

Η ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Δρ Γεωργίου Βουδούρη

Τοῦ Ἐθν. Κέντρου Ἐπιστημ. Ἐρευνῶν τῆς Γαλλίας

Ἡ Κβαντική Ἡλεκτρονική κλείνει ἐφέτος δέκα χρόνια ἀπὸ τὴν πρώτη της ἐμφάνιση σὲ συγκεκριμένες πραγματοποιήσεις. Ἡ ἐπέτειος αὐτὴ συνέπεσε μὲ τὴν ἀπονομὴ τοῦ Βραβείου Νόμπελ Φυσικῆς 1964 στὸν Ἀμερικανὸ Τάουνς καὶ στοὺς Σοβιετικοὺς Μπασώφ καὶ Προχόρωφ, πρωτεργάτες τοῦ νέου κλάδου, πὺ φαίνεται προορισμένος νὰ διευρύνῃ σημαντικὰ τοὺς ὀρίζοντες τῆς Ἐπιτήμης καὶ τῆς Τεχνικῆς.

Δέκα χρόνια πρὶν, κανεὶς δὲν μιλοῦσε περὶ Κβαντικῆς Ἡλεκτρονικῆς, γιατί ἀπλούστατα δὲν ὑπῆρχε. Γεννήθηκε κατὰ τὸ 1954 μὲ μία συσκευή, πὺ στηριζόταν μὲ τὸ ἓνα πόδι στὴν Κβαντικὴ Φυσικὴ καὶ μὲ τὸ ἄλλο στὴν Ἡλεκτρονικὴ. Μέσα σὲ λίγα χρόνια οἱ ἐφαρμογὲς εἶναι ἤδη πολλὲς καὶ προβλέπονται πολὺ περισσότερες σὲ ἄμεσο μέλλον. Ὁ κόσμος τοῦ ἔτους 2000 θὰ ὀφείλῃ ἀσφαλῶς κάτι ἀξιόλογο ἀπὸ τὴ μορφή του στὴν Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ.

Αὐτὸς ὁ νέος κλάδος εἶναι σήμερα ἓνας κρῖνος πὺ ἐνώνει σὲ κοινὴ προσπάθεια χιλιάδες ἐπιστήμονες ἀπὸ ὅλα τὰ Ἐθνη. Εἶναι ἓνας κοινὸς στίβος, ὅπου συναντᾶ κανεὶς ὀπτικούς, ἠλεκτρονικούς, τηλεπικοινωνιακούς, κρυσταλλογράφους, ἀστρονόμους, μετεωρολόγους, γεωφυσικούς. Τὸ ἐνδιαφέρον τοῦ ἐπιστημονικοῦ κόσμου ὑπῆρξε τὰ τελευταῖα χρόνια τόσο ἐκρηκτικὸ, ὥστε, ὅπως ἔλεγε ἓνας ἀπὸ τοὺς ἰδρυτὲς τοῦ νέου κλάδου, ἂν ὁ ρυθμὸς αὐτὸς κρατηθῇ μέχρι τοῦ 1980, ὅλοι οἱ κάτοικοι τοῦ πλανήτη μας θὰ πρέπει νὰ ἀσχολοῦνται μὲ τὴν Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ.

Ἀλλὰ στὴν πραγματικότητα, οἱ ἐκρήξεις δὲν διαρκοῦν πολὺ. Ἐνα μέρος ἀπὸ τὶς χιλιάδες ἐπιστημόνων, πρὸ παντὸς πολλοὶ νέοι πὺ γοητεύτηκαν περισσότερο ἀπὸ τὴ λάμψη τοῦ μοντέρνου παρὰ ἀπὸ τὴν ἀγάπη τοῦ θέματος, θὰ δοῦν

σὲ λίγο ὅτι καὶ ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ δὲν εἶναι παρὰ ἓνας κλάδος τῆς Ἐπιστήμης, ὅπως καὶ οἱ ἄλλοι. Καὶ πολλοὶ πὺ φαντάστηκαν ὅτι θὰ βροῦν στὴν Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ τὸ μαγικὸ κλειδί γιὰ νὰ λύσουν ὅλα τὰ προβλήματά τους, βέβαια θὰ ἀπογοητευθοῦν, γιατί πανάκεια δὲν ὑπάρχει.

Δὲν κάνομε τὶς ἐπιφυλάξεις αὐτὲς γιὰ νὰ μειώσωμε τὴ σημασία τοῦ νέου κλάδου. Θέλομε μόνο νὰ φυλαχτοῦμε ἀπὸ τὴν ὀραιοπάθεια καὶ τὶς ὑπερβολές. Κατὰ τᾶλλα, σκοπὸς ἀκριβῶς τοῦ ἄρθρου μας εἶναι νὰ δείξωμε πόσο ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ εἶναι ὀραία καὶ χρήσιμη. Ἴσως μάλιστα εἶναι κάτι περισσότερο. Ἴσως οἱ ἱστορικοὶ τὴν κατατάξουν ἀργότερα ἀνάμεσα σὲ τὶς μεγάλες κατακτήσεις τοῦ αἵωνα μας: σχετικότης, κωματικὴ μηχανικὴ, πυρηνικὴ φυσικὴ, φυσικὴ τοῦ στερεοῦ σώματος, κβαντικὴ ἠλεκτρονικὴ, ἔρευνα τοῦ διαστήματος.

**

Ἄς ἀρχίσωμε ὀμως ἀπὸ τὴν ἀρχή. Τὸ ἔτος γεννήσεως, 1954, εἶναι κάπως πλαστογραφημένο. Ὅπως συμβαίνει συχνὰ στὴν Ἐπιστήμη, τὸ σπέρμα εἶναι παληότερο. Ἦταν τὸ 1917 ὅταν ἓνα γερμανικὸ περιοδικὸ ἐδημοσίευσε μία θεωρητικὴ ἐργασία ἐνὸς καθηγητοῦ τῆς Φυσικῆς, πὺ ὀνομαζόταν Ἀλβέρτος Ἀϊνστάϊν. Ὅχι, δὲν ἐπρόκειτο γιὰ τὴ θεωρία τῆς Σχετικότητος, ἀλλὰ γιὰ ἓνα νέο φαινόμενο, τὴν ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως. Ὀλοκλήρη ἡ σημερινὴ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ δὲν εἶναι παρὰ ἐφαρμογὴ αὐτοῦ τοῦ φαινομένου. Μόνο πὺ τὸν καιρὸ ἐκεῖνο ἡ Ἡλεκτρονικὴ ἔκανε μὸλις τὰ πρῶτα τῆς βήματα καὶ κανεὶς, οὔτε ὁ Ἀϊνστάϊν, δὲν μπορούσε νὰ σκεφθῇ ὅτι ἡ ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως θὰ ἐνδιέφερε τὴν Ἡλεκτρονικὴ.

Ἡ ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως, τί εἶναι; Πρέπει προηγουμένως νὰ ὑπενθυμίσωμε ὀρισμένα πράγματα καὶ πρῶτα ἀπ' ὅλα τί θὰ πῆ ἀκτινοβολία. Ἡ ἀκτινοβολία εἶναι ἐνέργεια

(όπως π.χ. η θερμότης ή η κινητική ενέργεια), διακρίνεται όμως από τα άλλα είδη ενέργειας γιατί ώρισμένες ιδιότητές της είναι διαφορετικές. Χαρακτηριστικό της ακτινοβολίας είναι ότι διαδίδεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τόσο μέσα από υλικά σώματα όσο και μέσα από το κενό. 'Ακτινοβολία είναι π.χ. ή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που αποδεσμεύεται από ένα ραδιοφωνικό πομπό και διαδίδεται στο χώρο για να φθάση στο δέκτη. "Όταν ή διάδοση γίνεται στο κενό, ή ακτινοβολία διαδίδεται με την τεράστια ταχύτητα του φωτός (300.000 χιλιόμετρα ανά δευτερόλεπτο). Μέσα στα υλικά σώματα ή ταχύτητα διαδόσεως είναι μικρότερη.

"Αν ή ακτινοβολία παράγεται από την κεραία ενός πομπού, ή κεραία διαρρέεται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, το όποιον έχει μία συχνότητα. Συχνότητα θα πει πόσες φορές το ρεύμα της κεραίας αλλάζει κατεύθυνση μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, δηλαδή πόσες περιόδους ή «κύκλους» κάνει το ρεύμα μέσα σε ένα δευτερόλεπτο. Οί συχνότητες, που χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και στις τηλεπικοινωνίες, καταλαμβάνουν την περιοχή από ένα περίπου εκατομμύριο ως δεκάδες χιλιάδες εκατομμύρια κύκλους ανά δλ. (ήψηλή ως πάρα πολύ ήψηλή συχνότητα).

Τήν ίδια συχνότητα με τον πομπό, ή όπως λέμε γενικότερα με την πηγή, έχουν και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα της ακτινοβολίας. Αυτό θα πει ότι, σε ένα ώρισμένο σημείο του χώρου, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αυξομειώνεται τόσες φορές ανά δλ. όσες είναι ή συχνότητα της πηγής.

"Άλλος τρόπος για να χαρακτηρίσωμε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι να πάρωμε, σε μία ώρισμένη στιγμή, την απόσταση ανάμεσα σε δυο γειτονικές κορυφές τους, που την ονομάζωμε μήκος κύματος. Στη ραδιοφωνία και τις τηλεπικοινωνίες, τα μήκη κύματος εκτείνονται από χιλιόμετρα ως εκατοστά ή χιλιοστά (μακρά κύματα ως μακροκύματα). 'Ανάμεσα στη συχνότητα και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας υπάρχει άπλη σχέση αντιστρόφου αναλογίας. "Όσο ή συχνότητα είναι ήψηλότερη, τόσο το μήκος κύματος είναι βραχύτερο (πρέπει να διαιρούμε τον αριθμό 300.000.000 με τη συχνότητα σε κύκλους ανά δλ. για να εύρισκωμε το μήκος κύματος σε μέτρα).

Το φως δεν διαφέρει ουσιαστικά από την ραδιοηλεκτρική ακτινοβολία της ραδιοφωνίας. Δεν διαφέρει ουσιαστικά, έχει όμως συχνότητα πάρα πολύ ήψηλότερη σε τρόπο, ώστε πολλά φαινόμενα να εκδηλώνονται διαφορετικά. Οί συχνότητες του φωτός φθάνουν σε πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια εκατομμυρίων κύκλους ανά δλ. Το μήκος κύματος είναι αντιστοίχως βραχύ, μικρότερο από ένα μικρόν (εκατομμυριοστό του μέτρου).

'Η συχνότης του όρατου φωτός καθορίζει, μεταξύ άλλων, και το χρώμα του. Το όρατο φως περιορίζεται ανάμεσα στο έρυθρό και στο ιώδες. Το έρυθρό αντιστοιχεί σε μήκος κύ-

ματος περί τα 0,8 μικρόν, ενώ το ιώδες σε 0,4 μικρόν περίπου. Κάτω από το έρυθρό (πρός τα μεγαλύτερα μήκη κύματος) έχουμε την υπέρυθη ακτινοβολία, πάνω από το ιώδες (πρός τα μικρότερα μήκη κύματος) τοποθετείται ή υπεριώδης ακτινοβολία. Το υπέρυθρο και το υπεριώδες δεν διεγείρουν το μάτι μας και δεν αποτελούν όρατο φως.

"Όταν το φως (όρατο ή μη) προσπίπτει σε άτομα της ύλης, ή ακτινοβολία και ή ύλη αλληλεπιδρούν. Τα φαινόμενα της αλληλεπιδράσεως έχουν εξαιρετική σημασία για τη Φυσική. "Έτσι, είναι γνωστό από τις αρχές του αιώνα μας ότι ή ακτινοβολία μπορεί να απορροφάται από την ύλη σύμφωνα με ένα έντελώς καθορισμένο μηχανισμό. 'Ο μηχανισμός αυτός αφορά τόσο την ακτινοβολία, όσο και την ύλη.

