

## ΜΙΚΡΟΤΡΟΝ

του Α. Φίλιππα

Το μίκροτρον είναι ένα είδος από τη μεγάλη ποικιλία επιταχυντών που κατασκευάζονται τόσο για ερευνητικούς όσο και για βιομηχανικούς σκοπούς. Οι επιταχυντές είναι αυτό που δείχνει το όνομά τους: επιταχύνουν φορτισμένα σωματίδια από κάποια αρχική ενέργεια, η οποία συνήθως έχει πολύ μικρή τιμή, έως κάποια τελική ενέργεια. Κατ' επέκταση, ως επιταχυντές αναφέρονται και οι δακτύλιοι αποθήκευσης σωματιδίων, μολονότι, αν θέλουμε ν' ακριβολογήσουμε, οι τελευταίοι δεν επιταχύνουν τα σωματίδια, αλλά απλώς τα διατηρούν, επί κάποιο χρονικό διάστημα, σε σταθερή τροχιά.

Διακρίνουμε δύο κύριες κατηγορίες επιταχυντών, τους γραμμικούς και τους κυκλικούς. Το μίκροτρον μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός αυτών των δύο, μια και αποτελείται τόσο από κυκλικά όσο και από ευθύγραμμα τμήματα.

Οι επιταχυντές, χρειάζονται επειδή είναι τα μόνα εργαλεία που έχουμε για να μελετήσουμε τις αλληλεπιδράσεις των συστατικών της, και από αυτές να βγάλουμε συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο δομείται η ύλη. Ήδη, από τους πρώτους επιταχυντές που τέθηκαν σε λειτουργία, ανέκυψε μια πολύ σπουδαία χρήση τους: η εκμετάλλευση της δέσμης των σωματιδίων που

παράγονται σ' αυτούς για πάρα πολλές άλλες χρήσεις, τόσο βιομηχανικές όσο και ιατρικές.

Η λειτουργία των επιταχυντών, οποιουδήποτε τύπου, βασίζεται στην ύπαρξη υψηλών ηλεκτρικών πεδίων, επειδή τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να επιταχυνθούν μόνο με ηλεκτρικά πεδία. Ο τρόπος δημιουργίας αυτών των ηλεκτρικών πεδίων, χαρακτηρίζει τόσο το είδος του επιταχυντή όσο και τη μέγιστη ενέργεια στην οποία μπορεί να φτάσει η δέση των επιταχυνόμενων σωματιδίων.

Μολονότι το κύριο αντικείμενο της έρευνας που γίνεται με τους επιταχυντές είναι η μελέτη της δομής της ύλης, δηλαδή η μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων και των πυρήνων, όπως λ.χ. στην Ιατρική, τόσο στη διαγνωστική όσο και στη θεραπευτική, στη μελέτη των υλικών, στη Βιολογία, στη Χημεία και γενικά στις διάφορες εφαρμογές των ακτινοβολιών, όπως είναι ο μη καταστροφικός έλεγχος.

**Α.** Ενδεικτικά αναφέρουμε την παραγωγή, από δέσμες ηλεκτρονίων, διεισδυτικών ακτίνων Χ, που χρησιμοποιούνται στη ραδιογραφία του χάλυβα. Οι επιταχυντές είναι επίσης ιδιαίτερος χρήσιμοι στην παραγωγή ισοτόπων και κυρίως, ισοτόπων με έλλειμμα νετρονίων (τα ισότοπα που παράγονται σε αντιδραστήρες έχουν περίσσεια νετρονίων) ή ισοτόπων με κατευθυνόμενη ακτινοβλία εξαθλώσης, πράγμα που βοηθάει στις τομογραφίες. Μια άλλη περιοχή εφαρμογής, είναι η στε-

ροραδιογραφία, κατά την οποία λαμβάνονται δύο ή περισσότερες εκθέσεις υπό προκαθορισμένες γωνίες. Μια άλλη, λιγότερο γνωστή εφαρμογή των ιονίζουσών ακτινοβολιών, είναι η μετατροπή των ελαστικών ιδιοτήτων διαφόρων πλαστικών. Στο σύντομο αυτό άρθρο, δεν είναι δυνατό να περιγράψουμε τις διαδικασίες και τη μεθοδολογία, παίρνουμε όμως μια γεύση των περιορισμών δυνατοτήτων που έχουν οι επιταχυντές. Οι βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ιονίζουσες και μη ακτινοβολίες, πληθαίνουν με ταχύ ρυθμό.

