

# **Αγωγή, μεταβίβαση, ολοκλήρωση**

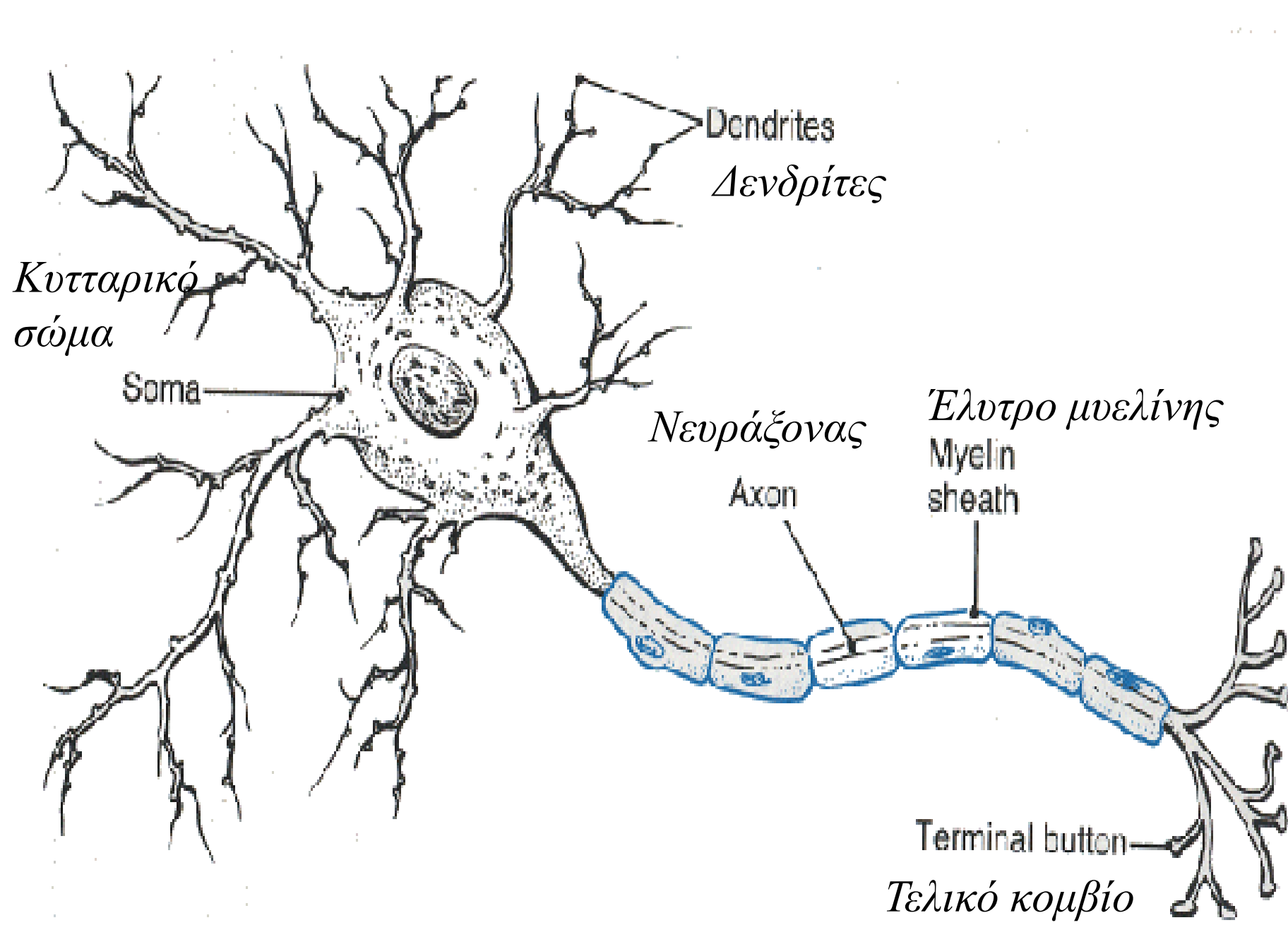
**Αλεξάνδρα Οικονόμου**

# Νευρική ώση

Άγγιγμα δακτύλου → αντίληψη

*< 1/10 δευτ.*

*Μεταφορά πληροφοριών από νευράξονες*



Dendrites  
Δενδρίτες

Κυτταρικό  
σώμα

Soma

Νευράξονας

Axon

Έλυτρο μυελίνης  
Myelin  
sheath

Terminal button

Τελικό κομβίο

# Επιλεκτική διαπερατότητα μεμβράνης

Ελεύθερα:  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$

Ιόντα:  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  μέσω **διάυλων**  
(πρωτεϊνικών)

# Δυνάμεις στη νευρική ώση

1. Δύναμη διάχυσης (κλίση συγκέντρωσης)  
μετακίνηση μορίων από υψηλή σε χαμηλή  
συγκέντρωση  
(απόλυτο 0:  $0^{\circ} \text{K} = -237,15^{\circ} \text{C}$ , μόρια σταματάνε την  
κίνηση)
2. Δύναμη ηλεκτροστατικής πίεσης  
σωματίδια με ίδια τάση **απωθούνται**  
σωματίδια με αντίθετη τάση **έλκονται**  
**ηλεκτρολύτες**: 2 μέρη με αντίθετο φορτίο  
**ιόντα**: κατιόντα (+), ανιόντα (-)  
NaCl:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$

# Το δυναμικό ηρεμίας

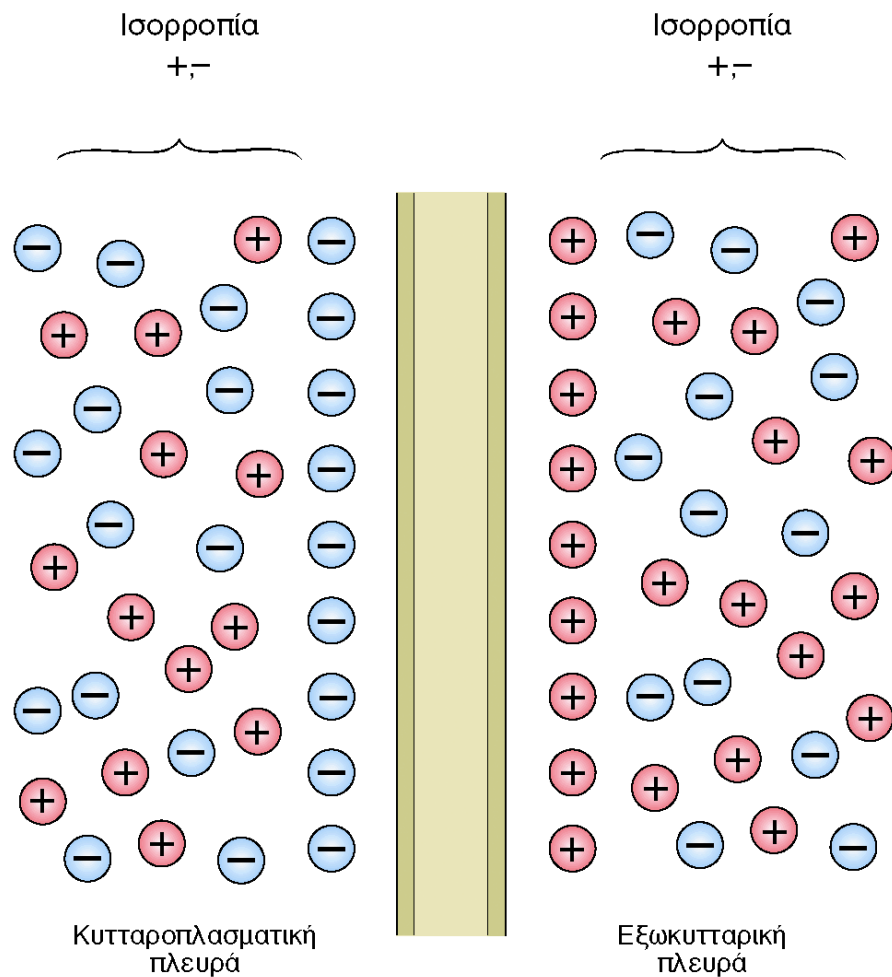
Εσωτερικό νευρώνα: ελαφρά αρνητικό σε σχέση με εξωτερικό

Κυτταρικό υγρό:

μέσα στη μεμβράνη: περισσότερα  $K^+$

έξω από τη μεμβράνη: περισσότερα  $Na^+$ ,  $Cl^-$

(αλάτι...)