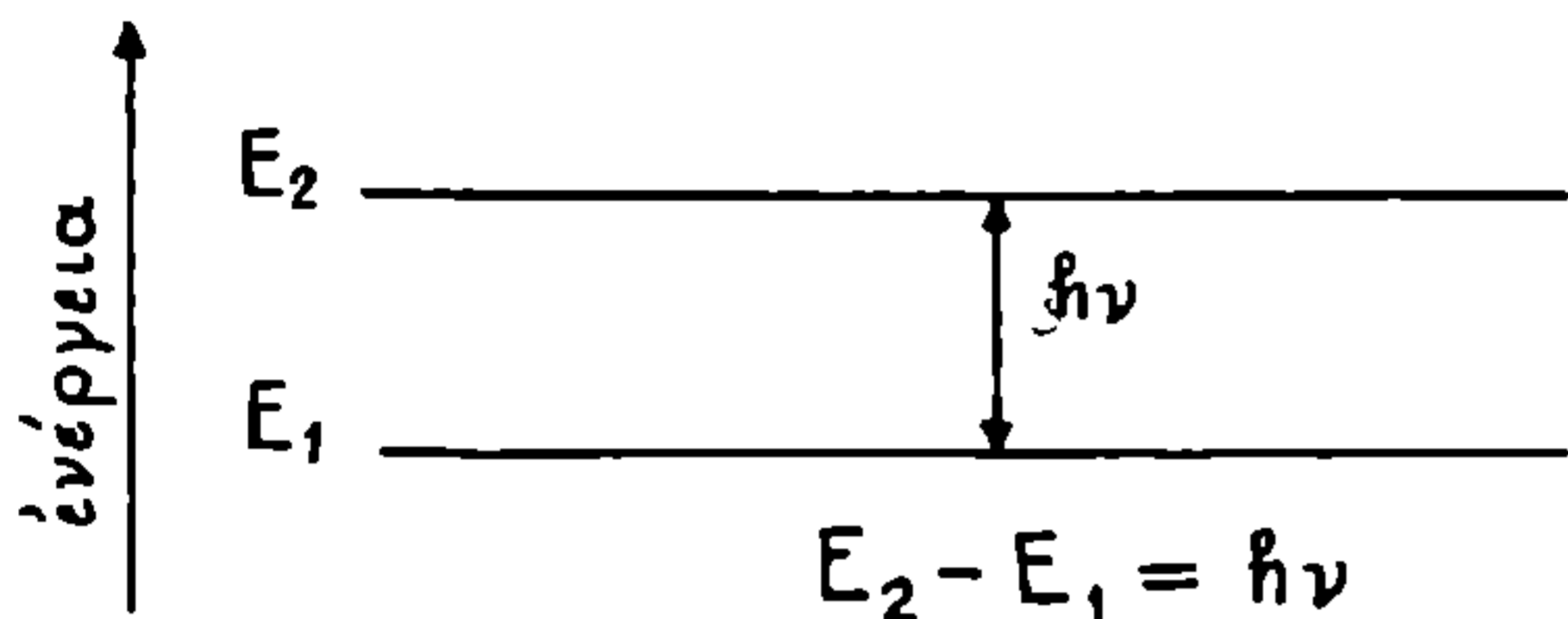
'Από την πλευρά της ακτινοβολίας, ή απορρόφηση ακτινοβολίας μιας ώρισμένης συχνότητος δεν γίνεται κατά όποιεσδήποτε ποσότητες, αλλά κατά κόκκους, κατά όλοκληρους μικρούς κόκκους ακτινοβολίας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. Το φωτόνιο μπορούμε να το φανταζώμαστε έξ ίσου καλά σαν ένα συγκεντρωμένο κόκκο ενέργειας, δηλαδή σαν ένα «σωμάτιο» που κινείται με την ταχύτητα του φωτός, όσο και σαν κύμα, που μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Γι' αυτό λέμε ότι το φωτόνιο είναι ένα σωματίο—κύμα.

'Η λέξη «κβάντο» είναι λατινική και σημαίνει ποσό, μερίδιο, τεμάχιο. 'Εδώ χρησιμοποιείται με την έννοια του μικρού αδιαίρετου κόκκου. "Αν συσσωρεύσωμε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό από κβάντα, θα σχηματίσωμε ακτινοβολία με ανάλογη ένταση. "Όταν, αντιστρόφως, υποδιαιρούμε ακτινοβολία μιας ώρισμένης συχνότητος σε διαρκώς και μικρότερα τεμάχια, θα φθάσωμε σε ένα έσχατο κόκκο, που είναι παραέρα αδιαίρετος και αποτελεί το φωτόνιο της ακτινοβολίας, στη θεωρουμένη συχνότητα. Αυτό θα πει ότι ή ακτινοβολία ώρισμένης συχνότητος έχει συνεχή συγκρότηση, δεν μπορεί δηλαδή να διαιρείται επ' άπειρον σε μικρότερα κομμάτια. 'Ασυνεχή συγκρότηση έχει και ή ύλη, όσο τουλάχιστον τη θεωρούμε ότι αποτελείται από αδιαίρετα άτομα.

Στην 'Ατομική Φυσική συναντάμε και άλλα μεγέθη που μεταβάλλονται κατά τρόπο ασυνεχή και τα λέμε κβαντικά ή κβαντωμένα. 'Από την πλευρά της ύλης, όταν ένα άτομο απορροφήση ένα φωτόνιο, ή ενέργεια του ατόμου αυξάνει, με άλλα λόγια το άτομο διεγείρεται. 'Η διεγερση μπορεί π.χ. να εκδηλωθή ως έξις: "Ένα ηλεκτρόνιο, που στρέφεται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου, πηδάει (μεταπίπτει) σε μία άλλη τροχιά μεγαλύτερας ακτίνας. 'Αλλά πρέπει ακριβώς να τονισθή ότι οί τροχιές των ηλεκτρονίων είναι κβαντωμένες, δηλαδή τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να περιφέρονται σε όποιεσδήποτε τροχιά, αλλά μόνο σε καθορισμέ-

ν ε ς τροχιές. Έπομένως, κάθε μ ε τ ά π τ ω σ η από μία τροχιά σέ άλλη γίνεται με π ή δ η μ α. Για να γίνει ακριβώς αυτό τὸ πηδῆμα χρειάζεται ἐνέργεια, πὸ τὴ δίνει τὸ ἀπορροφούμενο φωτόνιο. Ἔτσι τὸ ἄτομο διεγείρεται, περνᾷ δηλαδὴ σέ μία ὑψηλότερη ἐνεργειακὴ κατάσταση, ἢ ὅπως λέμε σέ μία ὑψηλότερη κβαντικὴ στάθμη ἐνεργείας.

Ἄς σημειώσωμε μὲ ν τὴν συχνότητα, πὸ ἀντιστοιχεῖ στὸ φωτόνιο. Τὸ φωτόνιο εἶναι ἕνας κόκκος ἀκτινοβολίας καὶ ἔχει μία ὠρισμένη ἐνέργεια, πὸ ἰσοῦται μὲ τὸ γινόμενο $h \cdot \nu$, ὅπου h ἡ περίφημη σταθερὰ τοῦ Πλάνκ. Ἀπὸ τὴν ἄλλη μεριά, τὸ ἄτομο ἀπορροφᾷ αὐτὸ τὸ φωτόνιο καὶ ἡ ἐνέργειά του αὐξάνει ἀπὸ μία τιμὴ E_1 σέ μία μεγαλύτερη τιμὴ E_2 . Ἡ διαφορὰ $E_2 - E_1$ ἰσοῦται ἀκριβῶς μὲ τὴν ἐνέργεια τοῦ φωτονίου $h\nu$. Καὶ ἔτσι φθάνομε στὴν βασικὴ κβαντικὴ σχέση $E_2 - E_1 = h\nu$.



Σχ. 1

Ἡ σχέση αὐτὴ τηρεῖται κάθε φορά, πὸ ἕνα ἄτομο ἢ ἕνα μόριο μεταπίπτει ἀπὸ μία κβαντικὴ ἐνεργειακὴ κατάσταση σέ ἄλλη (ἠλεκτρονικὰ πηδῆματα στὰ ἄτομα, μεταβολὲς στὴν κινητικὴ κατάσταση τῶν μορίων, ὁποιαδήποτε κβαντωμένη ἐνεργειακὴ μεταβολή).

Τὰ ἄτομα δὲν μένουν πολὺ στὴν κατάσταση διεγέρσεως. Μεταπίπτουν ἀπὸ μόνα τους, αὐθορμήτως, πρὸς τὶς κατώτερες ἐνεργειακὲς στάθμες. Μία τέτοια μετάπτωση τοῦ ἀτόμου σινοδεύεται ἀπὸ ἐκπομπὴ ἑνὸς φωτονίου, πάντοτε σύμφωνα μὲ τὸν προηγούμενο νόμο. Αὐτὴ εἶναι ἡ α ὕ θ ὁ ρ μ η τ η ἐ κ π ο μ π ἦ ἀκτινοβολίας. Δὲν προκαλεῖται ἀπὸ κανένα ἐξωτερικὸ αἶτιο, εἶναι ἕνα φαινόμενο πὸ γίνεται χωρὶς καμμία ἐξωτερικὴ ἐπέμβαση. Βασικὸ τοῦ χαρακτηριστικὸ εἶναι ὅτι γίνεται σ τ ἦ ν τ ὕ χ η καὶ δίνει φωτόνια πὸ διαδίδονται πρὸς ὅλες τὶς κατευθύνσεις τοῦ χώρου, χωρὶς συγκεκριμένο συσχετισμὸ στὸ χώρο καὶ στὸ χρόνο.

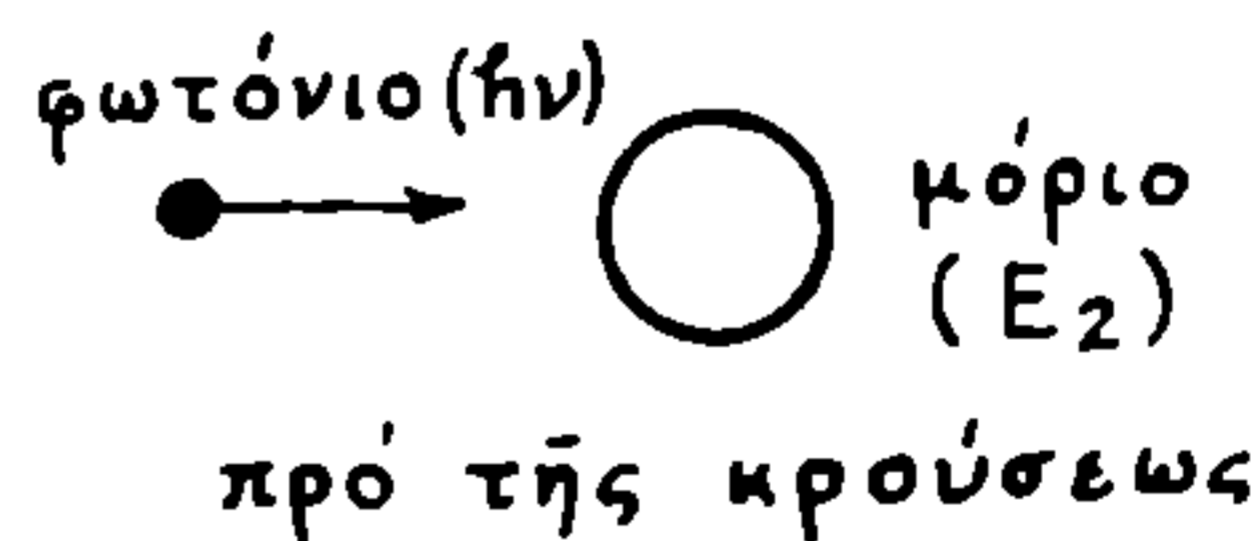
Τὸ ἄρθρο τοῦ 1917 μιλοῦσε γιὰ πρώτη φορά γιὰ ἕνα ἄλλο εἶδος ἐκπομπῆς. Ἔστω ὅτι ἕνα μόριο εὑρίσκεται σέ μία ὑψηλότερη κβαντικὴ ἐνεργειακὴ στάθμη E_2 καὶ μένει στὴν κατάσταση αὐτὴ γιὰ κάποιον διάστημα, χωρὶς νὰ μεταπίπτει ἀπὸ μόνο του στὴν κατώτερη στάθμη E_1 . Ἄν, κατὰ τὸ διάστημα αὐτό, τὸ μόριο κτυπηθῆ ἀπὸ ἕνα φωτόνιο, πὸ ἀντιστοιχεῖ στὴ μετάπτωση $E_2 - E_1$, ἡ κρούση μπορεῖ νὰ γίνῃ ἡ αἰτία γιὰ νὰ πραγματοποιηθῆ ἡ μετάπτωση ἀπὸ E_2 σέ E_1 . Τότε ὅμως τὸ ἄτομο ἐκπέμπει ἕνα νέο φωτόνιο, ἀκριβῶς ἴδιο μὲ τὸ ἀρχικὸ, πὸ ἔγινε ἡ αἰτία τῆς ἐκπομπῆς. Στὴν περίπτωση αὐτὴ, τὸ ἀρχικὸ φωτόνιο δρᾷ ἐπὶ τοῦ μορίου σὰν μία ἐξωτερικὴ ἐπίδραση (διέγερση), πὸ ἔχει ἐδῶ σὰν ἀποτέλεσμα ὄχι τὴν ἀ-

πορρόφηση, ἀλλὰ τὴν ἐκπομπὴ ἑνὸς νέου φωτονίου. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάστηκε ἐ κ π ο μ π ἦ ἐ κ δι ε γ έ ρ σ ε ω ς.