Οι σημαντικότερες όμως επιπτώσεις στη βιομηχανία από τη χρήση τους, βρίσκονται στην ίδια κατασκευή των επιταχυντών.

Διακρίνουμε εδώ, τρεις γενικές κατηγορίες:

**Α.** Ανάπτυξη βιομηχανικών τεχνικών για την παραγωγή των πρωτοποριακών επιστημονικών οργάνων που απαιτούνται από τους ερευνητές.

**Β.** Βιομηχανική παραγωγή «πρότυπων» επιταχυντών, που χρησιμοποιούνται στην έρευνα, την ιατρική και τη βιομηχανία.

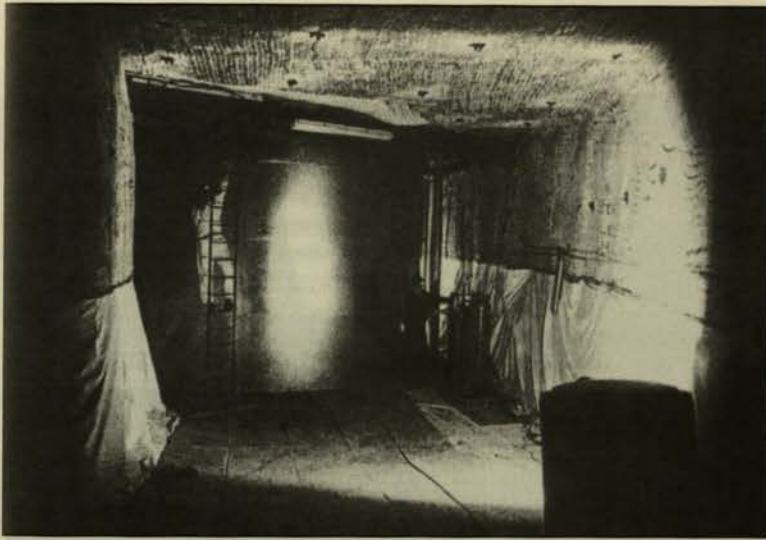
**Γ.** Χρήση των επιταχυντών σε βιομηχανικές διαδικασίες ως εξειδικευμένων εργαλείων.

**Δ.** Τέλος, οι επιταχυντές απαιτούν μια πληθώρα τεχνολογιών όπως είναι οι:

1. Μηχανικές κατασκευές και κενό.

*Ο Α. Φίλιππας είναι Καθηγητής στο Γενικό Τμήμα του ΕΜΠ.*





2. Άμορφα μαγνητικά υλικά υψηλής διαπερατότητας.
3. Ενισχυτές χαμηλού θορύβου.
4. Ανιχνευτές μικροδιαύλων.
5. Συσκευές επιφανειακής συναρμο-λόγησης (surface mounted devices).
6. Μονολιθικά κυκλώματα.
7. Εξασημάτια ή κυκλώματα χαμηλής τιμής, υψηλής ποιότητας και ανθεκτικά σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας.
8. Lasers.
9. Ανάλυση σε χρόνους picoseconds.
10. Οπτικές ίνες.
11. Απεικόνιση δέσμης.

Παρά την πλυθώρα αυτών των εφαρμογών, οι επιταχυντές παραμένουν κατά κύριο λόγο εργαλεία μελέτης της δομής της ύλης.

