



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

Βιοχημεία Τροφίμων I

Ενότητα 2^η

Κρέας και ψάρι II

Όνομα καθηγητή: Έφη Τσακαλίδου

Τμήμα: Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





Στόχοι ενότητας

- Κατανόηση της δομής του σαρκομερούς
- Κατανόηση της δομής και της λειτουργικότητας των συσταλών πρωτεϊνών του κρέατος
- Κατανόηση της συστολής του μυός
- Κατανόηση της δομής και της λειτουργίας της μυοσφαιρίνης
- Κατανόηση των αλλαγών του χρώματος του κρέατος

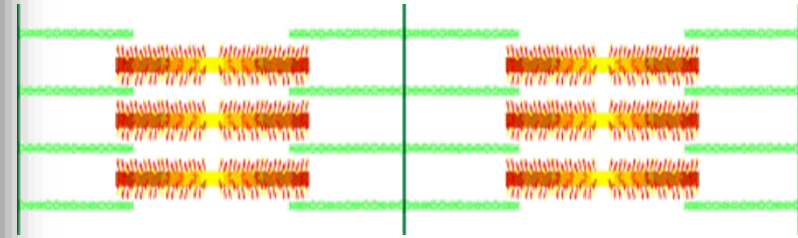
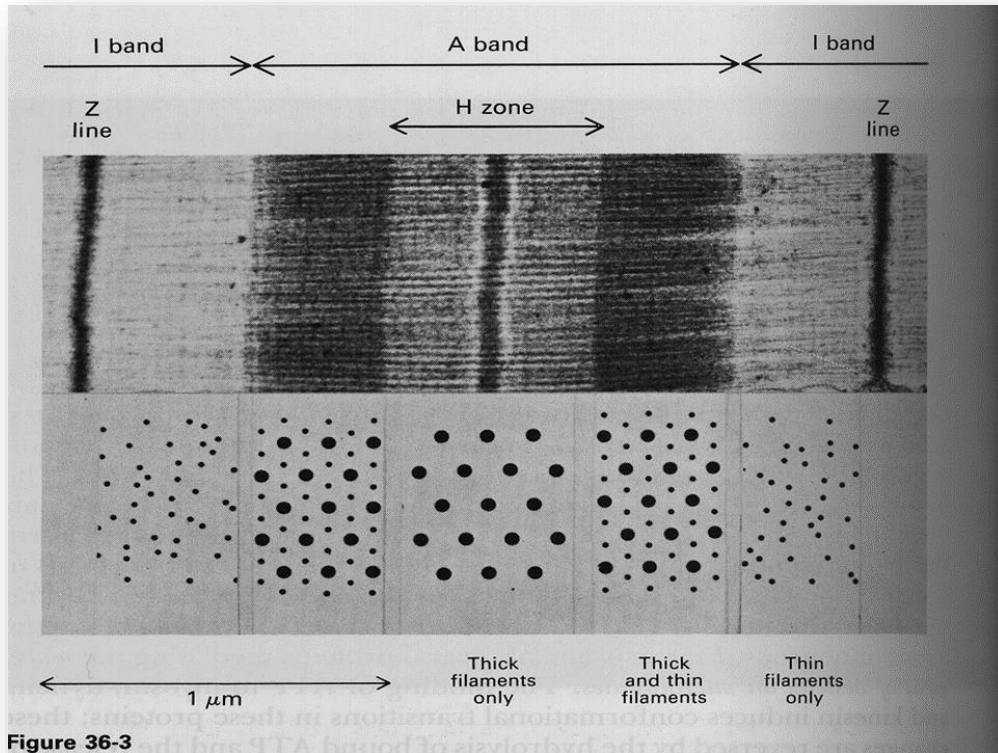


Λέξεις - κλειδιά

- Λέξεις κλειδιά: Σαρκομερές, Μυοσίνη, Ακτίνη, Συστολή του μυός, Μυοσφαιρίνη, Αλλαγές Χρώματος
- Key words: Sarcomere, Myosin, Actin, Muscle Contraction, Myoglobin, Color Changes



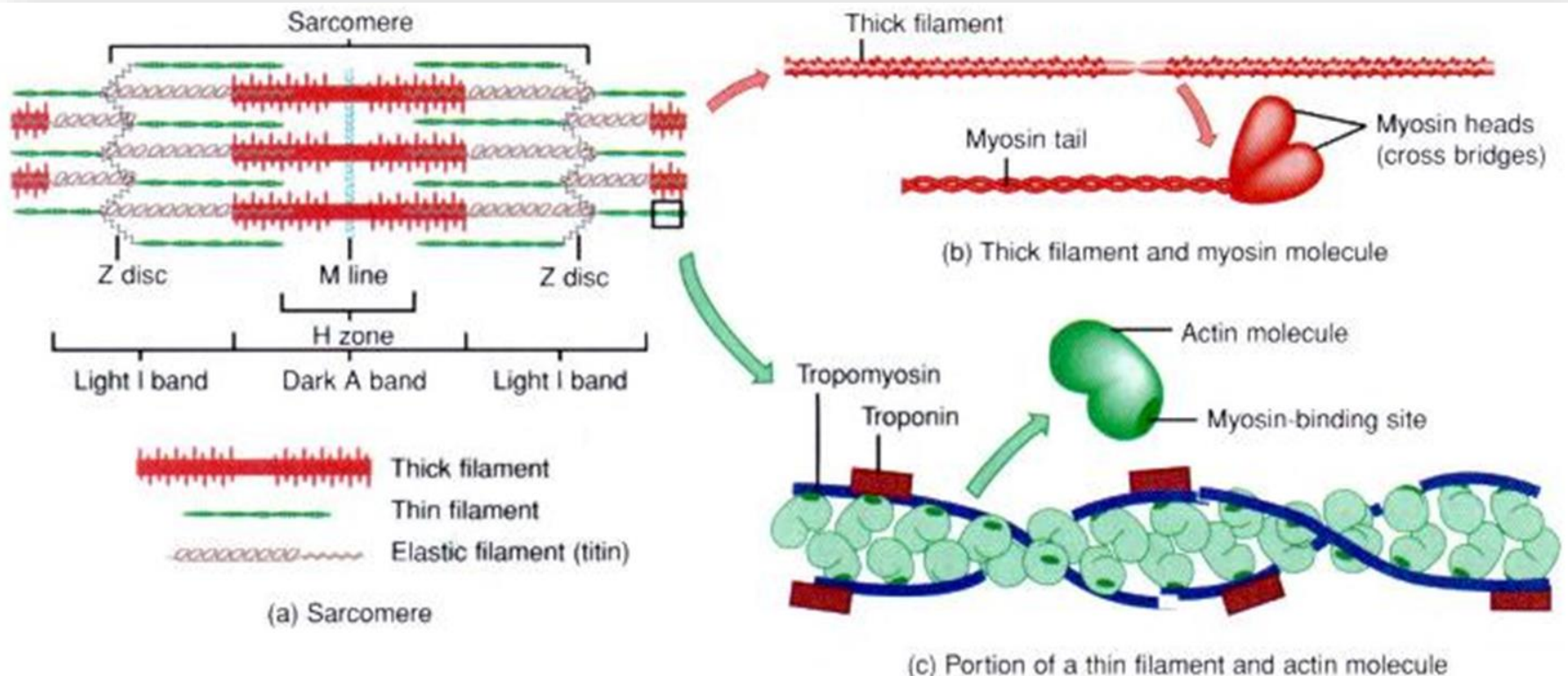
Δομή Σαρκομερούς (α)



<https://www.youtube.com/watch?v=NfEJUPnqzk0>



Δομή Σαρκομερούς (β)

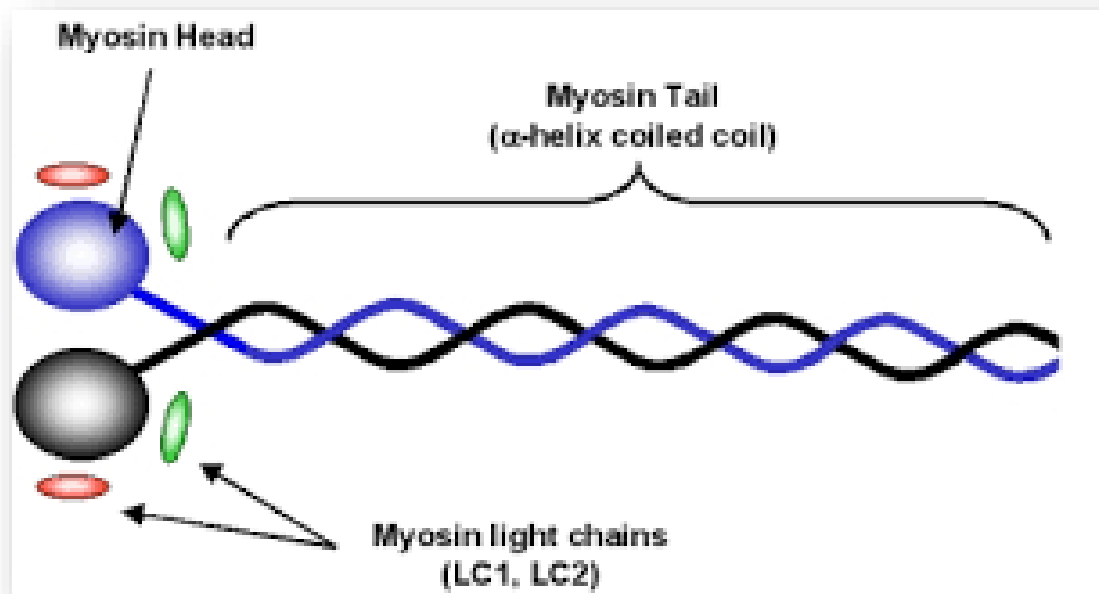




Μυοσίνη (α)

Μυοσίνη:

- 45% των πρωτεϊνών των μυϊκών νημάτων.
 - βασικό συστατικό των παχέων νημάτων.
- Πρωτεΐνη μεγάλου MB (540 kDa).
 - 2 βαριές αλυσίδες (MB 230 kDa).
 - 4 ελαφρές αλυσίδες (MB 20 kDa).

