



Νευροφυσιολογία και Αισθήσεις

Διάλεξη 14
Κίνηση από τον Νωτιαίο Μυελό
(Spinal Control of Movement)



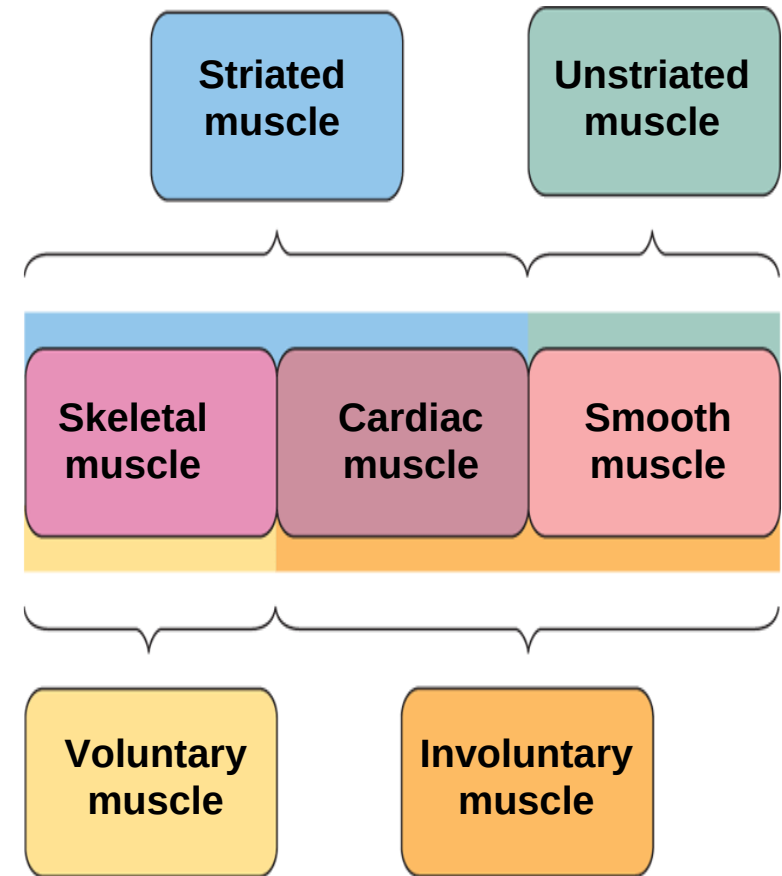
- **Κινητικά Συστήματα**

- Μύες και νευρώνες που ελέγχουν τους μύες
- Ρόλος: Δημιουργία συντονισμένης κίνησης
- Μέρη κινητικού ελέγχου
 - Νωτιαίος μυελός (Spinal cord) → συντονισμένη σύσπαση των μυών
 - Εγκέφαλος (Brain) → κινητικά προγράμματα





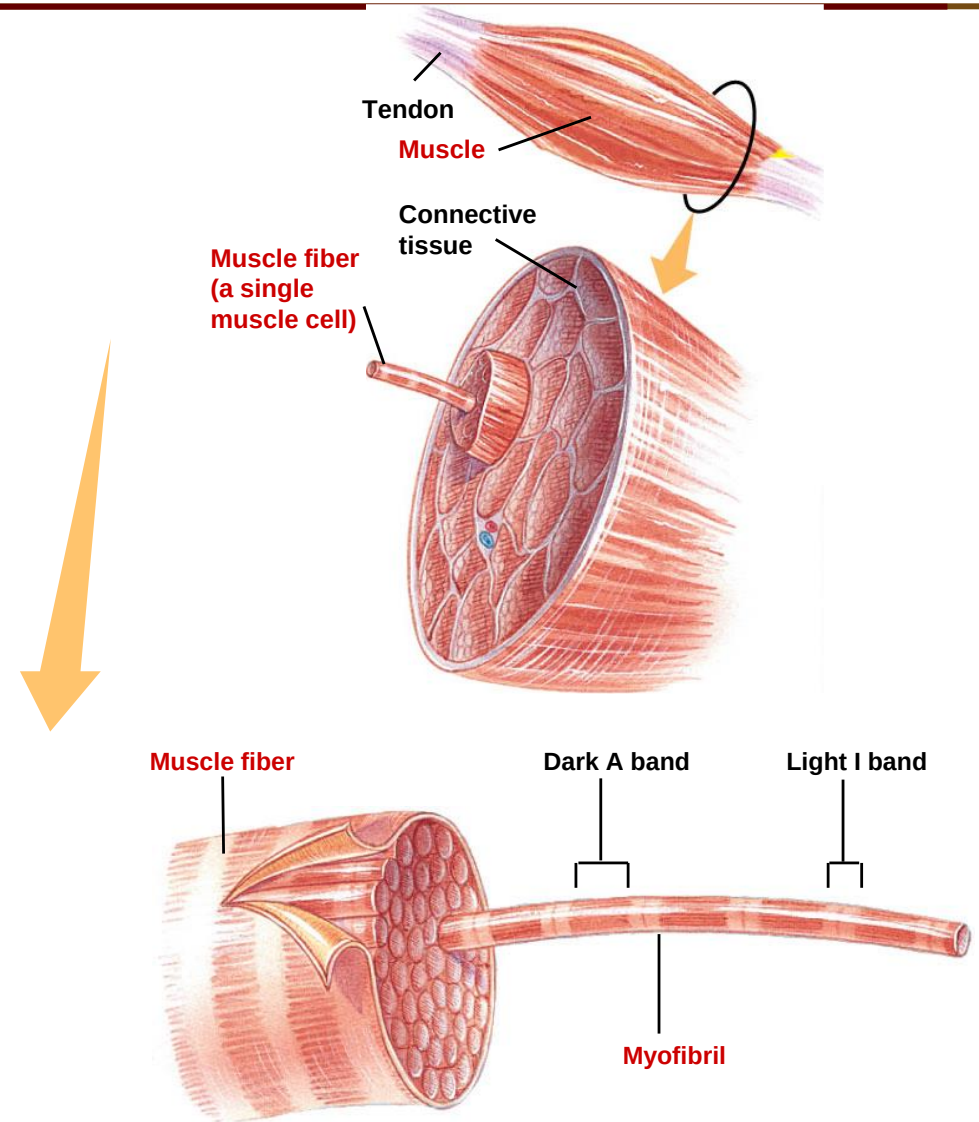
- **Ο μεγαλύτερος ιστός στο σώμα**
 - Σκελετικός (30-40% BW), λείος και καρδιακός (10% BW)
- **Ελεγχόμενη και συντονισμένη σύσπαση μυών επιτρέπει**
 - Κίνηση εκ προθέσεως μέρους ή ολοκλήρου του σώματος
 - Χειρισμό αντικειμένων
 - Προώθηση περιεχομένου μέσα σε διάφορα κοίλα όργανα
 - Εκκένωση του περιεχομένου των οργάνων προς το εξωτερικό
- **Τρεις τύποι μυός**
 - Σκελετικός Μυς (Skeletal muscle)
 - Η πλειοψηφία του μυϊκού συστήματος
 - Καρδιακός Μυς (Cardiac muscle)
 - Μόνο στην καρδιά
 - Λείος Μυς (Smooth muscle)
 - Σε όλο το σώμα ως μέρος των κοίλων οργάνων
- **Κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες**
 - Γραμμωτός (Striated) ή Μη-γραμμωτός (unstriated)
 - Εκούσιοι (Voluntary) ή ακούσιοι (involuntary)



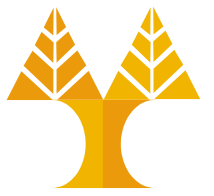
Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)



- Οι μύες αποτελούνται από μυϊκές ίνες (muscle fibers)
 - Παράλληλες
 - Ενωμένες με συνδετικό ιστό
- Μυϊκές Ίνες (muscle fibers) = μυϊκό κύτταρα (muscle cells)
 - Πολυπύρηννα (Multinucleated)
 - Μεγάλου, επιμήκους, κυλινδρικού σχήματος
 - Συνήθως εκτείνονται σε όλο το μήκος του μυός
 - Κάθε μυϊκή ίνα περιέχει πολλά μυοϊνίδια = συσταλτικές μονάδες (Contractile units)



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)

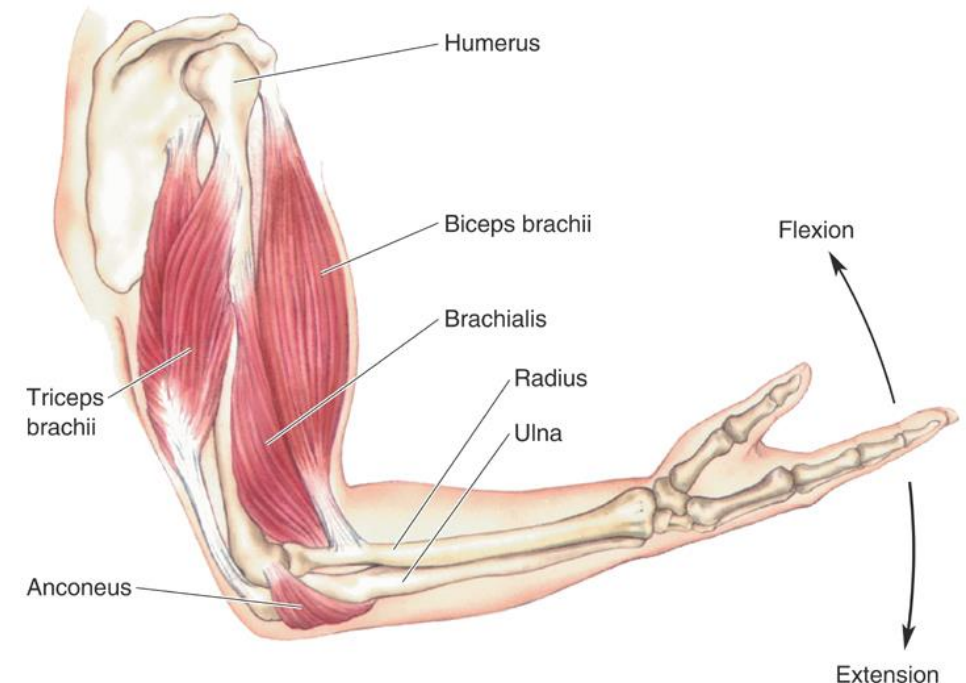


- **Σωματικοί Μύες (Somatic Musculature)**

- Αξονικοί Μύες (Axial muscles)
 - Κίνηση του κορμού (trunk)
- Εγγύς Μύες (Proximal muscles)
 - Κίνηση ώμου (shoulder), αγκώνα (elbow), λεκάνης (pelvis), γόνατου (knee)
- Περιφερικοί Μύες (Distal muscles)
 - Κίνηση χεριών (Hands), άκρου ποδιού (foot), δακτύλων (digits) ποδιών και χεριών

- **Κίνηση (Movement)**

- Κάμψη (Flexion)
- Έκταση (Extension)
- Απαγωγή (Abduction)
- Προσαγωγή (Adduction)



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)