Ακόμα, οι τελευταίες ανακαλύψεις της Φυσικής των Στοιχειωδών Σωματιδίων, μας δίνουν την ελπίδα ότι κάποτε θα μπορέσουμε να ερμηνεύσουμε πολλά από τα φαινόμενα του Σύμπαντος, μια και η Φυσική των Υψηλών Ενέργειας συνδέεται στενά με την Αστροφυσική.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 1α, το πιο απλό μικροτρον, είναι ένας κυκλικός επιταχυντής και μπορεί να θεωρηθεί ως κύκλοτρο ηλεκτρονίων. Σε κάθε

περιστροφή, τα ηλεκτρόνια κερδίζουν ενέργεια και η ακτίνα του κύκλου που διαγράφουν μεγαλώνει. Επειδή τα ηλεκτρόνια όλων των ενεργειών περνούν ταυτοχρόνως από την κοιλότητα που τα επιταχύνει, παρουσιάζονται φαινόμενα φόρτισης δέσμης, με αποτέλεσμα η τελική τους ενέργεια να μην ξεπερνά τα 30 MeV περίπου.<sup>1</sup> Για να επιτευχθούν υψηλότερες ενέργειες και πιο εύελικτη λειτουργία, προστέθηκαν δύο ευθύγραμμα τμήματα επιτάχυνσης (Σχ. 1β). Λόγω της νέας αυτής μορφής σ' αυτά τα μικροτρον, δόθηκε η ονομασία «μίκροτρον πίστας» (racetrack microtron). Το ενεργειακό κέρδος κάθε περιστροφής είναι  $\geq 1$  MeV και η μέγιστη ενέργεια αυξάνεται κατά πολύ, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται υπεραγωγμοί μαγνήτες.<sup>2</sup> Μια ακόμα παραλλαγή είναι το πλέγμα τεσσάρων κυψελών (Four-cell Lattice)<sup>3</sup>

Με την απόκτηση του Μίκροτρον τα δύο Ιδρύματα, το Πανεπιστήμιο Αθηνών και το Ε.Μ.Π., κατά κύριο λόγο, αλλά και όσα άλλα ΑΕΙ και Ερευνητικά Κέντρα έχουν αντίστοιχο ενδιαφέρον, θα έχουν στη διάθεσή τους ένα μοναδικό εργαλείο με το οποίο θα αντιμετωπίσουν ενεργά σε όλες τις εκδηλώσεις αυτής της πρωτοποριακής έρευνας. Σε αντίθεση, όμως, με τη συνηθισμένη πρακτική των ΑΕΙ, όπως

αυτά λειτουργούν σήμερα, στο περιβάλλον του Επιταχυντή θ' αναπτυχθεί μια πολυσχιδής δραστηριότητα, που θα καλύπτει αφενός μεν το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών που αναφέρθηκαν παραπάνω, αφετέρου δε καινούργιες περιοχές που ακόμα δεν έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα. Οι περιοχές αυτές είναι η ακτινοβολία συγχρότρου και (αργότερα) οι συσκευές laser ελευθέρων ηλεκτρονίων.

**I. Ακτινοβολία Συγχρότρου.** Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συνεχούς φάσματος, πολύ μεγάλης λαμπρότητας, πολωμένη στο επίπεδο της τροχιάς των ηλεκτρονίων, ανααντικατάστατη ως πηγή ακτινοβολίας στο υπεριώδες και στην περιοχή των ακτίνων Χ. Η χρήση της ακτινοβολίας συγχρότρου συνδέεται μεταξύ τους μια ποικιλία ερευνητών στους οποίους περιλαμβάνονται φυσικοί υψηλών ενεργειών, στερεάς κατάστασης, ατομικοί και μοριακοί φυσικοί, γιατροί, βιολόγοι και ηλεκτρονικοί μηχανικοί. Οι περιοχές έρευνας εκτείνονται σε:<sup>4</sup>

- i. Μελέτες απορρόφησης, ανάκλασης, φωταύγειας και εκπομπής φωτονίων.
- ii. Φωτοδιάσπαση μορίων και ατομικά φάσματα εκπομπής.
- iii. Επιδράσεις της ακτινοβολίας στη βιολογική ύλη.
- iv. Χρήση στη ληθογραφία για παραγωγή υψηλής ευκρίνειας σε μάσκες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- v. Σκέδαση Compton και Raman.
- vi. Διερεύνηση δομής πολύπλοκων μορίων (πρωτεϊνών λ.χ.).
- vii. Φθοριοσκοπία ιωδίου.
- viii. Σκέδαση μικρής γωνίας για τη μελέτη επαναλαμβανόμενων δομών στους ιστούς (σταθερές πλέγματος  $\sim 400$  Å).

