

Ποσοτική και Ποιοτική
Περιγραφή Νευροηλεκτρικών
Φαινομένων

Εισαγωγή

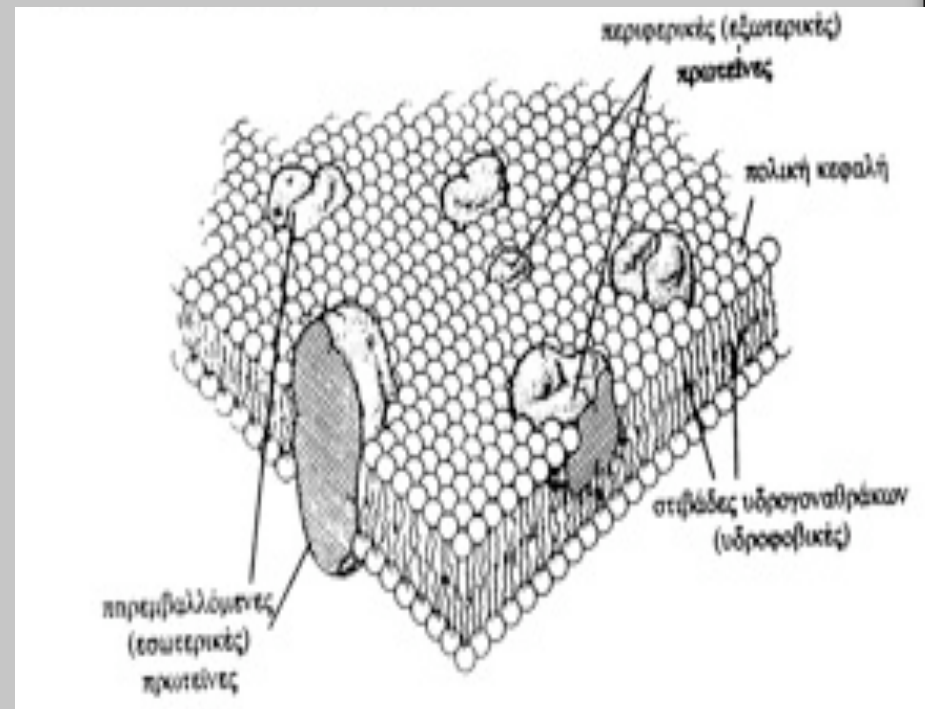
- ◎ Σκοπός: Περιγραφή της συμπεριφοράς των νευρικών κυττάρων και ποσοτικά και ποιοτικά.
- ◎ Τα νευρικά κύτταρα περιβάλλονται από μία πλασματική μεμβράνη της οποίας κύρια λειτουργία είναι να ελέγχει το πέρασμα ουσιών.
- ◎ Η μεμβράνη έχει πάχος περίπου $75 \overset{o}{\text{Å}}$ και μπορεί να θεωρηθεί σαν μία επίπεδη επιφάνεια.

Πόλωση της μεμβράνης

- ◎ Όταν το κύτταρο είναι σε κατάσταση ηρεμίας η διαφορά δυναμικού μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας και της εξωτερικής επιφάνειας της μεμβράνης είναι της τάξεως των 70 mV.
- ◎ Οφείλεται στην επιλεκτική διαπερατότητα της μεμβράνης και στη διαφορετική ιοντική σύνθεση του ενδοκυττάρριου και εξωκυττάρριου χώρου.

Κατασκευή της μεμβράνης

- ◉ Ανομοιογενής κατασκευή.
- ◉ Τα λιπίδια αποτελούν το 70% του όγκου της μεμβράνης.
- ◉ Δεν επιτρέπουν το πέρασμα των ιόντων μέσω της μεμβράνης.
- ◉ Πρωτεΐνες (εμφυτευμένες ανάμεσα στα λιπίδια) σχηματίζουν κανάλια επιτρέποντας την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ενδοκυττάριου και εξωκυττάριου χώρου.



Κατασκευή της μεμβράνης

- ⊙ Η ηλεκτρική δραστηριότητα συνδέεται με τη μετακίνηση των ιόντων νατρίου και καλίου.
- ⊙ Οι πρωτεΐνες δε βοηθούν μόνο τη ροή για κάθε ιόν, αλλά συγχρόνως ελέγχουν τη ροή αυτή δίνοντας τη δυνατότητα στη μεμβράνη να έχει επιλεκτική διαπερατότητα.
- ⊙ Η εσωτερική περιοχή της μεμβράνης συμπεριφέρεται όπως ένας μονωτής (διηλεκτρικό).

