



## ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

### *Βιοφυσική -*

### *Βιοφυσικός μηχανισμός της μυϊκής συστολής*

Ακαδ. έτος 2008-2009 - Διδάσκουσα: Μυρσίνη Μακροπούλου

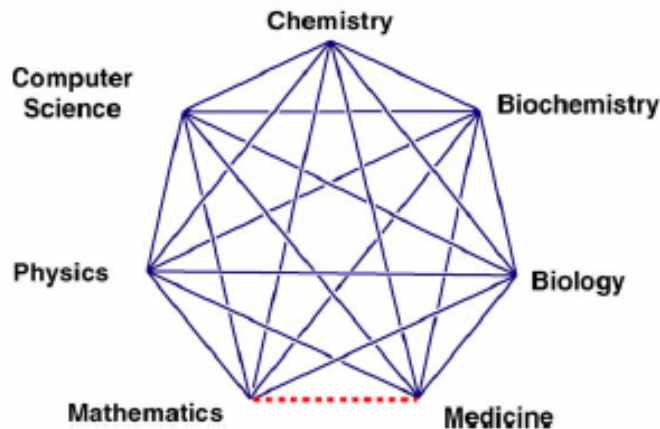
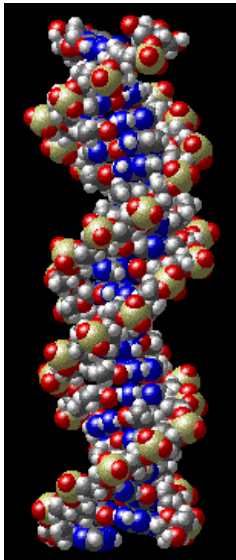
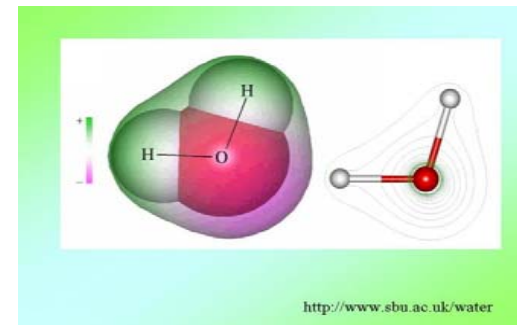


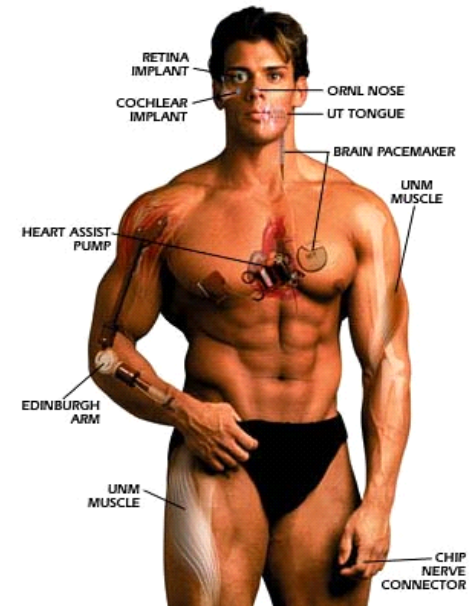
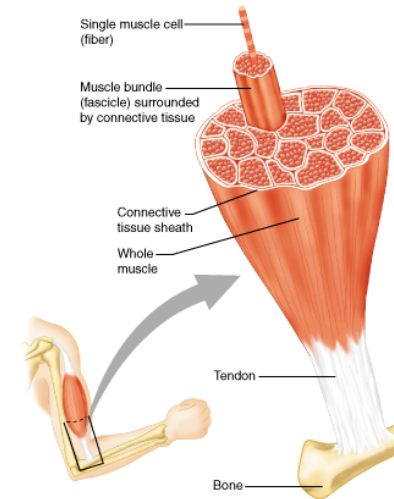
Fig. 15. The seven fields of molecular science.



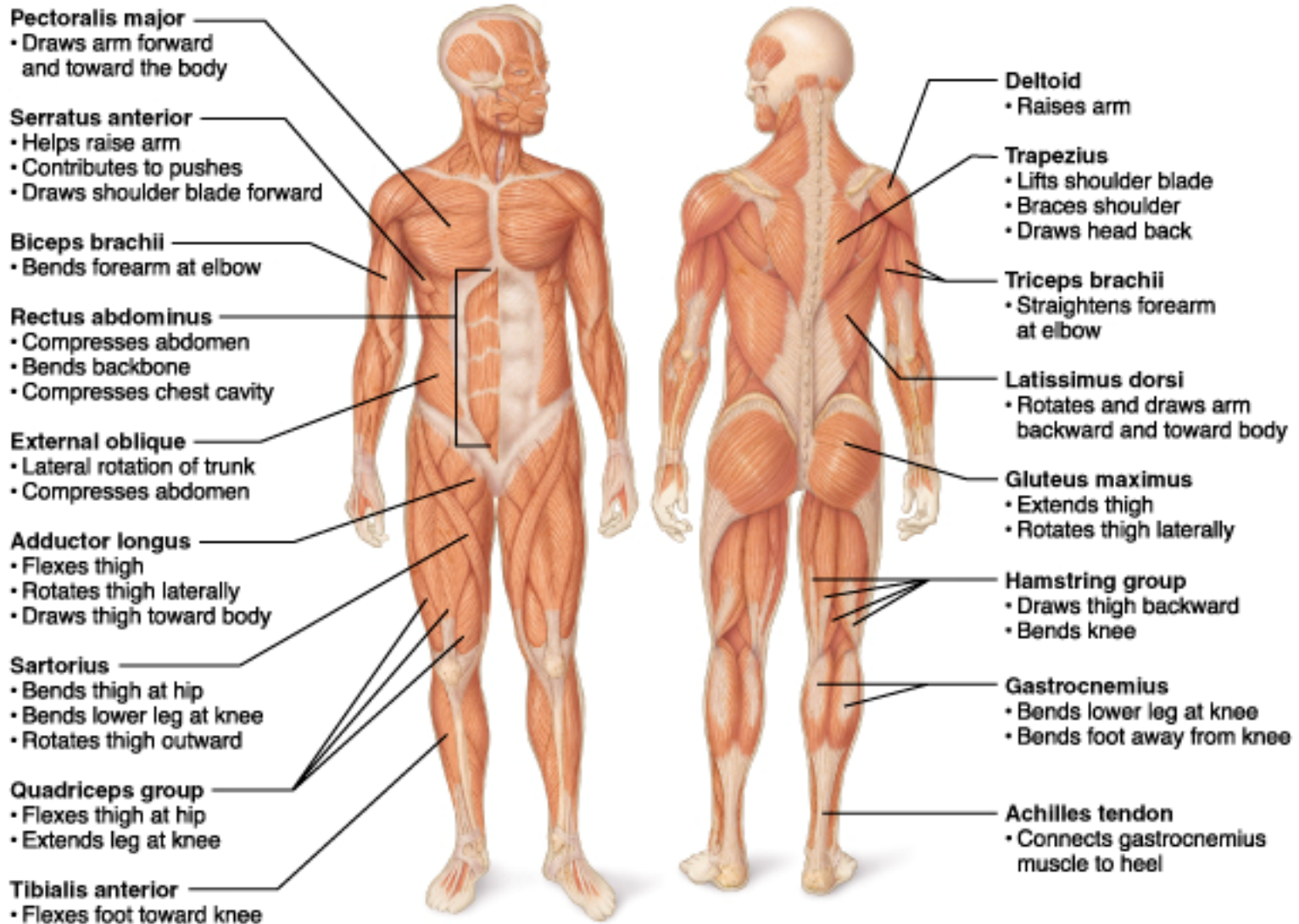
## ❖ Μηχανικά φαινόμενα και συστολή των μυών

⇒ Ο μυϊκός ιστός αποτελείται από τις **μυϊκές ίνες**, δηλαδή εξειδικευμένα κύτταρα που έχουν μεγάλο αριθμό συσταλτών κυτταροπλασματικών ινιδίων. Στον άνθρωπο διακρίνονται τρεις τύποι μυϊκού ιστού: ο γραμμωτός, ο λείος και ο καρδιακός.

⇒ Ένας **γραμμωτός μύς** (ή και σκελετικός μύς) αποτελείται από τα δύο άκρα με τα οποία προσφύεται στα οστά (**έκφυση, κατάφυση**) και το μεταξύ αυτών τμήμα (**γαστέρα**). Οι προσφύσεις των μυών στις περισσότερες περιπτώσεις ονομάζονται **τένοντες** και αποτελούνται από ίνες συνδετικού ιστού. Οι γραμμωτοί μύες στον άνθρωπο αποτελούν το 40% του βάρους του.



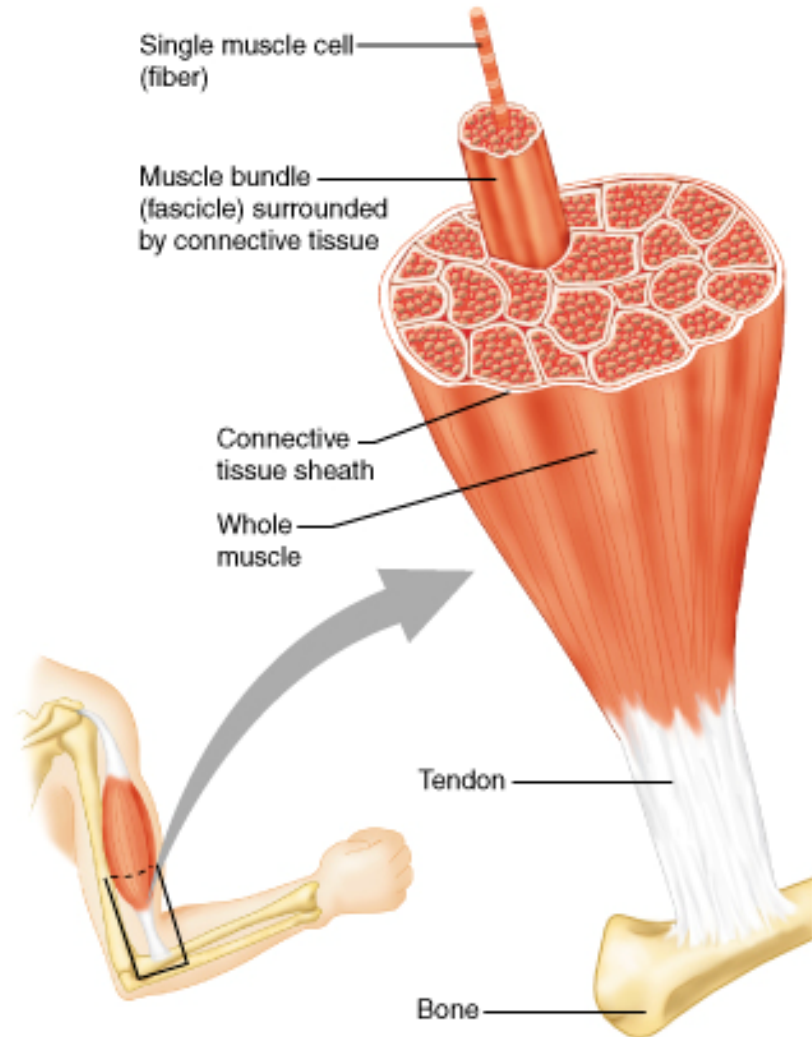
# The Muscular System - Το μυϊκό σύστημα -