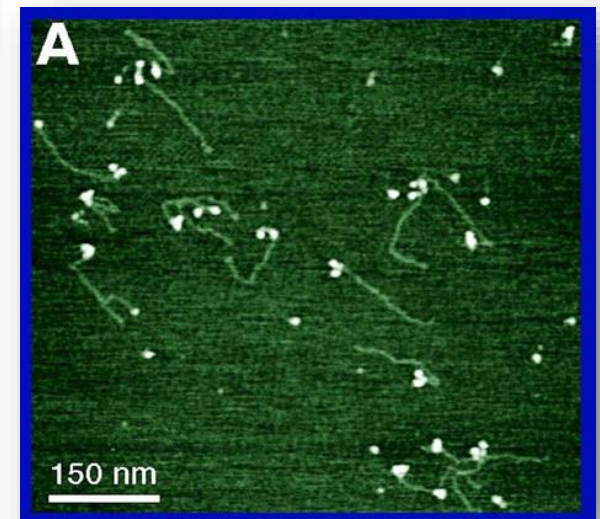
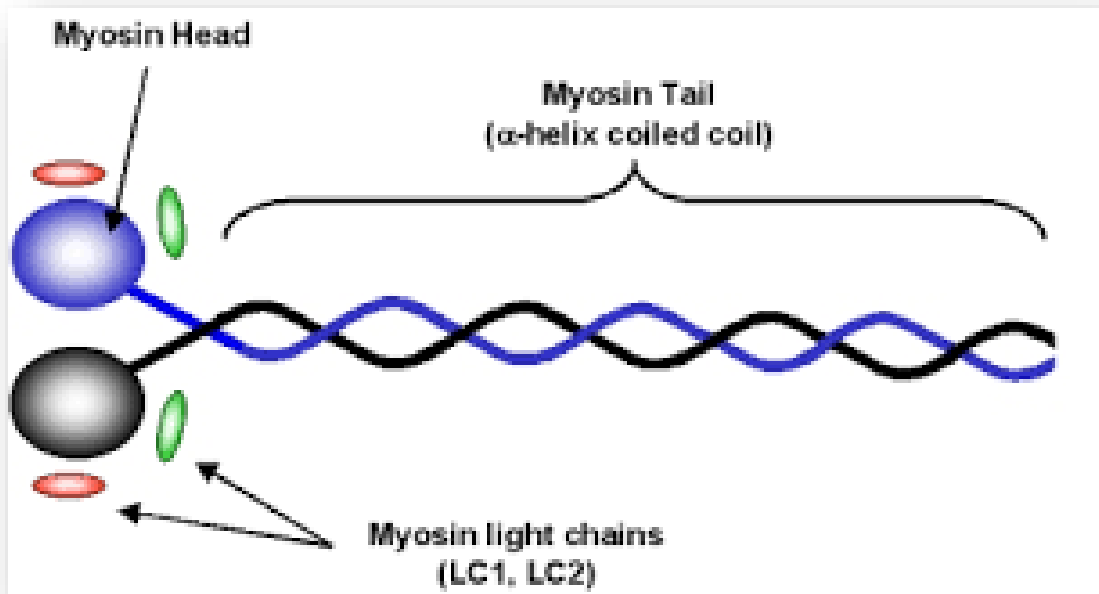




Μυοσίνη (β)

Μυοσίνη: (συνέχεια)

- Βαριές υπομονάδες κατά 55% ελικοειδή δομή (ουρά)
 - το N-τελικό άκρο σφαιρικής δομής (κεφαλή).
- Ελαφρές υπομονάδες:
 - 2 DTNB (Ca^{++} binding; regulatory).
 - 2 αλκαλικές (ATP-ase activity; essential).

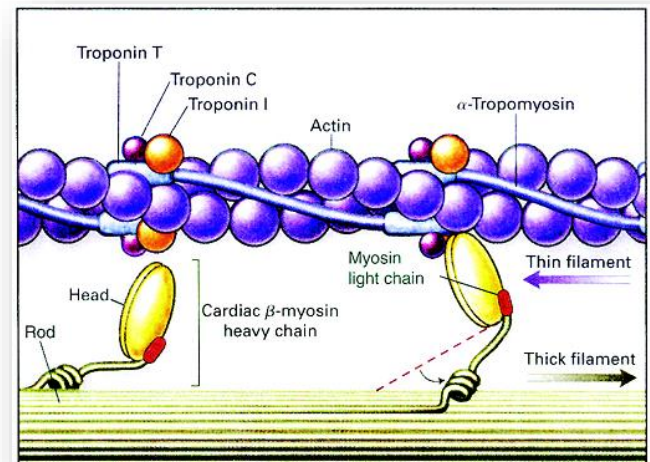
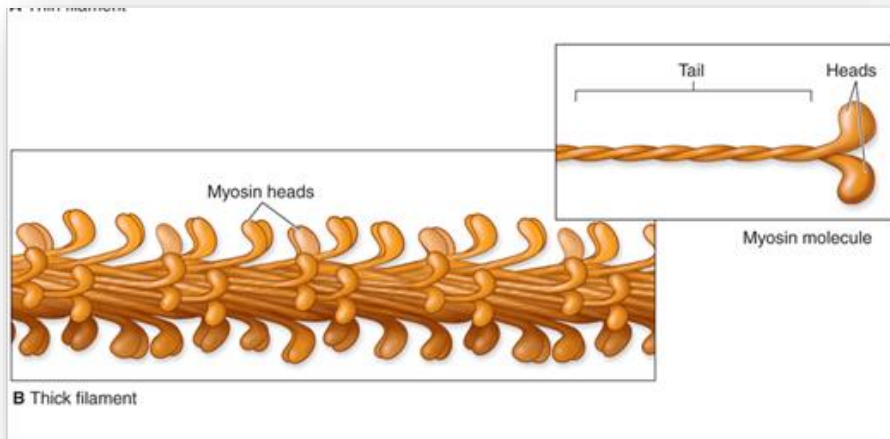




Μυοσίνη (δ)

Βιολογικές ενεργότητες της μυοσίνης:

- Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες ιοντικής ισχύος και pH, μόρια της μυοσίνης **οργανώνονται σε ίνες** («ουρά» του μορίου).
- Έχει την ικανότητα να **προσδένεται στην πολυμερισμένη δομή της ακτίνης** («κεφαλή» του μορίου).