Κατασκευή της μεμβράνης

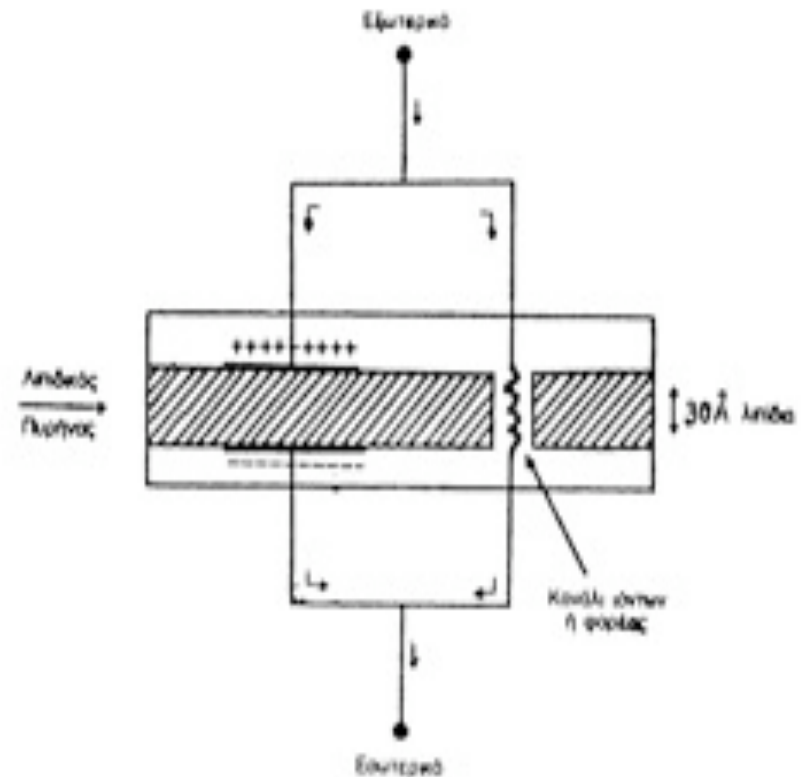
- ⊙ Χωρητικότητα του εσωτερικού της μεμβράνης (κατασκευή παράλληλων επιπέδων)

$$C_m = \frac{k\epsilon_0}{d'} = 0.9 \mu F / cm^2$$

- ⊙ Διηλεκτρική σταθερά

$$k=3$$

- ⊙ $d'=30 \text{ \AA}$



Ιοντική συμπεριφορά

- ⊙ Η συγκέντρωση των ιόντων καλίου στο εξωτερικό του κυττάρου είναι πολύ μικρότερη από τη συγκέντρωση στο εσωτερικό του.
- ⊙ Η συγκέντρωση των ιόντων νατρίου και χλωρίου στο εξωτερικό του κυττάρου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση στο εσωτερικό του.
- ⊙ Οι διαφορετικές συγκεντρώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τη διάχυση ιόντων από την υψηλή στη χαμηλή συγκέντρωση.
- ⊙ Ο βαθμός διάχυσης εξαρτάται από τη διαφορά συγκέντρωσης και τη διαπερατότητα της μεμβράνης.

Ιοντική συμπεριφορά

- ⊙ Η περιορισμένη χωρητικότητα της μεμβράνης προκαλεί συσσώρευση φορτίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού κατά μήκος της.
- ⊙ Δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο μέσα στη μεμβράνη.
- ⊙ Κάθε ποσοτική περιγραφή της ροής ιόντων στη μεμβράνη πρέπει να λάβει υπόψη της τις δυνάμεις διάχυσης καθώς επίσης και τη δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου.

Διάχυση

⊙ Προέρχεται από τη θερμική ενέργεια των μορίων και λαμβάνει χώρα προς τη διεύθυνση χαμηλότερης συγκέντρωσης ιόντων.

⊙ Νόμος του Fick: $\vec{j}_d = -D \vec{\nabla} C$

⊙ **C**: συγκέντρωση κάποιας ουσίας σαν συνάρτηση της θέσης

⊙ **D**: σταθερά αναλογίας

⊙ \vec{j}_d : ο αριθμός των σωματιδίων που μετακινούνται ανά μονάδα χρόνου διαμέσου μιας επιφανειακής τομής.