**Εικόνα 2-9** Το δυναμικό μεμβράνης δημιουργείται από τον διαχωρισμό θετικών και αρνητικών φορτίων εκατέρωθεν της κυτταρικής μεμβράνης. Η περίσσεια θετικών φορτίων εξωτερικά και αρνητικών φορτίων εσωτερικά της μεμβράνης ενός εν ηρεμία νευρικού κυττάρου αντιπροσωπεύει ένα μικρό κλάσμα του συνολικού αριθμού των ιόντων στο εσωτερικό του κυττάρου και στο εξωτερικό περιβάλλον του.

# Το δυναμικό ηρεμίας –συν.

Εξισορρόπηση των 2 δυνάμεων:

Δύναμη διάχυσης:  $K^+$  → έξω από τη μεμβράνη

αλλά

Δύναμη ηλεκτροστατικής πίεσης:  $K^+$  παραμένει **μέσα**  
στη μεμβράνη

(εξωτερικό: + σε σχέση με εσωτερικό)

⇒ **αντιστάθμιση**



# Το δυναμικό ηρεμίας –συν.

Εξισορρόπηση των 2 δυνάμεων:

Δύναμη διάχυσης:  $\text{Cl}^- \rightarrow$  μέσα στη μεμβράνη

αλλά

Δύναμη ηλεκτροστατικής πίεσης:  $\text{Cl}^-$  παραμένει έξω από τη μεμβράνη

(εσωτερικό: - σε σχέση με εξωτερικό)

$\Rightarrow$  αντιστάθμιση

# Το δυναμικό ηρεμίας –συν.

Εξισορρόπηση των 2 δυνάμεων:

Δύναμη διάχυσης →  $\text{Na}^+$  μέσα στη μεμβράνη

Δύναμη ηλεκτροστατικής πίεσης →  $\text{Na}^+$  μέσα στη μεμβράνη (έλκεται)

(εσωτερικό - σε σχέση με εξωτερικό)

αλλά...

# Πώς το $\text{Na}^+$ παραμένει σε μεγαλύτερη συγκέντρωση έξω από τη μεμβράνη;

Κλίση συγκέντρωσης

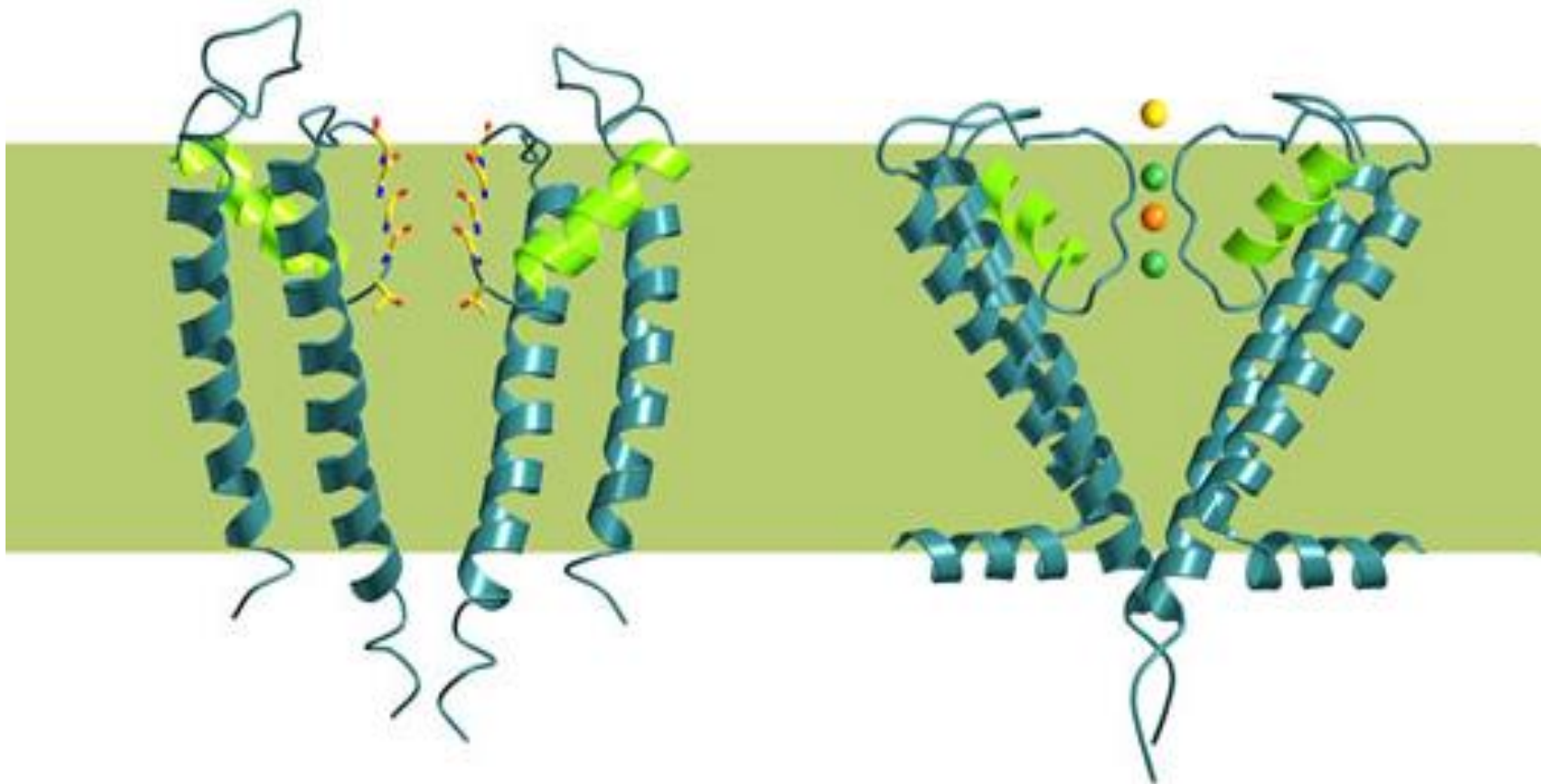
$\text{Na}^+$  >10 φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση στην **εξωτερική** πλευρά από την εσωτερική

$\text{K}^+$  >20 φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση στην **εσωτερική** πλευρά από την εξωτερική

Εσωτερικό: **ηλεκτροαρνητικό** (-30 ως -90 mV) σε σχέση με εξωτερικό

**Επιλεκτική διαπερατότητα μεμβράνης**

δίαυλοι ιόντων



**Open**

*Ανοικτός*

**Closed**

*Κλειστός*

# Κατάσταση ηρεμίας

Δίαυλοι  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  : διέλευση με μέτριο ρυθμό

Δίαυλοι  $\text{Na}^+$  : κλειστοί (πολύ χαμηλός ρυθμός διέλευσης), τασοελεγχόμενοι

# Δυναμικό ηρεμίας

Εσωτερικό ελαφρά αρνητικά φορτισμένο σε σχέση με εξωτερικό (διαφορά τάσης)

*Άνιση κατανομή ιόντων ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ )*

# Ενεργητική & παθητική μεταφορά

Ενεργητική μεταφορά:

