

## Κεφάλαιο 6

### ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ

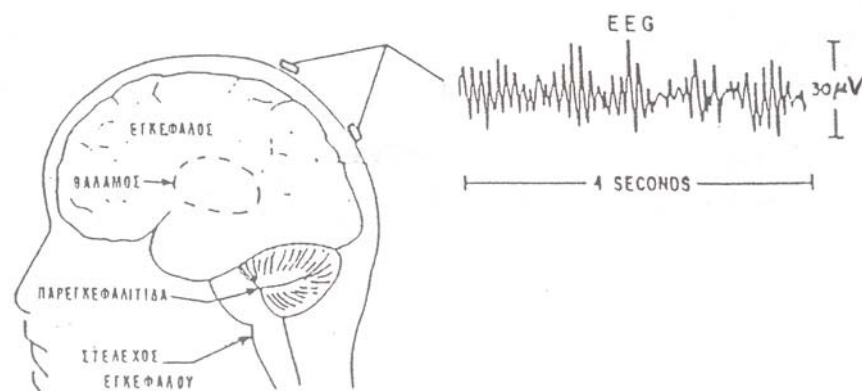
#### **6.1. Εισαγωγή**

Ηλεκτρόδια που τοποθετούνται κατευθείαν στο δέρμα του κεφαλιού μπορούν να καταγράψουν σήματα που δημιουργούνται στο εσωτερικό του εγκεφάλου. Αυτά τα επιφανειακά δυναμικά αποτελούν τη βάση για τη μελέτη της Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας. Σημαντικές προσπάθειες έχουν καταβληθεί για τη σωστή ερμηνεία του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) αλλά η λειτουργία και η γένεση του δεν έχουν κατανοηθεί ακόμη πλήρως.

Η μεγάλη σπουδαιότητα του EEG προέρχεται από τη χρησιμοποίησή του στη διάγνωση, και μερικές φορές στη θεραπεία. Η επιληψία παράγει τοπικές μεταβολές στο σχήμα του EEG, ενώ όγκοι κοντά στην επιφάνεια του εγκεφάλου είναι δυνατόν να εντοπισθούν από τη χαρακτηριστική επίδραση στο σχήμα του EEG στη γύρω περιοχή τους. Ομοίως, ένα τραύμα στον εγκέφαλο που προήλθε από κάποιο ατύχημα μπορεί να εκτιμηθεί ανάλογα από τις μεταβολές στους ρυθμούς του EEG. Χωρίς αυτή την πληροφορία θα χρειαζόταν δύσκολες, οδυνηρές και επικίνδυνες εγχειρήσεις για να γίνει μία τέτοια διάγνωση.

#### **6.2. Ορισμένα βασικά στοιχεία του εγκεφάλου**

Ο εγκέφαλος του ανθρώπου χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη : το στέλεχος του εγκεφάλου, την παρεγκεφαλίτιδα και το εγκεφαλικό μέρος (βλέπε Σχ. 6.1).



**Σχήμα 6.1.** Τα κύρια μέρη του εγκεφάλου.

Το στέλεχος του εγκεφάλου είναι το μέρος εκείνο του εγκεφάλου από το οποίο μεταφέρονται σήματα (ηλεκτρικοί παλμοί) και προς τις δύο κατευθύνσεις, δηλ. προς το νωτιαίο μυελό και προς τα υψηλότερα κέντρα του εγκεφάλου.

Ο θάλαμος ο οποίος βρίσκεται πάνω στο στέλεχος του εγκεφάλου, είναι ένας σταθμός σύνδεσης και ένα κέντρο ενοποίησης για όλα τα αισθητήρια ερεθίσματα προς το φλοιό. Η παραγκεφαλίτιδα η οποία βρίσκεται πάνω και πίσω από το στέλεχος έχει σχέση με το σωστό έλεγχο των κινήσεων των μυών.

Το μεγάλο μέρος του εγκεφάλου που παραμένει όταν αφαιρέσουμε το στέλεχος και την παραγκεφαλίτιδα είναι το εγκεφαλικό μέρος, το οποίο χωρίζεται σχεδόν σε δύο ίσα μέρη (το αριστερό και το δεξιό ημισφαίριο). Το εξωτερικό τμήμα του εγκεφαλικού μέρους, ο εγκεφαλικός φλοιός, είναι μία κατασκευή πάχους 2-3 mm, η οποία έχει μία συνολική επιφάνεια γύρω στα  $1600 \text{ cm}^2$  και περιέχει περίπου  $10^{10}$  νευρικά κύτταρα. Τα κύτταρα αυτά του φλοιού αλληλοσυνδέονται πάρα πολύ μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η επιφάνεια ενός απλού νευρικού κυττάρου μπορεί να καλύπτεται με  $10^3 - 10^5$  συνάψεις, οι οποίες μεταφέρουν πληροφορίες από τα άλλα κύτταρα. Το μεγαλύτερο μέρος της αντίληψης μας πρέπει, κατά ένα μεγάλο άγνωστο τρόπο, να δημιουργείται από τα κύτταρα του φλοιού. Ο φλοιός επίσης θεωρείται ότι είναι η κατασκευή εκείνη που δημιουργεί όλη την ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου που μετρείται στο κρανίο (εκτός από την ηλεκτρική δραστηριότητα που έχει πάρα πολύ χαμηλό εύρος και οφείλεται σε πηγές από το εσωτερικό του εγκεφάλου). Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει μία σχέση μεταξύ του θαλάμου και της

δραστηριότητας του φλοιού. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί όταν τοποθετούμε ηλεκτρόδια μέσα στον εγκέφαλο του ασθενούς για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Με τον τρόπο αυτό έχουμε καταγράψει δεδομένα τα οποία δείχνουν τη σχέση των κυττάρων του θαλάμου και των προβολών τους στο φλοιό (Αυτό γίνεται στον υπολογιστή με τη βοήθεια τεχνικών φασματικής ανάλυσης).

Ο φλοιός αποτελείται από τη φαιά ουσία, η οποία καλείται έτσι εξαιτίας της υπεροχής των σωμάτων των κυττάρων. Ακριβώς κάτω από τη φαιά ουσία είναι μία δεύτερη μεγάλη περιοχή, η λευκή ουσία, στην οποία υπερισχύουν τα νευρικά νημάτια. Στους ανθρώπους, ο όγκος που καταλαμβάνει η λευκή ουσία είναι περίπου ίση μ' αυτή του φλοιού. Οι αλληλοσυνδέσεις στη λευκή ουσία είναι πάρα πολλές. Μία επιφάνεια κάτω από το φλοιό  $1 \text{ cm}^2$  μπορεί να περιέχει  $10^7$  άξονες (νημάτια), οι περισσότεροι από τους οποίους συνδέουν διάφορες περιοχές του φλοιού. Ένας πολύ μικρότερος αριθμός νηματίων που εισδύουν από το κάτω μέρος της επιφάνειας του φλοιού προέρχεται από το θάλαμο.

Η ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου διαιρείται συνήθως σε τρεις κατηγορίες :

- (α) Αυτόματα ενεργά δυναμικά όπως ο α-ρυθμός και οι ρυθμοί του ύπνου.
- (β) Προκλητά δυναμικά τα οποία αντιπροσωπεύουν την απάντηση σε κάποιο ερέθισμα.
- (γ) Ενεργά δυναμικά τα οποία δημιουργούνται από απλά νευρικά κύτταρα και καταγράφονται με μικροηλεκτρόδια.

### **6.3. Περιγραφή του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος (EEG)**

Η ηλεκτρική δραστηριότητα μεταξύ της επιφάνειας του εγκεφάλου ενός φυσιολογικού ενήλικου ανθρώπου και μιας ηλεκτρικά ουδέτερης περιοχής του σώματος, όπως ο λοβός του αυτιού, μπορεί να φθάσει τα  $10 \text{ mV}$ . Είναι πιο συνηθισμένο όμως η μέτρηση του δυναμικού να γίνεται όχι στην επιφάνεια του εγκεφάλου αλλά στην επιφάνεια του δέρματος (που περιβάλλει το κρανίο), όπου η τιμή του δυναμικού πέφτει στα  $100 \mu\text{V}$  εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης του κρανίου. Αυτή η ηλεκτρική δραστηριότητα μπορεί να μετρηθεί παντού στο δέρμα

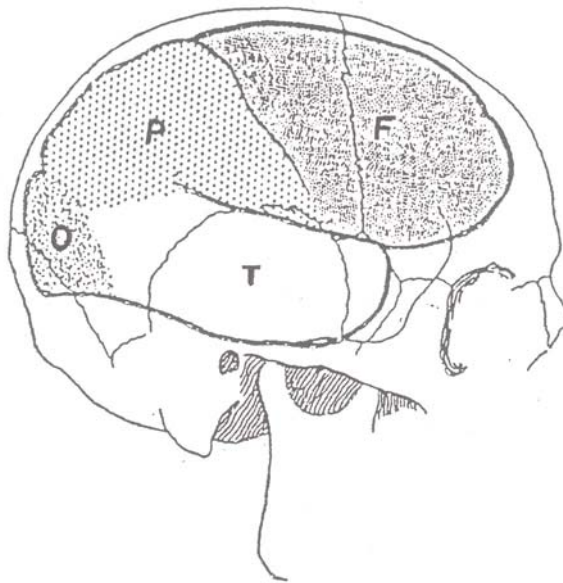
του κεφαλιού και η μορφή είναι η ίδια σ' όλα τα σημεία αν και υπάρχει μία μικρή μετατόπιση από μία περιοχή σε μία άλλη.

Για την καταγραφή του EEG χρησιμοποιούνται συνήθως δύο ηλεκτρόδια, το μονοπολικό και το διπολικό.

Στο **μονοπολικό ηλεκτρόδιο** το ένα ηλεκτρόδιο βρίσκεται πάνω από ενεργό ιστό και το άλλο σε μία μακρινή απόσταση σ' ένα σχετικά ανενεργό σημείο.

Στο **διπολικό ηλεκτρόδιο** έχουμε ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων κάθε ένα από τα οποία βρίσκεται πάνω από ενεργό ιστό.