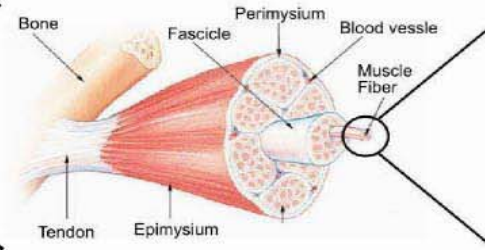
# Δομή μυός

**δεσμίδα μυϊκών ινών και  
συνδετικός ιστός που καλύπτει  
κάθε μια δεσμίδα**

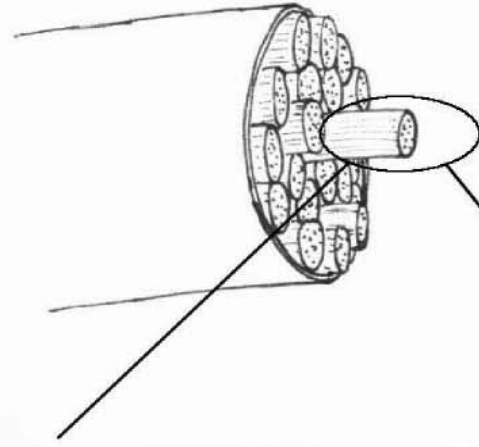
**Μυϊκές ίνες = μυϊκά κύτταρα**



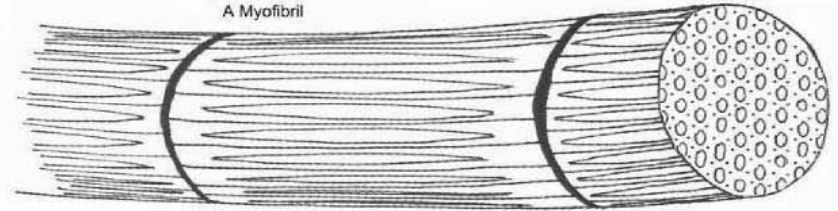
# • Μυϊκή ίνα



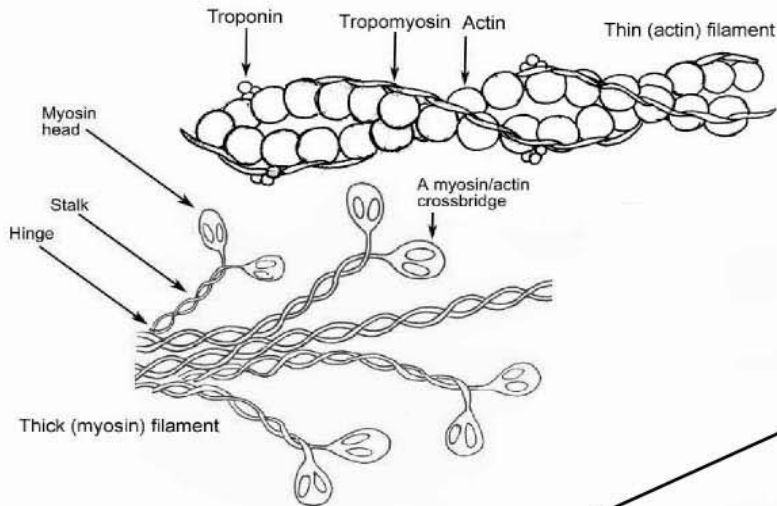
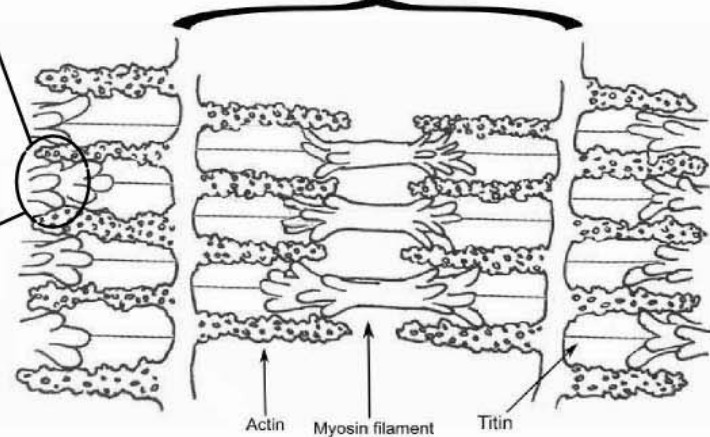
Muscle Fiber (single cell, multi-nuclear)



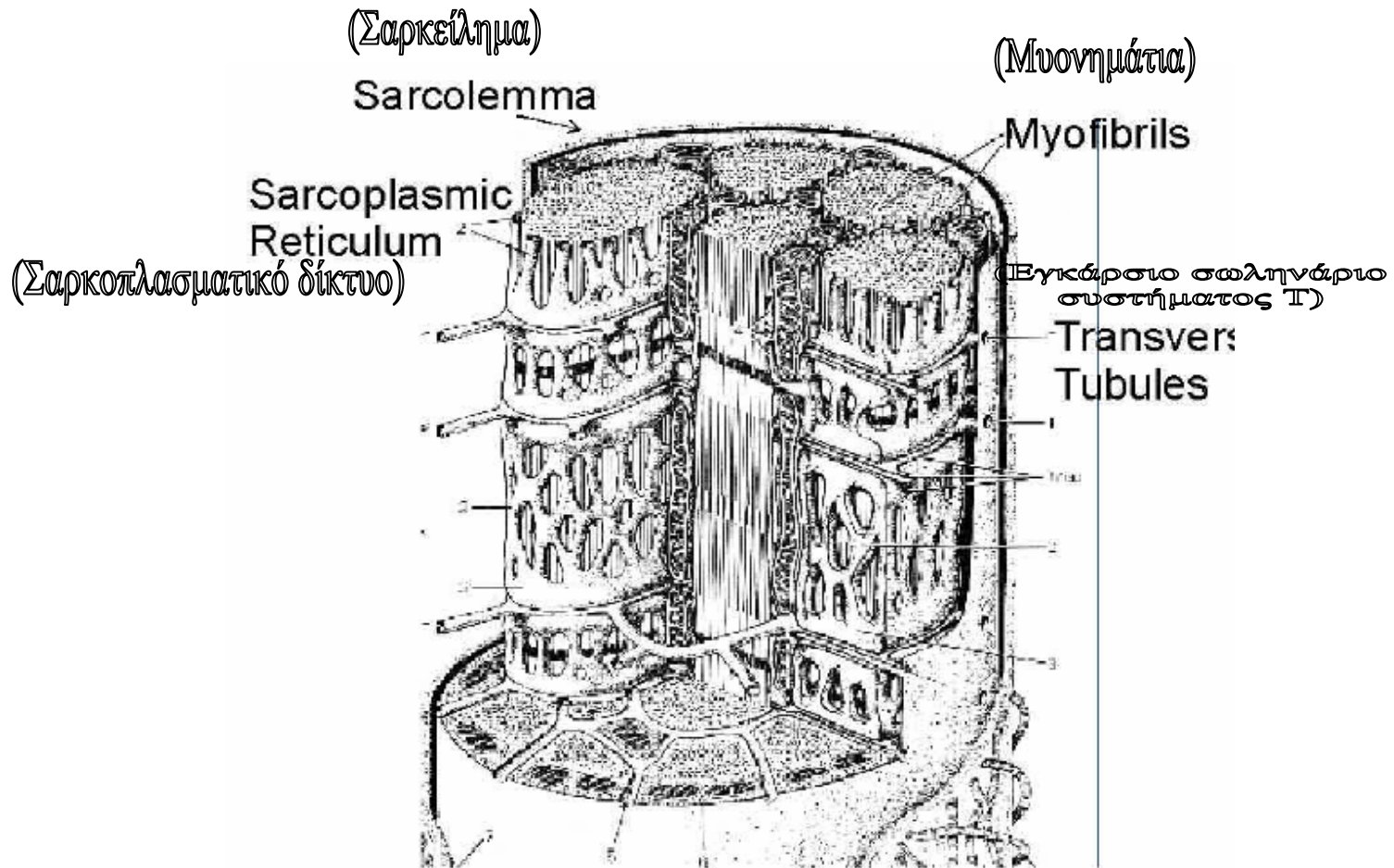
A Myofibril



One sarcomere



## Μορφολογική αναπαράσταση μυός

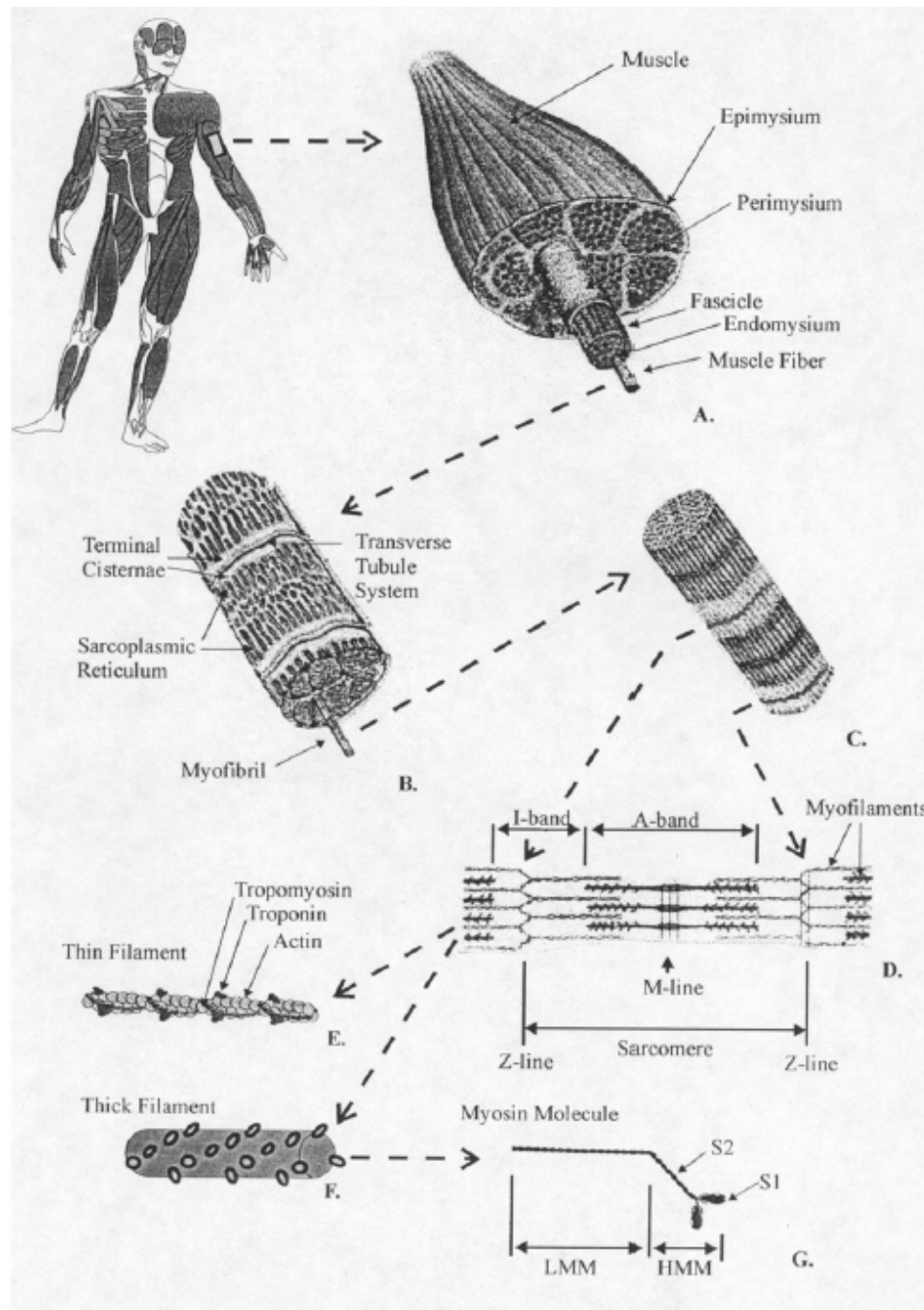


⇒ Οι λείοι μύες αποτελούνται από μυϊκές ίνες **ατρακτοειδούς σχήματος** και μεταβλητού μήκους, που νευρώνονται από το Αυτόνομο Νευρικό Σύστημα (ΑΝΣ) και γι' αυτό οι κινήσεις τους δεν εξαρτώνται από τη βούληση. Οι λείοι μύες αποτελούν το 5% των συνολικών μυών του ανθρώπινου σώματος.

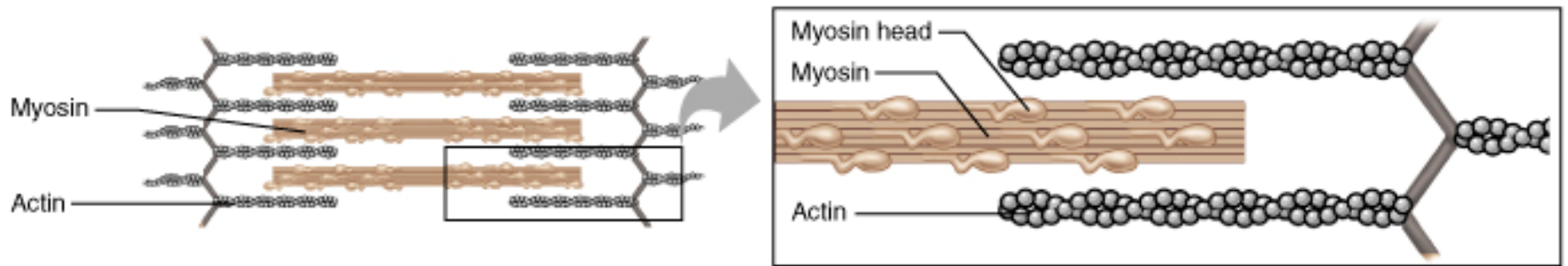
⇒ Οι καρδιακοί μύες βρίσκονται στην καρδιά, αποτελούνται από **μικρές κυλινδρικές ίνες** με εγκάρσιες γραμμώσεις, πολλά μιτοχόνδρια και έναν πυρήνα στο κέντρο τους. Η καρδιά νευρώνεται από το Αυτόνομο Νευρικό Σύστημα και επομένως οι κινήσεις της δεν εξαρτώνται από τη θέληση του ανθρώπου.