Αντλία ιόντων  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$

3 Ιόντα  $\text{Na}^+$  → εξωτερικό του νευρώνα

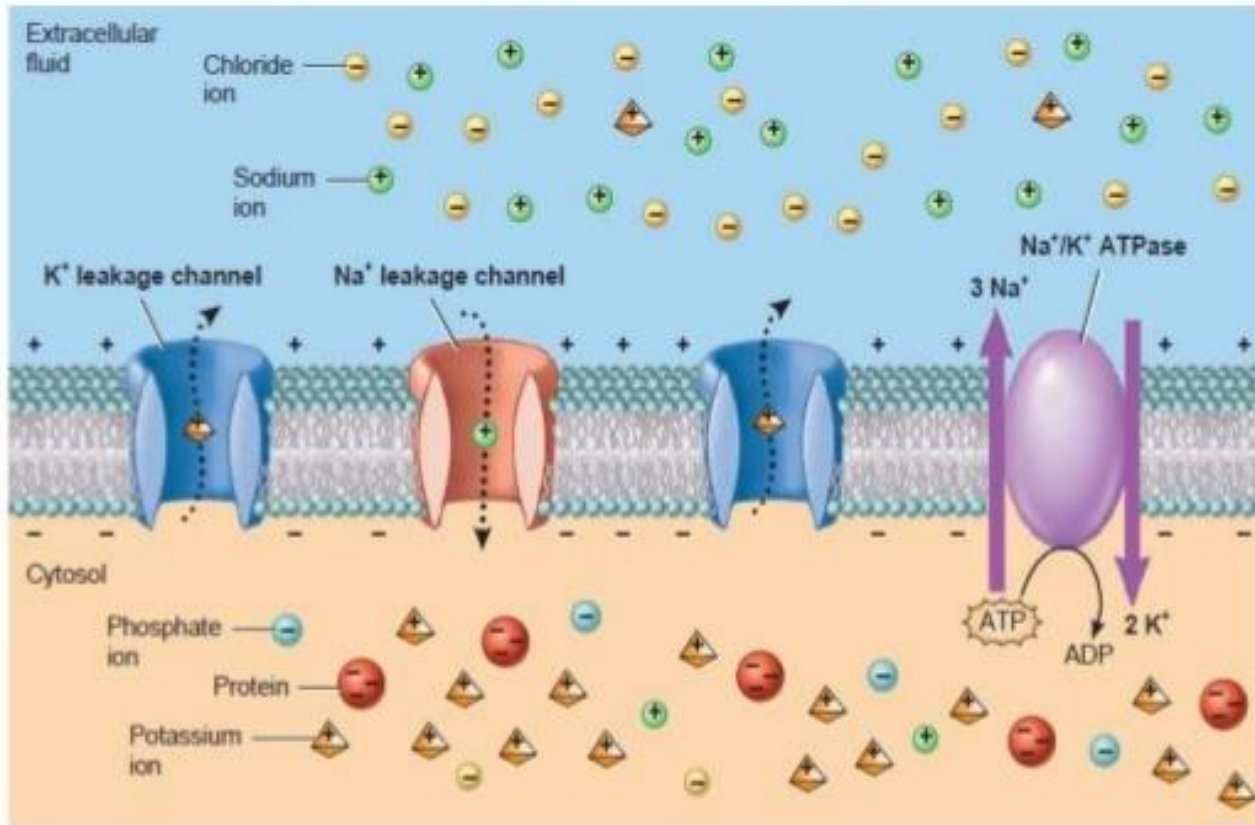
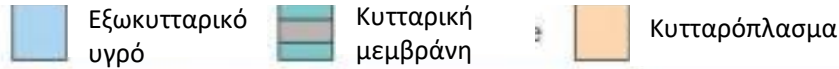
2 Ιόντα  $\text{K}^+$  → εσωτερικό του νευρώνα

Παθητική μεταφορά:

$\text{K}^+$  → εξωτερικό (ηλεκτρική πίεση)