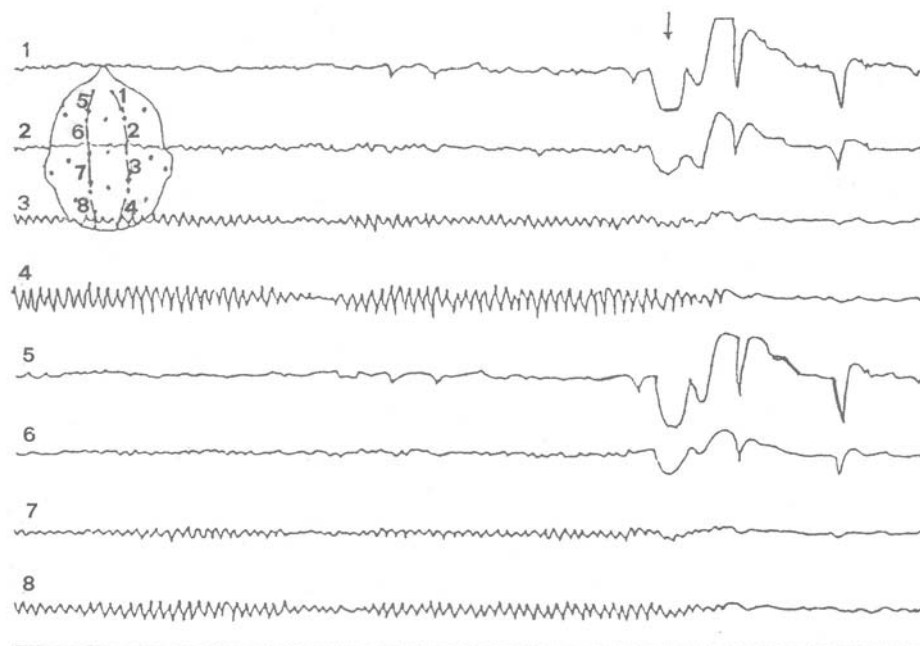
Στην πράξη χρησιμοποιούμε μέχρι 24 ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του δέρματος του κεφαλιού και έτσι καταγράφουμε τις διαφορές δυναμικού μεταξύ ζευγαριών από τα ηλεκτρόδια αυτά. Πρέπει να σημειωθεί ότι άλλες ηλεκτρικές διαταραχές στο σώμα χρειάζεται να εξαλειφθούν και τα σήματα πρέπει να χωρισθούν από τον εσωτερικό θόρυβο και να ενισχυθούν προτού καταγραφούν. Ορισμένα χαρακτηριστικά εμφανίζονται ισχυρότερα σε μερικές περιοχές του δέρματος του κεφαλιού από άλλες, και κάποιο τμήμα του EEG μπορεί να αποδειχθεί πολυτιμότερο από ένα άλλο για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων βρίσκεται ότι είναι εναλλασσόμενη, αλλά όχι κατά έναν απλό τρόπο.



**Σχήμα 6.2.** Κύριες περιοχές του εγκεφάλου.

Στο Σχ.6.2. περιγράφονται οι τέσσερις κύριες περιοχές του εγκεφάλου :  $F$ =μετωπική,  $T$ =κροταφική,  $P$ =βρεγματική και  $O$ =νιακή.

Το EEG μπορεί να καταγραφεί κι όταν ακόμη έχουμε απουσία εξωτερικών ερεθισμάτων. Το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι ο  $\alpha$ -ρυθμός, ο οποίος αποτελείται από κύματα συχνότητας  $8-13\text{ Hz}$ , και είναι ευκόλως διακρινόμενα από το ημιτονοειδή σχήμα τους (βλέπε Σχ.6.3). Αυτός ο ρυθμός, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.3, είναι εντονότερος στο νιακό τμήμα (πίσω μέρος) του εγκεφάλου και η λειτουργία του σχετίζεται με το οπτικό σύστημα. Αν το μάτι συγκεντρωθεί σ'ένα αντικείμενο, ο  $\alpha$ -ρυθμός μπλοκάρεται, μολονότι επανέρχεται αν η παρακολούθηση συνεχισθεί για πολύ ώρα. Όταν τα μάτια είναι κλειστά, ο  $\alpha$ -ρυθμός είναι βραδύτερος από ότι όταν είναι ανοικτά. Η αρχική υπόθεση ότι ο  $\alpha$ -ρυθμός δημιουργείται μόνο στους νιακούς



**Σχήμα 6.3.** Τυπικό σύνολο σημάτων του EEG στο οποίο φαίνεται οι θέσεις απ' όπου καταγράφηκαν τα σήματα αυτά. Όπως φαίνεται ο  $\alpha$ -ρυθμός υπερισχύει σε κάθε σήμα (ισχυρότερος όμως είναι στο πίσω μέρος, θέσεις 3,4,7 και 8).

πόλους δεν ισχύει πλέον, επειδή η παρουσία του  $\alpha$ -ρυθμού παρατηρείται και σε άλλα σημεία του εγκεφάλου, παρότι εμφανίζεται σπανίως στις μετωπικές περιοχές. Όταν ο  $\alpha$ -ρυθμός μπλοκάρεται, ο  $\beta$ -ρυθμός εμφανίζεται. Αυτός ο ρυθμός είναι μία ηλεκτρική δραστηριότητα χαμηλού εύρους και παρατηρείται στις μετωπικές περιοχές του

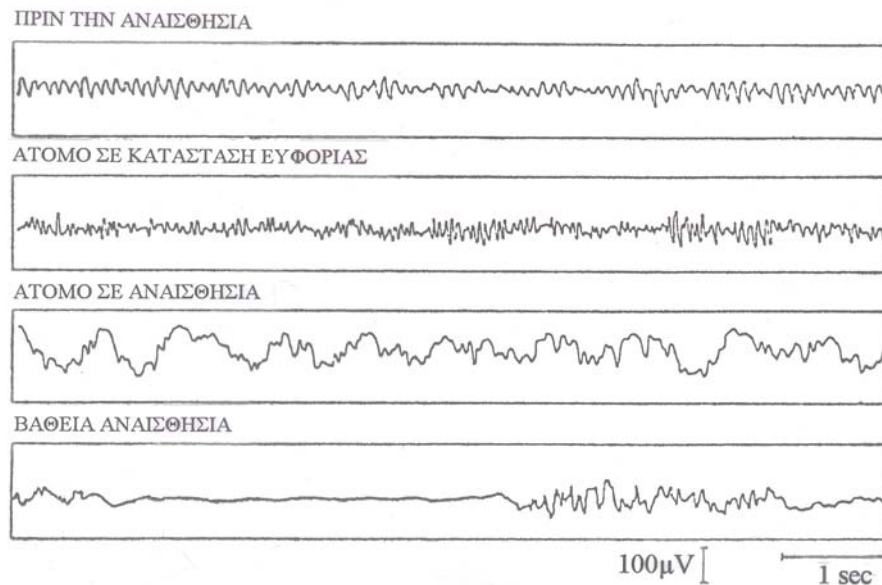
εγκεφάλου σε μία περιοχή συχνοτήτων 14-30 Hz. Αποτελείται από τμήματα που έχουν σχήμα ατράκτου και μπλοκάρεται αποκλειστικά με την έναρξη των κινήσεων του σώματος. Για παράδειγμα κινήσεις των δακτύλων μπλοκάρουν το β-ρυθμό μόνο στις περιοχές του εγκεφάλου που σχετίζονται μ' αυτές τις κινήσεις. Όταν ο β-ρυθμός παρατηρείται μαζί με τον α-ρυθμό θα αποτελεί απλά μία ασυμμετρία του α-ρυθμού, ο οποίος για το λόγο αυτό θα φαίνεται παραμορφωμένος.

Υπάρχουν ρυθμοί χαμηλότερης συχνότητας που είναι γνωστοί ως θ-ρυθμός (4-7 Hz) και ως δ-ρυθμός (< 4 Hz). Ο θ-ρυθμός είναι φυσιολογικός στο EEG ενός παιδιού και δείχνει να είναι εντονότερος στις κροταφικές και κεντρικές περιοχές του φλοιού. Η δραστηριότητα αυτή δεν επηρεάζεται από το ερέθισμα των αισθητήριων νευρικών κυττάρων αλλά είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια χαλάρωσης και αδράνειας. Φαίνεται ότι σχετίζεται με καταστάσεις συγκίνησης και μπορεί να είναι υπερβολική σε ασθενείς με διαταράξεις προσωπικότητας. Ο δ-ρυθμός δεν εμφανίζεται σε φυσιολογικούς ενηλίκους όταν είναι ξυπνητοί, αλλά μπορεί να παρατηρηθεί στην πρώτη παιδική ηλικία ή όταν υπάρχει κάποια ανωμαλία στον εγκέφαλο. Ορισμένες χημικές ουσίες μπορούν να δημιουργήσουν τον δ-ρυθμό.

Κατά τη διάρκεια του ύπνου το EEG αλλάσσει τελείως. Καθώς ο άνθρωπος βρίσκεται στον πρώτο ύπνο, ο α-ρυθμός εξαφανίζεται. Κατά τη διάρκεια των ονείρων ο β-ρυθμός εμφανίζεται, αλλά στο βαθύ ύπνο μόνο ο δ-ρυθμός είναι φανερός. Όταν ο ύπνος είναι βαθύς και έχουμε κάποιο ερέθισμα, τότε παρατηρείται μία έξαρση του α-ρυθμού πάνω από τον δ-ρυθμό.

Ας μελετήσουμε με τη βοήθεια του EEG τη συμπεριφορά ενός ανθρώπου στον οποίο δίνουμε ένα αναισθητικό για να τον ναρκώσουμε. Όταν ο άνθρωπος δεν έχει χάσει ακόμη τις αισθήσεις του, αλλά βρίσκεται σε μία κατάσταση ευφορίας ή σύγχυσης, οι ηλεκτρικοί παλμοί είναι γρήγοροι σε συχνότητα και γενικά υψηλού δυναμικού (βλέπε Σχ. 6.4B). Αυτός ο τύπος της δραστηριότητας εμφανίζεται πάλι όταν ο άνθρωπος συνέρχεται από την αναισθησία. Αυτή η αλλαγή στο EEG εμφανίζεται πρώτα στα ηλεκτρόδια των μετωπικών περιοχών του κεφαλιού και διατηρείται εκεί περισσότερο όταν σταματά να ενεργεί το αναισθητικό. Τη στιγμή που ο άνθρωπος χάνει τις αισθήσεις του στο EEG αμέσως επικρατούν αργά κύματα με υψηλό δυναμικό και οι καταγραφές αυτές είναι όμοιες με εκείνες που παρατηρούνται σε καταστάσεις κώματος ή λιποθυμίας (βλέπε Σχ. 6.4Γ). Αν η

αναισθησία βαθύνει τότε μπορούμε να φθάσουμε σε μία φάση όπου μεγάλα διαστήματα ίσου δυναμικού παρεμβάλλονται μεταξύ εξάρσεων ακανόνιστων κυμάτων (Σχ. 6.4Δ).



**Σχήμα 6.4.** Διάφορα στάδια της συμπεριφοράς ενός ατόμου πριν και μετά από αναισθησία.

Το σήμα του EEG, εκτός από την αυτόματη δραστηριότητα του, επηρεάζεται και από τα περιφερειακά ερεθίσματα. Κανονικά ο εσωτερικός θόρυβος (*background noise*) υπερισχύει του σήματος, αλλά με τη βοήθεια τεχνικών φασματικής ανάλυσης (*spectral analysis techniques*) το σήμα μπορεί να ξεχωρισθεί από το θόρυβο. Η συνάρτηση που επακολουθεί είναι γνωστή σαν προκλητό δυναμικό (*evoked response*).

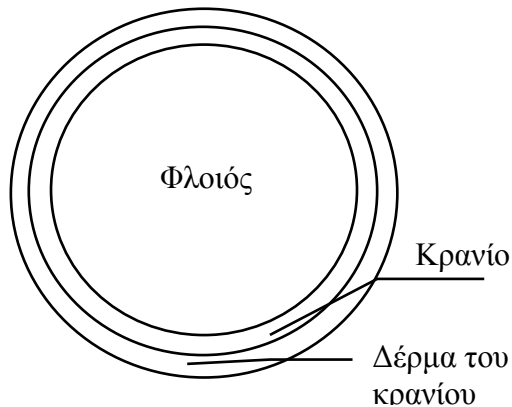
Όπως έχουμε αναφέρει, η γένεση του EEG δεν είναι πλήρως κατανοητή. Αν θεωρήσουμε μία σχεδόν ημιτονοειδή άλφα δραστηριότητα με περιοδικότητα  $100\text{ msec}$  και τη συγκρίνουμε με ξεχωριστούς ηλεκτρικούς παλμούς περιοδικότητας  $1\text{ msec}$ , τότε είναι φανερό ότι πολλά κύτταρα πρέπει να συνεισφέρουν στην περιοδικότητα που επακολουθεί. Τα δυναμικά που καταγράφονται στο δέρμα του κεφαλιού είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε αγωγίμο όγκο.

