



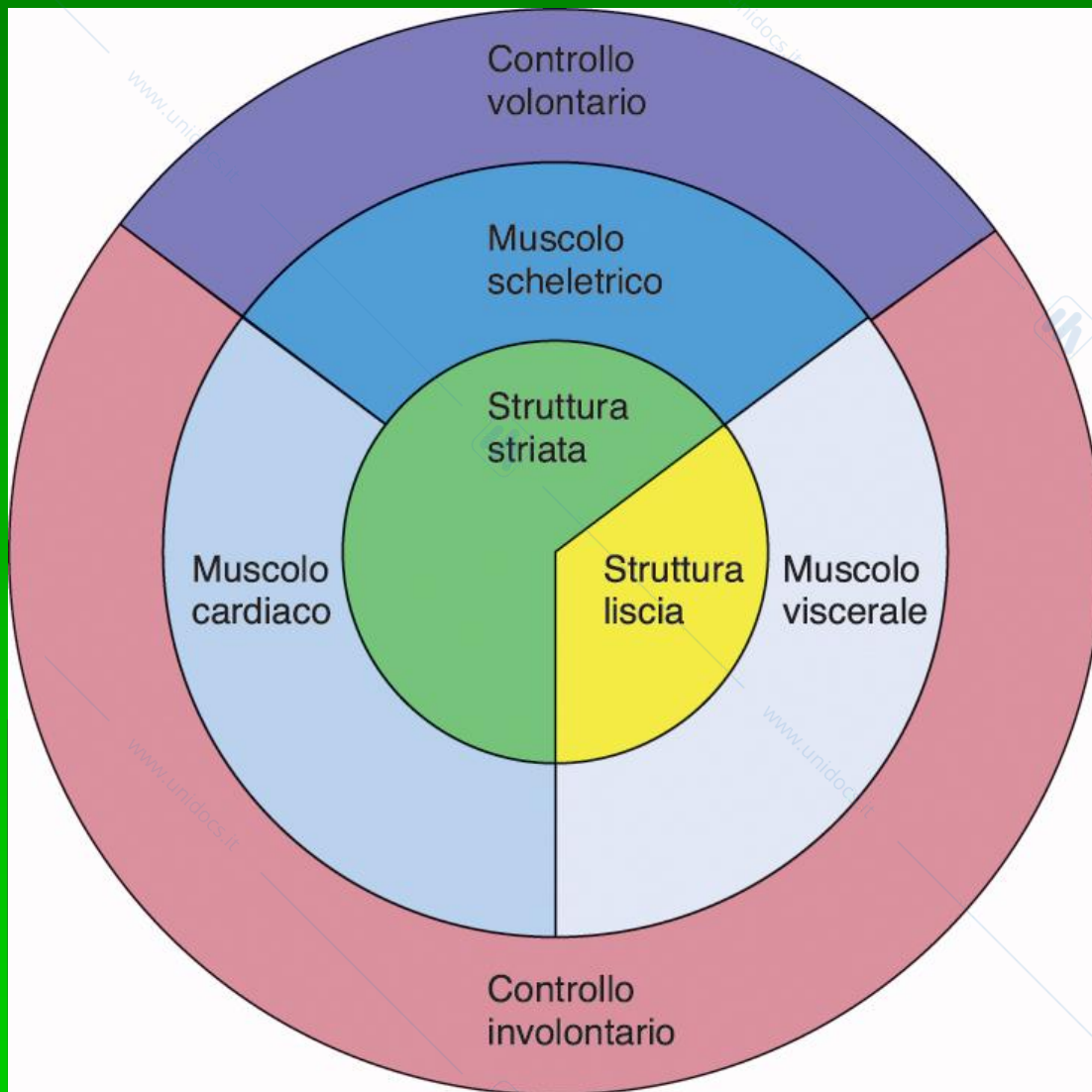
FISIOLOGIA DEL MUSCOLO

- **IL MUSCOLO è un TESSUTO ECCITABILE** la cui **MEMBRANA RISPONDE** agli **STIMOLI** PRODUCENDO **POTENZIALI D'AZIONE**
- **LA RISPOSTA MUSCOLARE AGLI STIMOLI è la CONTRAZIONE** con **PRODUZIONE** di **FORZA**

Muscoli

- **Si contraggono**
- **Generano movimento**
- **Generano forza**
- **Generano calore**
- **Supporto**

Classificazione dei muscoli



❖ **localizzazione anatomica e funzione**

❖ **struttura microscopica**

❖ **modalità di azione e di controllo**



Cardiac muscle cell



Skeletal muscle cell



Smooth muscle cell

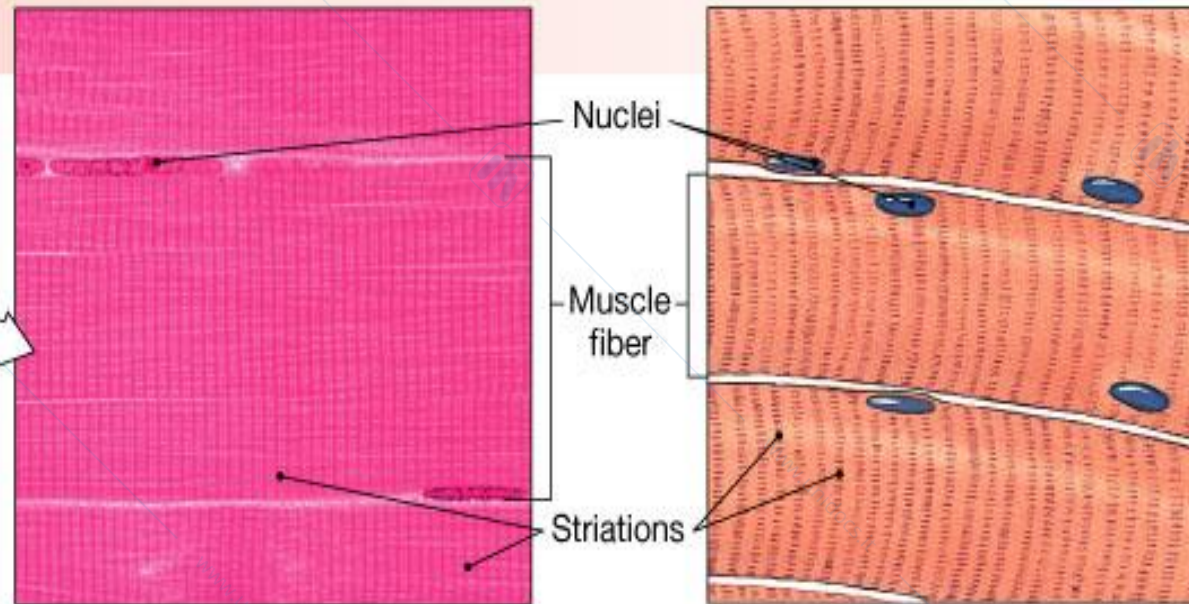
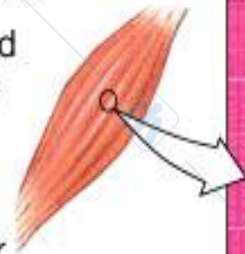
I tessuti muscolari: differenze funzionali e morfologiche

SKELETAL MUSCLE TISSUE

Cells are long, cylindrical, striated, and multinucleate.

LOCATIONS: Combined with connective tissues and nervous tissue in skeletal muscles

FUNCTIONS: Moves or stabilizes the position of the skeleton; guards entrances and exits to the digestive, respiratory, and urinary tracts; generates heat; protects internal organs



(a) Skeletalmuscle

- grandi cellule polinucleate
- striatura trasversale
- contrazione volontaria

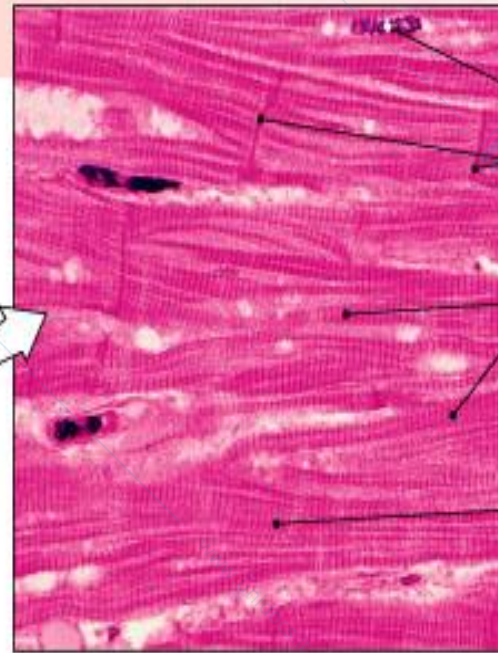
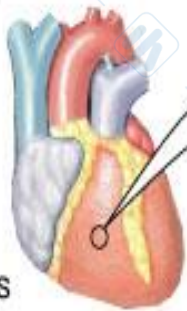
I tessuti muscolari: differenze funzionali e morfologiche

CARDIAC MUSCLE TISSUE

Cells are short, branched, and striated, usually with a single nucleus; cells are interconnected by intercalated discs.

LOCATION: Heart

FUNCTIONS: Circulates blood; maintains blood (hydrostatic) pressure



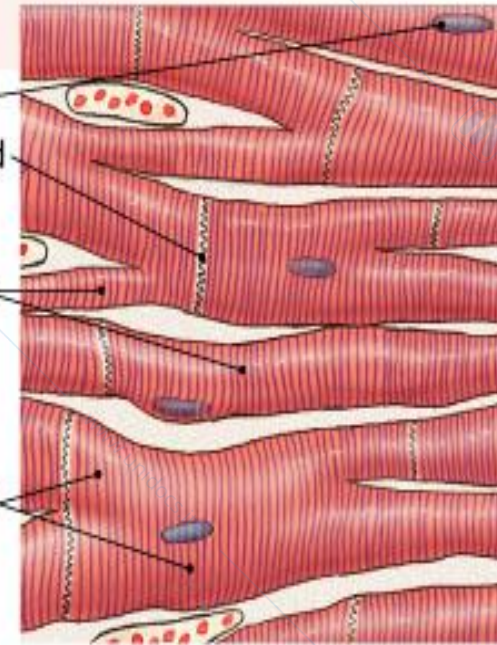
LM × 450

Nucleus

Intercalated discs

Cardiac muscle cells

Striations



(b) Cardiac muscle

- cellule mononucleate
- striatura trasversale
- accoppiate elettricamente
- contrazione involontaria

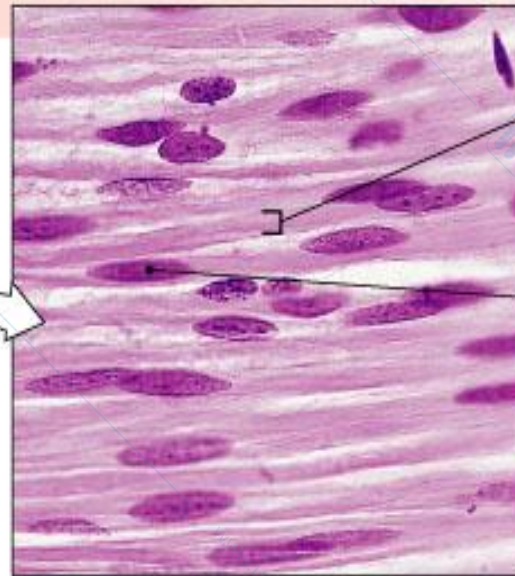
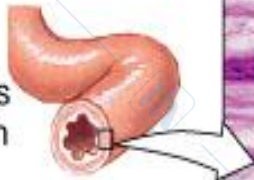
I tessuti muscolari: differenze funzionali e morfologiche

SMOOTH MUSCLE TISSUE

Cells are short, spindle-shaped, and nonstriated, with a single, central nucleus

LOCATIONS: Encircles blood vessels; found in the walls of digestive, respiratory, urinary, and reproductive organs

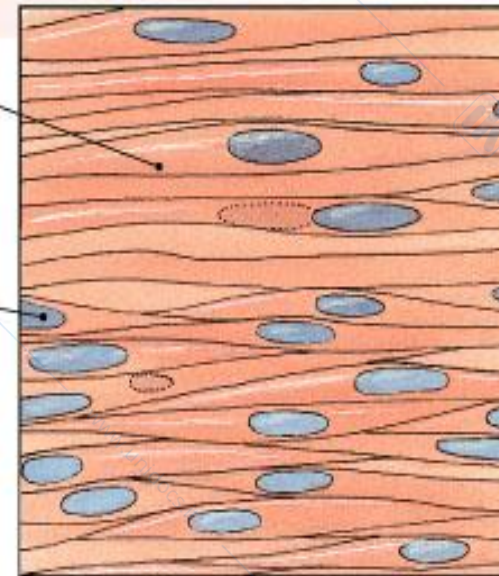
FUNCTIONS: Moves food, urine, and reproductive tract secretions; controls diameter of respiratory passageways; regulates diameter of blood vessels



LM × 235

Smooth muscle cell

Nucleus



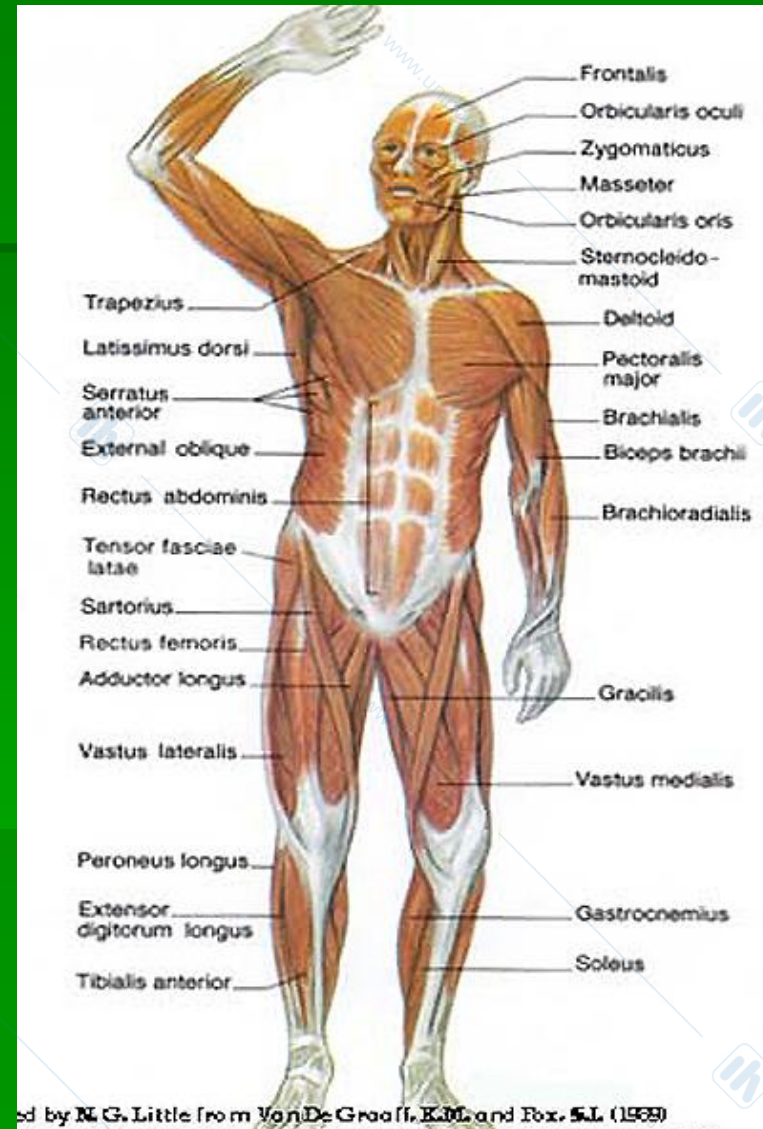
(c) Smooth muscle

- piccole cellule mononucleate
- striatura assente
- contrazione involontaria,
- accoppiamento elettrico e meccanico

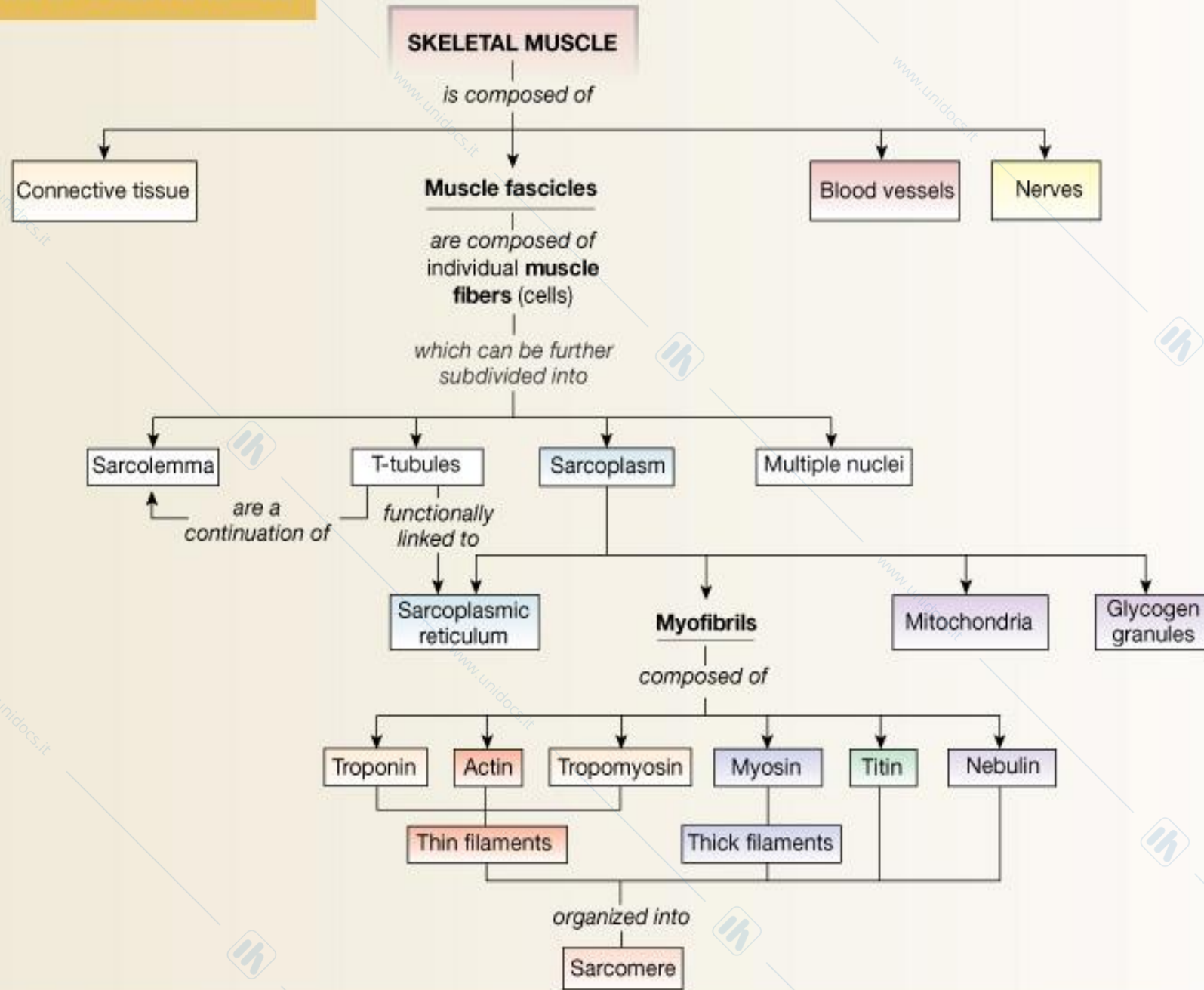
Table 12-3: Comparison of Three Muscle Types

	SKELETAL	SMOOTH	CARDIAC
Appearance under light microscope	Striated	Smooth	Striated
Fiber arrangement	Sarcomeres	Longitudinal bundles	Sarcomeres
Fiber proteins	Actin, myosin; troponin and tropomyosin	Actin, myosin, tropomyosin	Actin, myosin; troponin and tropomyosin
Control	<ul style="list-style-type: none">■ Voluntary■ Ca^{2+} and troponin■ Fibers independent	<ul style="list-style-type: none">■ Involuntary■ Ca^{2+} and calmodulin■ Fibers electrically linked via gap junctions	<ul style="list-style-type: none">■ Involuntary■ Ca^{2+} and troponin■ Fibers electrically linked via gap junctions
Nervous control	Somatic motor neuron	Autonomic neurons	Autonomic neurons
Hormonal influence	None	Multiple hormones	Epinephrine
Location	Attached to bones; a few sphincters close off hollow organs	Forms the walls of hollow organs and tubes; some sphincters	Heart muscle
Morphology	Multinucleate; large, cylindrical fibers	Uninucleate; small spindle-shaped fibers	Uninucleate; shorter branching fibers
Internal structure	T-tubule and sarcoplasmic reticulum	No t-tubules; sarcoplasmic reticulum reduced or absent	T-tubule and sarcoplasmic reticulum
Contraction speed	Fastest	Slowest	Intermediate
Contraction force of single fiber	All-or-none	Graded	Graded
Initiation of contraction	Requires input from motor neuron	Can be autorhythmic	Autorhythmic

La muscolatura scheletrica costituisce nell'uomo circa il 40% del peso corporeo, e un altro 10% è costituito da muscolatura liscia e cardiaca. Molte caratteristiche fondamentali della contrazione sono comuni a ciascuno di questi differenti tipi di muscolatura.