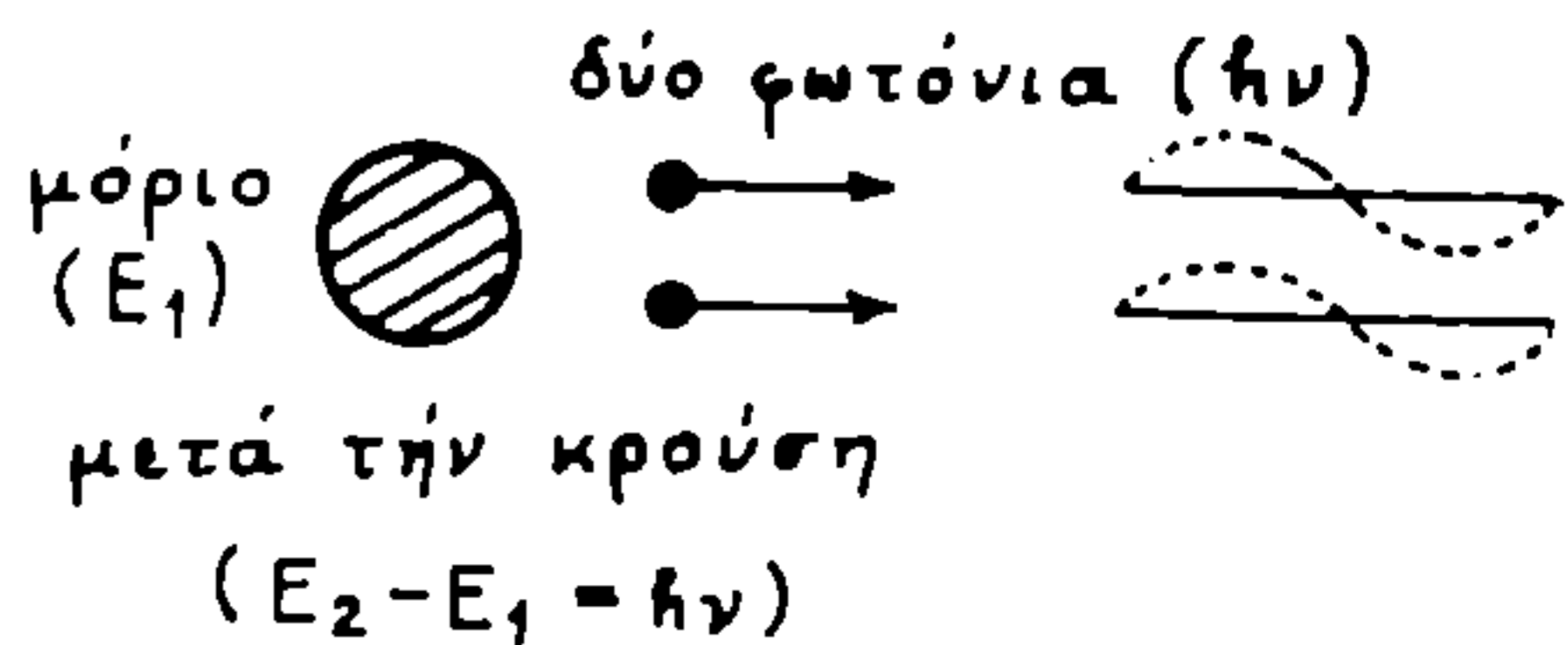
Ἔχει μεγάλη σημασία ὅτι τὸ νέο φωτόνιο εἶναι ἀ κ ρ ι β ὼ ς ἴ δ ι ο μ έ τ ὸ ἀ ρ χ ι κ ὸ. Ἄς τὸ δοῦμε αὐτὸ ἀπὸ τὴν ἀποψη τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἐνεργείας. Εἶδαμε ὅτι κάθε φωτόνιο εἶναι ἕνας κόκκος ἠλεκτρομαγνητικῆς ἐνεργείας. Ἡ ἐνέργεια αὐτὴ διαδίδεται κατὰ ἠλεκτρομαγνητικὰ κύματα, πὸ χαρακτηρίζονται ἀπὸ τὴν συχνότητα, τὸ πλάτος τὴν κ α τ ε ὕ θ υ ν σ η δ ι α δ ὴ σ ε ω ς καὶ τὴ φ ᾶ σ η τους. Ἡ σημασία τῆς φάσεως φαίνεται ὅταν ἔχομε συγχρόνως δύο (ἢ περισσότερα) κύματα. Λέμε ὅτι δύο κύματα ἔχουν τὴν ἴδια φάση ἢ ὅτι εὑρίσκονται σέ φάση, ὅταν περνοῦν ταυτοχρόνως ἀπὸ τὶς μέγιστες καὶ τὶς ἐλάχιστες τιμὲς τους. Τὸ γεγονός τώρα ὅτι δύο φωτόνια εἶναι ἀκριβῶς τὰ ἴδια, σημαίνει ὅτι τὰ ἀντίστοιχα ἠλεκτρομαγνητικὰ κύματα ἔχουν τὴν ἴδια συχνότητα, ἴσα πλάτη, διαδίδονται πρὸς τὴν ἴδια κατεύθυνση καὶ εὑρίσκονται σέ φάση.

Ἡ ταυτότητα κατευθύνσεως στὸ χώρο καὶ φάσεως στὸ χρόνο εἶναι βασικὰ χαρακτηριστικὰ τῆς ἐκπομπῆς ἐκ διεγέρσεως. Τὰ χαρακτηριστικὰ αὐτὰ τὰ ἐκφράζομε, λέγοντες ὅτι ἡ ἀκτινοβολία, πὸ παράγεται κατὰ τὴν ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως εἶναι σ ὺ μ φ ω ν ἦ ἀκτινοβολία (στὸ χώρο καὶ στὸ χρόνο). Ἀντίθετα, ἡ ἀκτινοβολία ἀπὸ αὐθόρμητη ἐκπομπὴ εἶναι ἀσύμφωνη (δὲν ὑπάρχει καθορισμένη σχέση κατευθύνσεως καὶ φάσεως). Οἱ συνήθεις φωτεινὲς πηγὲς δίδουν ἀσύμφωνη φωτεινὴ ἀκτινοβολία καὶ αὐτὸ εἶναι ἕνα βασικὸ τους μειονέκτημα.

Λογικὸ εἶναι τώρα νὰ ἀναρωτηθοῦμε: μήπως ἄραγε ἡ ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆ γιὰ νὰ κατασκευάσωμε πηγὲς, πὸ νὰ δίδουν σύμφωνη ἀκτινοβολία; Θὰ πρέ-



πρὸ τῆς κρούσεως



μετὰ τὴν κρούση

$$(E_2 - E_1 = h\nu)$$

Σχ. 2

λη γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτὸ νὰ διαθέτωμε ἕνα σῶμα, τοῦ ὁποίου πολλὰ μόρια, ἀσυνήθιστα πολλὰ, νὰ εὑρίσκονται σέ ὑψηλότερες κβαντικὲς ἐνεργειακὲς στάθμες. Ἄν τὰ μόρια αὐτὰ δὲν εἶναι ἀρκετὰ πλῆθος, δὲν γίνεται τίποτε, γιὰτὶ ναὶ μὲν θὰ ἔχομε κάποια ἐκπομπὴ ἐκ δι-

εγέρσεως, ή παραγομένη όμως ακτινοβολία θα απορροφάται από διάφορες αναπόφευκτες απώλειες του συστήματος και τελικά το σώμα δεν θα εκπέμπει.

Στή φύση δεν υπάρχουν σώματα, που να έχουν τόσα πολλά μόρια σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Η φύση προτιμά τις κατώτερες ενεργειακές στάθμες, που είναι σταθερότερες. Αν λοιπόν θέλωμε να φθάσωμε σε αποτέλεσμα, πρέπει να αντιστρέψωμε τεχνητά αυτή τη φυσική κατάσταση, πρέπει δηλαδή να αντιστρέψωμε την κατανομή, ή όπως λέμε τους κβαντικούς πληθυσμούς, των μορίων στις διάφορες ενεργειακές στάθμες. Την πράξη αυτή, με την οποία επιτυγχάνωμε την αντιστροφή των πληθυσμών, την ονομάζωμε *αντιστροφή*, δηλαδή ανέβασμα ενός αφύσικα μεγάλου ποσοστού μορίων σε κάποια υψηλότερη κβαντική στάθμη. Υπάρχουν σήμερα διάφοροι τρόποι για να επιτύχωμε την αντήληση. Γενικά όμως ή αντήληση είναι μία λεπτεπίλεπτη πράξη, που απαιτεί πολύ προσοχή.

Εστω λοιπόν ότι έχωμε ένα σώμα, που το λέμε ενεργό σώμα, στο οποίο κάνωμε κατάλληλη αντήληση, και έστω ότι το σώμα αυτό δέχεται λίγα φωτόνια με την κατάλληλη συχνότητα. Τέτοια αρχικά φωτόνια υπάρχουν πάντα, π.χ. από αυθόρμητη έκπομπή. Είναι τότε φανερό ότι θα λειτουργήση ο μηχανισμός της έκπομπής εκ διεγέρσεως και θα έχωμε μία αλυσωτή παραγωγή από αφθονα νέα φωτόνια, πανομοιότυπα με τα αρχικά. Αν τα φωτόνια είναι τόσο αφθονα, ώστε να υπερκαλύπτουν τις απώλειες του συστήματος, τότε το σώμα θα ακτινοβολή, όσο τουλάχιστο ή αντήληση συνεχίζεται. Το σώμα γίνεται ταλαντωτής, δηλαδή *πηγή*, που εκπέμπει σύμφωνη ακτινοβολία σε μία ώρισμένη συχνότητα.

Μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσωμε το σώμα και σαν *ένισχυτή*. Τα αρχικά φωτόνια, με την κατάλληλη συχνότητα, προέρχονται τότε από το προς ένισχυση σήμα. Η διάβαση αυτών των φωτονίων μέσα από το σώμα, που υπόκειται βέβαια πάντοτε σε κατάλληλη αντήληση, δίδει το ίδιο σήμα ένισχυμένο. Εννοείται ότι στο μεταξύ το σώμα δεν πρέπει να μετατρέπεται σε ταλαντωτή. Σ' αυτό βοηθούν ευτυχώς οι απώλειες του συστήματος, που έχουν όπως βλέπωμε και την καλή τους πλευρά.

Από όσα είπαμε ως εδώ, μπορούμε να συμπεράνωμε κάτω από ποιές συνθήκες είναι δυνατό να χρησιμοποιήσωμε την έκπομπή εκ διεγέρσεως για την παραγωγή ή την ένισχυση ακτινοβολίας ώρισμένης συχνότητας.

Πρώτον, πρέπει να βρωίμε κάποιο ενεργό σώμα, που να έχει τέτοιες κβαντικές στάθμες, ώστε να υπάρχουν ανάμεσά τους, ή να μπορούν να δημιουργηθούν, δύο τουλάχιστον στάθμες (E2 και E1) που ή διαφορά τους να αντιστοιχίη στην επιθυμητή συχνότητα ($E2 - E1 = h\nu$).

Δεύτερον, είναι απαραίτητη μία μέθοδος αντήλησεως, δηλαδή μία μέθοδος, που να προκαλή αντιστροφή των πληθυσμών στις στάθμες ενεργείας και να φέρη διαρκώς στην υψηλότε-

ρη κβαντική στάθμη ένα σχετικά μεγάλο ποσοστό μορίων ή ατόμων.

Τρίτον, είναι επίσης απαραίτητο να μπορούμε να συγκεντρώσωμε την παραγομένη ακτινοβολία μέσα σε κατάλληλο χώρο και να την οδηγήσωμε προς την κατεύθυνση, που θέλωμε. Το ενεργό σώμα πρέπει λοιπόν να μπορεί να τοποθετηθή μέσα σε ένα είδος κατάλληλου «*αντηχείου*».

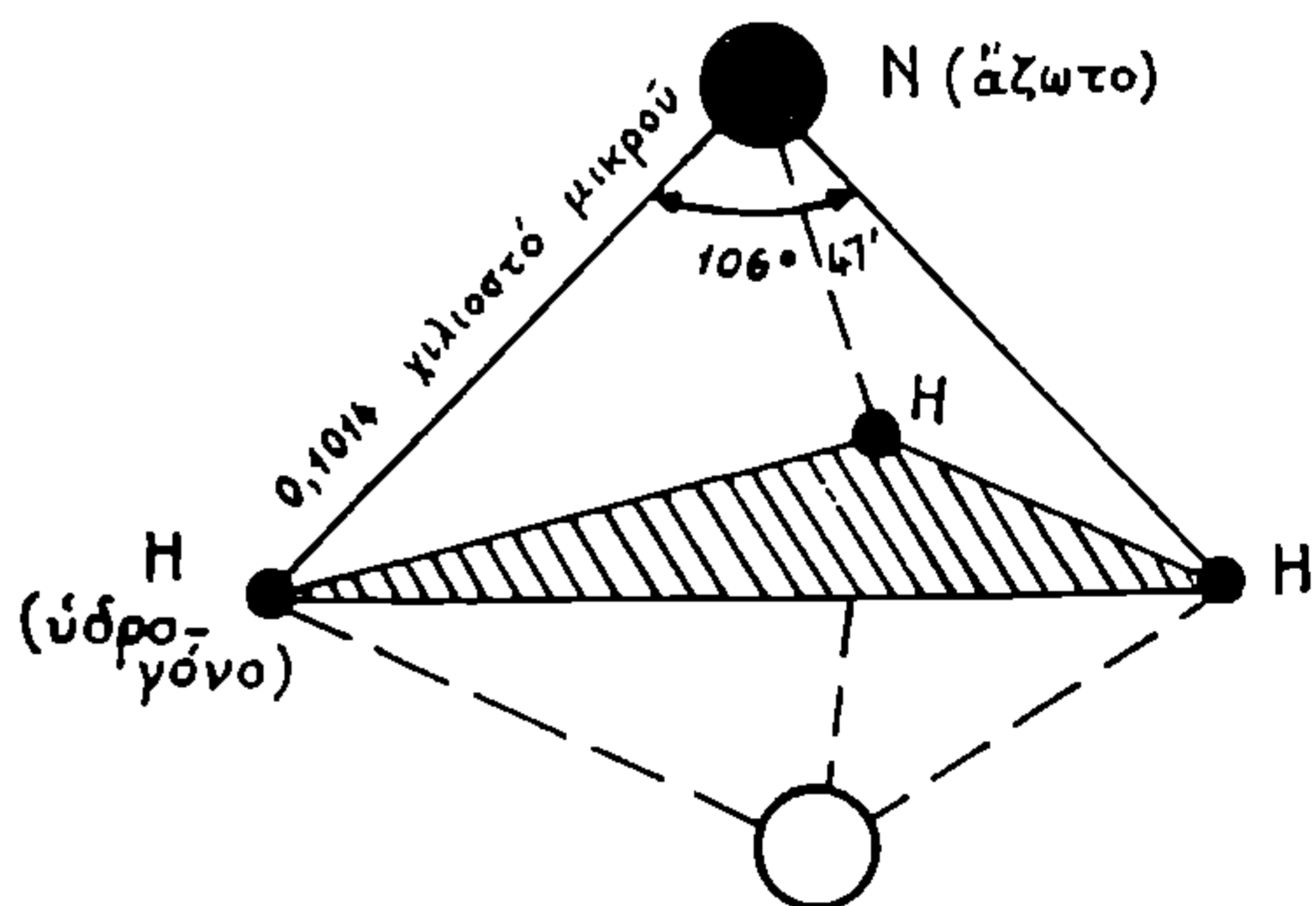
Όταν εξασφαλίσωμε τις συνθήκες αυτές, θα έχωμε κατασκευάσει μία συσκευή, που θα μετατρέπη ένα μέρος από την ενέργεια αντήλησεως σε ακτινοβολία. Το κέρδος θα είναι ότι ή αντήληση θα καταναλώνη ενέργεια μās κάποιας συνηθισμένης μορφής, που την προμηθευόμαστε σχετικά εύκολα, ενώ ή συσκευή θα παράγη ακτινοβολία με πολύτιμες ιδιότητες.