Σταθερά του Fick

⊙ Για ένα αέριο η σταθερά του Fick δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{lu}{3}$$

⊙ l : μέση διαδρομή

⊙ u : μέση μοριακή ταχύτητα

⊙ Συνήθως το D προσδιορίζεται από πειραματικές παρατηρήσεις παρά από βασικές αρχές.

Ηλεκτρικό Πεδίο

⊙ Λόγω του φορτίου τους τα ιόντα υπόκεινται σε δυνάμεις ηλεκτρικού πεδίου.

⊙ Η ροή που προκύπτει εξαρτάται από την ιοντική κινητικότητα των διαφόρων ιόντων.

⊙ Ιοντική κινητικότητα: $u_p = \frac{v_p}{E}$

⊙ Ιοντική ροή: $\vec{j}_e = -u_p \frac{Z_p}{|Z_p|} C_p \vec{\nabla} \Phi$

Ηλεκτρικό Πεδίο

- ⊙ $-\vec{\nabla} \Phi$: ένταση ηλεκτρικού πεδίου
- ⊙ $\frac{Z_p}{|Z_p|}$: το πρόσημο της δύναμης που εξασκείται στο ιόν p (+ για θετικά φορτισμένα ιόντα και - για αρνητικά φορτισμένα ιόντα)
- ⊙ $-u_p \frac{Z_p}{|Z_p|} \vec{\nabla} \Phi$: μέση ταχύτητα ου ιόντος
- ⊙ Η ροή εκφράζεται σε moles/(m².sec)
- ⊙ Η ιοντική κινητικότητα εξαρτάται από το ιξώδες του διαλύματος, το μέγεθος του ιόντος και το φορτίο του.

Εξίσωση του Einstein

- ⊙ Η σχέση της ιοντικής κινητικότητας και της σταθεράς του Fick δίνεται από τον τύπο:

$$D_p = \frac{u_p RT}{|Z_p| F}, \quad \frac{RT}{F} = \frac{8.314 * 300}{96487} = 25.8mV$$

- ⊙ Η παραπάνω σχέση μπορεί να αποδειχθεί με τη χρήση των ποσοτήτων D και u_p για ηλεκτρόνια που κινούνται σε ημιαγωγούς.

Ολική ροή

- ◉ Η ολική ροή ενός ιόντος p δίνεται από τη σχέση (Εξίσωση Nerst-Planck):

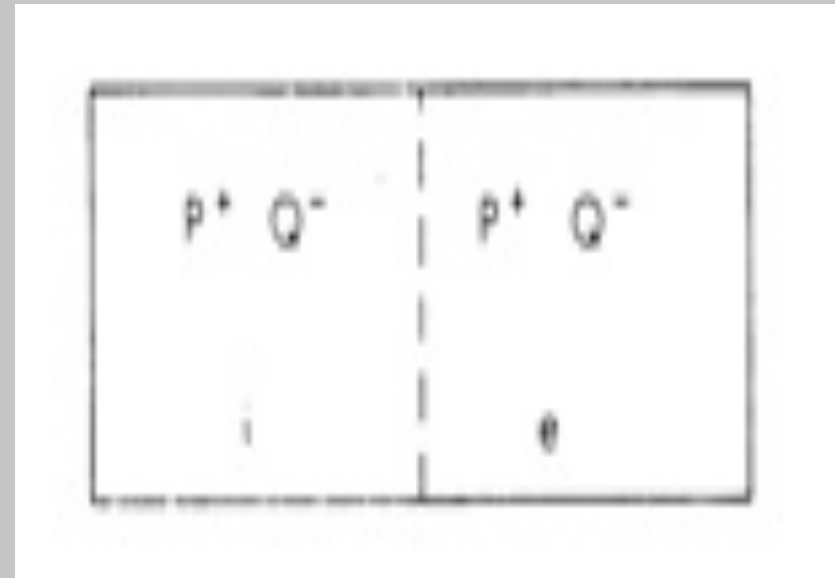
$$\vec{j}_p = \vec{j}_d + \vec{j}_e, \quad \vec{j}_p = -D_p \left(\vec{\nabla} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \vec{\nabla} \Phi \right)$$

- ◉ Η ροή αυτή μετατρέπεται σε μια πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος όταν την πολλαπλασιάσουμε με $F \cdot Z_p$
- ◉ Η πυκνότητα ρεύματος δίνεται σε **Amperes/m²**

$$\vec{j}_p = - \left(u_p RT \frac{Z_p}{|Z_p|} \vec{\nabla} C_p + u_p |Z_p| C_p F \vec{\nabla} \Phi \right)$$