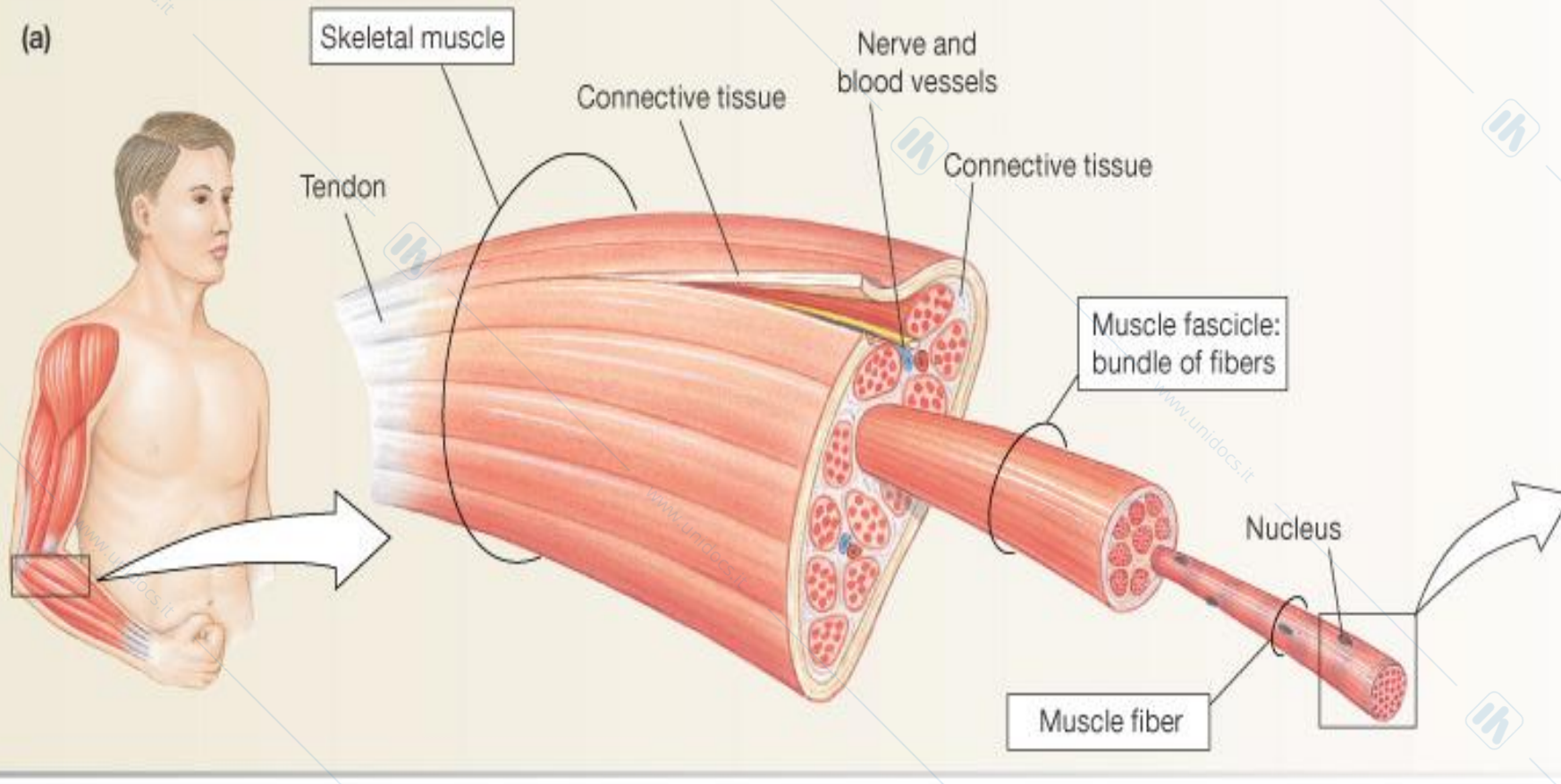


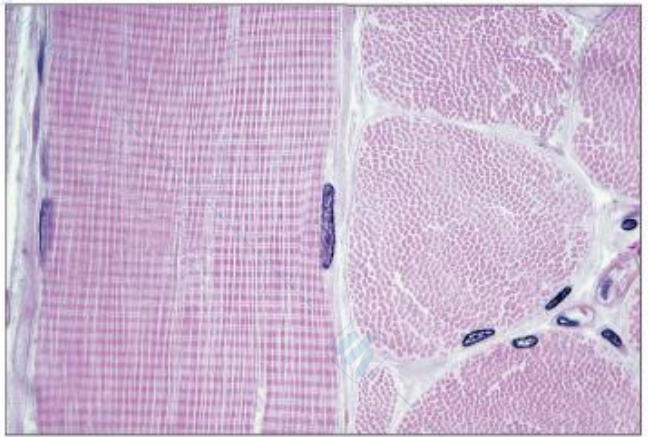
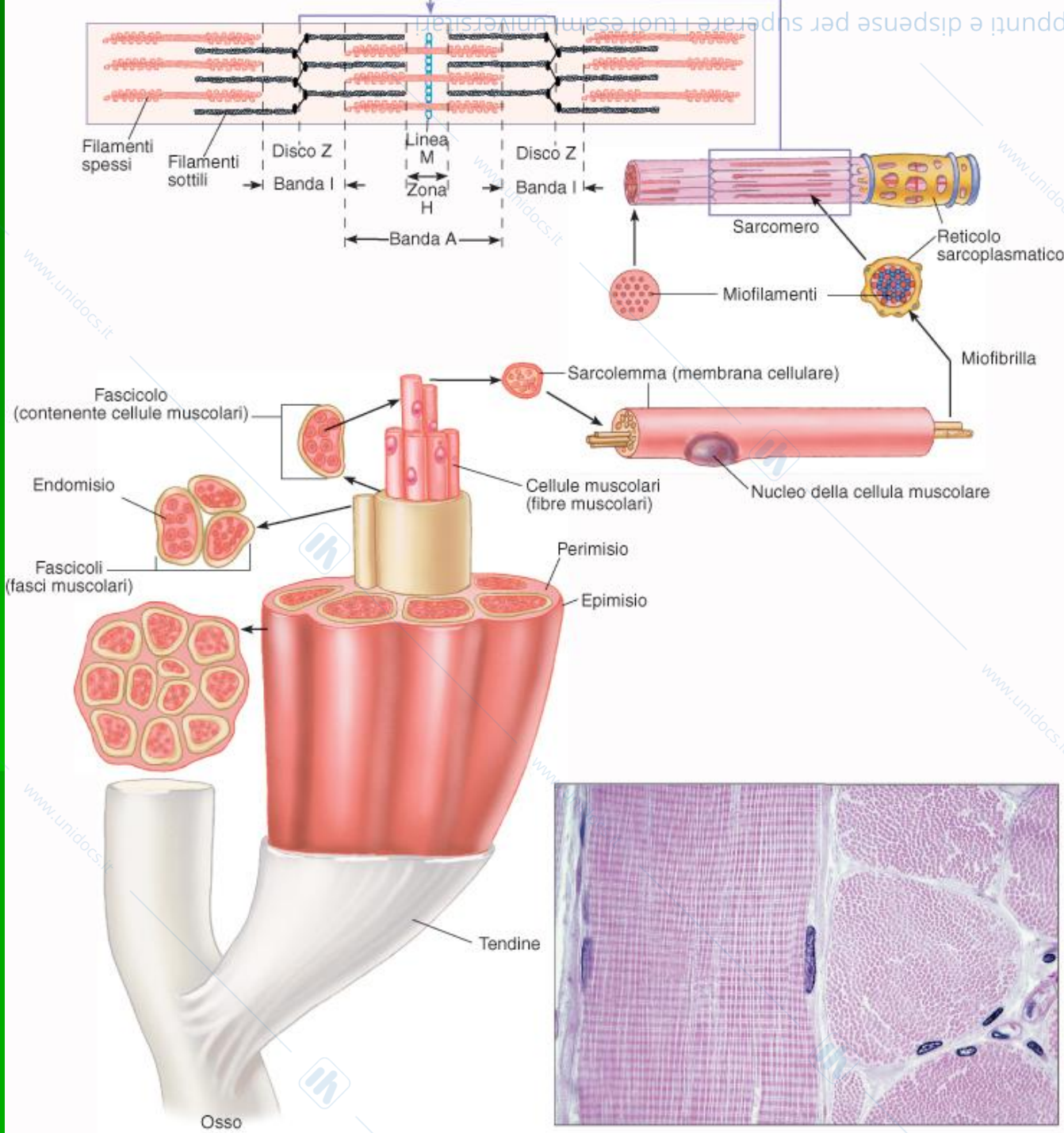
ORGANIZATION OF SKELETAL MUSCLE



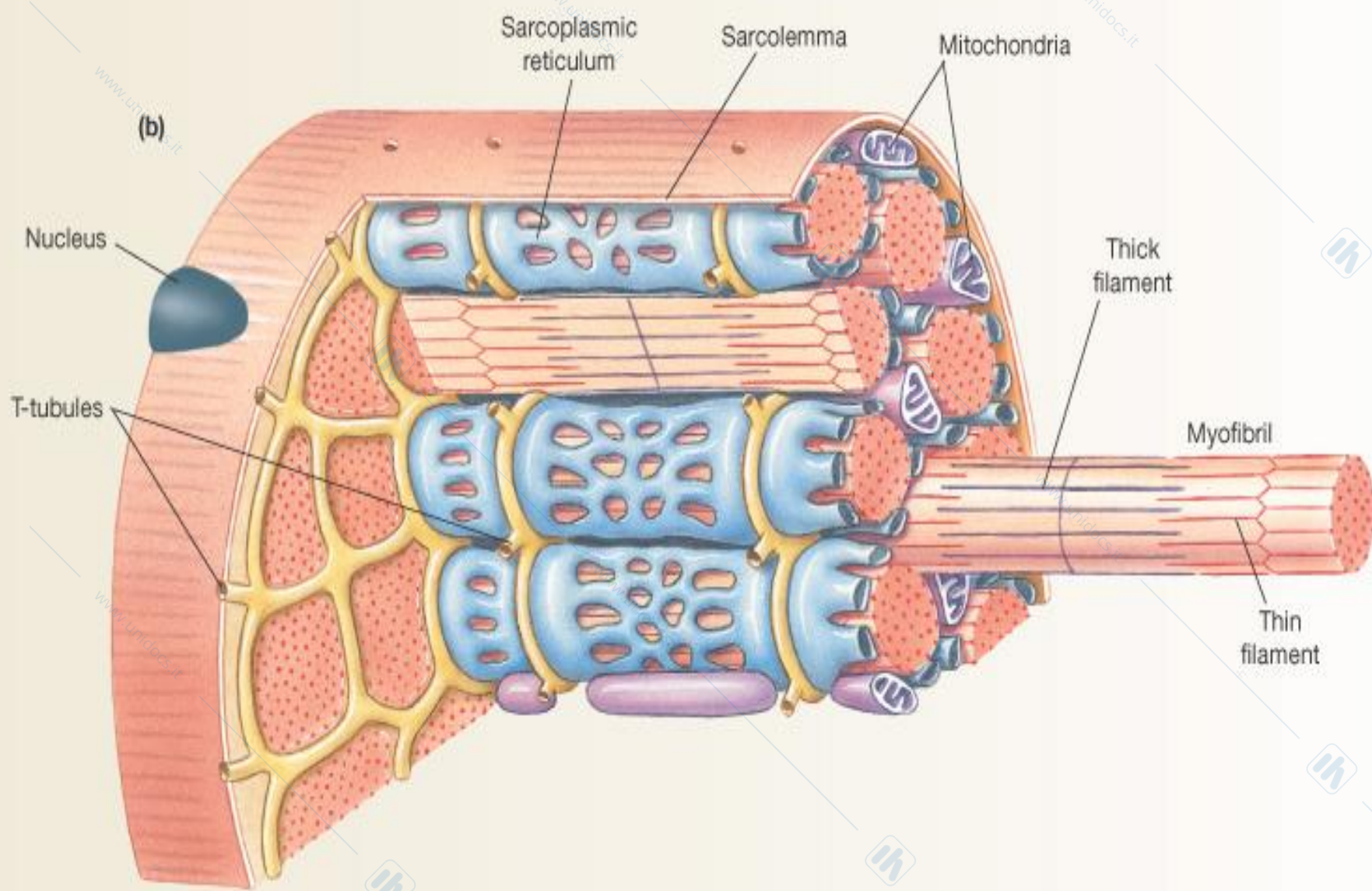
ORGANIZATION OF SKELETAL MUSCLE

(a)

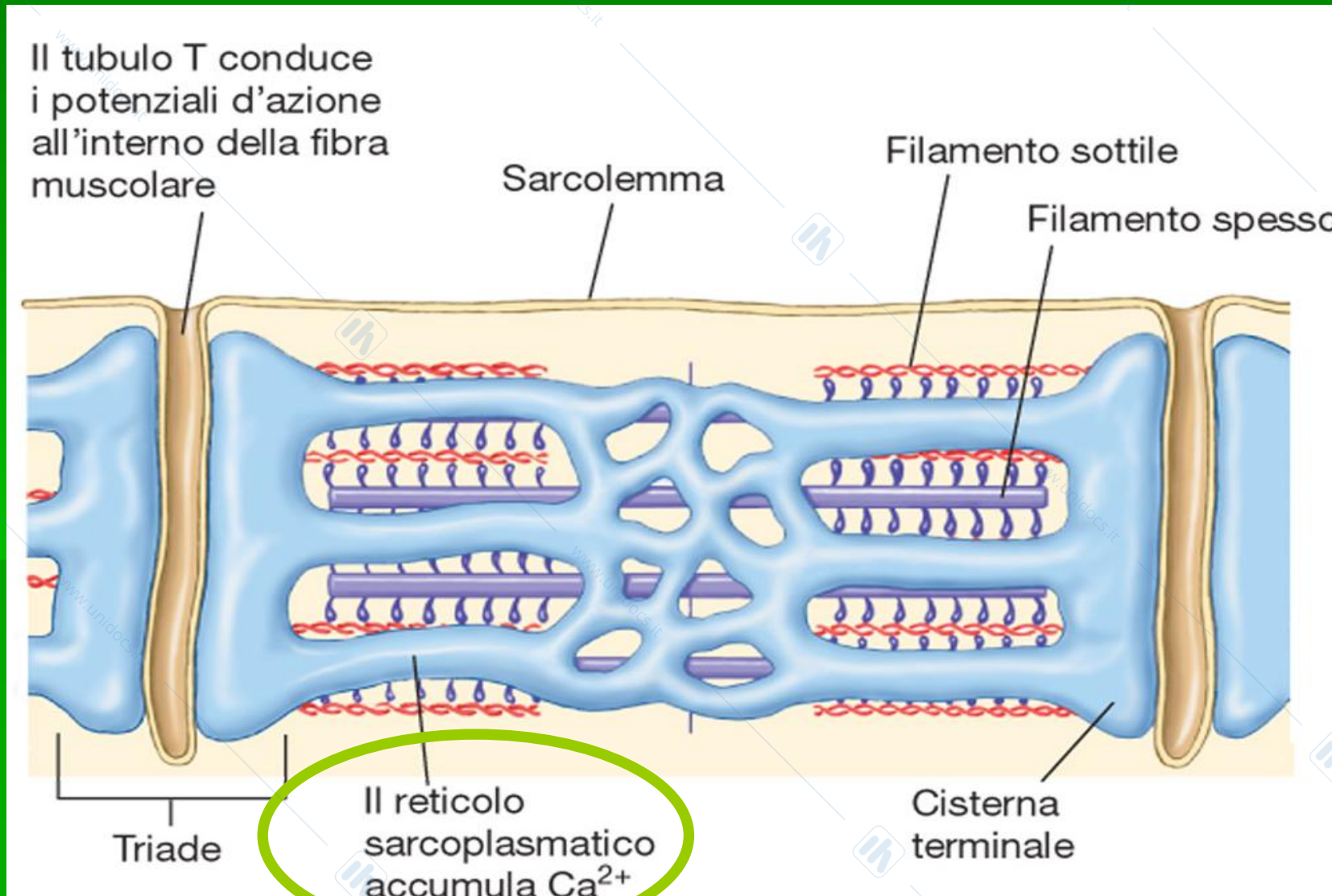




ULTRASTRUCTURE OF MUSCLE FIBER



- ❖ Reticolo sarcoplasmatico (5% del volume cellulare) è un deposito di Ca^{2+} il resto della fibra è quasi interamente occupato dall'apparato contrattile



Tubuli T e Reticolo Sarcoplasmatico

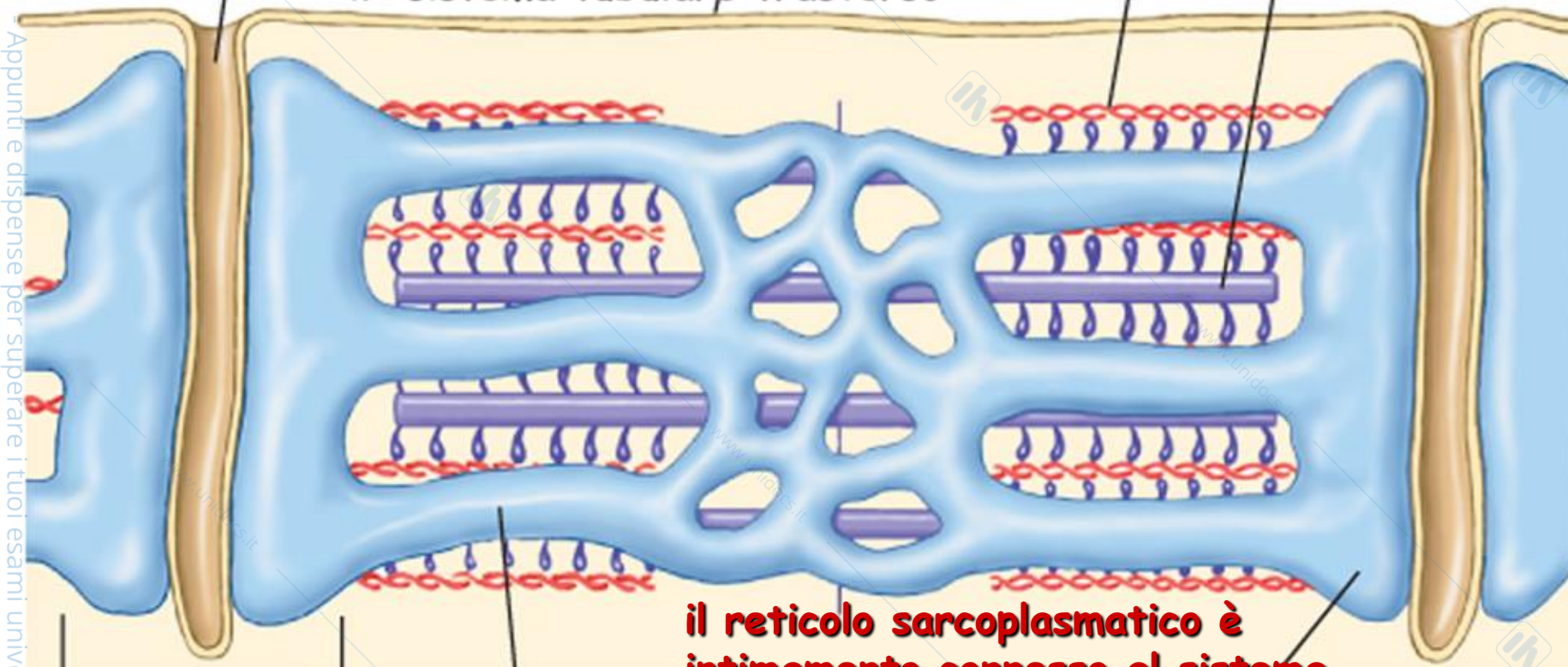
Il tubulo T conduce i potenziali d'azione all'interno della fibra muscolare

il sarcolemma si invagina a formare il "sistema tubulare trasverso"

Sarcolemma

Filamento sottile

Filamento spesso



il reticolo sarcoplasmatico è intimamente connesso al sistema tubulare T

Il reticolo sarcoplasmatico accumula Ca^{2+}

Cisterna terminale

Triade

Rete tubolare: TUBULI T

Formata da un tubulo trasverso (tubulo a T), una invaginazione della membrana muscolare (sarcolemma), e da un reticolo sarcoplasmatico con cisterne terminali contenenti Ca^{++} intra-cellulare. Un tubulo trasverso e ai suoi lati le due cisterne terminali del reticolo sarcoplasmatico costituiscono una "triade" funzionale.

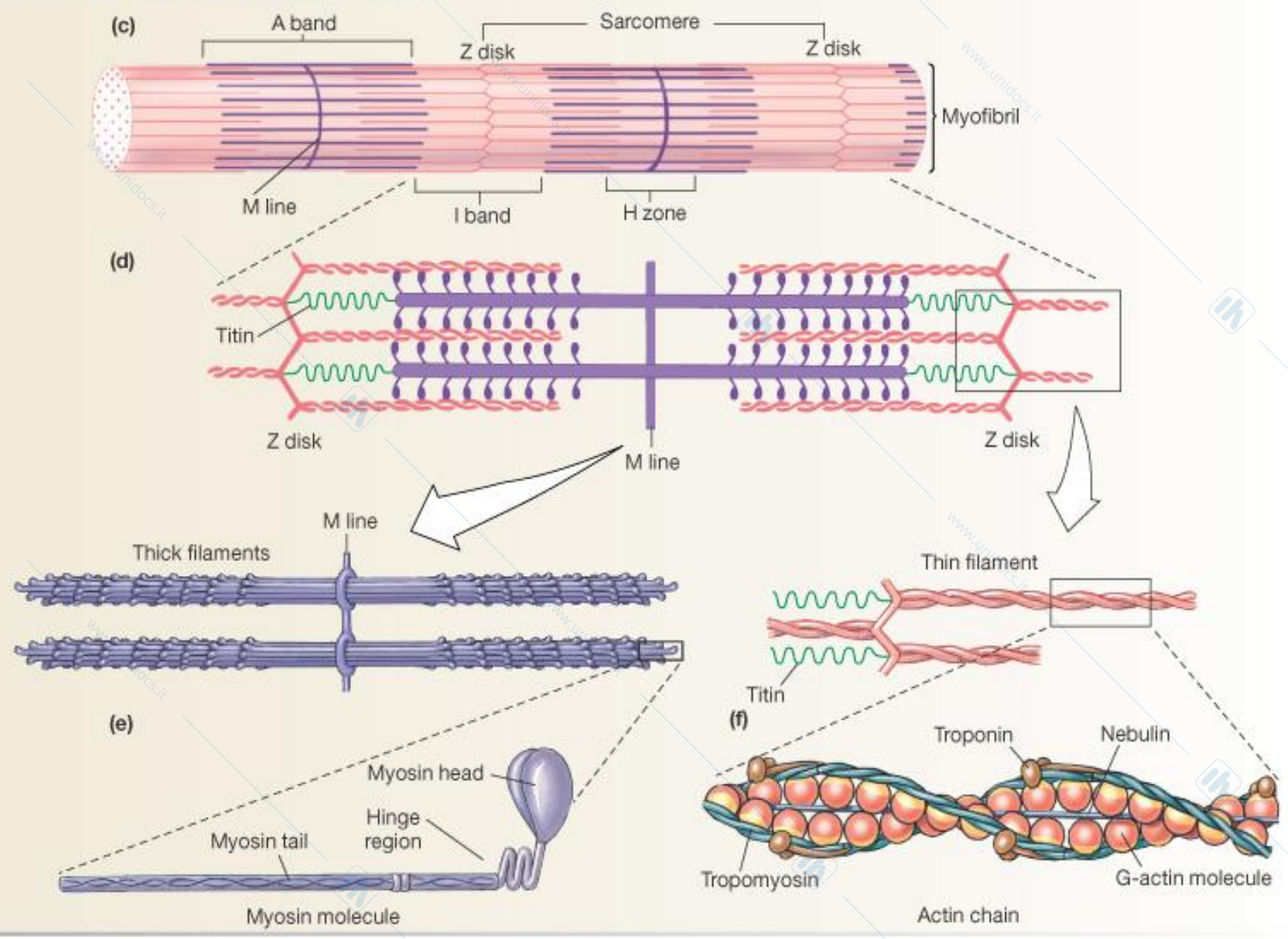
Il tubulo trasverso è caratterizzato da una proteina-recettore voltaggio-dipendente, la cui attivazione al giungere del potenziale d'azione fa aprire il canale per il Ca^{++} posto nelle cisterne terminali del reticolo sarcoplasmatico

Miofibrille

Le *miofibrille* sono disposte lungo l'asse maggiore della cellula, hanno un diametro pari a 1-2 μm , contengono l'apparato contrattile, costituiscono quasi interamente il citoplasma della cellula scheletrica.

Ogni miofibrilla contiene, affiancati l'uno accanto all'altro, circa 1.500 filamenti di **miosina** e 3.000 filamenti di **actina**

ULTRASTRUCTURE OF MUSCLE FIBER



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

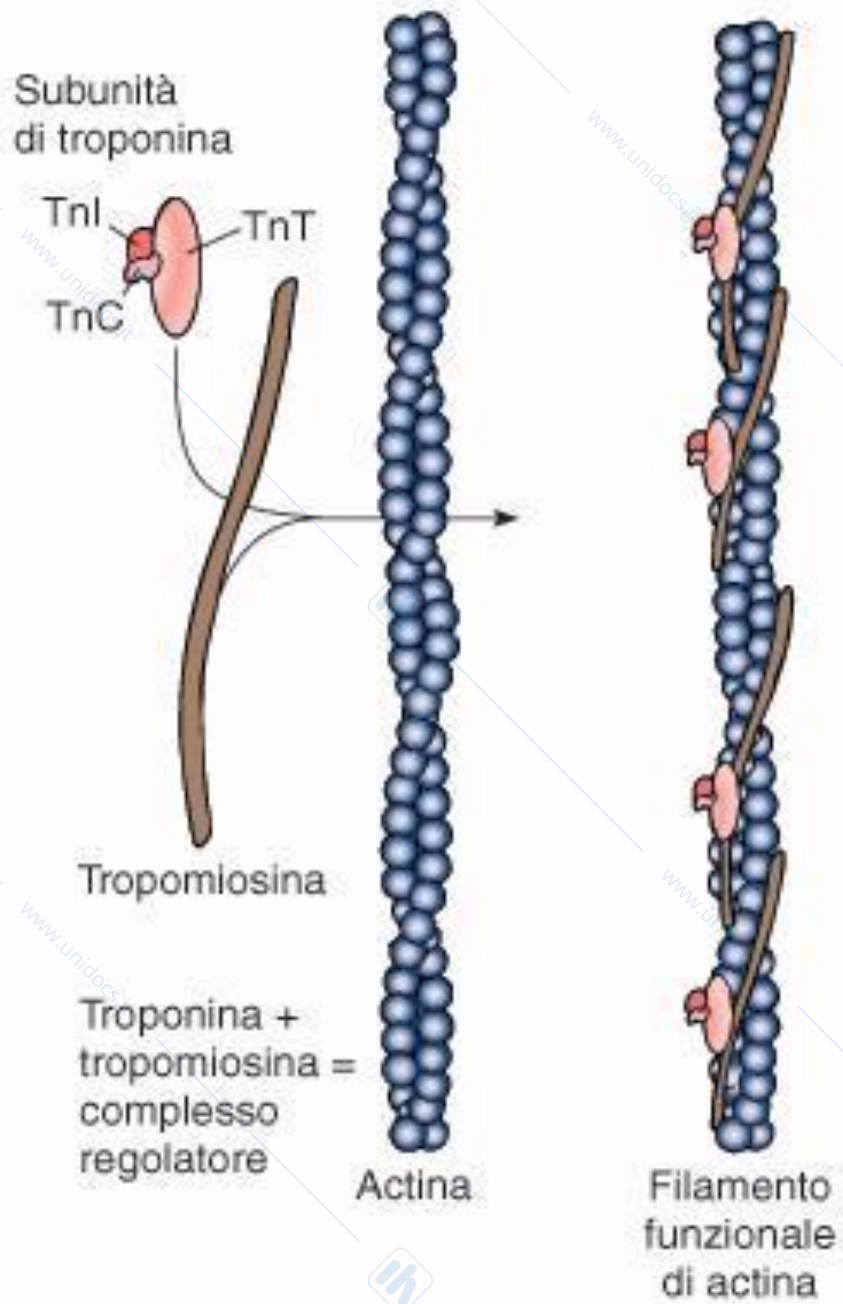
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.u

(a) Filamento sottile



Filamento sottile

Actina G



Actina F

- Il filamento sottile è costituito da proteine contrattili (actina) e proteine regolatrici (troponina e tropomiosina).