Χρειάστηκαν 37 χρόνια, από την ανακάλυψη της έκπομπής εκ διεγέρσεως, για να γίνη για πρώτη φορά δυνατή, το 1954, ή συνένωση όλων αυτών των συνθηκών σε μία πειραματική διάταξη. Έτσι κατασκευάστηκε ο πρώτος *κβαντικός ταλαντωτής*, από τον άμερικανό Τάουνς. Λειτουργήσε με άτμους άμμωνίας, στην περιοχή των εκατοστομετρικών κυμάτων (μικροκυμάτων) και ονομάστηκε MAZEP (MAZEP—MOLECULAR AMPLIFIER BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION δηλαδή μοριακός ένισχυτής με έκπομπή ακτινοβολίας εκ διεγέρσεως). Εκτοτε ή εξέλιξις υπήρξε κεραυνοβόλος.

*

**

Η πρώτη ιδέα για την εφαρμογή της έκπομπής εκ διεγέρσεως σε παραγωγή και ένισχυση ταλαντώσεων φαίνεται να διατυπώθηκε το 1952 από τους σοβιετικούς Μπασώφ και Προχόρφ και από τον άμερικανό Βέμπερ. Δύο χρόνια αργότερα ο Τάουνς παρουσίαζε τον πρώτο *Μάζερ* με άτμους άμμωνίας σε

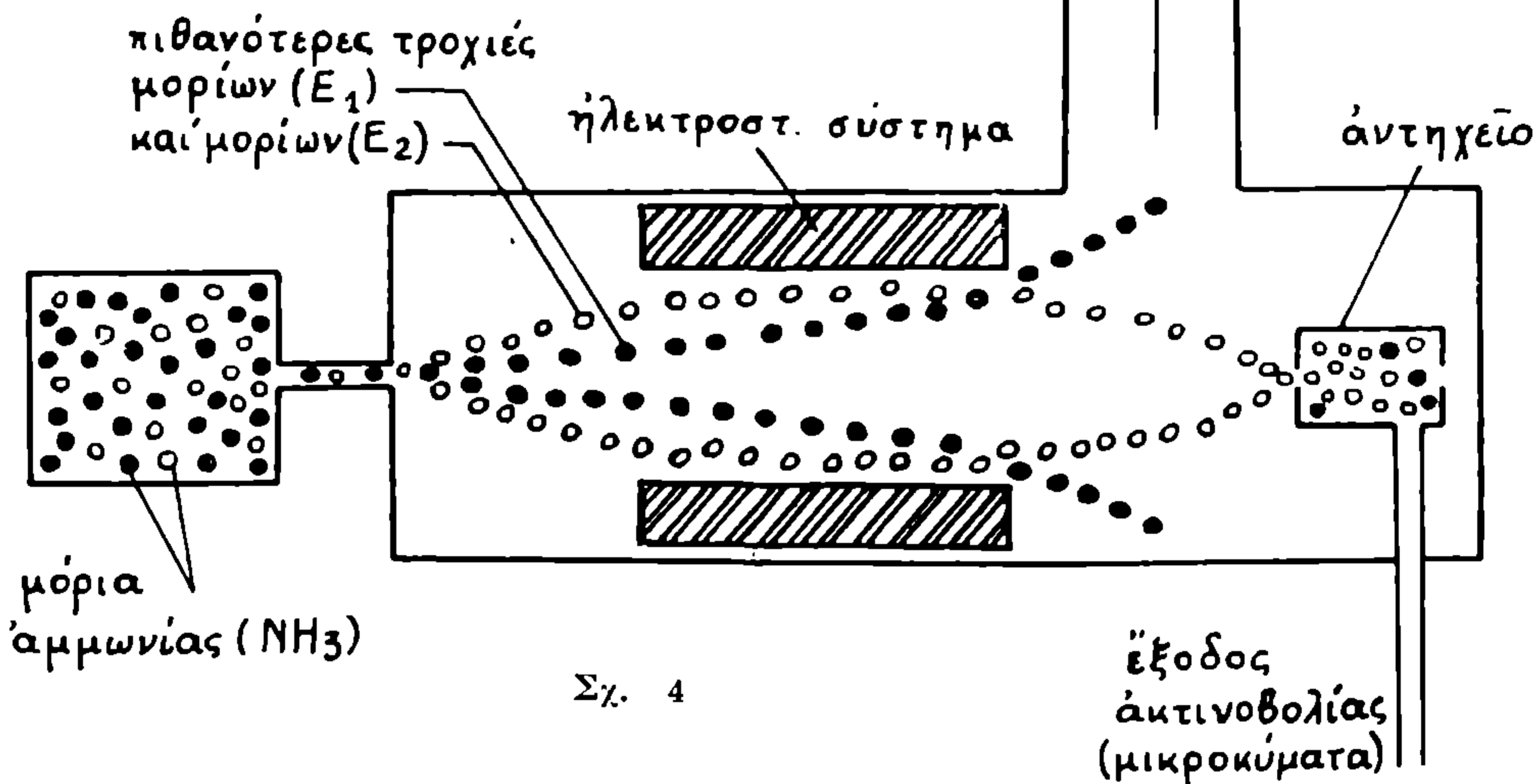


Σχ. 3

χαμηλή πίεση. Η συσκευή λειτουργεί ως εξής: Το μόριο της άμμωνίας αποτελείται από τρία άτομα υδρογόνου και ένα άτομο άζωτου. Τα τέσσαρα αυτά άτομα αποτελούν τις κορυφές μās πυραμίδος, το άτομο όμως του άζωτου μπορεί να εύρισκεται προς τη μία ή προς την άλλη πλευρά του επιπέδου των υδρογόνων (αναστροφή του μορίου). Οι δύο αυτοί μορια-

κοί σχηματισμοί αντιστοιχούν σε διάφορες κβαντικές στάθμες ενέργειας, τις μὲν ὑψηλότερες ἀπὸ τις δέ. Τὰ μόρια, πὸν εὐρίσκονται σὲ μία ὑψηλότερη στάθμη ἐπιλέγονται μὲ τὴ βοήθεια ἑνὸς ἠλεκτροστατικού πεδίου (ἀντληση) καὶ ὀδηγοῦνται μέσα σὲ ἕνα ἠλεκτρομαγνητικό ἀντηχείο. Τὸ ἀντηχείο δέχεται ἔτσι ἕνα μεγάλο ποσοστὸ ἀπὸ μόρια στὴν ὑψηλότερη στάθμη ἐνεργείας (ἀντιστροφή πληθυσμῶν) καὶ ἔχομε παραγωγή ταλαντώσεων μὲ ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως. Οἱ ἀποστάσεις ἀνάμεσα στὶς διάφορες στάθμες ἐνεργείας εἶναι τέτοιες, ὥστε ἡ παραγομένη ἀκτινοβολία νὰ ἔχη μῆκος κύματος τῆς τάξεως τοῦ ἑκατοστοῦ (μικροκύματα). Τὸ ἀντηχείο, ἔξ ἄλλου, ἔχει κατάλληλες διαστάσεις, ὥστε νὰ εἶναι συντονισμένο στὸ μῆκος κύματος τῆς ἀκτινοβολίας, πὸν θέλομε νὰ παράγομε.

Ἐνας τέτοιος κβαντικὸς ταλαντωτὴς μὲ αἰμοῦς ἀμμωνίας παρουσιάζει ἐξαιρετικὴ στα-



Σχ. 4

θερότητα ὡς πρὸς τὴ συχνότητα καὶ δίνει καθαρὴ ἀρμονικὴ ταλάντωση μὲ ἐλάχιστη παραμόρφωση. Ἡ ἴδια ὅμως συσκευή δὲν λειτουργεῖ ἔξ ἴσου καλὰ ὡς ἐνισχυτὴς (ἡ ζώνη συντονισμοῦ εἶναι πολὺ στενὴ).

Πολὺ καλύτεροι ἐνισχυτὲς μικροκυμάτων τυπου Μάξερ κατεσκευάσθησαν ἀπὸ τὸ 1957 καὶ ἔπειτα, μὲ βάση τὶς ἐργασίες τοῦ ἀμερικανοῦ Μπλόμπερκεν κ.ἄ. Οἱ αἰμοὶ ἀμμωνίας ἀντικαθίστανται ἐδῶ μὲ ἕνα στερεὸ σῶμα, π.χ. κρύσταλλο ἀπὸ ρουμπίνι. Τὸ ὄργανο χρησιμοποιεῖ τρεῖς κβαντικὲς στάθμες ἐνεργείας καὶ ἡ λειτουργία του εἶναι κάπως πιο πολὺπλοκη. Οἱ τρεῖς στάθμες ἐνεργείας E_1 , E_2 , E_3 δημιουργοῦνται, τοποθετώντας τὸν κρύσταλλο μέσα στὸ πεδίο ἑνὸς ἠλεκτρομαγνητοῦ (φαινόμενο Γσέεμαν). Μὲ τὴ βοήθεια μιᾶς καταλλήλου μεθόδου ἀντλήσεως, ἐξασφαλίζομε τὴν ἀνύψωση ἀπὸ τὴν στάθμη E_1 στὴν στάθμη E_3 , χρησιμοποιοῦμε δὲ τὴν μετάπτωση E_2-E_1 , πὸν ἀντιστοιχεῖ σὲ μία ἀπὸ τὶς συχνότητες συντονισμοῦ τοῦ ἀντηχείου. Τέλος, τὸ ἀντηχείο μὲ τὸν κρύσταλλο βυθίζονται μέσα σὲ ἕνα δο-

χεῖο ψύξεως (πὸν περιέχει π.χ. ὑγρὸ ἄζωτο ἢ ὑγρὸ ἥλιο).

Χάρη στὴν ἰσχυρὴ ψύξη, ἡ θερμοκίνηση τῶν μορίων τοῦ κρύσταλλου μειώνεται ἐξαιρετικά. Αὐτὸ ἔχει ἕνα πολὺ ἀξιόλογο τεχνικὸ ἀποτέλεσμα. Γιὰ νὰ τὸ καταλάβωμε, ἄς θυμηθοῦμε τί γίνεται ὅταν ἀνοίγωμε τὴν ἔνταση ἑνὸς ραδιοφώνου στὸ μέγιστο, προσπαθώντας νὰ ἀκούσωμε ἕνα ἀσθενὴ μακρινὸ σταθμὸ. Ἄναι γιὰ τὸ σταθμὸ, ἀκούομε μᾶλλον ἕνα θόρυβο, πὸν λέγεται θόρυβος βάθους. Ὁ θόρυβος αὐτὸς ὀφείλεται κατὰ πολὺ στὴν ἀτακτὴ θερμοκίνηση τῶν ἠλεκτρονίων μέσα στὶς ἠλεκτρονικὲς λυχνίες, τὶς ἀντιστάσεις κλπ. Ἀλλά, σὲ μία κβαντικὴ συσκευή, ὅπου

ἡ ἀκτινοβολία παράγεται ἢ ἐνισχύεται ἀπ' εὐθείας ἀπὸ τὰ ἄτομα καὶ τὰ μόρια, μποροῦμε νὰ ψύξωμε ἰσχυρὰ τὸ ἀκτινοβολοῦν σῶμα καὶ νὰ ἀποφύγωμε σχεδὸν ἐντελῶς τὸ θόρυβο. Τὸ γεγονός αὐτὸ ἔχει πολὺ μεγάλη ἀξία καὶ ἀποτελεῖ τὸ βασικότερο λόγο, γιὰ τὸν ὁποῖο οἱ Μάξερ γίνονται τόσο πολὺτιμοι στὶς τηλεπικοινωνίες, στὴ ραδιοαστρονομία, κλπ. Ἐνας Μάξερ μπορεῖ νὰ παίρνη ἀσθενέστατα μακρινὰ σήματα, ἀκριβῶς γιὰ τὴν ἔχει ἐξαιρετικὰ μικρὸ θόρυβο βάθους. Ἡ ψύξη κοστίζει βέβαια ἀκριβὰ, τὸ πλεονέκτημα ὅμως τοῦ χαμηλοῦ θορύβου εἶναι θεμελιώδες.