⇒ Σε κάθε γραμμωτή μυϊκή ίνα παρατηρούνται στο μικροσκόπιο εγκάρσιες γραμμώσεις (**σαρκομερίδια**), που οφείλονται στην εναλλαγή ισότροπων (**φωτεινές – Α ζώνες**) και ανισότροπων (**σκοτεινές – Ι ζώνες**) περιοχών. Κάθε Ι ζώνη χωρίζεται στη μέση από μια σκοτεινή γραμμή (**Z γραμμή ή Z δίσκος**). Στα σαρκομερίδια υπάρχουν **λεπτά και παχιά μυονημάτια**. Τα παχιά μυονημάτια αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από την πρωτεΐνη **μυοσίνη**, ενώ τα λεπτά μυονημάτια περιέχουν κυρίως **ακτίνη** αλλά και **τροπομυοσίνη** και **τροπονίνη**.

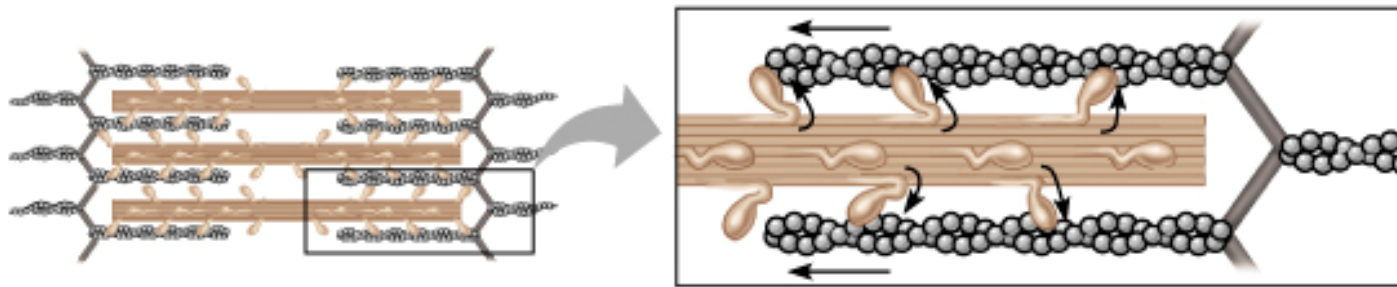
⇒ Το μόριο της μυοσίνης διαχωρίζεται σε ελαφριά και βαριά **μερομυοσίνη**. Η βαριά μερομυοσίνη καταλήγει σε μια σφαιρική κεφαλή, την S1, στην οποία βρίσκεται το ένζυμο **Ca<sup>+2</sup> - ATPάση**.







(a) Relaxed state



(b) Contracted state

Σχηματική απεικόνιση του σαρκομεριδίου σε κατάσταση **(a)** μυϊκής χάλασης (χαλάρωσης) και **(b)** πλήρους σύσπασης.

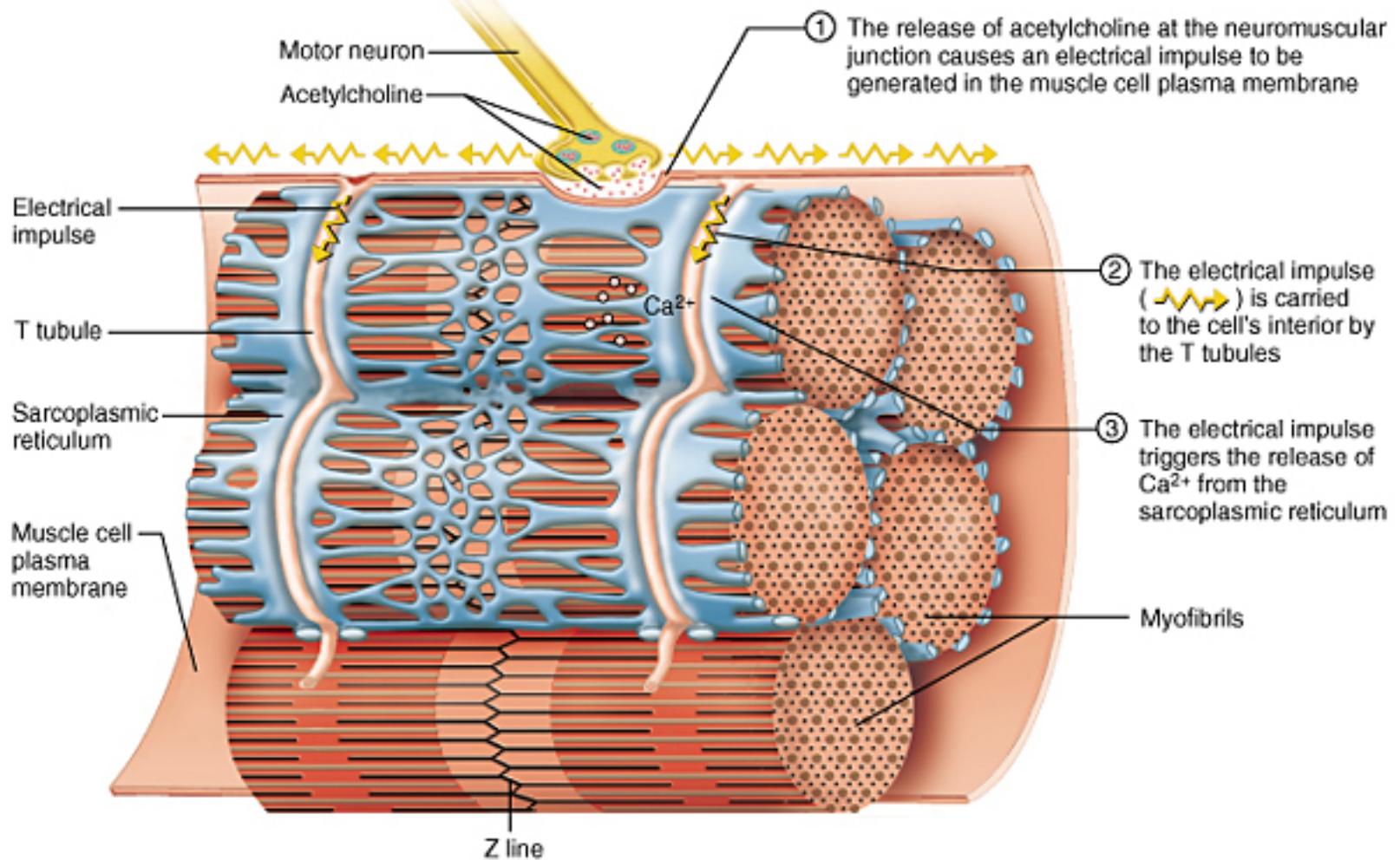
⇒ Το απαραίτητο ερέθισμα για την πρόκληση της μυϊκής συστολής έρχεται στο μυ μέσω του νευράξονα ενός κινητικού νευρώνα (**νευρομυϊκή σύναψη**). Πολύ περιληπτικά, η διαδικασία της μυϊκής συστολής μπορεί να δοθεί με τα παρακάτω βήματα.

Υ **Διέγερση:** Το δυναμικό ενέργειας που εμφανίζεται στο σαρκείλημα μεταφέρεται στους σωληνίσκους T και από εκεί στο σαρκοπλασματικό δίκτυο. Από το σαρκοπλασματικό δίκτυο (δίκτυο μεμβρανών) ελευθερώνονται στο σαρκόπλασμα ιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{+2}$ ), απαραίτητη προϋπόθεση για να ξεκινήσει η μυϊκή συστολή ή σύσπαση.

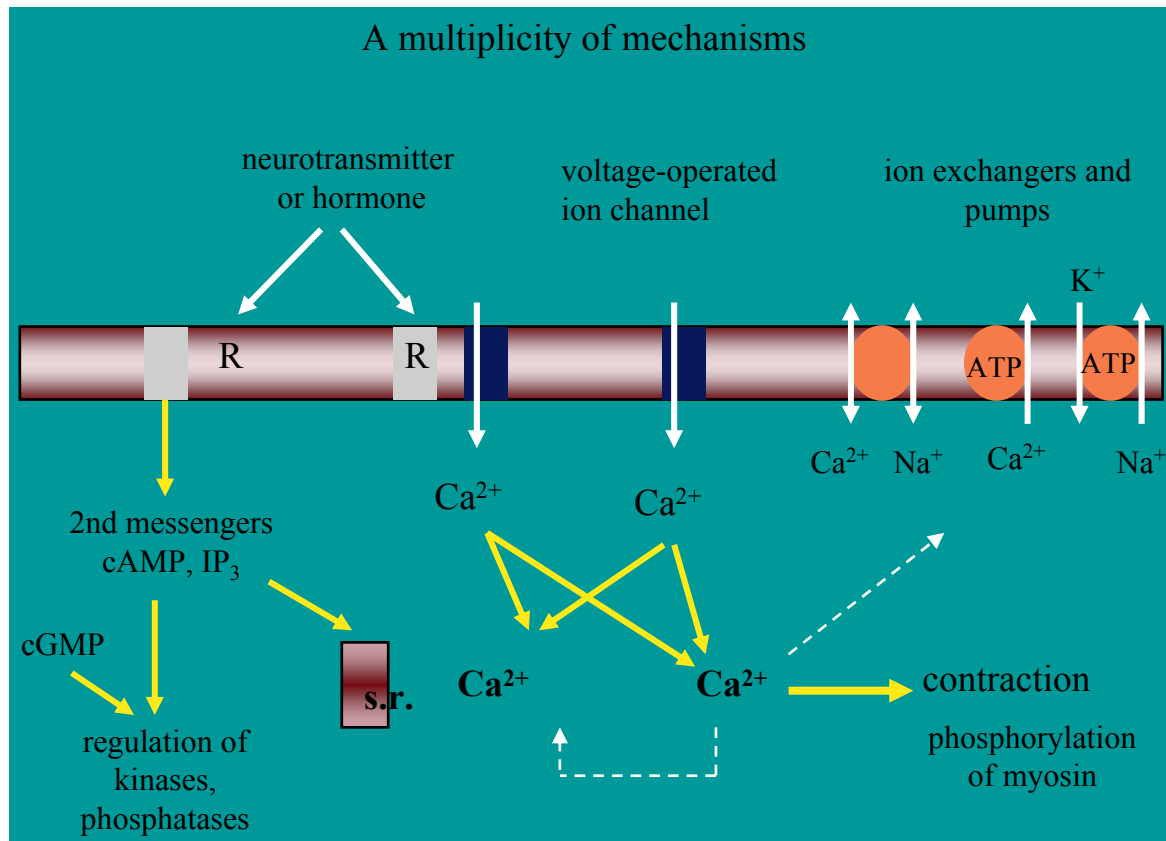
Υ **Συστολή-σύσπαση:** Τα ιόντα  $\text{Ca}^{+2}$  ενώνονται με την τροπονίνη. Αυτό επάγει αλλαγές στη στερεοδιαμόρφωση του συστήματος τροπονίνης - τροπομυοσίνης, που οδηγούν στην αποδέσμευση θέσεων αλληλεπίδρασης της ακτίνης - μυοσίνης. Δημιουργούνται γέφυρες μεταξύ της ακτίνης και της S1 κεφαλής της μυοσίνης και το σημείο πρόσδεσης μετακινείται («διολισθαίνει») προς το κέντρο της ζώνης A. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη συστολή παρέχεται από την υδρόλυση του μορίου ATP από το ένζυμο  $\text{Ca}^{+2} - \text{ATPάση}$ .

Υ **Χαλάρωση:** Τα ιόντα  $\text{Ca}^{+2}$  αναρροφώνται από τις αντλίες  $\text{Ca}^{+2}$  στις μεμβράνες του σαρκοπλασματικού δικτύου και αναστέλλεται ο σχηματισμός γεφυρών ακτίνης - μυοσίνης από τα λεπτά μυονημάτια. Η ενεργός τάση εξαφανίζεται και αποκαθίσταται το μήκος ηρεμίας του μυός.

