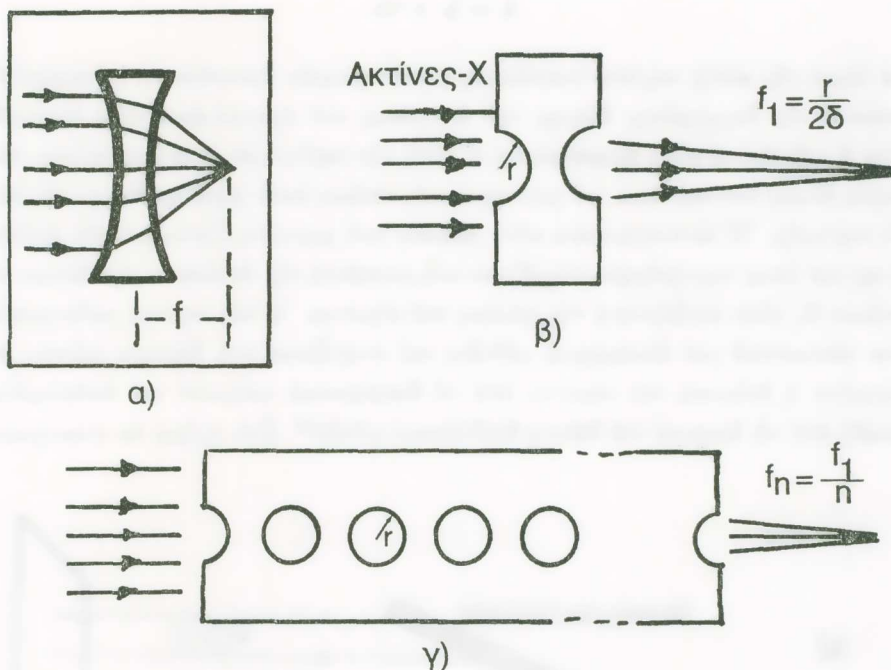
Σε περισσότερο προχωρημένο στάδιο εξέλιξης εύρίσκεται ἡ κατασκευή πλακιδίων $\lambda/4$ για ακτίνες-X, που βασίζονται στη μικρή ἀλλά ὑπαρκτή διαφορά του δείκτη διαθλάσεως και της ἀνακλάσεως πλησίον της γωνίας Bragg¹³ ἀπό μονοκρύσταλλο Ἀδάμαντος ἢ Πυριτίου ἢ Βηρυλίου.

της ζώνης είναι $\Delta R_n = 0.15 \mu\text{m}$, τὸ δὲ ὕψος τῆς αἶλακος εἶναι $2 \mu\text{m}$ καὶ οἱ τυπικὲς διαστάσεις τοῦ έστιακοῦ σημείου εἶναι $(1.3 \times 5) \mu\text{m}^2$.

11. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva and B. Lengeler, Nature 384, 7 Nov. 49 (1996).

12. P. Engström, Development of Capillary Optics for X-ray Focusing (thesis; Chalmers Tekniska Högskola) ISBN 91-7032-584-7 (1996).

13. C. Giles, C. Malgrange, J. Goulon, F. de Bergevin, C. Vettier, A. Fontaine, E. Dartyge, S. Pizzini, F. Bandele, A. Freund, Rev. Scient. Inst. 60, 1549 (1995).



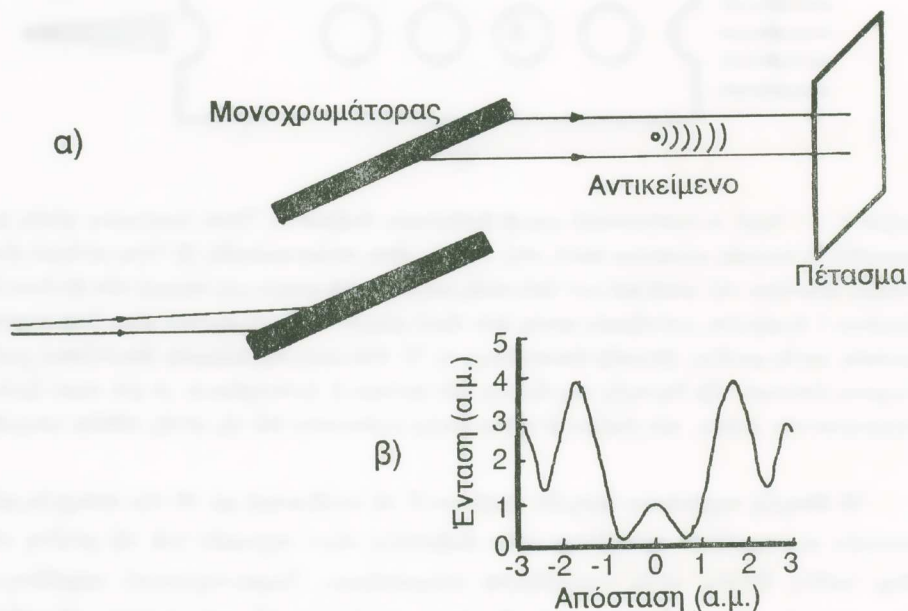
Σχῆμα 3. α) Ἀρχὴ συγκεντρωτικοῦ φακοῦ διαθλάσεως ἀκτίνων-Χ. Ὄταν ἀμφίκυλλος φακὸς ἐμβαπτισθεῖ σὲ ὀπτικῶς πυκνότερο ὑλικό, τότε ὁ φακὸς εἶναι συγκεντρωτικός. β) Ὅλα τὰ ὑλικά εἶναι ὀπτικῶς ἀραιότερα τοῦ κενοῦ καὶ κατ' ἐπέκταση, τοῦ ἀέρα, στὴ φασματικὴ περιοχὴ τῶν ἀκτίνων-Χ, ἐπομένως ὁ ἀμφίκυλλος κυλινδρικός φακὸς ἀπὸ ὑλικὸ μικροῦ ἀτομικοῦ ἀριθμοῦ εἶναι ἕνας συγκεντρωτικός φακὸς μεγάλης ἐστιακῆς ἀποστάσεως. γ) Ἡ ἐλάττωσις τῆς ἐστιακῆς ἀποστάσεως χωρὶς σύγχρονη ἐλάττωσις τῆς διατομῆς τῆς δέσμης τῶν ἀκτίνων-Χ ἐπιτυγχάνεται μὲ μιὰ σειρὰ ὁμοίων συγκεντρωτικῶν φακῶν, τῶν ὁποίων οἱ κύριες ἐστίες εὐρίσκονται ἐπὶ τῆς αὐτῆς εὐθείας γραμμῆς.