- **Άνω κινητικοί νευρώνες (Upper motor neurons)**

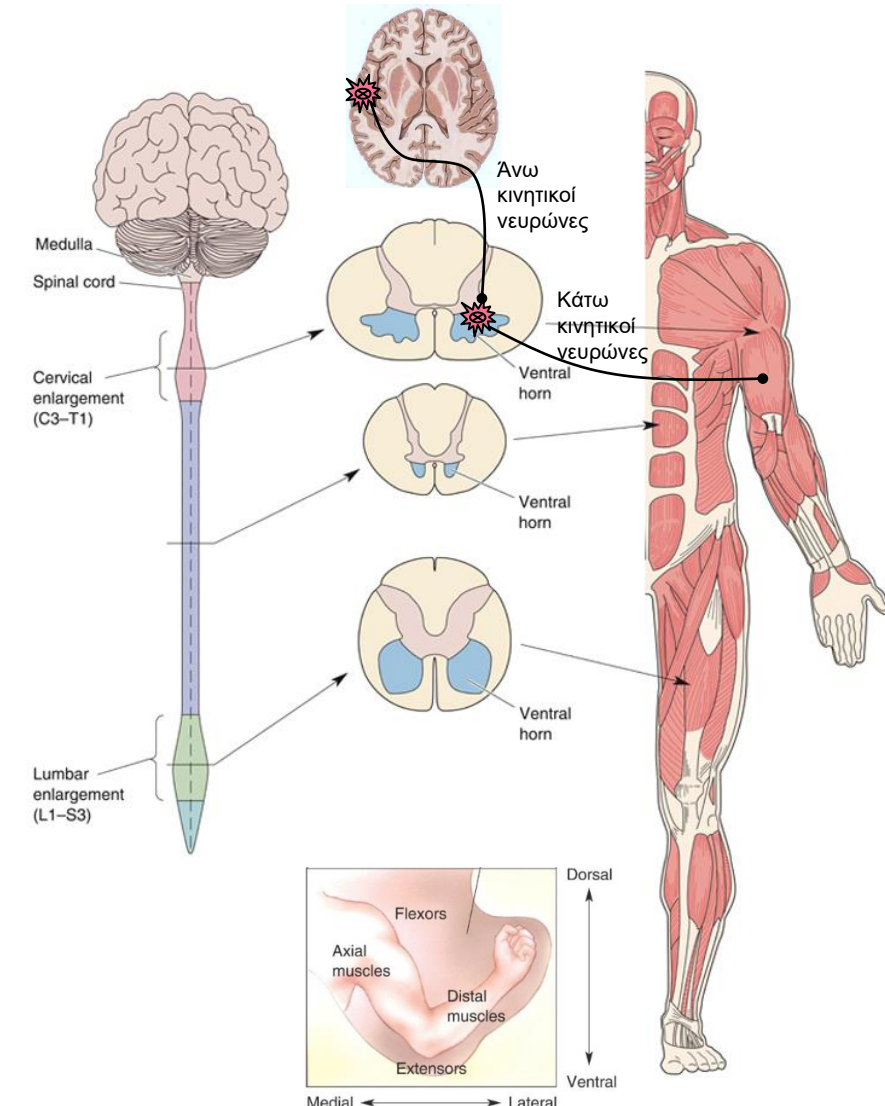
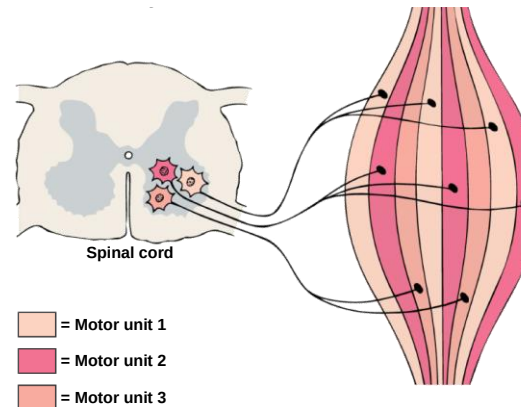
- Είσοδος (input) στο νωτιαίο μυελό από τον φλοιό

- **Κάτω κινητικοί νευρώνες (Lower motor neurons)**

- Εξέρχονται από τον νωτιαίο μυελό
- Κατανομή κατά μήκος του νωτιαίου μυελού
- Δύο είδη κινητικών νευρώνων
 - Άλφα (Alpha)
 - Γάμμα (Gamma)

- **Κινητική Μονάδα (Motor Unit)**

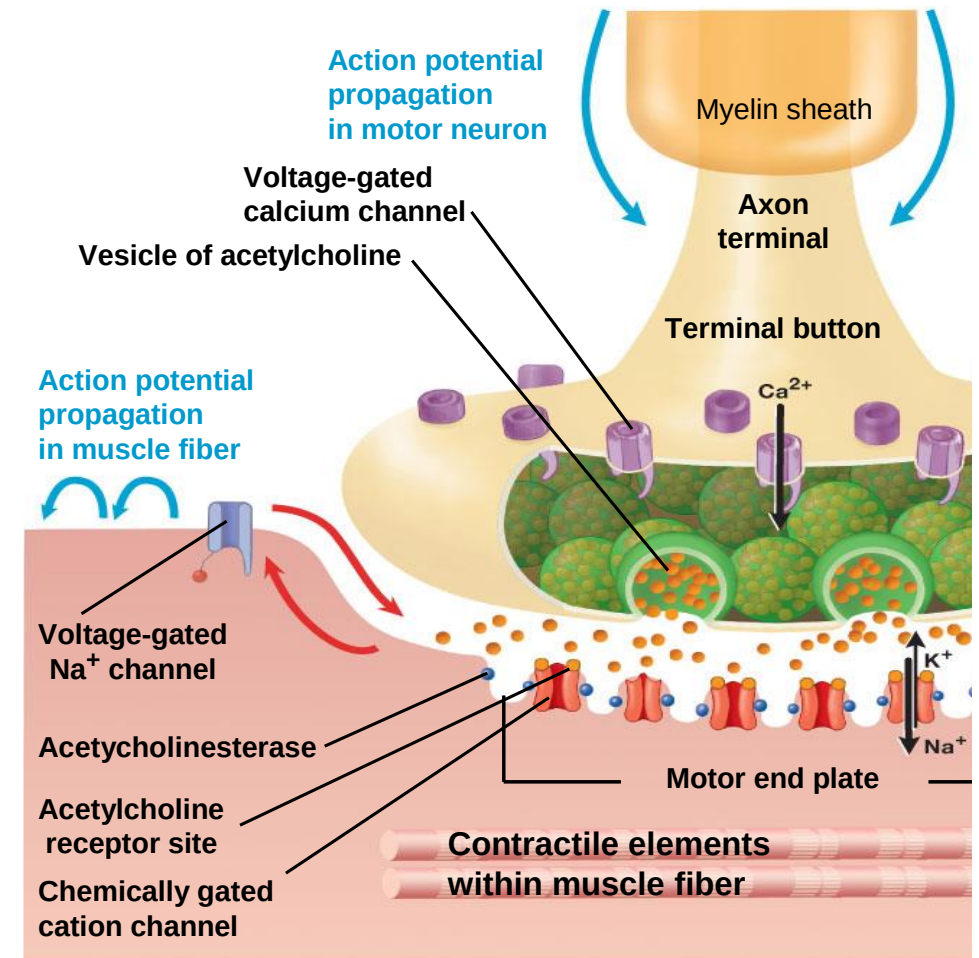
- Ο α κινητικός νευρώνας και οι μυϊκές ίνες που εννervώνει



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)



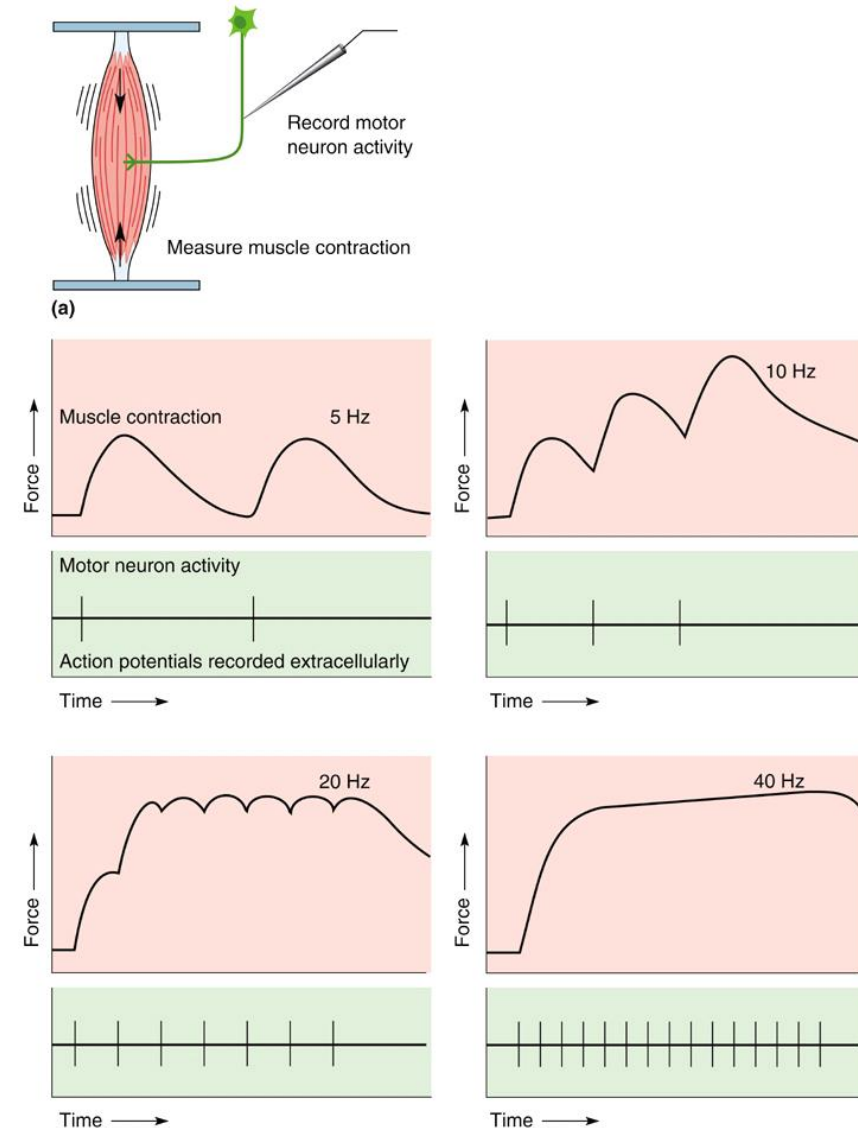
- Οι α κινητικοί νευρώνες σχηματίζουν συνάψεις με τους μύες
 - ΔΕ φτάνει στην απόλιξη
 - Απελευθερώνεται ACh
 - Νικοτινικοί υποδοχείς στην τελική πλάκα (endplate)
 - Δημιουργούνται ΔΜΣΔ (EPSP), λέγονται και δυναμικά τελικής πλάκας (endplate potentials)
 - Τασεοελεγχόμενοι δίαυλοι Na^+ → ΔΕ
 - Σύσπαση (Contraction)
 - Εστεράση της ACh (Acetylcholinesterase) διασπά την ACh



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)



- **Βαθμιδωτός έλεγχος της σύσπασης των μυών**
 - Αλλάζει ο ρυθμός πυροδότησης (firing rate) των α κινητικών νευρώνων
 - Επιστράτευση και άλλων συνεργικών κινητικών μονάδων
 - Μικρές πρώτα, μεγάλες μετέπειτα
- **Μυϊκός Τέτανος (Tetanus)**
 - Μυϊκές ίνες διεγείρονται τόσο γρήγορα που δεν προλαβαίνουν να χαλαρώσουν
 - Σύσπαση 3-4x πιο δυνατή από μια μόνη σύσπαση (twitch)
 - Μην το μπερδέψετε με την ασθένεια!