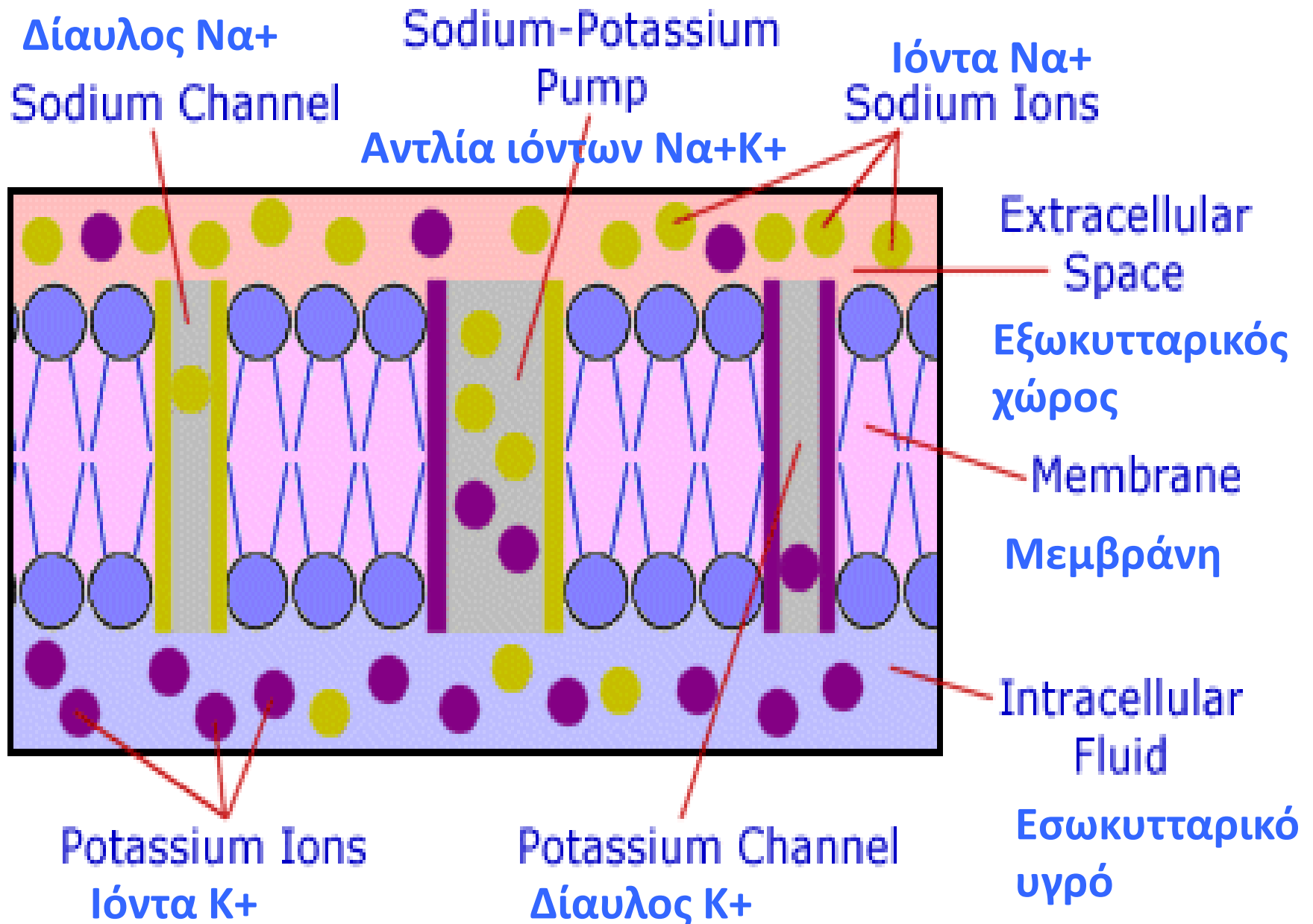
# Δυναμικό ηρεμίας

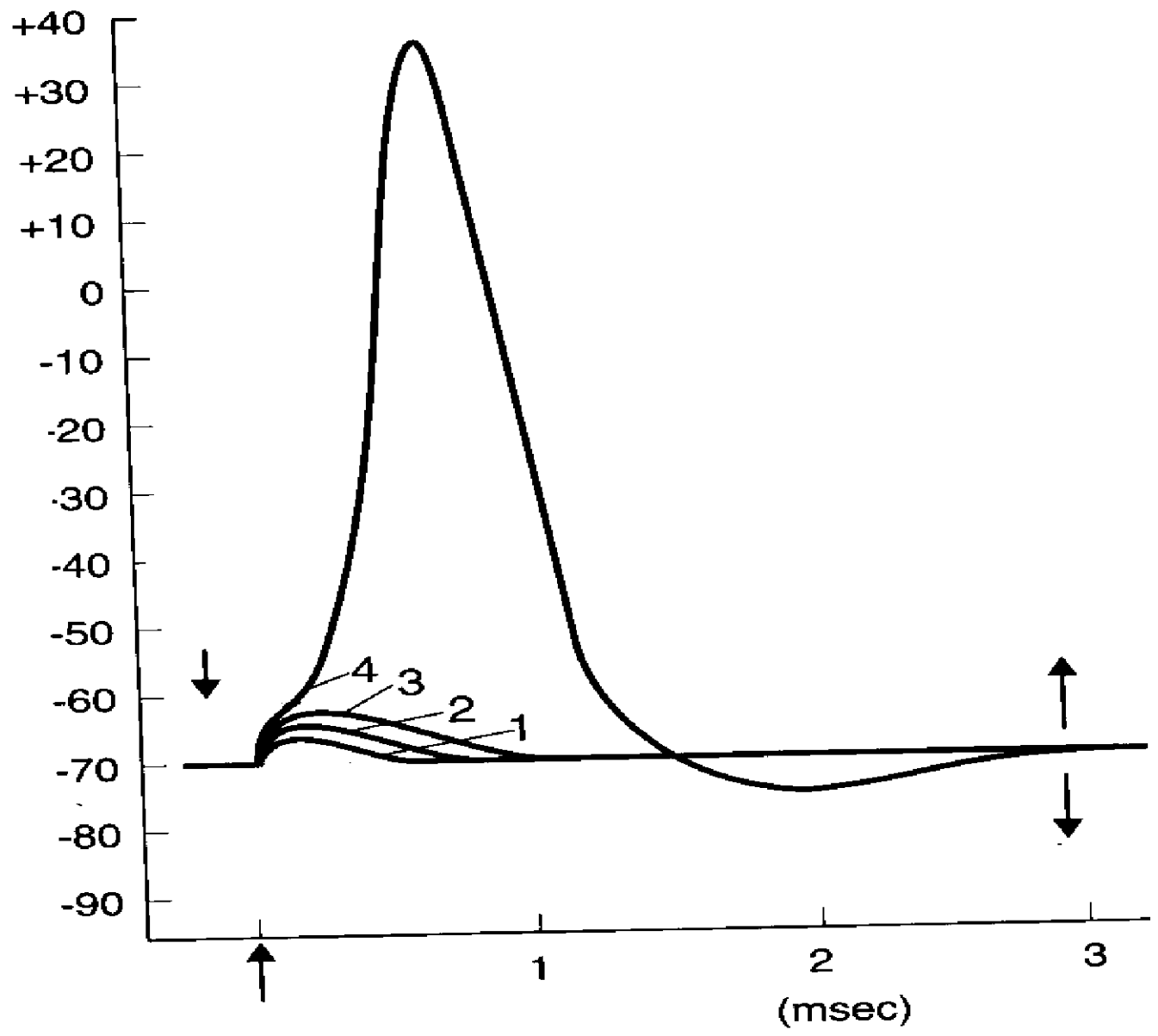
Το δυναμικό ηρεμίας καθορίζεται από (1) την άνιση κατανομή ιόντων εντός & εκτός του κυττάρου (2) την αδυναμία των ανιόντων να εξέλθουν από το κύτταρο, (3) την αντλία ιόντων  $\text{Na}^+/\text{K}^+$



Δυναμικό ηρεμίας







# Αρχή δυναμικού ενέργειας

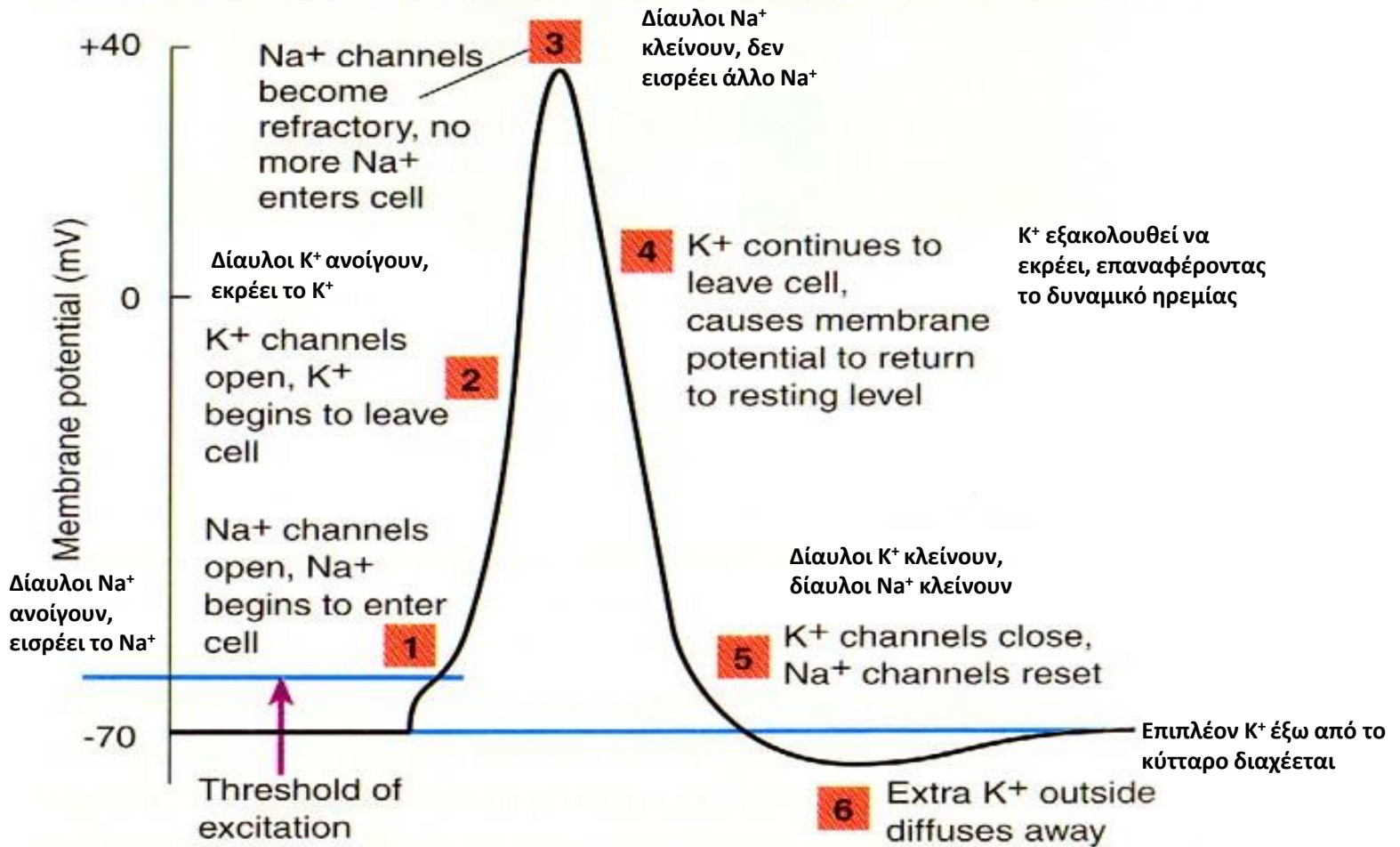
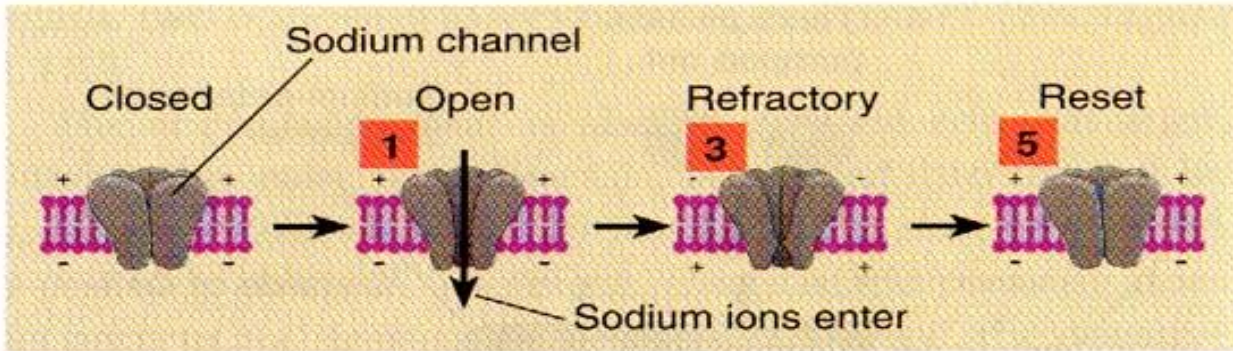
Νόμος όλου ή ουδενός:

Μέγεθος & μορφή δυναμικού **ανεξάρτητα** έντασης  
ερεθίσματος

Ερέθισμα καθορίζει **συχνότητα**, όχι ένταση & μορφή  
δυναμικού

Τασοελεγχόμενοι δίαυλοι  $\text{Na}^+$

Αλλαγή ηλεκτρικού φορτίου  $\rightarrow$  ανοίγουν δίαυλοι  
 $\text{Na}^+$



## Δυναμικό ενέργειας –συν.

Ουδός πυροδότησης (κατώφλι πυροδότησης)

Μικρότερη εκπόλωση : διάυλοι  $\text{Na}^+$  ανοίγουν, αλλά εξισορρόπηση από αυξημένη εκροή ιόντων  $\text{K}^+$

Εκπόλωση υπερβαίνει ουδό: διάυλοι  $\text{Na}^+$  ανοίγουν αρκετά,  $\text{Na}^+$  εισέρχεται γρηγορότερα απ' ό,τι εξέρχεται  $\text{K}^+$

Μεγαλύτερη εκπόλωση

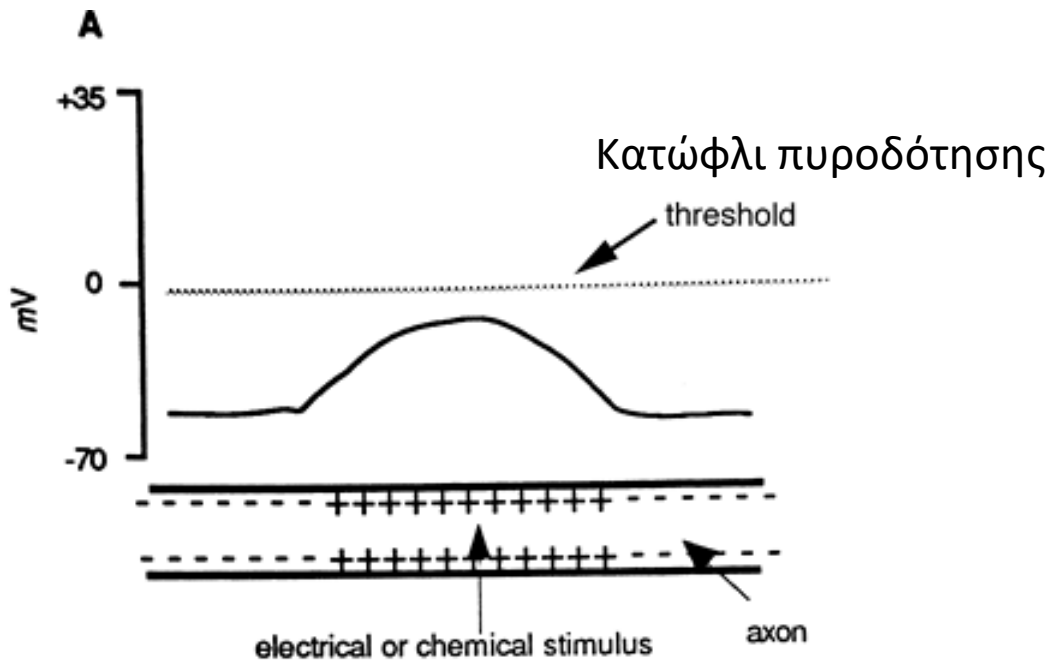
Όταν δυναμικό  $> 0$ : θετικό (+20 mV)

# Δυναμικό ενέργειας –συν.

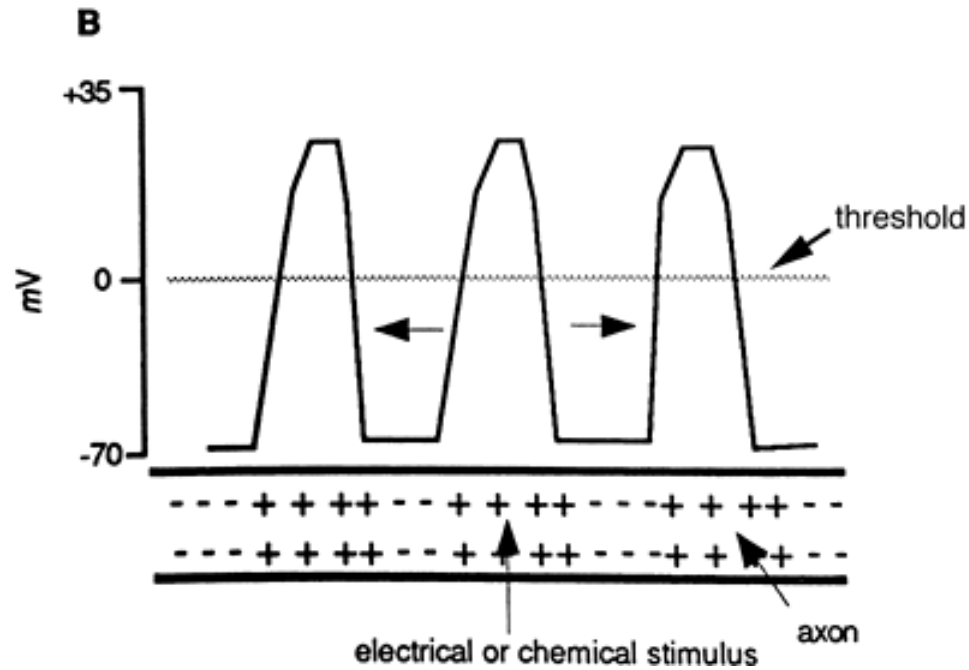
Ακόμα και στην κορύφωση: μεγαλύτερη συγκέντρωση  $\text{Na}^+$  στο εξωτερικό από ό,τι στο εσωτερικό