- **ACTINA:** (43 KD) le molecole di G-actina sono disposte lungo 2 catene avvolte ad elica e possiedono siti attivi per il legame della miosina

- **TROPOMIOSINA:** (70 KD) polimero proteico allungato che avvolge il filamento di actina, bloccando parzialmente i siti di legame per la miosina (ogni molecola di tropomiosina copre 7 monomeri di G actina)

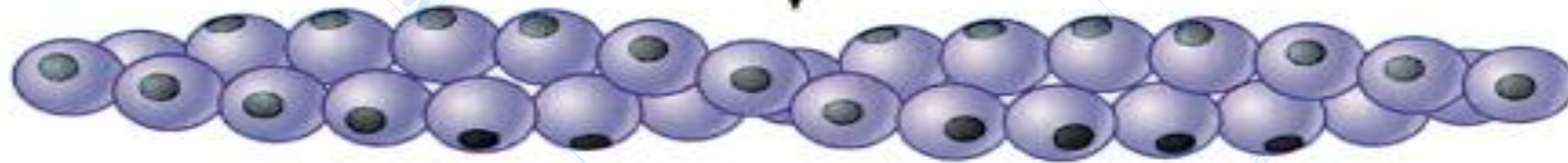
- **TROPONINA:** (80 KD) composta da 3 subunità: I (legame actina), T (legame tropomiosina), C (alta affinità per il calcio)

I filamenti sottili

Siti di fissazione per la miosina

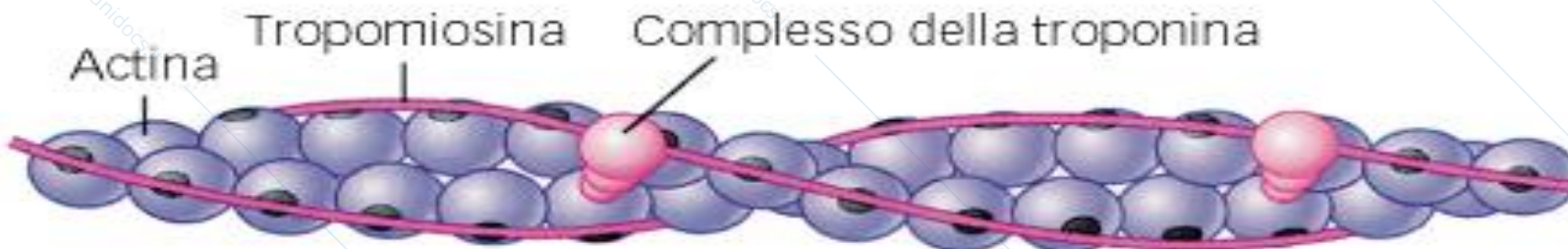
Actina G

Molecole di actina



Filamento a doppia elica di actina

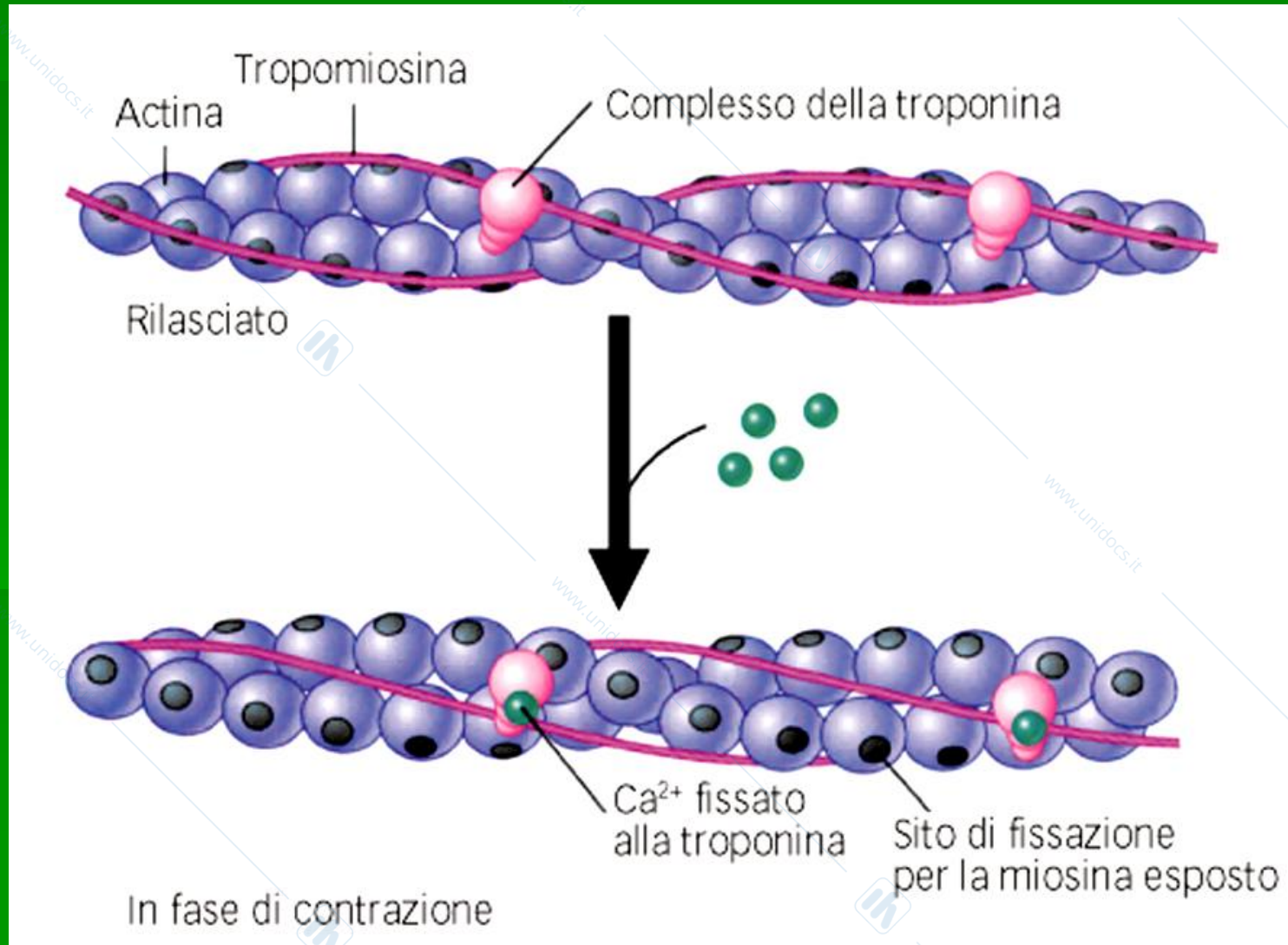
(a)



Porzione del filamento sottile

il Ca^{2+} legato alla troponina C permette il legame Actina-Miosina

4 ioni Ca^{2+} si legano alla troponina C che si sposta scoprendo il sito sull'actina di legame per la miosina



(b) Filamento spesso

Catene leggere

Regione cefalica
della miosina
che lega ATP
e actina

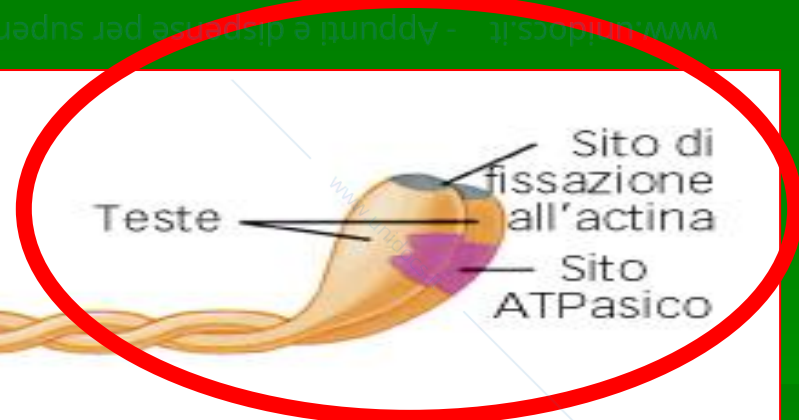
Vista assiale
di un filamento
di miosina

Le teste di
miosina
sporgono
come ponti
trasversali

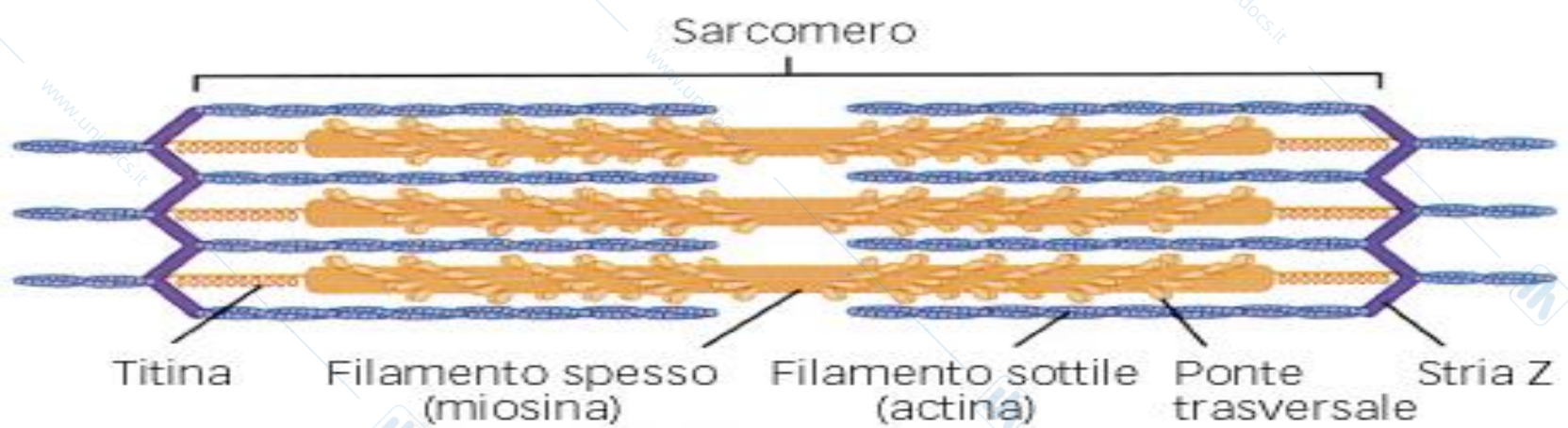
Zona nuda:
solo
porzioni
caudali

Filamenti
di miosina
riuniti
coda a coda

Filamento
di miosina
assemblato



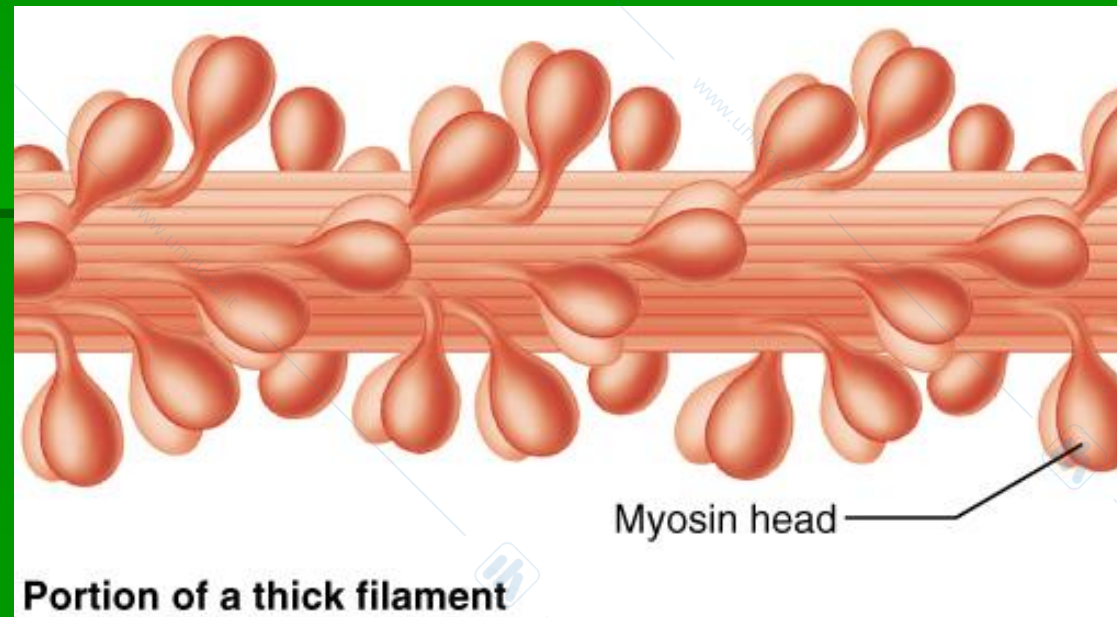
I filamenti spessi

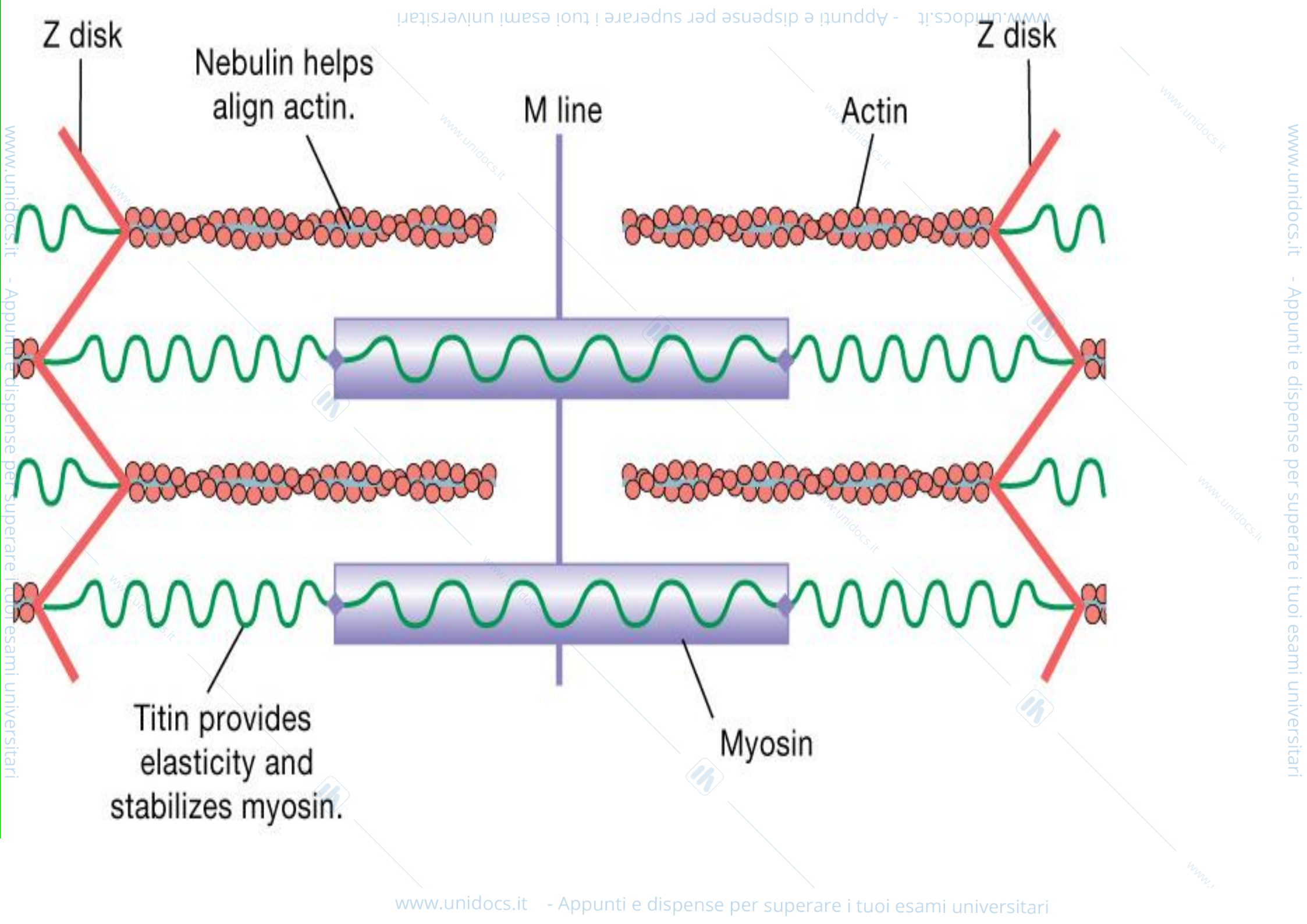


A single myosin protein resembles 2 golf clubs whose shafts have been twisted about one another



About 300 of these myosin molecules are joined together to form a single thick filament





Proteine accessorie della miofibrilla

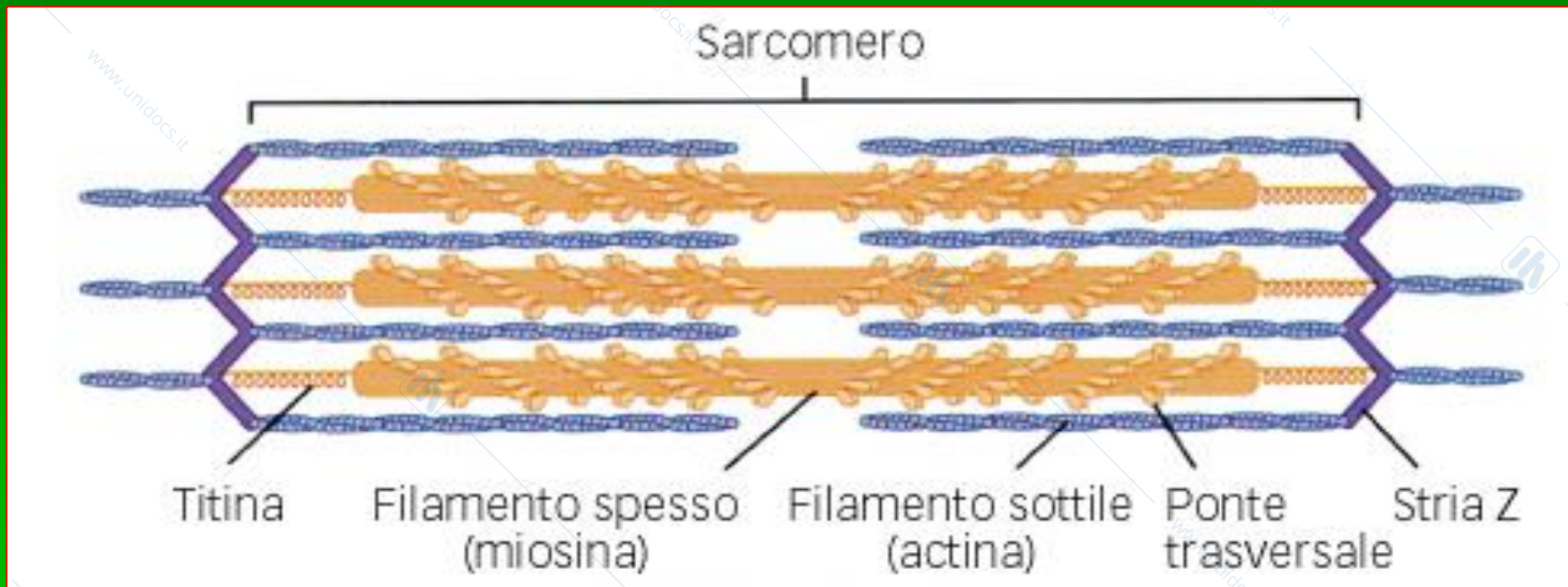
I filamenti di actina sono ancorati ad estremità del disco Z mediante α -actinina;

Le cellule del muscolo scheletrico contengono **titina e nebulina**.

Titina : P.M. 3×10^6 è il polipeptide più grande finora descritto; le molecole di titina a forma di molla si estendono dai filamenti spessi sino al disco Z (lunghezza $1 \mu\text{m}$, sono a forma di molla e sembra che la loro funzione sia di mantenere in posizione centrale al sarcomero i filamenti spessi di miosina.

Nebulina: strettamente associata all'actina consiste in un motivo ripetuto di 35 aminoacidi che lega actina; sembra che intervenga nell'assemblaggio dell'actina stessa e nella regolazione della sua lunghezza.

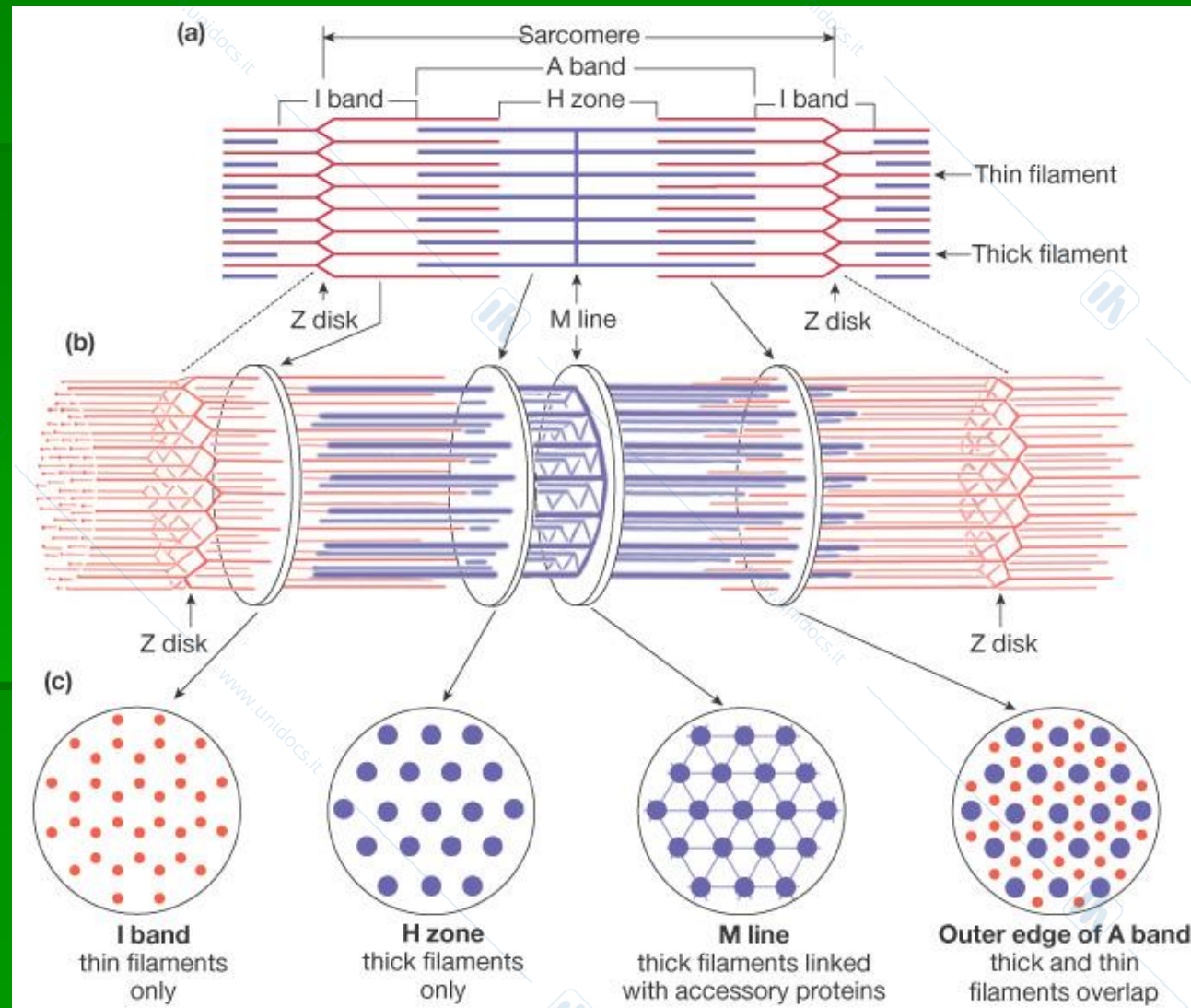
Il sarcomero e la disposizione dei filamenti spessi e sottili



L'unità che si ripete lungo la miofibrilla si chiama *sarcomero*; è delimitato dalle due *strie Z*. Nel centro del sarcomero sono localizzati i filamenti spessi. I filamenti sottili sono ancorati alle strie Z.