Ἡ ὕπαρξις συμφώνων δεσμῶν ἀκτίνων-Χ σὲ συνδυασμὸ μὲ τὰ νέα στοιχεῖα τῶν ὀπτικῶν συστημάτων συνετέλεσε στὴν ἀνάπτυξιν νέων τεχνικῶν γιὰ τὴ μελέτη τῆς ὕλης καθὼς ἐπίσης στὴν ἀναβάθμισιν παλαιότερων. Χαρακτηριστικὸ παράδειγμα νέας τεχνικῆς εἶναι ἡ ἀκτινογραφία ἀντιθέσεως φάσεως. Ὁ σχηματισμὸς τῶν εἰδώλων μὲ τίς μέχρι σήμερα ἐφαρμοζόμενες τεχνικὰς βασίζεται στὸ ὅτι ἡ διαφορὰ τῆς ἀμαυρώσεως τῆς φωτογραφικῆς πλάκας ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ διαφορὰ τῆς ἐντάσεως τῆς διερχομένης δέσμης μέσω ἀνομοιογενοῦς ἀντικειμένου, ὅπου ἡ ἔνταση τῆς διερχόμενης δέσμης ἀπὸ τὴν περιοχὴ (i) τοῦ ἀντικειμένου δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση¹⁴:

14. μ_i εἶναι ὁ γραμμικός συντελεστὴς ἀπορροφῆσεως τοῦ ὑλικοῦ, x_i τὸ πάχος αὐτοῦ καὶ I_0 ἡ ἔνταση τῆς προσπίπτουσας δέσμης.

$$I_i = I_0 e^{-\mu_i x_i}$$

Γιά υλικά τῆς αὐτῆς περίπου συστάσεως ἢ πολὺ μικρῶν διαστάσεων, ἡ διαφορὰ τῆς ἐντάσεως τῆς διερχομένης δέσμης καὶ ἐπομένως καὶ ἀμειωτέως εἶναι ἀμελητέα, ὥστε ἡ μέθοδος νὰ εἶναι ἀνεφάρμοστη σ' αὐτὴ τὴν περίπτωσιν ἢ νὰ ἀπαιτοῦνται πολὺ ὑψηλές δόσεις ἀκτινοβολίας καὶ φωτογραφικὲς πλάκες πολὺ μεγάλης δυναμικῆς ἐνεργοῦ περιοχῆς. Ἡ ἀκτινογραφικὴ αὐτὴ μέθοδος ποὺ χαρακτηρίζεται γιὰ τὴν ἀπλότητά της καὶ ὅπως περιγράφηκε στηρίζεται στὴ μεταβολὴ τῆς ἐντάσεως τῆς δέσμης τῶν ἀκτίνων-X, εἶναι ἀνεξάρτητη τῆς φάσεως τοῦ κύματος. Ἡ νέα τεχνικὴ ραδιογραφίας εἶναι οὐσιαστικὰ μιὰ ὁλογραφικὴ μέθοδος καὶ στηρίζεται στὴ διαφορὰ φάσεως ποὺ εἰσαγάγει ἡ διέλευση τοῦ κύματος ἀπὸ τὰ διαφορετικὰ τμήματα τοῦ ἀντικειμένου, δηλαδὴ ἀπὸ τὴ διαφορὰ τοῦ δείκτη διαθλάσεως αὐτῶν¹⁵. Στὸ σχῆμα 4α σκιαγραφεῖ-



Σχῆμα 4α. Ἀρχὴ τῆς ἀκτινογραφικῆς μεθόδου ἀντιθέσεως φάσεως. Ἡ δέσμη ἀπὸ τὸν ἐλίτροχο μικρῆς περιόδου, μονοχρωματίζεται σὲ μονοχρωμάτορα αὐλακα πολλαπλῶν ἀνακλάσεων δημιουργώντας μιὰ μονοχρωματικὴ δέσμη μὲ χωρικὸ καὶ χρονικὸ μῆκος συμφωνίας ἱκανὸ νὰ σχηματίζει ὁλόγραμμα τοῦ ἀντικειμένου ἐπὶ τοῦ πετάσματος. β) Κατανομὴ τῆς ἐντάσεως τῶν ἀκτίνων-X ἐπὶ τοῦ πετάσματος.

15. Ἄν καὶ ὁ δείκτης διαθλάσεως εἶναι σχεδὸν μονάδα γιὰ τὶς ἀκτίνες-X, ὁ ὁπτικὸς δρόμος