Ἐπάρχουν διάφορα ἄλλα εἶδη Μάξερ, πὸν χρησιμοποιοῦν καὶ ἄλλες οὐσίες σὰν ἐνεργὰ σῶματα. Ἡ κατασκευὴ τους ἔχει σήμερα βιομηχανοποιηθῆ καὶ ἡ ἀγορὰ προσφέρει τέτοιες συσκευὲς μικροκυμάτων στὴν τιμὴ π.χ. τῶν 1000 δολλαρίων.

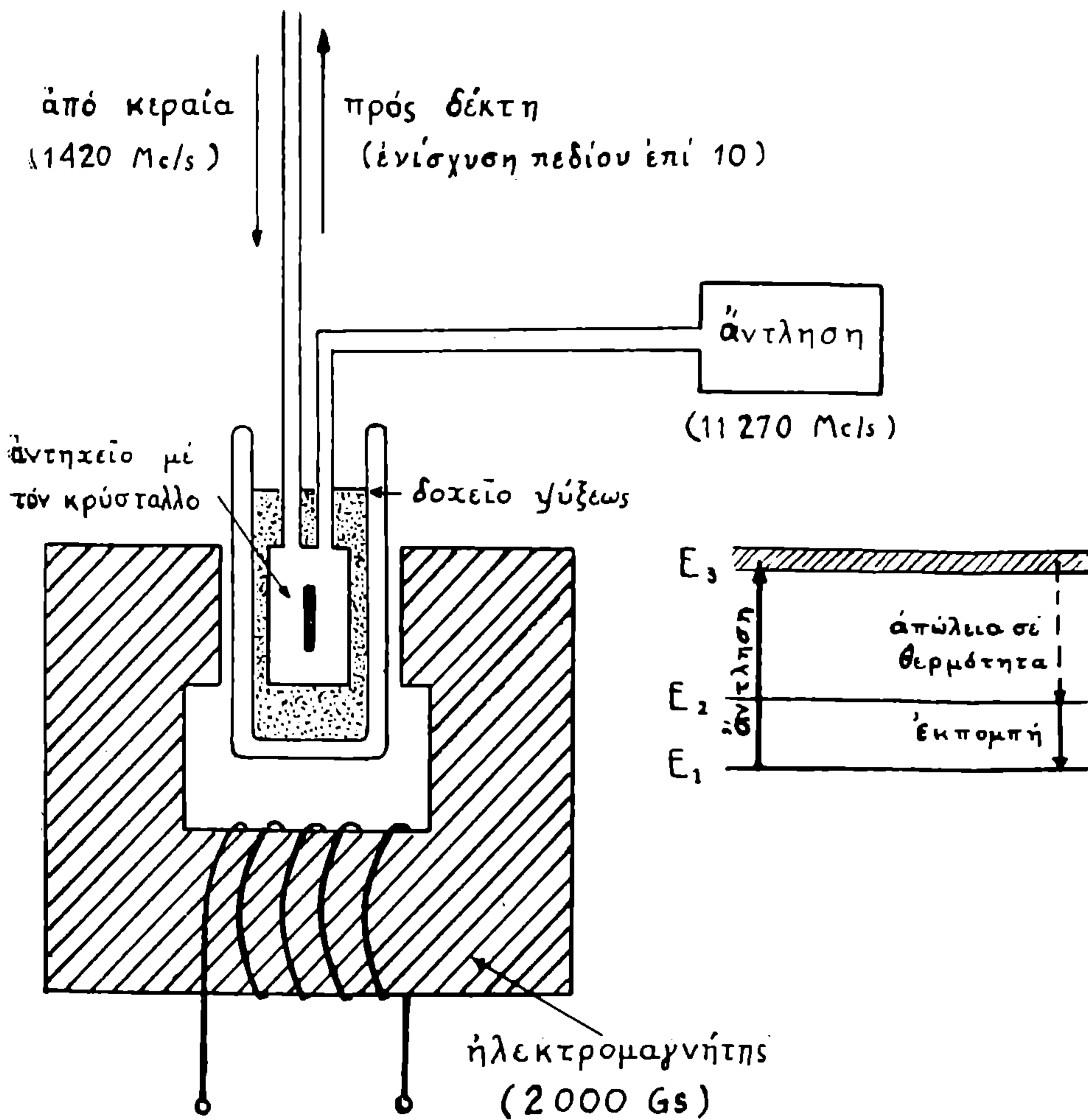
Ἐκτὸς ἀπὸ τὶς ἐφαρμογὲς στὶς τηλεπικοινωνίες (κυρίως στὶς τηλεπικοινωνίες τοῦ διαστήματος) καὶ στὴ ραδιοαστρονομία, θὰ μπορούσε νὰ ἀναφέρη κανεὶς πολλὰ ἄλλα. Π.χ. ἕνας

Μάζερ, που η συχνότης του εξαρτάται από ένα μαγνητικό πεδίο, μπορεί προφανώς να χρησιμοποιηθῆ για τὴν μέτρηση αὐτοῦ τοῦ πεδίου. Ἔτσι, κατασκευάζονται σήμερα μ α γ ν η τ ὀ μ ε τ ρ α με Μάζερ, που ἡ ἀκρίβεια καὶ ἡ εὐαισθησία τους εἶναι πάρα πολὺ ὑψηλές (ἀκρίβεια ἑκατομμυριοστοῦ τοῦ γκάους).

Ἄλλο παράδειγμα εἶναι τὰ ἀ τ ο μ ι κ ἄ ὠ ρ ο λ ὄ γ ι α. Πραγματικά, εἶπαμε ὅτι ἡ

ὤνες. Τὸ καλύτερο μέχρι σήμερα ἐνεργὸ σῶμα γιὰ Μάζερ ὠρολογίου εἶναι τὸ ἀέριο ὑδρογόνο σὲ ἀτομικὴ κατάσταση.

Μπορεῖ εὐκολὰ νὰ φαντασθῆ κανεῖς πολλές ἄλλες ἐφαρμογές στὴν περιοχὴ τῆς Μετρολογίας. Ὑπάρχουν ἐπίσης πολλές δυνατότητες γιὰ διάφορες ἄλλες περιοχές τῆς τεχνικῆς, τῆς επιστήμης καὶ τῆς ἐρευνας, ἀπὸ τίς ὁποῖες ὠρισμένες ἔχουν ἤδη καταλήξει σὲ πραγματο-



Σχ. 5

ἀκτινοβολία ἐνὸς Μάζερ ἔχει πολὺ σταθερὴ συχνότητα. Ἀπὸ τὴν ἄλλη μεριά, ὅλοι ξέρομε ὅτι ἓνα ἐναλλασσόμενο ρεῖμα, με μιὰ ὠρισμένη συχνότητα, σὰν αὐτὸ τοῦ δικτύου τῆς πόλεως, μπορεῖ νὰ θέσῃ σὲ κίνηση ἓνα ὠρολόιο. Φυσικά, ἡ συχνότητα τοῦ Μάζερ εἶναι πολὺ ὑψηλότερη ἀπὸ αὐτὴ τοῦ δικτύου. Αὐτὸ ὅμως δὲν ἔχει βασικὴ σημασία. Ἐκεῖνο ποὺ ἔχει σημασία, ἀπὸ τὴν ἀποψη τῆς ἀκρίβειας, εἶναι ἡ σταθερότης τῆς συχνότητος. Τὸ ὠρολόιο θὰ εἶναι τόσο πιὸ ἀκριβές, ὅσο ἡ συχνότης εἶναι σταθερότερη. Κατεσκευάσθησαν ἔτσι ὠρολόγια με Μάζερ (ἀτομικὰ ὠρολόγια) με σφάλμα ἐνὸς δευτερολέπτου ἀνὰ μερικὸς αἰ-

λοήσεις καὶ ἄλλες ἀντιμετωπίζονται γιὰ τὸ ἀμεσον μέλλον.

**

Ἦστερα ἀπὸ τὴν πραγματοποίησιν τοῦ Μάζερ, τὸ πιὸ ἐπαναστατικὸ γεγονός στὴν Κβαντικὴ Ἠλεκτρονικὴ ἦταν ἡ ἀνακάλυψις τοῦ ὀπτικοῦ Μάζερ ἢ Λ ἄ ζ ε ρ (LASER = LIGHT APPARATUS BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION, δηλαδὴ συσκευή φωτός, με ἐκπομπὴ ἀκτινοβολίας ἐκ διεγέρσεως). Ἀνηγγέλθη τὸ 1960 ἀπὸ τοὺς ἀμερικανοὺς Ζάβαν καὶ Μάϊμαν. Πρόκειται γιὰ μιὰ νέα πηγὴ

φωτός (όρατοῦ ἢ υπέρυθρου), πού βασικό της χαρακτηριστικό είναι ὅτι ἐκπέμπει σύμφωνη ἀκτινοβολία.

Οἱ ὀπτικοὶ ζήλευαν τοὺς ραδιοηλεκτρολόγους, γιατί μπορούσαν νὰ παράγουν σύμφωνη ἀκτινοβολία, ὅπως αὐτὴ πού ἐκπέμπει μία κεραία ραδιοφωνικοῦ σταθμοῦ. Οἱ δικές τους πηγές, οἱ φωτεινές πηγές, ἦταν κατ' ἀρχὴν ἀσύμφωνες καὶ χρειαζόταν πολὺς κόπος γιὰ νὰ δώσουν στὸ φῶς, μὲ εἰδικές πειραματικές διατάξεις, κάποιο σημαντικό βαθμὸ συμφωνίας, ὅταν τοῦτο ἦταν ἀπαραίτητο. Τώρα οἱ ὀπτικοὶ ἔχουν πιά ἐτοιμὴ τὴ σύμφωνη πηγὴ τους, τὸν Λάζερ. Τὸ γεγονός αὐτὸ θὰ ἀνανεώσῃ ἀσφαλῶς ἓνα μεγάλο μέρος τῆς Ὀπτικῆς.

Οἱ ραδιοηλεκτρολόγοι, ἀπὸ τὴν πλευρὰ τους, εἰρρίσκουν ἀσφαλῶς κάποιες δυσκολίες νὰ παρακολουθήσουν μία τέτοια ἀπότομη προέκταση τοῦ κλάδου τῆς στὴν Κβαντικὴ Φυσικὴ καὶ στὴν Ὀπτικὴ. Ἀπὸ καιρὸ βέβαια χρησιμοποιοῦσαν ὠρισμένες κβαντικές γνώσεις καὶ ἐπανελάμβαναν συχνά. Ἴσως καὶ μὲ κάποια διάθεση ὑποτιμήσεως, ὅτι τὸ φῶς δὲν εἶναι τίποτε ἄλλο ἀπὸ ἠλεκτρομαγνητικὴ ἀκτινοβολία. Ὅλα αὐτὰ ὅμως δὲν ἔμπαιναν καὶ πολὺ στὴν οὐσιαστικὴ δουλειὰ τους, ἔμεναν μᾶλλον σὰν πολυτέλεια. Καὶ νὰ πού τώρα ὁ ραδιοηλεκτρολόγος πρέπει νὰ γίνῃ στὰ σοβαρὰ καὶ κβαντικὸς καὶ ὀπτικός, ὡς ἓνα βαθμὸ τουλάχιστο. Παρ' ὅλη του ὅμως τὴν ἀρχικὴ δυσκολία νὰ ἀναγνωρίσῃ στὸ Λάζερ τὰ γνωστὰ του ἠλεκτρονικὰ κυκλώματα, φαίνεται νὰ προσαρμόζεται γρήγορα, βοηθούμενος ἀσφαλῶς καὶ ἀπὸ τίς στέρρες γνώσεις του στὴν τεχνικὴ τῶν μικροκυμάτων.