Συγκέντρωση στο εσωτερικό αυξάνεται  $< 1/100$

Εσωτερικό μεμβράνης θετικό: ιόντα  $\text{Na}^+$  δεν έλκονται πλέον



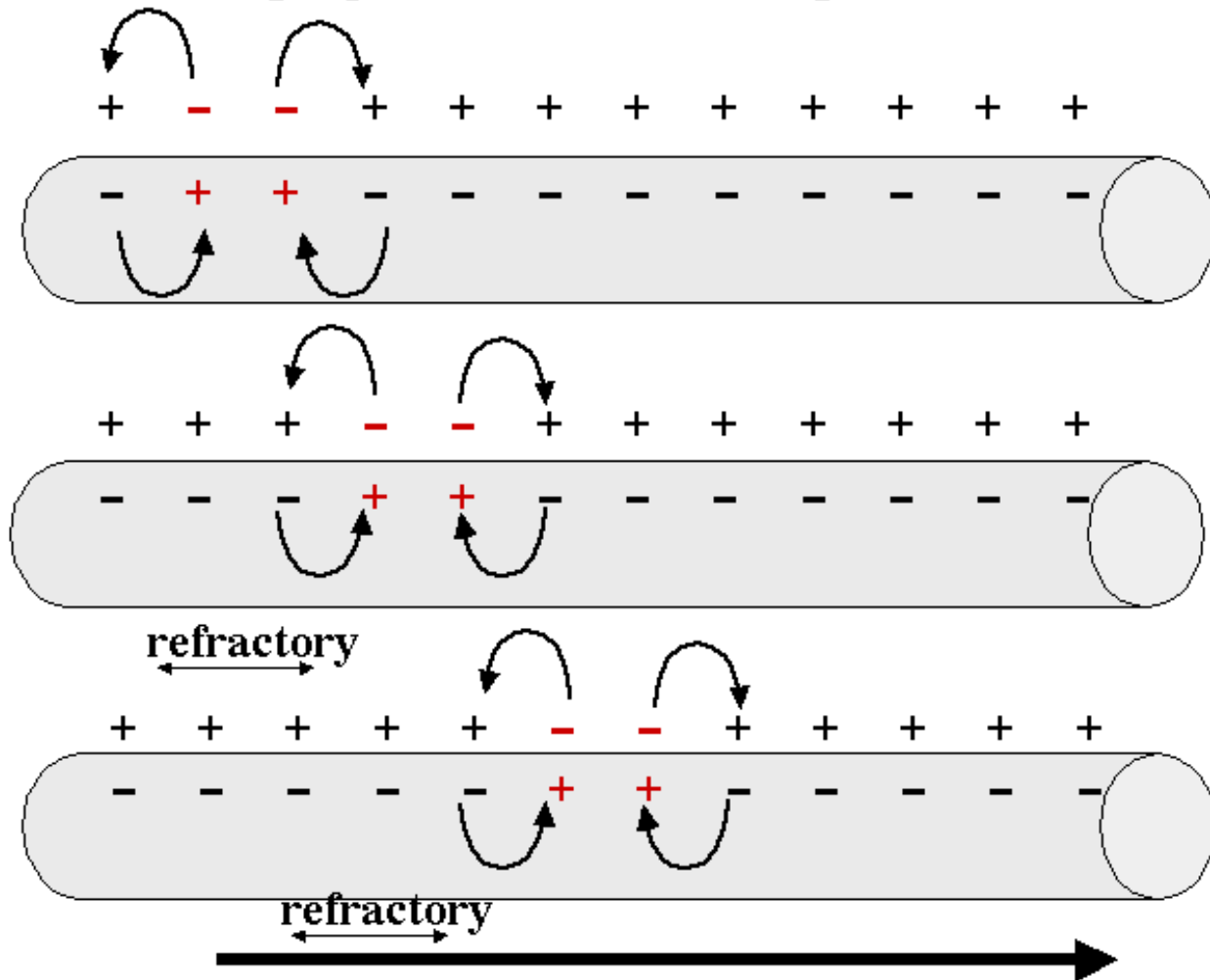
Τοπικά διαβαθμιζόμενο δυναμικό



Δυναμικό ενέργειας

# Μεταφορά δυναμικού ενέργειας

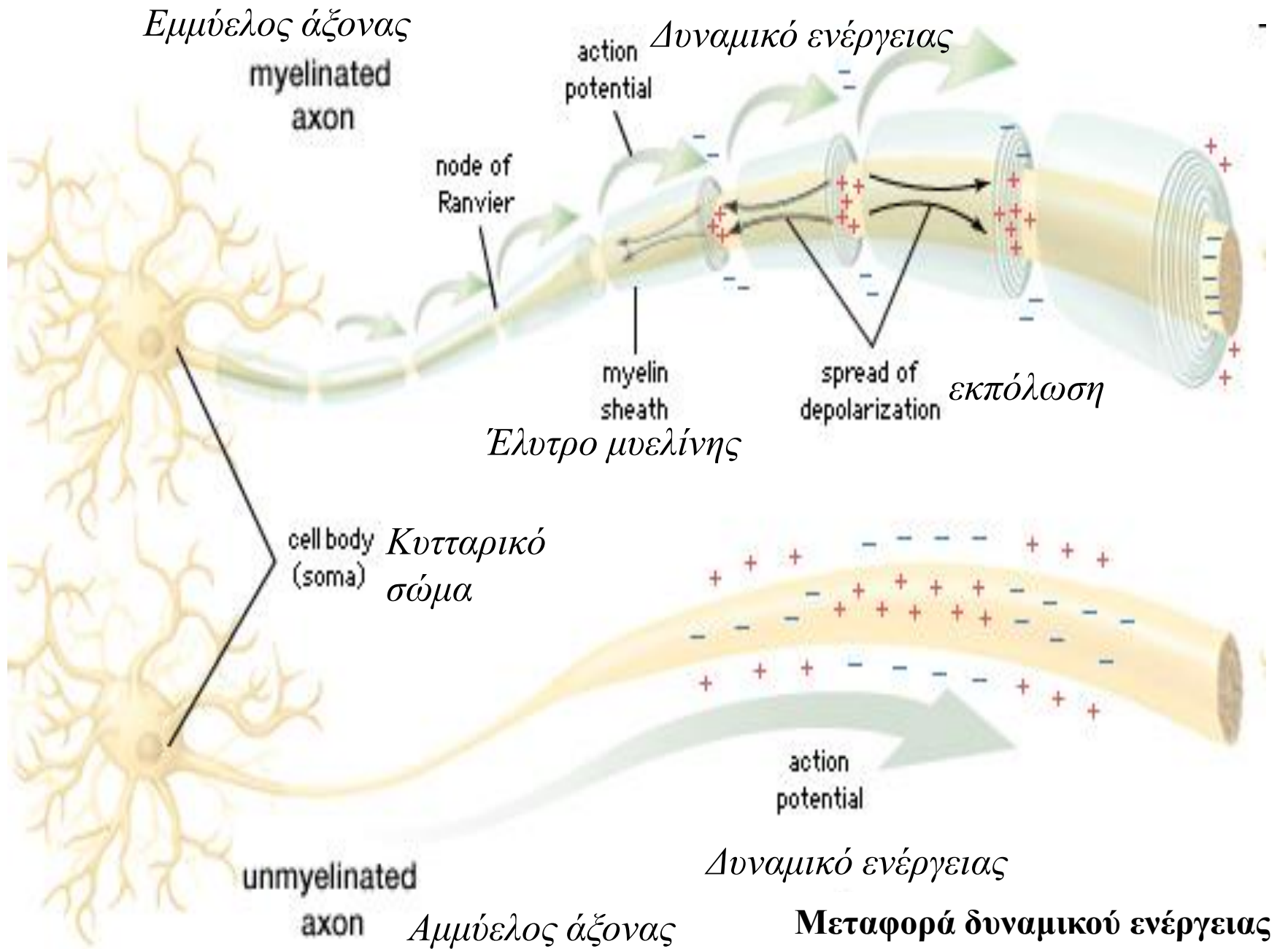
## Propagation of action potential





**Πίνακας 2-1** Στοιχεία των τοπικών σημάτων (δυναμικά υποδοχέα και συναπτικά δυναμικά) και των μεταδιδόμενων σημάτων (δυναμικά ενέργειας)

	<i>Εύρος</i>	<i>Διάρκεια</i>	<i>Άθροιση</i>	<i>Δράση του σήματος</i>	<i>Τρόπος μετάδοσης</i>
<i>Τοπικά σήματα</i>					
<i>Δυναμικά υποδοχέα</i>	Μικρό (0,1–10 mV)	Μικρή (5–100 ms)	Διαβαθμισμένη	Υπερπόλωση ή εκπόλωση	Παθητική
<i>Συναπτικά δυναμικά</i>	Μικρό (0,1–10 mV)	Μικρή έως μεγάλη (5 ms–20 min)	Διαβαθμισμένη	Υπερπόλωση ή εκπόλωση	Παθητική
<i>Μεταδιδόμενα σήματα</i>					
<i>Δυναμικά ενέργειας</i>	Μεγάλο (70–110 mV)	Μικρή (1–10 ms)	<i>Όλον ή ουδέν</i>	Εκπόλωση	Ενεργητική



# Αποκατάσταση δυναμικού ηρεμίας

Απομάκρυνση  $K^+$  από εσωτερικό νευρώνα

δεν έλκονται από + φορτίο (ηλεκτροστατική πίεση)

περισσότερα στο εσωτερικό (διάχυση)

Υπερπόλωση (καθώς  $K^+$  απομακρύνονται)

# Αποκατάσταση δυναμικού ηρεμίας –συν.

Αντλία ιόντων  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$

*(λίγο περισσότερα ιόντα  $\text{Na}^+$ , λίγο λιγότερα ιόντα  $\text{K}^+$  από πριν)*