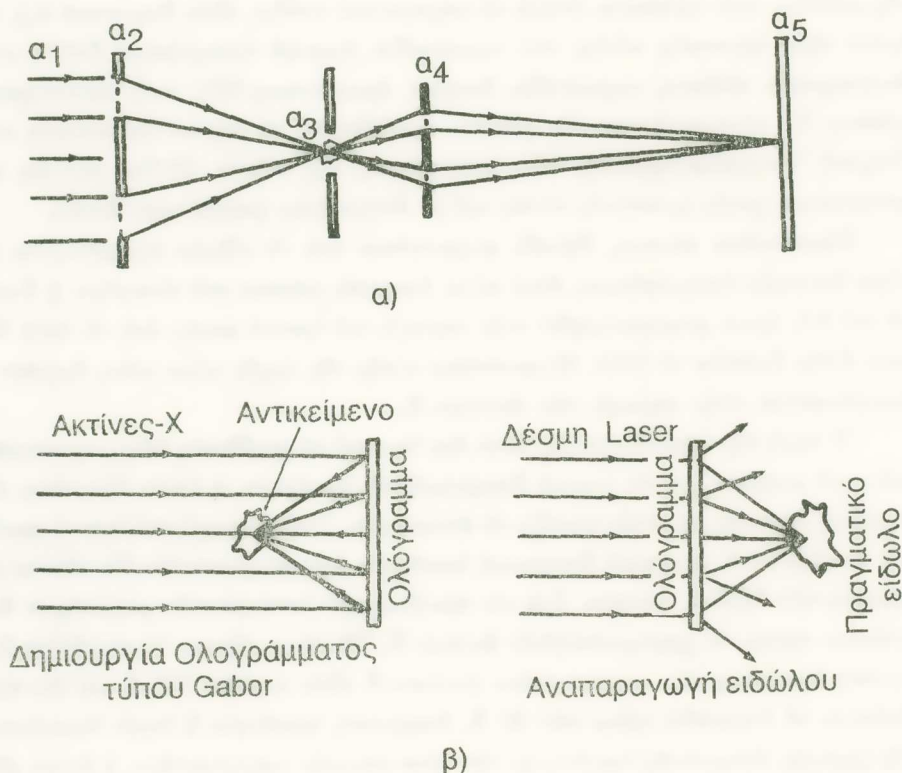
ται ή νέα αὐτὴ τεχνική. Ἡ δέσμη τῶν ἀκτίνων- X ἀπὸ τὴν ἐνθετὴ διάταξιν στὸ δακτύλιο συσσωρεύσεως μονοχρωματίζεται δημιουργώντας ἓνα ἐπίπεδο οἰονεὶ σύμφωνο κύμα τὸ ὁποῖο προσπίπτει στὸ ἀντικείμενο. Στὸ τμήμα τοῦ κύματος ποὺ διέρχεται ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο εἰσάγεται διαφορὰ φάσεως καὶ ἐπὶ τοῦ πετάσματος σχηματίζεται ἓνα ὀλόγραμμα τύπου Gabor, σχῆμα 4β, ὅπου ἡ διαφορὰ τῆς ἀμαυρώσεως προέρχεται ἀπὸ τὴ διαφορὰ τοῦ δείκτη διαθλάσεως. Τὰ πρῶτα πειράματα γιὰ τὴ θεμελίωση τῆς μεθόδου, ποὺ εὑρίσκεται ἀκόμη σὲ πειραματικὸ στάδιο, εἶναι θεαματικὰ π.χ. ἓνα λεπτὸ νῆμα ὀργανικῆς οὐσίας ποὺ παρουσιάζει διαφορὰ ἀμαυρώσεως 0.02% στὴν ἀκτινογραφία πλάτους, παρουσιάζει διαφορὰ ἀμαυρώσεως 50% στὴν ἀκτινογραφία φάσεως. Τὰ πλεονεκτήματα τῆς μεθόδου προβλέπεται νὰ φέρουν ἐπανάσταση στὴν Ἱατρικὴ Ἀκτινοδιαγνωστικὴ, διότι λεπτομέρειες τῆς τάξεως 10^{-6}m γίνονται παρατηρήσιμες χωρὶς χρωστικὲς οὐσίες καὶ μὲ ἀσυγκρίτως χαμηλότερες δόσεις.

Μικροσκοπία φάσεως, δηλαδὴ μικροσκοπία ποὺ τὸ εἶδωλο σχηματίζεται ὅχι λόγω διαφορᾶς ἀπορροφήσεως ἀλλὰ λόγω διαφορᾶς φάσεως ποὺ εἰσαγάγει ἡ διαφορὰ τοῦ δ.δ. ἔχουν χρησιμοποιηθεῖ στὴν περιοχὴ τοῦ ὁρατοῦ φωτός ἀπὸ τὸ Δανὸ Φυσικὸ Frits Zernike τὸ 1934. Μικροσκοπία αὐτῆς τῆς ἀρχῆς τώρα μόλις ἀρχισαν νὰ ἐφευρίσκονται στὴν περιοχὴ τῶν ἀκτίνων- X .

Ἡ ἀρχὴ τῆς ἀπροσδιοριστίας θέτει ἓνα ὄριο γιὰ τὴ μεγέθυνση ἑνὸς μικροσκοπίου καὶ κατὰ συνέπεια γιὰ τὴ χωρικὴ διακριτικὴ του ἱκανότητα, ἡ ὁποία ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὸ μῆκος κύματος, τὸ ὁποῖο φωτίζει τὸ ἀντικείμενο. Στὴν περιοχὴ τοῦ ὁρατοῦ φωτός, γιὰ τὸ λόγο αὐτό, ἡ χωρικὴ διακριτικὴ ἱκανότητα ἑνὸς μικροσκοπίου δὲν γίνεται μικρότερη τῶν 2500 Å περίπου. Γιὰ τὸν προσδιορισμὸ λεπτομερειῶν μικρότερων διαστάσεων πρέπει νὰ χρησιμοποιηθοῦν ἀκτίνες- X . Ἡ μέχρι σήμερα ἐπιτευχθεῖσα διακριτικὴ ἱκανότητα τῶν μικροσκοπίων ἀκτίνων- X εἶναι περίπου 550 Å καὶ δὲν προβλέπεται νὰ ἐπεκταθεῖ κάτω τῶν 20 Å, διακριτικὴ ἱκανότητα ἡ ὁποία ὑπολείπεται τῆς χωρικῆς διακριτικῆς ἱκανότητος τῶν ἠλεκτρονικῶν μικροσκοπίων, ἡ ὁποία φθάνει στὰ 2 Å (2-20 Å). Τὸ κύριο ὅμως πλεονέκτημα τῶν μικροσκοπίων ἀκτίνων- X ἔναντι τῶν ἠλεκτρονικῶν εἶναι ὅτι τὰ πρῶτα ἐπιτρέπουν ποσοτικὴ μελέτη βιολογικῶν παρασκευασμάτων στὸ φυσικὸ τους ἢ περίπου στὸ φυσικὸ τους περιβάλλον καὶ ἐπιπλέον ἐπιτυγχάνουν τὴν κατ' ἐπιλογὴ ἀπεικόνιση δεδομένου στοιχείου χρησιμοποιώντας γιὰ φωτισμὸ ἀκτίνες- X μήκους κύματος αὐτὸ τῆς ἀκμῆς ἀπορροφήσεως τοῦ στοιχείου. Ὁ τρόπος λειτουργίας τῶν διαφόρων τύπων μικροσκοπίων ἀκτίνων- X

ὅμως σὲ μῆκη κύματος ἀκόμη καὶ γιὰ ἀντικείμενα μικρομετρικῶν διατάξεων εἶναι ἀρκετὰ μεγάλος, ὥστε νὰ εἰσάγεται σημαντικὴ διαφορὰ φάσεως, π.χ. γιὰ διαφορὰ δείκτη διαθλάσεως 10^{-5} καὶ πάχος 100 μm , ἡ διαφορὰ φάσεως εἶναι 180°.