## Η διαδικασία της μυϊκής συστολής (Nerve Activation of Individual Muscle Cells)

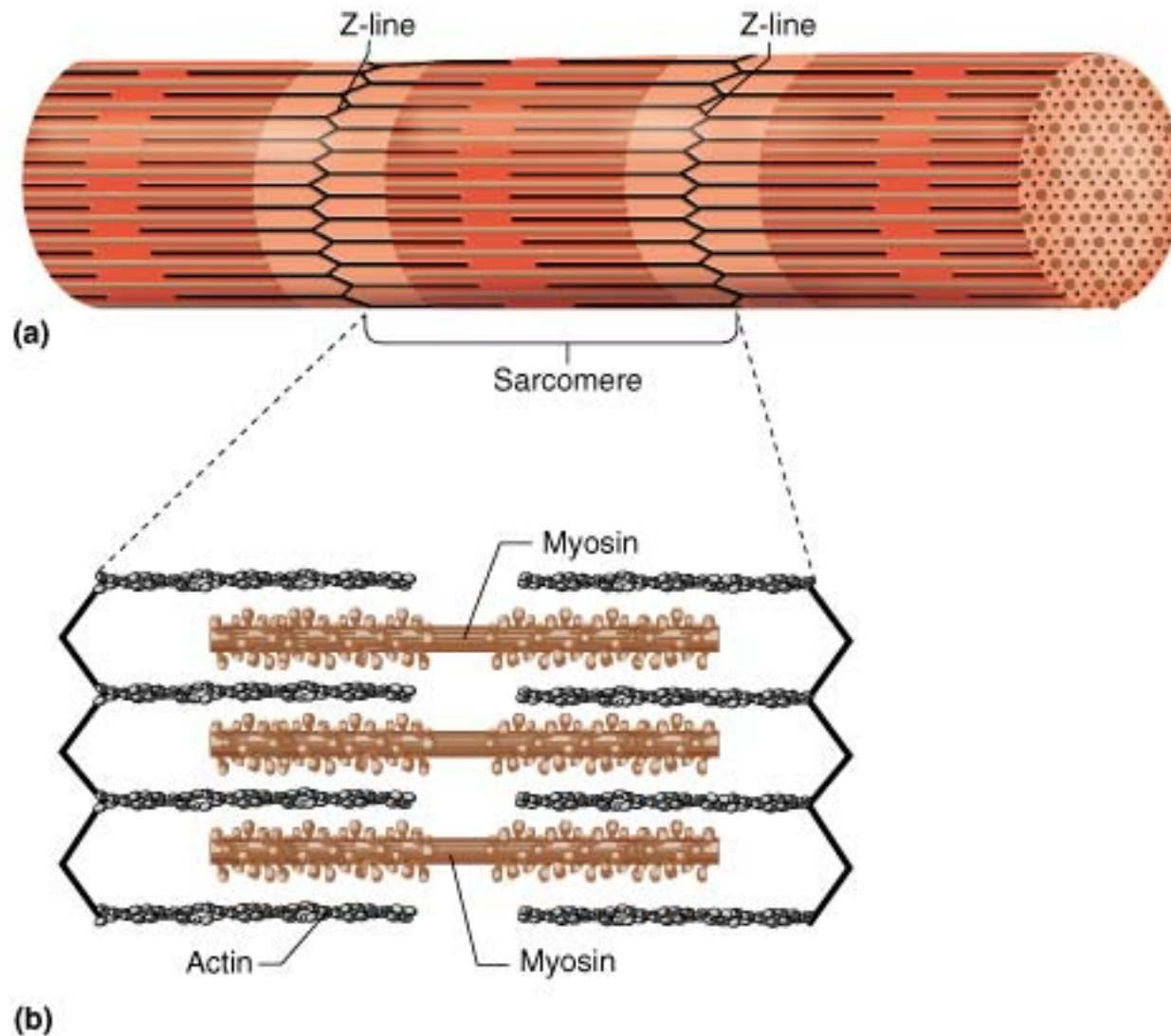


**Υ Διέγερση:** Το δυναμικό ενέργειας που εμφανίζεται στο σαρκείλημα μεταφέρεται στους σωληνίσκους T και από εκεί στο σαρκοπλασματικό δίκτυο. Από το σαρκοπλασματικό δίκτυο (δίκτυο μεμβρανών) ελευθερώνονται στο σαρκόπλασμα ιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{2+}$ ), απαραίτητη προϋπόθεση για να ξεκινήσει η μυϊκή συστολή ή σύσπαση.

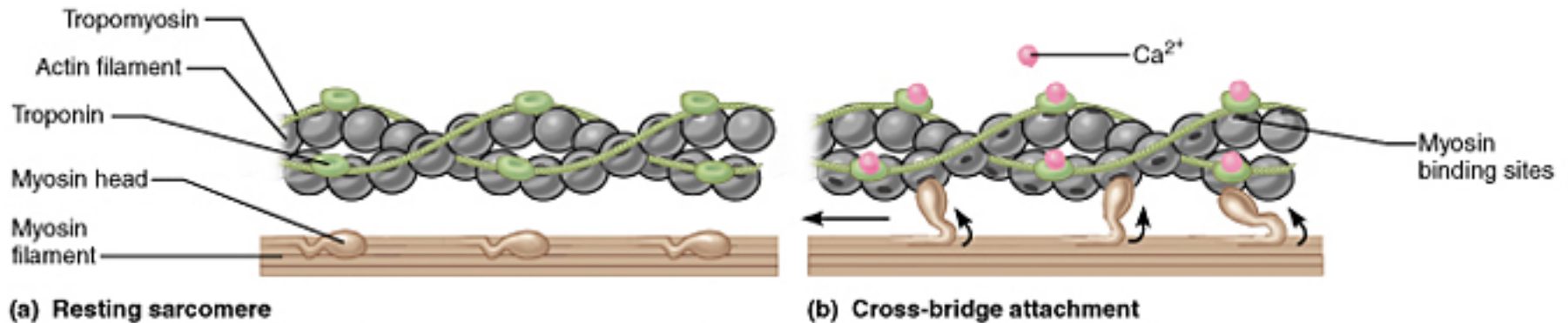


**Υ Συστολή-σύσπαση:** Τα ιόντα Ca<sup>+2</sup> ενώνονται με την τροπονίνη. Αυτό επάγει αλλαγές στη στερεοδιαμόρφωση του συστήματος τροπονίνης - τροπομυοσίνης, που οδηγούν στην αποδέσμευση θέσεων αλληλεπίδρασης της ακτίνης - μυοσίνης. Δημιουργούνται γέφυρες μεταξύ της ακτίνης και της S1 κεφαλής της μυοσίνης και το σημείο πρόσδεσης μετακινείται («διολισθαίνει») προς το κέντρο της ζώνης Α. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη συστολή παρέχεται από την υδρόλυση του μορίου ATP από το ένζυμο Ca<sup>+2</sup> – ATPάση.

# Skeletal Muscle Contractile Unit



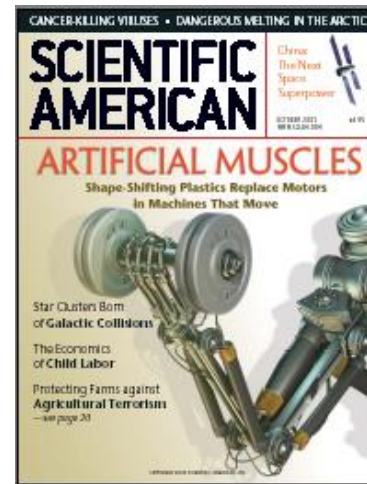
# Μηχανισμός μυϊκής συστολής



Υ Συστολή-σύσπαση: Τα ιόντα  $Ca^{2+}$  ενώνονται με την τροπονίνη. Αυτό επάγει αλλαγές στη στερεοδιαμόρφωση του συστήματος τροπονίνης - τροπομυοσίνης, που οδηγούν στην αποδέσμευση θέσεων αλληλεπίδρασης της ακτίνης - μυοσίνης. Δημιουργούνται γέφυρες μεταξύ της ακτίνης και της S1 κεφαλής της μυοσίνης και το σημείο πρόσδεσης μετακινείται («διολισθαίνει») προς το κέντρο της ζώνης Α. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη συστολή παρέχεται από την υδρόλυση του μορίου ATP από το ένζυμο  $Ca^{2+}$  - ATPάση.

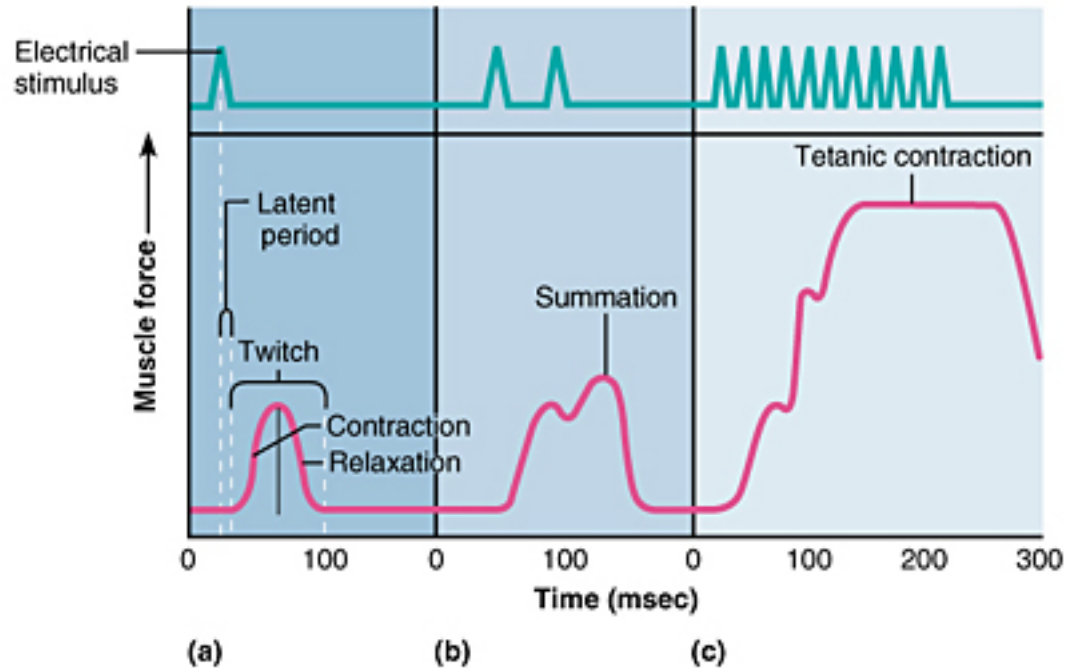
# Μελέτη της δομής και της λειτουργίας ενός ανθρώπινου μυ

- Ο έλεγχος και η δραστηριότητα των μυών οφείλονται σε ηλεκτρικές δυνάμεις.
- Οι μύες παράγουν δυνάμεις μόνο κατά τη διάρκεια της συστολής τους.
- Χαρακτηριστικά των μυών:
  - διεγερσιμότητα – αποκρίνονται σε ερεθίσματα (π.χ. σε νευρικό παλμό)
  - συσταλτικότητα
  - εκτατικότητα
  - ελαστικότητα



# Συστολή μυός: μύογραμμα

- **Λανθάνουσα περίοδος:** από τη διέγερση έως την έναρξη της συστολής
- **Συστολή:** ο χρόνος στον οποίο ο μυς βραχύνεται
- **Χαλάρωση:** ο μυς επανέρχεται στο αρχικό του μήκος