αποκαθιστά κατανομή ιόντων

αργή διαδικασία

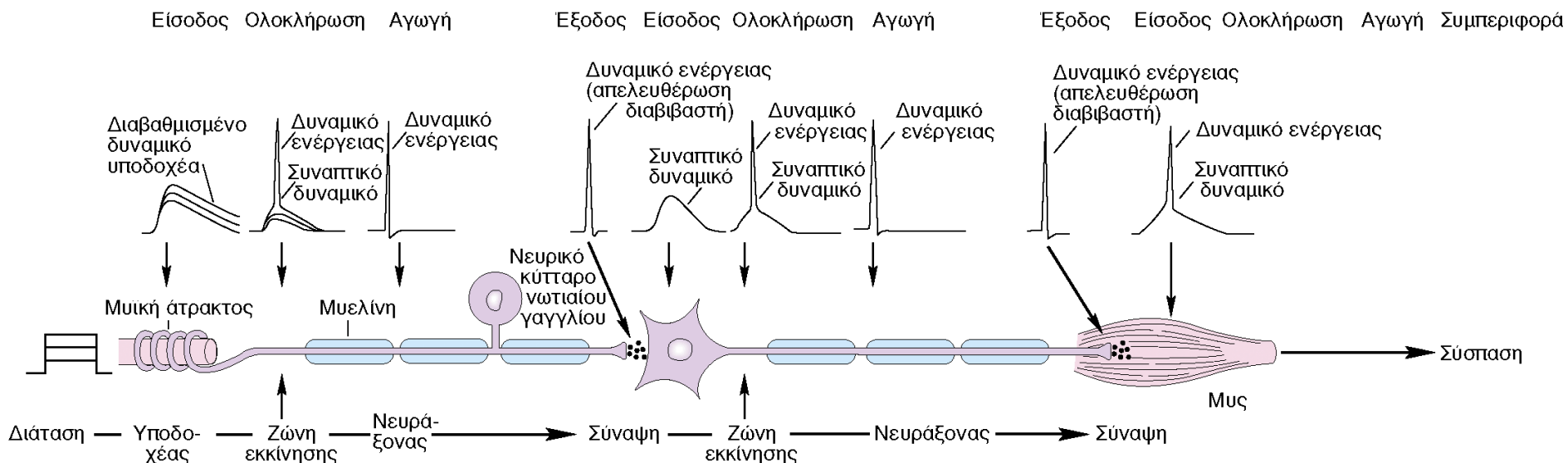
# Ανερέθιστη περίοδος

Δεν μπορεί να δημιουργηθεί καινούριο δυναμικό ενέργειας

Χαμηλή διαπερατότητα ιόντων  $\text{Na}^+$

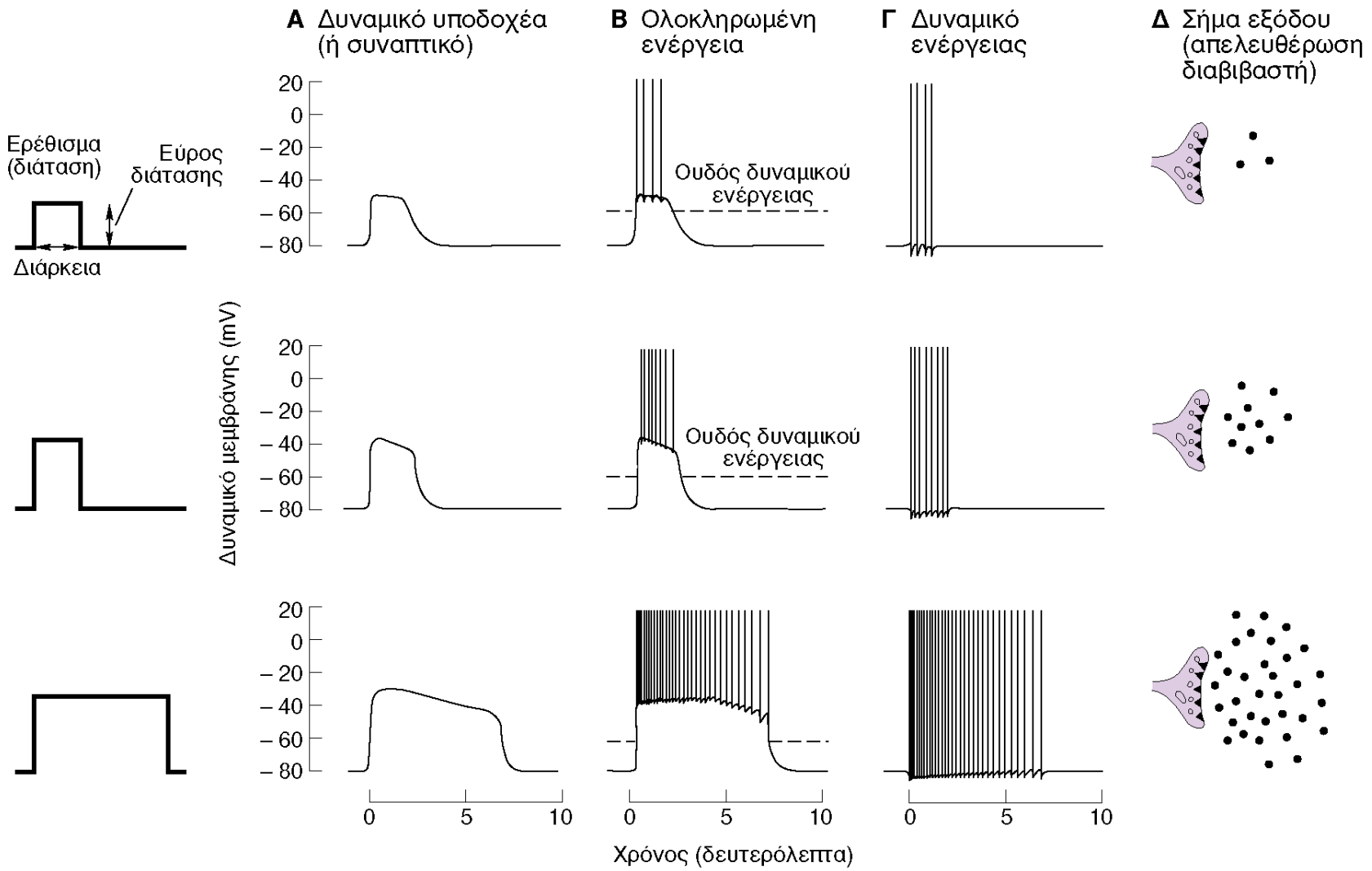
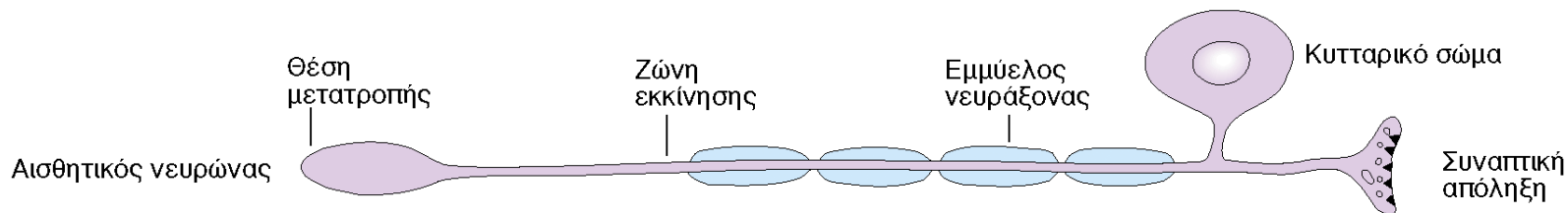
Υψηλή διαπερατότητα ιόντων  $\text{K}^+$

Ανώτατο φυσιολογικό όριο ρυθμού πυροδότησης νευρώνα



**Εικόνα 2-12** Η αλληλουχία των σημάτων που οδηγεί στην παραγωγή αντανακλαστικής δράσης. Η διάταση ενός μυός παράγει ένα *δυναμικό υποδοχέα* στις τελικές απολήξεις του αισθητικού νευρώνα (κύτταρο του νωτιαίου γαγγλίου). Το εύρος του δυναμικού υποδοχέα είναι ανάλογο προς την ένταση της διάτασης. Στη συνέχεια, το δυναμικό αυτό εξαπλώνεται παθητικά στη ζώνη εκκίνησης, στον πρώτο κόμβο Ranvier. Εάν το δυναμικό υποδοχέα είναι αρκετά μεγάλο, δημιουργεί ένα *δυναμικό ενέργειας* στη ζώνη εκκίνησης· στη συνέχεια, το δυναμικό ενέργειας μεταδίδεται ενεργητικά και χωρίς αλλαγή κατά μήκος του νευράξονα, μέχρι την τελική περιοχή του. Στο τελικό κομβίο, το δυναμικό ενέργειας οδηγεί σε ένα σήμα εξόδου: στην απελευθέρωση ενός χημικού δια-