Συγκέντρωση ιόντων στο κύτταρο

- Η συγκέντρωση του ιόντος P^+ στο χώρο i ξεπερνά αυτή του χώρου e και επιπλέον το ιόν Q^- είναι αδιαπέραστο ως προς τη μεμβράνη.
- Συγκέντρωση θετικών φορτίων στο χώρο e και αρνητικών φορτίων στο χώρο i .
- Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου με κατεύθυνση από το e στο i , το οποίο αυξάνει λόγω της διάχυσης P^+ από το i στο e .
- Παρεμπόδιση διάχυσης μέχρι την πλήρη διακοπής της \rightarrow κατάσταση ισορροπίας



Κατάσταση ισορροπίας του Nernst

- ◉ Στην κατάσταση ισορροπίας η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου εξισορροπεί τη δύναμη της διάχυσης.

$$\vec{j}_p = 0 = -D_p F Z_p \left(\vec{\nabla} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \vec{\nabla} \Phi \right)$$

$$\vec{\nabla} C_p = -\frac{Z_p C_p F}{RT} \vec{\nabla} \Phi$$

- ◉ Θεωρούμε ότι οι ποσότητες μεταβάλλονται μόνο προς τη διεύθυνση που είναι κάθετη στη μεμβράνη.
- ◉ **Δυναμικό του Nernst:**

$$\Delta = \frac{59.4}{Z_p} \log_{10} \left(\frac{[C_p]_e}{[C_p]_i} \right) \quad mV$$

- ◉ Μπορεί να ερμηνευθεί σαν το δυναμικό για το οποίο το p ιόν είναι σε ισορροπία με τη δύναμη της διάχυσής του.

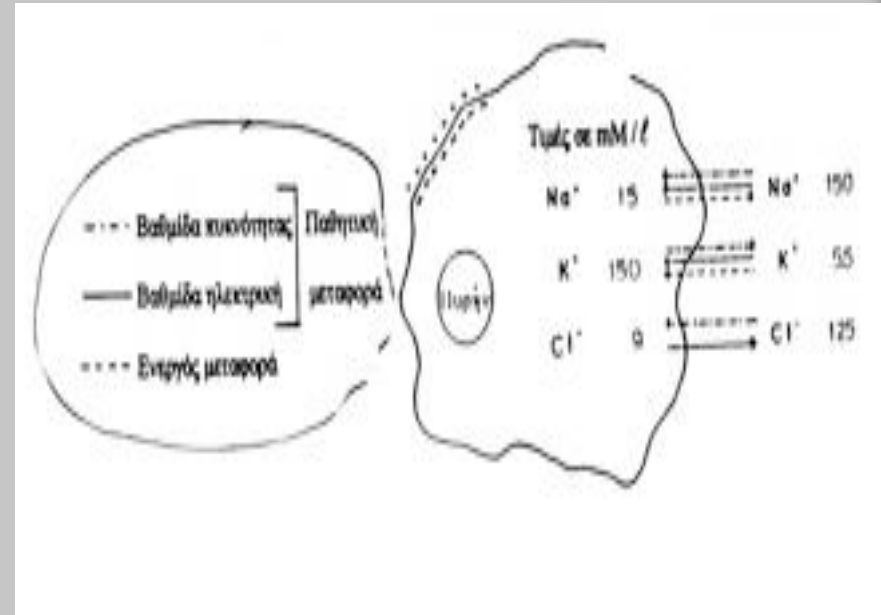
Συστατικά εσωτερικού και εξωτερικού υγρού των κινητονεύρων της γάτας

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.

	Εσωτερικό υγρό ($\mu\text{M}/\text{cm}^3$)	Εξωτερικό υγρό ($\mu\text{M}/\text{cm}^3$)
Na^+	15	150
K^+	150	5.5
Υπόλοιπα	2	4.5
Άθροισμα	<u>167</u>	<u>160</u>
Cl^-	9	125
HCO_3^-	8	27
A^-	150	-
Υπόλοιπα	0	8
Άθροισμα	<u>167</u>	<u>160</u>