Δύο προτάσεις έχουν γίνει σχετικά με τους διαφόρους ρυθμούς του EEG:

- (α) Οι ρυθμοί αντιπροσωπεύουν ένα μηχανισμό ανίχνευσης (scanning mechanism) με τον οποίο ο εγκέφαλος αποκτά εξωτερική πληροφορία από τα αισθητήρια νευρικά κύτταρα.
- (β) Τα κύματα αντιπροσωπεύουν κυκλώματα ανατροφοδότησης (*feed-back loops*) για αποθήκευση πληροφορίας.

#### 6.4. Το μοντέλο των τριών ομόκεντρων σφαιρών

Μπορούμε να θεωρήσουμε τον φλοιό (που περιβάλλει τον εγκέφαλο), το κρανίο και το δέρμα (που περιβάλλει το κρανίο) ότι αποτελούν ένα μοντέλο τριών ομοκεντρικών σφαιρικών περιοχών ομοιόμορφης αγωγιμότητας (Βλέπε Σχ. 6.5).



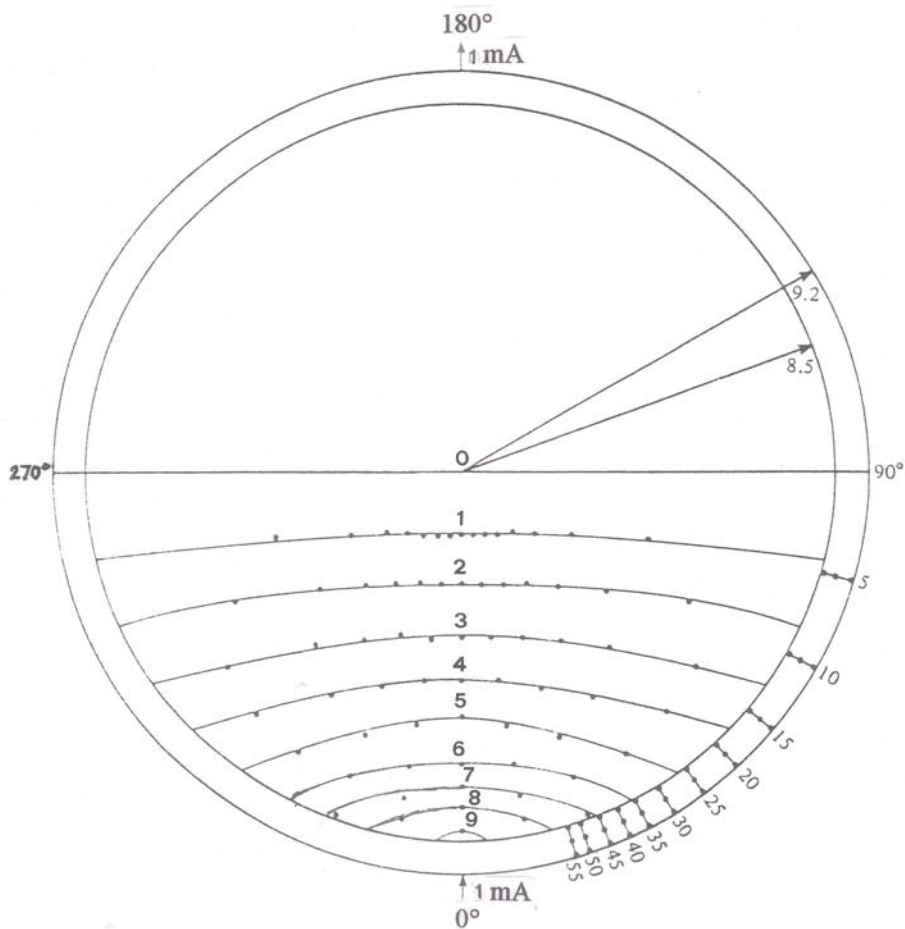
Σύγκριση με ένα πιο ρεαλιστικό ηλεκτρολυτικό μοντέλο του κεφαλιού δείχνει ότι το μοντέλο των τριών ομοκεντρικών σφαιρών είναι αρκετά ακριβές εκτός από εκείνα τα μέρη στο δέρμα όπου το πραγματικό και το

**Σχήμα 6.5.** Το μοντέλο των τριών ομοκεντρικών σφαιρών στην περίπτωση του ανθρώπινου κεφαλιού.

πάχος που χρησιμοποιείται στο μοντέλο διαφέρουν περισσότερο.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό (μία μαθηματική ανάλυση δίνεται παρακάτω) βρίσκουμε προσεγγιστικά ότι το πεδίο των προκλητών δυναμικών μπορεί να εξηγηθεί από μία απλή διπολική πηγή μέσα στο φλοιό. Στην περίπτωση αυτή θεωρούμαι ότι ο φλοιός και το δέρμα έχουν μία αγωγιμότητα  $0.0033 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , ενώ το κρανίο έχει μία αγωγιμότητα  $0.00002 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Στο Σχ. 6.6 περιγράφεται ένα πεδίο που δημιουργείται από ένα ειδικό διπολικό ηλεκτρόδιο. Από το πεδίο αυτό είναι εύκολο να κατανοήσουμε την σχετική ευαισθησία του ηλεκτροδίου σε διαφορετικά σημεία. Μερικά συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε από το παράδειγμα αυτό είναι :





**Σχήμα 6.6.** Γραφική παράσταση ισοδυναμικών γραμμών που δημιουργούνται από την εφαρμογή μιας σημειακής πηγής ρεύματος στο μοντέλο των τριών αγώγιμων ομοκεντρικών σφαιρών. Τα μέτρα (σε μονάδες) των πηγών είναι  $\pm 1 \text{ mA}$ , η αντίσταση του φλοιού και του δέρματος είναι  $220 \text{ Ohm.cm}$ , και η αντίσταση του κρανίου είναι  $17.000 \text{ Ohm.cm}$ . Το κρανίο μπορεί να προσεγγισθεί από μία λωρίδα αντίστασης μηδενικού πάχους αλλά με εγκάρσια αντίσταση ισοδύναμη μ' ένα έλασμα πάχους  $0.5 \text{ cm}$ . Η ακτίνα του φλοιού και του δέρματος είναι  $8.5 \text{ cm}$  και  $9.2 \text{ cm}$  αντίστοιχα. Η πηγή ρεύματος εφαρμόζεται στο  $0^\circ$  και στο  $180^\circ$  (το ρεύμα στο σημείο αυτό έχει αντίθετο πρόσημο). Τα δυναμικά μετρούνται σε millivolts.

- (α) Ένα ηλεκτρόδιο στο μπροστινό και ένα στο πίσω μέρος του κεφαλιού αποτελούν ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων το οποίο είναι ευαίσθητο σχεδόν εξ ίσου καλά σ' όλες τις πηγές μέσα στον εγκέφαλο.
- (β) Τα ηλεκτρόδια επιφανείας που βρίσκονται σε απόσταση  $5 \text{ cm}$  μεταξύ τους είναι δέκα φορές πιο ευαίσθητα στις εγγύτερες πηγές του εσωτερικού του εγκεφάλου από τις πηγές στο κέντρο του εγκεφάλου.

(γ) Τοποθετήσεις των ηλεκτροδίων πιο κοντά από  $5 \text{ cm}$  είναι σχετικά ανεπαρκείς λόγω της επίδρασης εκτροπής (shunting effect) του ηλεκτρικού ρεύματος από το δέρμα του κεφαλιού.

Η λύση στο μοντέλο των τριών ομοκεντρικών σφαιρικών περιοχών μπορεί να απλοποιηθεί, αν θεωρήσουμε το κρανίο σαν μία λωρίδα μηδενικού πάχους της οποίας η εγκάρσια αντίσταση ανά μονάδα επιφανείας,  $\rho_m$ , είναι ίση προς εκείνη που υπολογίζεται από την αντίσταση  $\rho$  και το πάχος  $t$ , δηλαδή  $\rho_m = \rho \cdot t$ .

Αυτή η προσέγγιση είναι ικανοποιητική επειδή το πάχος του κρανίου είναι μικρό σχετικά με την ακτίνα του δέρματος του κεφαλιού και επιπλέον, επειδή η αντίσταση του είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του εσωτερικού του εγκεφάλου ή του δέρματος του κεφαλιού.

Μία λύση για το απλοποιημένο αυτό μοντέλο από τις βοηθητικές συμμετρικές συνθήκες του Σχ.6.7 απαιτεί το δυναμικό στο εσωτερικό του εγκεφάλου να είναι της μορφής

$$\Phi_c = \sum_{n=1}^{\infty} a_n P_n(\cos \theta) r^n,$$

ενώ στο δέρμα του κεφαλιού

$$\Phi_s = \sum_{n=1}^{\infty} P_n(\cos \theta) \left( b_n r^n + \frac{c^n}{r^{n+1}} \right)$$

όπου  $P_n(\cos \theta)$  είναι τα πολυώνυμα του Legendre.

Τα τρία σύνολα των αγνώστων συντελεστών βρίσκονται από τις ακόλουθες τρεις συνθήκες :

(α) Η κανονική συνιστώσα της πυκνότητας ρεύματος κατά μήκος του ορίου του κρανίου πρέπει να είναι συνεχής, δηλαδή

$$\frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \Phi_c}{\partial r} = \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \Phi_s}{\partial r} \quad \text{στο κρανίο,}$$

όπου  $\rho_c$  και  $\rho_s$  είναι οι αντιστάσεις του εσωτερικού του εγκεφάλου και του δέρματος του κεφαλιού αντίστοιχα.