σκιαγραφείται στο σχήμα 5. Το είδωλο του αντικειμένου δημιουργείται¹⁶ είτε με τη διαδικασία της απορρόφησης των ακτίνων-X δημιουργώντας σκιά ή οποία μεγεθύνεται στη συνέχεια με τη βοήθεια φακού περιθλάσεως, είτε με τη δημιουργία ολόγραμματος ακτίνων-X τύπου Gabor. Στη δεύτερη περίπτωση ή μεγέθυνση επιτυγχάνεται με ανασύσταση του είδωλου φωτίζοντας το ολόγραμμα με οπτικό Laser.



Σχήμα 5. α) Σύνθετο μικροσκόπιο ακτίνων-X με φακούς περιθλάσεως Bragg-Fresnell α_1) δέσμη ακτίνων-X. α_2) Συγκεντρωτικός φακός ο οποίος συγκεντρώνει τη δέσμη πάνω στο δείγμα. α_3) Δείγμα. α_4) 'Αντικειμενικός φακός. α_5) 'Ανιχνευτής ευαισθησίας θέσεως επί του οποίου σχηματίζεται το μεγεθυμένο είδωλο. β) 'Ολογραφικό μικροσκόπιο ακτίνων-X. Το είδωλο σχηματίζεται σε δύο στάδια, στο πρώτο δημιουργείται ένα ολόγραμμα τύπου Gabor φωτίζοντας το αντικείμενο με μία σύμφωνη δέσμη ακτίνων-X και σε δεύτερο στάδιο, δημιουργείται το είδωλο μεγεθυμένο φωτίζοντας το ολόγραμμα με σύμφωνη δέσμη ορατού φωτός.

16. M. R. Howells, J. Kirz and D. Sayre, Scient. Amer. Feb. 1991, p. 42.

Ἡ σκέδαση συμφώνου ἀκτινοβολίας ἀπὸ συσσωματώματα διαστάσεων τῆς αὐτῆς τάξεως μεγέθους μὲ τὸ μῆκος κύματος τῆς ἀκτινοβολίας προκαλεῖ ἓνα κοκκῶδες ὀπτικό πεδίο. Μεταξὺ τῆς κατανομῆς τῶν κόκκων τοῦ ὀπτικοῦ πεδίου καὶ τῆς κατανομῆς τῶν συσσωματωμάτων τῆς σκεδαζούσης ὕλης ὑπάρχει μιὰ ἀμφιμονοσήμαντη ἀντιστοιχία ποὺ ἐπιτρέπει τὴ μελέτη τῆς κατανομῆς τῶν ἀνωμαλιῶν. Ἡ φασματοσκοπικὴ τεχνικὴ ποὺ βασίζεται στὰ παραπάνω καὶ ἀναπτύχθηκε μετὰ τὴν εἰσαγωγή τῶν Laser, εἶναι γνωστὴ ὡς κοκκῶδης φασματοσκοπία (speckle spectroscopy). Ἡ ἐπίτευξη συμφώνων δεσμῶν ἀκτίνων-Χ σημαντικοῦ μήκους συμφωνίας στὶς ἐγκαταστάσεις συγχρότρου τρίτης γενιᾶς εἶχε ὡς ἀποτέλεσμα τὴν ἐπέκταση τῶν ὁρίων τῆς κοκκῶδους φασματοσκοπίας σὲ ἀτομικὴ διάσταση¹⁷. Τὸ γεγονός αὐτὸ συνδυαζόμενο μὲ τὴν παλμικὴ χρονικὴ δομὴ τῆς δέσμης τῆς ἀκτινοβολίας συγχρότρου, ἐπιτρέπει τὴ δυναμικὴ μελέτη συστημάτων στὴν κατάσταση μεταβολῆς φάσεως. Ἡ ὑπαρξὴ τῶν συμφώνων δεσμῶν ἀκτίνων-Χ, ποὺ ἀποτέλεσε τὴ βάση τῶν νέων μεθόδων, δημιουργεῖ συγχρόνως νέους περιορισμοὺς στὴν ὀργανολογία τῆς τρίτης γενιᾶς τῶν ἐγκαταστάσεων συγχρότρου. Ἐνδεικτικὰ ἀναφέρεται τὸ βασικότερο στοιχεῖο τὸ ὁποῖο εἶναι παρὸν σὲ κάθε διάταξη ἀκτίνων-Χ, τὸ παράθυρό της ὅπως π.χ. αὐτὸ τοῦ Βηρυλίου δημιουργεῖ κοκκῶδη ὕφὴ στὴν τομὴ τῆς δέσμης λόγω συμβολῆς ἀπὸ τὶς μικροσκοπικὲς ἀνωμαλίαις τῆς ἐπιφανείας του¹⁸.

Ἀντιπροσωπευτικὸ παράδειγμα φασματοσκοπικῆς τεχνικῆς, ἡ ὁποία ἀναβαθμίστηκε καὶ ἐπεκτάθηκε εἶναι καὶ ἡ φασματοσκοπία μὴ ἐλαστικῆς σκεδάσεως ἀκτίνων-Χ.