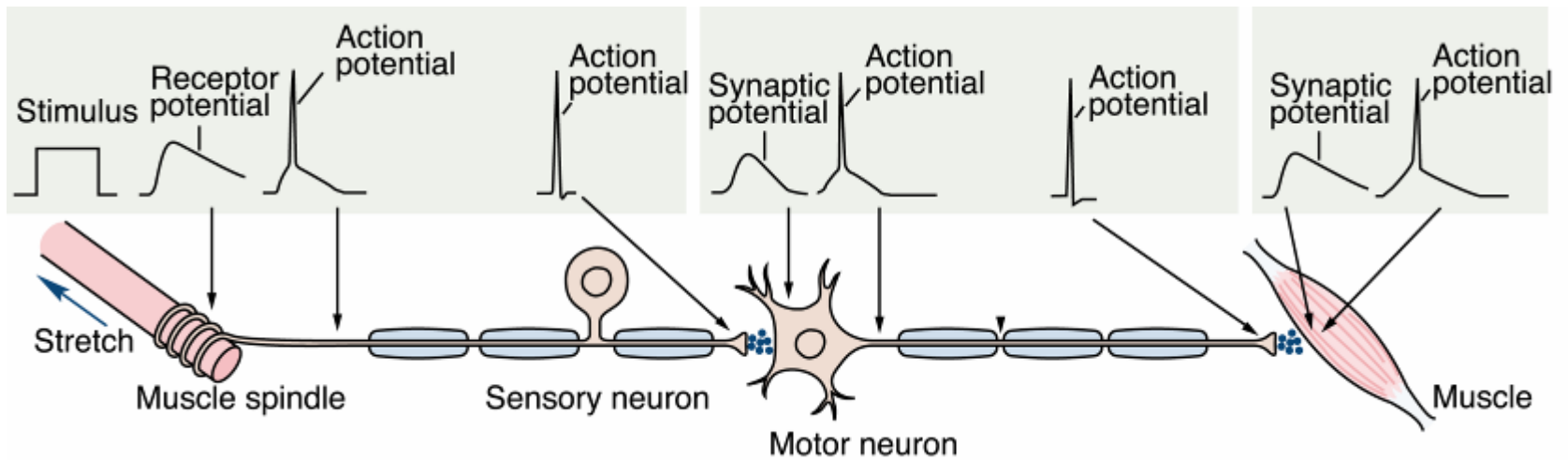
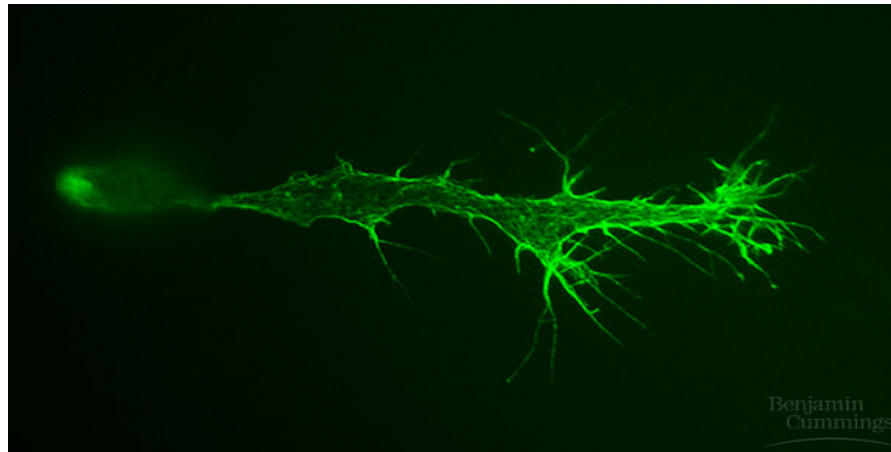
**Άθροιση:** αύξηση της κινητήριας δύναμης λόγω αυξημένου ρυθμού διέγερσης της μονάδας κίνησης

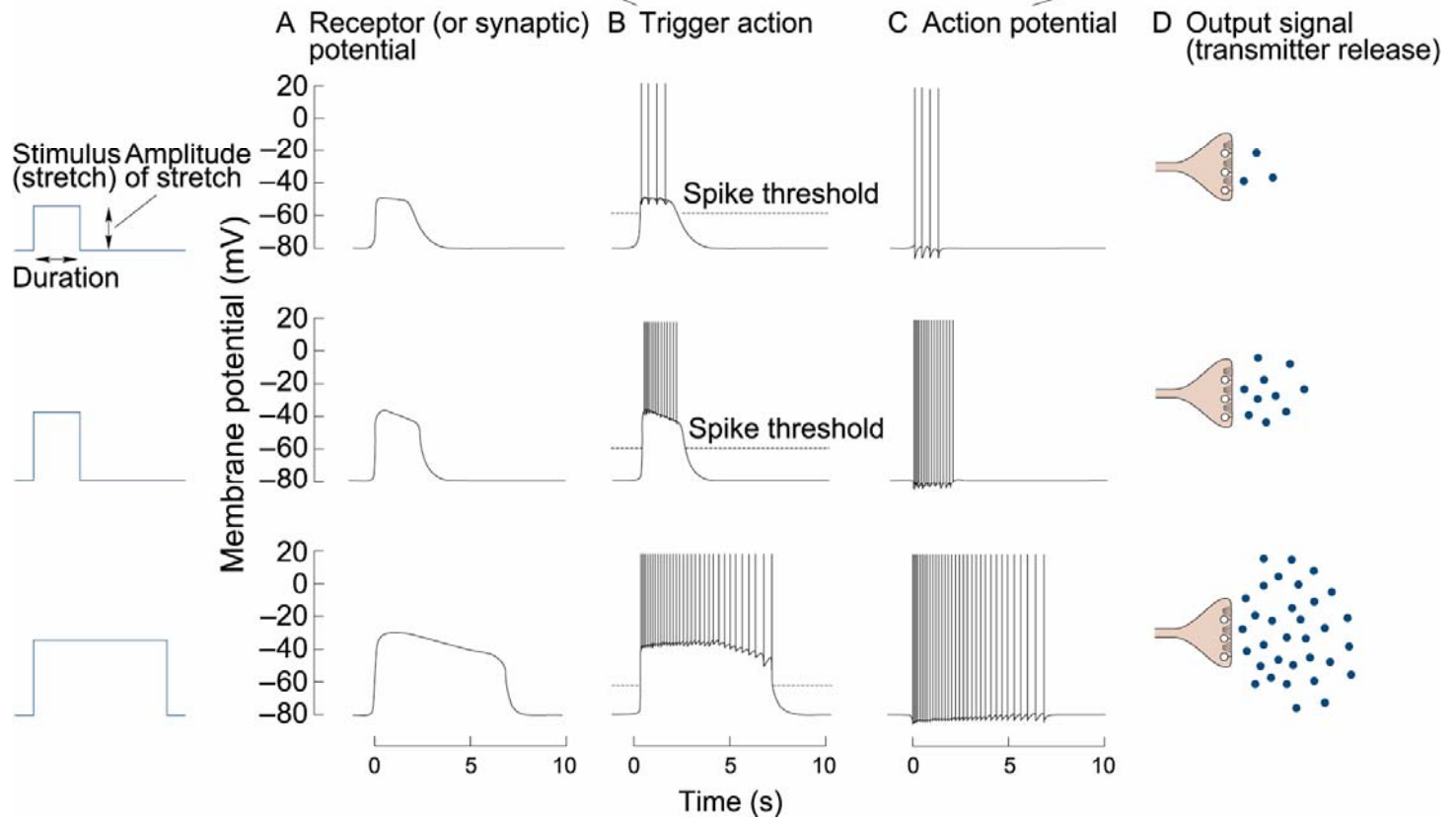
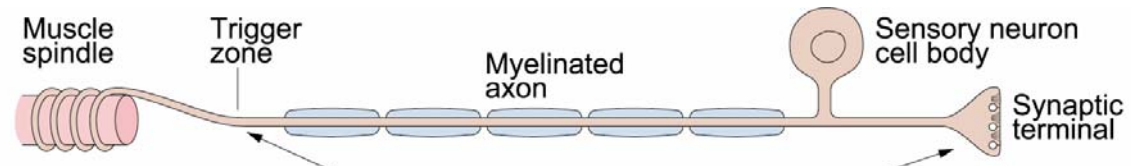
**Τέτανος:** ρυθμός διέγερσης τόσο συχνός, που ο μυς δεν μπορεί να χαλαρώσει και βρίσκεται σε διαρκή μέγιστη συστολή (σπασμός)



# Diseases and Disorders of the Muscular System

- **Muscular dystrophy**: genetic disorders that lack a particular muscle protein (dystrophin), loss of muscle fibers, muscle wasting and weakness
- **Tetanus**: “lock jaw”, a common problem before vaccinations, now is very rare, caused by bacteria toxin that over stimulates motor unit nerves
- **Muscle cramps**: “charley horse” uncontrolled muscle contractions due to ATP, potassium, muscle fatigue, dehydration or build-up of lactic acid
- **Pulled muscles**: a “strain”, muscle fibers are torn with bleeding, swelling, pain
- **Plantar Fasciitis**: inflammation of the broad ligament in sole of foot, very painful, treated with steroid injections





# Ηλεκτρομυογράφημα

## Ορισμός

Κάθε φορά που ένα δυναμικό δράσης διατρέχει μια μυϊκή ίνα, ένα μικρό μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος μεταδίδεται από το μυ μέχρι το δέρμα. Αν συστέλλονται ταυτόχρονα πολλές μυϊκές ίνες, τα ηλεκτρικά δυναμικά αθροίζονται στο δέρμα δίνοντας υψηλές τιμές.

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του δέρματος, πάνω από τον αντίστοιχο μυ ή εισάγοντας βελονοειδή ηλεκτρόδια μέσα στο μυ, είναι δυνατή η ηλεκτρική καταγραφή της διέγερσής του, που καλείται **ηλεκτρομυογράφημα (EMG - ΗΜΓ)**. Το ηλεκτρομυογράφημα είναι μια τεχνική καταγραφής των αλλαγών του ηλεκτρικού δυναμικού του μυός, όταν διεγείρεται για συστολή. Είναι δηλαδή, το αλγεβρικό άθροισμα όλων των συμπεριλαμβανομένων δυναμικών δράσης των κινητικών μονάδων ενός μυ, τα οποία μεταδίδονται κατά μήκος των μυϊκών ινών που βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων καταγραφής.

*(Από σημειώσεις στο διαδίκτυο των κ.κ. Δημήτρη Κουτσούρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Γιώργου Ματσόπουλου, Ερευνητή ΕΠΙΣΕΥ-Ε.Μ.Π.)*

## Καταγραφή δυναμικών

Για την καταγραφή του ΗΜΓ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ένα ή δύο ηλεκτρόδια. Συνηθίζεται η χρησιμοποίηση δύο ηλεκτροδίων σε ένα **διπολικό μοντέλο (Dipole)**, θεωρώντας ότι το ρεύμα συγκεντρώνεται σε δύο σημεία κατά μήκος της μυϊκής ίνας.

Η λήψη του μυοηλεκτρικού σήματος επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια διακρίνονται κατά κανόνα σε δύο τύπους:

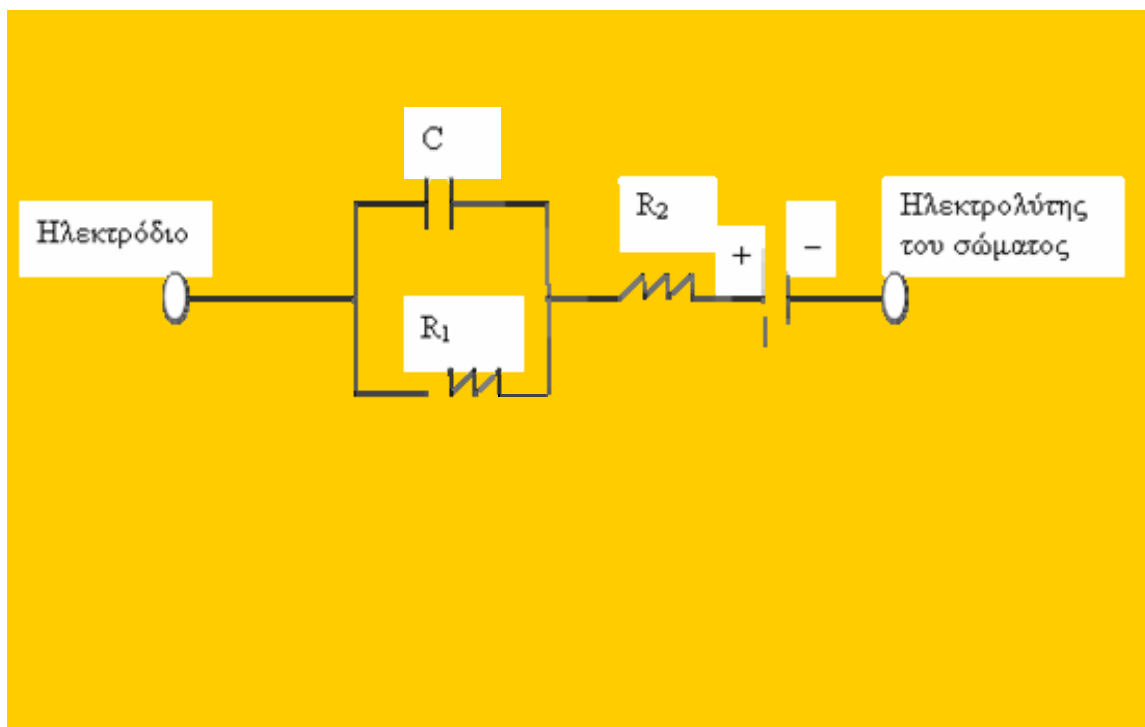
- **Επιφανειακά ηλεκτρόδια (surface electrodes)**
- **Ηλεκτρόδια βάθους (indwelling intramuscular electrodes)**

Τα επιφανειακά ηλεκτρόδια διακρίνονται σε:

- α) Παθητικά επιφανειακά ηλεκτρόδια (passive surface electrodes)** και
- β) ενεργητικά επιφανειακά ηλεκτρόδια (active surface electrodes)**

*(Από σημειώσεις στο διαδίκτυο των κ.κ. Δημήτρη Κουτσούρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Γιώργου Ματσόπουλου, Ερευνητή ΕΠΙΣΕΥ-Ε.Μ.Π.)*

Σε όλα τα ηλεκτρόδια η διπλή επιφανειακή φορτισμένη στιβάδα τους λειτουργεί ως πυκνωτής. Έτσι, όταν το ηλεκτρόδιο έρθει σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα, αυτό αντιστοιχεί με ένα δυναμικό παράλληλο σε σύστημα RC.