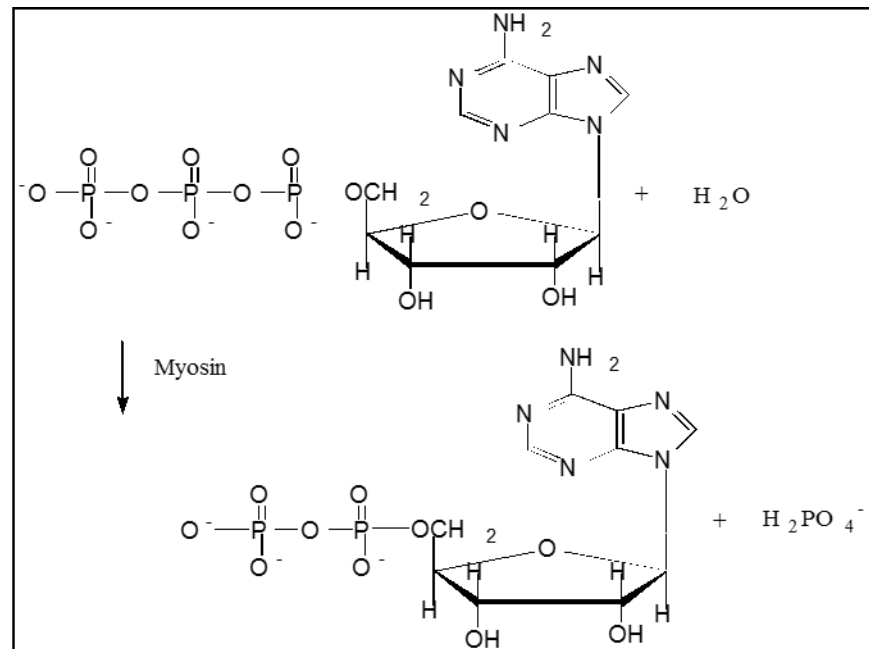
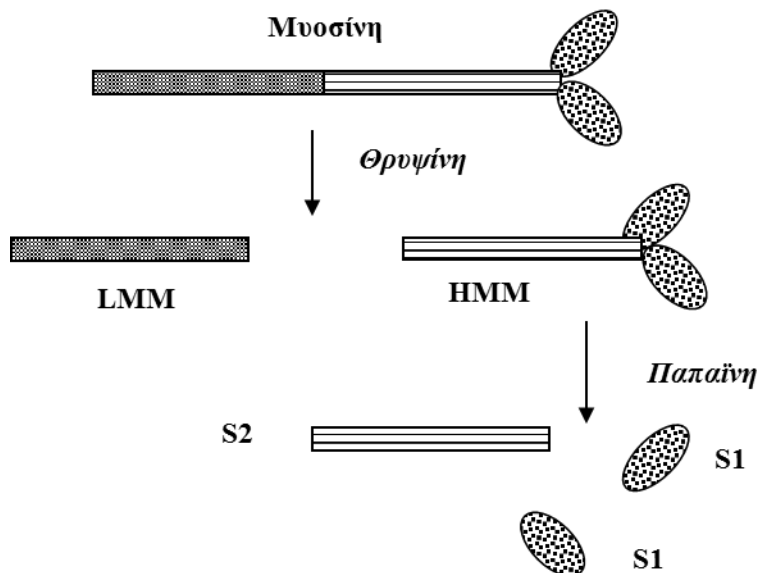




Μυοσίνη (ε)

Βιολογικές ενεργότητες της μυοσίνης: (συνέχεια)

- Έχει **ενεργότητα ΑΤΡάσης** παρουσία ιόντων Mg^{++} και Ca^{++} («κεφαλή» του μορίου)





Πρωτεΐνες C, H και X

Οι πρωτεΐνες C, H και X εντοπίζονται περιοδικά πάνω στα παχέα μυϊκά νήματα:

- μοιάζουν σαν να τα περιβάλλουν.
- έχουν τον κύριο άξονα τους παράλληλα με αυτόν των παχέων μυϊκών νημάτων.
- **προστατεύουν τα παχέα μυϊκά νήματα** από δυνάμεις τάνυσης και από απότομες μεταβολές της ιοντικής ισχύος.



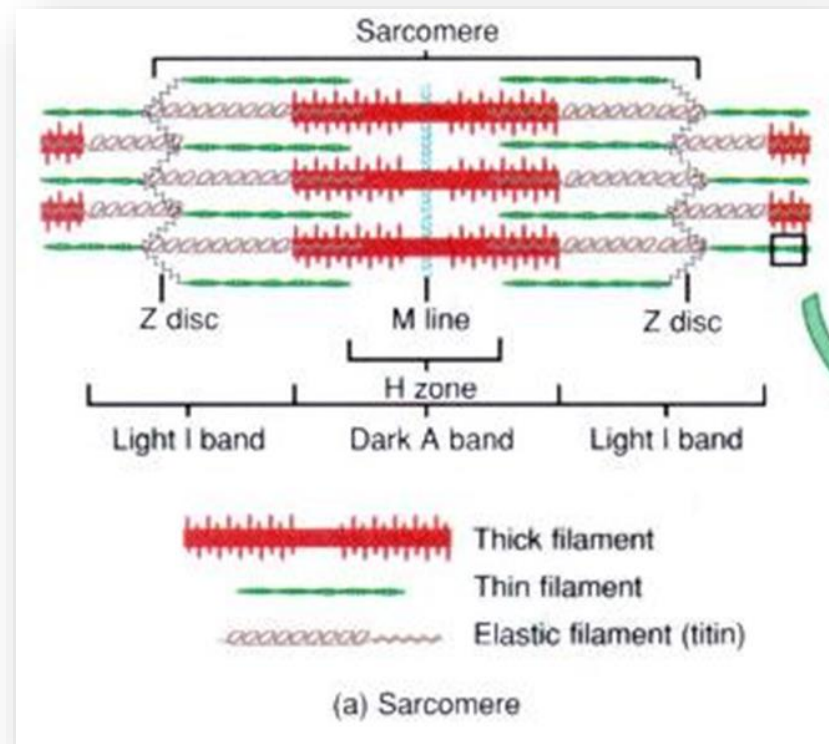
Μυομεσίνη, Κινάση κρεατίνης

Μυομεσίνη:

- κύρια πρωτεΐνη της Μ-γραμμής.
- αποτελεί το 3% των πρωτεϊνών των μυικών νημάτων.
- έχει μοριακό βάρος 165 kDa.
- συγκρατεί τα παχέα μυικά νήματα σε οργανωμένη δομή.

Κινάση της κρεατίνης:

- εμπλέκεται στην αναγέννηση του ATP.



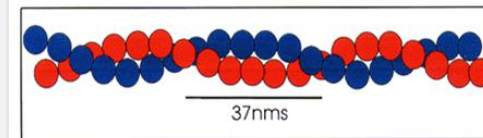
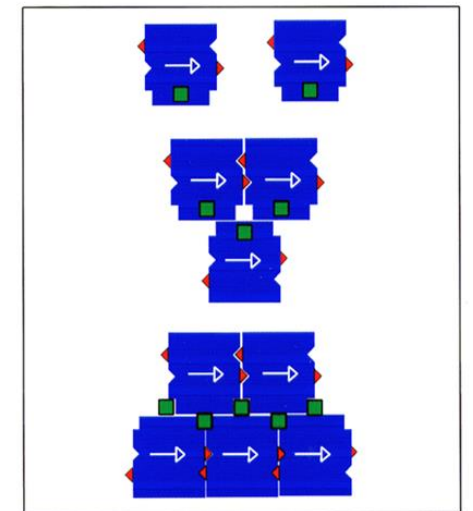


Ακτίνη

Ακτίνη:

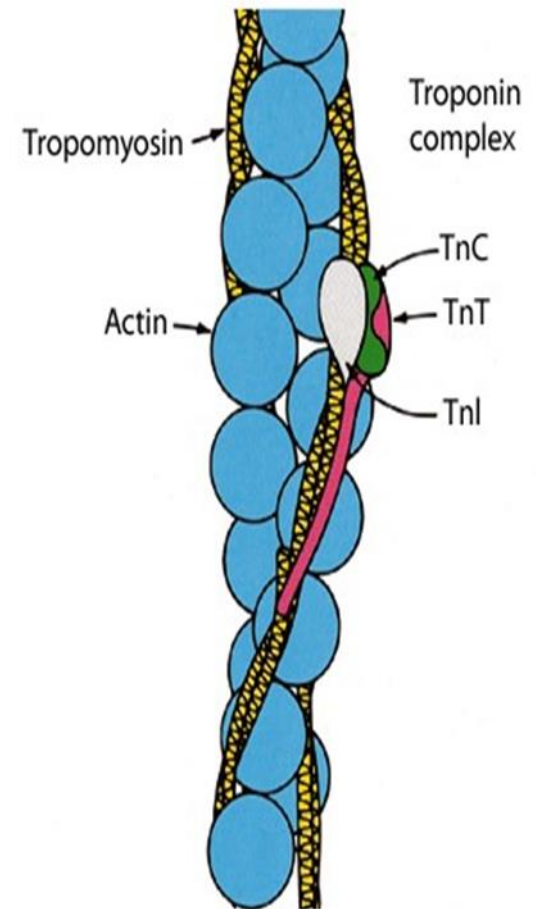
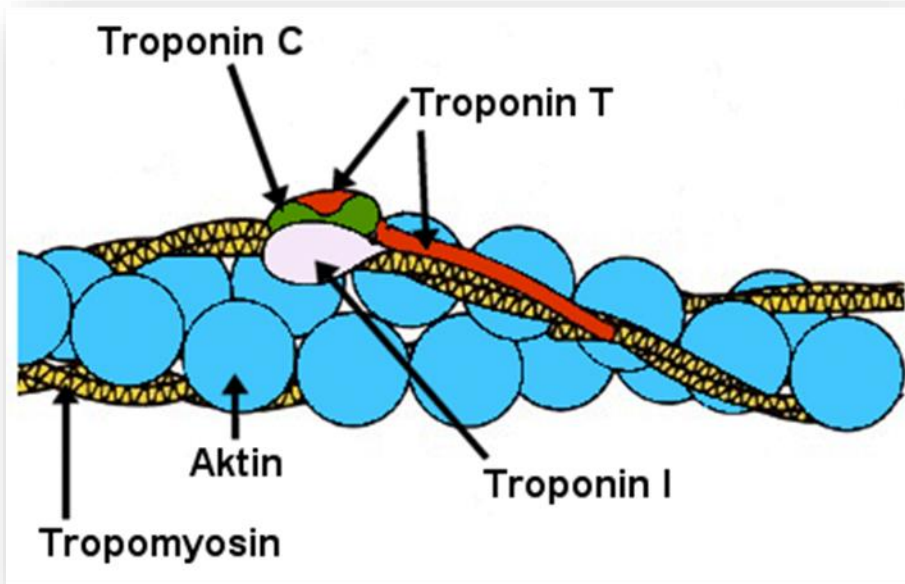
- 20% των πρωτεϊνών των μυϊκών νημάτων.
- βασικό συστατικό των λεπτών νημάτων.
- Σε διαλύματα χαμηλής ιοντικής ισχύος σφαιρικό μονομερές μόριο (MB 42 kDa, G-ακτίνη).
- Αυξανομένης της ιοντικής ισχύος προς τα φυσιολογικά επίπεδα,
 - πολυμερισμός προς ινώδη μορφή διπλής έλικας (F-ακτίνη).
- Πρόσδεση της F-ακτίνης στις δύο πλευρές του Z-δίσκου με αντίθετο προσανατολισμό.