SARCOMERO: L'UNITA' CONTRATTILE

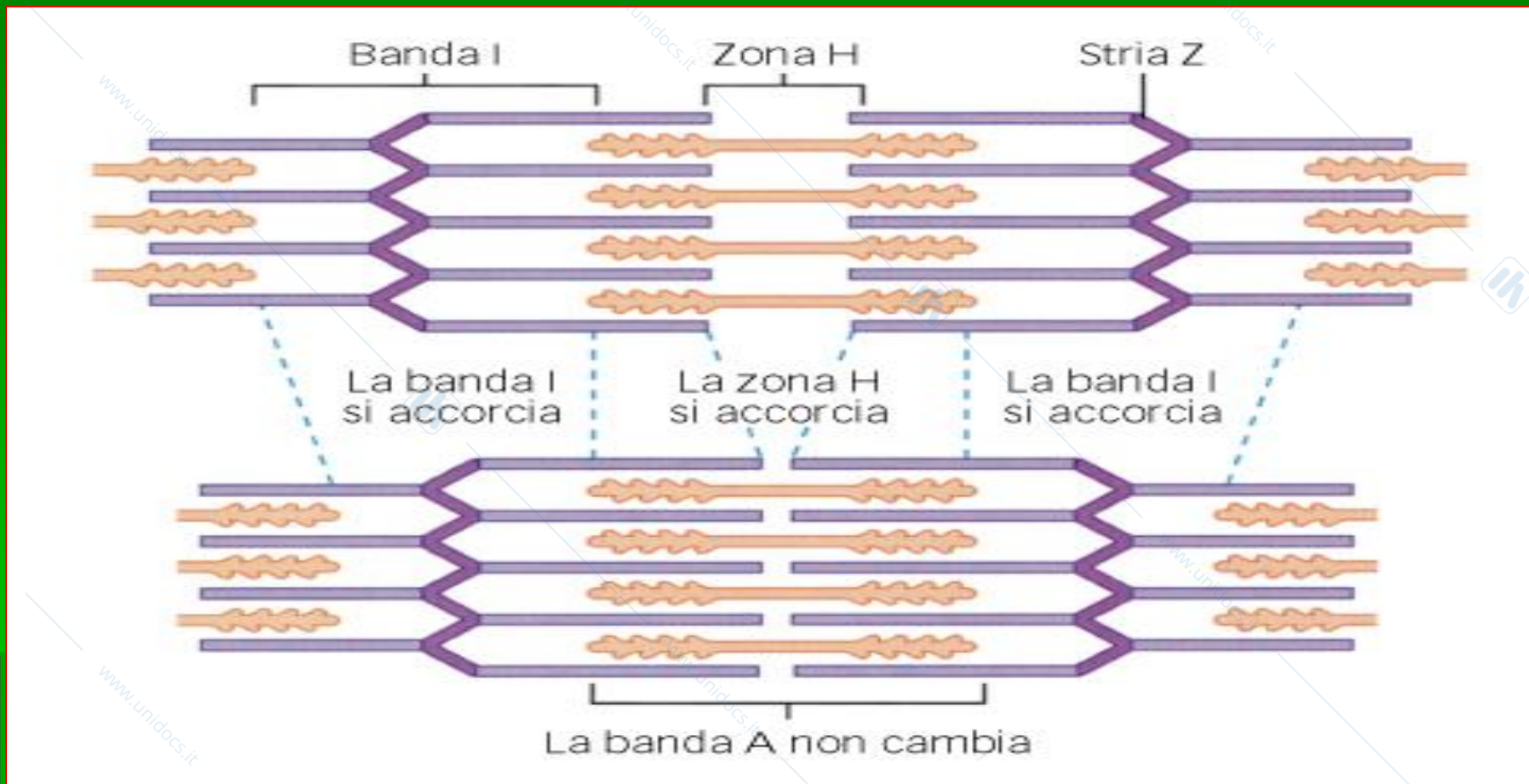
- dischi Z
- bande I
- banda A
- zona H
- linea M



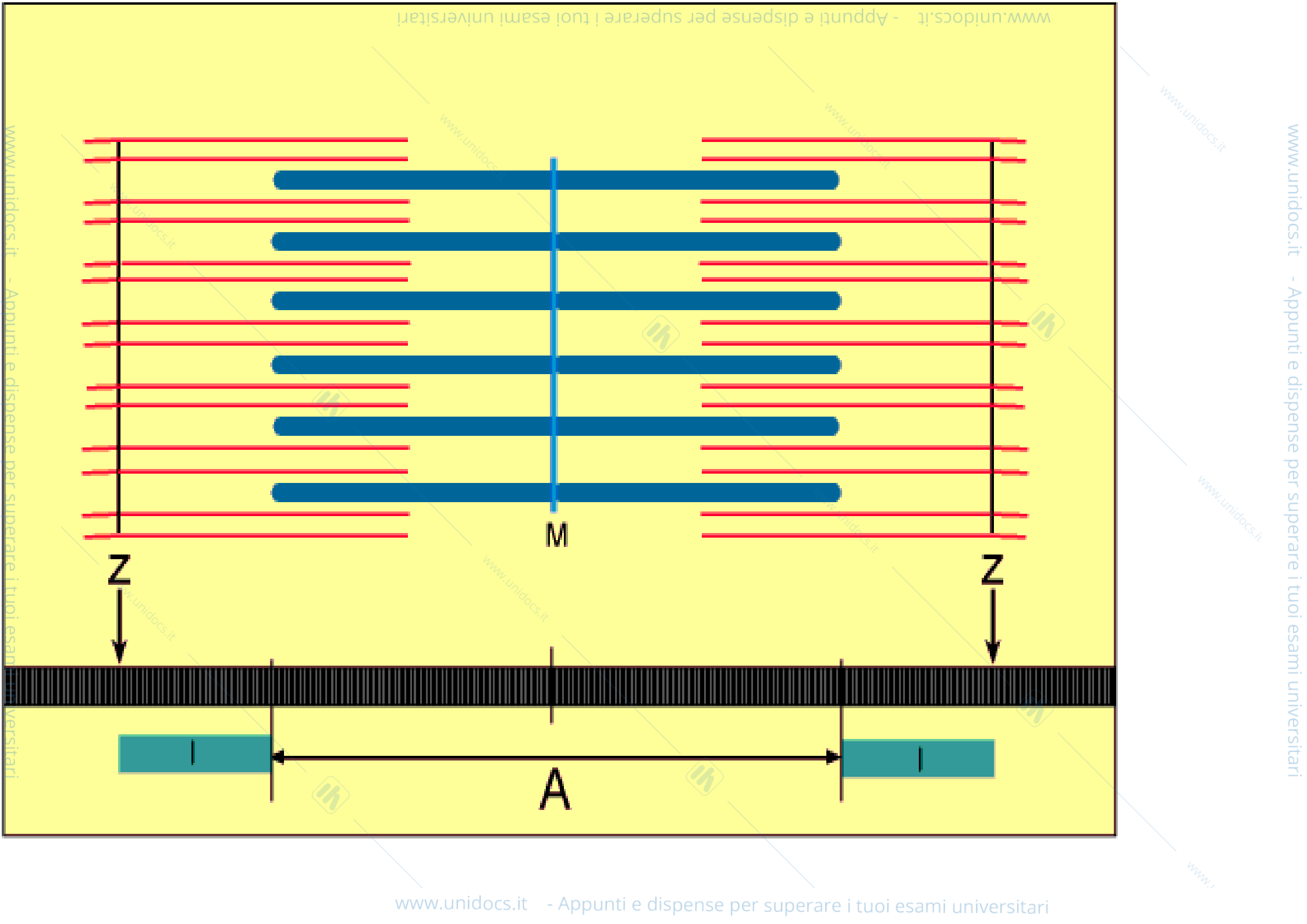
Per ricordare:

- **Muscolo**
- **Fascicolo**
- **Fibra muscolare**
- **Miofibrilla**
- **Miofilamenti**
- **Filamenti sottili: soprattutto actina**
- **Filamenti spessi: soprattutto miosina**

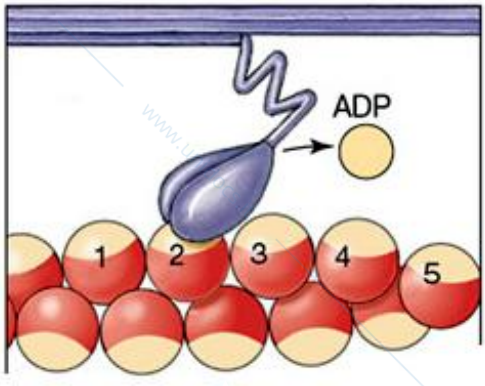
SLITTAMENTO DEI FILAMENTI DURANTE LA CONTRAZIONE



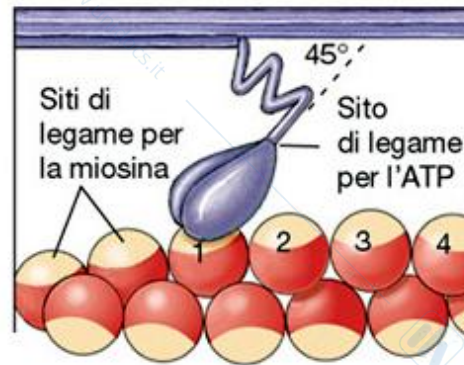
Durante la contrazione il sarcomero si accorcia: i filamenti sottili e spessi non modificano la loro lunghezza ma scorrono gli uni sugli altri.



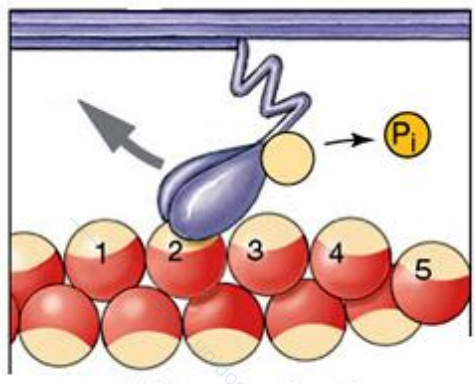
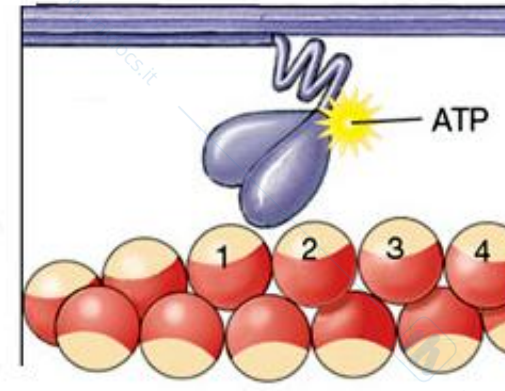
6 Al termine del colpo di forza la testa della miosina rilascia ADP e riassume lo stato di rigor o di legame stretto.



1 Legame stretto nello stato di rigor. Il ponte trasversale è disposto con un angolo di 45° rispetto ai filamenti.

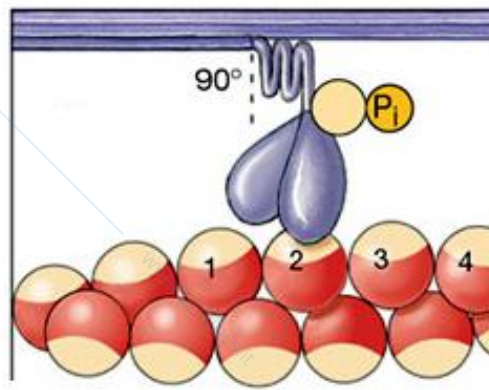


2 L'ATP si lega al proprio sito di legame sulla miosina, che si dissocia allora dall'actina.

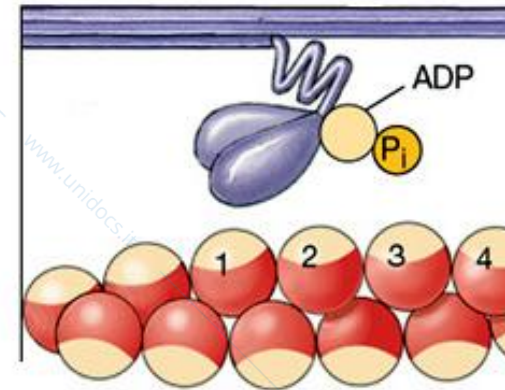


Il filamento di actina si muove

5 Il rilascio di P_i induce il colpo di forza. La testa della miosina ruota sul proprio cardine, spingendo il filamento di actina oltre di sé.

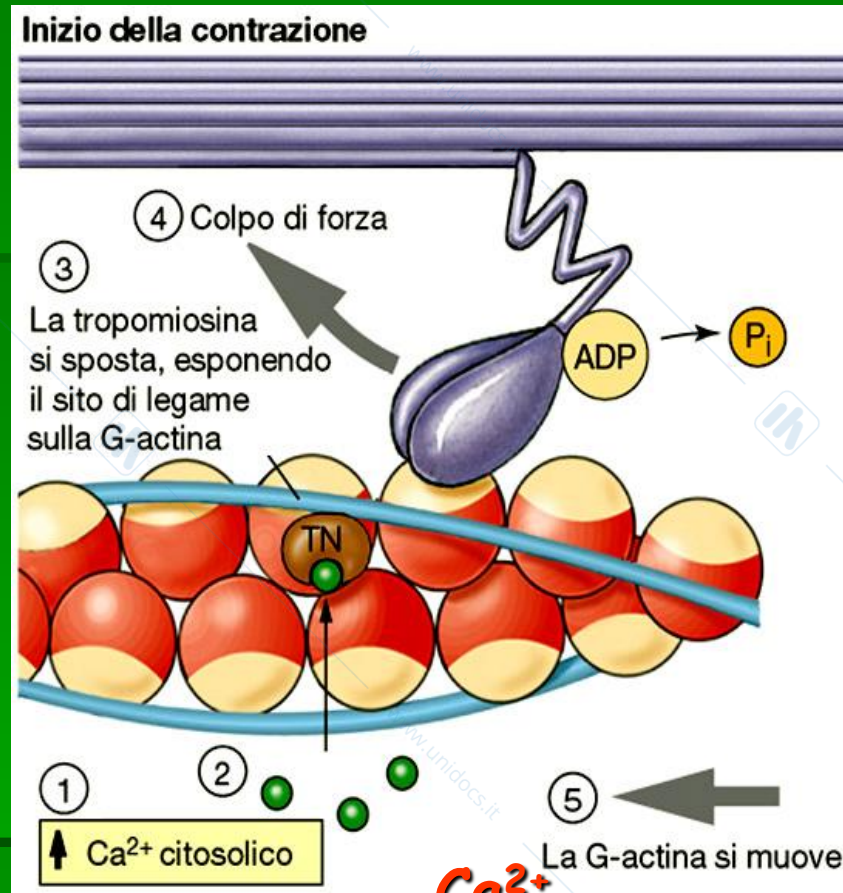
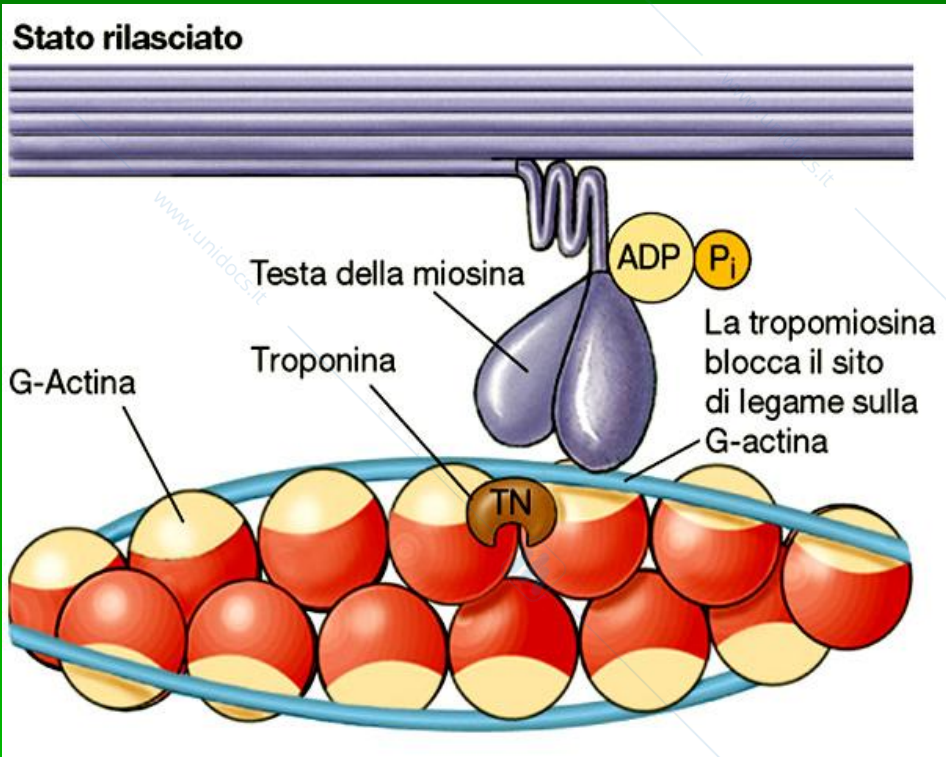


4 La testa della miosina si flette e si lega debolmente a una nuova molecola di actina. Il ponte trasversale è ora disposto con un angolo di 90° rispetto ai filamenti.



3 L'attività ATPasica della miosina idrolizza l'ATP. ADP e P_i rimangono legati alla miosina.

Ruolo regolatorio di tropomiosina e troponina



Ca²⁺

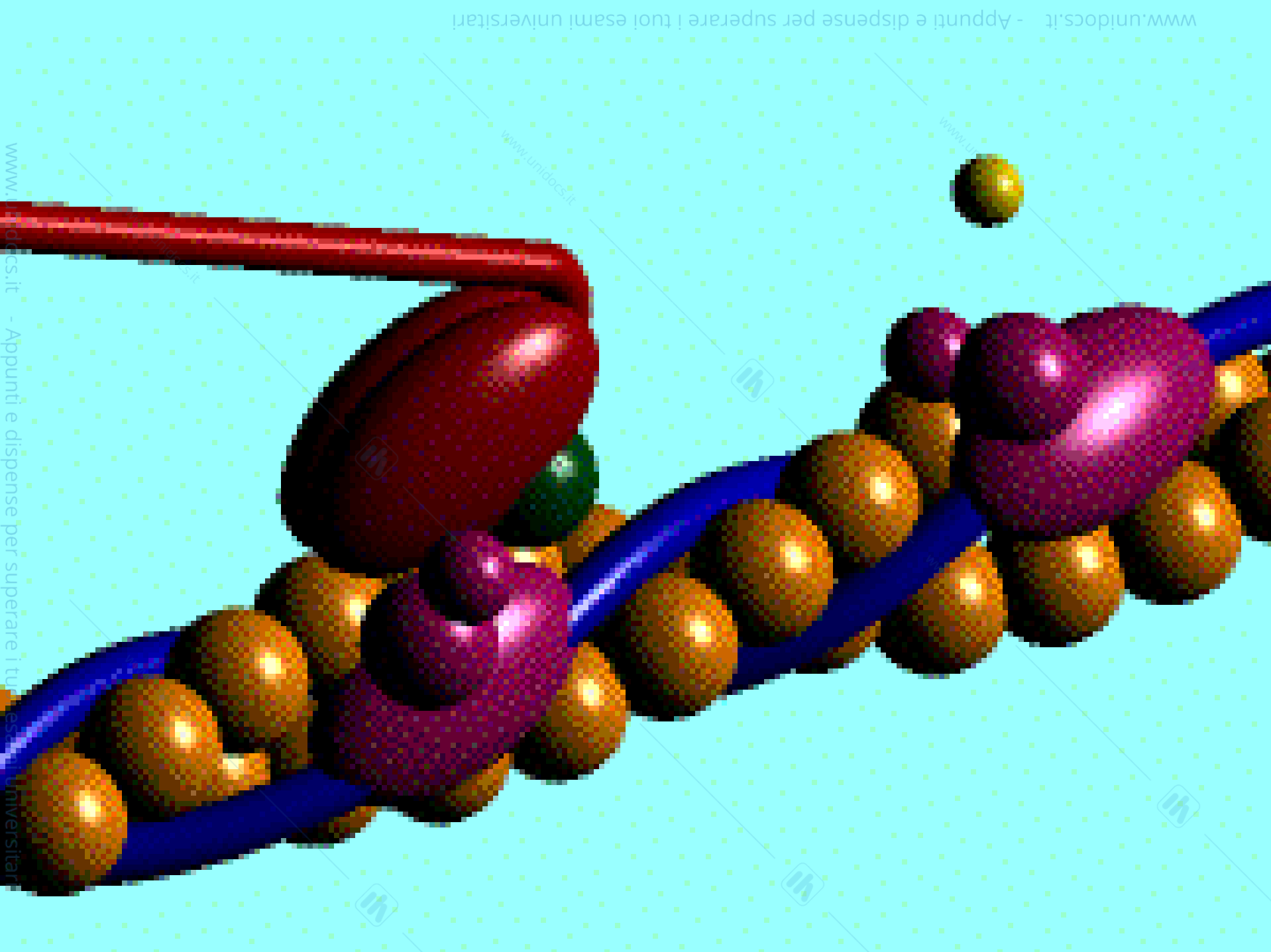
SERCA

il rilascio si ha quando il calcio viene ripompato nel reticolo dalla SERCA

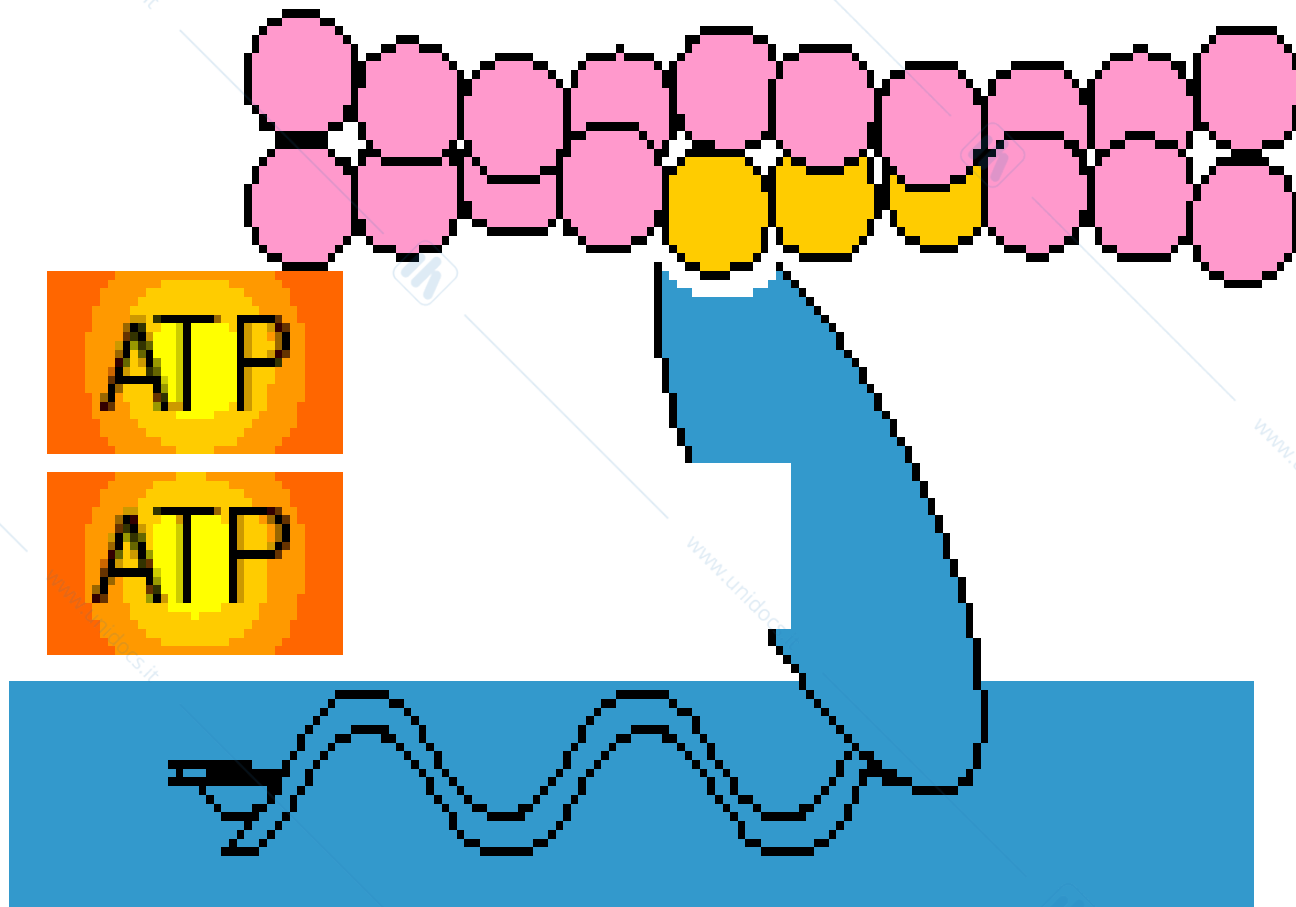
Reticolo Sarcoplasmatico

Ca²⁺

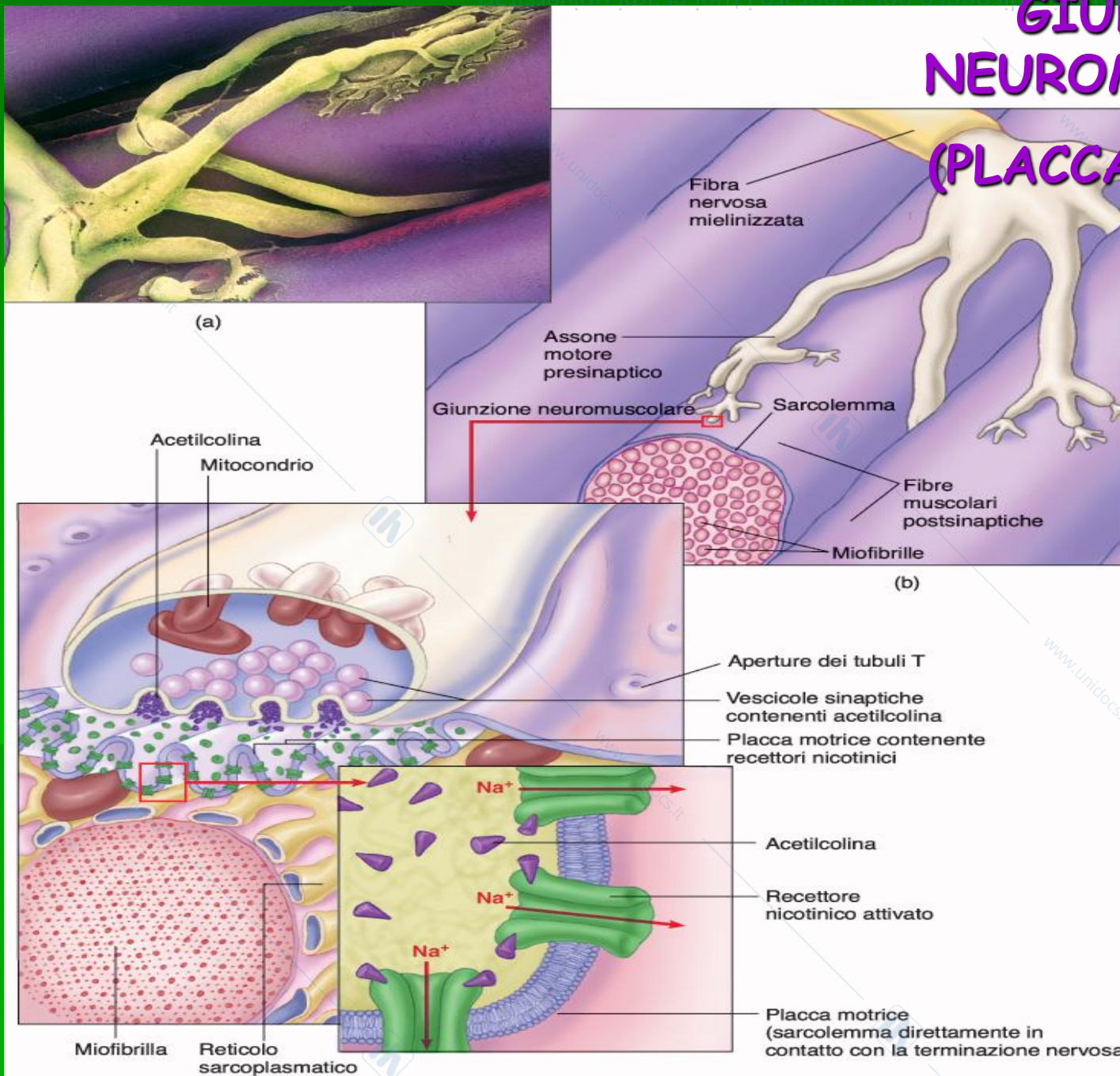
SERCA



The cycle of attachment, power stroke, and release continues as long as calcium and ATP remain available.