(β) Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του φλοιού και του δέρματος δίνεται από την σχέση

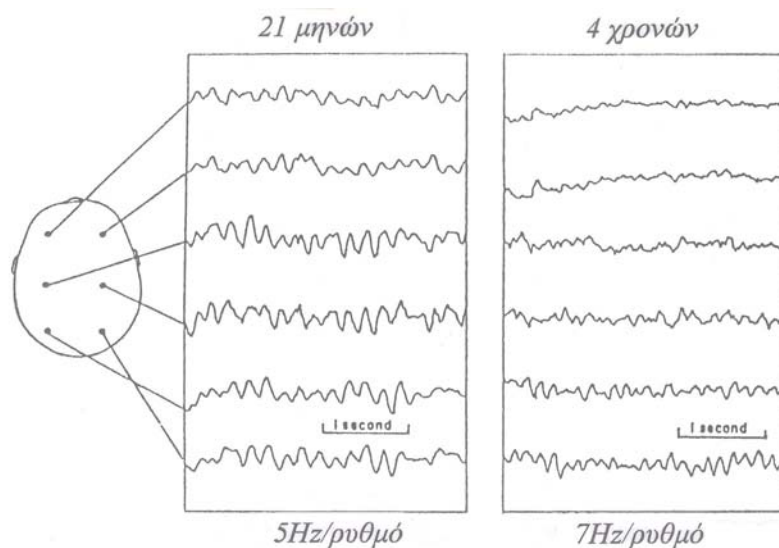
$$\Phi_c - \Phi_s = -\rho_m \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \Phi_c}{\partial r}$$

(γ) Η κανονική συνιστώσα της πυκνότητας ρεύματος μέσα στην επιφάνεια του δέρματος του κεφαλιού πρέπει να είναι ίση με την πυκνότητα του ρεύματος που εφαρμόζεται στην επιφάνεια. Άρα

$$J(\theta) = \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \Phi_s}{\partial r} \quad \text{στην επιφάνεια του δέρματος του κεφαλιού.}$$

### 6.5. Το EEG σε φυσιολογικά παιδιά

Το EEG φυσιολογικών παιδιών διαφέρει από τους ενήλικες. Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν απέτυχαν να αποκαλύψουν ρυθμική δραστηριότητα στην ινιακή περιοχή ενός φυσιολογικού νηπίου κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων μηνών από τη γέννηση του, παρότι υπάρχει ένδειξη ρυθμικής ηλεκτρικής δραστηριότητας μπροστά από κεντρικές περιοχές πριν από τη γέννηση. Το καταπληκτικό αποτέλεσμα είναι ότι οι ρυθμοί αυτοί των περιοχών αυτών του φλοιού είναι σχεδόν του ίδιου μεγέθους όπως των ενηλίκων (παρατηρούνται στην περιοχή συχνοτήτων 7-13 Hz).

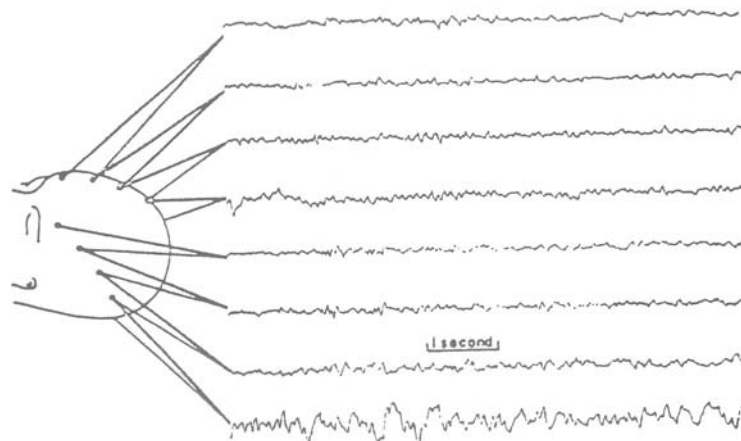


**Σχήμα 6.7.** Σύγκριση των καταγραφών του εγκεφάλου μεταξύ ενός παιδιού ηλικίας 21 μηνών και 4 χρονών.

Οι ηλεκτρικοί ρυθμοί στην ινιακή περιοχή, οι οποίοι εμφανίζονται τον τέταρτο μήνα μετά τη γέννηση είναι πολύ αργοί (3-4 Hz). Οι ρυθμοί της ινιακής περιοχής αυξάνουν σε ρυθμό, στην αρχή γρήγορα και μετά πιο αργά, μέχρι την ηλικία των δεκατριών ετών όπου η έκταση των συχνοτήτων μοιάζει πλέον μ' αυτή των ενηλίκων (βλέπε για κάποιες λεπτομέρειες στο Σχ. 6.7).

### 6.6. Μη-φυσιολογική συμπεριφορά στο EEG ενός ανθρώπου

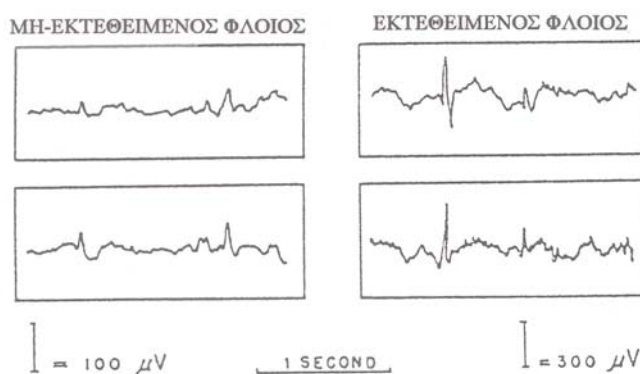
Κατ' αρχάς γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ διακριτών εντοπισμένων περιοχών με μία μη-φυσιολογική ηλεκτρική δραστηριότητα (βλέπε Σχ. 6.8) η οποία δηλώνει μία εστιακή ζημιά στην επιφάνεια του εγκεφάλου και των πιο γενικευμένων διαταραχών οι οποίες πιθανώς προβάλλονται στην επιφάνεια από κακώσεις στο εσωτερικό του εγκεφάλου.



**Σχήμα 6.8.** EEG ενός ενήλικου με εσωτερικά τραύματα.

Στην πρώτη περίπτωση οι ανωμαλίες εντοπίζονται σε μία μικρή περιοχή του φλοιού και έχουν χαρακτήρα και χρονική διάρκεια που πιθανόν να περιμέναμε από ηλεκτρικές δραστηριότητες που δημιουργούνται όχι πολύ μακριά κάτω από τα καταγράφοντα ηλεκτρόδια. Με άλλα λόγια, είναι προσωρινές μεταβολές του δυναμικού σχετικά μικρής διάρκειας που μοιάζουν με παλμούς στις συνηθισμένες συχνότητες καταγραφής. Αυτές οι διαταραχές μπορούν να παίρνουν μορφή απομονωμένων παλμών με διάρκεια γύρω στα 15 msec οι οποίοι συμβαίνουν στην

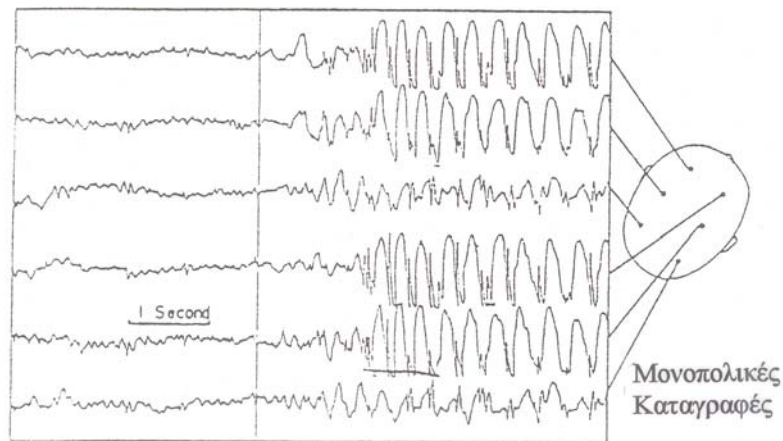
τύχη, η απότομων κυμάτων (διάρκειας μέχρι 200 msec). Αυτοί οι παλμοί προέρχονται από το εσωτερικό του εγκεφάλου λόγω των υψηλών δυναμικών τους. Ένα παράδειγμα τυχαίων παλμών που καταγράφονται διαμέσου του κρανίου και αργότερα από τον εκτεθειμένο φλοιό ενός ασθενούς με ένα εσωτερικό τραύμα περιγράφονται στο Σχ.6.9.



**Σχήμα 6.9.** Εστιακές κορυφές του φλοιού που διακρίνονται στο EEG.

Οι συντομότεροι από τους παλμούς, όταν καταγράφονται από τον εκτεθειμένο εγκέφαλο, δεν είναι μικρότεροι από 15 msec σε διάρκεια. Η διάρκεια αυτή αντιστοιχεί περισσότερο σε ηλεκτρική δραστηριότητα ενός δενδρίτου παρά στην δραστηριότητα του σώματος ή του άξονα ενός κυττάρου. Σε κανονικές καταστάσεις δεν υπάρχει ένδειξη ότι οι δενδρίτες παράγουν παλμούς. Το γεγονός επίσης ότι ηλεκτρικοί παλμοί ποτέ δεν παρατηρούνται σε κανονικό EEG μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πολλοί από τους ηλεκτρικούς παλμούς ενός επιληπτικού ασθενή μπορεί να δημιουργούνται εξαιτίας ανώμαλης λειτουργίας των δενδριτών.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία περιέχει καταγραφές από δραστηριότητα στην επιφάνεια η οποία προέρχεται από εσωτερικές κακώσεις του εγκεφάλου. Αυτές οι ανωμαλίες διακρίνονται από τις προηγούμενες που περιγράφηκαν στο ότι, αντί να εντοπιστούν στο ένα ημισφαίριο του εγκεφάλου, παρατηρούνται ταυτόχρονα σε αντίστοιχες περιοχές των δύο ημισφαιρίων. Οι παλμοί αυτοί είναι υψηλού δυναμικού, του ίδιου εύρους, συνήθως πιο διακριτοί στις μεσαίες και μπροστινές περιοχές του κεφαλιού και σχεδόν πάντοτε ταυτόχρονοι και στα δύο μέρη. Μία τυπική περίπτωση δίνεται στο Σχ. 6.10.



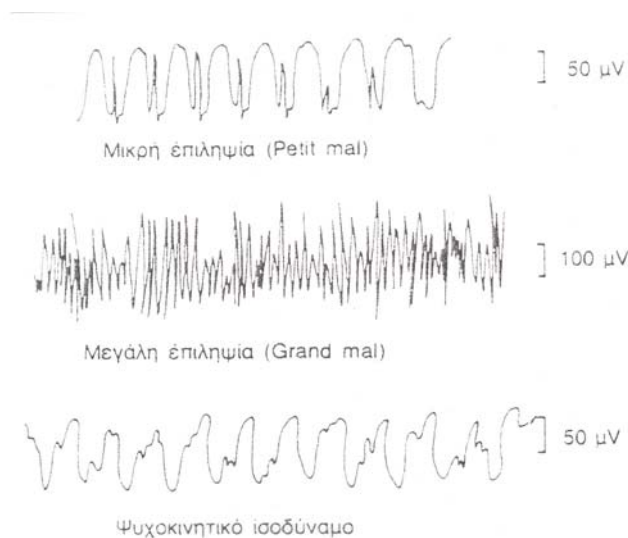
**Σχήμα 6.10.** Παράδειγμα έναρξης κρίσης ελαφράς μορφής επιληψίας (*petit mal*).

Το πρότυπο αιχμής-κύματος στις καταγραφές των εγκεφαλικών κυμάτων χαρακτηρίζει την έναρξη μίας προσβολής ελαφράς μορφής επιληψίας (*petit mal*), της οποίας η διάρκεια είναι πολύ σύντομη, διαρκεί γύρω στα 3-30 sec και έχει σαν συνέπεια την απώλεια της συνείδησης.