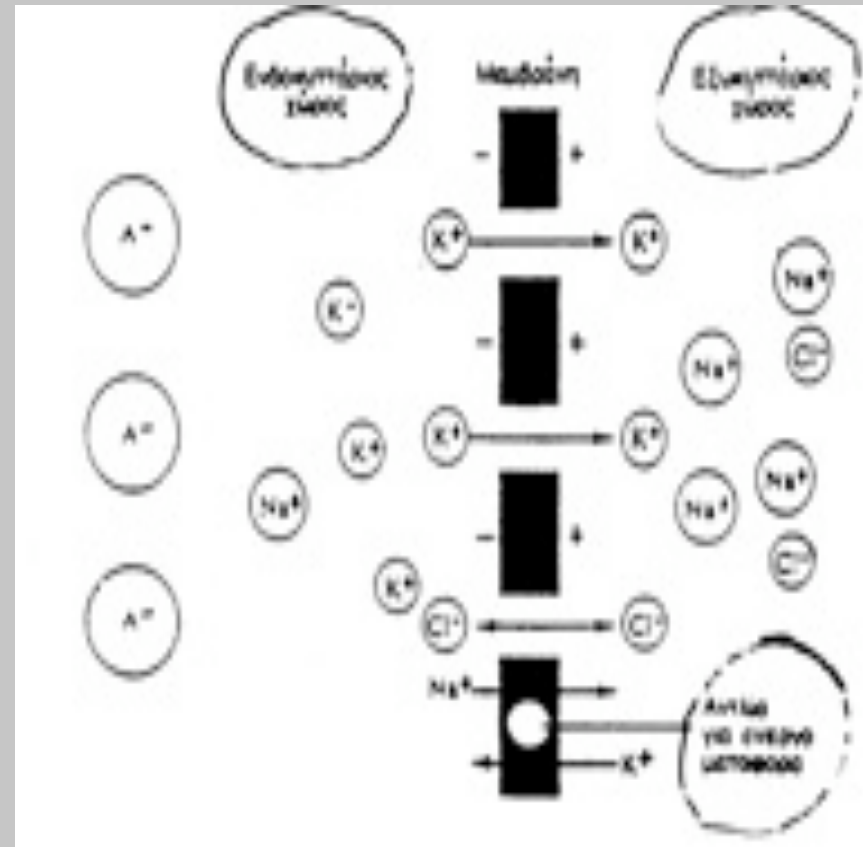
Σχηματική παράσταση των συγκεντρώσεων των 3 κύριων ιόντων στο εσωτερικό και εξωτερικό του κυττάρου

- ⊙ Η διαπερατότητα της μεμβράνης και η κινητικότητα του ιόντος αντικατοπτρίζουν την ευκολία με την οποία το δεδομένο ιόν περνά μέσα από τη μεμβράνη.
- ⊙ Εξαρτώνται από το βαθμό ενυδάτωσης του ιόντος και από τους “πόρους” της μεμβράνης.



Κίνηση ιόντων K^+ και Cl^- της μεμβράνης του νευρικού κυττάρου

- Οι διαφορές στα “λειτουργικά” μεγέθη των διαφόρων ιόντων επιτρέπει στις μεμβράνες να “ξεχωρίσουν” τα διάφορα ιόντα.
- Μια μεμβράνη με κατάλληλο μέγεθος “πόρων” θα μπορούσε να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση των λιγότερο ενυδατωμένων (“μικρότερων”) ιόντων K^+ και Cl^- , ενώ θα εμπόδιζε τη διέλευση των περισσότερο ενυδατωμένων (“μεγαλύτερων”) ιόντων Na^+



Κίνηση ιόντων K^+ και Cl^- της μεμβράνης του νευρικού κυττάρου

- Το K^+ έχει την τάση να κινείται από το εσωτερικό του κυττάρου προς το εξωτερικό, ενώ το Cl^- αντίθετα.
- Υπάρχει η ανάγκη να διατηρούνται ίσες οι συνολικές συγκεντρώσεις των θετικών και αρνητικών φορτίων σε κάθε πλευρά της μεμβράνης, ώστε να εξουδετερώνονται τα αρνητικά και τα θετικά φορτία.
- Η κίνηση των ιόντων συνεχίζεται μόνο μέχρις ότου η άνιση κατανομή του φορτίου στην κάθε πλευρά της μεμβράνης δημιουργήσει ένα δυναμικό, ικανό να εξουδετερώσει τις βαθμίδες των συγκεντρώσεων τους.
- Η διαφορά δυναμικού οφείλεται αποκλειστικά στις ιδιότητες της μεμβράνης που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.
- Είναι απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς της μεμβράνης σε κατάσταση ηρεμίας σε σχέση με τα διάφορα ιόντα.
- Κάθε ιόν θεωρείται ότι μετακινείται μέσα από τη μεμβράνη, ανεξάρτητα από την παρουσία άλλων ιόντων.