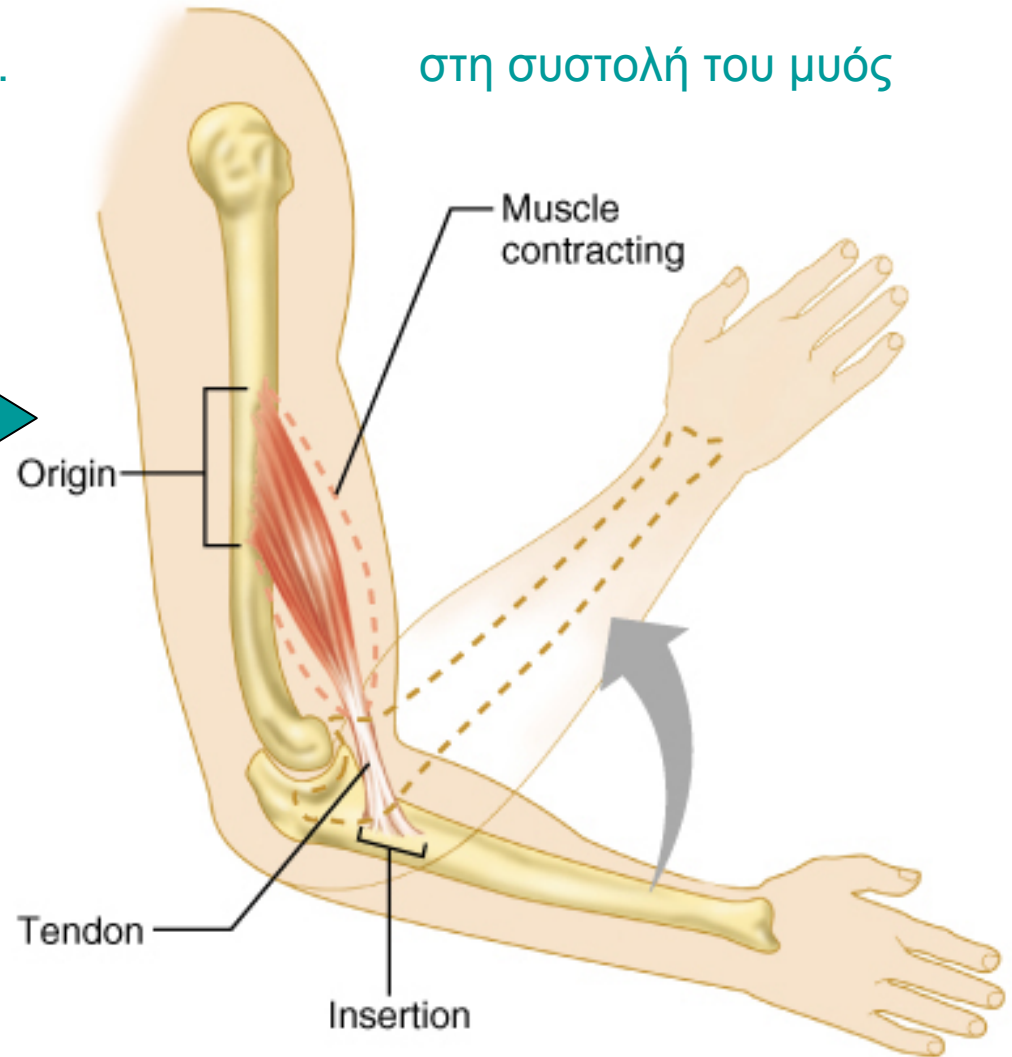
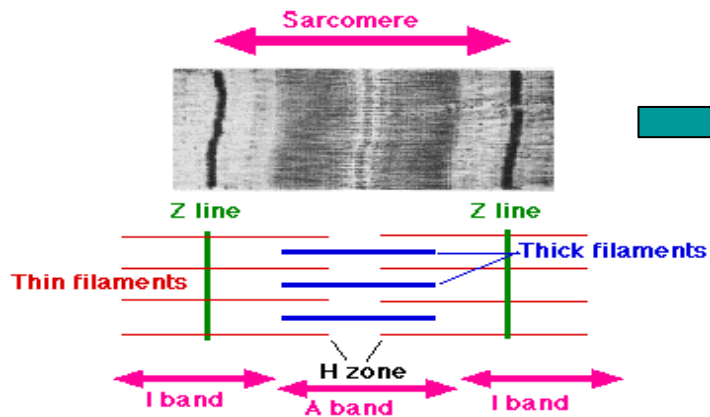


*(Από σημειώσεις στο διαδίκτυο των κ.κ. Δημήτρη Κουτσούρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Γιώργου Ματσόπουλου, Ερευνητή ΕΠΙΣΕΥ-Ε.Μ.Π.)*

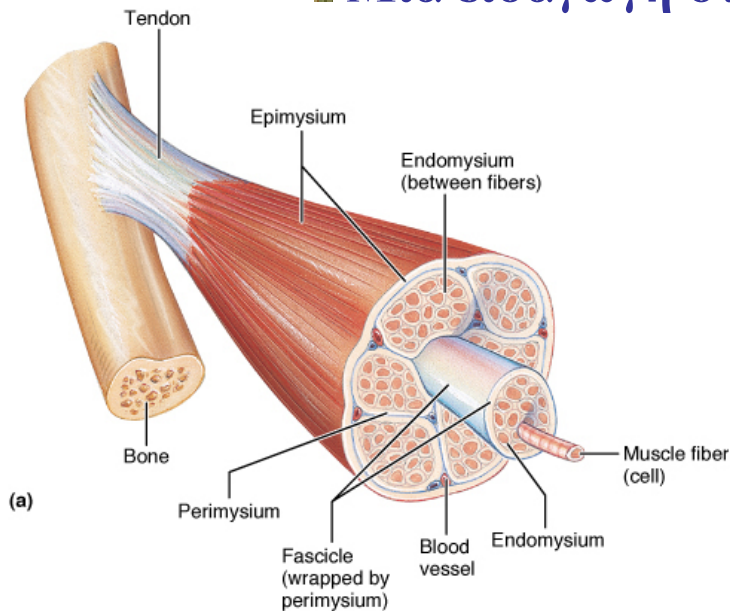
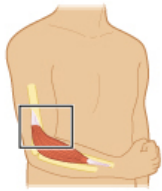
# Μια εισαγωγή στη μηχανική της μυϊκής συστολής

Από τη συστολή της μυϊκής ίνας .....

στη συστολή του μύος



## Μια εισαγωγή στη μηχανική της μυϊκής συστολής (2)



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

- **Φυσική των μυών: Αρχή I**
- Η επιφάνεια διατομής είναι ανάλογη της δύναμης  $F$  του μύος

### • Φυσική των μυών: Αρχή II

- ☀ Το μήκος ενός μύος είναι ανάλογο της ικανότητας του για βράχυνση (strain)
  - Ο αριθμός των σαρκομεριδίων σε σειρά καθορίζει την ικανότητα για βράχυνση
- ☀ Βραχείς, παχείς μύες
  - Πολύ δύναμη
  - Μικρό εύρος βράχυνσης
- ☀ Μακρείς, λεπτοί μύες
  - Λιγότερη δύναμη
  - Μεγαλύτερο εύρος βράχυνσης

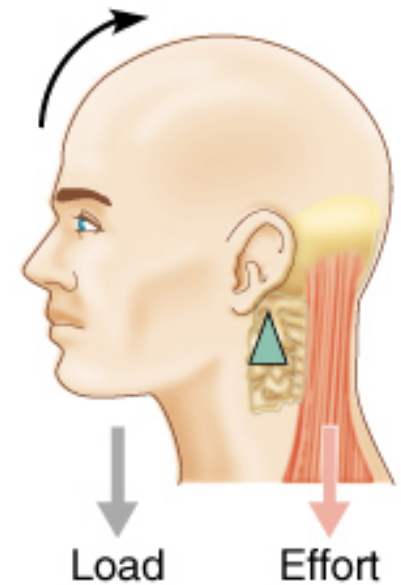
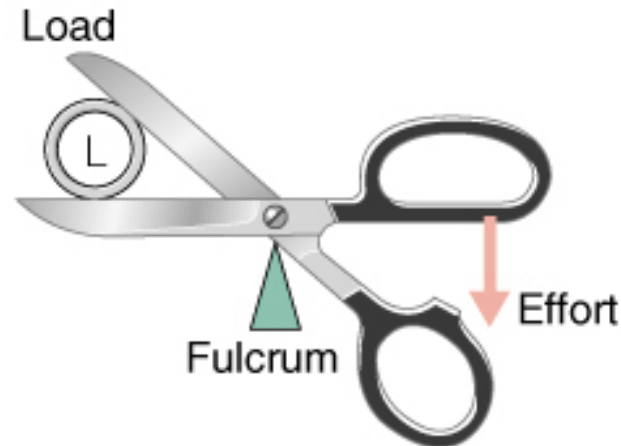
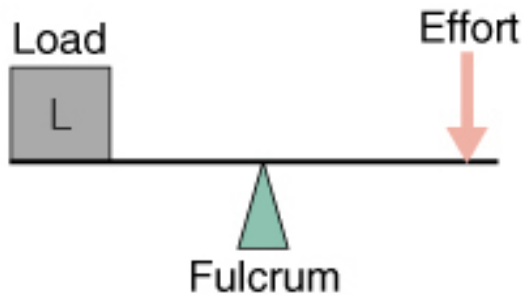


on Education, Inc., publishing as Benjamin Cumming



## Μηχανική των μυών – συσχέτιση με τους μοχλούς

### Μοχλός α' τάξης

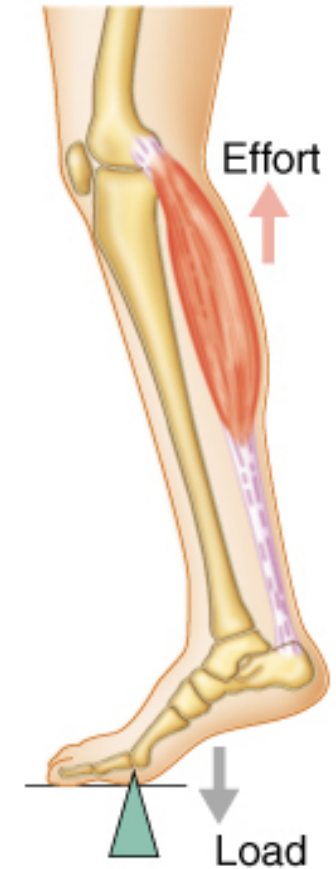
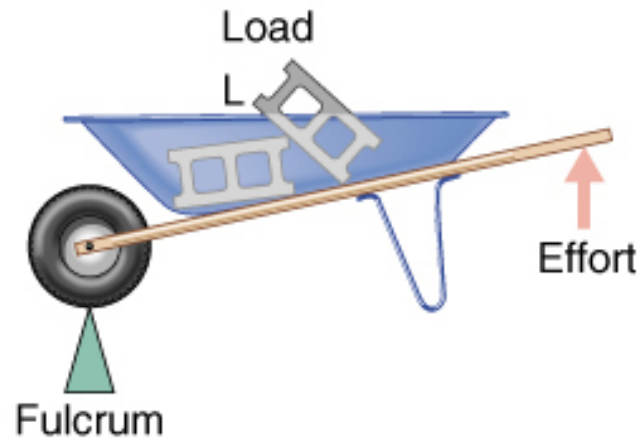
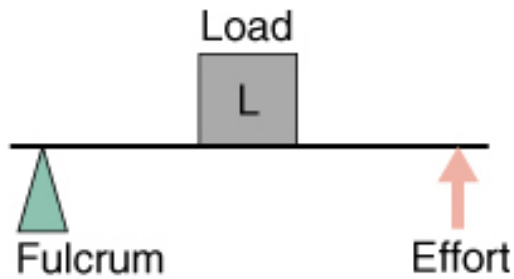