Υπάρχει ένα δεύτερο είδος επιληψίας, η μεγάλη μορφή επιληψίας (*grand mal*) κατά τη διάρκεια της οποίας παρατηρούνται υπέρμετρες εκφορτίσεις των νευρώνων οι οποίες εξαπλώνονται καθόλη την έκταση του κεντρικού νευρικού συστήματος, στο φλοιό, στα βαθύτερα κείμενα τμήματα του εγκεφάλου, ακόμη και στο νωτιαίο μυελό. Οι εκφορτίσεις αυτές προκαλούν γενικευμένες τονικές συσπάσεις ολοκλήρου του σώματος. Η κρίση της μεγάλης μορφής επιληψίας διαρκεί από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι τρία ως τέσσερα λεπτά και χαρακτηρίζεται από μετεπιληπτική καταστολή ολοκλήρου του νευρικού συστήματος. Το άτομο μένει σε κατάσταση ψυχοκινητικής καταστολής για ένα, ως πολλά λεπτά μετά την προσβολή και συχνά παρουσιάζει έντονη καταβολή των δυνάμεων για πολλές ώρες.

Η μεσαία γραφική παράσταση του Σχ. 6.11 αντιπροσωπεύει το τυπικό EEG κάθε σχεδόν περιοχής του φλοιού κατά τη διάρκεια της προσβολής μεγάλης μορφής επιληψίας. Το EEG δείχνει ότι παρατηρούνται μεγάλης τάσης σύγχρονες εκφορτίσεις της ίδιας σχεδόν περιοδικότητας με τα φυσιολογικά α-κύματα σ'ολόκληρη την έκταση του φλοιού. Επιπλέον παρατηρείται ο ίδιος τύπος εκφόρτισης και στις δύο πλευρές του εγκεφάλου ταυτόχρονα, γεγονός που σημαίνει ότι η διαταραχή

προέρχεται από τα κατώτερα εγκεφαλικά κέντρα, τα οποία ελέγχουν τη δραστηριότητα του φλοιού, και όχι από τον εγκεφαλικό φλοιό.



**Σχήμα 6.11.** Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα διαφόρων τύπων επιληψίας.

Θα μπορούσε να αναρωτηθεί κανείς τι είναι εκείνο που σταματά την κρίση της μεγάλης επιληψίας μετά από κάποιο χρόνο; Η διακοπή της κρίσης πιστεύεται ότι οφείλεται :

- (i) σε κόπωση των νευρώνων που συμμετέχουν στην δημιουργία της κρίσης και
- (ii) σε ενεργητική αναστολή από ορισμένα νευρικά στοιχεία του εγκεφάλου.

Όλες οι ανωμαλίες που περιγράφηκαν στη δεύτερη κατηγορία κυρίως βρίσκονται σε περιπτώσεις οι οποίες ονομάζονται «ιδιοπαθής» τύπος επιληψίας ο οποίος θεωρείται κληρονομικός επειδή δεν υπάρχει καμία γνωστή αιτία για την απόκτηση του. Ανωμαλίες συνήθως βρίσκονται στις καταγραφές στενών συγγενών επιληπτικών ασθενών. Προσεγγιστικά, τα 2/3 αυτών των ασθενών έχουν κάποια ανωμαλία στις καταγραφές τους μεταξύ προσβολών.

Λιγότερο γνωστές μορφές ανώμαλων κυμάτων που παρατηρήθηκαν μερικές φορές στις καταγραφές επιληπτικών ασθενών περιέχουν ακανόνιστα αργά κύματα, συχνά αναμεμιγμένα με απότομα κύματα. Όμως, όταν αυτά τα αργά κύματα εμφανίζονται να παρουσιάζουν μία συνέχεια, μπορούν να δηλώνουν μία κάκωση,

επειδή αυτά είναι τα κύματα που βρίσκονται σε ιστούς που συνορεύουν με όγκους στον εγκέφαλο, και είναι γνωστά σαν δ-κύματα.

Τέλος, επιληπτικοί ασθενείς μπορεί να έχουν EEG τα οποία παρουσιάζουν τέτοιες ανωμαλίες, που δεν προσαρμόζονται σε καμία από τις δύο κατηγορίες που περιγράψαμε. Μπορεί να μην υπάρχει μία γνωστή ανωμαλία, αλλά πολλές αναμειγμένες ανωμαλίες, που έχουν πιθανώς περισσότερες από μία εστίες. Μία καταγραφή ενός τέτοιου είδους προκαλεί υποψίες για διάχυτη αρρώστια ή ατροφία του φλοιού, αλλά δεν μπορεί να γίνει μία προς μία συσχέτιση με την κλινική εικόνα (για περισσότερες βλέπε το βιβλίο της Brazier).

### **6.7. Μαγνητική Δραστηριότητα του Εγκεφάλου**

Η μαγνητοεγκεφαλογραφία είναι η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στον εγκέφαλο. Τα ηλεκτρικά ρεύματα στον εγκέφαλο προέρχονται από τις κινήσεις των ιόντων οι οποίες προκαλούνται από τις αλλαγές του δυναμικού κατά μήκος των μεμβρανών των νευρικών κυττάρων. Οι αλλαγές στο δυναμικό των μεμβρανών και οι κινήσεις των ιόντων ξεκινούν από τους δένδριτες των νευρικών κυττάρων.

Η μελέτη των μαγνητικών πεδίων του εγκεφάλου έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Στα αρχικά στάδια η έρευνα βασιζόταν στην εύρεση των μαγνητικών πεδίων σε σχέση με τις διάφορες ιδιότητες των αισθήσεων. Ωστόσο οι νέες εξελίξεις στην τεχνολογία οδήγησαν στην αναζήτηση μιας πιο εύχρηστης κλινικής μεθόδου για την μελέτη του ανθρωπίνου εγκεφάλου.

Η ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου του σώματος παρουσιάζεται δύσκολη διότι οι τιμές είναι περίπου  $10^{10}$  φορές μικρότερες από την ένταση του μαγνητικού πεδίου της γης. Επιπλέον, το πεδίο αυτό πρέπει να μετρηθεί παρουσία θορύβου, ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μαγνητικό πεδίο του ανθρώπινου σώματος.

Το βιομαγνητόμετρο SQUID (Biomagnetometer SQUID) είναι το μοναδικό όργανο που μπορεί να μετρήσει πολύ μικρά μαγνητικά πεδία, τα οποία παράγονται από ποικίλες δραστηριότητες, τόσο του ανθρώπινου σώματος όσο και του περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, το υπεραγωγίμο μαγνητόμετρο χαμηλής

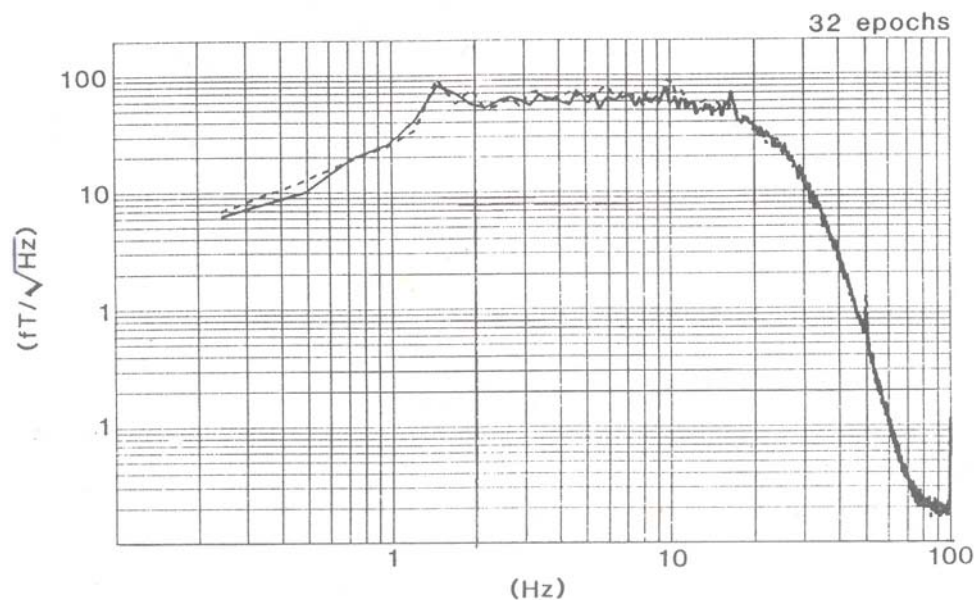


θερμοκρασίας είναι ο πιο ευαίσθητος ανιχνευτής μαγνητικής ροής που υπάρχει σήμερα.

Μ' αυτή τη συσκευή μπορούμε να μετρήσουμε μαγνητικά πεδία της τάξης των  $2 \times 10^{-8} \text{ G}$  από τον εγκέφαλο, τα οποία αντιστοιχούν σε δραστηριότητες του για τις α-συχνότητες (8-13 Hz) ή μαγνητικά πεδία της τάξης των  $5 \times 10^{-9} \text{ G}$  για προκλητά δυναμικά από οπτικά ερεθίσματα. Το μαγνητικό πεδίο το οποίο μετρείται από την καρδιά είναι της τάξης  $10^{-5} \text{ G}$ .

Για να πάρουμε μια ιδέα του πόσο μικρά είναι αυτά τα πεδία, θα θέλαμε να δώσουμε μερικά γνωστά μεγέθη μαγνητικών πεδίων για σκοπούς σύγκρισης : Το μαγνητικό πεδίο της γης είναι  $0,56 \text{ G}$  και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνήτη είναι  $IT=10^4 \text{ G}$ .

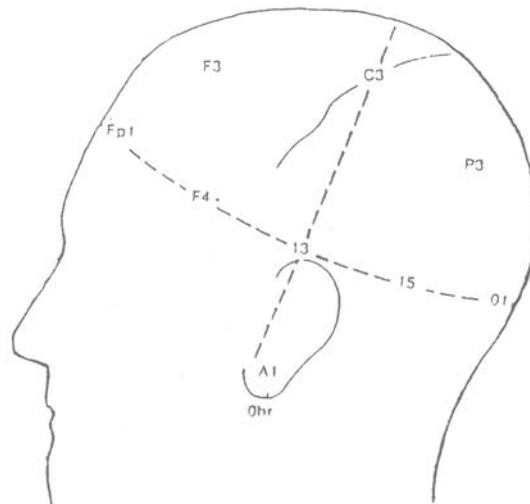
Χρησιμοποιώντας το SQUID σ'ένα ακουστικά και ηλεκτρικά μονωμένο δωμάτιο μετρούμε τα μαγνητικά πεδία από τον εγκέφαλο, από διαφορετικά άτομα. Η καταγραφή των μαγνητικών πεδίων αποτελεί το μαγνητοεγκεφαλογράφημα (MEG). Το επίπεδο του θορύβου στο περιβάλλον του SQUID είναι της τάξης των  $50 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$  (Σχ. 6.12).



**Σχήμα 6.12.** Στο σχήμα αυτό περιγράφεται ο εκτιμητής του φάσματος ισχύος και διακρίνεται η ισχύς του θορύβου στο περιβάλλον του SQUID που είναι της τάξης  $50 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$ .

Ο ανιχνευτής του SQUID είναι τοποθετημένος σε υγρό ήλιο θερμοκρασίας  $4^{\circ}$  K. Η ευαισθησία του μηχανήματος έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να πλησιάζει τα  $95$   $pT/Volt$  στη μέγιστη ευαισθησία.