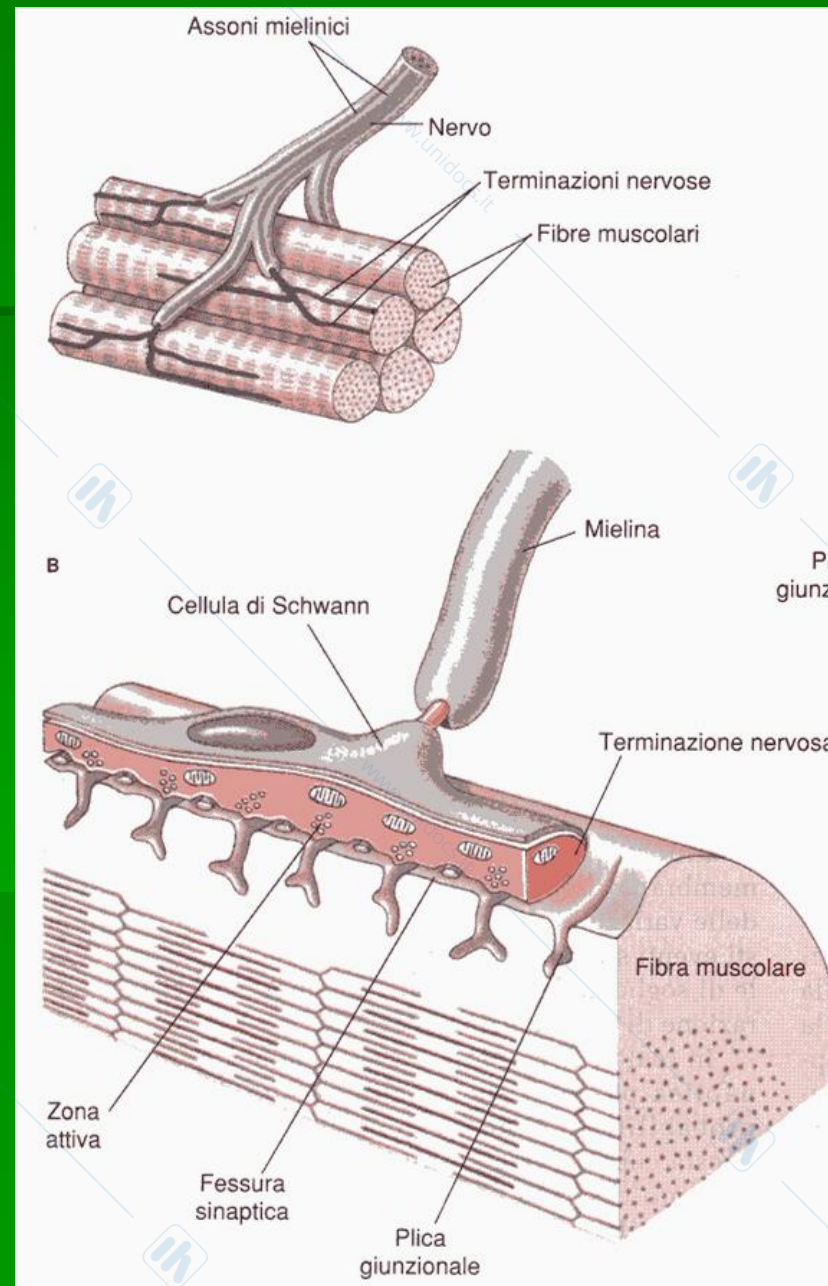
GIUNZIONE NEUROMUSCOLARE (PLACCA MOTRICE)



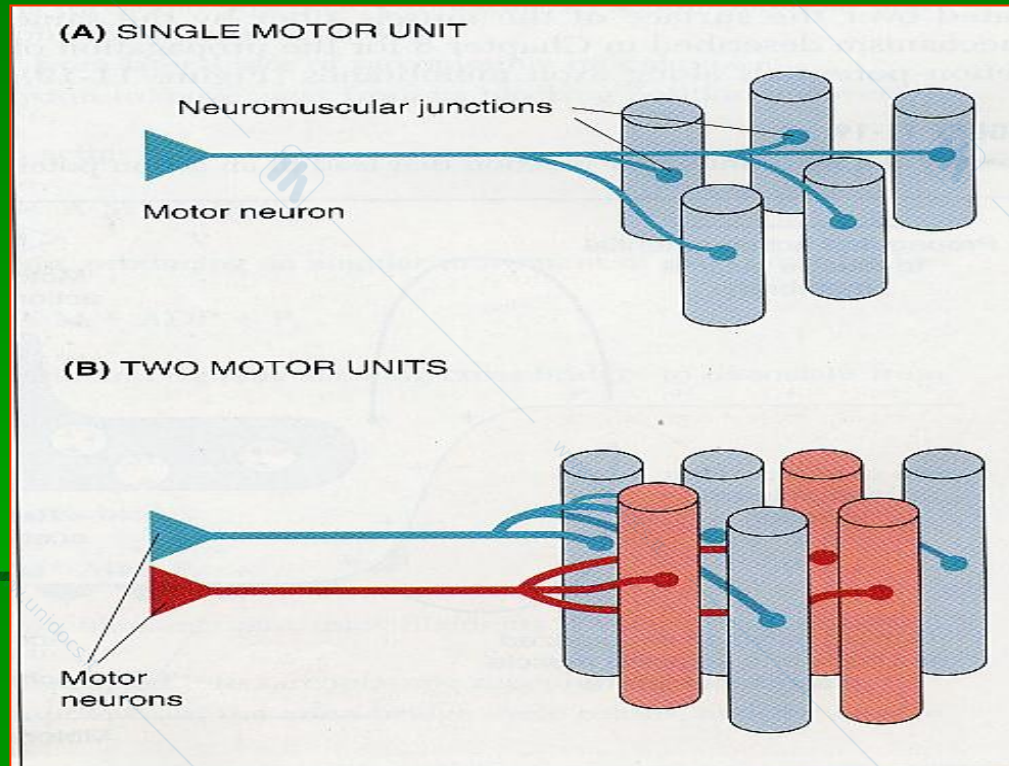
E' l'esempio più tipico e più facile da studiare di trasmissione sinaptica.

Si tratta del punto di congiunzione fra il terminale assonico di un neurone motore e la corrispondente fibra muscolare

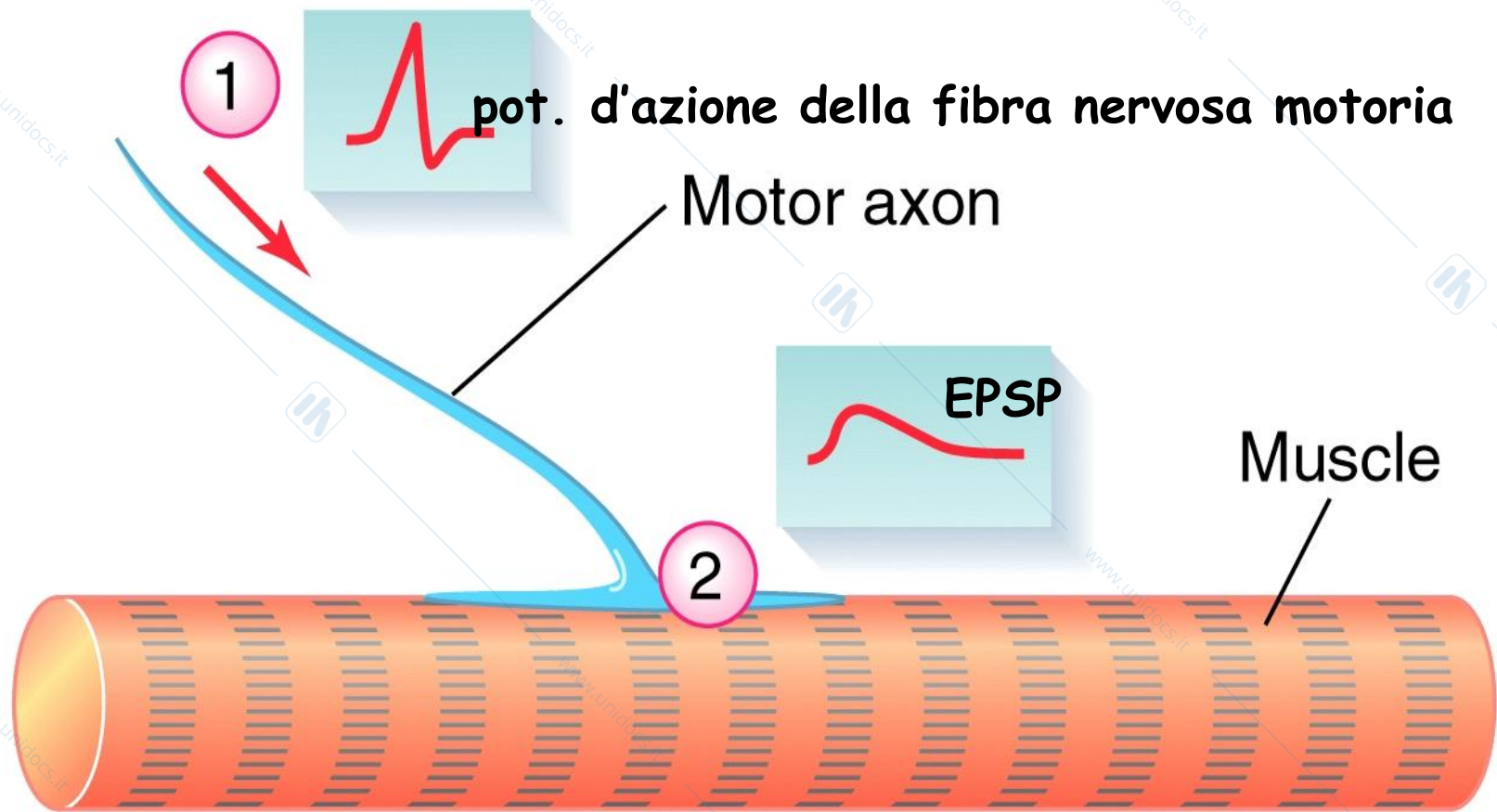
Il neurone motore è una fibra mielinica che si divide, in prossimità del muscolo, in numerose diramazioni, ciascuna delle quali forma una sinapsi con una sola fibra muscolare



L'insieme di un neurone motore e di tutte le fibre muscolari da esso innervate costituisce l'unità motoria, che è l'elemento unitario per la regolazione della contrazione muscolare

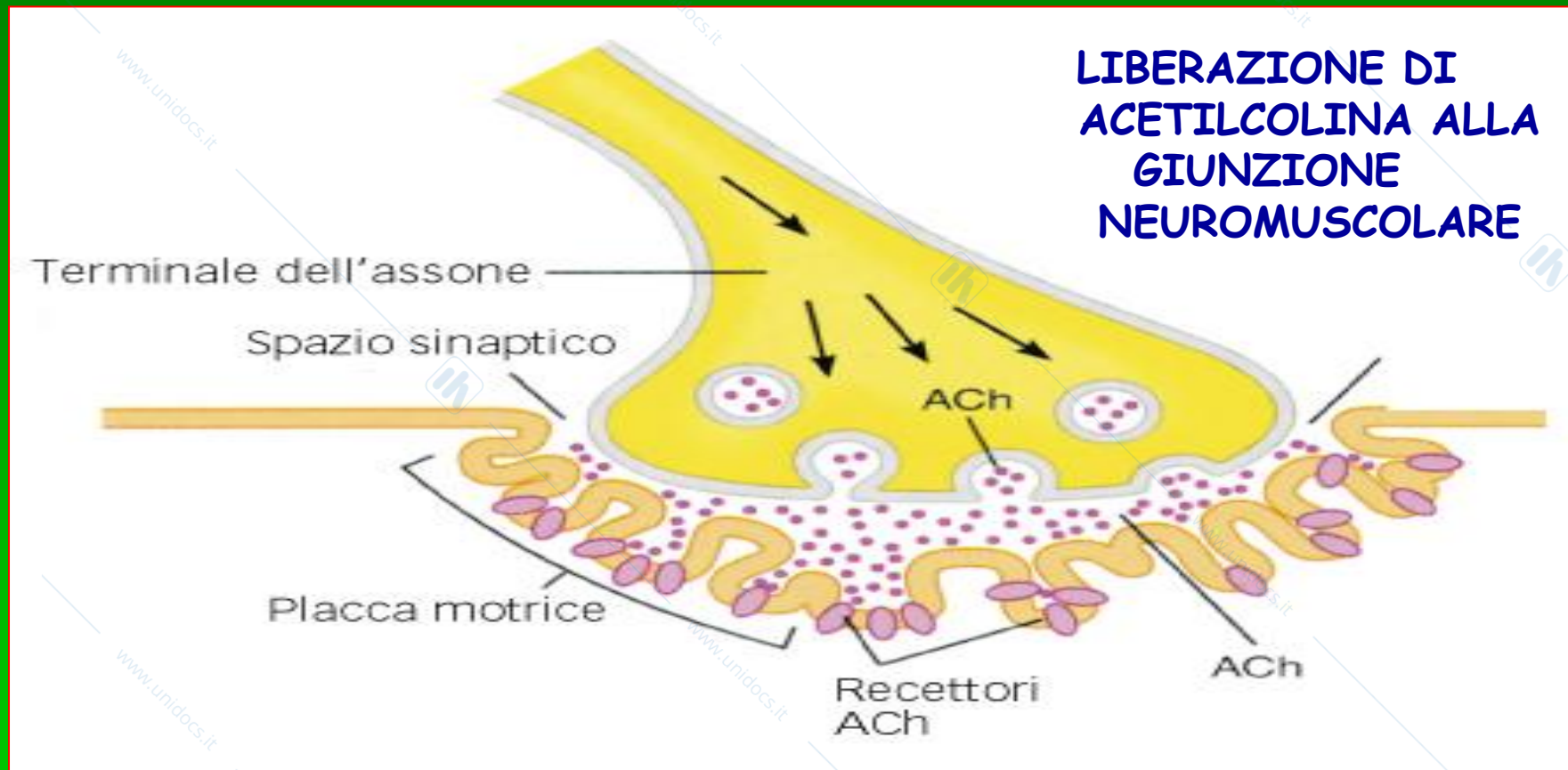


ECCITAZIONE DELLA FIBRA MUSCOLARE



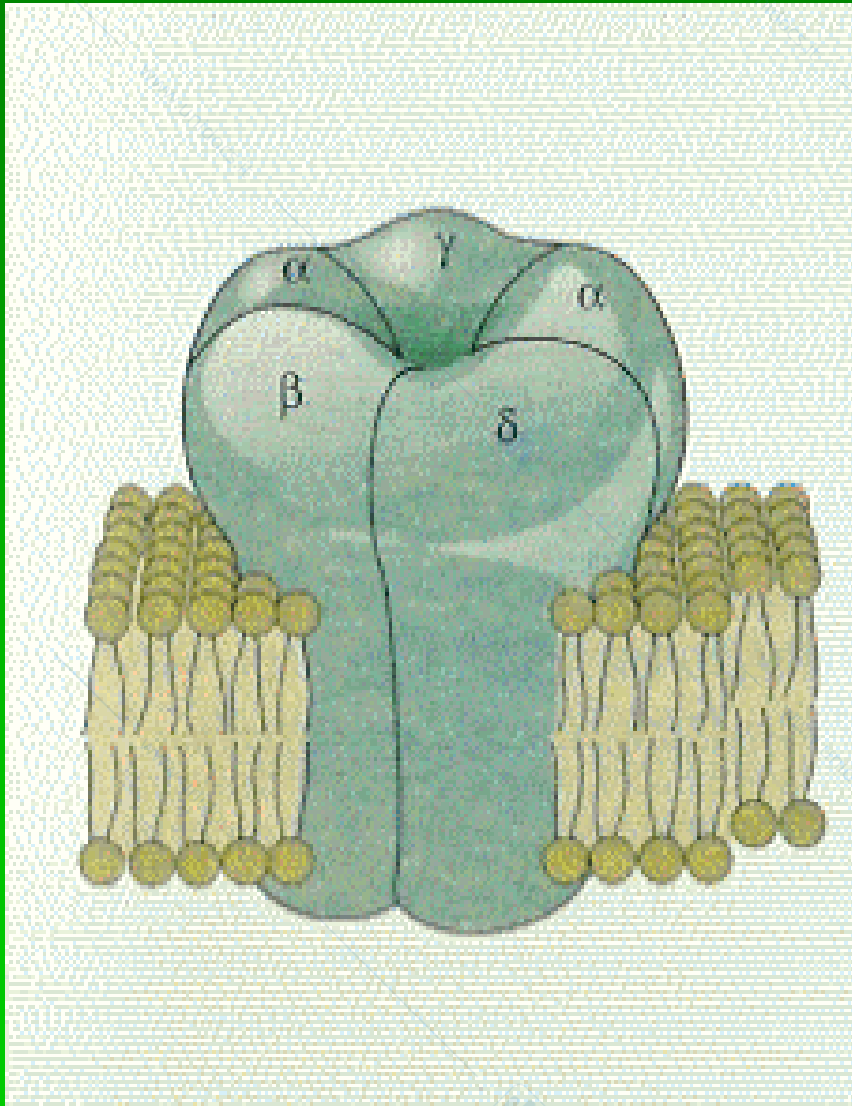
pot. d'azione propagato nella fibra muscolare

ACCOPPIAMENTO ECCITAZIONE- CONTRAZIONE



L'acetilcolina (ACh) è liberata dalle terminazioni dell'assone di un motoneurone e si fissa ai recettori della placca motrice. Questa fissazione provoca un potenziale di placca che avvia un potenziale d'azione nella cellula muscolare

ATTIVAZIONE DEL RECETTORE NICOTINICO A LIVELLO POSTSINAPTICO

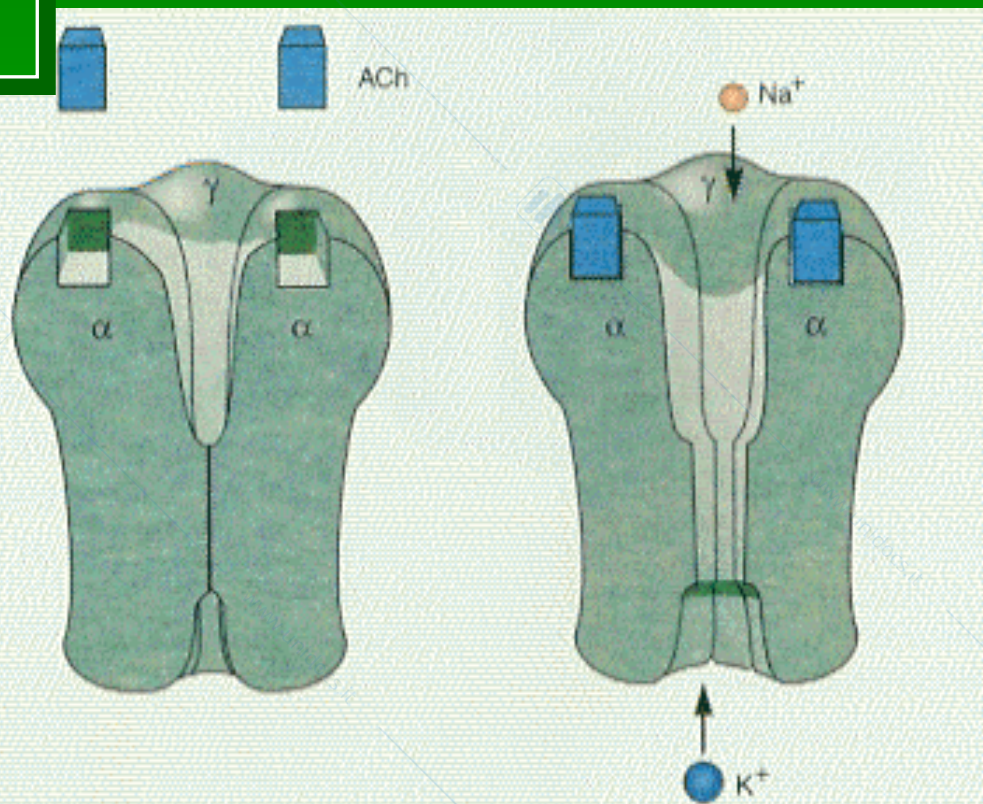


Le molecole di Ach dopo aver attraversato la fessura sinaptica vanno ad agire su un canale ionico

Il canale per l' Ach è composto di 5 sub-unità (2 sub-unità, le α sono tra loro uguali)

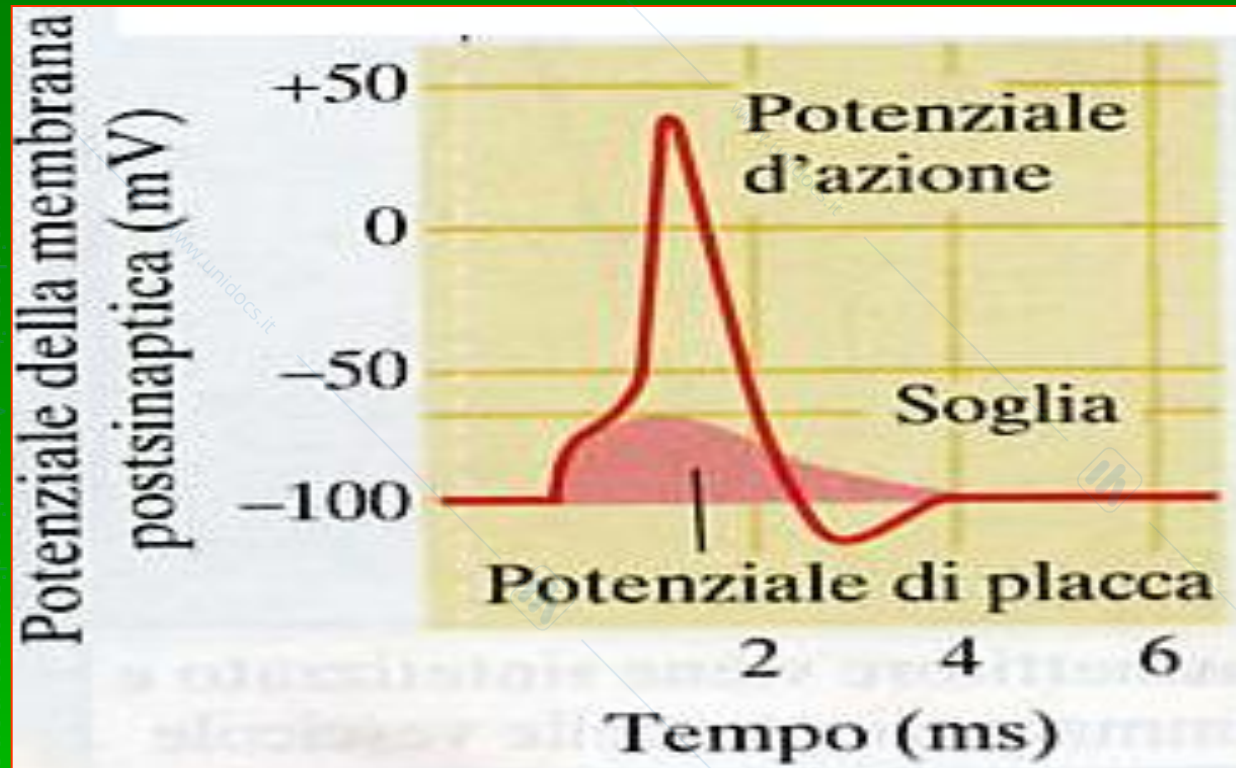
Due molecole di Ach si legano alle sub-unità α di ciascun canale e lo fanno aprire.