βιβαστή. Ο διαβιβαστής διαχέεται στη συναπτική σχισμή και αλληλεπιδρά με μόρια του υποδοχέα στην κυτταρική μεμβράνη των κινητικών νευρώνων που νευρώνουν τον εκτεινόμενο μυ. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί την έναρξη ενός συναπτικού δυναμικού στον κινητικό νευρώνα. Το συναπτικό δυναμικό εξαπλώνεται, στη συνέχεια, παθητικά στη ζώνη εκκίνησης του κινητικού νευρώνα, όπου μπορεί να δημιουργήσει ένα δυναμικό ενέργειας που μεταδίδεται ενεργητικά στην απόληξη του κινητικού νευρώνα. Στην απόληξη, το δυναμικό ενέργειας προκαλεί απελευθέρωση διαβιβαστή, που συνεπάγεται ένα συναπτικό δυναμικό στον μυ. Το σήμα αυτό παράγει ένα δυναμικό ενέργειας στον μυ, προκαλώντας σύσπαση της μυϊκής ίνας.



# Η μετάδοση του δυναμικού ενέργειας

Το δυναμικό ενέργειας γεννά ένα νέο δυναμικό ενέργειας σε κάθε σημείο κατά μήκος του νευράξονα.

Το δυναμικό ενέργειας έτσι είναι **τόσο έντονο στο τέλος όσο στην αρχή.**

Η μετάδοση είναι πιο αργή από το ηλεκτρικό ρεύμα, λόγω της διάχυσης των ιόντων νατρίου κατά μήκος του νευράξονα.



# Η μετάδοση του δυναμικού ενέργειας

Λεπτότεροι νευράξονες: 1 μ/δευτ.

Παχύτεροι νευράξονες: 10 μ/δευτ.

Νευράξονες με μυελίνη: 100 μ/δευτ. (και άνω)

Φως: 300 εκατομύρια μ/δευτ.

# Αγωγή κατ' άλματα

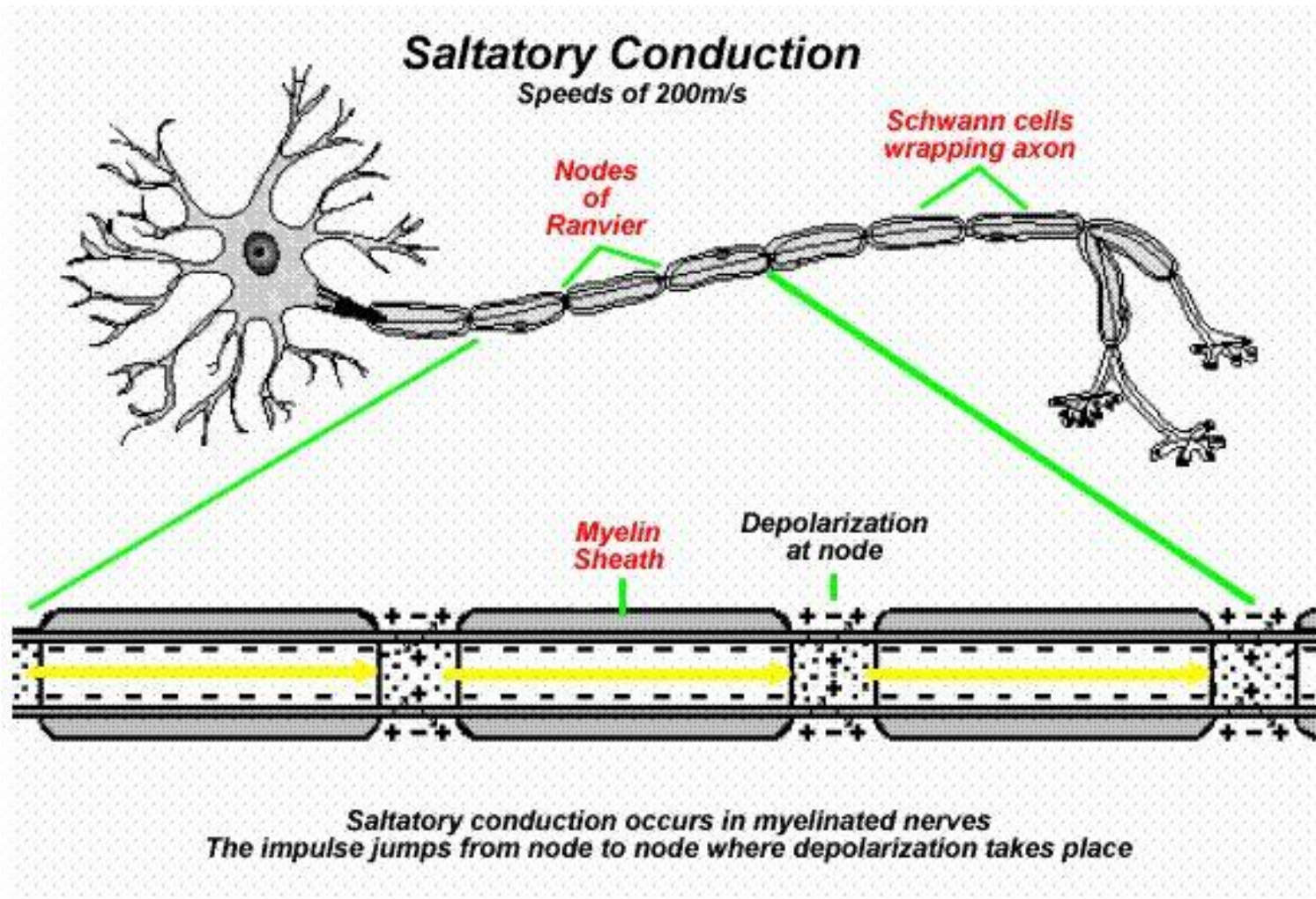
Το έλυτρο μυελίνης αυξάνει την ταχύτητα (αυξάνει την αντίσταση)

Δίαυλοι νατρίου **μόνο στους κόμβους**

Αφού δημιουργηθεί το δυναμικό ενέργειας, κατιόντα εισέρχονται στο νευράξονα & εκπολώνουν τη μεμβράνη στην επόμενη περίσφιγξη

Εξοικονόμηση ενέργειας: αντλία ιόντων νατρίου-καλίου δεν απαιτείται σε κάθε σημείο της μεμβράνης

# Αγωγή κατ' άλματα



Σύντομο βίντεο για την αγωγή

[https://www.youtube.com/watch?v=OZG8M\\_IdA1M](https://www.youtube.com/watch?v=OZG8M_IdA1M)

# Επίδραση ουσιών

Δηλητήριο σκορπιού:

- Κρατάει διαύλους  $\text{Na}^+$  ανοικτούς, κλείνει διαύλους  $\text{K}^+$
- Παρατεταμένη εκπόλωση, δεν μεταφέρονται πληροφορίες

Ξυλοκαΐνη (τοπικό αναισθητικό):

- Εμποδίζει εισροή ιόντων  $\text{Na}^+$ , διότι προσκολλάται στους διαύλους  $\text{Na}^+$
- Αναστέλλει δυναμικά ενέργειας τοπικά

# Επίδραση ουσιών –συν.

Αιθέρας, χλωροφόρμιο (γενικά αναισθητικά):

- Ανοίγει διαύλους  $K^+$
- Εκροή ιόντων  $K^+$  από νευρώνα
- Υπερπόλωση, δεν δημιουργείται δυναμικό ενέργειας
- Δεν υπάρχει ανταπόκριση στα περισσότερα ερεθίσματα