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)

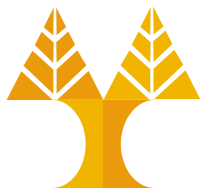


• Είδη κινητικών μονάδων (Motor Units)

- Ερυθροί Μύες (Red muscle fibers)
 - Μεγάλος αριθμός μιτοχονδρίων, μυογλοβίνης (myoglobin) και ενζύμων
 - Συσπώνται αργά για παρατεταμένη διάρκεια
- Λευκοί μύες (White muscle fibers)
 - Λίγα μιτοχόνδρια, αναεροβικός μεταβολισμός
 - Γρήγορη σύσπαση και κόπωση (fatigue)
- Γρήγορες κινητικές μονάδες (Fast motor units)
 - Νευρώνες μεγάλης διαμέτρου → γρήγορη αγωγή (conduction)
 - Λευκοί μύες → γρήγορη κόπωση
- Αργές κινητικές μονάδες (Slow motor units)
 - Νευρώνες μικρής διαμέτρου → αργή αγωγή (conduction)
 - Ερυθροί μύες → αργή κόπωση



Το Σκελετοκινητικό Σύστημα (The Somatic Motor System)

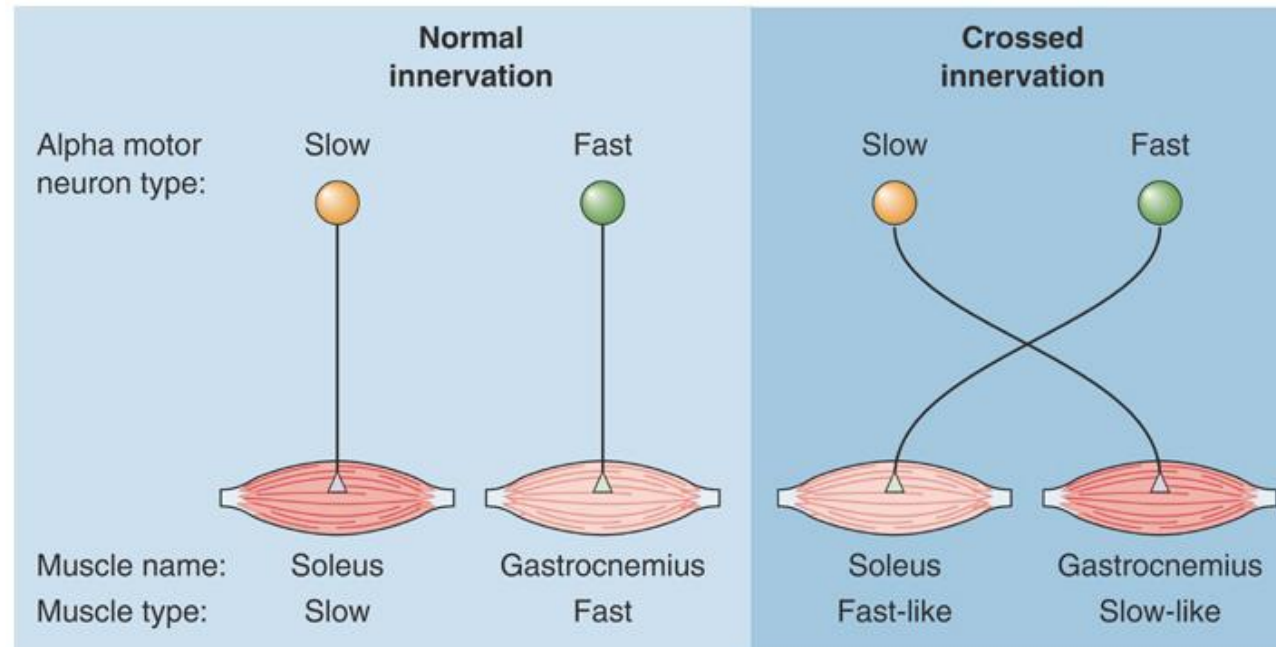


- **Νευρομυϊκός Τύπος**

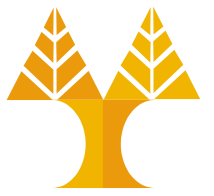
- Εξαρτούνται οι ιδιότητες του μυός από τον νευρώνα που τον εννεурώνει;
- Ανταλλαγή νευρώνων
 - Αλλάζει ο φαινότυπος (phenotype), δηλαδή τα φυσικά χαρακτηριστικά

- **Μύες αλλάζουν λόγο αλλαγής στη δραστηριότητα**

- Υπερτροφία (Hypertrophy): Υπερβολική αύξηση του όγκου των μυϊκών ινών
- Ατροφία (Atrophy): Καταστροφή (degeneration) των μυϊκών ινών



Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)



- **Μυϊκή ίνα (Muscle fiber)**

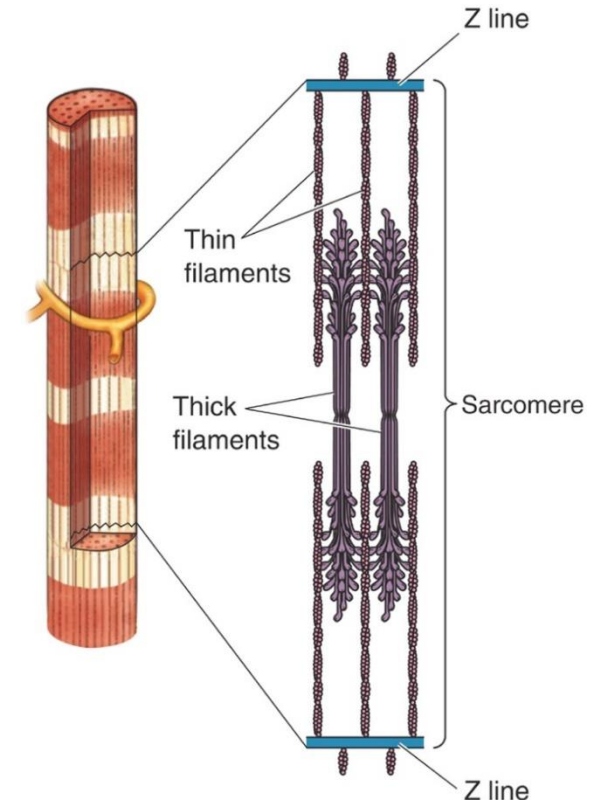
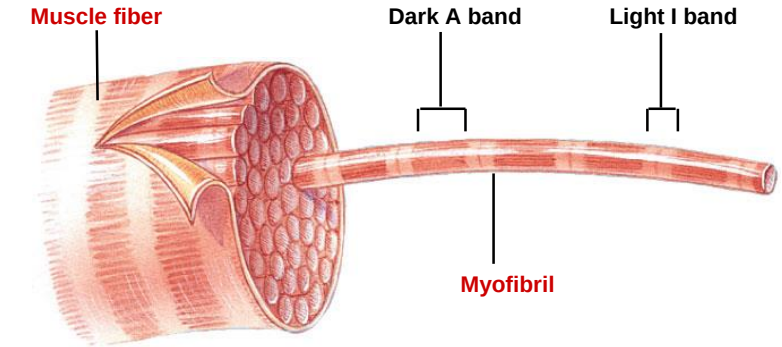
- Κύτταρο (cell)
- Πολλά μυϊκά ινίδια (myofibrils)

- **Μυϊκά Ινίδια (Myofibrils)**

- Συσταλτικές (contractile) μονάδες της μυϊκής ίνας
- Με το μικροσκόπιο
 - Εναλλασσόμενες σκούρες (A bands) και ανοιχτόχρωμες (I bands) λωρίδες
 - Γραμμώσεις (striations)
- Συμμετρική διαρρύθμιση νημάτων
 - Παχέα Νημάτια (Thick filaments) – Μυοσίνη (myosin)
 - Λεπτά Νημάτια (Thin filaments) – ακτίνη (actin)

- **Σαρκομέριο (Sarcomere)**

- Λειτουργική μονάδα (Functional unit) του σκελετικού μυός
- Μεταξύ δύο γραμμών Z
 - Οι γραμμές Z ενώνουν τα νημάτια δύο συνεχόμενων σαρκομερίων

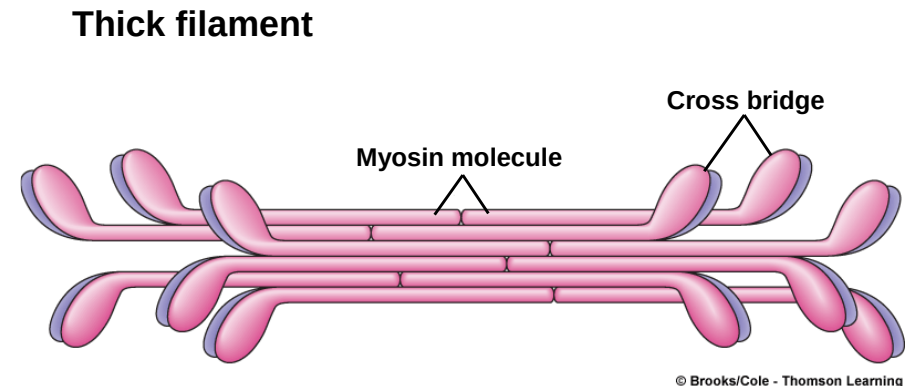
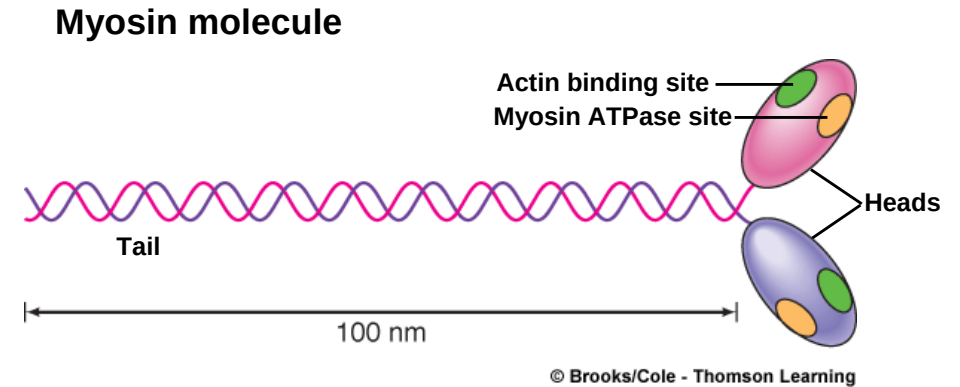


Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)

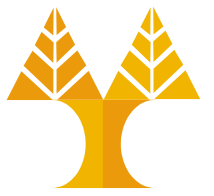


• Παχέα Νημάτια (Thick filaments)

- Μόρια μυοσίνης (myosin)
- Μερικές εκατοντάδες μόρια
- Κεφαλές σχηματίζουν διασυνδέσεις (cross bridges) μεταξύ παχέων και λεπτών (thin) νηματίων
 - Η κεφαλή έχει δύο σημαντικές περιοχές πρόσδεσης
 - Μια περιοχή για πρόσδεση στην ακτίνη
 - Μια περιοχή ATPase (υδρόλυση ATP)