Si tratta di un canale cationico (cioè permeabile ai cationi, gli ioni con carica positiva)



Si tratta in realtà di una eccezione in quanto nella stragrande maggioranza dei canali ionici c'è un solo sito per il NT

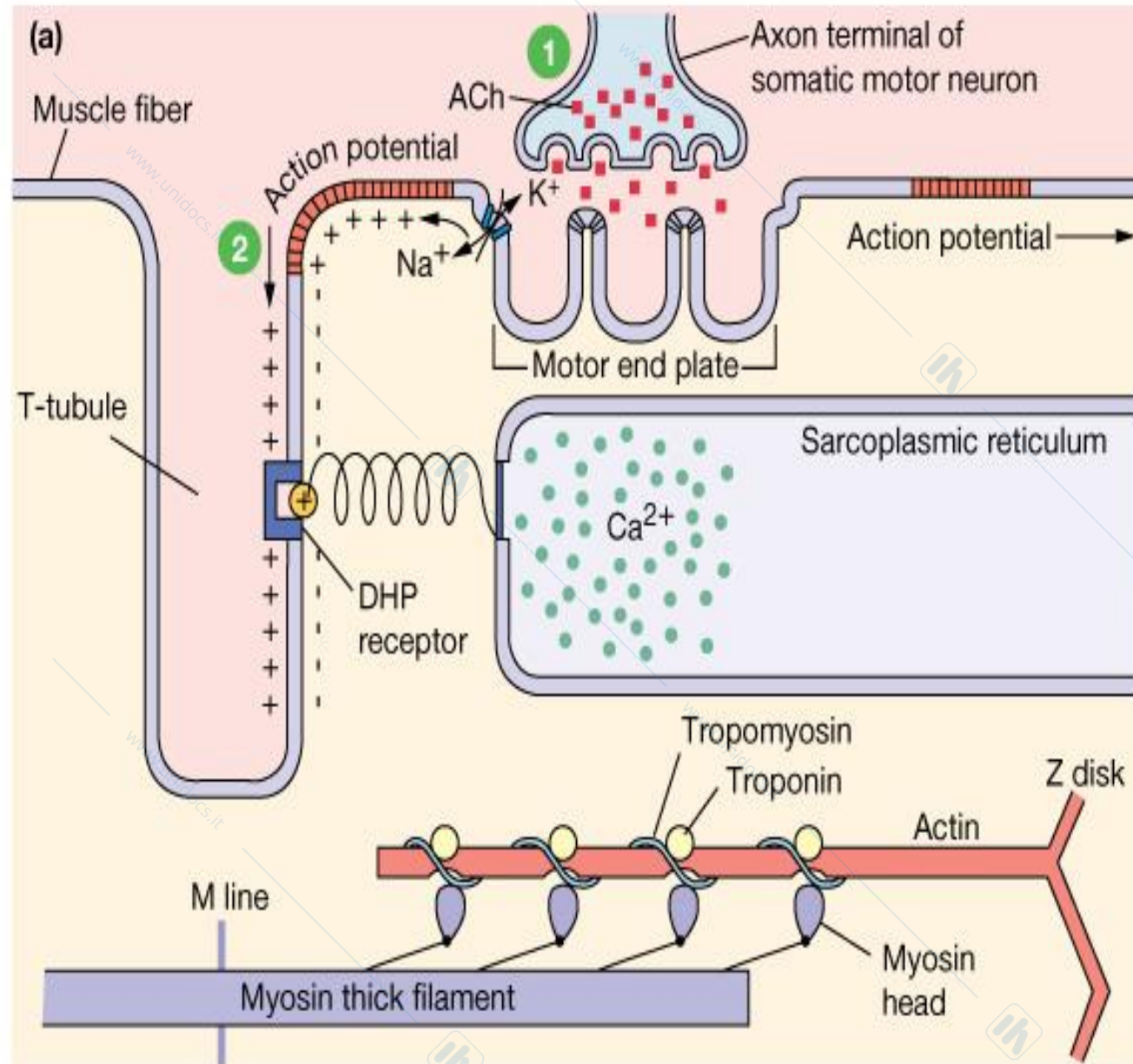
Benchè il canale sia permeabile sia al K^+ che al Na^+ , è soprattutto il Na^+ a passare, entrando nella cellula



GENERAZIONE DEL POTENZIALE DI PLACCA ED INSORGENZA DEL POTENZIALE D'AZIONE

Ciascuna vescicola contiene 10000÷40000 molecole di ACh; (diametro 50÷100 nm). Ad ogni potenziale d'azione il motoneurone rilascia 200-300 vescicole. L'attivazione dei recettori nicotinici determina la generazione di un potenziale di placca che depolarizza la cellula postinaptica fino a circa -20 mV: in questo modo la cellula scheletrica raggiunge la soglia di generazione del potenziale d'azione.

PROPAGAZIONE DEL POTENZIALE D'AZIONE LUNGO I TUBULI T

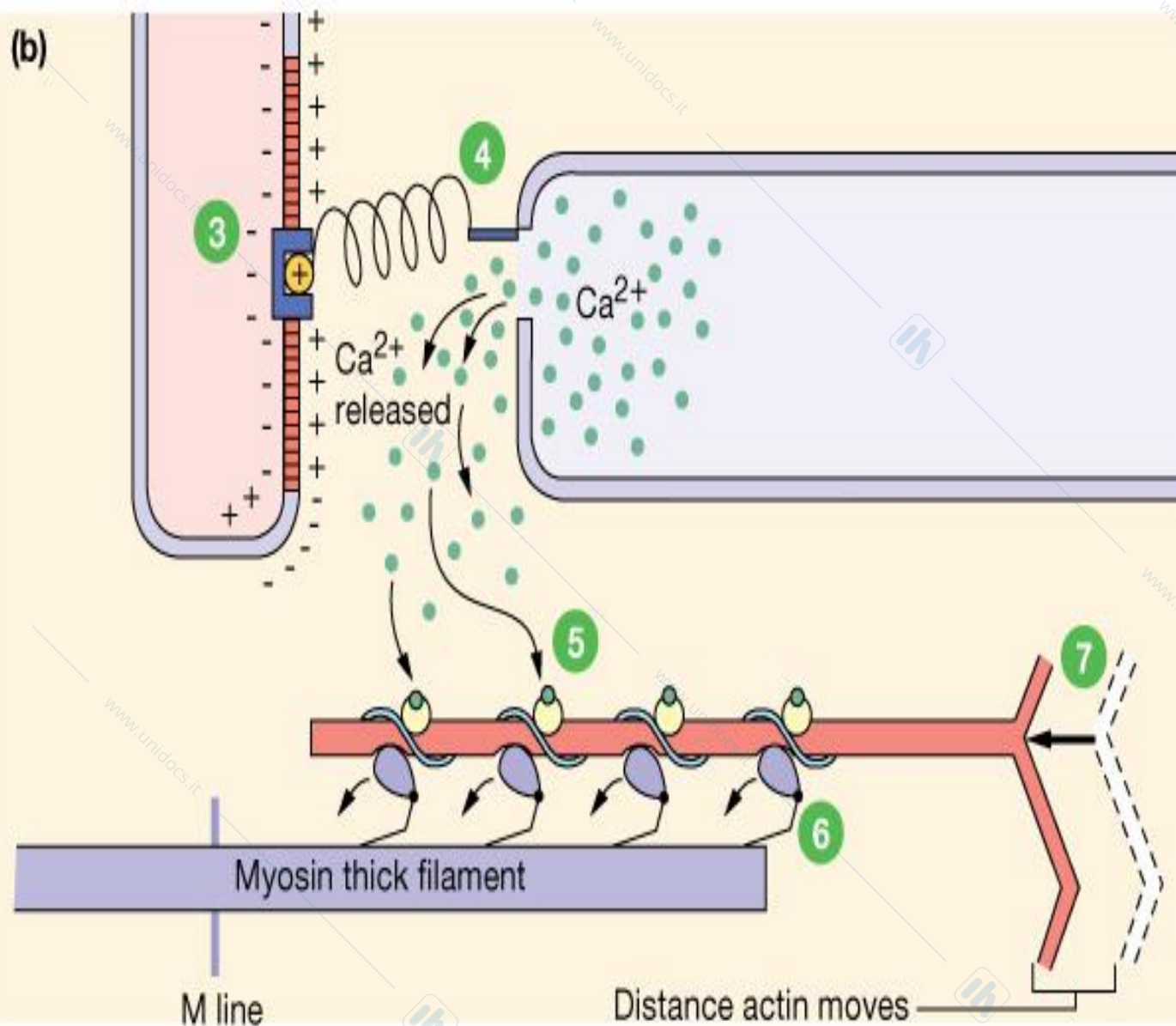


1 Somatic motor neuron releases ACh at neuromuscular junction.

2 Net entry of Na^+ through ACh receptor-channel initiates a muscle action potential.

Il potenziale d'azione si propaga lungo la membrana cellulare e lungo i Tubuli T (invaginazioni della membrana nell'interno della fibra).

INTERAZIONE TRA I TUBULI T ED IL RETICOLO SARCOPLASMATICO : RILASCIO DI CALCIO



3 Action potential in t-tubule alters conformation of DHP receptor.

4 DHP receptor opens Ca²⁺ release channels in sarcoplasmic reticulum and Ca²⁺ enters cytoplasm.

5 Ca²⁺ binds to troponin, allowing strong actin-myosin binding.

6 Myosin heads execute power stroke.

7 Actin filament slides toward center of sarcomere.

CONTRACTION

RELAXATION

RIEPILOGO
ACCOPIAMENTO
ECCITAZIONE-
CONTRAZIONE

① Muscle action potential propagated

Muscle plasma membrane

Transverse tubule

Lateral sac

Sarcoplasmic reticulum

Ca²⁺

Ca²⁺

② Ca²⁺ released from lateral sac

ATP → ADP + P_i

⑤ Ca²⁺ taken up

③ Ca²⁺ binding to troponin removes blocking action of tropomyosin

⑥ Ca²⁺ removal from troponin restores tropomyosin blocking action

Troponin

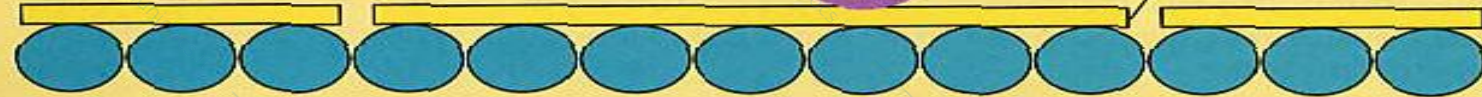
Tropomyosin

Actin

ATP

④ Cross bridge moves

Thick filament



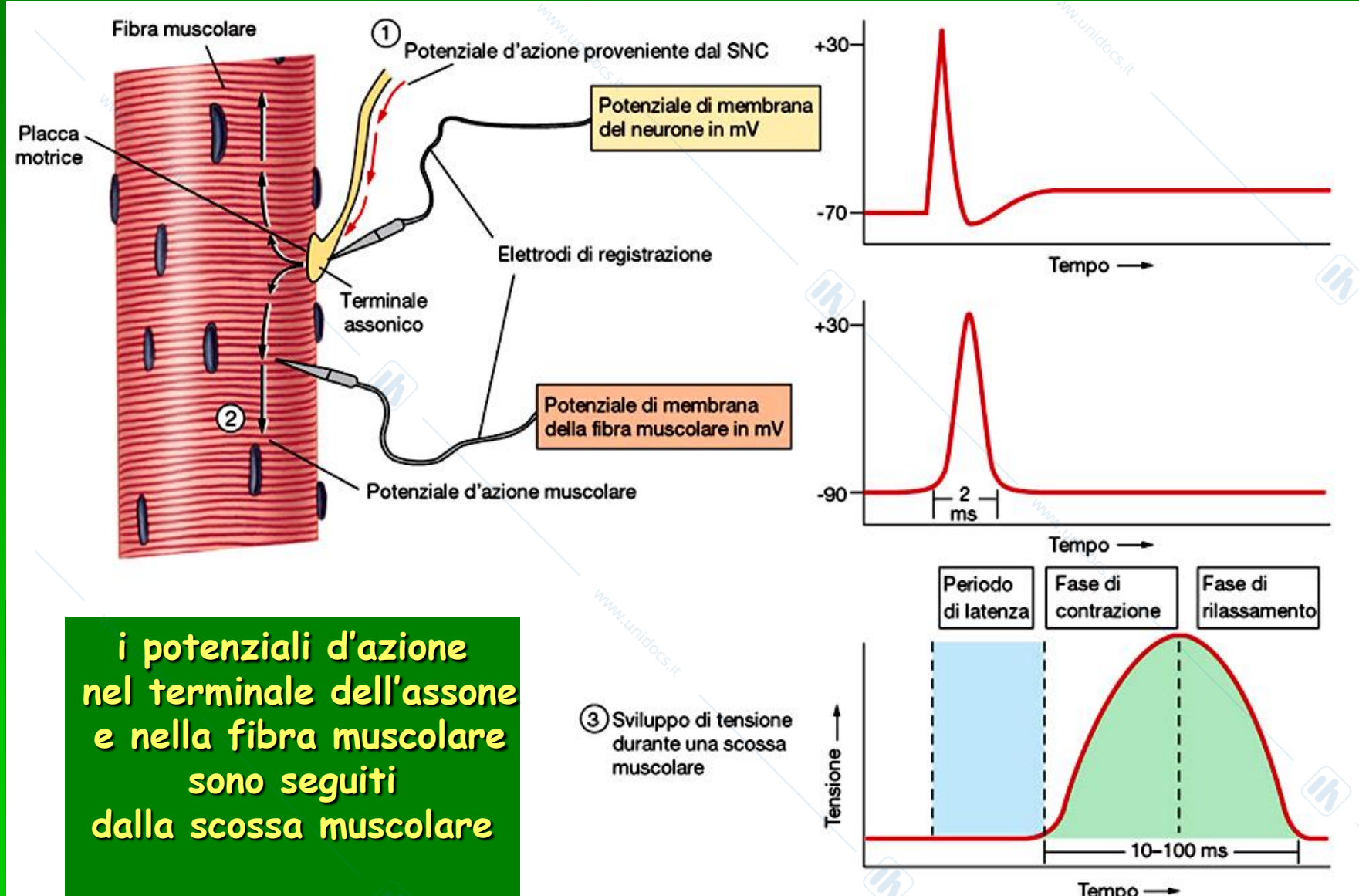
Riassumendo...

Il potenziale d'azione della fibra nervosa motoria provoca:

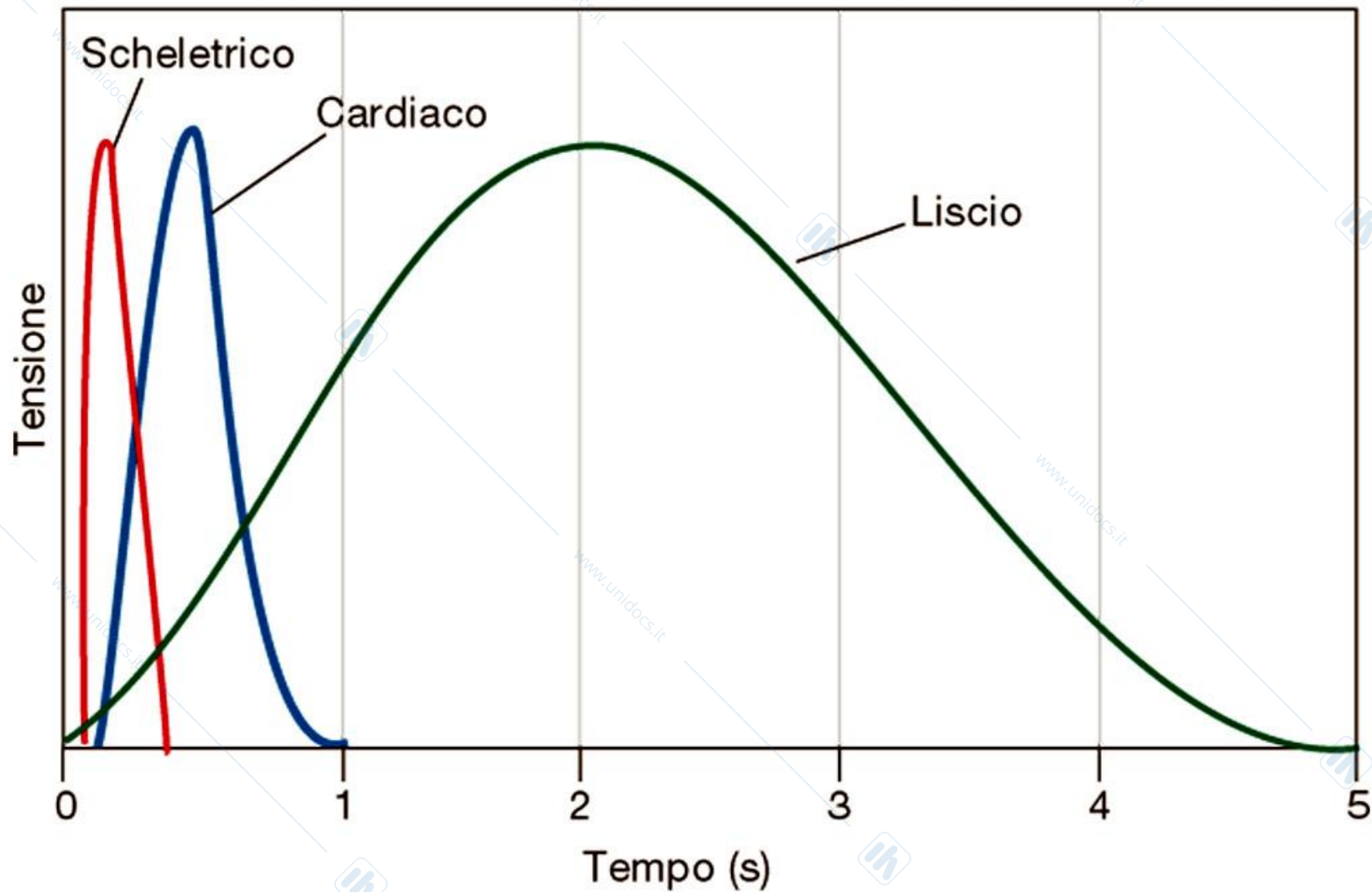
- ❖ **rilascio di acetilcolina;**
- ❖ **potenziale post-sinaptico eccitatorio (potenziale di placca);**
- ❖ **depolarizzazione della membrana tubulo T conseguente al potenziale d'azione sul sarcolemma;**
- ❖ **modificazione conformazionale di una proteina sensibile al voltaggio sulla membrana del tubulo T ;**

- ❖ mediante accoppiamento meccanico diretto, apertura di canali rilascianti Ca^{2+} , situati nella membrana del RS da cui si estendono come pilastri sino alle proteine di membrana voltaggio dipendenti dei tubuli T;
- ❖ fuoriuscita del Ca^{2+} nella fessura di giunzione tubulo T e RS provoca apertura di altri canali del Ca^{2+} ;
- ❖ flusso di Ca^{2+} nel citosol della fibra muscolare;
- ❖ contrazione contemporanea miofibrille
- ❖ ricaptazione Ca^{2+} mediante ATPasi del Ca^{2+}

Eventi e elettrici e meccanici della contrazione muscolare



Durata della contrazione muscolare nei tre tipi di muscolo



Energia per la contrazione: ATP & Fosfocreatina

L'energia meccanica per la contrazione muscolare deriva direttamente dall'energia chimica immagazzinata nell'ATP.

Le riserve di ATP sono però nella cellula muscolare molto limitate.

L'ATP consumato viene pertanto continuamente rigenerato cosicché la concentrazione intracellulare di ATP rimane relativamente costante anche in caso di elevato consumo energetico.

I processi capaci di rigenerare ATP sono:

- ❖ Scissione di fosfocreatina
- ❖ Glicolisi anaerobia (2 ATP/glucosio)
- ❖ Ossidazione aerobia di glucosio e acidi grassi (36 ATP/glucosio)

Muscolo a riposo



ATP derivato dal metabolismo + creatina \rightarrow ADP + fosfocreatina

Nel muscolo a riposo l'energia dell'ATP viene accumulata nei legami fosfato ad alta energia della fosfocreatina

Muscolo in esercizio



Fosfocreatina + ADP

creatina
chinasi

Creatina + ATP

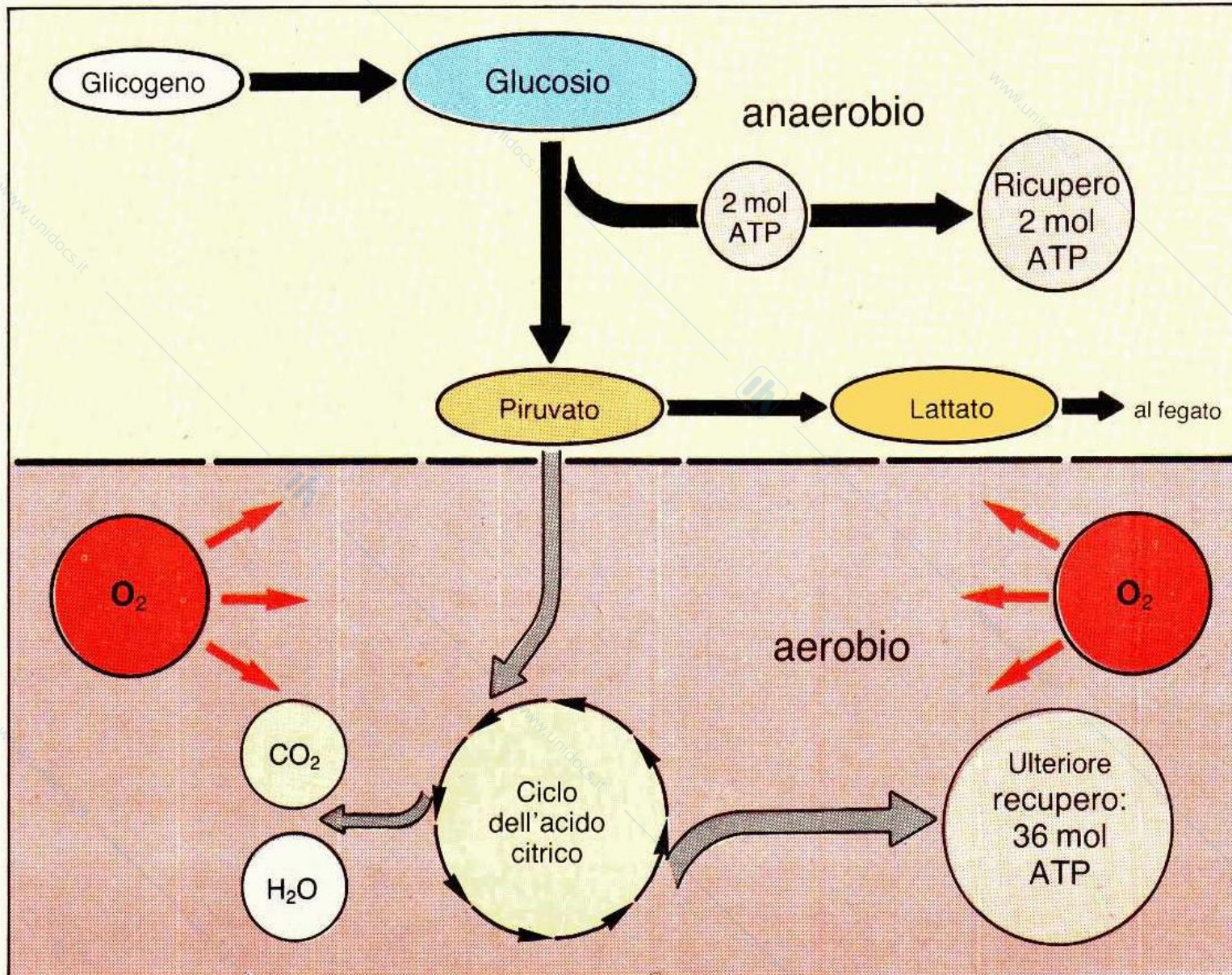
Necessaria per

**Miosina ATPasi
 Ca^{2+} -ATPasi
 Na^+/K^+ ATPasi**

**(contrazione)
(rilasciamento)
(riporta ai loro compartimenti originali gli ioni che hanno attraversato la membrana durante il pot. d'azione)**

I processi capaci di rigenerare ATP sono:

- ❖ Scissione di creatinfosfato
- ❖ Glicolisi anaerobia (2 ATP/glucosio)
- ❖ Ossidazione aerobia di glucosio e acidi grassi (36 ATP/glucosio)



B. Ricupero di energia aerobia e anaerobia dal glucosio

PROPRIETA' MECCANICHE DEL MUSCOLO SCHELETRICO

Le fibre muscolari sono *eccitabili*; un muscolo, può essere stimolato mediante applicazione diretta di stimoli elettrici o attraverso la stimolazione del nervo motore.

Quando un muscolo si contrae esso esercita una forza su ciò a cui è attaccato (questa forza è uguale alla *tensione* nel muscolo) e si accorcia se gli è consentito di farlo.

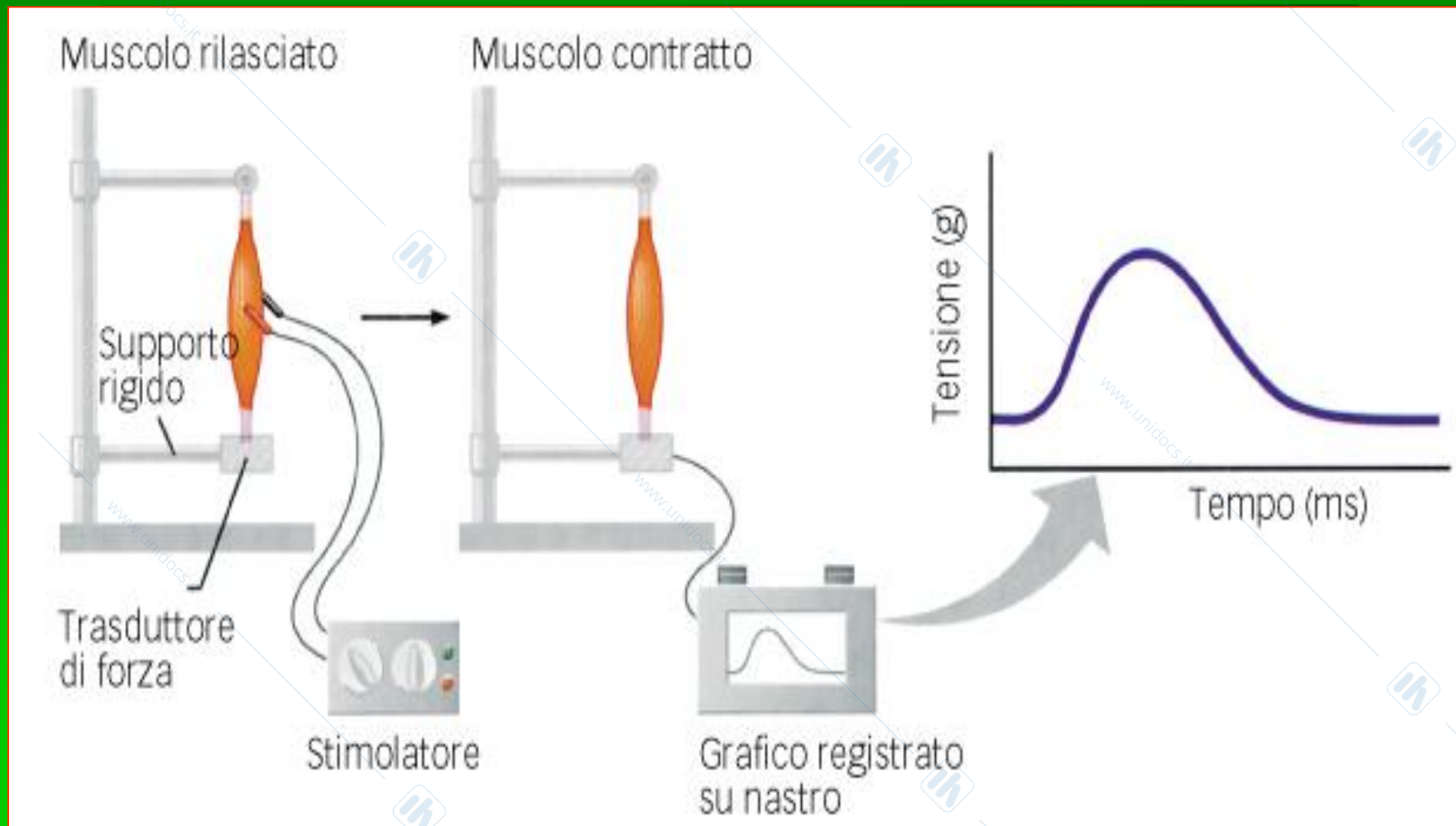
Pertanto possiamo misurare due diverse variabili durante la contrazione di un muscolo: la sua lunghezza e la sua tensione.