Ἔτσι, δύο εἰδικότητες τόσο γειτονικές στὴν οὐσία, πού ζοῦσαν ὡστόσο χωρισμένες ἐδῶ καὶ πολλὲς δεκαετίες, συναντῶνται σήμερα στὸν ἴδιο στίβο τοῦ Λάζερ. Ἀλλὰ ἡ ἔνωση αὐτὴ δὲν ἔγινε στὴν πραγματικότητα καὶ τόσο ἀπότομα. Εἶναι μερικὲς δεκαετίες τώρα πού οἱ ραδιοηλεκτρολόγοι κάνουν φασματοσκοπία καὶ ἡ φασματοσκοπία ἦταν πάντα μία κυρία ἀπασχόληση τῶν ὀπτικῶν. Συνέβαινε μάλιστα οἱ μὲν ραδιοηλεκτρολόγοι νὰ κατεβαίνουν πρὸς ὄλο καὶ μικρότερα μήκη κύματος, μέχρι τὰ χιλιοστομετρικά, ἐνῶ οἱ ὀπτικοὶ ἀνέβαιναν διαρκῶς πρὸς τὰ μεγαλύτερα μήκη κύματος τοῦ υπέρυθρου, ὡς μερικὲς δεκάδες μικρά. Ἀλλὰ τὸ πρᾶγμα ἔμενε ὡς ἐκεῖ, ὡσὸτου τὸ χαντάκι πού ἀπέμενε τείνει τώρα νὰ γεφυρωθῇ μὲ τοὺς Λάζερ.

Ἡ λειτουργία τοῦ Λάζερ βασίζεται στὶς ἴδιες ἀρχές μὲ αὐτὲς πού εἶδαμε γιὰ τὸ Μάζερ. Ἐπειδὴ ὅμως τώρα οἱ ὀπτικὲς συχνότητες εἶναι πολὺ ὑψηλότερες, ὑπάρχουν καὶ σημαντικὲς διαφορές.

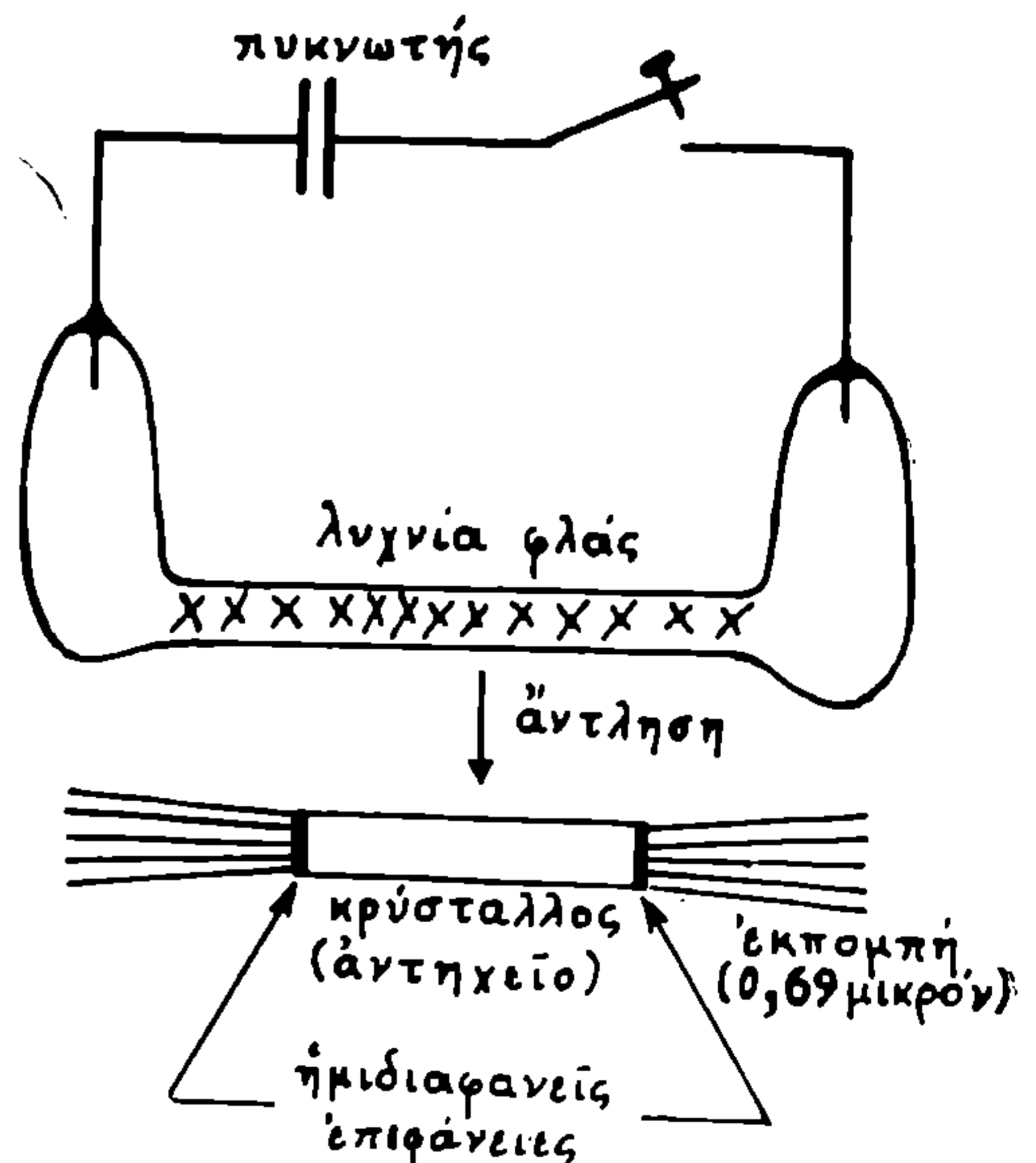
Ἡ σημαντικώτερη, διαφορὰ εὐρίσκεται στὴ συγκρότηση τοῦ ἀντηχείου. Τὰ ὀπτικὰ μήκη κύματος εἶναι τόσο μικρά, ὥστε εἶναι πιά ἀδύνατο νὰ χρησιμοποιήσωμε μὲ τὸν ἴδιο τρόπο, ὅπως στὸν Μάζερ, ἓνα ἠλεκτρομαγνητικὸ ἀντηχείο. Οἱ ὀπτικοὶ ὅμως ἐγγώριζαν εὐτυχῶς ἀπὸ καιρὸ ἓνα ἄλλο εἶδος ἀντηχείου, γνωστὸ ἀπὸ τὸ 1897 σὰν συμβολόμετρο τῶν Περὼ—Φαμπρύ. Ἔτσι, στὴν περίπτωση ἐνὸς Λάζερ μὲ κρύσταλλο (ρουμπίνι), τὸ ἀντηχείο παίρνει τὴ μορφή μιᾶς ράβδου ἀπὸ τὸν κρύσταλλο αὐτό,

τῆς ὁποίας δύο ἀπέναντι ὕψεις ἔχουν ἐλαφρῶς ἐλαργυρωθῇ, ὥστε νὰ εἶναι ἡμιδιαφανεῖς. Χάρη στὶς πολλαπλὲς ἀνακλάσεις, δημιουργεῖται μέσα στὸν κρύσταλλο ἓνας πολὺ μεγάλος ἀριθμὸς στασίμων κυμάτων καὶ τὸ ἀντηχείο συντονίζει σὲ μία πάρα πολὺ ὑψηλὴ τάξη. Συγχρόνως, ἓνα μέρος τῆς ἀκτινοβολίας μπορεῖ νὰ ἀποδοθῇ στὸ περιβάλλον, μέσα ἀπὸ τὰ ἡμιδιαφανῆ τοιχώματα.

Τὸ τελευταῖο αὐτὸ εἶναι ἀξιόλογο, γιατί θὰ ἦταν ἀλλοιῶς ἀδύνατο νὰ ὀδηγήσωμε τὴν ἀκτινοβολία πρὸς τὰ ἔξω μὲ κυματοδηγούς, ὅπως στοὺς Μάζερ (τέτοιοι κυματοδηγοὶ θὰ ἔπρεπε ἐδῶ, ἐξ αἰτίας τοῦ πολὺ μικροῦ μήκους κύματος τοῦ φωτός, νὰ ἔχουν ἀπίθανα μικρὲς διαστάσεις). Καὶ ὄχι μόνο λύνεται τὸ πρόβλημα αὐτό, ἀλλὰ, ἐπὶ πλέον, ἡ ἀκτινοβολία ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν κρύσταλλο τοῦ Λάζερ μὲ τὴ μορφή μιᾶς λεπτῆς καὶ σχεδὸν τελείως παράλληλης δέσμης, πρᾶγμα πού εὐνοεῖ μία ἐξαιρετικὴ συγκέντρωση ἐνεργείας.

Μία ἄλλη διαφορὰ ἀναφέρεται στὴ μέθοδο τῆς ἀντλήσεως. Ἀπαιτεῖται ἐδῶ μία ὀπτικὴ ἀντλήση. Ἡ ἀρχὴ τῆς ὀπτικῆς ἀντλήσεως ὀφείλεται στὸ Γάλλο Καστλέρ καὶ εἶναι γνωστὴ ἀπὸ τὸ 1950. Ἐπρεπε ὅμως νὰ λυθοῦν διάφορα προβλήματα, ὡσὸτου εὐρεθῶν πρακτικὲς μέθοδοι, πού νὰ ἐξασφαλίζουν μία ἀρκετὰ δραστηρικὴ ὀπτικὴ ἀντλήση.

Ἔτσι κατασκευάστηκαν οἱ πρῶτοι Λάζερ μὲ κρύσταλλο ἀπὸ ρουμπίνι, πού παράγουν κόκκινο φῶς μὲ μήκος κύματος γύρω στὰ 0,69



Σχ. 6

τοῦ μικροῦ. Χρησιμοποιώντας διάφορα ἄλλα ἐνεργὰ σώματα (ἀμορφα ἢ κρυσταλλικά) μὲ κατάλληλες προσμίξεις, μπορούμε νὰ παράγωμε ἀκτινοβολία μὲ μήκη κύματος στὶς περιοχὲς τοῦ ἐρυθροῦ καὶ τοῦ γειτονικοῦ υπέρυθρου φωτός (ἀπὸ 0,69 ὅς 2,6 μικρά). Ἡ ἀντλήση γίνεται μὲ τὴ βοήθεια μιᾶς λυχνίας φλᾶς (δηλαδή ἐνὸς σωλήνα ἠλεκτρικῆς ἐκκενώσεως),

πού στέλνει στο ενεργό σώμα ισχυρό φως και πραγματοποιεί την αντιστροφή των πληθυσμών.

Ένας τέτοιος Λάξερ λειτουργεί συνήθως κατά παλμούς με διάρκεια κάθε παλμού γύρω στο εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου και με ρυθμό επαναλήψεως περί τις χίλιες φορές ανά δευτερόλεπτο. Οί παλμοί της λυχνίας αντίληψης είναι διαφορετικοί και έχουν ισχύ μίας δεκάδος κιλοβάττ. Η ισχύς του παραγομένου παλμού φωτός ανέρχεται σε χιλιάδες κιλοβάττ. Επί πλέον, αυτή ή εξαιρετική μεγάλη ισχύς εϋρίσκεται συγκεντρωμένη σε μία παράλληλη δέσμη με διατομή μικρότερη από ένα τετραγωνικό εκατοστό. Μπορούμε μάλιστα, με τη βοήθεια ενός φακού, να επιτύχουμε συγκέντρωση σε μία κηλίδα με διάμετρο λίγα μικρά. Η πυκνότης ισχύος στην κηλίδα γίνεται πιά τεράστια, μετράται σε εκατομμύρια εκατομμυρίων κιλοβάττ ανά τετραγωνικό εκατοστό. Και εάν να μὴν εϋφθαναν όλα αυτά, το παραγόμενο φως έχει μία πολύ καλά καθορισμένη συχνότητα, είναι δηλαδή κατά πολύ μονοχρωματικό και σύμφωνο φως. Μόνο οί Ήλιοι του διαστήματος μπορούν να δώσουν στην επιφάνεια τέτοιες πυκνότητες ενεργείας σε τόσο στενή ζώνη συχνότητας.

Για να καταλάβουμε καλύτερα αυτούς τους αστρονομικούς αριθμούς, θα αναφέρουμε τὰ εξής παραδείγματα:

Η δέσμη φωτός του Λάξερ μπορεί να συγκεντρωθῆ πάνω σε μία λάμπα ξυρίσματος και να θερμάνῃ τὸ μέταλλο τόσο πολύ, ὥστε να τὸ λιώσῃ. Σάν πρακτικὴ ἐφαρμογὴ ἀντιμετωπίζεται ἡ κατασκευὴ συσκευῆς με Λάξερ, πὸν θὰ κἀνῃ σιγκόλλησῃ μετάλλων σημείο πρὸς σημείο.

Άλλο ἀποτέλεσμα εἶναι ἡ καταστροφὴ κυττάρων σε ζωντανούς οργανισμούς. Η ισχύς τῆς δέσμης εἶναι ἀσφαλῶς ὑπεραρκετὴ γιὰ νὰ προκαλέσῃ ἐγκαίματα ὑψηλοῦ βαθμοῦ και νὰ ξεσκίση τις σάρκες. Χάρη μάλιστα στην ἐξαιρετικὴ λεπτότητα τῆς δέσμης, ὁ Λάξερ μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆ στή χειρουργικὴ σάν ἓνα νυστέρι με καταπληκτικὴ ἀκρίβεια. Δὲν πρέπει ὅμως νὰ τὸ παρακάνουμε, συγκρίνοντας τὴ δέσμη τοῦ Λάξερ με τὴν «ἀκτῖνα τοῦ θανάτου».