#### (a) First-class lever

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

# Μηχανική των μυών – συσχέτιση με τους μοχλούς

## Μοχλός β' τάξης

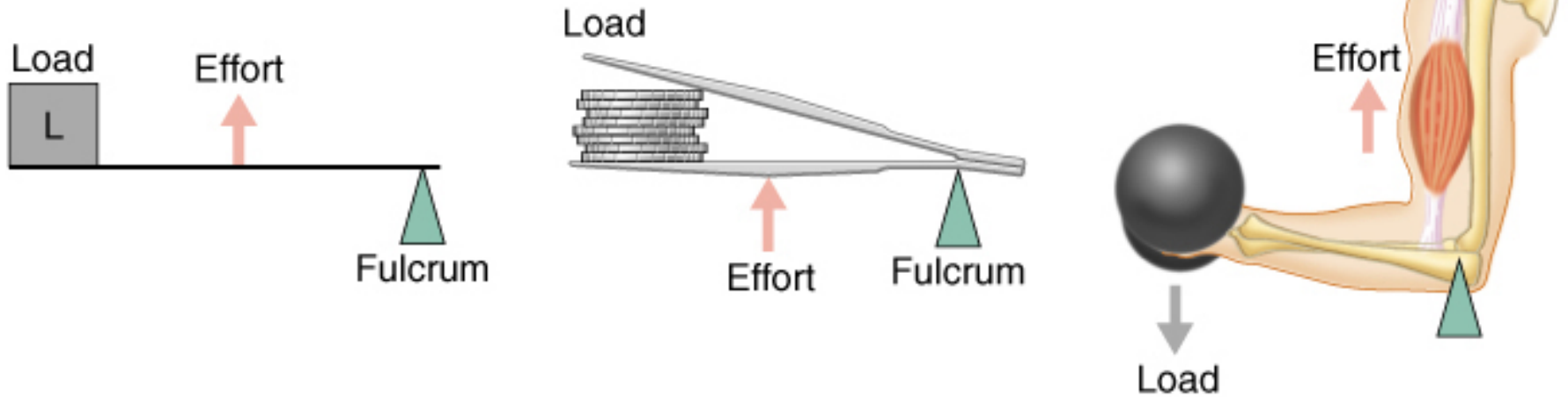


### (b) Second-class lever

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

# Μηχανική των μυών – συσχέτιση με τους μοχλούς

## Μοχλός γ' τάξης

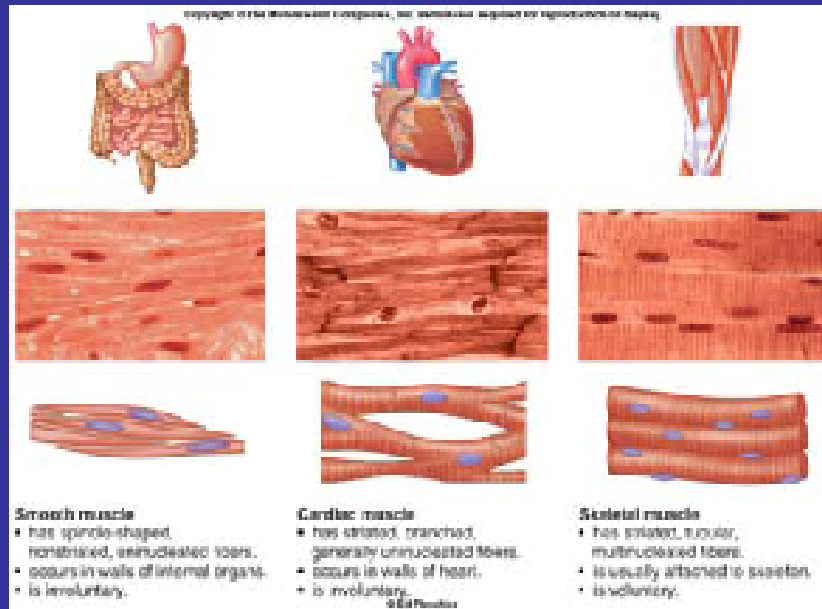


### (c) Third-class lever

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

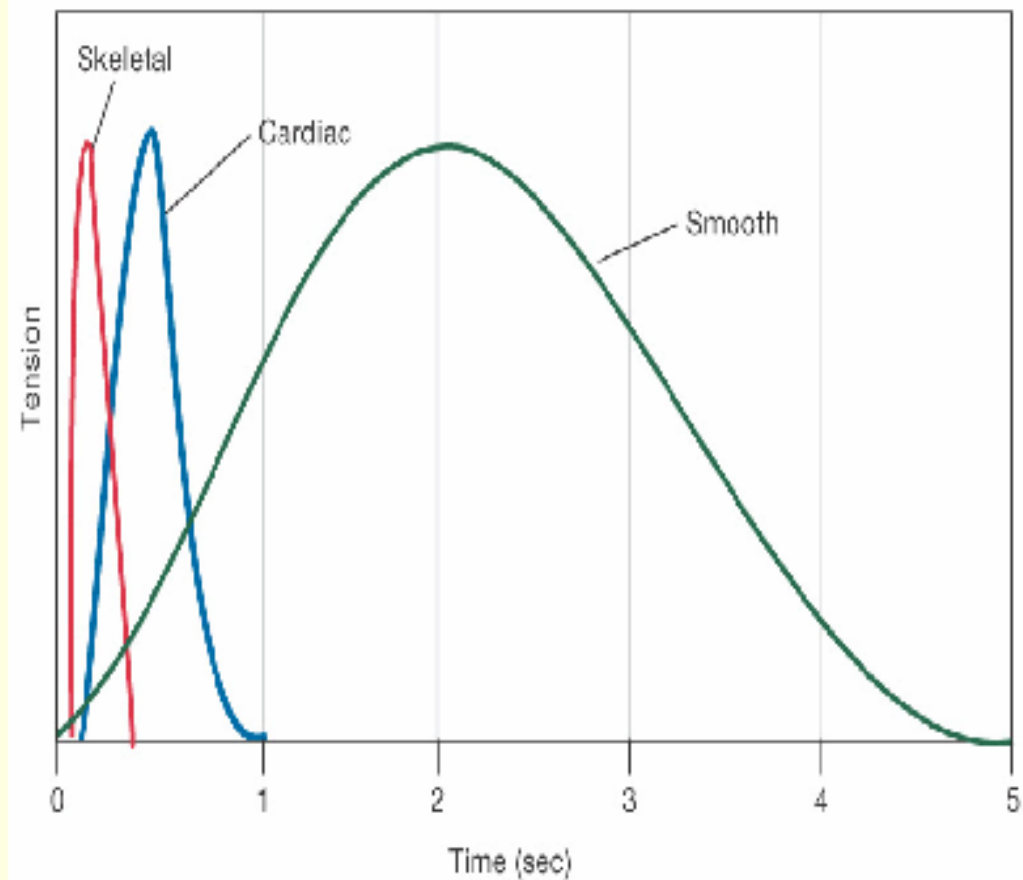
# Review: 3 types of muscle tissue

- **Smooth** – involuntary muscle found in hollow organs and vessels
- **Cardiac** – involuntary muscle found in the heart
- **Skeletal** – voluntary muscle that is attached to the skeleton



# Smooth Muscles: Contrasted to Skeletal Muscle

- **Homeostatic role**
  - Control fluid
  - Sphincters
- **Tonic contractions**
  - Support tubes
  - Move products
- **Slow contractions**
  - Little fatigue
  - Low O<sub>2</sub> use

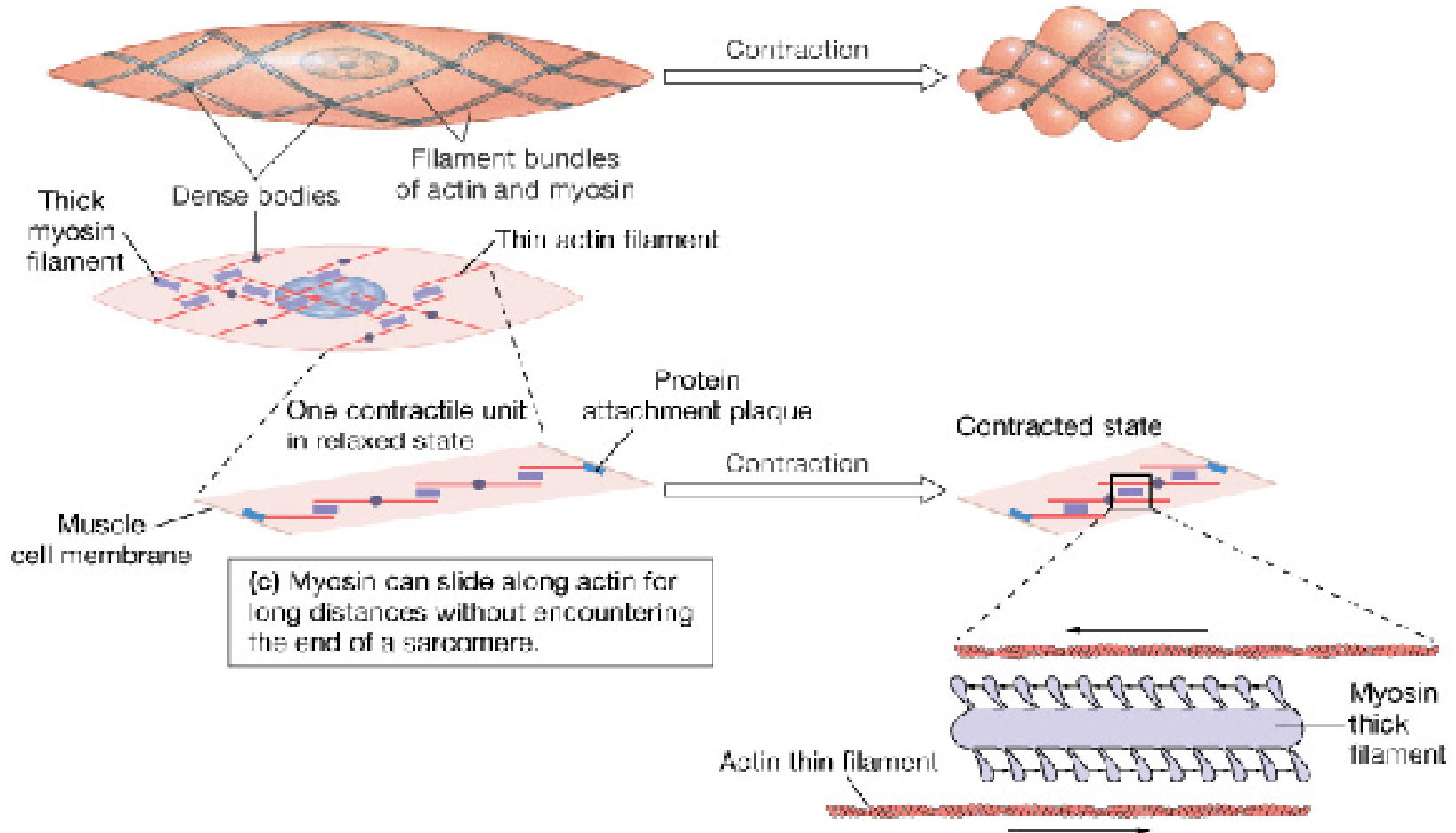


**Duration of muscle contraction  
in three types of muscle**

# Smooth Muscles: Characteristics

(a) Actin and myosin are loosely arranged around the periphery of the cell, held in place by protein dense bodies.

(b) The arrangement of the fibers causes the cell to become globular when it contracts.

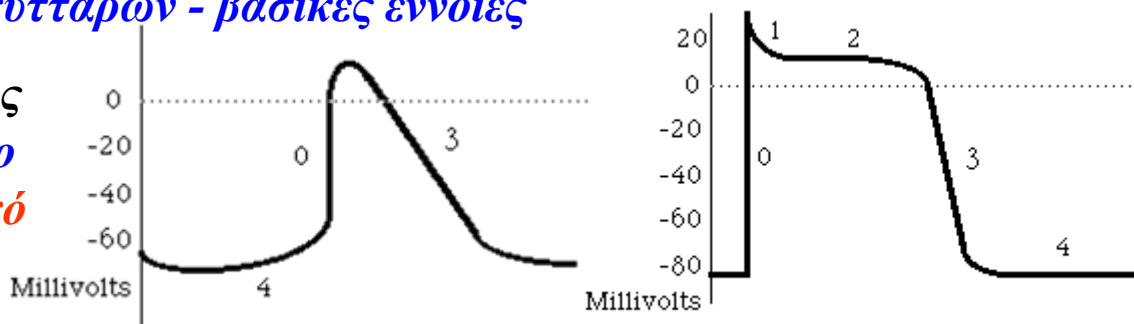


(c) Myosin can slide along actin for long distances without encountering the end of a sarcomere.