Microfilaments 1
Sub-unit geometry





Αναπαράσταση λεπτού νήματος



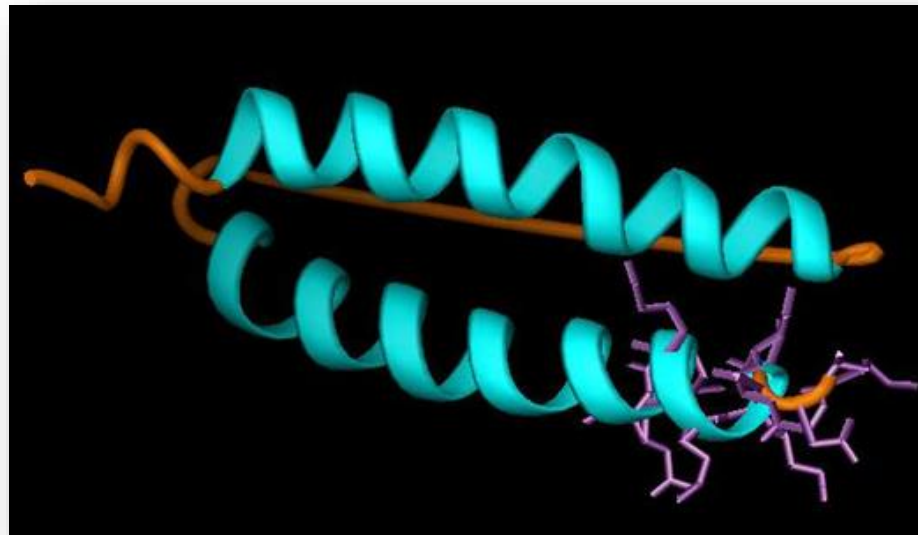
Το σύμπλοκο τροπομυοσίνης-τροπονίνης
ρυθμίζει τις αλληλοεπιδράσεις
μυοσίνης-ακτίνης.



Τροπομοσίνη (α)

Τροπομοσίνη:

- 5% των πρωτεϊνών των μυϊκών νημάτων.
 - συστατικό των λεπτών νημάτων.
- α- τροπομοσίνη (37 kDa) και β-τροπομοσίνη (33 kDa):
 - οργανωμένα σε ελικοειδή υπερδευτεροταγή δομή (α-α), (β-β), (α-β).

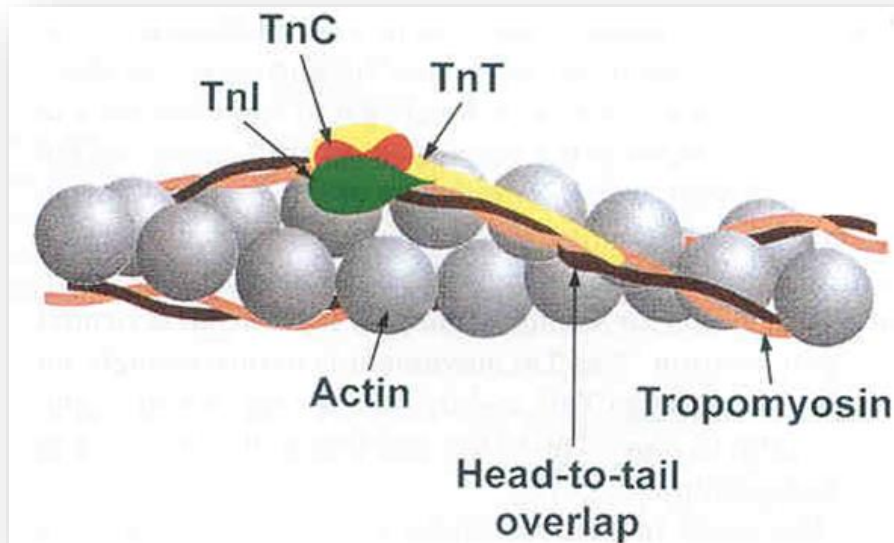




Τροπομοσίνη (β)

Τροπομοσίνη: (συνέχεια)

- Διμερή μόρια τροπομοσίνης:
 - συμπυκνώνονται άκρο - με - άκρο.
 - προσδένονται στα λεπτά νήματα της F-ακτίνης.
 - (1 μόριο τροπομοσίνης εφάπτεται με 7 μόρια G-ακτίνης).



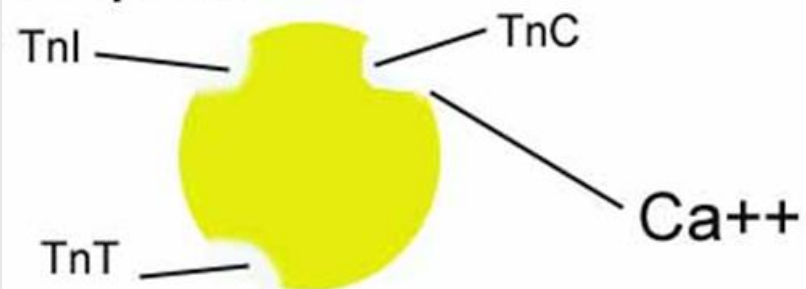


Τροπονίνη

Τροπονίνη:

- 5% των πρωτεϊνών των μυϊκών νημάτων.
 - συστατικό των λεπτών νημάτων.
- Τρεις υπομονάδες, η κάθε μια με διακριτό ρόλο:
 - Η τροπονίνη C (18 kDa) δεσμεύει ασβέστιο.
 - N-άκρο: $K_d = 10 \mu\text{M}$
(χαμηλή συγγένεια προς το Ca)
 - C-άκρο: $K_d = 0.1 \mu\text{M}$
(υψηλή συγγένεια προς το Ca)
 - Η τροπονίνη T (37 kDa) δεσμεύει την τροπομυοσίνη.
 - Η τροπονίνη I (24 kDa) δεσμεύει την ακτίνη.

Troponin





Νεβουλίνη

Νεβουλίνη:

- Η νεβουλίνη αποτελεί το 5% των πρωτεϊνών των μυικών νημάτων και έχει μοριακό βάρος 700 - 900 kDa.
- Διαθέτει πολλές περιοχές πρόσδεσης με την ακτίνη, και εμφανίζει διαφορετικά μήκη ανάλογα με το μήκος των λεπτών νημάτων.
- Ο βιολογικός της ρόλος είναι πιθανόν η **ρύθμιση του μήκους των λεπτών νημάτων**.



α- & β-Ακτινίνη - Δεσμίνη

α-ακτινίνη:

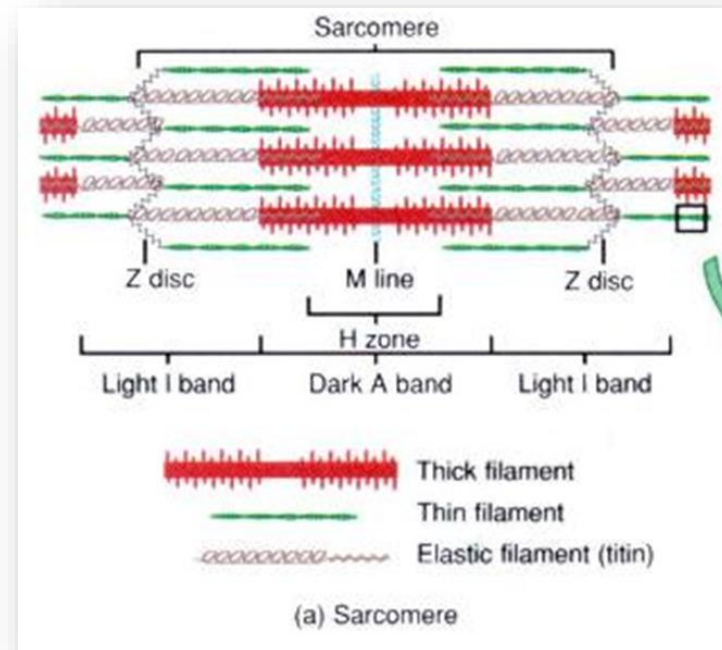
- Δύο όμοιες υπομονάδες (MB 100 kDa).
- Στον Z-δίσκο, παρέχει δομή και δεσμεύει την F-ακτίνη.