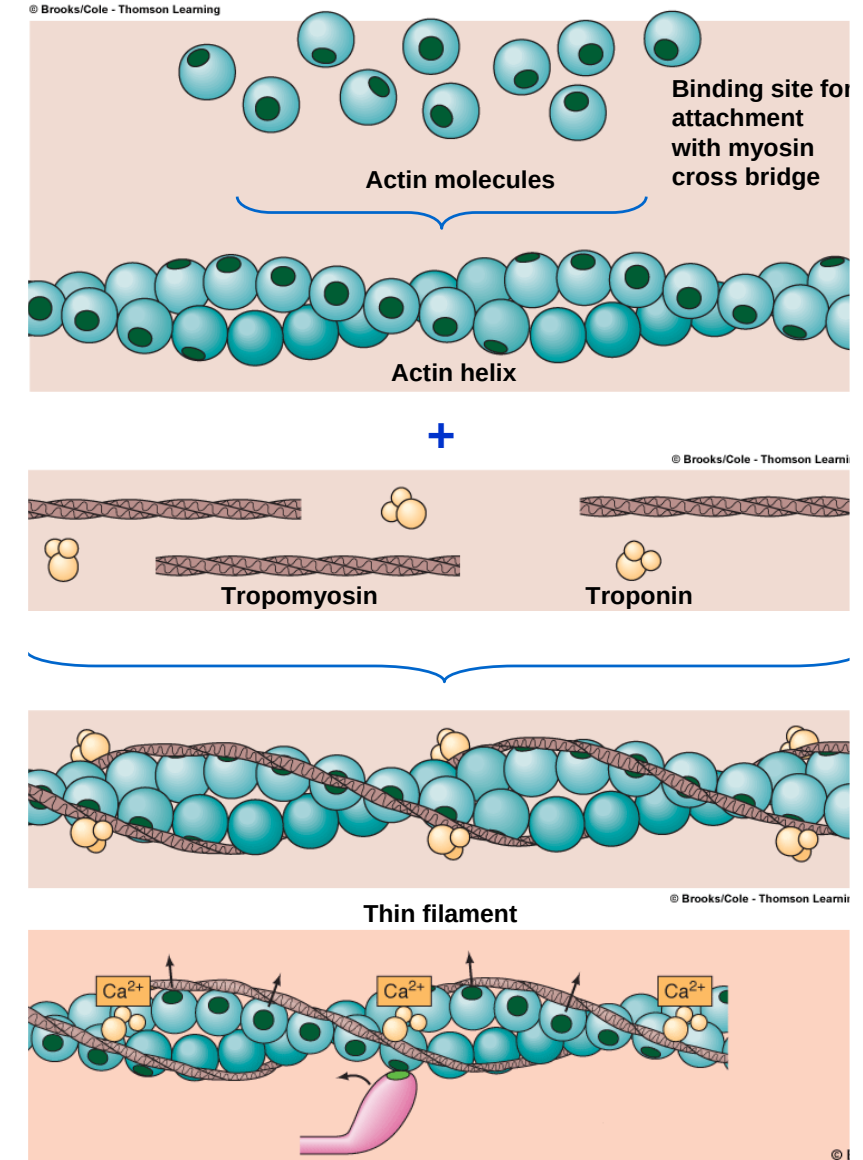


Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)

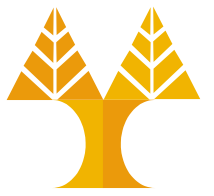


- **Λεπτά Νημάτια (Thin filaments)**

- Ακτίνη (Actin)
 - Το κυρίως μέρος των νημάτων
 - Κάθε μόριο ακτίνης διαθέτει περιοχή για πρόσδεση με την κεφαλή της μυοσίνης
- Τροπομυοσίνη (Tropomyosin)
 - Μόρια σαν λεπτά νημάτια τα οποία καλύπτουν τις περιοχές πρόσδεσης της ακτίνης και εμποδίζουν πρόσδεση στη μυοσίνη
- Τροπονίνη (Troponin)
 - Τρεις πολυπεπτιδικές μονάδες
 - Μια προσκολλάται στην τροπομυοσίνη
 - Μια προσκολλάται στην ακτίνη
 - Μια προσκολλάται στο Ca^{2+}
- Όταν Ca^{2+} προσκολληθεί στην τροπονίνη
 - Η τροπομυοσίνη μετακινείται από τη θέση όπου εμποδίζει την πρόσδεση
 - Μπορεί να γίνει πρόσδεση ακτίνης-μυοσίνης

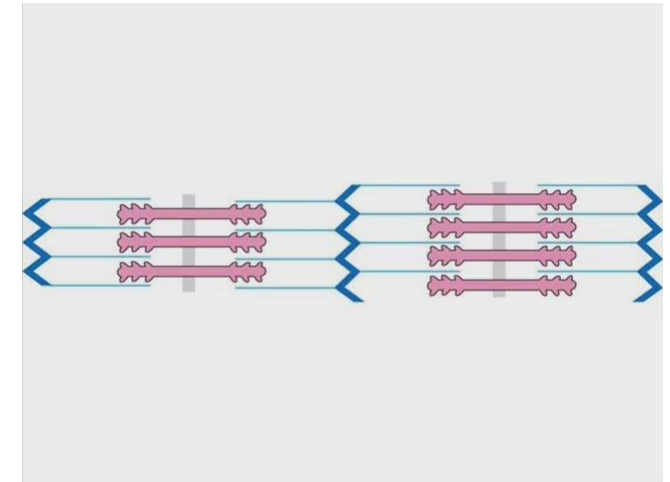
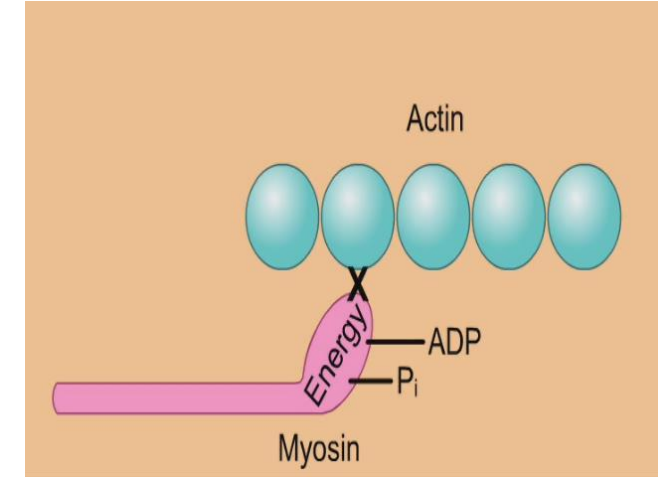


Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)

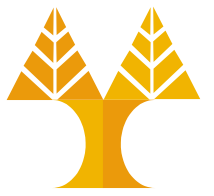


• Ισχυρή Ώθηση (Power Stroke)

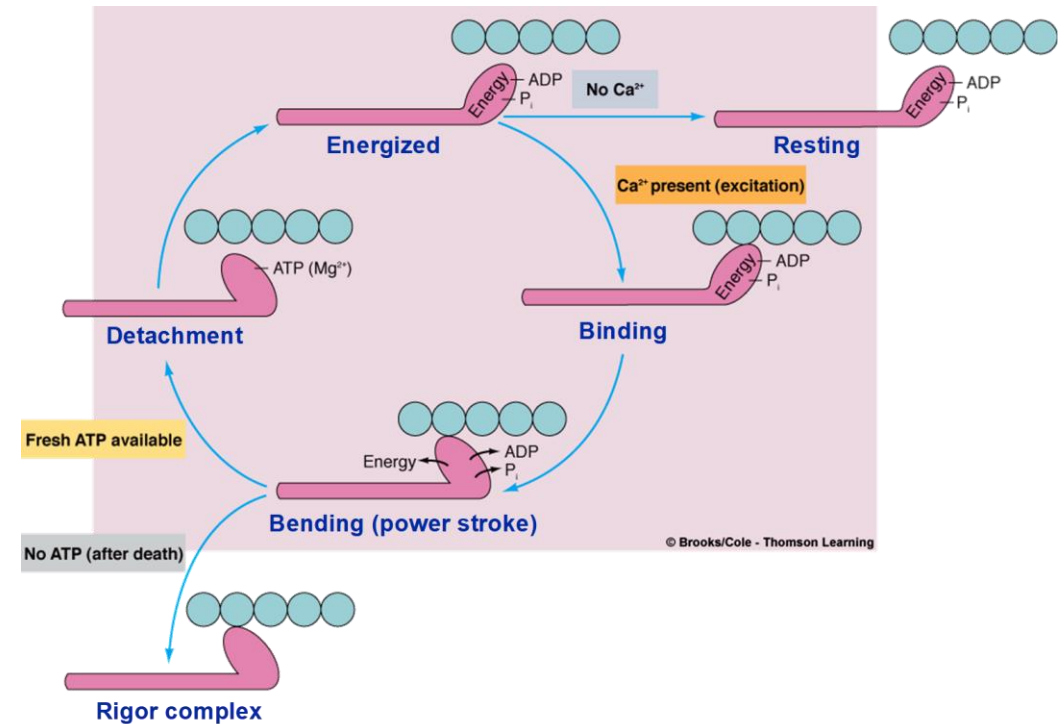
- Ca^{2+} απελευθερώνεται από το σαρκοπλασματικό δίκτυο (sarcoplasmic reticulum)
- Περιοχές πρόσδεσης ελευθερώνονται
- Η κεφαλή της μυοσίνης προσκολλάται στην ακτίνη
- Η κεφαλή της μυοσίνης περιστρέφεται προς το κέντρο του σαρκομέριου – Ισχυρή Ώθηση (power stroke)
- Απελευθερώνεται ADP
- Προσκολλάται ATP και απελευθερώνεται η κεφαλή της μυοσίνης από την ακτίνη
- Υδρόλυση του ATP μεταφέρει ενέργεια στη μυοσίνη και την επαναφέρει στην αρχική διαμόρφωση της



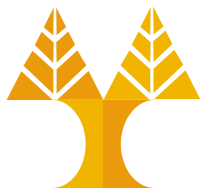
Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)



- Η σύσπαση συνεχίζεται ενώσω υπάρχει ATP και τα επίπεδα του Ca^{2+} στο σαρκόπλάσμα (sarcoplasm) είναι αρκετά ψηλά
- Η μυοσίνη παραμένει ενωμένη μέχρι να προσκολληθεί ATP → νεκρική ακαμψία (rigor mortis)
 - Απελευθέρωση Ca^{2+}
 - Το ATP εξαντλείται γρήγορα
 - Αρχίζει σε μερικές ώρες
 - Μπορεί να διαρκέσει 1-2 μέρες
- Το Ca^{2+} βρίσκεται αποθηκευμένο στο σαρκοπλασμικό δίκτυο (sarcoplasmic reticulum)



Σύνδεση Διέγερσης-Σύσπασης (Excitation-Contraction Coupling)