Οι ασθενείς τοποθετούνται πάνω σ'ένα ειδικό ξύλινο κρεβάτι με το κεφάλι πάνω σ'ένα ειδικό μαξιλάρι γεμάτο με αέρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων εκτός από τον άρρωστο και το γιατρό δεν παραβρίσκεται κανένα άλλο άτομο μέσα στο δωμάτιο εξέτασης. Χρησιμοποιούμε το Διεθνές Σύστημα Σημείων (IPS) για την καταγραφή του MEG από τα άτομα (Σχ.6.13). Μετά την τοποθέτηση του SQUID σε κάθε συγκεκριμένο σημείο, τα άτομα ζητούνται να ηρεμήσουν και να κλείσουν τα μάτια τους για δύο λόγους :



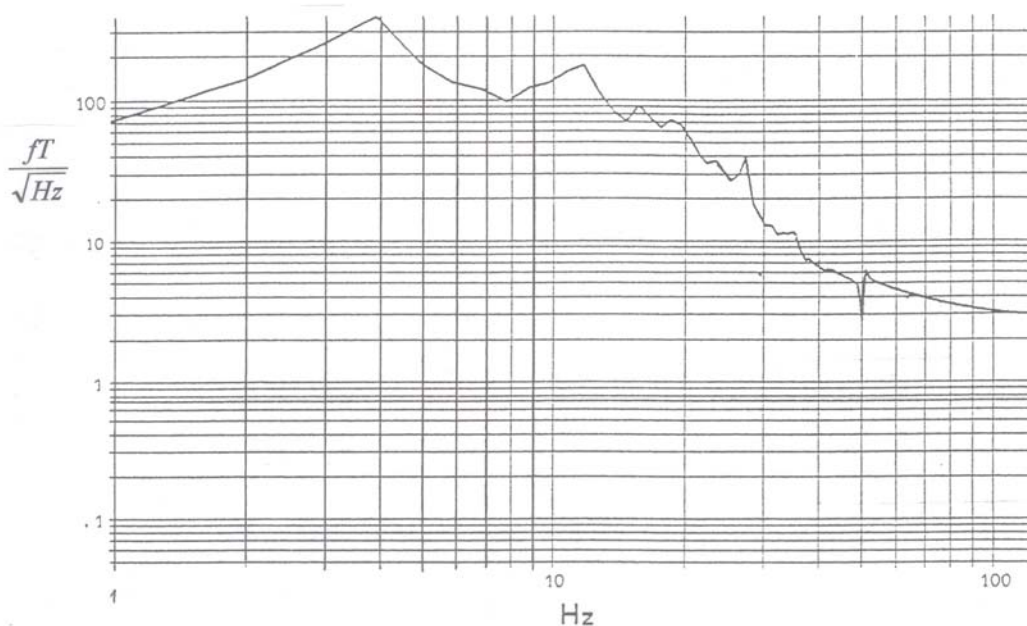
**Σχήμα 6.13.** Διεθνές σύστημα 10-20 Ηλεκτροεγκεφαλογραφικής τοποθέτησης ηλεκτροδίων.

- (α) Για να αποφύγουμε τον εξωτερικό θόρυβο που δημιουργείται από το τρεμπάιγμα των ματιών.
- (β) Για να καταγράψουμε τον  $\alpha$ -ρυθμό ( $8-13$  Hz), επειδή μας ενδιαφέρει να λάβουμε το MEG από την περιοχή του ινιακού φλοιού. Επιπλέον εισάγουμε ένα τόνο φωνής της τάξης των  $12$  Hz για να αυξήσουμε τον  $\alpha$ -ρυθμό του ατόμου για καλύτερη καταγραφή του MEG σε ένα μη-μαγνητικά μονωμένο δωμάτιο.

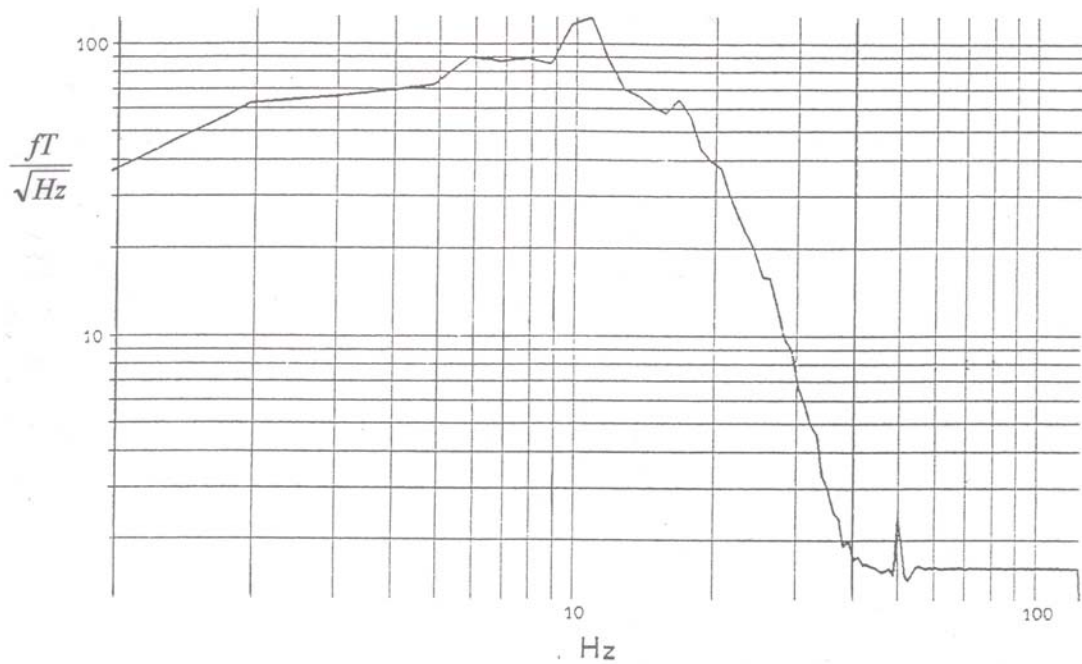
Σ' αυτό το πείραμα για κάθε σημείο μέτρησης και για κάθε άτομο παίρνουμε 32 καταγραφές και η συνολική διάρκεια κάθε καταγραφής είναι 1 sec. Τέλος για σκοπούς σύγκρισης μετρούμε τα ίδια σημεία με ερέθισμα και χωρίς ερέθισμα.

Για να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου πριν από το πείραμα δεν ζητούμε να μάθουμε από τα άτομα οποιαδήποτε πληροφορία για το ιστορικό τους. Σκοπός μας είναι να δούμε αν μπορούμε να εξάγουμε οποιαδήποτε πληροφορία αποκλειστικά από τη φασματική ανάλυση του MEG. Χρησιμοποιώντας έτσι το παραπάνω πείραμα βρίσκουμε μεταξύ διαφόρων ασθενών έναν του οποίου το φάσμα του MEG δείχνει ένα μέγιστο στα 3-4 Hz και είναι κυματικής μορφής. Αυτό είναι μία ένδειξη ελαφράς μορφής επιληψίας.

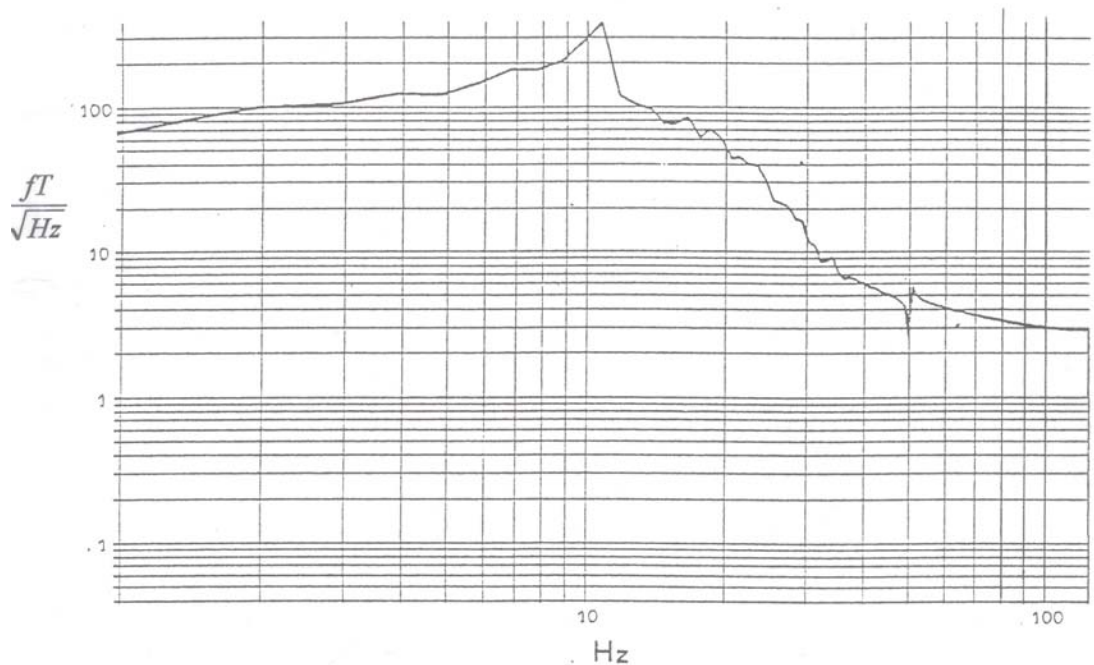
Το Σχ. 6.14 περιγράφει το φάσμα ισχύος του μαγνητικού πεδίου ενός επιληπτικού ασθενή που προέκυψε από 32 καταγραφές με διάρκεια κάθε καταγραφής 1 sec. Ο ακροδέκτης του SQUID τοποθετείται κάθε φορά κοντά στο σημείο  $P_3$  των 10-20 IPS. Σ' αυτό το σχήμα φαίνεται καθαρά μία κορυφή κοντά στα 4 Hz καθώς και μία άλλη του α-ρυθμού.



**Σχήμα 6.14.** Εξομαλυμένο φάσμα ισχύος από 32 μετρήσεις που πήραμε από τον εγκέφαλο ενός επιληπτικού ατόμου για μια περίοδο 1 sec για κάθε μέτρηση. Η κεραία λήψης του SQUID τοποθετήθηκε σ' ένα σημείο γύρω από το  $P_3$  (IPS). Σ' αυτό το σχήμα φαίνεται καθαρά η μέγιστη ένδειξη στην συχνότητα 4 Hz, καθώς επίσης και η μέγιστη ένδειξη της α-συχνότητας.



**Σχήμα 6.15.** Εξομαλυμένο φάσμα ισχύος από 32 μετρήσεις που πήραμε από το επιληπτικό άτομο που αναφέραμε στο σχήμα 6.14 διάρκειας 1 sec για κάθε μέτρηση. Η κεραία λήψης του SQUID για αυτές τις μετρήσεις τοποθετήθηκε μακριά από το P3 (IPS). Σ' αυτό το σχήμα μπορούμε να δούμε μόνο την μεγίστη ένδειξη της α-συχνότητας, ενώ η ένδειξη της επιληπτικής εστίας δε φαίνεται όπως στο Σχήμα 6.14.