**II. Laser Ελευθέρων Ηλεκτρονίων (FEL).** Ο βασικός μηχανισμός των FEL προτάθηκε το 1947 από τον Gorn και ενσωματώθηκε στον ταλαντωτή Ubitron από την Phillips<sup>5</sup> Η λειτουργία του βασίζεται στην αλληλεπίδραση των

(1) CAS - CERN Accelerator School (CERN 90-03) σελ. 315 Fig. 4.

(2) Ibid σελ. 433 Fig. 7.

(3) Ibid σελ. 432-433 Figs. 6, 8.

(4) Encyclopaedia of Physics Addison-Welsey Publishing Company.



ηλεκτρονίων μιας σχετικιστικής και πολύ καλής ποιότητας δέσμης ηλεκτρονίων, με συστοιχία μαγνητών εναλλασσόμενης πολικότητας (undulator magnet).<sup>1</sup> Μερικές από τις περιοχές έρευνας, αναφέρονται παρακάτω:

- i. Μελέτες Συμπυκνωμένης Ύλης
- ii. Μελέτες μη γραμμικής κβαντικής ηλεκτροδυναμικής
- iii. Μελέτες μη γραμμικής οπτικής και μικροκυμάτων
- iv. Χημεία
- v. Βιολογία
- vi. Ιατρική
- vii. Φωτο-αντιδράσεις
- viii. Περιοχή υπέρυθρης ακτινοβολίας
- ix. Περιοχή υπεριώδους ακτινοβολίας
- x. Χειρουργική
- xi. Φωτοθεραπεία

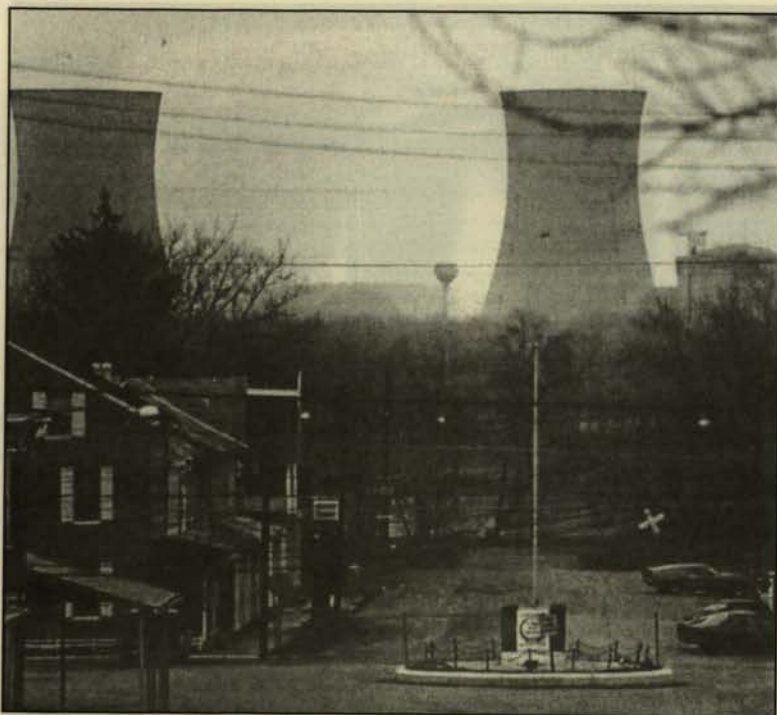
### III. Εργαστήρια Laser Ελευθέρων Ηλεκτρονίων

- i. Κίνα
- ii. Ιαπωνία
- iii. Γερμανία
- iv. Ισραήλ
- v. Γαλλία
- vi. Ολλανδία
- vii. Ιταλία
- viii. Αγγλία
- ix. Πρώην ΕΣΣΔ
- x. ΗΠΑ

Το μικροτρον το οποίο εκχωρείται στο Πανεπιστήμιο Αθηνών και στο Ε.Μ.Π. είναι μηχανή της τελευταίας τεχνολογίας, μια και η τεχνολογία αυτών των μηχανών αναπτύχθηκε στα τελευταία 10-15 χρόνια.