Στὰ τέλη τῆς δεκαετίας τοῦ 1920 ἀναπτύχθηκε ἡ μέθοδος μελέτης τῆς ἐνεργειακῆς καταστάσεως τῶν ἠλεκτρονίων τοῦ στερεοῦ ἀπὸ τὸ φάσμα τῆς μὴ ἐλαστικῆς σκεδάσεως τῶν ἀκτίνων-Χ, ἡ ὁποία χρησιμοποιεῖται καὶ σήμερα εὐρύτατα γιὰ τὸν ἴδιο σκοπὸ¹⁹. Γιὰ τὴν πληρέστερη κατανόηση τῶν φαινομένων τὰ ὁποῖα ἐπηρεάζουν τὴν κατανομὴ τῶν ἠλεκτρονίων ἀπαιτεῖται βελτίωση τῆς ἐνεργειακῆς διακριτικῆς ικανότητος τῶν φασματοσκοπίων, ἡ ὁποία μέχρι πρόσφατα δὲν ἦταν καλύτερη τῶν μερικῶν eV. Ἡ χρησιμοποίησις τελείων κρυστάλλων μεγάλης ἐπιφανείας καὶ εἰδικῆς κοπῆς σὲ θέση ὀπισθοσκεδάσεως ἐλάττωσε τὴν τιμὴ τῶν διακρίσιμων ἐνεργειακῶν διαφορῶν στὴν τάξιν τῶν μερικῶν δεκάδων meV. Αὐτὸ εἶχε ὡς συνέπεια ἡ μέθοδος

17. R. Ladbury, Phys. Today p. 22 June 1995, S. Brauer, G. B. Stephenson, M. Satton, R. Brüning, E. Dufresne, S. G. Mochrie, G. Grübel, J. Als-Nielsen, D. Abernathy, Phys. Rev. Lett. 74, 2010, 1995.

18. A. Snigirev, I. Snigireva, V. G. Kohn, S. M. Kuznetsov, Nuc. Inst. Met. in Phys. Res. A370, 634 (1996).

19. N. G. Alexandropoulos, Italian Physical Society, Conference Proceedings Vol. 25, 173 (1990), M. J. Cooper, Rep. Prog. Phys. A246, 491 (1986).

νά επεκταθεῖ καί στή μελέτη τῆς κατανομῆς φωτονίων²⁰, δηλαδή τῶν θερμικῶν ταναλντώσεων τῶν στερεῶν. Ἡ ἐφαρμογή τῆς μεθόδου στό νερό, στή στερεά καί στήν ὑγρή μορφή, ἤλθε νά ἀνατρέψει ἐπιστημονικά δεδομένα τά ὁποῖα μέχρι τώρα δέν ἀμφισβητοῦντο. Συγκεκριμένα μέχρι τώρα ἦταν παραδεκτό ὅτι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου (ἐλαστικῶν κυμάτων) στά στερεά εἶναι μεγαλύτερη αὐτῆς εἰς τά ὑγρά, πράγμα τὸ ὁποῖο ἀμφισβητεῖται μετὰ ἀπό πρόσφατες μετρήσεις.

Ἡ ὀπτική τῶν ἀκτίνων-Χ, πού 101 χρόνια τώρα ἀποτελέσει τὸ βασικὸ ἐργαλεῖο γιὰ τὴ μελέτη τῆς ὕλης σὲ ἀτομική καί ὑποατομική κλίμακα, ἔχει ἐφαρμογές στήν Ἰατρική καί σὲ ὅλες σχεδὸν τίς θετικὲς ἐπιστῆμες καί στήν τεχνολογία, οἱ ὁποῖες συνέβαλαν τὰ μέγιστα στήν ἐξέλιξή τους. Σήμερα ἡ ὀπτική τῶν ἀκτίνων-Χ εὐρίσκεται σὲ ἓνα σημεῖο ἀναμορφώσεων καί ὑπόσχεται ὅτι στά ἐπόμενα λίγα χρόνια θὰ προκαλέσει μιὰ ἀναθεώρηση πολλῶν βασικῶν ἀρχῶν τῆς φυσικῆς, ἐνῶ συγχρόνως θὰ ὀδηγήσει στήν ἀνάπτυξη τεχνικῶν πού θὰ ἐπηρεάσουν ὀλόκληρο τὸ ἐπιστημονικὸ οἰκοδόμημα, συμβάλλοντας στήν τεχνολογική ἐπανάσταση. Ἡ ἐποχή πού διανύουμε σήμερα εἶναι γιὰ τὴν ὀπτική τῶν ἀκτίνων-Χ ὅ,τι ἡ περίοδος τῆς δεκαετίας τοῦ 1960 γιὰ τὴν ὀπτική τοῦ ὁρατοῦ φωτὸς μετὰ τὴν ἐφεύρεση τοῦ Laser, μὲ τὸ ἐπιπρόσθετο χαρακτηριστικὸ ὅτι παρουσιάζει μιὰ πρωτόγνωρη δυναμική.

Ἐχω τὴν ἐντύπωση ὅτι εὐρισκόμαστε σὲ μιὰ προεπαναστατικὴ ἐπιστημονικὴ ἐποχή. Θὰ σᾶς παρακαλοῦσα νά μοῦ ἐπιτρέψετε μιὰ ἀπλή σύγκριση μὲ γνωστὰ γεγονότα τῆς ἀρχῆς τοῦ αἰῶνα μας, ὅταν ἡ φασματοσκοπία τοῦ ὁρατοῦ φωτὸς εἶχε τεχνολογικά τελειοποιηθεῖ τόσο ὅσο ἀφορᾷ τίς πηγές ὅσο καί τὰ φασματοσκοπία, τὰ δεδομένα συνελέγοντο μὲ προβλέψεις πού ὑπαγόρευε τὸ πρότυπο τοῦ ἀτόμου τοῦ Bohr. Ἡ τελικὴ ὅμως ἐρμηνεία τους ἐδόθη στά πλαίσια τῆς Κβαντομηχανικῆς ἡ ὁποία καί ἀνεπτύχθη κυρίως γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτό, ἀλλὰ σήμερα ἀντιμετωπίζει προβλήματα στήν ποσοτικὴ ἐξήγηση πολλῶν ἀπὸ τίς νέες παρατηρήσεις.