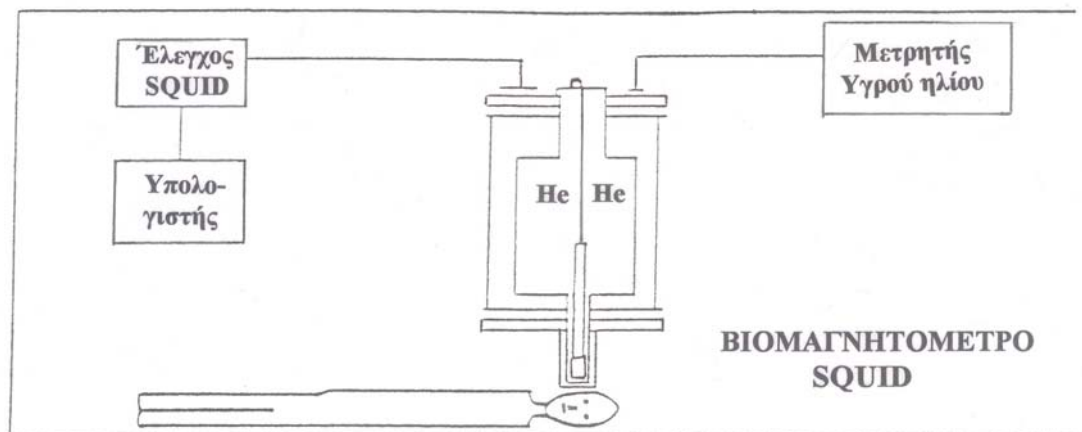


**Σχήμα 6.16.** Εξομαλυμένο φάσμα ισχύος που πήραμε από τον εγκέφαλο ενός κανονικού ατόμου με τις ίδιες συνθήκες καταγραφής όπου φαίνεται μόνο η μεγίστη ένδειξη της α-συχνότητας.

Το Σχ. 6.15 παριστάνει το φάσμα ισχύος του μαγνητικού πεδίου ενός επιληπτικού ασθενή, που προέκυψε με τον ίδιο τρόπο όπως αναφέρθηκε ανωτέρω με τη διαφορά ότι ο ακροδέκτης του SQUID τοποθετήθηκε αρκετά μακριά από το σημείο  $P_3$  των 10-20 IPS. Σ' αυτό το σχήμα παρατηρούμε μόνο την κορυφή του α-ρυθμού και όχι την κορυφή λόγω επιληπτικής εστίας που φαίνεται στο Σχ. 6.14.

Το MEG ενός φυσιολογικού ατόμου δείχνεται στο Σχ.6.16 όπου διακρίνεται μόνο η κορυφή των 12 Hz.

Το Σχ. 6.17 είναι μία απεικόνιση της εξέτασης ασθενή με το βιομαγνητόμετρο SQUID. Η απόσταση του ασθενή από το SQUID είναι 3mm (αποφεύγονται με τον τρόπο αυτό τα δυναμικά επαφής), η δε λήψη του εκπεμπόμενου από τον εγκέφαλο σήματος γίνεται από κάθετη θέση.



**Σχήμα 6.17.** Σχηματική απεικόνιση εξέτασης ασθενή με το βιομαγνητόμετρο SQUID.

Μέχρι τώρα η μόνη τεχνική που γνωρίζουμε για τον εντοπισμό των επιληπτικών περιπτώσεων ήταν αυτή που σχετίζεται με το EEG. Ωστόσο η τεχνική αυτή περιορίζεται από το γεγονός ότι το EEG πρέπει να καταγράφεται κατά τη διάρκεια της επιληπτικής κρίσης. Έτσι οι νευρολόγοι δεν παρατήρησαν ανωμαλίες στα καταγραφόμενα EEG σε στιγμές που οι ασθενείς δεν είχαν κρίσεις. Το πλεονέκτημα στην περίπτωση του MEG είναι ότι μπορεί να μας δώσει πληροφορία για την κατάσταση των ατόμων όχι μόνο κατά τη διάρκεια της επιληπτικής κρίσης αλλά και κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε χρονικής στιγμής.

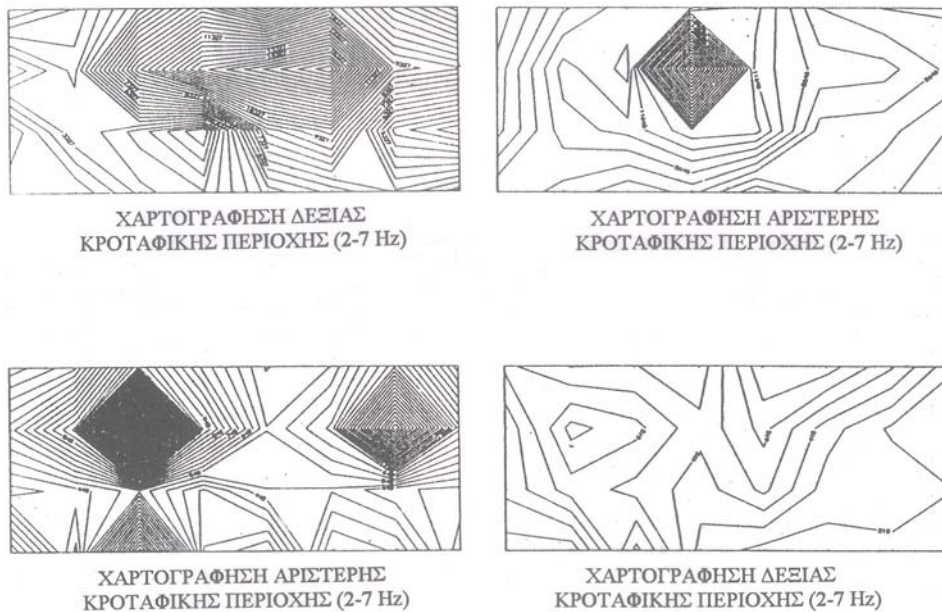
Άλλα πλεονεκτήματα του MEG έναντι του EEG είναι τα εξής :

- α) Απαλλαγή από την παρεμβολή των δυναμικών επαφής. Το MEG μετράει μόνο κάθετες συνιστώσες της μαγνητικής ροής χωρίς να παρεμβάλλονται πλάγιες συνιστώσες διπλανών σημείων.
- β) Αυξημένη ευαισθησία
- γ) Είναι δυνατή η χαρτογράφηση περιοχής του εγκεφάλου για τη διαπίστωση επιληπτικής εστίας, όπως περιγράφεται κατωτέρω.

Υπάρχει όμως και ένα σημαντικό μειονέκτημα του MEG έναντι του EEG. Το κόστος του SQUID είναι πολύ μεγαλύτερο από τη συσκευή των ηλεκτροδίων που απαιτείται για την καταγραφή του EEG.

Σε κάθε μέτρηση με το SQUID λαμβάνουμε τη μαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται μόνο από μία κυκλική περιοχή του φλοιού, διαμέτρου  $2.36\text{ cm}$  (λόγω της διαμέτρου του πηνίου εισόδου του μηχανήματος) και βάθους  $3-4\text{ cm}$ , χωρίς να επηρεαζόμαστε από τη μαγνητική ακτινοβολία παρακείμενων ή άλλων απομακρυσμένων περιοχών. Καταγράφουμε την εκπεμπόμενη μαγνητική ακτινοβολία από 32 σημεία του κάθε εγκεφαλικού ημισφαιρίου, που είναι τοποθετημένα σε τέσσερις σειρές των οκτώ σημείων, έτσι ώστε το κάθε σημείο να απέχει από το γειτονικό του  $1.5\text{ cm}$ , δηλαδή το μισό της διαμέτρου του πηνίου εισόδου του SQUID.

Συνολικά δηλαδή καταγράφουμε την εκπεμπόμενη μαγνητική ακτινοβολία τουλάχιστον 64 σημείων του κεφαλιού (σε πολλά άτομα γίνεται και πλήρης καταγραφή δηλαδή ολική χαρτογράφηση). Όπως αναφέραμε παραπάνω, για κάθε σημείο παίρνουμε 32 διαφορετικές καταγραφές, κάθε καταγραφή είναι διάρκειας περίπου  $1\text{ sec}$  και οι παρατηρήσεις λαμβάνονται με συχνότητα δειγματοληψίας  $256\text{ Hz}$ . Για την αποφυγή του σήματος θορύβου η μαγνητοεγκεφαλογραφική δραστηριότητα περιορίζεται μεταξύ  $0.1$  και  $30\text{ Hz}$ . Υπολογίζουμε τα φάσματα ισχύος των παρατηρημένων σημάτων και στη συνέχεια με τη χρήση μιας τεχνικής δισδιάστατης χωρικής απεικόνισης φθάνουμε στη μαγνητοεγκεφαλογραφική χαρτογράφηση για την οποία υπολογίζονται χάρτες της πυκνότητας της φασματικής ισχύος κατά δέσμες συχνοτήτων ( $2-7\text{ Hz}$ ,  $7-14\text{ Hz}$ ,  $14-25\text{ Hz}$ ) που μας επιτρέπουν να εξακριβώσουμε εύκολα την ύπαρξη περιοχής με μεγάλη πυκνότητα εκπομπής μαγνητικής ακτινοβολίας στις χαμηλές παθολογικές συχνότητες ( $2-7\text{ Hz}$ ). Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο Σχ.6.18.

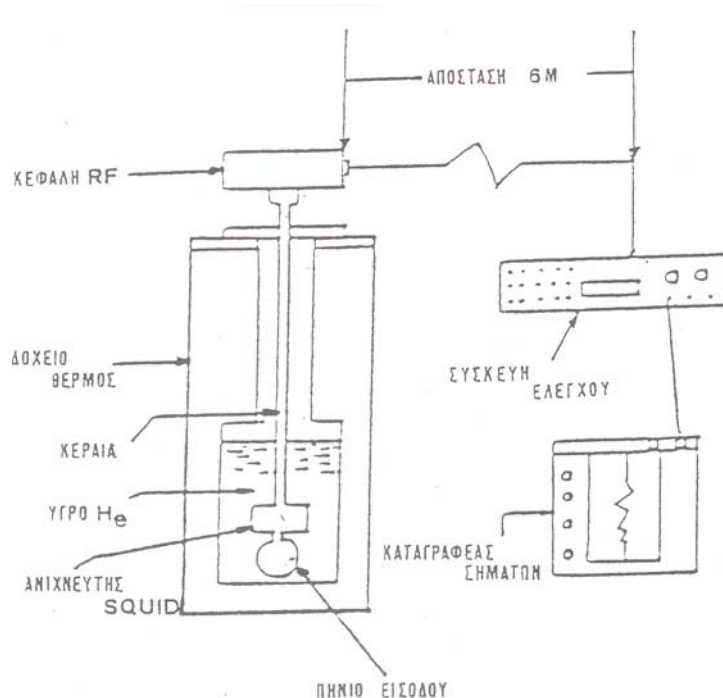


**Σχήμα 6.18.** Χάρτες ισοφασματικών πλατών για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιληπτικών ατόμων και για ένα φυσιολογικό άτομο.

### 6.8. Περιγραφή του SQUID

Το SQUID, όπως αναφέραμε ανωτέρω, αποτελεί μια ειδική συσκευή μέτρησης μαγνητικών πεδίων που ανακαλύφθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 60. Τα αρχικά “*Superconducting Quantum Interference Device*” αποδίδονται στα ελληνικά ως «Υπεραγώγιμη Κβαντική Συσκευή Συμβολής». Για πρώτη φορά το SQUID μαζί με τα ηλεκτρονικά συστήματα που το συνοδεύουν εμφανίστηκε στο εμπόριο το 1970. Οι συσκευές αυτές τώρα χρησιμοποιούνται από αρκετούς επιστήμονες σ’ όλο τον κόσμο.