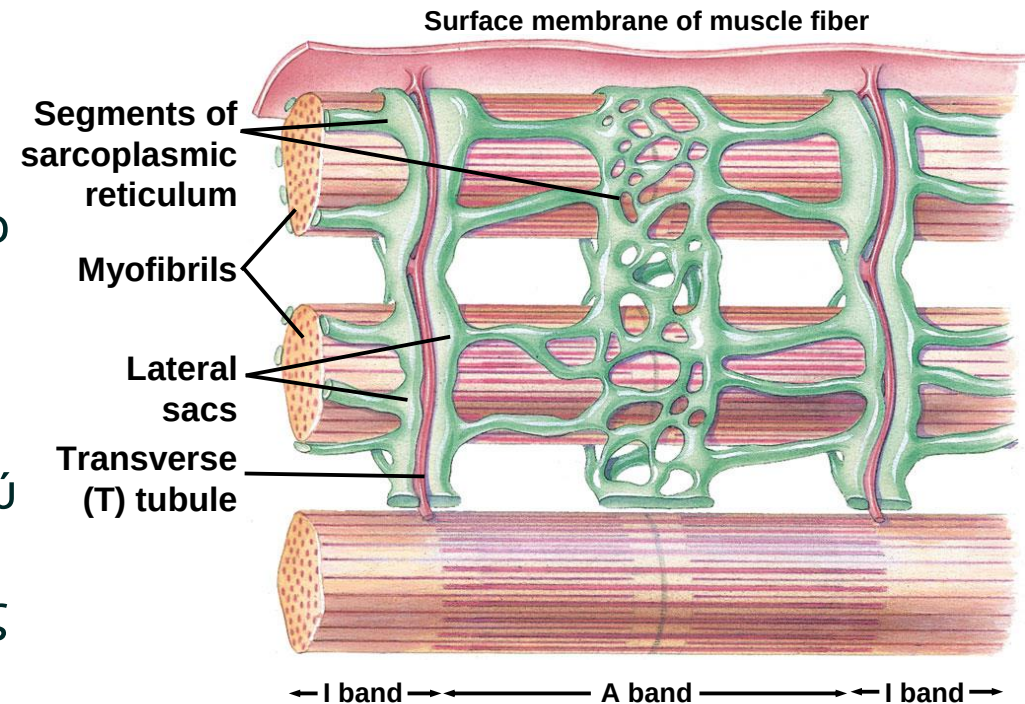


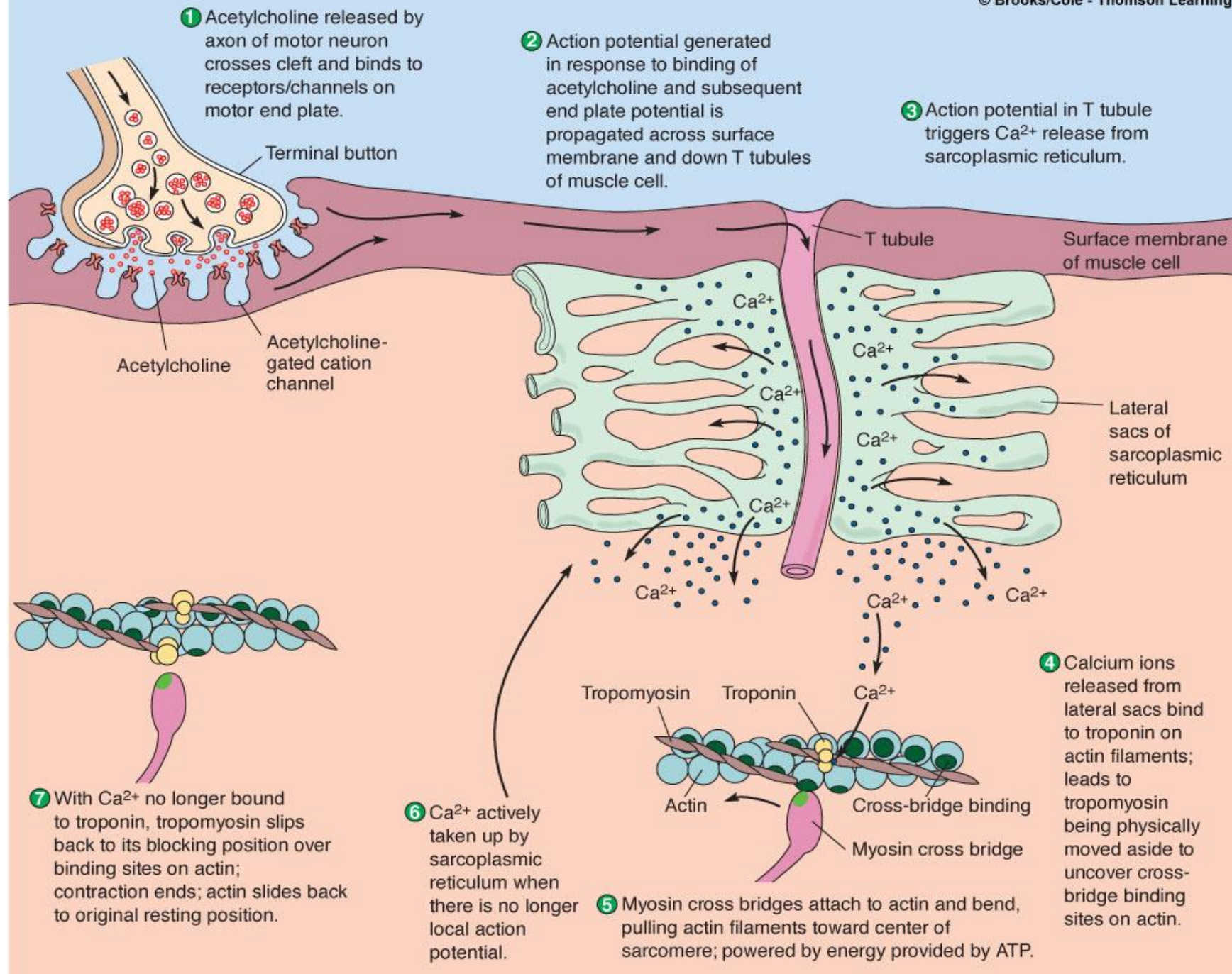
- **Σαρκοπλασμικό Δίκτυο (Sarcoplasmic Reticulum - SR)**

- Τροποποιημένο ενδοπλασμικό δίκτυο (endoplasmic reticulum)
- Ένα δίκτυο από διασυνδεόμενα χωρίσματα, γύρω από κάθε μυϊκό ινίδιο (myofibril)
- Δεν είναι συνεχές αλλά περιβάλλει το ινίδιο σε όλο του το μήκος

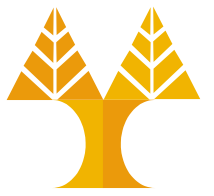
- **Εγκάρσιοι ή T σωληνίσκοι (T tubules)**

- Βαθείς σωληνοειδείς εγκολπώσεις της κυτταρικής μεμβράνης από την επιφάνεια προς το κέντρο του μυϊκού κυττάρου
- Είναι συνεχή με την επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης → Δυναμικά ενεργείας από την επιφάνεια κατευθύνονται μέσα στους σωληνίσκους
- Διάδοση των ΔΕ ενεργοποιεί απελευθέρωση Ca^{2+} από το ΣΔ στο κυτοσόλιο





Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)



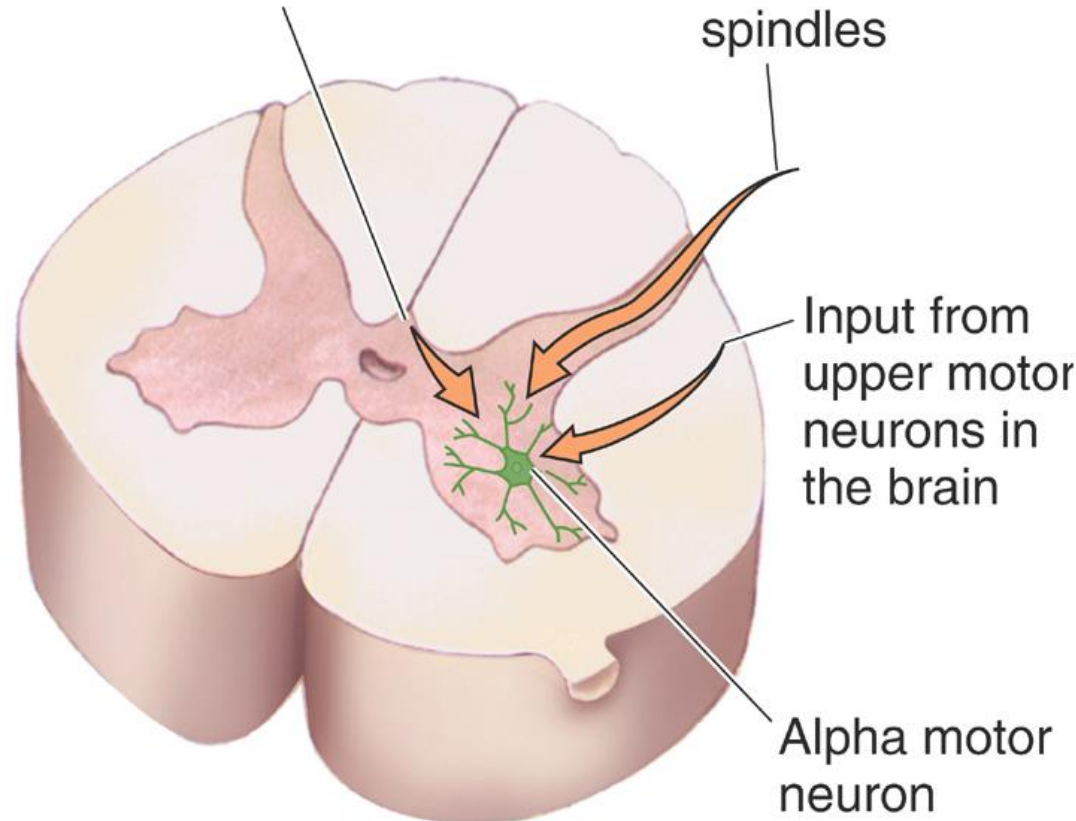
- Είσοδοι στους α κινητικούς νευρώνες

Διάμεσοι νευρώνες
του νωτιαίου μυελού

Input from spinal
interneurons

Sensory input
from muscle
spindles

Αισθητήρια
εισαγωγή από
τις μυϊκές
ατράκτους



Input from
upper motor
neurons in
the brain

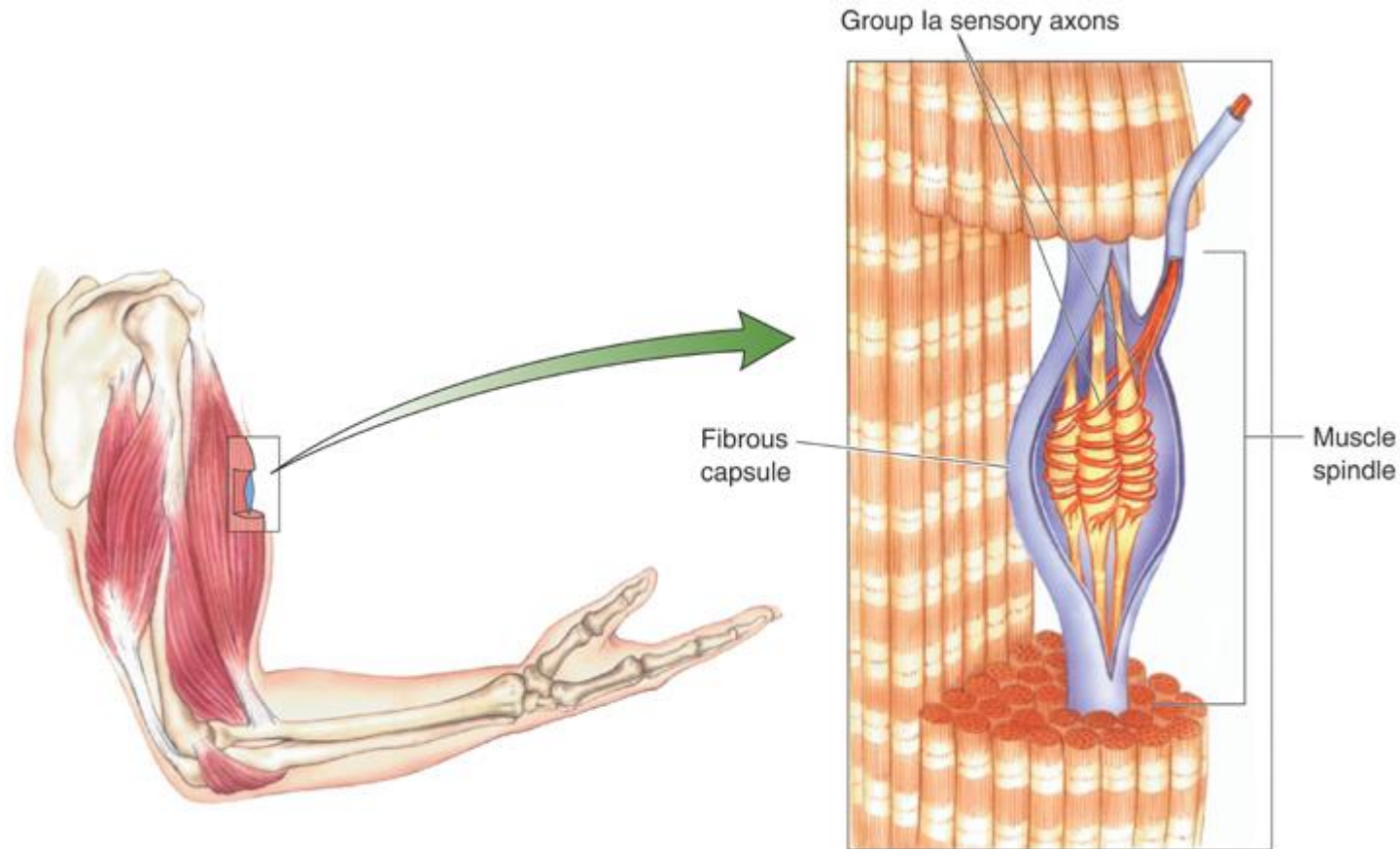
Εισαγωγή από
τους άνω
κινητικούς
νευρώνες