(d) Smooth muscle myosin has hinged heads all along its length.

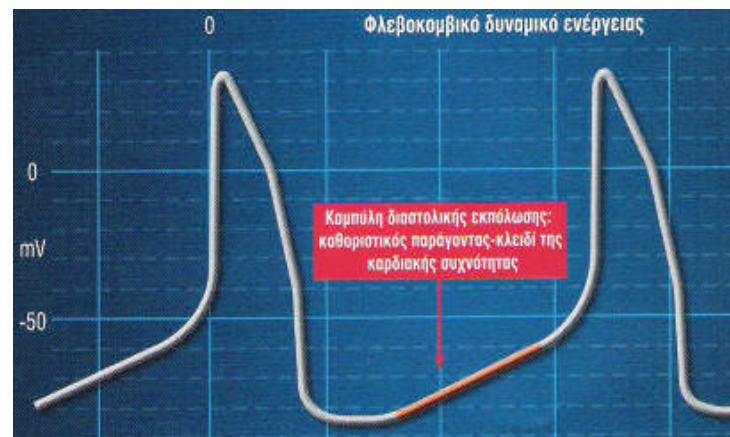
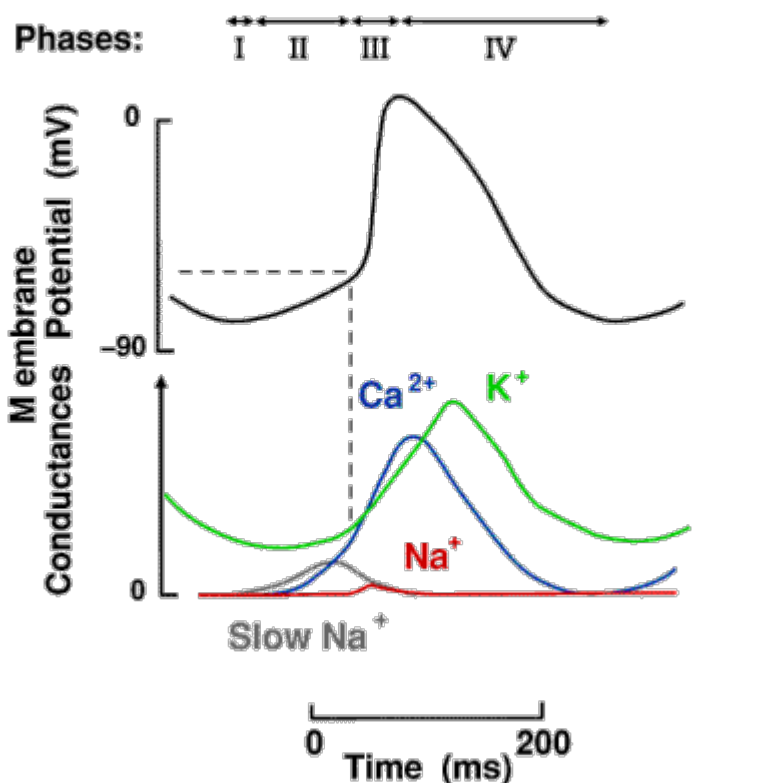
♥ Σήματα που παράγονται από την ηλεκτρική δραστηριότητα νευρικών και μυϊκών κυττάρων - βασικές έννοιες

Κυματομορφές δυναμικών δράσης από ένα γραμμωτό μυϊκό κύτταρο (αριστερά) και ένα καρδιακό μυϊκό κύτταρο (δεξιά)



**Autorhythmic cells exhibit PACEMAKER POTENTIALS. Depolarization is due to the inward diffusion of calcium (not sodium as in nerve cell membranes). Depolarization begins when:**

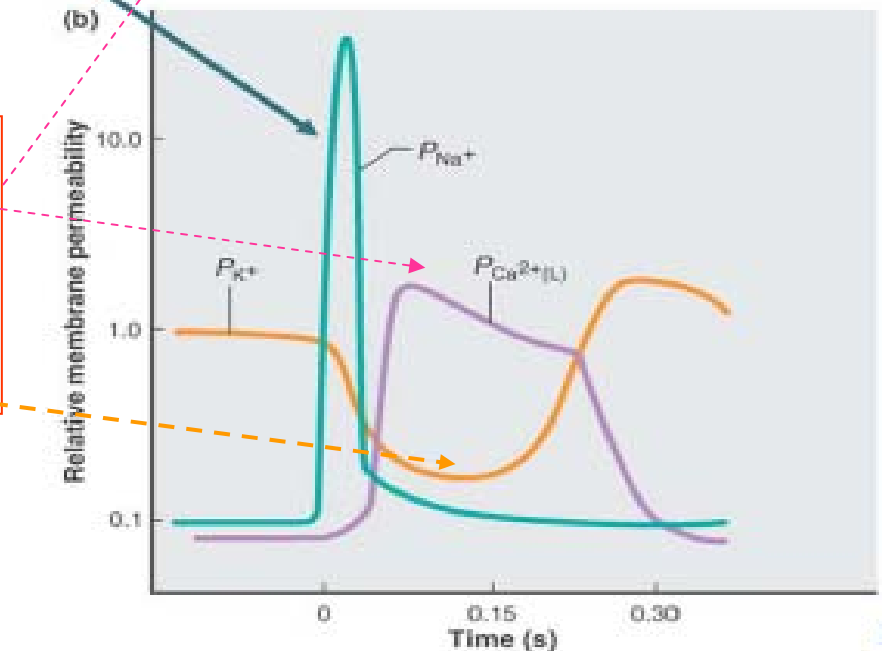
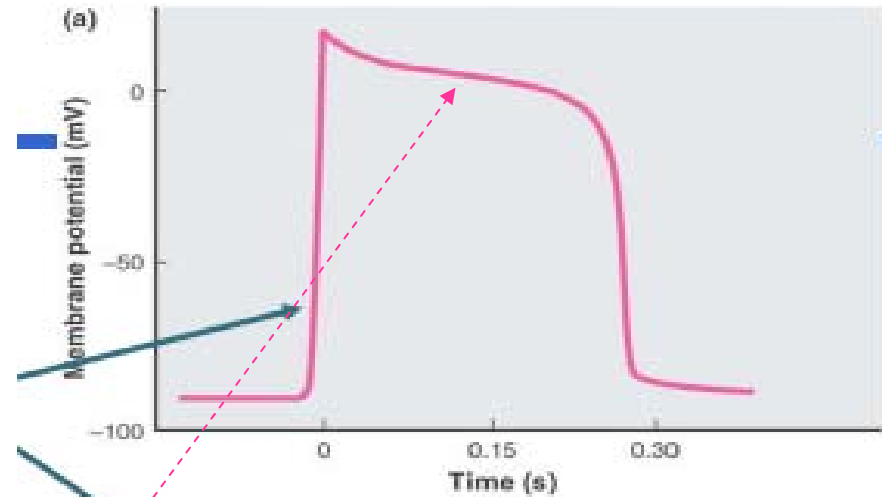
- the slow calcium channels open (4),
- then concludes (quickly) when the fast calcium channels open (0).
- Repolarization is due to the outward diffusion of potassium (3).



♥ Καταγραφή, με τη βοήθεια μικροηλεκτροδίων, του δυναμικού δράσης μιας κοιλιακής μυοκαρδιακής ίνας

Action Potential must be initiated in cardiac cells for contraction to occur: the rapid opening of voltage-gated sodium channels is responsible for the rapid depolarization phase

The prolonged “plateau” of depolarization is due to the slow but prolonged opening of voltage-gated calcium channels (L-type calcium channel, “long”) PLUS closure of potassium channels



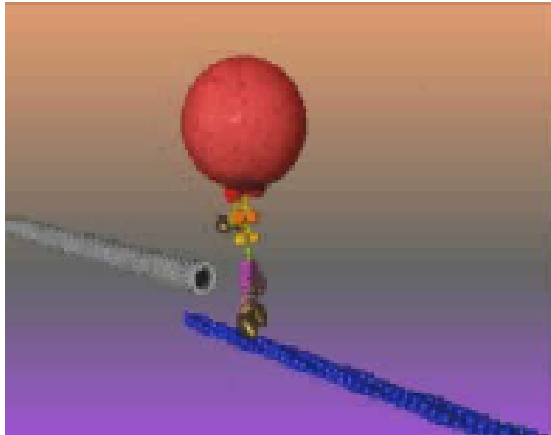


## Major protein components of vertebrate skeletal myofibrils

Protein	Percent total protein	Function
Myosin	44	Major component of thick filaments. Interacts with hydrolysis of ATP to produce mechanical force
Actin	22	Major component of muscle thin filaments, against which thick filaments slide during muscle contraction
Tropomyosin	5	Rod-like protein that binds along the length of actin filaments
Troponin	5	Complex of three muscle proteins positioned at regular intervals along actin filaments. Ca <sup>2+</sup> regulation
Titin	9	Large flexible protein. Elastic network linking thick filaments to Z discs

# Actin Functions

Organelle Transport



Structure Formation  
(Microvilli, stereocilia)

Cell Migration



Cytokinesis



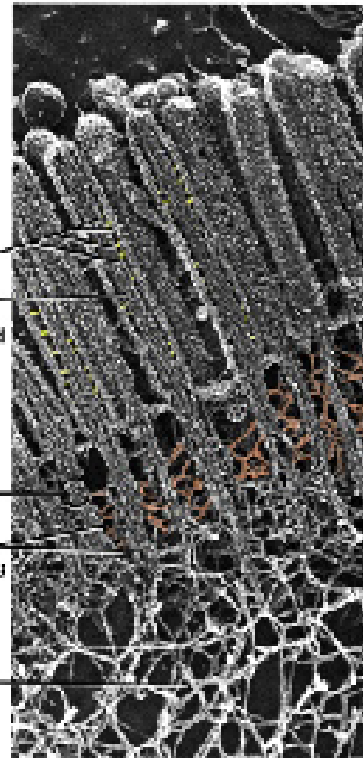
Membrane filaments in cages

Core actin filaments (crosslinked by fimbrin and villin)

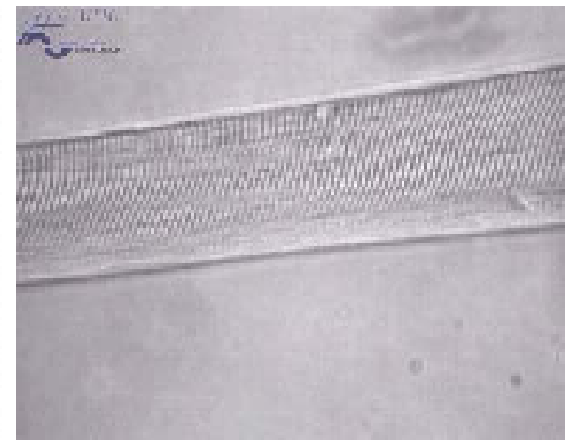
Actin filaments (actin)

Spectrin connecting filaments

Keratin intermediate filaments



Muscle Contraction



## ■ Βιβλιογραφία

- "Θέματα Μοριακής Βιοφυσικής", Στ. Χαμόδρακα, Εκδόσεις Συμμετρία, 1993.
- "Biophysique", M. Volkenstein, (στα γαλλικά) (Editions Mir, Moscou), 1985.
- "Medical Instrumentation – Application and Design", J.G. Webster, (John Wiley and Sons, Inc.), 1998.
- "Mechanisms of Nerve Conduction and Muscle Contraction", J. Kurantsin-Mills,
- "Muscle biomechanics", James Wakeling, Neuromuscular Mechanics Laboratory, Dept Biomed. Physiol. and Kinesiology, Simon Fraser University.
- <http://zlab.rutgers.edu/classes/BehaviorCogNeuro> Behavioral and Cognitive Neuroanatomy.
- "The Motor Unit and Muscle Action", Lu Chen, MCB, UC Berkeley.
- Πολλές εικόνες – σχήματα είναι από εκπαιδευτικό υλικό ή δημοσιεύσεις που διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο.
- Η ιστοσελίδα μου είναι στη διεύθυνση: <http://users.ntua.gr/mmakro>