Ἐὰν περιορισθοῦμε, γιὰ τὴ διευκόλυνση τῆς συζητήσεως, στή σύγκριση τοῦ ρυθμοῦ συλλογῆς δεδομένων κατὰ τὴν ἐποχὴ τῆς σύγχρονης ὀπτικῆς τῶν ἀκτίνων-Χ μὲ αὐτὸν τῆς προηγούμενης, μόνο ὡς πρὸς τὴ λαμπρότητα τῶν πηγῶν πού ἔχει αὐξηθεῖ κατὰ δεκατρεῖς τάξεις μεγέθους (10^{13}), μιὰ ἀνθρωποώρα συλλογῆς δεδομένων σὲ ἓνα ἀπὸ τὰ πολλὰ πειράματα πού διεξάγονται συγχρόνως στὶς Εὐρωπαϊκὲς Ἐγκαταστάσεις Ἀκτινοβολίας Συγχρότρου²¹, ἀντίστοιχες περίπου σὲ τρία ἑκατομμύρια

20. G. Ruocco, F. Sette, Bergmann, M. Krisch, C. Masciovecchio, V. Mazzacurati, G. Signorelli & R. Verbeni, Nature Vol 379, 521 (1996).

21. Μόνο στὶς ἐγκαταστάσεις τοῦ ESRF ἔχουν προγραμματιστεῖ 3570 βάρδιες γιὰ τὸ πρῶτο ἔξάμηνο τοῦ 1997.

άνθρωποέτη στην καλύτερη εργαστηριακή συσκευή ακτίνων-Χ περιστρεφόμενης ανόδου (3.17×10^6 έτη).

‘Η νέα τεχνολογία και έρευνητική μεθοδολογία έχουν ως αποτέλεσμα την πλήρη αναδιοργάνωση και μεταμόρφωση τής δομής τών έρευνητικών προσπαθειών. Κατά τὸ παρελθόν, ἡ έρευνα στην περιοχή τών ακτίνων-Χ διεξήγετο ἀπὸ ὀλιγομελεῖς ὁμάδες, σὲ ἐργαστήρια, μικρῶν οἰκονομικῶν ἐπενδύσεων, διεσπαρμένων σὲ έρευνητικὰ κέντρα καὶ Πανεπιστημιακὰ τμήματα καὶ πολλές φορές στὸ ἴδιο ΑΕΙ ἢ έρευνητικὸ κέντρο ὑπῆρχαν περισσότερα τοῦ ἑνὸς ἐργαστήρια ακτίνων-Χ. ‘Η δομὴ αὐτὴ ἦταν τὸ πλέον χαρακτηριστικὸ παράδειγμα τρόπου έρεύνης ποὺ ἔχει χαρακτηριστεῖ ὡς «έρευνα μικρῆς κλίμακας».

‘Η χρήση τοῦ συγχρότρου ὡς πηγῆς ακτίνων-Χ ποὺ ἀπαιτεῖ μεγάλες ἐγκαταστάσεις μὲ ἀντίστοιχες χρηματικὲς ἐπενδύσεις, εἶχε ὡς ἀποτέλεσμα νὰ περιορίσει καὶ σὲ μερικὲς περιπτώσεις νὰ ἐκμηδενίσει τὴν ἀξία τών μικρῶν, ὀλιγομελῶν ἐργαστηρίων, ἢ χρησιμότητα τών ὁποίων ἔχει περιοριστεῖ σὲ κλασικὲς μετρήσεις ρουτίνας καὶ σὲ διεργασίες προετοιμασίας καὶ ἐλέγχου διατάξεων καὶ δειγμάτων. Τέλος συντέλεσε στὸν περιορισμὸ τών συγκινήσεων ποὺ ἔδιδε ἡ μικρῆς κλίμακας έρευνα τῆς «‘Ηρωικῆς ἐποχῆς», ποὺ ὁ χρόνος μετὰξὺ ἐμπνεύσεως καὶ ὑλοποιήσεως ἦταν τῆς ἰδίας τάξεως μεγέθους μὲ τὴ διάρκεια τοῦ ἐνθουσιασμοῦ καὶ ἡ πίστη τοῦ έρευνητῆ στην ἰδέα του ἀποτελοῦσε τὸ πρωταρχικὸ στοιχεῖο γιὰ τὴν ἐκτέλεση τοῦ πειράματος.

‘Η σημερινὴ πρακτικὴ, καλύτερη ἢ χειρότερη, εἶναι πάντως τελείως διαφορετικὴ, ἀπαιτεῖ μακροχρόνιο προγραμματισμὸ, συνεργασία σχετικὰ μεγάλου ἀριθμοῦ έρευνητῶν, κατὰ προτίμηση διαφορετικῆς προελεύσεως καὶ ἐπικουρικὸ προσωπικὸ, ἀναζήτηση χρηματοδότησης καὶ προσπάθεια νὰ πεισθοῦν διάφοροι ἀρμόδιοι εἰδήμονες καὶ μὴ ὅτι ἡ έρευνητικὴ προσπάθεια θὰ ἔχει κάποιο συγκεκριμένο πρακτικὸ ἐμπορεύσιμο ἀποτέλεσμα. Ἔτσι σχεδὸν τὸ σύνολο τών έρευνητικῶν προσπαθειῶν τῆς σύγχρονης ὀπτικῆς τών ακτίνων-Χ γίνεται γιὰ νὰ τελειοποιηθοῦν μέθοδοι καὶ διατάξεις ποὺ θὰ συμβάλουν στην παραγωγή, στὸν έλεγχο, στὴ μελέτη καὶ στὴν ἐπεξεργασία ὑλικῶν καὶ γενικότερα στὴ μελέτη μηχανισμῶν ὅπως π.χ. χημικῶν, βιολογικῶν. Ὡς πέραργο δὲ τῆς προσπάθειας αὐτῆς μελετῶνται φαινόμενα, τὰ ὁποῖα δὲν ἔχουν ἀκόμη διερευνηθεῖ, ἐὰν καὶ ἐφόσον εἶναι δυνατὴ ἡ ἐπικλήση τῆς δικαιολογίας ὅτι θὰ συμβάλουν στὴ βελτίωση ὑπαρχουσῶν τεχνικῶν. Γιὰ τοὺς παραπάνω λόγους, ἂν καὶ σήμερα οἱ ἀνθρωποῶρες ποὺ ἀναλώνονται στην περιοχή αὐτὴ τῆς φυσικῆς εἶναι περισσότερες παρὰ ποτὲ ἄλλοτε, καμία σημαντικὴ ἀνακάλυψη δὲν προέκυψε καὶ καμία ριζοσπαστικὴ νέα ἰδέα δὲν ἀνεπήδησε ἀκόμη²².