Η ἀκτινοβολία τοῦ Λάξερ παρουσιάζει και ἓνα ἄλλο ἐνδιαφέρον χαρακτηριστικὸ. Η πυκνότης τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας ἀντιστοιχεῖ σε ὑψίσυχο ἠλεκτρικὸ πεδίο, πὸν ἡ ἔντασή του ανέρχεται σε δεκάδες εκατομμυρίων βόλτ ανά μέτρο. Εἶναι ἡ πρώτη φορά, πὰν παράγονται στο ἐργαστήριό τόσο ισχυρὰ ὑψίσυχα πεδία και οί ἐφαρμογές στην ἐπιστημονικὴ ἔρευνα ἀσφαλῶς δὲν θὰ λείψουν.

Θεαματικὴ εἶναι ἡ χρησιμοποίησι τοῦ Λάξερ σάν Ραντάρ γιὰ τὴν ἐντόπισῃ μακρινῶν ἀντικειμένων και τὴ μέτρησι ἀποστάσεων. Πραγματικὰ, οί παλμοί ἐνὸς Λάξερ μοιάζουν με τοὺς παλμούς τοῦ Ραντάρ και ἡ νέα συσκευὴ μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆ κατὰ τὸν ἴδιο τρόπο, ἂν και με μερικὲς δυσκολίες (ἡ δέσμη εἶναι πολὺ λεπτὴ γιὰ νὰ ἐπιτύχῃ εϋκόλα τὸ ἀντικείμενο, ἡ ἀτμόσφαιρα ἀπορροφᾷ πολὺ τὸ

φως και προκαλεῖ διακυμάνσεις στην ταχύτητα διαδόσεως, ἡ λήψῃ γίνεται συχνὰ δύσκολη, γιὰ τὸ σῆμα πὸν ἐπιστρέφει στο δέκτη, ὕστερα ἀπὸ ἀνάκλαση ἐπὶ τοῦ ἀντικειμένου, εἶναι πολὺ ἀσθενές). Οί δυσκολίες αὐτὲς δὲν ἐμπόδισαν ὅμως νὰ κατασκευασθοῦν ἤδη τηλεμετρα Λάξερ γιὰ μικρὲς ἀποστάσεις. Οὔτε ἐμπόδισαν τὰ πειράματα, πὸν ἄρχισαν ἀπὸ τὸ 1962, ὁπότε ἡ Σελήνη «φωτίσθηκε» ἀπ' εϋθείας ἀπὸ τὴ Γῆ με μίαν πηγὴ Λάξερ. Πιστεύεται μάλιστα ὅτι τὰ πειράματα αὐτά, πὸν συνεχίζονται, θὰ δώσουν ἓναν ἀκριβέστερο τοπογραφικὸ χάρτη τῆς Σελήνης.

Δὲν θὰ συνεχίσουμε τὴν ἀπαρίθμησι τῶν ἐφαρμογῶν πρὸς διάφορες ἄλλες κατευθύνσεις (μετρολογία, ἠλεκτρομαγνητισμός, ἐπιστημονικὴ ἔρευνα) γιὰ νὰ συμπληρώσουμε κάπως ὅσα εἶπαμε γι' αὐτοὺς τοὺς ἴδιους τοὺς Λάξερ.

Οί Λάξερ με στερεὸ σώμα ὑπέστησαν ἤδη διάφορες τελειοποιήσεις. Η λειτουργία τους κατὰ συνεχῆ τρόπο, ὄχι κατὰ παλμούς, εἶναι δυνατὴ. Γενικῶς ὅμως ὁ βαθμὸς ἀποδόσεως παραμένει μικρὸς (μικρότερος ἀπὸ ἓνα ἐπὶ τοῖς ἑκατὸ) και πρὸ παντὸς τὸ παραγόμενο φως δὲν εἶναι ἀρκετὰ σύμφωνο.

Μεγάλῃ πρόοδο, κυρίως πρὸς τὴ συμφωνία τοῦ παραγομένου φωτός, ἐσημείωσαν οί Λάξερ με ἀέριο. Η ἀρχὴ μένει πάντοτε ἡ ἴδια, τὸ ενεργὸν ὅμως σώμα εἶναι π.χ. μίγμα ἀερίων νέου και ἡλίου, με μερικὲς πιέσεις περὶ τὸ 1 χιλιοστὸ και τὸ 0,1 χιλιοστοῦ στήλης ὑδραργύρου ἀντιστοίχως. Τὸ ἀέριο μίγμα γεμίζει τὸ χῶρο τοῦ ἀντηχείου. Η ἀντήσῃ γίνεται με ἠλεκτρικὴ ἐκκένωσι μέσα σε αὐτὸ τὸ ἴδιο τὸ ἀέριο μίγμα, ὁ μηχανισμὸς ὅμως τῆς ἐκκενώσεως εἶναι τώρα πὸ πολύπλοκος και δὲν θὰ τὸν περιγράψουμε ἐδῶ.

Οί Λάξερ με διάφορα ἀέρια μίγματα ἔχουν συνεχῆ λειτουργία και δίδουν ἐρυθρὸ και ὑπερυθρο φως (με μῆκη κύματος στην περιοχὴ ἀπὸ 0,63 ὡς 13 μικρά). Η συμφωνία τοῦ παραγομένου φωτός εἶναι πολὺ καλὴ και ὁ βαθμὸς ἀποδόσεως κάπως βελτιωμένος. Σὲ ἀντιστάθμισμα, ἡ ισχύς ἐξόδου δὲν ὑπερβαίνει τὸ 1 βάττ. Οί συσκευὲς αὐτὲς θὰ βροῦν ἀσφαλῶς πολλὲς ἐφαρμογές στην Μετρολογία, στην ἐργαστηριακὴ ἔρευνα και ἄλλοῦ, χάρη κυρίως στο γεγονός ὅτι ἡ παραγομένη ἀκτινοβολία ἔχει συχνότητα ἐξαιρετικὰ «καθαρή» (εἶναι σε ὑψηλὸ βαθμὸ μονοχρωματικὴ). Η κατασκευὴ τῶν Λάξερ με ἀέριο ἔχει σήμερα βιομηχανοποιηθῆ.

Υπάρχουν ἀκόμα και οί Λάξερ με ἡμιαγωγό. Οί ἡμιαγωγοί εἶναι γνωστοί ἀπὸ τις ἐφαρμογές τους στα τρανζίστορ (ἡ στίς κρυσταλλολυχνίες, ὅπως τις λέμε). Τὸ ενεργὸ σώμα εἶναι ἓνα κατάλληλο εἶδος τρανζίστορ (ἐπαφὴ ρ—η) και ἡ ἀντήσῃ γίνεται με παλμούς ρεύματος μεγάλης ἐντάσεως (χιλιάδες ἀμπέρ ανά τετραγωνικὸ εκατοστό). Ὁ μηχανισμὸς τῆς ἐκπομπῆς, πὸν εἶναι βέβαια και πάλι μίαν ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως, εἶναι λίγο δύσκολο νὰ ἐξηγηθῆ ἐδῶ (ἡ ἐκπομπὴ ὀφείλεται σε ἐπανασυνδέσεις ἠλεκτρονίων και ὀπῶν στην περιοχὴ τῆς ἐπαφῆς ρ—η, ἡ δὲ ἐ-

ποφή χρησιμοποιείται ως «κιματοδηγός» της παραγομένης ακτινοβολίας).

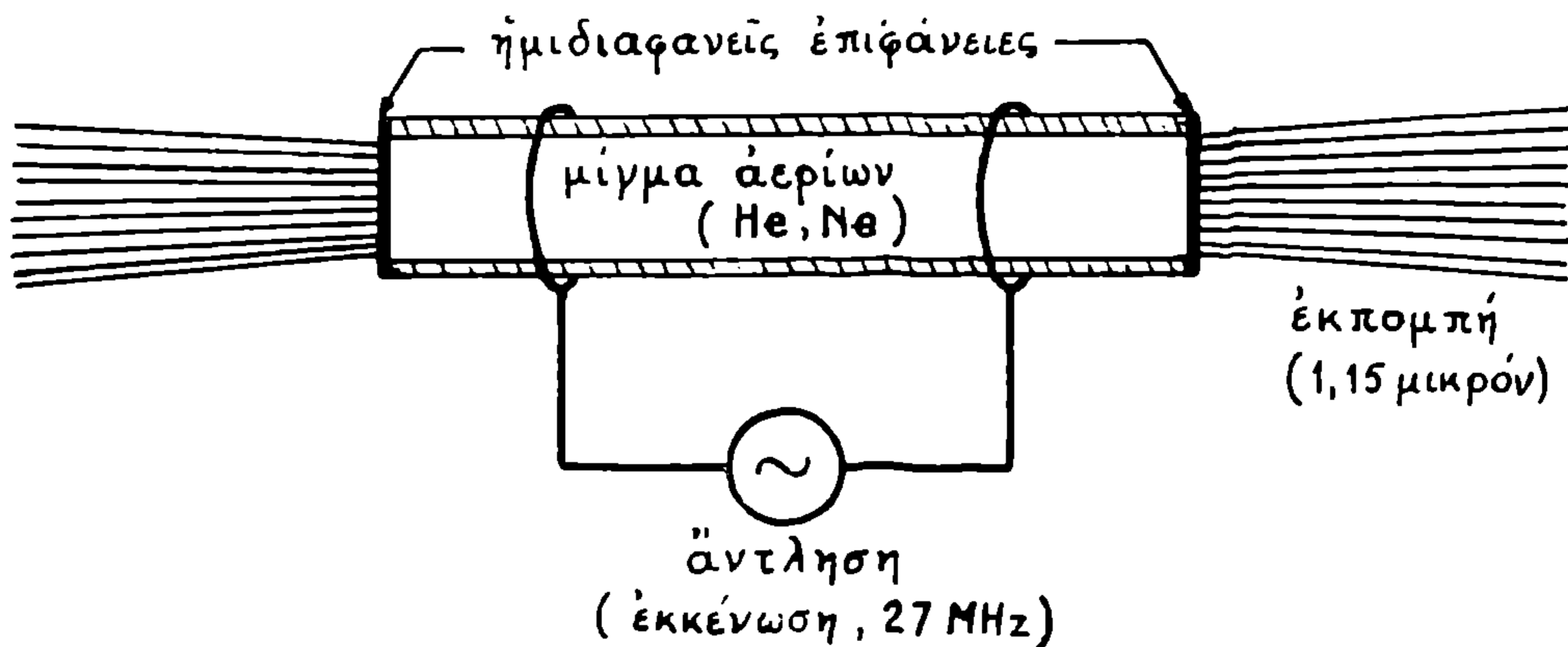
Ο πρώτος Λάζερ με ήμισυαγωγό (από άρσενικοϋχο γάλλιο) ελειτουργήσε κατά το 1963 και έδωσε έρυθρό φώς (με μήκος κύματος 6,84 του μικρού). Γενικώς, ή συμφωνία του φωτός, που παράγεται από τέτοιες συσκευές, δέν είναι ικανοποιητική. Έχουν όμως ένα ζηλευτό βαθμό αποδόσεως, που δέν απέχει πολύ από τα 100οο, μπορούν δέ να λειτουργούν στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Παρ' όλο ότι οι σχετικές έρευνες εύρισκονται ακόμη υπό εξέλιξη, οι νέες αυτές πηγές έχουν ήδη προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον σαν όργανα μετασηματισμού ήλεκτρικής ενεργείας σε όρατο φώς με μεγάλο βαθμό αποδόσεως.

**

Θά ήθέλαμε, πριν τελειώσωμε, να επανέλθωμε σε δύο περιοχές εφαρμογών της Κβαντικής

νά προκαλή εύκολα διακοπή για το μεγαλύτερο μέρος των όπτικων συχνότητων. Πρέπει λοιπόν να αναζητηθούν τα κατάλληλα λιγυστά «παράθυρα» της ατμοσφαιρας, μέσα από τα όποια οι αντίστοιχες συχνότητες θά μπορούσαν να περάσουν με τη λιγότερη δυνατή απορρόφηση.

Έπειτα έρχεται το ζήτημα της συγκροτήσεως ενός πλήρους πομπού. Είναι αλήθεια ότι διαθέτομε την βασική πηγή, τον Λάζερ. Σε συνέχεια όμως χρειάζεται ενίσχυση και ή πραγματοποίηση ικανοποιητικών όπτικων ενισχυτών θά απαιτήση ακόμη αρκετές έρευνες. Χρειάζεται επίσης διαμόρφωση (δηλαδή «άποτύπωση» του ωφελίμου σήματος στη δέσμη, που θά το μεταφέρει) και τα μέσα που διαθέτομε μέχρι σήμερα δέν είναι καθόλου περίφημα, κυρίως γιατί απαιτούν σημαντική ισχύ διαμορφώσεως (κύτταρα Κέρρ για διαμόρφωση πλάτους, μη γραμμικοί κρύσταλλοι για διαμόρφωση φάσεως).



Σχ. 7

Ηλεκτρονικής: τις τηλεπικοινωνίες και τη φασματοσκοπία.