Alpha motor
neuron

Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)



- Αισθητήρια ανάδραση από τους μύες
 - Ιδιοδεκτικότητα (Proprioception)

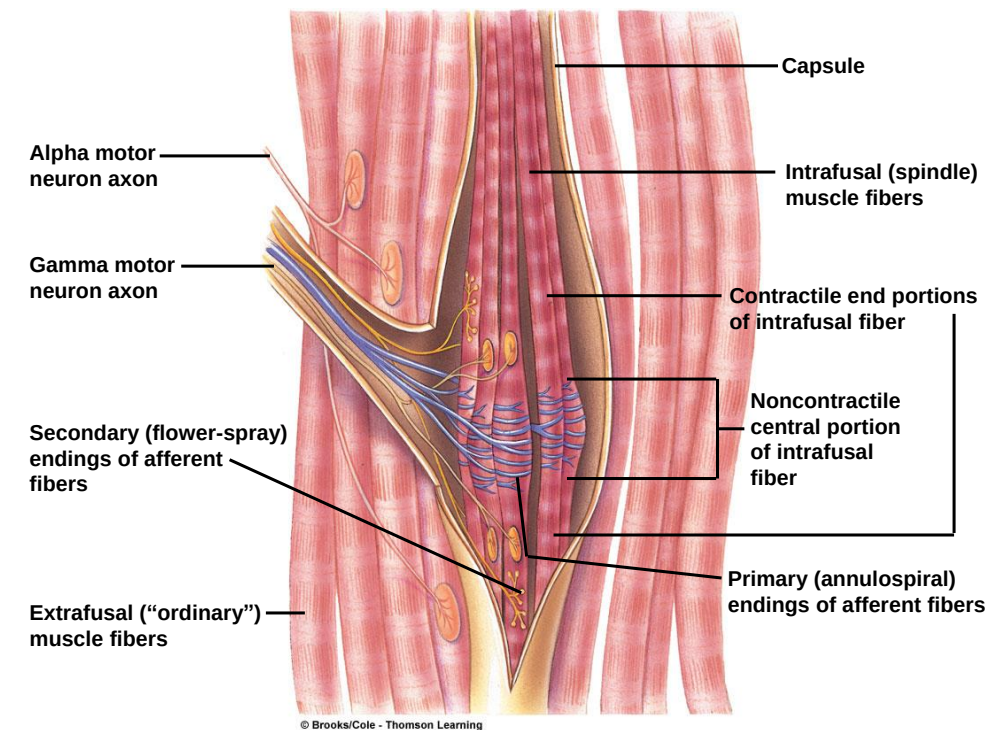


Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)

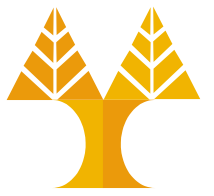


- **Νευρομυϊκές άτρακτοι (Muscle Spindles)**

- Παράλληλα με τον μυ
- Ελέγχουν το μήκος του μυός
- Μια ομάδα από εξειδικευμένες μυϊκές ίνες = ενδοατράκτιες ίνες (intrafusal fibers)
 - Μέσα σε ένα περίβλημα συνδετικού ιστού που μοιάζει με άτρακτο, παράλληλα με τις εξωατράκτιες ίνες
 - Τα άκρα μπορούν να συστέλλονται (contractile ends) ενώ το κεντρικό μέρος όχι
- Κάθε άτρακτος έχει τη δική της εννεύρωση
 - Παίξει ρόλο στο μυοτακτικό αντανακλαστικό (stretch reflex)
 - Απαγωγοί (Efferent)
 - γ κινητικοί νευρώνες (Gamma motor neurons)
 - Προσαγωγοί (Afferent - Ia)

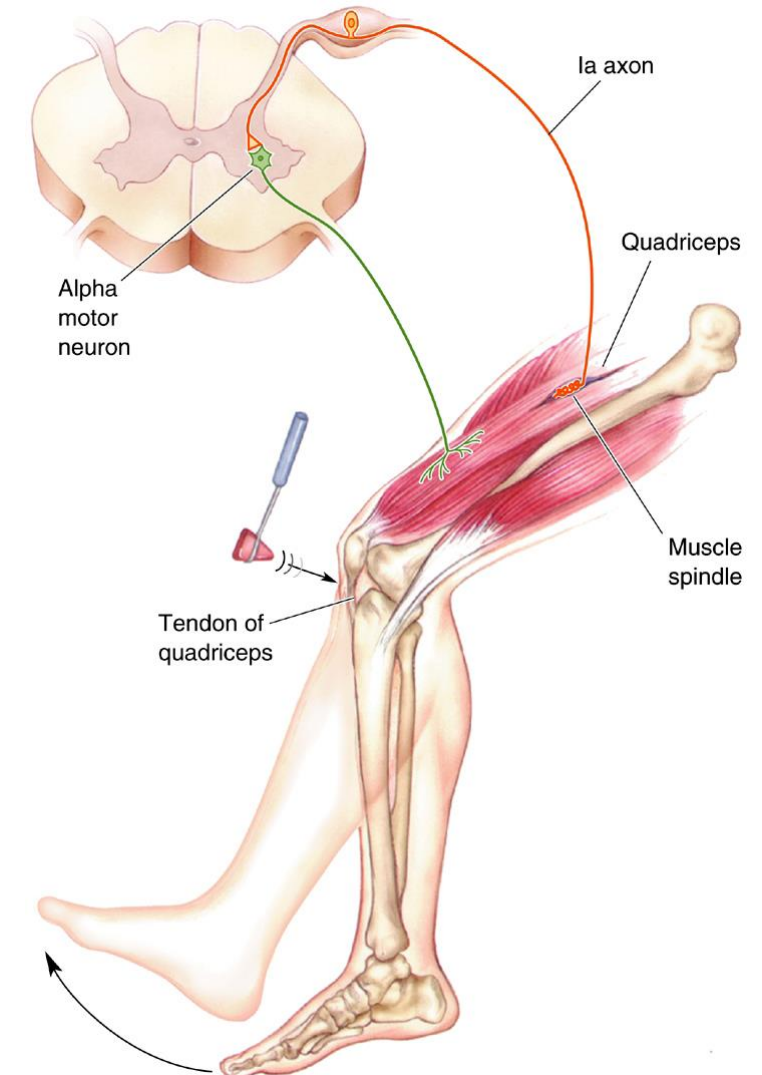


Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)

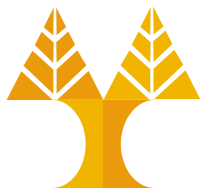


- **Μυοτακτικό αντανακλαστικό (Myotatic Reflex)**

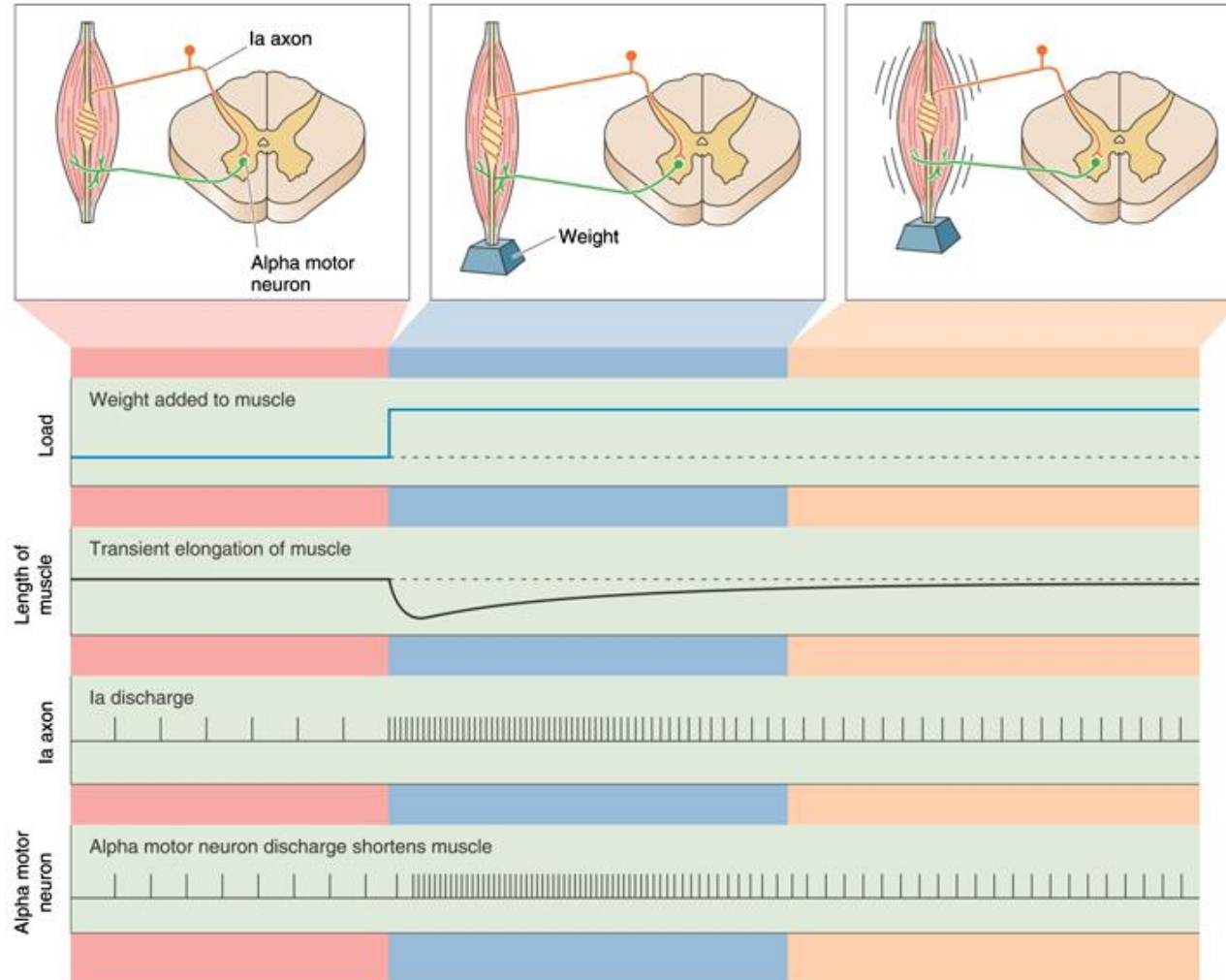
- Τάνυση του μυός → Ο μυς τείνει να επανέλθει στο προηγούμενο μήκος
- Βρόγχος ανάδρασης
- Ο ρυθμός πυροδότησης ΔΕ του αισθητήριου νεύρου είναι ανάλογος του μήκους του μυός
- Μονοσυναπτικό (Monosynaptic)
- Παράδειγμα
 - Αντανακλαστική εκτίναξη του ποδιού (knee-jerk reflex)



Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)



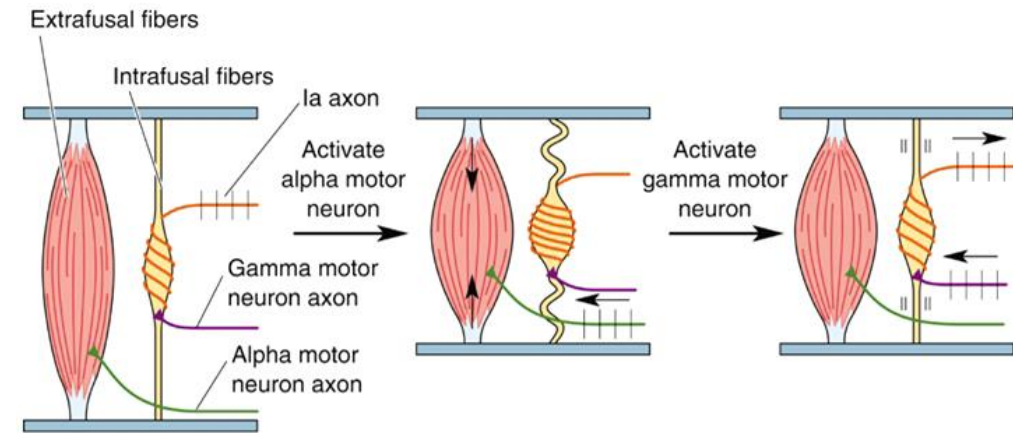
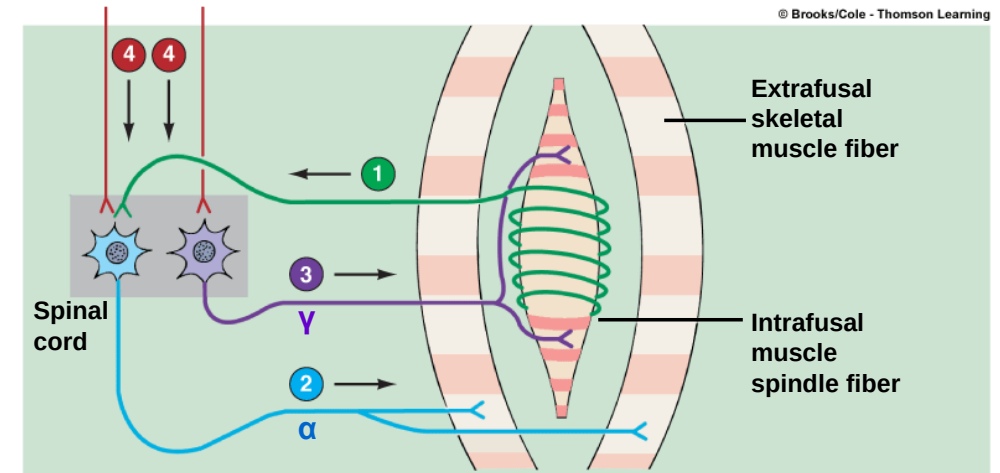
- Μυοτακτικό αντανακλαστικό (Myotatic Reflex)



Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)



- Συγχρονισμένη ενεργοποίηση (coactivation) α και γ κινητικών νευρώνων
 - Κατά τη διάρκεια της σύσπασης του μυός
 - Η άτρακτος συσπάται για να μειωθεί το μήκος της
 - Προσαρμογή ώστε να παραμείνει ευαίσθητη σε επιμήκυνση
- Χωρίς συγχρονισμένη ενεργοποίηση
 - Χαλαρή άτρακτος
 - Δεν παρέχει σήμα μετά από επιμήκυνση

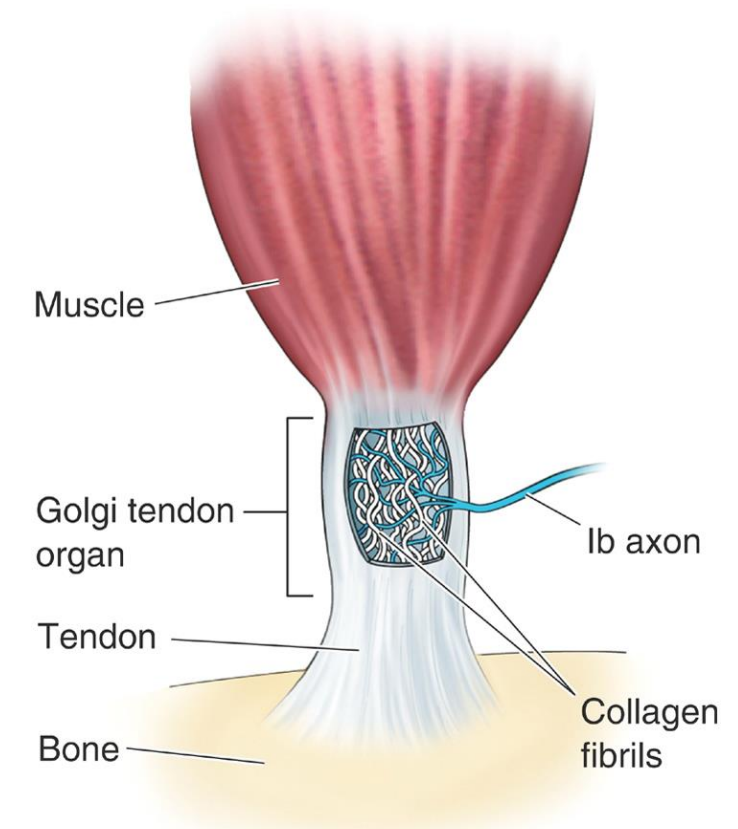


Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)

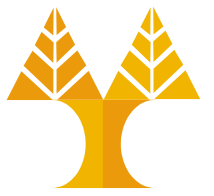


• Τενόντιο Όργανο του Gogli (Gogli Tendon Organ)

- Σε σειρά με τον μυ
 - Εξειδικευμένοι νευρώνες ενσωματωμένοι στους τένοντες (Ib)
- Ανάδραση σχετικά με την ολική τάση (tension) του μυός
 - Ενσωματώνει όλους του παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την τάση
- Τάνυση του τένοντα ασκεί πίεση στις απολήξεις των νευρώνων
 - Αυξάνεται ο ρυθμός των ΔΕ
 - Αντίστροφο μυοτακτικό αντανακλαστικό
- Πληροφορίες φτάνουν μέχρι και την ενσυνείδητη επίγνωση (conscious awareness)
 - Αισθανόμαστε την τάση (αλλά όχι το μήκος) στους μύες



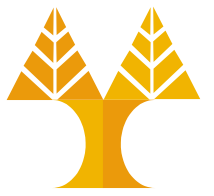
Έλεγχος της Κίνησης από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Control of Motor Units)



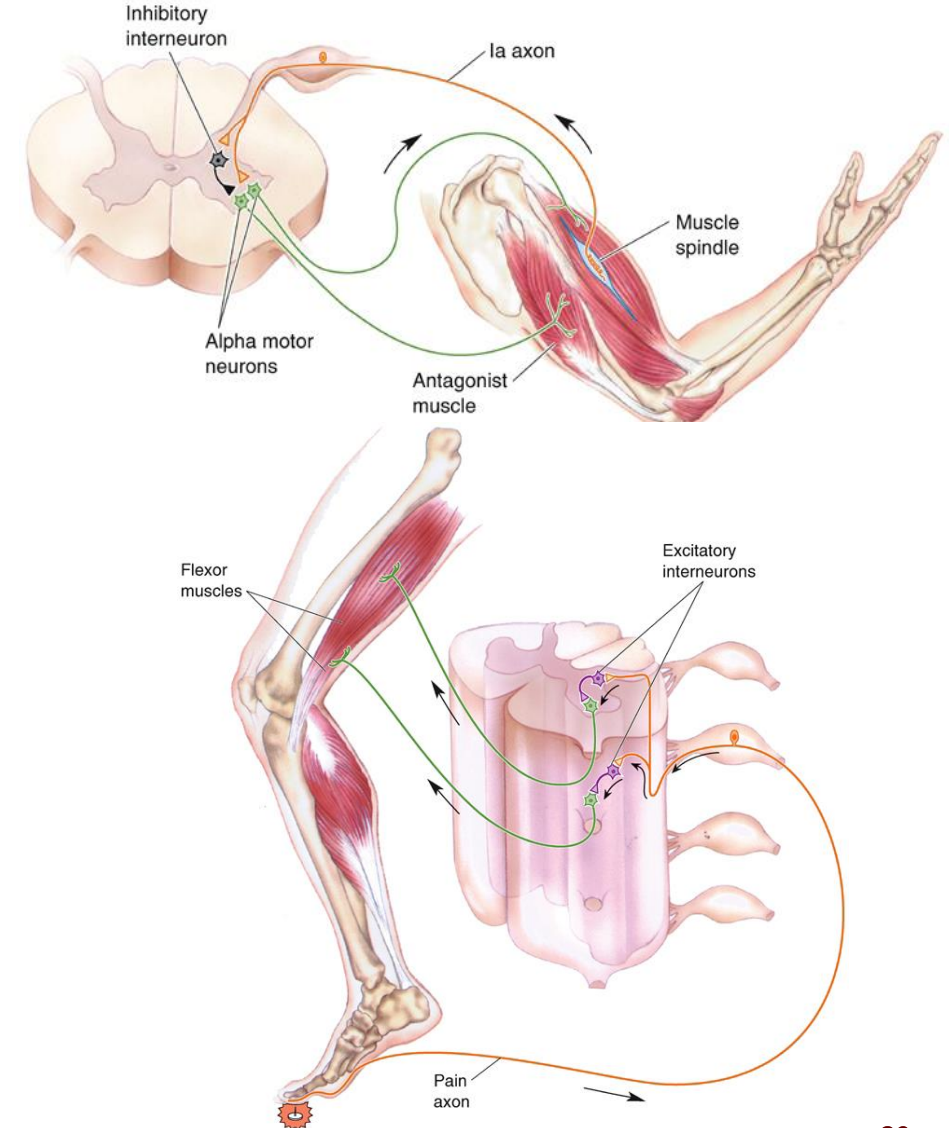
- **Ιδιοδεκτικότητα (Proprioception) από τις κλειδώσεις (joints)**
 - Ιδιοδεκτικοί νευρώνες από τους ιστούς της κλείδωσης
 - Αντιδρούν στη γωνία, κατεύθυνση, και ταχύτητα της κίνησης της κλείδωσης
 - Πληροφορίες από τις κλειδώσεις συνδυάζονται με τις πληροφορίες από τις ατράκτους, τα τενόντια όργανα Gogli και το δέρμα