Nella maggior parte dei casi una di queste due variabili è mantenuta costante durante la contrazione.

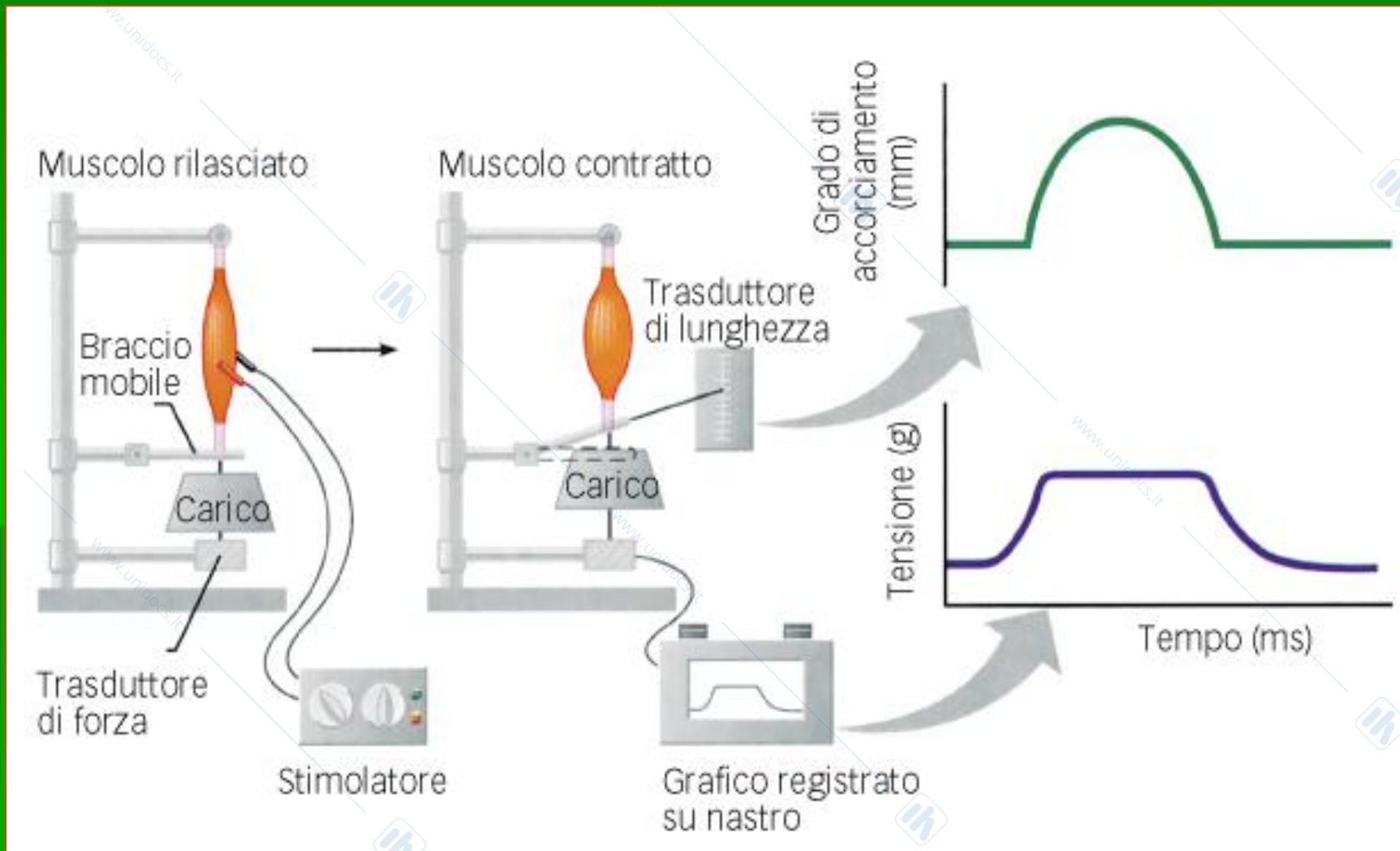
Nella contrazione *isometrica* al muscolo non è consentito l'accorciamento (la sua lunghezza è mantenuta costante) e si misura la tensione prodotta.

Nella contrazione *isotonica* il carico sul muscolo (che è uguale alla tensione prodotta nel muscolo) è mantenuto costante e si misura l'accorciamento

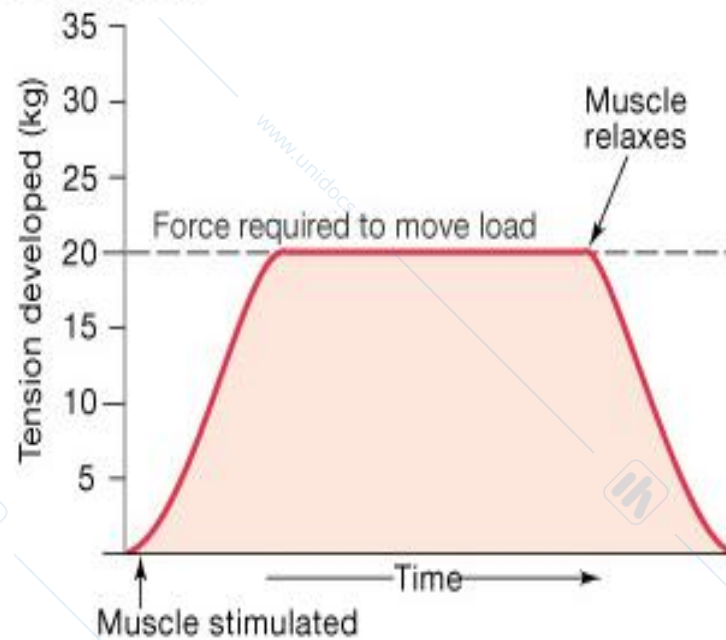
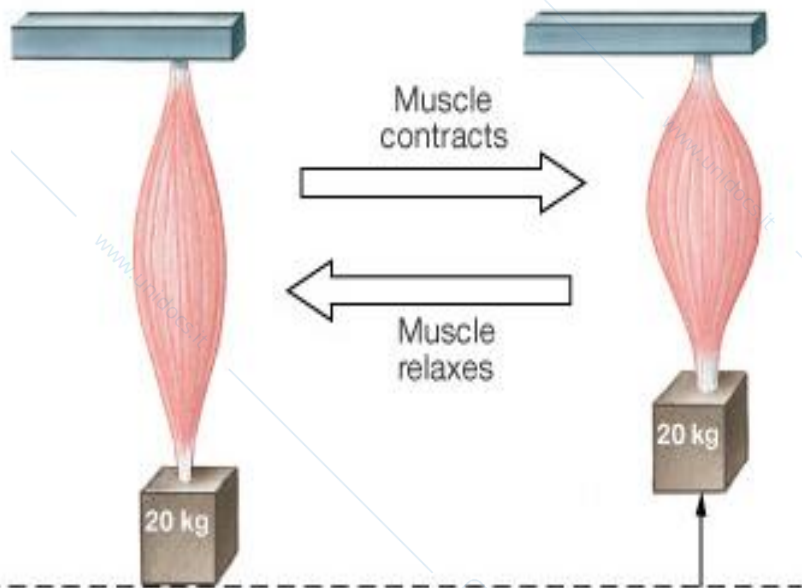
Muscolo in contrazione isometrica (a lunghezza costante)



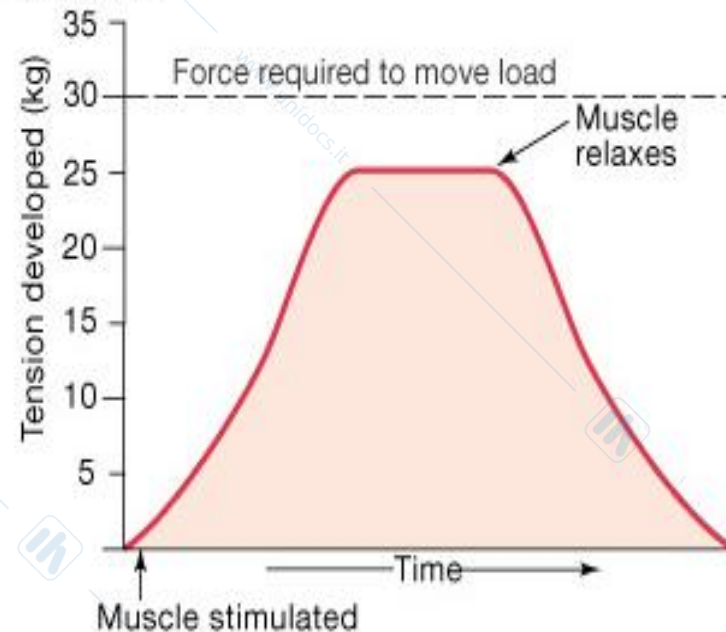
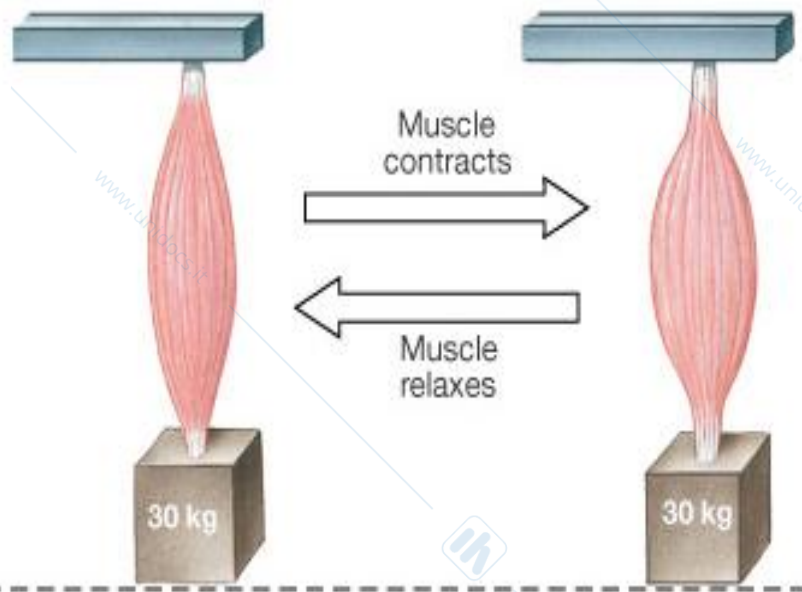
Muscolo in contrazione isotonica (a carico costante)

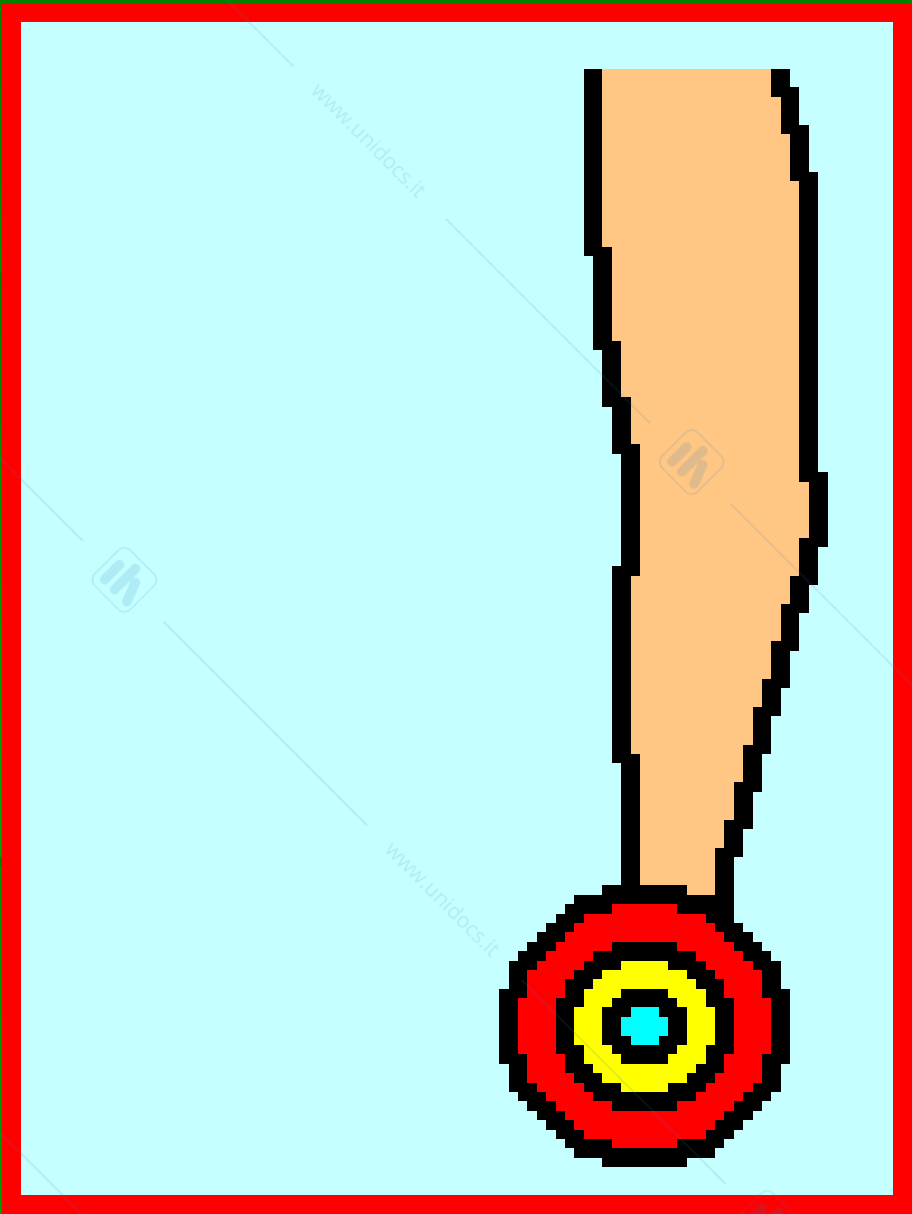


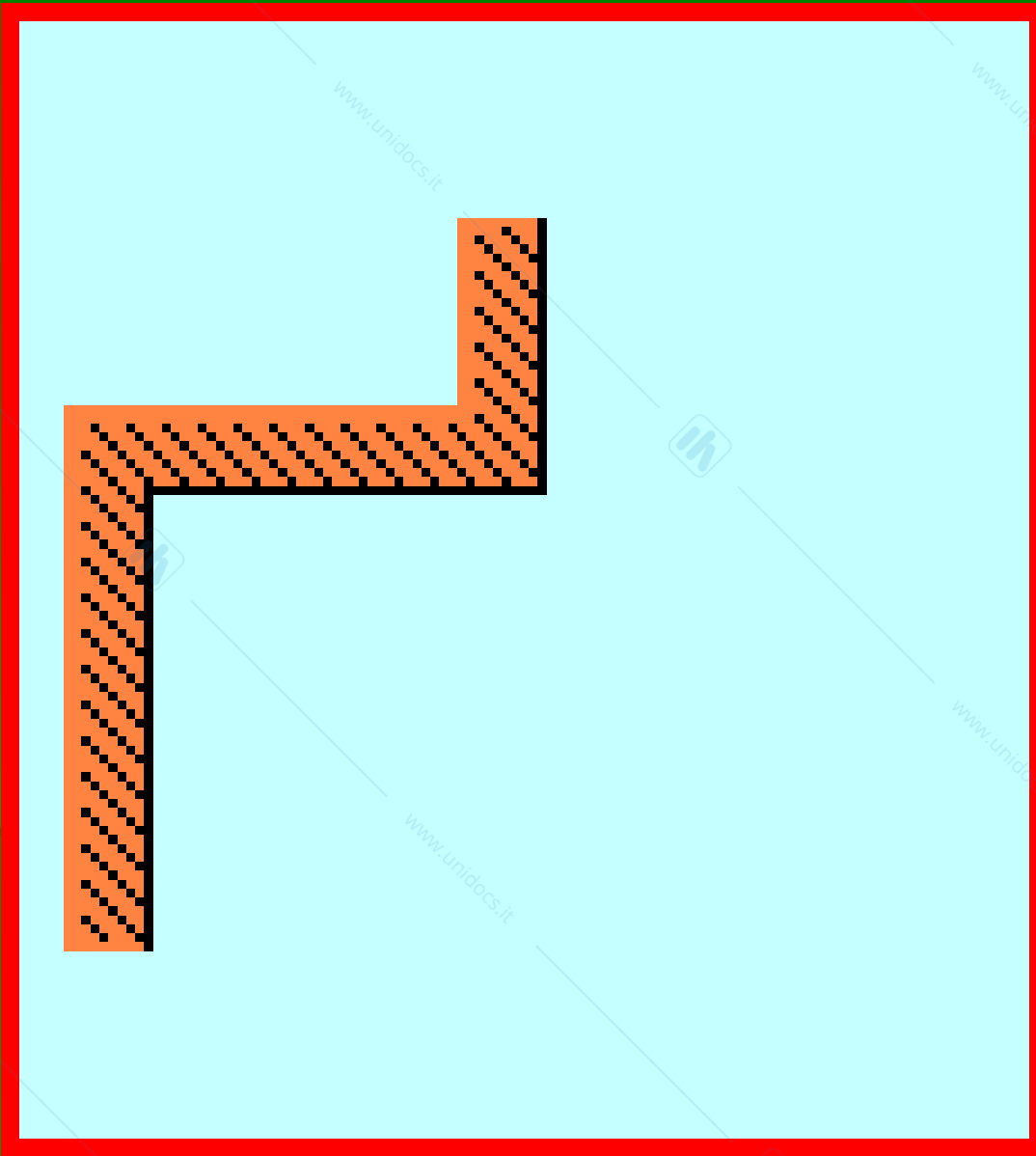
(a) **Isotonic contraction:** muscle contracts, shortens, and creates enough force to move the load.



(b) **Isometric contraction:** muscle contracts but does not shorten. Force cannot move the load.









**DA QUALI FATTORI
DIPENDE LA TENSIONE
SVILUPPATA DAL
MUSCOLO?**

Curva tensione-lunghezza

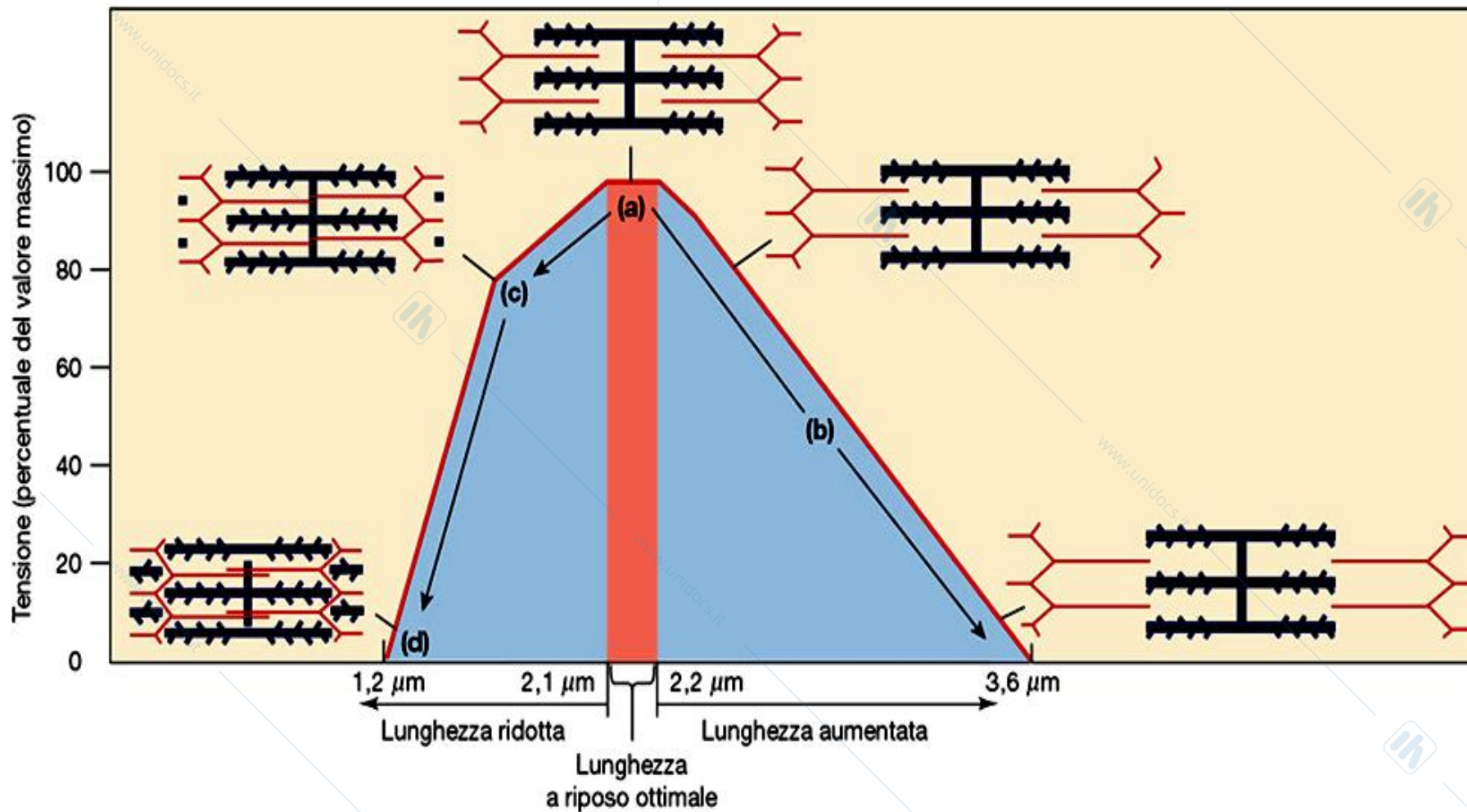
La tensione sviluppata dal muscolo dipende dalla lunghezza del muscolo prima della contrazione.

E' massima alla lunghezza fisiologica dei muscoli, che corrisponde alla completa sovrapposizione dei filamenti.

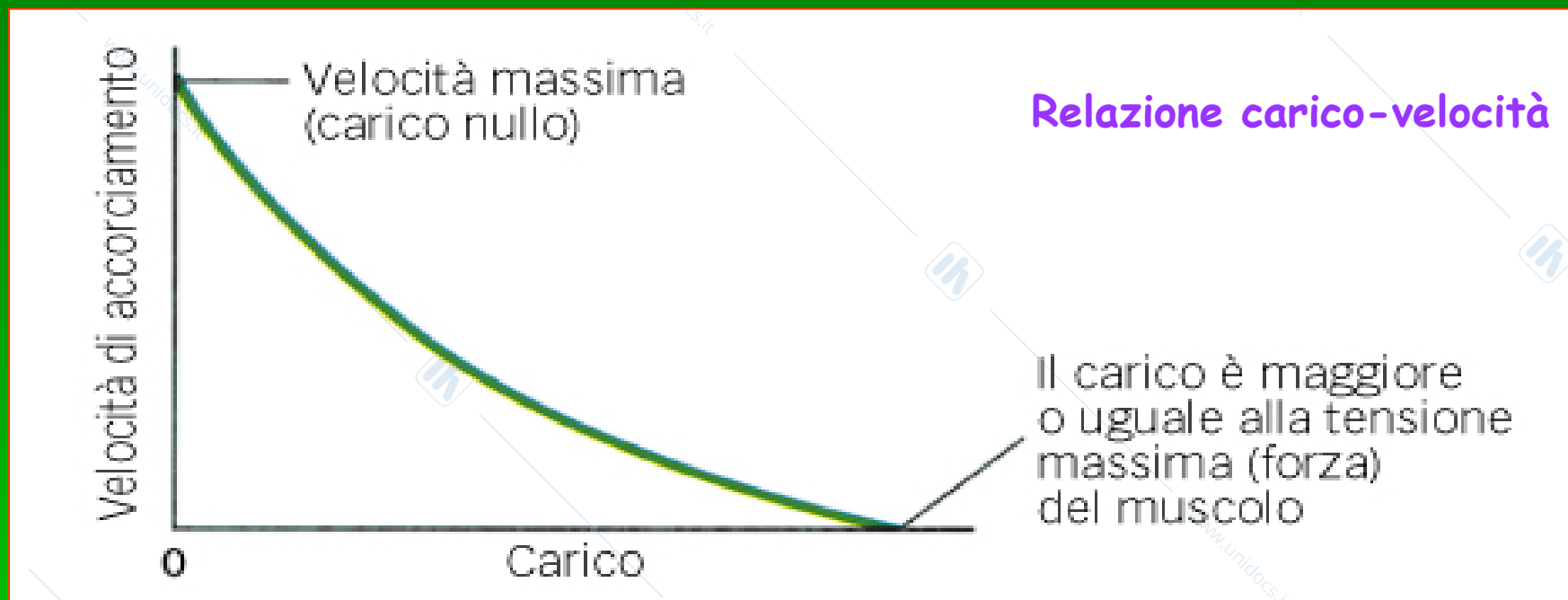
Diminuisce per lunghezze maggiori, perché meno ponti possono interagire.