Οι τηλεπικοινωνίες έχουν ένα πολύ γνωστό τεχνικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Οι πολύ ύψηλές συχνότητες παρουσιάζουν το πλεονέκτημα να έχουν μεγάλη χωρητικότητα πληροφορίας (μετάδοση πολλών σημάτων με μία μόνη έκπομπή). Οι όπτικές συχνότητες, ειδικότερα ώθηούν το πλεονέκτημα αυτό σε άπιστευτο βαθμό (π.χ. ένα εκατομμύριο τηλεφωνικές συνδέσεις ή χίλιες συνδέσεις τηλεοράσεως ανά όπτική δέσμη). Έπί πλέον, ή δέσμη ενός Λάζερ έχει όξύτατη κατευθυντικότητα, πράγμα που, μεταξύ άλλων, την αναδεικνύει σαν το καλύτερο μέχρι σήμερα μέσο μυστικών συνδέσεων μεταξύ ενός πομπού και ενός μοναδικού δέκτη, χωρίς πιά να είναι πρακτικώς δυνατή ή λήψη από άλλους αδιάκριτους δέκτες.

Είναι λοιπόν φανερό ότι οι Λάζερ άνοίγουν νέους πλατείς όρίζοντες στις τηλεπικοινωνίες της αύριον. Λέμε της αύριον, γιατί το ζήτημα προσκορούει ακόμη σε πολλές δυσκολίες, μερικώς από τις όποιες είναι οι έξης.

Η απορρόφηση της όπτικής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα είναι τόσο ισχυρή, ώστε

Τέλος, είναι ό δέκτης. Όλες οι λειτουργίες του πρέπει να εξετασθούν σε νέα βάση και πολλές προσπάθειες εύρισκονται υπό εξέλιξη. Τα υπάρχοντα μέσα επιτρέπουν κάποια ενίσχυση (με παραμετρικούς ενισχυτές) και πρό παντός επιτρέπουν κάποια φώωση, δηλαδή την απελευθέρωση του ωφελίμου σήματος από την δέσμη μεταφοράς (με τη βοήθεια φωτοκυττάρων). Η λειτουργία όμως της αλλαγής συχνότητας θά απαιτήση πολλές ακόμη εργασίες (ώσόντου αξιοποιηθούν καλύτερα οι δυνατότητες των μη γραμμικών στοιχείων).

Έτσι, ναί μέν είναι σήμερα στοιχειωδώς δυνατή κάποια όπτική τηλεπικοινωνιακή σύνδεση, πραγματικές όμως όπτικές τηλεπικοινωνίες δέν μπορεί να έχουμε πριν από μερικά χρόνια. Οι σχετικές έρευνες διεξάγονται με μεγάλη ένταση και ζέση, πράγμα άλλωστε που χαρακτηρίζει γενικώτερα την σημερινή κατάσταση της Κβαντικής Ηλεκτρονικής, προς αυτή και προς πολλές άλλες κατευθύνσεις.

Ακριβώς, μία άλλη κατεύθυνση είναι και ή φασματοσκοπία, που συγκεντρώνει ένα μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον. Η φασματοσκοπία είχε ανάγκη από την πιο μεγάλη ποιότητα πηγών ήλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

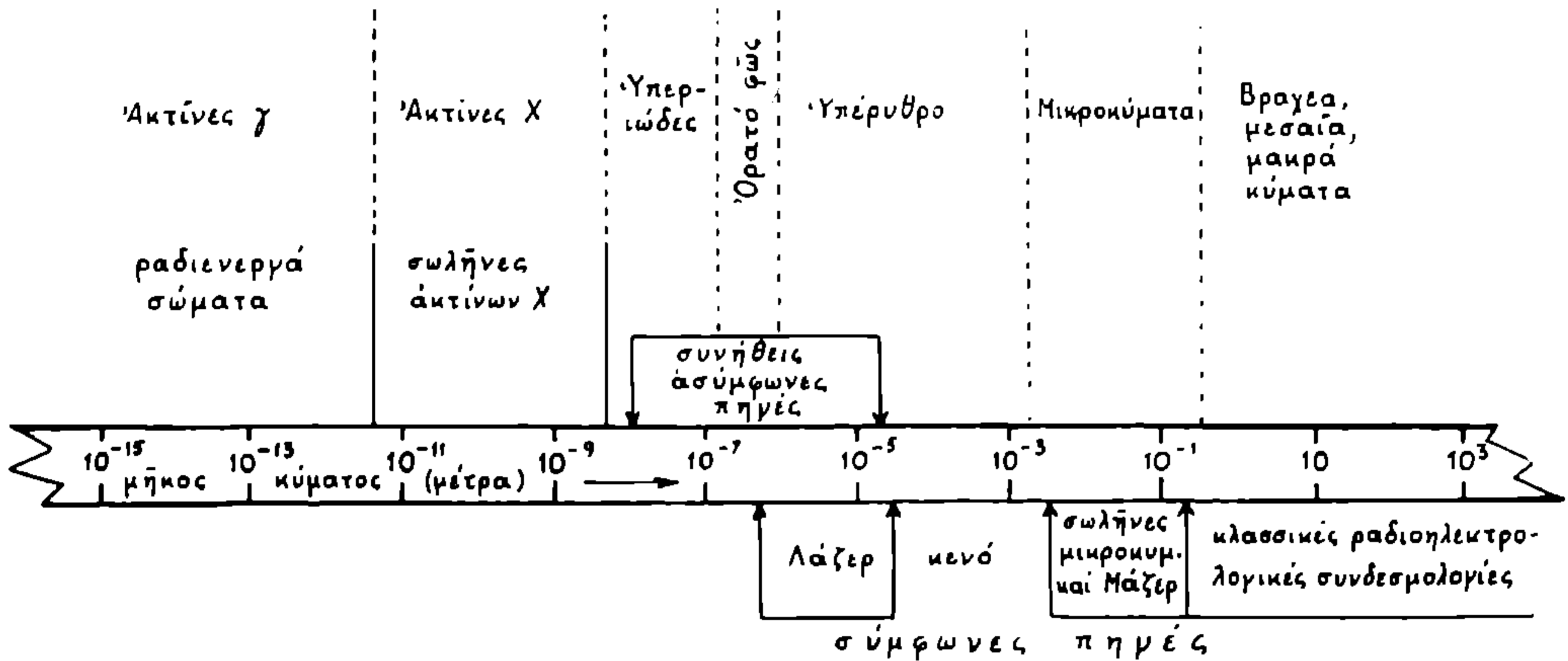
ας. Τὸ ἰδανικὸ τῆς εἶναι νὰ διαθέτῃ κατάλλη-
 λες πηγὲς γιὰ ὅλα τὰ μήκη κύματος, ἀπὸ τὴν
 ἀκτινοβολία γάμμα μέχρι τὰ μικρὰ κύματα τῆς
 ραδιοφωνίας. Τὸ σύνολο αὐτῶν τῶν συχνοτή-
 των συγκροτεῖ αὐτὸ πού λέμε ἡ λ ε κ τ ρ ο -
 μ α γ ν η τ ι κ ὸ φ ᾶ σ μ α καὶ ἀντικείμε-
 νο τῆς φασματοσκοπίας εἶναι νὰ μελετᾷ τὴ
 συμπεριφορὰ τῆς ὕλης ὡς πρὸς τὶς διάφορες
 ἀκτινοβολίες τοῦ ἐκτεταμένου αὐτοῦ φάσμα-
 τος. Καταλαβαίνομε λοιπὸν ὅτι κάθε κενὴ πε-
 ριοχὴ τοῦ φάσματος, γιὰ τὴν ὁποία δηλαδὴ
 δὲν ὑπάρχουν διαθέσιμες πηγές, ἀποτελεῖ καὶ
 ἕναν ἀκρωτηριασμὸ τῆς φασματοσκοπίας.

Δυστυχῶς ὅμως, παρὰ τὶς τόσες προόδους
 ποὺ εἶχαν γίνει στὸ μεταξὺ τὸ ἠλεκτρομαγνη-

Ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ προσφέρει ἔτσι
 μία ὑπηρεσία βασικῆς σημασίας στὴν Ἐπιστή-
 μη καὶ συμβάλλει σὲ ἕνα πλήθος νέων ἐπιστη-
 μονικῶν ἐρευνῶν καὶ ἀνακαλύψεων.

*
 **

Ἔτσι γεννήθηκε καὶ αὐτὴ εἶναι περὶ τοῦ σή-
 μερα ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ. Ὑστερὰ ἀπὸ
 μία παύση μερικῶν δεκαετηρίδων, οἱ ιδέες τοῦ
 Ἀϊνστάϊν γιὰ τὴν ἐκπομπὴ ἐκ διεγέρσεως ξα-
 νάρθαν στὸ προσκήνιο. Ἀρκεσαν πιά τὰ τελευ-
 ταῖα αὐτὰ δέκα χρόνια γιὰ νὰ ἀποκτήσωμε
 μία ἀξιόλογη ἤδη ποικιλία ἀπὸ Μάζερ καὶ
 Λάζερ.



Σχ. 8

τικὸ φάσμα παρουσίαζε σοβαρὰ κενά. Μπο-
 ροῦμε ἄραγε νὰ ἐλπίζωμε ὅτι οἱ Μάζερ καὶ
 οἱ Λάζερ θὰ καλύψουν ὅλα αὐτὰ τὰ κενά; Ὁ-
 λοὶ καὶ σύντομα, ὄχι φυσικά. Εἶναι ὅμως βέ-
 βαιο ὅτι θὰ καλύψουν πολλά. Ἦδη ἄλλωστε,
 οἱ νέες αὐτὲς συσκευές ἐβεβλίωσαν οὐσιαστικῶς
 τὴν ἀνταπόκριση τῶν διαθέσιμων πηγῶν ὡς
 πρὸς τὸ ἠλεκτρομαγνητικὸ φάσμα.

Μέχρι σήμερα, οἱ κλασσικὲς πηγές μικροκυ-
 μῶν καὶ οἱ Μάζερ καλύπτουν καλὰ τὴν πε-
 ριοχὴ τῶν μικρῶν κύματος ἀπὸ 50 ἑκατοστὰ μέ-
 χρι περίπου 0,5 χιλιοστὰ. Κατόπιν ἔρχεται ἕνα
 σημαντικό κενὸ στὸ ὑπέρυθρο. Οἱ Λάζερ κα-
 λύπτουν τὸ ὑπόλοιπο ὑπέρυθρο καὶ μεγάλο μέ-
 ρος τοῦ ὁρατοῦ φωτός, ἐκτὸς ἀπὸ τὸ μπλὲ καὶ
 τὸ ἰώδες (δηλαδὴ καλύπτουν τὴν περιοχὴ ἀπὸ
 50 ὠς 0,6 μικρὰ). Ἡ ὑπεριώδης περιοχὴ μένει
 ἀκόμη πρακτικῶς ἀκάλυπτη σὲ σύμφωνες πη-
 γές. Οἱ ἐρευνες ὅμως συνεχίζονται ἐπιμονα
 καὶ ὑπάρχουν σοβαρὲς ἐνδείξεις ὅτι σὲ λίγο θὰ
 ἔχη καλυφθῆ ἀπὸ τὴν Κβαντικὴ Ἡλεκτρονι-
 κή, ὅλη ἡ ἔκταση, ποὺ περιλαμβάνει τὰ μι-
 κροκύματα, τὸ ὑπέρυθρο, τὸ ὁρατὸ φῶς καὶ ἕ-
 να γειτονικὸ μέρος τοῦ ὑπεριώδους.

Ὅσο κι' ἂν ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρονικὴ δὲν
 εἶναι στὴν οὐσία παρὰ ἐφαρμογὴ τοῦ φαινομέ-
 νου τῆς ἐκπομπῆς ἐκ διεγέρσεως, ἔπρεπε νὰ
 γίνουν σοβαρὲς μελέτες καὶ νὰ λυθοῦν δύσκο-
 λα τεχνικὰ προβλήματα γιὰ νὰ φθάσωμε στὶς
 σημερινὲς πραγματοποιήσεις. Ἡ ἐργασία αὐτὴ
 ἔγινε σὲ σχετικὰ βραχὺ χρονικὸ διάστημα, μέ-
 σα σὲ μία μόνο δεκαετία, καὶ αὐτὸς ὁ ταχὺς
 ρυθμὸς ὄχι μόνον δὲν ἀνεκόπη, ἀλλὰ συνεχίζε-
 ται, πρὸς τὸ παρόν, γοργότερος, τόσο πού καὶ
 οἱ εἰδικοί ἀκόμη δυσκολεύονται κάπως νὰ πα-
 ρακολουθοῦν τὶς ἀλλεπάλληλες δημοσιεύσεις
 γιὰ νέες ἀναζητήσεις, νέες τελειοποιήσεις.

Γιὰ τὸν μὴ εἰδικό, δὲν εἶναι ἴσως εὐκολο νὰ
 ἀναμετρήσῃ ἀπὸ τώρα τὶς συνέπειες τῆς ἐμ-
 φανίσεως καὶ τῆς γοργῆς ἀναπτύξεως τοῦ νέ-
 ου κλάδου. Ὅταν ὅμως ἡ Κβαντικὴ Ἡλεκτρο-
 νικὴ, πλατύτερη καὶ συμπληρωμένη, θὰ ἔχη
 περάσει στὰ συνήθη διδακτικὰ βιβλία καὶ οἱ
 ἐφαρμογές τῆς θὰ ἔχουν ἀλλάξει πολλὰ πρά-
 γματα, ὁ ἀναγνώστης θὰ φέρῃ πίσω στὴ μνή-
 μη του ὅσα ἐλέγοντο στὸ τέλος αὐτῆς τῆς
 πρώτης δεκαετίας.