Τη χρήση αυτής της μηχανής διεκδικούν έξι τμήματα από τα δύο αυτά ιδρύματα και συγκεκριμένα τα Φυσικό, Ιατρικής και Πληροφορικής από το Π.Α. και τα Γενικό, Ηλεκτρολόγων και Μηχανικών Ηλ. Υπολογιστών, και Χημικό από το Ε.Μ.Π.

Οι περιοχές στις οποίες θα ασχοληθούν ερευνητές, όχι μόνο από αυτά τα τμήματα, αλλά και όσοι άλλοι ενδιαφέρονται από άλλα Ιδρύματα και Ερευνητικά Κέντρα, είναι συνοπτικά:



**A.** Άμεσα συνδεδεμένη με τον επιταχυντή και τη δέσμη:

1. Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων
2. Επιστήμη των Επιταχυντών
3. Ραδιοκύματα Ισχύος
4. Ανάπτυξη Laser Ελευθέρων Ηλεκτρονίων

**B.** Έμμεσα συνδεδεμένη με τον επιταχυντή και τη δέσμη, δηλ. έρευνα που χρησιμοποιεί τον επιταχυντή ως εργαλείο και όχι αντικείμενο έρευνας.

1. Ιατρική Επιστήμη: Διάγνωση/Θεραπεία
2. Επιστήμη Υλικών: Χαρακτηρισμός/Επεξεργασία
3. Περιβάλλον: Μετρήσεις Ρύπων/Επεξεργασία Λυμάτων
4. Αρχαιολογία: Αρχαιομετρία/Συντήρηση
5. Επιστήμη Τροφίμων: Συντήρηση
6. Οργανολογία: Ανάπτυξη Ανιχνευτικών Διατάξεων
7. Μικροηλεκτρονική: Λιθογραφία Ακτίνων Χ
8. Βιοτεχνολογία: Κρυσταλλογραφία Προτεϊνών

Για να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης του μικροτρον και της με αυτήν συναφούς έρευνας ερευνητικής δραστηριότητας, πρέ-

πει να δούμε με συντομία, τί συνεπάγεται αυτή η εγκατάσταση. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι παρά τη φαινομένη πολυπλοκότητα που έχει η υψηλή τεχνολογία οποιουδήποτε επιταχυντικού συστήματος, στην προκειμένη περίπτωση στα Ιδρύματα, προσφέρεται ένα πλήρες σύστημα και εκ τούτου δεν απαιτούνται μεγάλες κατασκευές, όπως λ.χ. το σύστημα μεταφοράς δέσμης ή το σύστημα τροφοδοσίας των μαγνητών. Επί πλέον, οι μαγνήτες είναι συνήθως τύπου και όχι υπεραγωγμοί, όπως λ.χ. στα πιο σύγχρονα μικροτρον. Συνεπώς, ο έλεγχος λειτουργίας τους δεν προκαλεί καμία δυσκολία. Το ίδιο συμβαίνει και με το σωλήνα επιτάχυνσης, οι κοιλότητες συντονισμού του οποίου, είναι επίσης συνηθισμένου τύπου, καθώς και με τα ηλεκτρονικά και το σύστημα ελέγχου γενικότερα. Στα δύο Ιδρύματα υπάρχει ικανό επιστημονικό προσωπικό με εμπειρία στις τρεις αυτές περιοχές, θα απαιτηθεί όμως η ενίσχυση με τεχνικό και βοηθητικό προσωπικό.

Είναι κοινοτυπία να επαναληφθεί ότι ο κύριος ρόλος των ΑΕΙ είναι η εκ-

(5) CAS - CERN Accelerator School (CERN 90-03) σελ. 237.

(1) CAS - CERN Accelerator School (CERN 90-03) σελ. 254-7.