Δεσμίνη:

- MB 55 kDa, στην περιφέρεια του Z-δίσκου σχηματίζει ίνες μήκους 10 nm που συνδέουν γειτονικά μυϊκά νήματα.

β-ακτινίνη:

- Δύο υπομονάδες (MB 31 και 35 kDa).
- Δεσμεύει την F-ακτίνη στα ελεύθερα άκρα των λεπτών νημάτων και,
- Εμπλέκεται στην ρύθμιση του μήκους τους.

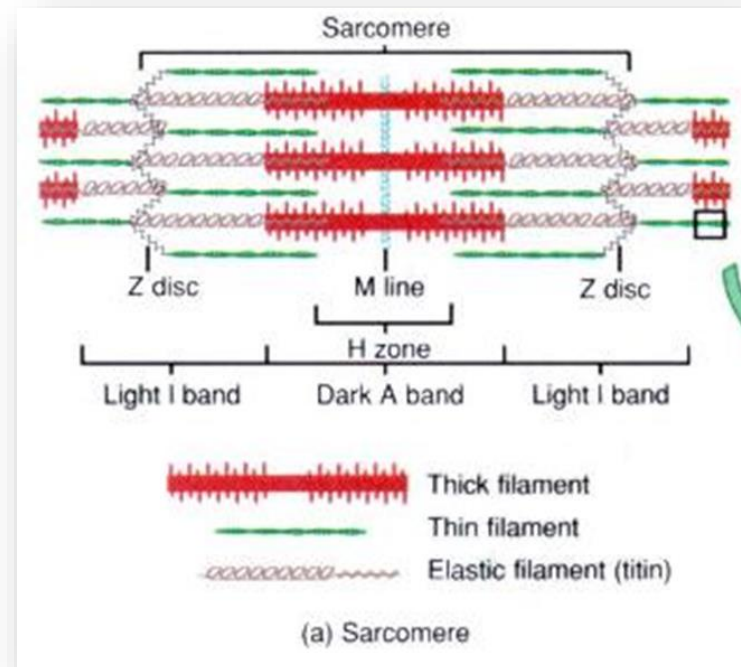




Τιτίνη

Τιτίνη (κονεκτίνη):

- 10% των πρωτεϊνών των μυϊκών νημάτων.
- Ελαστική πρωτεΐνη, MB 1.000 kDa, μήκους 0.9-1 μm .
- Εκτείνεται από τη Z-γραμμή μέχρι την M-γραμμή (ήμισυ σαρκομερούς).
- Αλληλεπιδρά με:
 - την μυοσίνη.
 - τις πρωτεΐνες της M-γραμμής.
 - την α -ακτινίνη.
- Υποστηρίζει τη μηχανική συνέχεια των μυών,
 - όταν εκτείνονται πέραν του σημείου αλληλοεπικάλυψης των νημάτων (gap filaments).

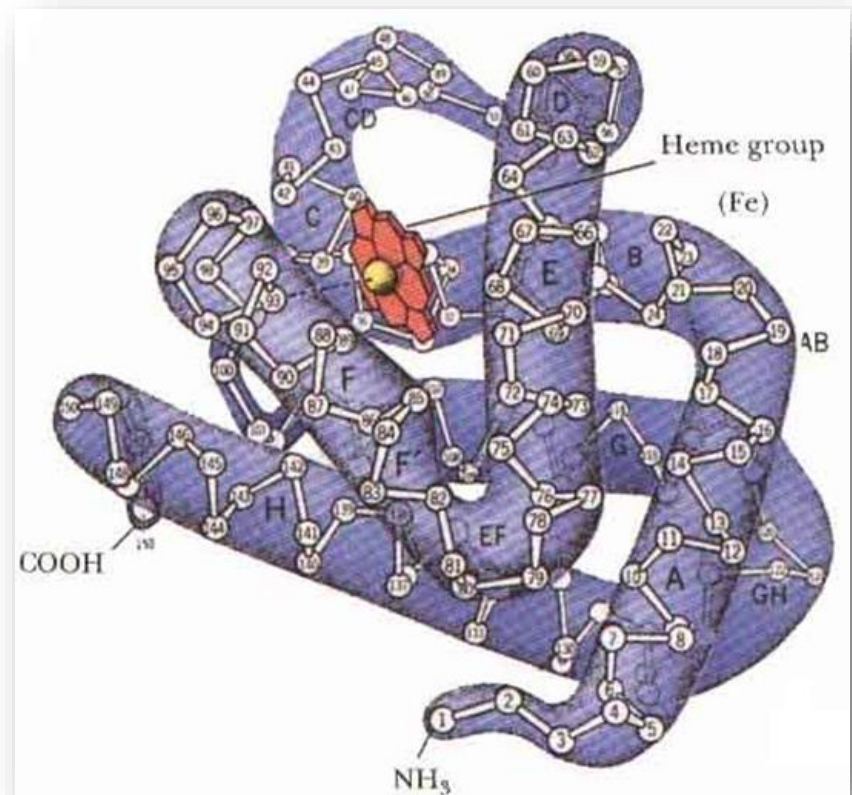




Μυοσφαιρίνη (α)

Μυοσφαιρίνη:

- Μια πεπτιδική αλυσίδα:
 - 1.5% της πρωτεΐνης στους σκελετικούς μύες.
 - MW 16.8 kDa, σφαιρικής δομής.
 - 80% των αμινοξέων υπό μορφή α-έλικας.

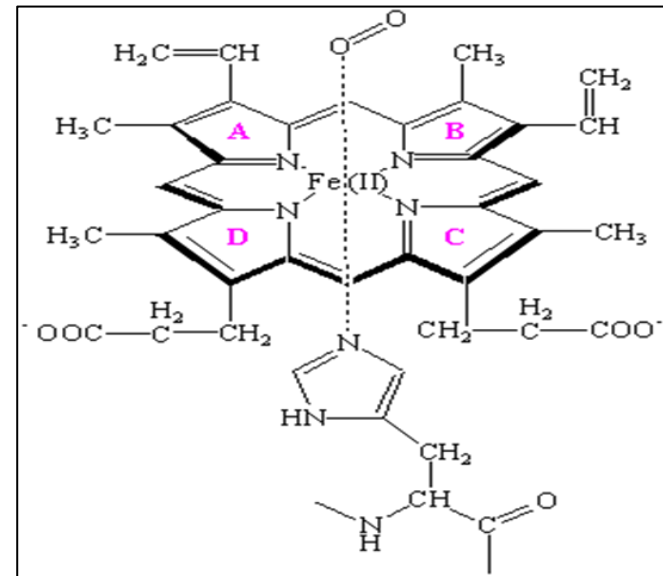
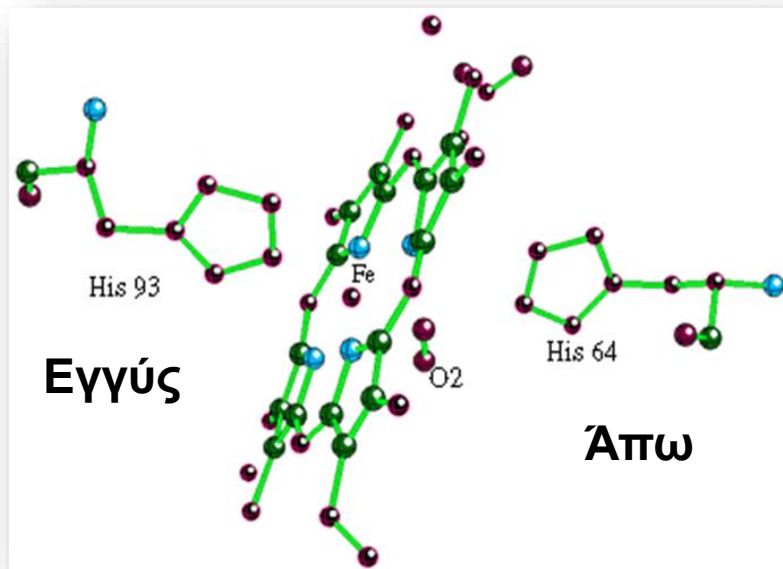




Μυοσφαιρίνη (β)

Μυοσφαιρίνη:

- Χρωμοφόρο συστατικό:
 - Πορφυρινικός (τετραπυρρολικός) δακτύλιος της αίμης,
 - τοποθετημένος σε υδρόφοβη υποδοχή του πρωτεϊνικού μορίου.
 - φέρει στο κέντρο του ένα άτομο σιδήρου.