Το σύστημα SQUID περιλαμβάνει υπεραγώγιμα υπερευαίσθητα μαγνητόμετρα και συστήματα μέτρησης, καθώς και όργανα για μέτρηση της ηλεκτρικής και μαγνητικής συμπεριφοράς των υλικών σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (σήμερα βρίσκονται υπό πειραματική κατασκευή υλικά που γίνονται υπεραγώγιμα σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες, έως και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος). Ένα απλό σύστημα SQUID με το οποίο κάνουμε μετρήσεις μαγνητικών πεδίων από μία απόσταση περιγράφεται στο Σχήμα 6.19.



**Σχήμα 6.19.** Σχηματική παράσταση ενός τυπικού συστήματος SQUID για ανίχνευση μαγνητικών πεδίων.

Ο ανιχνευτής SQUID και το κύκλωμα εισόδου που τον συνοδεύει πρέπει να λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτό το λόγο το SQUID βυθίζεται σε υγρό ήλιο θερμοκρασίας  $4,2^{\circ} K$  υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Το δοχείο θέρμος είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί το SQUID για μερικές μέρες μέχρι να χρειαστεί επαναπλήρωση με ήλιο. Η πρόψυξη του γίνεται με υγρό άζωτο.

Μια κεραία χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας (RF transmission line) συνδέει τον ανιχνευτή του SQUID με την RF κεφαλή, που είναι τοποθετημένη στην κορυφή του δοχείου θέρμος, και αυτή με τη σειρά της τον συνδέει με μία ξεχωριστή συσκευή ελέγχου, όπου παραλαμβάνεται το εξερχόμενο σήμα.

Επίσης, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός χαμηλής ευαισθησίας ενισχυτή θορύβου, του οποίου το δυναμικό εξόδου αλλάζει σε σχέση με την αλλαγή του ρεύματος στην είσοδό του.

Το σήμα εισόδου συνδέεται με τον ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος μέσα στο υγρό ήλιο στη βάση της κεραίας του SQUID, μ' ένα ζευγάρι υπεραγωγίων πηνίων εισόδου. Το ρεύμα διαμέσου του ζεύγους των ακροδεκτών οδηγεί τη μαγνητική ροή μέσα στον ανιχνευτή του SQUID διαμέσου πηνίων  $2\mu H$ .



Ο ανιχνευτής περιέχει ένα RF πηνίο το οποίο χρησιμοποιείται για να εκπέμπει ένα σήμα 19 MHz από την RF κεφαλή (το RF δηλώνει ραδιοσυχνότητα). Το εύρος του RF στον ανιχνευτή ρυθμίζεται από το σήμα της εισόδου, το οποίο καθορίζεται από την RF κεφαλή και μεταφέρεται διαμέσου ενός συνδεδεμένου καλωδίου στο τμήμα ελέγχου. Αυτό χρησιμοποιείται για να παράγει ένα αρνητικό παλλινδρομικό σήμα, το οποίο ακυρώνει την αλλαγή της ροής στον ανιχνευτή που προκαλείται από το σήμα εισόδου. Το εύρος αυτού του παλλινδρομικού σήματος, είναι ως εκ τούτου ανάλογο με το ρεύμα εισόδου και χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί το σύστημα του δυναμικού εξόδου.

Επιπρόσθετα για την πρόκληση των απαιτούμενων σημάτων, τόσο των παλλινδρομικών, όσο και αυτών της εξόδου, η συσκευή ελέγχου έχει και άλλες χρήσιμες λειτουργίες. Αυτές είναι η ενίσχυση και το φιλτράρισμα του σήματος εξόδου, ο από μακριά έλεγχος της RF κεφαλής και η παραγωγή διαγνωστικών σημάτων ελέγχου (για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το SQUID και τις εφαρμογές του βλέπε τη διδακτορική διατριβή του Ραζή Αλεξανδράτου).

## **6.9. Αρχές λειτουργίας**

Η λειτουργία του βιομαγνητόμετρου SQUID, στηρίζεται στο φαινόμενο Josephson (1961) της υπεραγωγιμότητας. Η υπεραγωγιμότητα είναι ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον φαινόμενο, γιατί αποτελεί μία απροσδόκητη εξαίρεση στον εμπειρικό κανόνα ότι κάθε ροή υπόκειται σε απώλειες λόγω τριβών, η δε ερμηνεία της χρειάστηκε μία μακροχρόνια (1911-1957) και εντατική προσπάθεια. Επίσης, μας δίνει την ευκαιρία να παρατηρήσουμε μακροσκοπικώς τον κυματικό και κβαντικό χαρακτήρα της ύλης. Ο φυσικός Josephson σε ηλικία 22 χρονών, μεταπτυχιακός σπουδαστής στο πανεπιστήμιο του Cambridge, διατύπωσε τη θεωρία του φαινομένου που πήρε το όνομά του, βάσει της οποίας όταν δύο μέταλλα βρεθούν στη χαμηλή θερμοκρασία των  $-269$  βαθμών Κελσίου, (κοντά στο απόλυτο μηδέν της κλίμακας Kelvin), μηδενίζεται η ηλεκτρική τους αντίσταση και αν τότε τα ενώσουμε με ένα μονωτή λεπτού πάχους, το ρεύμα της ανωτέρω διάταξης θα έχει χαρακτηριστική

ημιτονοειδή μορφή και θα μεταπηδάει διαμέσου του μονωτή από το ένα μέταλλο στο άλλο.

Το βασικό κύκλωμα του SQUID , όπως φαίνεται στο Σχ.6.20 αποτελείται από το πηνίο εισόδου με αυτεπαγωγή  $L_1$ . Αυτό συνδέεται με το πηνίο σήματος του SQUID που έχει αυτεπαγωγή  $L_3=2mH$  (όπου  $L=$ συντελεστής αυτεπαγωγής). Τα δύο πηνία συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις που έχουν αυτεπαγωγή  $L_2$ .

Μεταβολή της ροής στο πηνίο σήματος με αυτεπαγωγή  $L_1$  συνεπάγεται και μεταβολή της ροής του πηνίου  $L_3$  λόγω της αμοιβαίας επαγωγής  $M$ , αυτές οι αλλαγές επάγονται στο SQUID (όπου  $M=$ συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής).

Το όλο κύκλωμα είναι υπεραγώγιμο επειδή, όπως έχει αναφερθεί, είναι βυθισμένο σε περιβάλλον  $4,2^\circ K$  και σύμφωνα με την κβαντομηχανική, η ολική ροή, που διαρρέει το κύκλωμα, είναι σταθερή και κβαντισμένη και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$\Phi = I(L_1 + L_2 + L_3) = n\Phi_0 \quad (6.1)$$

όπου  $\Phi_0$  είναι η κβαντική ροή και το  $n$  είναι ακέραιος αριθμός.

Το  $I$  είναι ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα λόγω μεταβολής της ροής και δίνεται σε *Ampere*. Στην περίπτωση του SQUID χρησιμοποιούμε

$$\Phi_0 = 2,7 \times 10^{-7} \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^2$$

Εάν η ροή στο πηνίο εισόδου αλλάξει κατά  $\Delta\Phi$ , το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα θα αλλάξει κατά  $\Delta I$  και θα ισχύει η σχέση :

$$\Delta\Phi + \Delta I(L_1 + L_2 + L_3) = 0, \quad (6.2)$$

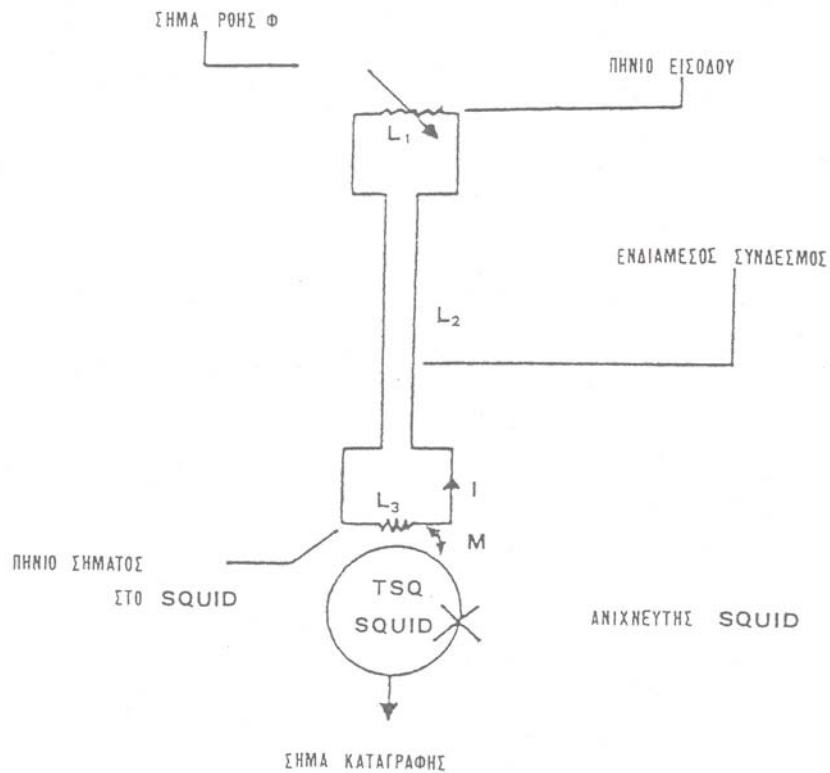
έτσι ώστε η ολική ροή διαμέσου του κυκλώματος να παραμένει σταθερή.

Ας υποθέσουμε ότι το πηνίο εισόδου έχει  $N$  σπείρες με διατομή  $A$  η κάθε σπείρα και το μαγνητικό πεδίο, κάθετο προς αυτές τις σπείρες αλλάζει κατά  $\Delta B$ , τότε ισχύει

$$\Delta\Phi = NA\Delta B \quad (6.3)$$

Επομένως, λύνοντας την εξίσωση (6.2) ως προς  $\Delta I$  έχουμε :

$$\Delta I = \frac{-\Delta\Phi}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (6.4)$$



**Σχήμα 6.20.** Βασικό κύκλωμα SQUID.

Αντικαθιστώντας το  $\Delta\Phi$  με το ίσο του από την εξίσωση (6.3) έχουμε :

$$\Delta I = \frac{-NA\Delta B}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (6.5)$$

όπου  $\Delta I$  είναι το ρεύμα που δέχεται το SQUID.

Σκοπός του κατασκευαστή είναι να φτιάξει το πηνίο εισόδου έτσι ώστε να παίρνουμε τη μέγιστη ευαισθησία που δίνεται από τη σχέση (6.5) όταν διαιρέσουμε και τα δύο μέρη με  $\Delta B$ . Δηλαδή η ευαισθησία του SQUID εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta I}{\Delta B} = \frac{-NA}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (6.6)$$

Στη σχέση αυτή το  $L_3$  είναι σταθερό και το  $L_2$  μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Η αυτεπαγωγή του πηνίου  $L_1$  είναι ανάλογη του  $N^2 A$ .