παίδευση. Σ' αυτόν τον τομέα, πράγματι το μίκροτρον θα παίξει καθοριστικό ρόλο, κυρίως στις μεταπτυχιακές σπουδές. Οι εγκαταστάσεις του επιταχυντή προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία δραστηριοτήτων, όπως συστήματα ελέγχου, συστήματα υψηλών και χαμηλών τάσεων, μικροκύματα, μαγνήτες ισχύος και μαγνητικά πεδία μεγάλης ακρίβειας, ταχεία ηλεκτρονικά, τεχνολογία laser, και, φυσικά, θέματα έρευνας και εκπαίδευσης από τις επιστημονικές περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Όπως είδαμε, οι επιταχυντές απαιτούν μια πληθώρα τεχνολογιών. Και σ' αυτή την περιοχή, λοιπόν, θα παίξει σημαντικό ρόλο το μίκροτρον, και θα ικανοποιηθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό η σύνδεση της βιομηχανίας με την εκπαίδευση. Οι σημαντικότερες περιοχές στις οποίες είναι πιθανό να υπάρξει στενή συνεργασία με τη βιομηχανία, είναι οι μηχανικές κατασκευές και κενό, συσκευές επιφανειακής συναμομόλογησης, και εν γένει συσκευές ελέγχου.

Το σημαντικότερο, όμως πλεονέκτημα της δημιουργίας ενός Κέντρου Επιταχυντικών Συστημάτων, είναι η συνεργασία των δύο Ιδρυμάτων από το ένα μέρος και η συνεργασία που προσφέρεται σ' όλα τα άλλα Ιδρύματα, Ερευνητικά Κέντρα και Φορείς του γενικότερου Ελληνικού χώρου. Όχι ήσσονος σημασίας είναι το εκδηλωθέν ενδιαφέρον από πολλά Κέντρα του εξωτερικού για μια στενή συνεργασία, τόσο όσον αφορά την εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση της μηχανής, όσο και τη συμμετοχή σ' ένα ευρύ φάσμα ερευνητικών δραστηριοτήτων.

Ένα κύριο ερώτημα που τίθεται σε οποιαδήποτε καινούργια προσπάθεια έχει να κάνει με το κόστος, τόσο κατά την έναρξη ή την εγκατάσταση όσο και με τη λειτουργία. Το κόστος κατασκευής της μηχανής είναι μεγάλο, και ως εκ τούτου θα ήταν απαγορευτικό για τον προϋπολογισμό των δύο Ιδρυμάτων. Η μηχανή όμως μας δίνεται πλήρης, και παρά τις αντίθετες απόψεις δύο ή τριών επιστημόνων, σε κατάσταση λειτουργίας. Απομένει το κόστος μεταφοράς και εγκατάστασής της

στην Ελλάδα, και τα πάγια λειτουργικά έξοδα. Με τιμές Ιουνίου 1993, το συνολικό κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης έως την περίοδο της μόνιμης λειτουργίας του (δηλ. για την πενταετία 1993-1998) ανέρχεται σε 2,3 δις δρχ. περίπου. Μετά το διάστημα αυτό, τα πάγια έξοδα ανέρχονται στο ποσό των 160 εκατ. δρχ. περίπου, ανά έτος.

Τα ποσά αυτά κατά το μεγαλύτερο τους ποσοστό, θα προέρχονται από τρίτους φορείς, και κυρίως από τις συμμετοχές των ερευνητικών ομάδων στα διάφορα προγράμματα. Μια όχι ενκαταφρόνητη πηγή χρηματοδότησης, προβλέπεται να είναι η παροχή υπηρεσιών προς τρίτους, ειδικότερα μετά την εδραίωση της ακτινοβολίας συγχρότρου και του laser των ελευθέρων ηλεκτρονίων.

Τέλος, και εν όψει του ήδη εκδηλωθέντος ενδιαφέροντος από πολλά ερευνητικά Κέντρα, το μίκροτρον θα καταστεί ένα μεσογειακό περιφερειακό εργαστήριο υψηλής επιστημονικής βάσης. Οι γενικότερες επιπτώσεις από μια τέτοια εξέλιξη είναι προφανείς.