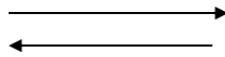




Μυοσφαιρίνη (γ)

Μυοσφαιρίνη (Mb)
(Fe²⁺)

οξυγόνωση



Οξυμυοσφαιρίνη (MbO₂)
(Fe²⁺)

αναγωγή

Μεταμυοσφαιρίνη (MMb)
(Fe³⁺)

οξειδωση

Παράγοντες που επηρεάζουν
την ισορροπία

- Οξυγόνο
- Φως
- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- pH
- Άλατα



Αλιπάσωση κρέατος (α)

NO + μυοσφαιρίνη (Mb)



νιτροζυλομυοσφαιρίνη (MbNO₂)
(φωτεινό κόκκινο χρώμα, ασταθής)

θέρμανση προϊόντος



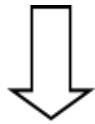
μετουσίωση μυοσφαιρίνης

νιτροζυλοαιμοχρωμίνη
(επιθυμητό ροζ χρώμα, χημικά σταθερή)



Αλιπάσωση κρέατος (β)

NO (περίσσεια) + μεταμυοσφαιρίνη (MMb)



αζωμυοσφαιρίνη (NMb)

θέρμανση απουσία O₂



αζωαιμίνη

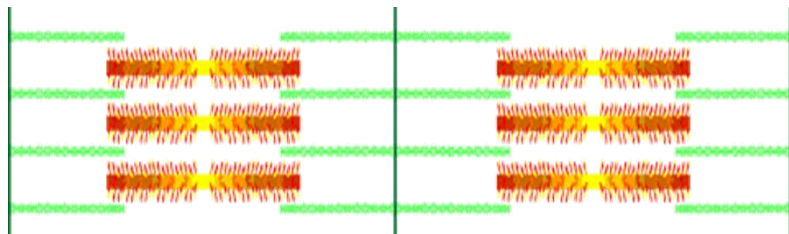
(πράσινη χρωστική «νιτρώδες κάψιμο»)



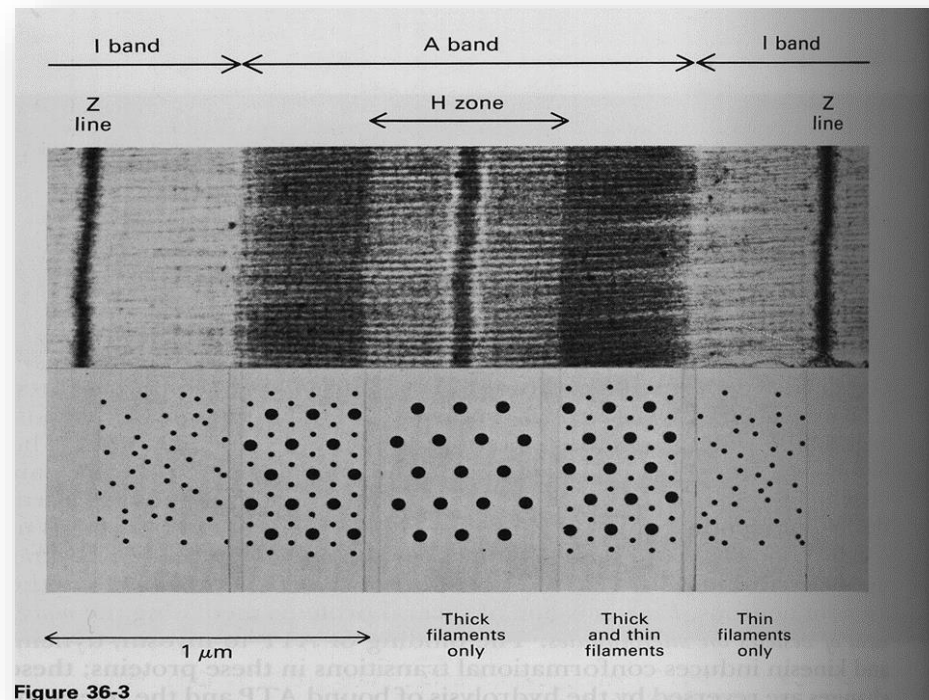
Συστολή μυός (α)

Συστολή του μυός.

- Ολίσθηση των παχέων επί των λεπτών νημάτων.
- Δεν μεταβάλλονται:
 - το μήκος των παχέων και λεπτών νημάτων
 - το μήκος της A-ζώνης.
- Μειώνονται:
 - το μήκος της I- και της H-ζώνης
 - το μήκος του σαρκομερούς.

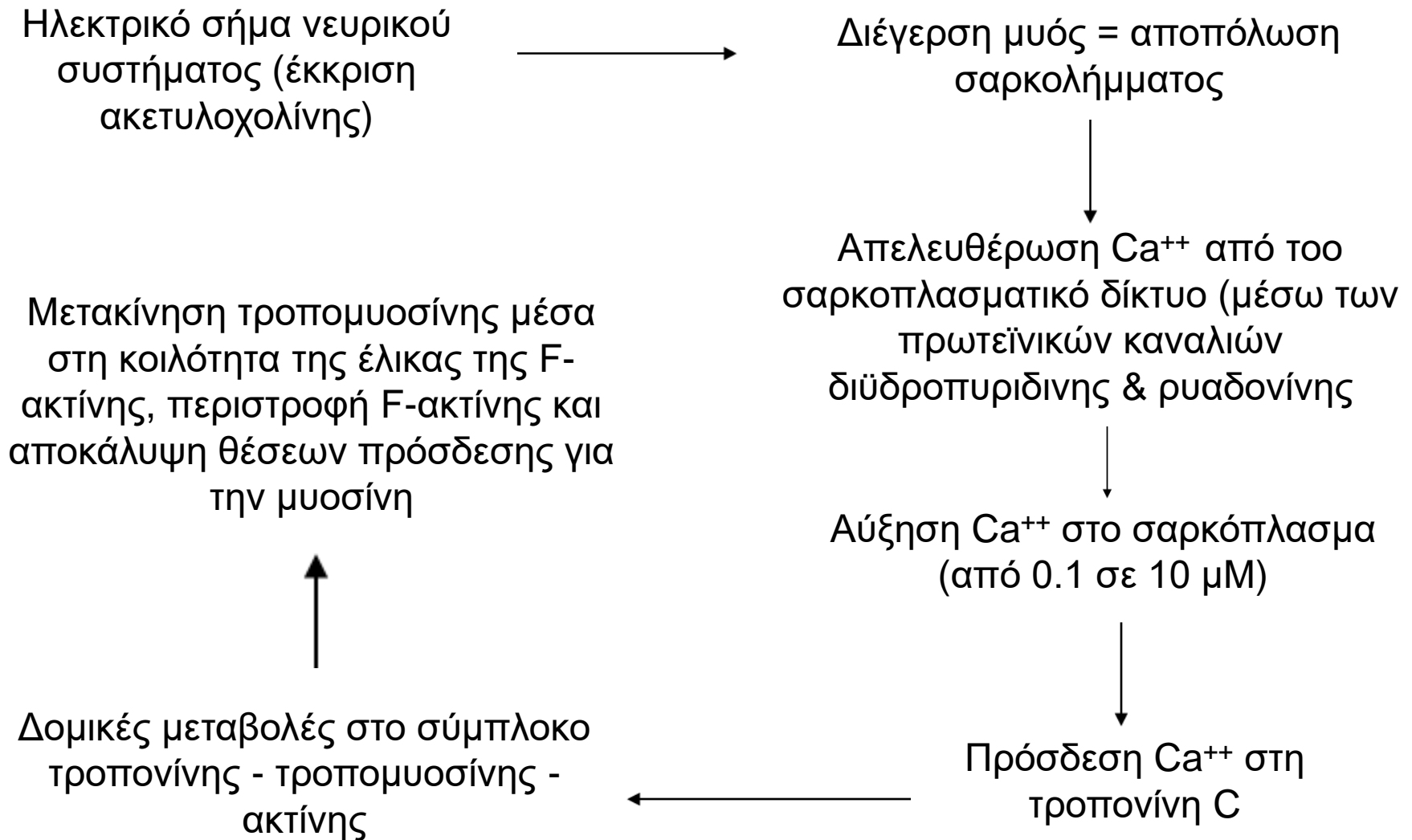


<https://www.youtube.com/watch?v=enTZnBdeIb5c>





Συστολή του μυός (β)