Diminuisce per lunghezze minori, perché i filamenti di actina si sovrappongono

Relazioni lunghezza-tensione per il sarcomero



•La tensione e la velocità di contrazione del muscolo dipendono dal carico applicato



- La velocità di accorciamento di un muscolo dipende dal carico applicato: è massima quando il carico è nullo

• La tensione sviluppata dal muscolo dipende dalla frequenza di stimolazione



La risposta meccanica di una fibra muscolare ad un potenziale d'azione è denominata **SCOSSA** muscolare; insorge con un ritardo di alcuni ms (10-100, periodo di latenza).

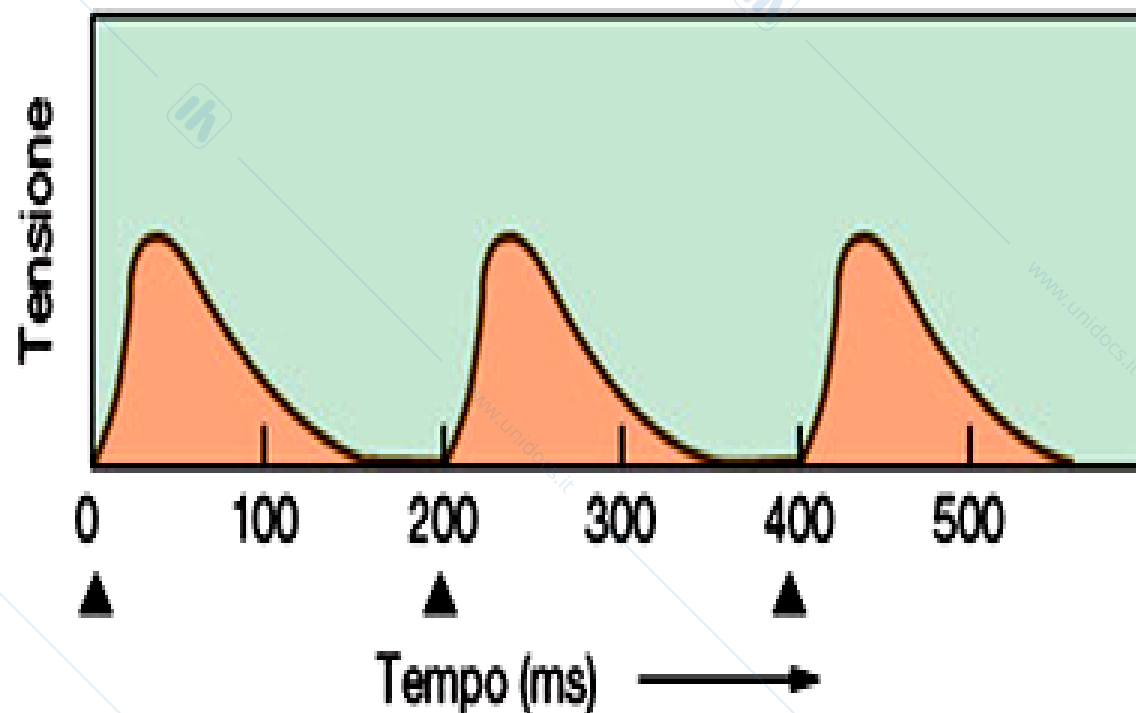
SOMMAZIONE DI SCOSSE

Poiché la latenza tra l'arrivo del potenziale d'azione e l'inizio della scossa è di alcuni ms, e la scossa dura 100 ms, cosa succede quando un secondo potenziale d'azione viene generato prima che la scossa sia terminata?

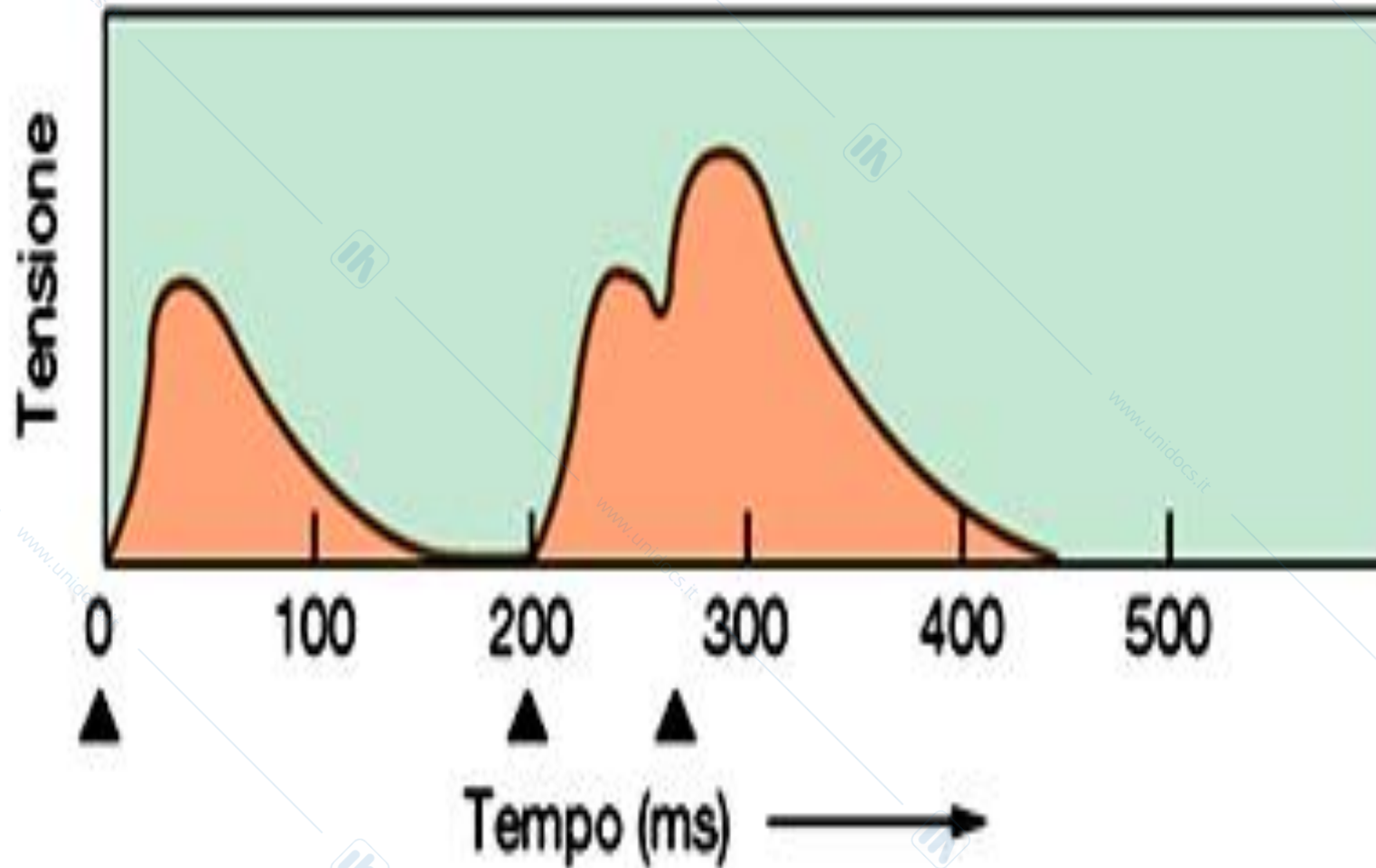
La fibra risponde generando una scossa la cui tensione è maggiore.
Si genera una sommazione di scosse.

SCOSSA SEMPLICE: risposta meccanica ad una singola stimolazione. Contrazione seguita da rilasciamento, con sviluppo di forza (o accorciamento) ridotto; la risposta meccanica dura almeno 10 volte più a lungo del potenziale d'azione.

(a) **Scosse muscolari singole:** il muscolo si rilascia completamente tra gli stimoli (▲).

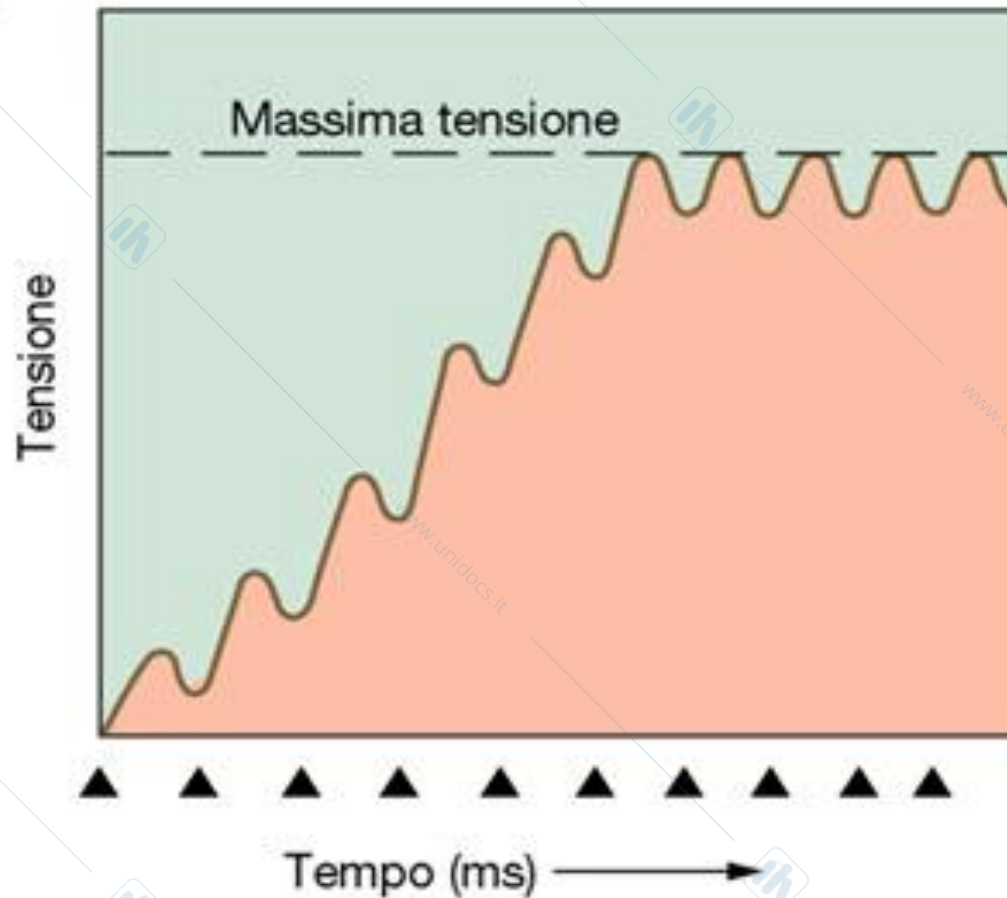


(b) Sommazione: gli stimoli ravvicinati non consentono al muscolo di rilassarsi completamente.



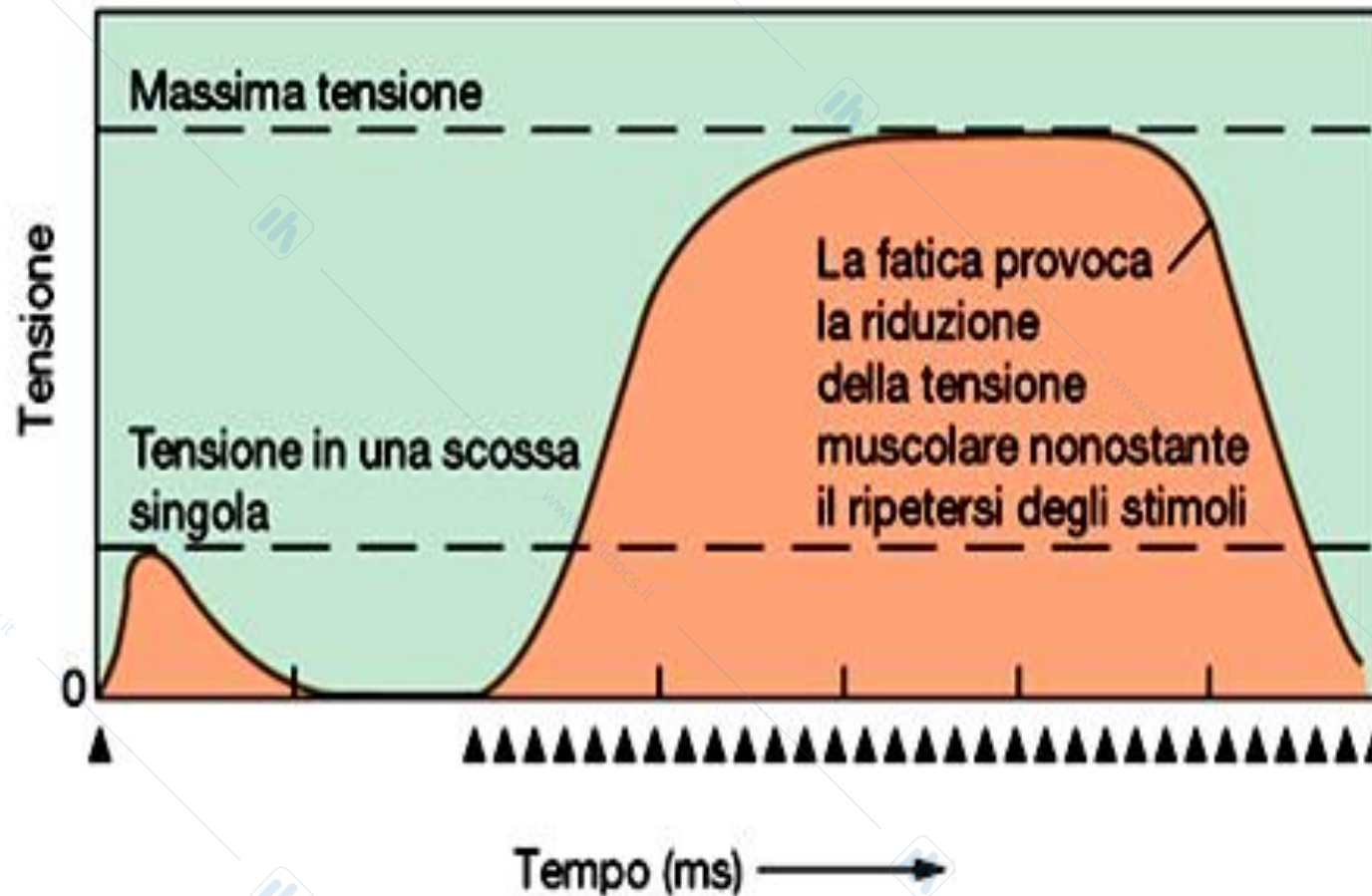
TETANO INCOMPLETO: risposta meccanica a stimolazioni ripetute con intervalli più brevi del ciclo del Ca^{++} : rilasciamento incompleto e maggiore sviluppo di forza (o accorciamento)

La sommazione può determinare il tetano incompleto: l'intervallo fra gli stimoli è abbastanza lungo da consentire un parziale rilasciamento muscolare.



TETANO COMPLETO: risposta meccanica alla stimolazione ad alta frequenza (20-60 Hz). Non avviene rilasciamento e lo sviluppo di forza (o l'accorciamento) è massimo

(d) La sommazione può determinare il tetano completo: il muscolo raggiunge una tensione costante.

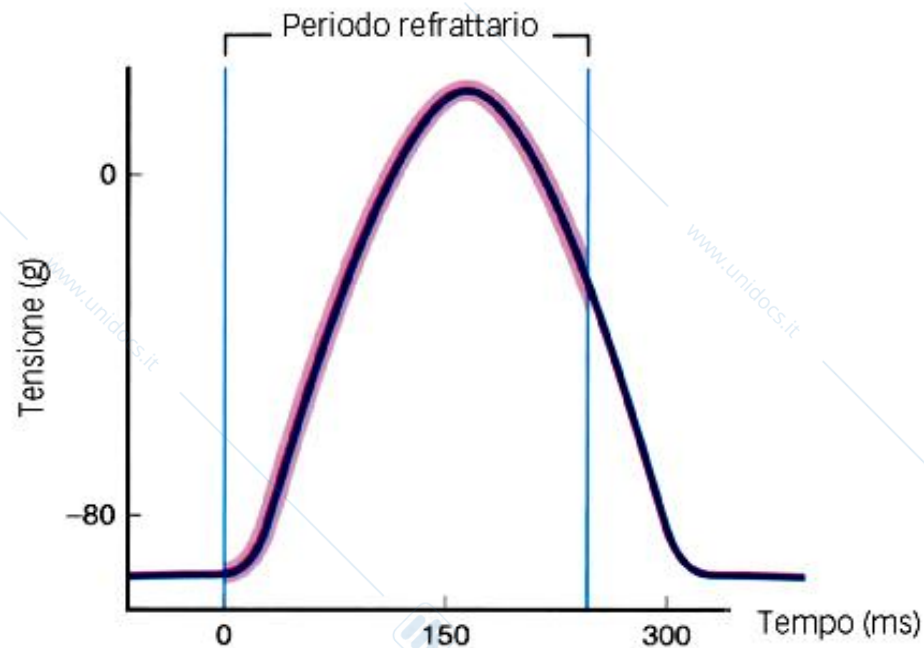
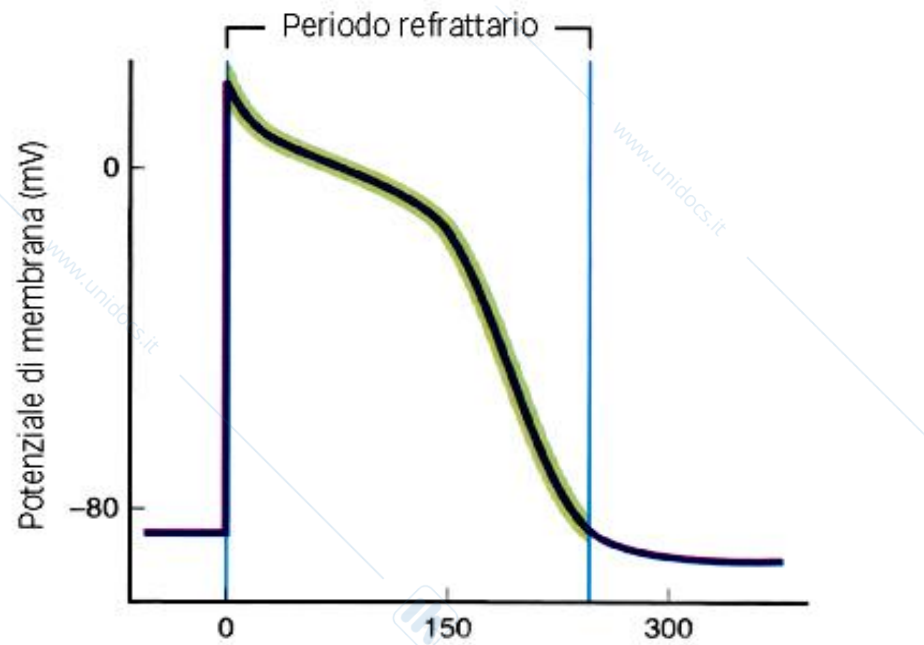


Uno stato di contrazione prolungata, causato da ripetute stimolazioni ravvicinate nel tempo è detto contrazione tetanica, o **TETANO**

Se la frequenza di stimolazione non è eccessiva, la tensione può oscillare e la fibra muscolare rilassarsi parzialmente tra 2 stimoli, causando un tetano incompleto

Nel tetano completo, prodotto da stimolazioni a frequenza massimale, la fibra non si rilassa tra stimoli successivi

La massima tensione tetanica è pari a 3-5 volte quella sviluppata dalla singola scossa



Relazione
temporale tra
una contrazione e
un potenziale
d'azione nel
muscolo cardiaco

Non si verifica
tetano

Scossa singola

- ❖ Un motoneurone assieme a tutte le fibre muscolari che innerva viene definito unità motoria.
- ❖ La scossa singola è la risposta meccanica di una unità motoria ad un singolo potenziale d'azione.
- ❖ Dato un potenziale d'azione la scossa singola è sempre uguale

Fasi

- ❖ *periodo di latenza* (pochi millisecondi) tra la comparsa del potenziale d'azione nel sarcolemma e la contrazione muscolare;
- ❖ *fase di contrazione* (10-100 millisecondi) dalla fine della latenza al picco della tensione muscolare (grammi)
- ❖ *fase di rilasciamento* (fino alla tensione nulla).

Tipi di contrazione:

la contrazione isotonica si verifica quando il muscolo genera una forza muscolare almeno pari al carico (es. un peso) determinando un accorciamento del muscolo.

la contrazione isometrica si verifica quando la forza muscolare generata è inferiore al carico (nessun movimento). Si noti l'andamento della tensione

Tetano:

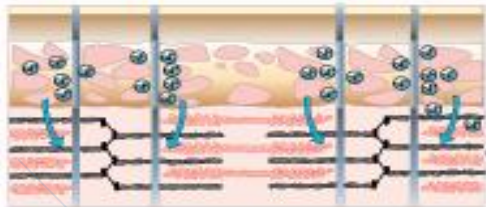
quando la concentrazione intracellulare del Ca^{++} è elevata, i siti di legame della miosina sull'actina restano esposti e la contrazione muscolare diviene sostenuta e prolungata

Relazione lunghezza-tensione:

la tensione attiva massima si sviluppa in corrispondenza della lunghezza muscolare alla quale si verifica una sovrapposizione ottimale dei filamenti sottili e spessi, che consente la formazione del maggior numero possibile di ponti trasversi. La tensione attiva risulta dalla sottrazione della tensione passiva (che si sviluppa stirando il muscolo a differenti lunghezze o precarichi) dalla tensione totale (la tensione muscolare massima sviluppata partendo da differenti lunghezze)

Relazione forza-velocità:

velocità dell'accorciamento in funzione della variazione della forza di opposizione alla contrazione (postcarico) che viene prefissata (contrazione isotonica). La velocità dell'accorciamento dipende dalla velocità alla quale si formano i ponti trasversi di actina e miosina



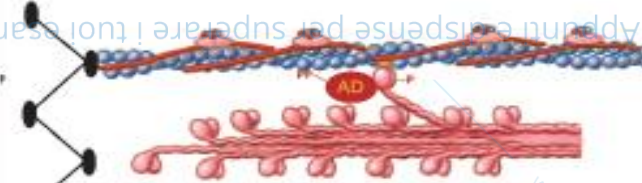
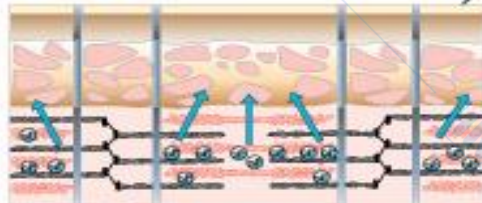
Nella fibra muscolare, la contrazione ha inizio con la liberazione di Ca^{2+} .

La depolarizzazione di membrana ad opera del potenziale d'azione causa la liberazione di ioni Ca^{2+} dal reticolo sarcoplasmatico.

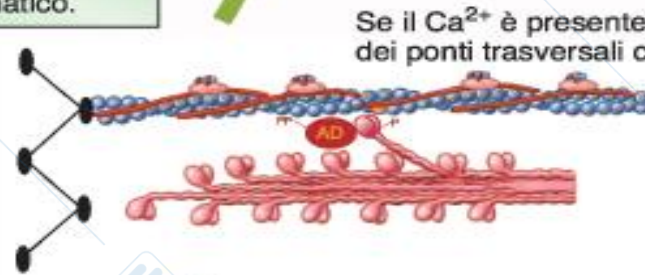
Se il Ca^{2+} è rimosso il ciclo si interrompe e il muscolo si rilassa.

Se l'ATP è rimosso, i ponti trasversali rimangono attaccati e insorge il rigor mortis. Il ciclo si interrompe qua.

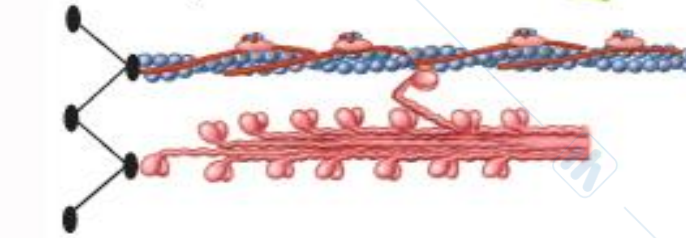
La ripolarizzazione della membrana consente la ricaptazione di ioni Ca^{2+} da parte del reticolo sarcoplasmatico.



① Il Ca^{2+} si lega alla subunità TnC del complesso Troponina-Tropomiosina. Ciò dà origine a modificazioni conformazionali che alla fine spostano la posizione della tropomiosina esponendo i siti di legame per la miosina situati sull'actina. A quel punto viene liberato P_i .



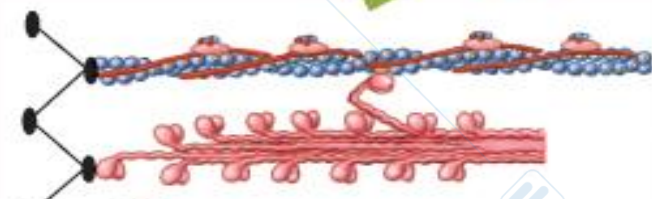
Se il Ca^{2+} è presente, i cicli dei ponti trasversali continuano



② Il rilascio di P_i scatena il "colpo di potenza" della contrazione. L'energia necessaria è fornita dall'idrolisi di $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_i + \text{E}$. Nel corso del "colpo di potenza" la testa della miosina ruota di 45° portando la linea Z più vicina al filamento spesso. A quel punto è liberato l'ADP.



④ L'ATP si lega alle teste di miosina liberando il ponte trasversale. Esso rimane legato nella forma idrolizzata di ADP e P_i .



③ La miosina rimane nella posizione legata fino a quando l'ATP si lega alla testa della miosina o è rimosso il Ca^{2+} .

Fino a quando Ca^{2+} e ATP sono presenti il ciclo continua. La linea Z è tirata sempre più vicina alle estremità dei filamenti spessi.