22. Στὸ πεδίο τῆς σύγχρονης ὀπτικῆς τών ακτίνων-Χ φαίνονται ἀνάγλυφα οἱ ἀντιφάσεις καὶ

Παράρτημα Α

Ἀπόσπασμα ἀναφορᾶς τοῦ Διευθυντοῦ
τοῦ ἐργαστηρίου Φυσικῆς τοῦ Ἐθνικοῦ Πανεπιστημίου
Ἐργαστήριον τῆς Φυσικῆς

Πρὸς τὴν Σ. Πρυτανείαν τοῦ Ἐθνικοῦ Πανεπιστημίου.

Κύριε Πρύταμι

Κατὰ τὸ ἀκαδημαϊκὸν ἔτος 1896-97 ἐγένοντο ἐν τῷ ἐργαστηρίῳ τῆς Φυσικῆς τακτικῶς αἱ ἀσκήσεις τῶν φοιτητῶν τοῦ φυσικοῦ καὶ μαθηματικοῦ τμήματος τῆς Φιλοσοφικῆς Σχολῆς.

Ἡσκήθησαν δὲ κατὰ τὸ ἔτος τοῦτο οἱ ἐξῆς φοιτηταί, πληρώσαντες τὸ νόμιμον τέλος τοῦ χαρτοσήμου...

Ἐν τῷ ἐργαστηρίῳ ἐγκατέστησα ἀπὸ τῆς ἀρχῆς τοῦ ἀκαδημαϊκοῦ ἔτους διὰ τῶν ὑπαρχουσῶν ἐν αὐτῷ συσκευῶν πλήρες σύστημα πρὸς παραγωγὴν τῆς ἀκτινοβολίας τοῦ Röntgen. Δι' αὐτῆς ἠδυνήθην νὰ ἐκτελέσω πληθὺν ἀκτινογραφιῶν καὶ ἀκτινοσκοπιῶν ἐπὶ τραυματιῶν καὶ ἄλλων ἀρρώστων, ὧν πολλοὶ φέροντες βολίδας ἢ ἄλλα μετάλλινα σώματα ἐθεραπεύθησαν. Ἡ προσφορὰ δὲ συσκευῆς φορητῆς ἣν ἔκαμην ὁ Ἡμερήσιος Χρονογράφος τοῦ Λονδίνου, εἰς ἣν καὶ ὑμεῖς, Κύριε Πρύταμι, συνετελέσατε, μοὶ παρέσχε τὸ μέσον νὰ ἐκτελέσω τοιαύτας ἐπιτυχεῖς ἀκτινογραφίας καὶ ἀκτινοσκοπίας καὶ ἐκτὸς τοῦ ἐργαστηρίου μου, εἰς Ἀθήνας, εἰς Πάτρας καὶ εἰς Κέρκυραν.

Ἡ τῇ ὑμετέρα προτάσει γενομένη αὐξήσις τῆς χρηματικῆς χορηγίας πρὸς ἀγορὰν ὀργάνων τοῦ ἐπομένου ἔτους 1897-98 θέλει συντελέσει οὐκ ὀλίγον εἰς τὸν ἐμπλουτισμὸν τοῦ ἐργαστηρίου συμφώνως πρὸς τὰς μεγάλας προόδους τῆς ἐπιστήμης.

Ἐν Ἀθήναις τῇ 1 Ὀκτωβρίου 1897.

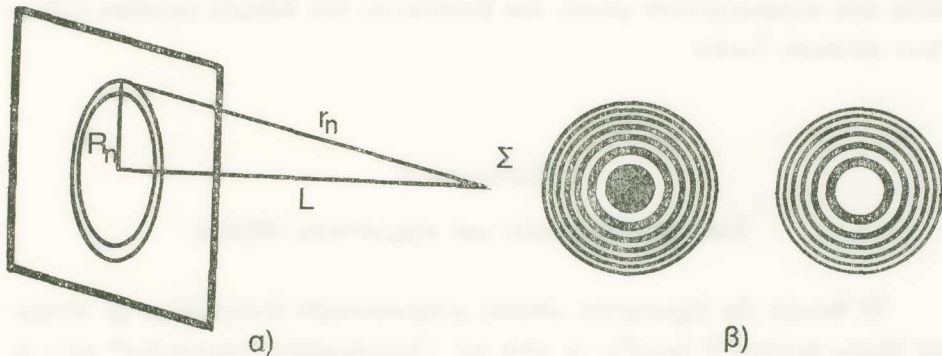
Εὐπειθέστατος
Τ. Α. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ

οἱ προβληματισμοὶ τῆς μετεξέλιξης τοῦ τρόπου ἔρευνας μικρῆς κλίμακας κάτω ἀπὸ τὶς ὑπαρκτὲς κοινωνικοοικονομικὰς συνθῆκας καὶ τὸν ἀσφυκτικὸν ἐναγκασμὸν ἔρευνας καὶ παραγωγῆς. Ἔτσι αὐτὸ τὸ πεδίο ἀποτελεῖ τὸ δοκιμαστήριον γιὰ τὸν τρόπο ἐξελίξεως τῆς ἔρευνας καὶ τῆς ἐκπαιδεύσεως.

Παράρτημα Β

Ἀρχὴ Φακοῦ Περιθλάσεως

Ἀπὸ τὴ θεωρίᾳ τοῦ Fresnell²³ γιὰ τὴν περίθλαση ἐπιπέδου κύματος ἐντάσεως ἡλεκτρικοῦ πεδίου E_0 ἀπὸ κυκλικὴ ζώνη (σχῆμα 6), προκύπτει ὅτι στὴν περίπτωση



Σχῆμα 6. α) Ἀρχὴ σύγκλισης παράλληλης δέσμης ἡλεκτρομαγνητικοῦ κύματος ἀπὸ κυκλικὴ ζώνη, β) πλακίδιο ζωνῶν Fresnell.

$$R_n^2 = (L + n\lambda/2)^2 - L^2 = nr\lambda \quad (1)$$

πού $r_n = n\lambda/2$, παρατηρεῖται ἐνισχυτικὴ συμβολὴ στὸ σημεῖο Σ γιὰ κάθε δυάδα στοιχειωδῶν κυμάτων σκεδασθέντων σὲ ἀντιδιαμετρικὰ σημεῖα. Μεταξὺ τῆς ἐξωτερικῆς ἀκτίνας R_n , τῆς ζώνης καὶ τῆς ἀποστάσεως L τοῦ σημείου Σ ἀπὸ τὸ ἐπίπεδο τῆς ζώνης, ἰσχύει ἡ σχέση:

$$\text{καὶ } L = \frac{R_n^2}{n\lambda}.$$

Στὴν περίπτωση πού ἡ κυκλικὴ ὀπὴ τοῦ πετάσματος ἀντικατασταθεῖ ἀπὸ κυκλικὴ ζώνη, ἐξωτερικῆς ἀκτίνας R_n καὶ ἐσωτερικῆς R_{n-1} , οἱ ὁποῖες ἱκανο-

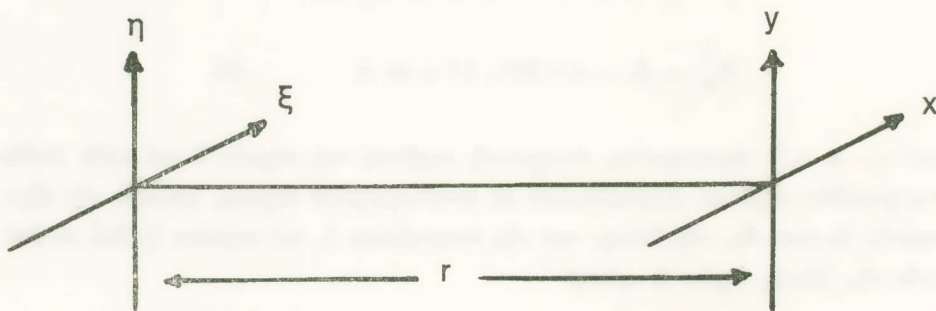
23. E. Hecht, Optics, Addison-Wesley, 1989.

ποιούν τη σχέση (1) για ένισχυτική συμβολή, τότε το έμβασδόν τῆς ζώνης πρέπει νὰ εἶναι πR_1^2 ἀνεξαρτήτως τοῦ n . Ἐνα σύστημα N ὁμόκεντρων κυκλικῶν ζωνῶν ἐναλλάξ διαφανῶν καὶ ἀδιαφανῶν δημιουργεῖ στὸ σημεῖο Σ ἡλεκτρικὸ πεδίο $E = \sum_n^N E_{2n+1} \approx \frac{N}{2} E_0$, καὶ φωτεινὴ ροὴ $N^2/4$ φορές μεγαλύτερη αὐτῆς τὴν ὁποία δημιουργεῖ μιὰ ζώνη. Δηλαδή μιὰ παράλληλη δέσμη φωτὸς τὴν μετατρέπει σὲ συγκλίνουσα διερχόμενη ἀπὸ τὸ A , τὸ ὁποῖο δύναται νὰ θεωρηθεῖ ὡς ἡ κυρία ἐστία ἐνὸς συγκεντρωτικοῦ φακοῦ, ποὺ ἀποτελεῖται ἀπὸ διάταξη ἐπιπέδων ὁμόκεντρων κυκλικῶν ζωνῶν.

Παράρτημα Γ

Καθυστέρηση φάσεως καὶ σχηματισμὸς εἰδώλου

Ἡ θεωρία τῆς δημιουργίας εἰδώλου μικροσκοπικῶν ἀντικειμένων μὲ σύγχρονες δέσμες ἀκτίνων- X ὁμοιάζει μὲ αὐτὴ τοῦ Ὀλογράμματος Fraunhofer²⁴ στὴν περιοχὴ τῶν Laser.



Σχῆμα 7. Ἀρχὴ τῆς δημιουργίας ὀλογράμματος: ἐπίπεδο κύμα ἀκτίνων- X προσπίπτει ἐπὶ τοῦ ἀντικειμένου A , τὸ ὁποῖο περιγράφεται ἀπὸ τὴ συνάρτηση $A(\xi, \eta)$. Τὸ ὀλόγραμμα σχηματίζεται ἐπὶ τοῦ πετάσματος ποὺ εὑρίσκεται σὲ ἀπόσταση r , ἡ δὲ ένταση τοῦ ἡλεκτρικοῦ πεδίου εἶναι ἡ $E(x, y)$.

24. A. Snigirev, I. Snigireva, V. Kohn, S. Kuznetsov and I. Schelokov, Rev. Inst. 66, 5486, 1995, G. A. Tyler and B. J. Thomson, Opt. Acta 23, 685 (1976).

Ἐστω ὅτι ἓνα ἀντικείμενο, τοῦ ὁποίου ἡ κατανομή ὕλης περιγράφεται ἀπὸ τὴ συνάρτηση $A(\xi, \eta)$, φωτίζεται ἀπὸ ἓνα ἐπίπεδο κύμα πλάτους E_0 καὶ μήκους κύματος λ (σχῆμα 7). Ἡ κατανομή τοῦ ἡλεκτρικοῦ πεδίου $E(x, y)$, στὸ ἐπίπεδο ἀπεικόνισης ποὺ βρίσκεται σὲ ἀπόσταση r δίδεται στὴν περίπτωση τοῦ μακρινοῦ πεδίου ἀπὸ τὴ σχέση:

$$E(x, y) = - \frac{iE_0}{\lambda r} \exp [ikr] \int \int_{-\infty}^{\infty} [1 - A(\xi, \eta)] \exp \left\{ \frac{ik}{2r} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \right\} \exp [i \varphi(\xi, \eta)] d\mu d\eta.$$

τὸ δὲ ὁλόγραμμα δημιουργεῖται ἀπὸ τὴν ἔνταση τῆς δέσμης ποὺ δίνεται ἀπὸ τὴ σχέση

$$I(x, y) = E(x, y) \cdot E^*(x, y)$$

ἡ ὁποία περιέχει τὴ συνάρτηση $\varphi(\xi, \eta)$.