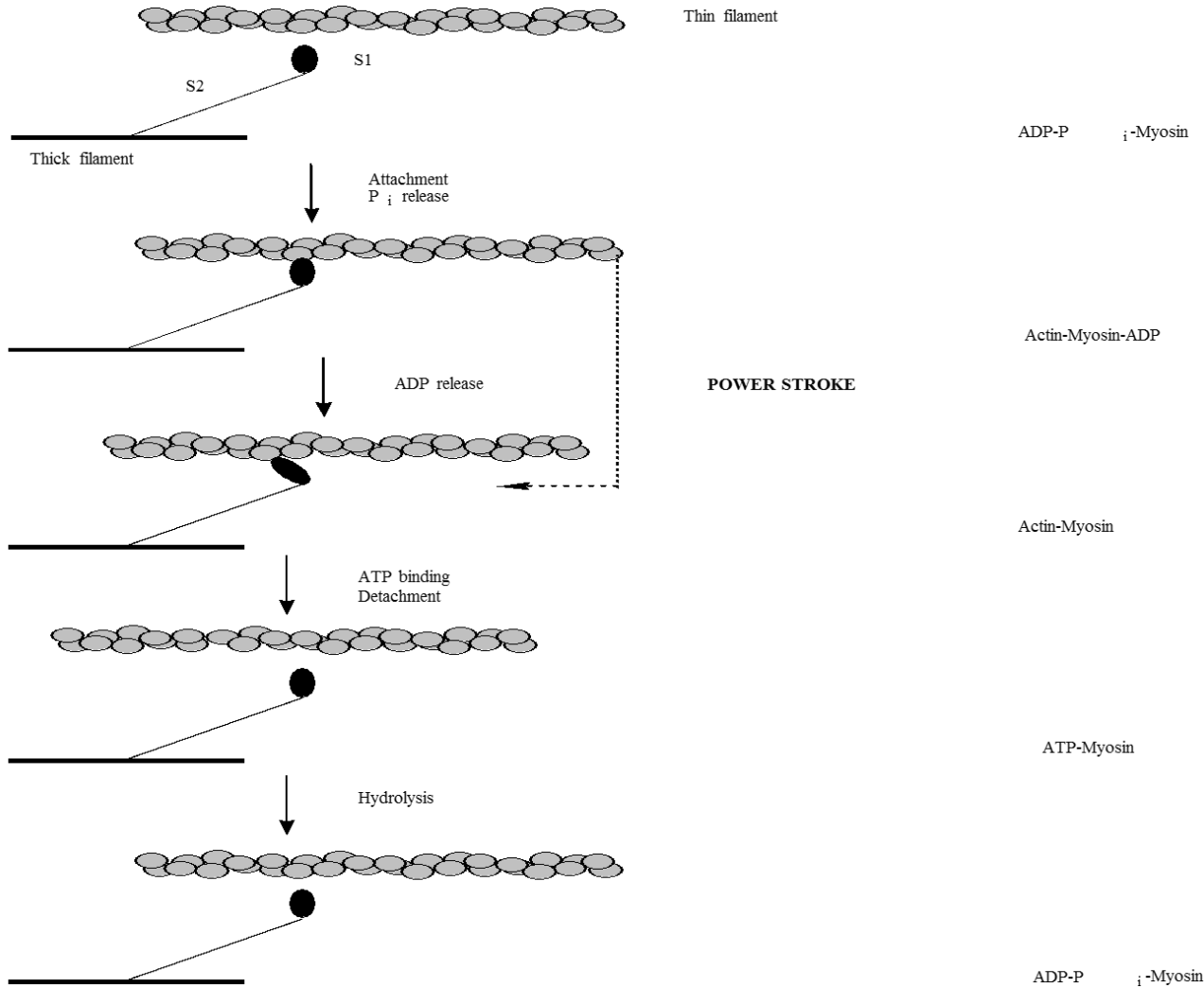


Συστολή του μυός (γ)

- Μυς εν ηρεμία, η κεφαλή της μυοσίνης δεν αγγίζει την ακτίνη
- Το ADP και η ομάδα P_i προσδεδεμένα στο σύμπλοκο “μυοσίνη-ADP- P_i ”
- Άφιξη νευρικού ερεθίσματος και απομάκρυνση της ομάδας P_i (άρα και ενέργειας) από το σύμπλοκο “μυοσίνη - ADP - P_i ”
- Η ενέργεια ωθεί την κεφαλή της μυοσίνης να προσεγγίσει και να αγγίξει τα μόρια της ακτίνης (γωνία 90°)
- Απομάκρυνση του ADP από σύμπλοκο “μυοσίνη - ADP”, ολοκλήρωση υδρόλυσης ATP και απελευθέρωση πλήρους ενέργειας (power stroke)
- Η ενέργεια οδηγεί στην αλλαγή της γωνίας πρόσδεσης της μυοσίνης με την ακτίνη (45°) και άρα ολισθήση των λεπτών νημάτων κατά 75 \AA

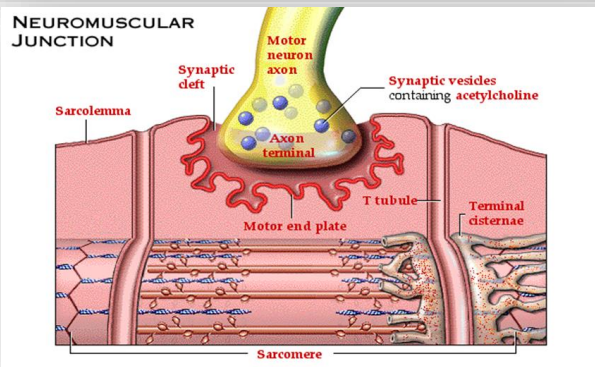
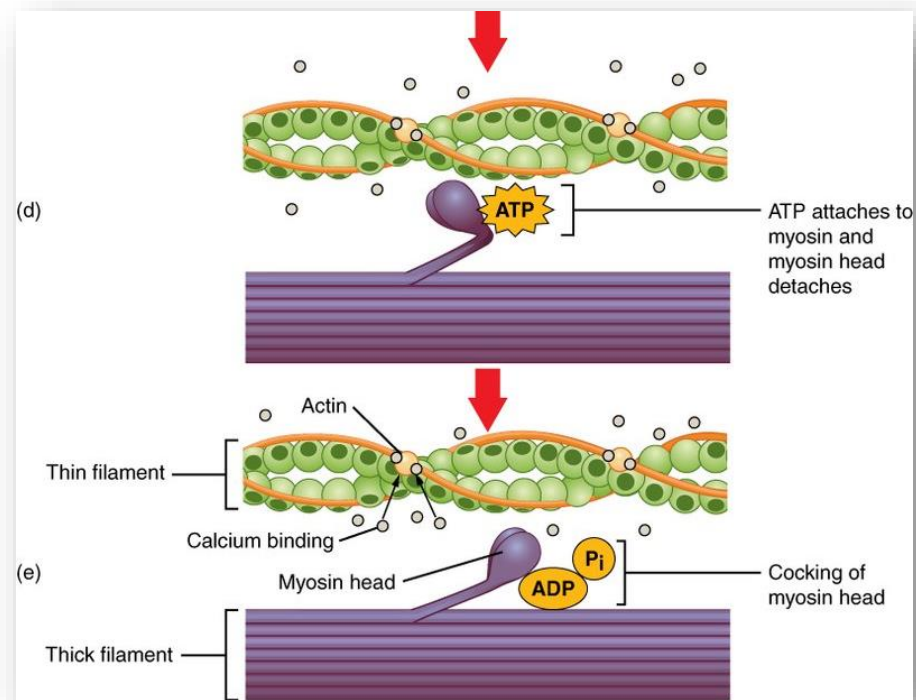
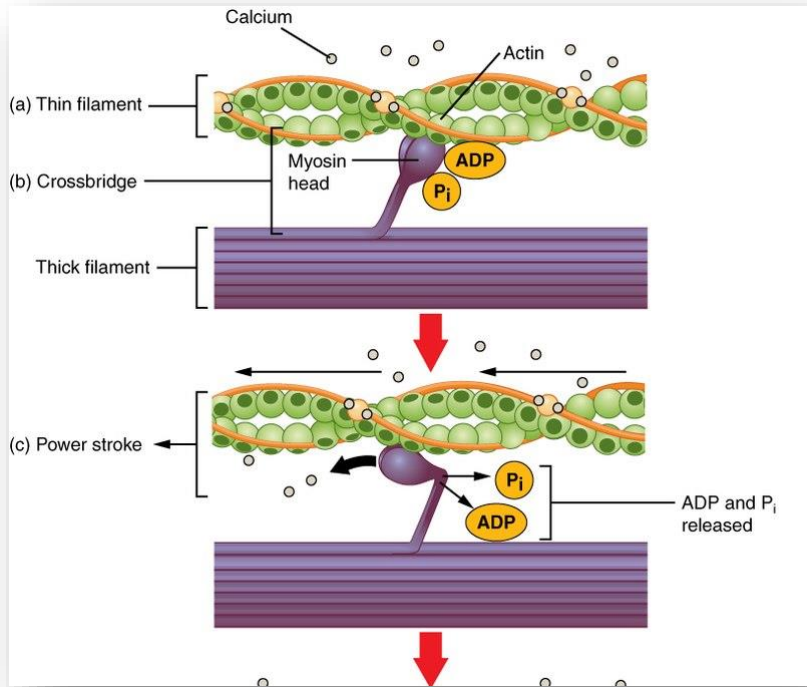