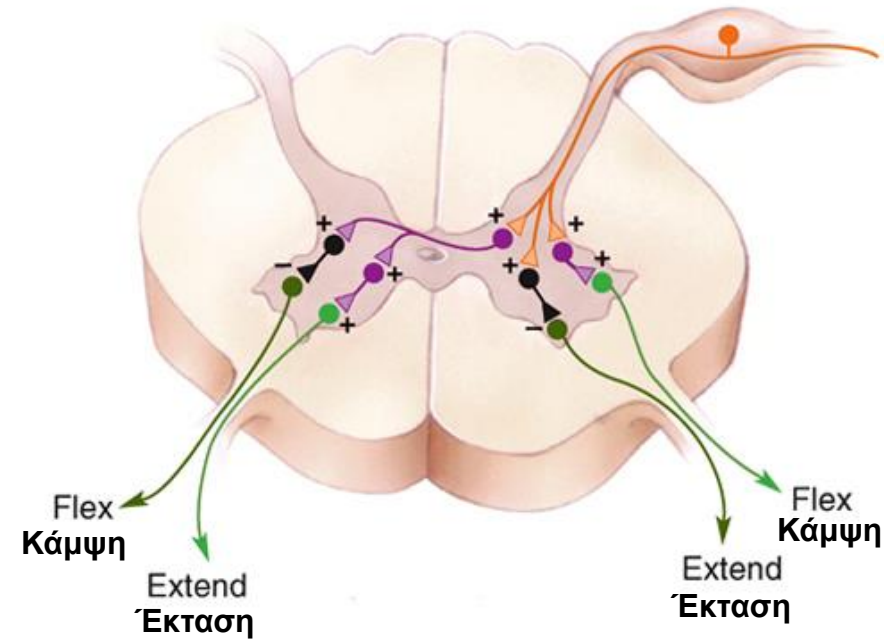
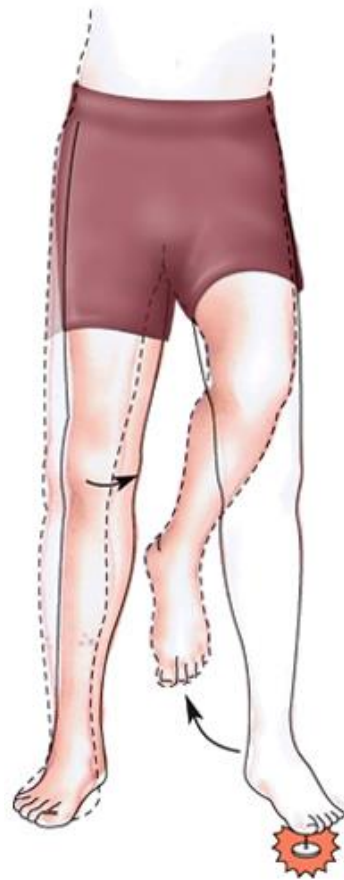
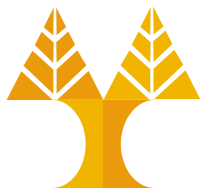
Διάμεσοι Νευρώνες του Νωτιαίου Μυελού (Spinal Interneurons)

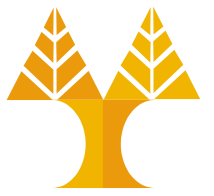


- **Συναπτικές εισόδους στους διάμεσους νευρώνες**
 - Κύριοι αισθητήριοι νευρώνες (Primary sensory axons)
 - Νευρώνες από τον εγκέφαλο (Descending axons from brain)
 - Παράπλευροι από κατώτερους κινητικούς νευρώνες (Collaterals of lower motor neuron axons)
- **Ανασταλτικοί Διάμεσοι Νευρώνες (Inhibitory Interneurons)**
 - Αντίστροφη Αναστολή (Reciprocal inhibition)
 - Σύσπαση ενός μυός συνοδεύεται από χαλάρωση του ανταγωνιστή του
 - Π.χ. Μυοτακτικό ανακλαστικό
- **Διεγερτικοί Διάμεσοι Νευρώνες (Excitatory Interneurons)**
 - Αντανακλαστικό Απόσυρσης (Flexor reflex)
 - Απόσυρση άκρου από ερέθισμα
 - Αντανακλαστικό Διασταυρομένης Απόσυρσης (Crossed-extensor reflex)
 - Activation of extensor muscles and inhibition of flexors on opposite side



Διάμεσοι Νευρώνες του Νωτιαίου Μυελού (Spinal Interneurons)

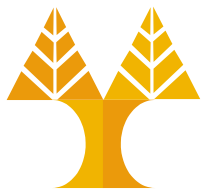




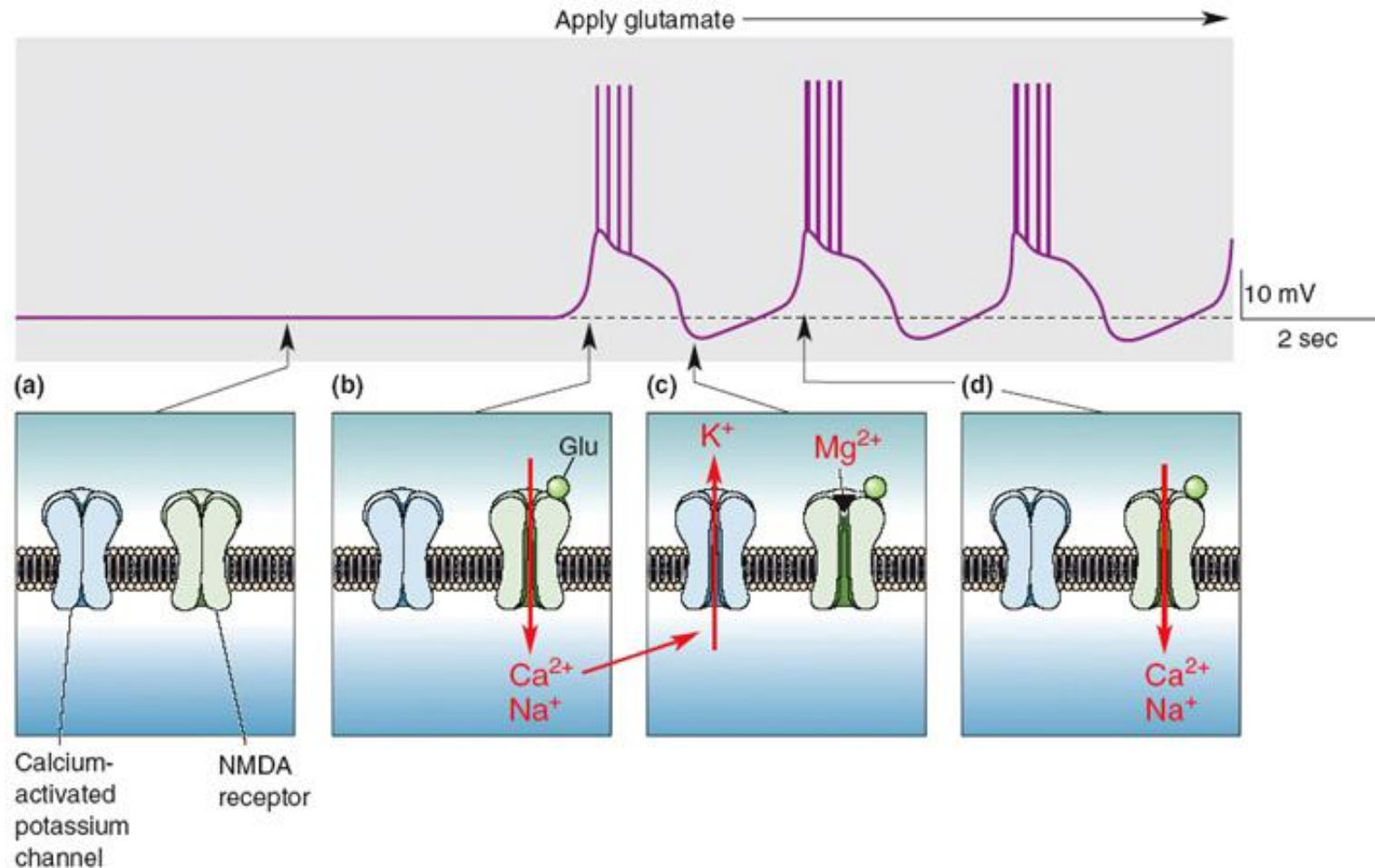
- **Πρόγραμμα για βάδισμα από τον Νωτιαίο Μυελό (Spinal Motor Programs for Walking)**
 - Γιατί τα αποκεφαλισμένα κοτόπουλα συνεχίζουν αν τρέχουν;
 - (σε κάποιο βαθμό τρέχουν και οι αποκεφαλισμένες γάτες)



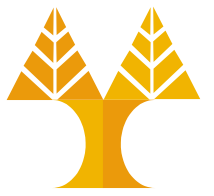
Προγραμματισμός Βαδίσματος από τον Νωτιαίο Μυελό



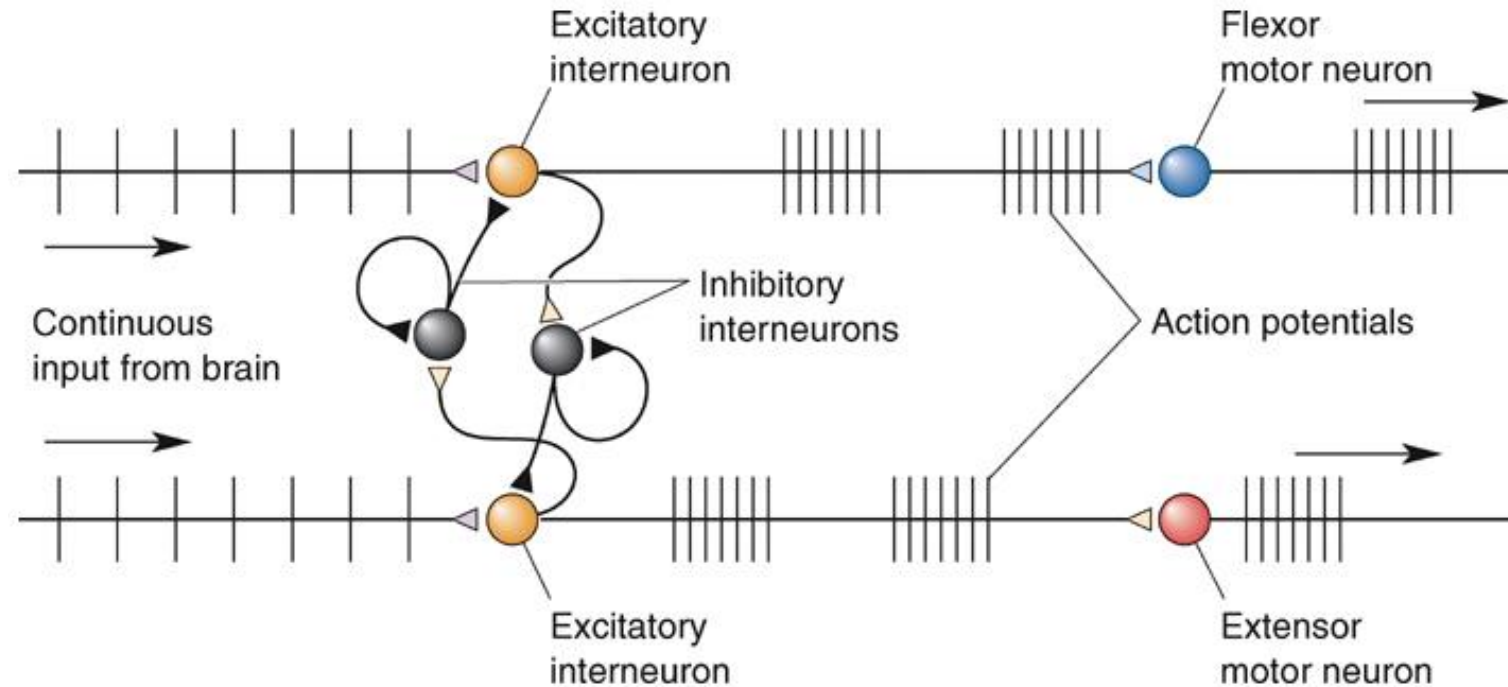
- Παραγωγή προγράμματος για βάδισμα από τον Νωτιαίο Μυελό



Προγραμματισμός Βαδίσματος από τον Νωτιαίο Μυελό



- Παραγωγή προγράμματος για βάδισμα από τον Νωτιαίο Μυελό





Διάλεξη 15
Κίνηση από το ΚΝΣ
(CNS Control of Movement)