Συστολή του μυός (δ)





Συστολή του μυός (ε)



<https://www.youtube.com/watch?v=BVcgO4p88AA>

<https://www.youtube.com/watch?v=eN4AAEX38Rg>



Συστολή του μυός (στ)

Επαναφορά μυός στην ηρεμία

- Απενεργοποίηση (turning off) των λεπτών νημάτων.
- Μείωση συγκέντρωσης σαρκοπλασματικού Ca από 10 σε 0.1 μM
- Μεταφορά Ca πίσω στο σαρκοπλασματικό δίκτυο, μέσω αντλίας Ca (σαρκοπλασματική πρωτεΐνη M.B. 100 kDa).
- 1 μόριο ATP και δύο ιόντα Ca ενώνονται με την αντλία Ca
- Υδρόλυση του ATP, μεταφορά Ca στο σαρκοπλασματικό δίκτυο και πρόσδεση με την καλσικεστρίνη, υπεύθυνη για την αποθήκευση του



Συστολή λείων μυών (α)

Λείοι μύες:

- σε διάφορα όργανα (τοιχώματα στομάχου, εντέρων, αιμοφόρων αγγείων).
- η τροπονίνη και η τροπομυοσίνη δεν παίζουν ρυθμιστικό ρόλο στη συστολή του μυός.
- η αλληλοεπίδραση μυοσίνης – ακτίνης γίνεται μόνον όταν οι ελαφρές αλυσίδες της μυοσίνης φωσφορυλιωθούν



Συστολή λείων μυών (β)

Η αλληλουχία των αντιδράσεων:

- υπό τον ορμονικό έλεγχο της **επινεφρίνης** (αδρεναλίνης), ενεργοποιείται η αδενυλοκυκλάση και συντίθεται c-AMP
- το c-AMP διεγείρει την έκκριση Ca^{++} από το σαρκοπλασματικό δίκτυο, το οποίο συμπλοκοποιείται με μια ειδική πρωτεΐνη, τη καλμοδουλίνη (M.W. 17 kDa)
- Το σύμπλοκο αυτό ενεργοποιεί την κινάση των ελαφρών αλυσίδων της μυοσίνης (MLCK, myosin light chain kinase)
- η MLCK με την σειρά της ενεργοποιεί, μέσω φωσφορυλίωσης, τις ελαφρές αλυσίδες της μυοσίνης με αποτέλεσμα αυτές την αλληλοεπιδράσουν με την ακτίνη.

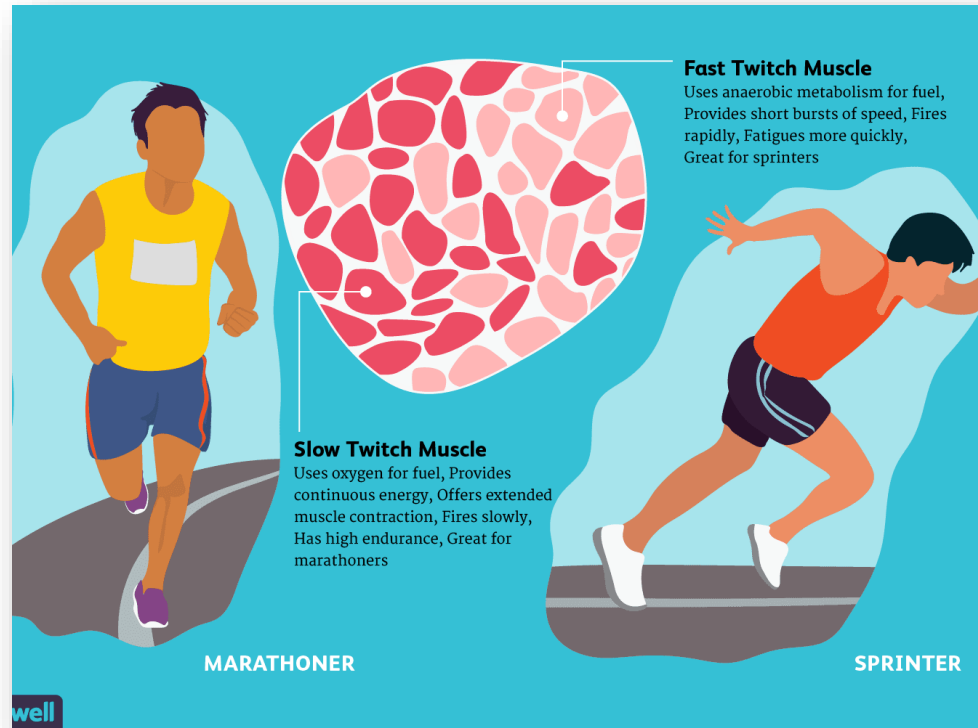


Αργοί μύες

Αργοί μύες (slow):

περιέχουν περισσότερη μυοσφαιρίνη, γι' αυτό και ονομάζονται **κόκκινοι (red)**. Λόγω της πλεονάζουσας μυοσφαιρίνης:

- δεσμεύουν περισσότερο οξυγόνο.
- παράγουν ενέργεια (ATP) χωρίς ταυτόχρονη παραγωγή γαλακτικού οξέος (οξειδωτικός μεταβολισμός).
- υποστηρίζουν κινήσεις που απαιτούν **αντοχή** (π.χ. δρόμοι αντοχής).

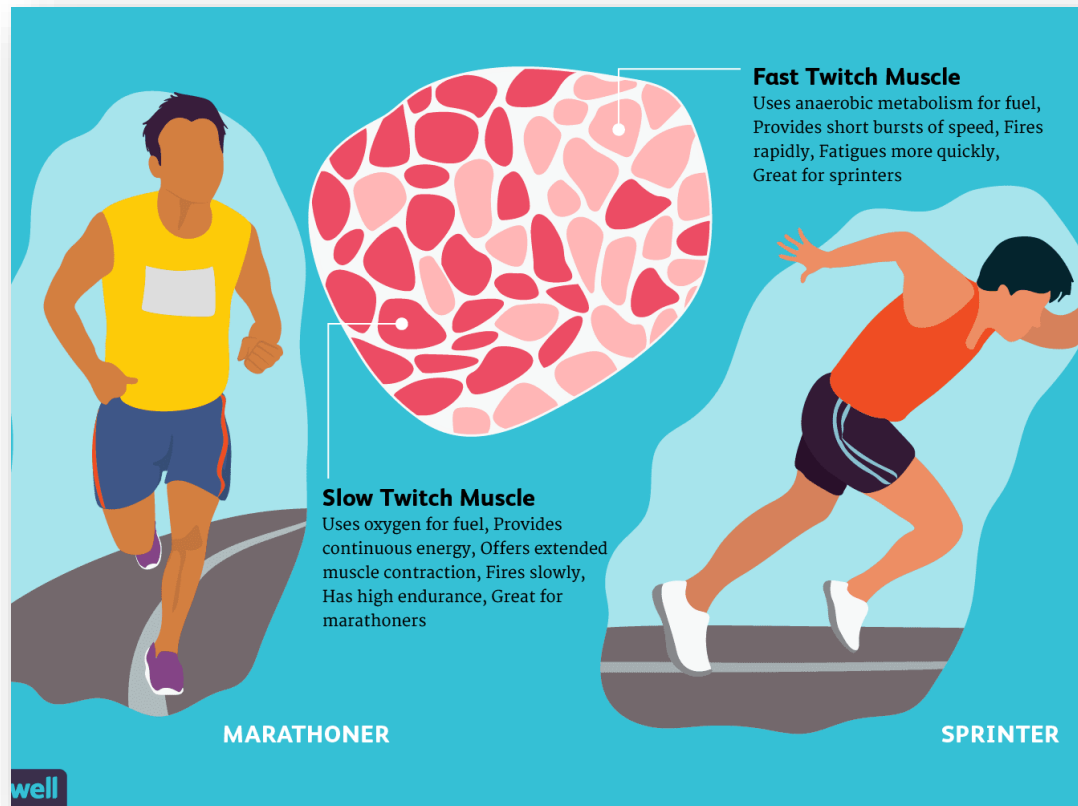




Γρήγοροι μύες

Γρήγοροι μύες (fast):
διαθέτουν λιγότερη
μυοσφαιρίνη, γι' αυτό και
ονομάζονται **λευκοί (white)**.

- Παράγουν ταχύτερα ενέργεια (ATP),
- αλλά ταυτόχρονα και γαλακτικό οξύ (γλυκολυτικός μεταβολισμός).
- υποστηρίζουν κινήσεις που απαιτούν **ταχύτητα** (π.χ. δρόμοι ταχύτητας).





Βιβλιογραφία

- B.K. Simpson (2012) Food Biochemistry and Food Processing, Wiley-Blackwell
- M.J. Berg, L.J. Tymoczko, G.J. Gato, L. Stryer (2015) Βιοχημεία, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης