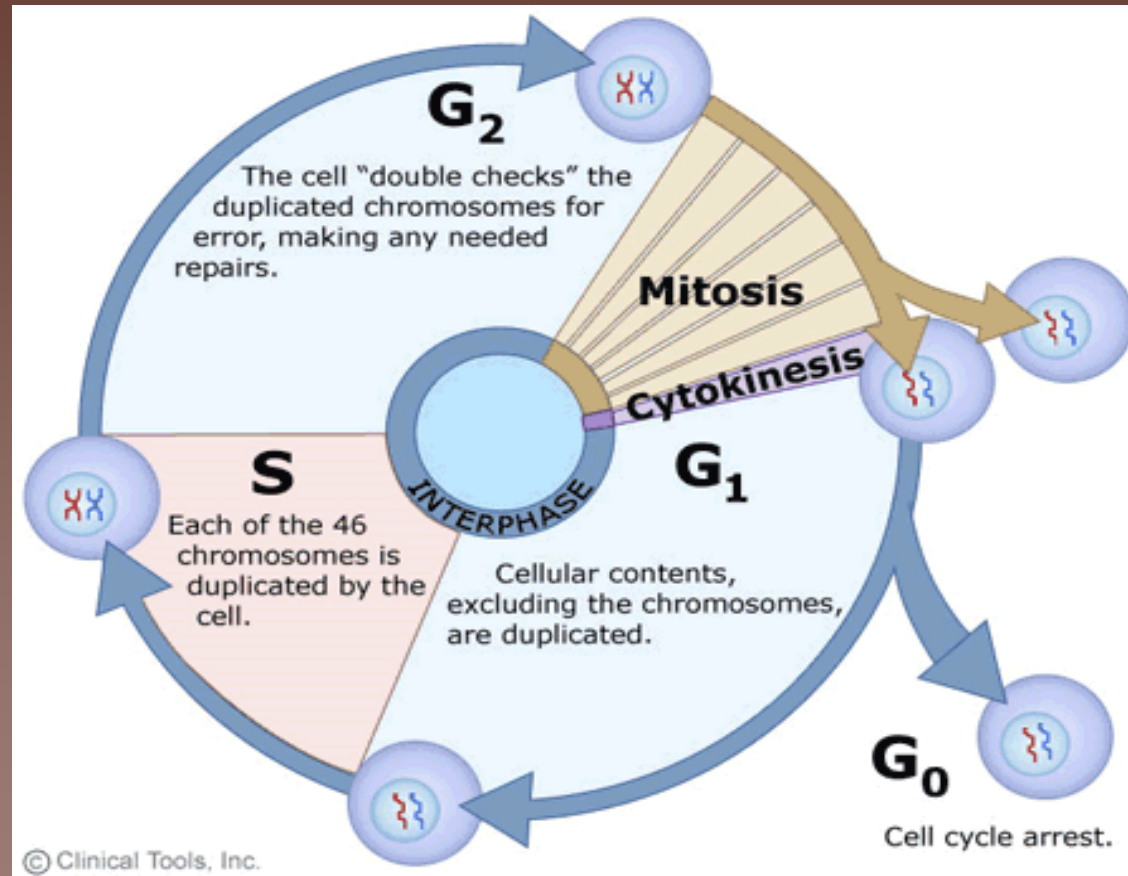


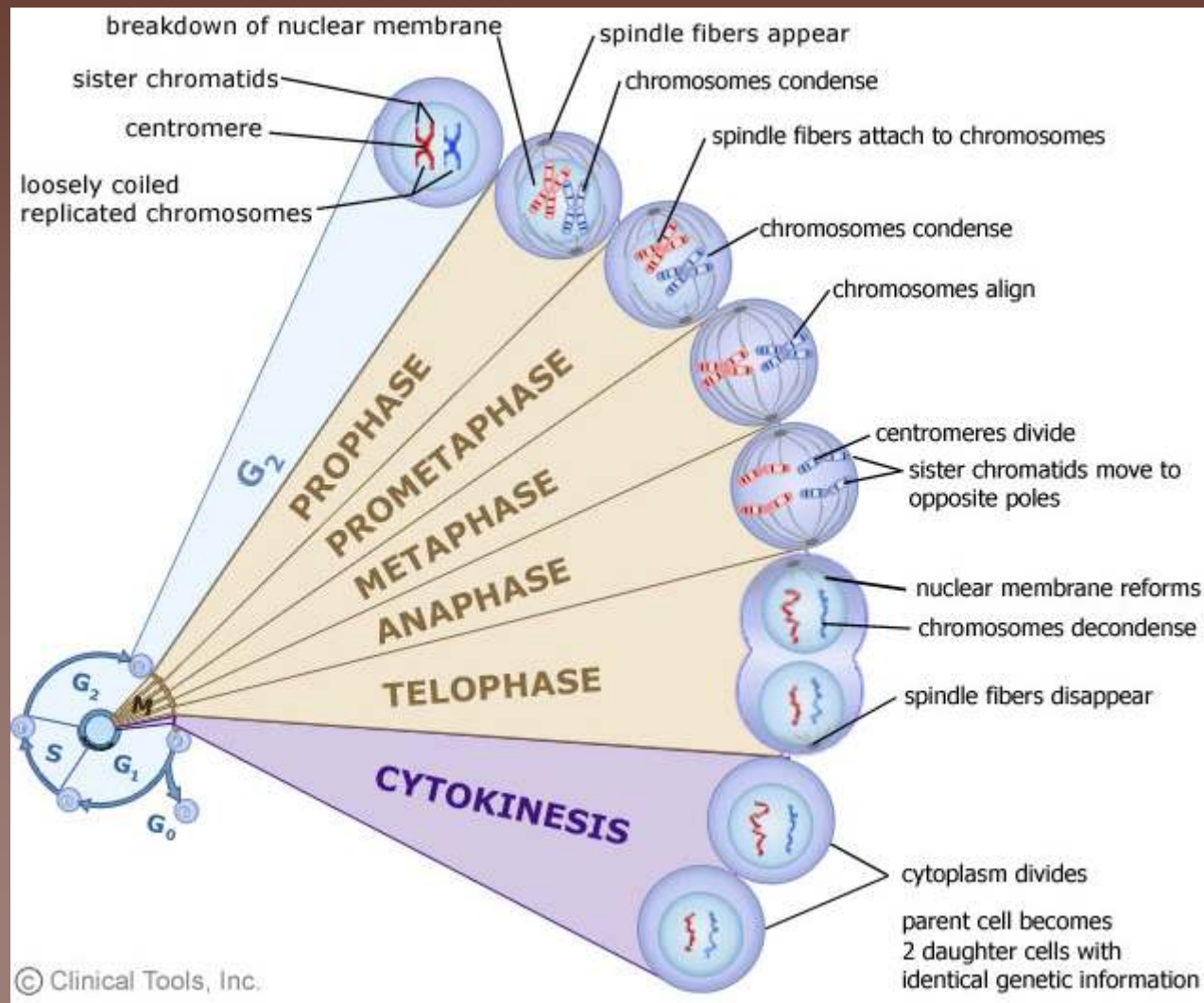
Μίτωση

Δρ. Γκατζίδου Ελισάβετ
Μέλος Ε.ΔΙ.Π.
Εργαστήριο Βιολογίας
Τμήμα Ιατρικής ΔΠΘ

Κυτταρικός Κύκλος



Οι φάσεις της Μίτωσης



Φάση M

- ◆ Μίτωση (διαίρεση του πυρήνα) και Κυτταροκίνηση (διαίρεση του κυτταροπλάσματος)
- ◆ Το κύτταρο αναδιοργανώνει όλα τα συστατικά του και τα μοιράζει ισότιμα στα δύο θυγατρικά κύτταρα.

Φάση M

- ◆ *Πώς το κύτταρο θα διαχωρίσει με ακρίβεια και θα μοιράσει τα χρωμοσώματά του ώστε κάθε θυγατρικό κύτταρο να παραλάβει ένα αντίγραφο του γονιδιώματος;*
- ◆ *Συναρμολογεί δύο εξειδικευμένες μηχανές του κυτταροσκελετού:*
 1. *Μία που τραβά και διαχωρίζει τα διπλασιασμένα χρωμοσώματα (κατά τη μίτωση)*
 2. *Μία που διαιρεί το κυτταρόπλασμα στα δύο (κατά την κυτταροκίνηση)*

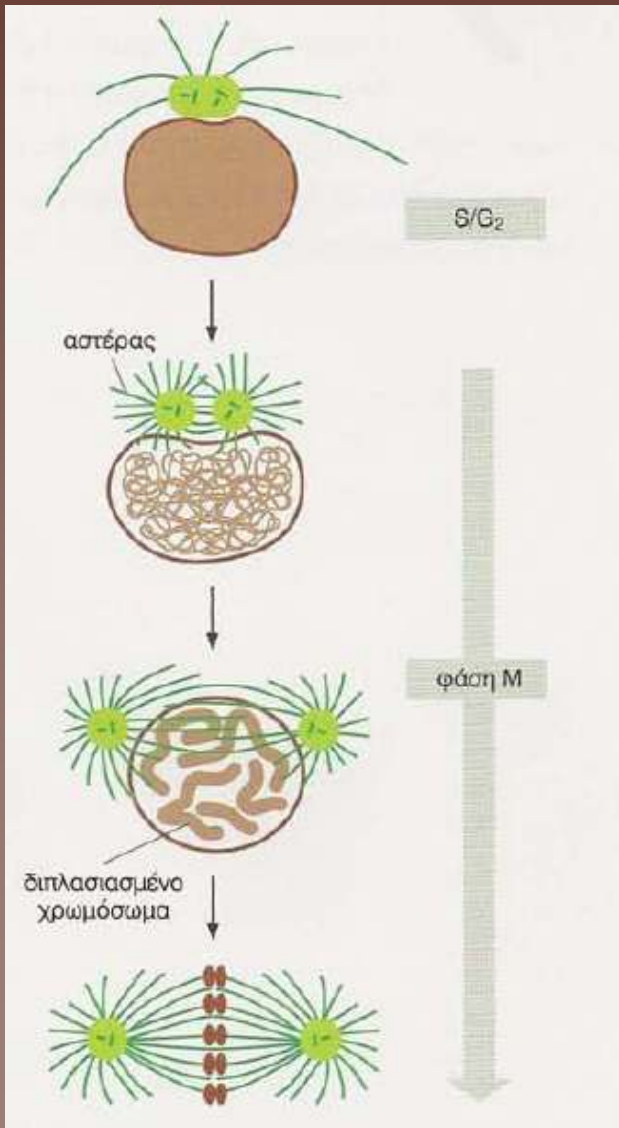
Κεντροσωμάτιο - Centromere

- ◆ Τα **κεντροσωμάτια** διπλασιάζονται και βοηθούν να σχηματιστούν οι δύο πόλοι της μιτωτικής ατράκτου.
- ◆ Το **κεντροσωμάτιο** είναι το κύριο κέντρο οργάνωσης των μικροσωληνίσκων στα ζωϊκά κύτταρα.
- ◆ Κεντρικά εντοπιζόμενο οργανίδιο. Στα περισσότερα ζωϊκά κύτταρα περιέχει ένα ζεύγος κεντριολίων.
- ◆ Ο διπλασιασμός είναι απαραίτητος στο να σχηματιστούν οι δύο πόλοι της μιτωτικής ατράκτου, και παράλληλα κάθε θυγατρικό κύτταρο να αποκτήσει το δικό του **κεντροσωμάτιο**.
- ◆ Ο διπλασιασμός των **κεντροσωματίων** ξεκινά από τη φάση S και ενεργοποιείται από τις ίδιες Cd κινάσες (G_1/S -Cdk και S-Cdk) που πυροδοτούν την αντιγραφή του DNA.
- ◆ **Κύκλος του κεντροσωματίου.**

Κύκλος του κεντροσωματίου: η διεργασία του διπλασιασμού και διαχωρισμού του κεντροσωματίου

1. Όταν το κεντροσωμάτιο διπλασιάζεται τα δύο αντίγραφα παραμένουν ως ενιαίο σύμπλοκο στη μια πλευρά του πυρήνα.
2. Καθώς αρχίζει η Μίτωση, τα δύο κεντροσωμάτια διαχωρίζονται και το καθένα οργανώνει το σχηματισμό ενός ακτινωτού «στεφάνου» μικροσωληνίσκων που καλείται **αστέρας**.
3. Οι δύο αστέρες μετακινούνται στις αντίθετες πλευρές του πυρήνα ώστε να σχηματίσουν τους δύο πόλους της μιτωτικής ατράκτου.

Κύκλος του κεντροσωματίου



Εικόνα 19-5. Στο μεσοφασικό κύτταρο το κεντροσωμάτιο διπλασιάζεται για να σχηματίσει τους δύο πόλους της μιτωτικής ατράκτου. Στα περισσότερα ζωικά κύτταρα, ένα ζεύγος κεντριδίων (εδώ εικονίζονται ως σκουροπράσινες γραμμές) σχετίζεται με το στρώμα του κεντροσωματίου (ανοιχτό πράσινο) που κατευθύνει την έκφυση των μικροσωληνίσκων. (Για λόγους ευκρίνειας, ο όγκος του κεντροσωματίου εικονίζεται μεγαλύτερος απ' όσο είναι στην πραγματικότητα). Ο διπλασιασμός του κεντροσωματίου αρχίζει στην αρχή της φάσης S και ολοκληρώνεται κατά τη φάση G₂. Στην αρχή, τα δύο κεντροσωμάτια παραμένουν μαζί. Μόλις αρχίσει η φάση M διαχωρίζονται στα δύο και καθένα εμπυρηνώνει τον αστέρα του. Στη συνέχεια, οι δύο αστέρες απομακρύνονται μεταξύ τους και οι μικροσωληνίσκοι που αλληλεπιδρούν ανάμεσα στους δύο αστέρες επιμηκύνονται για να σχηματίσουν τη δίπολη μιτωτική άτρακτο, στον κάθε πόλο της οποίας υπάρχει ένας αστέρας. Όταν αποδομηθεί το πυρηνικό περίβλημα, οι μικροσωληνίσκοι της ατράκτου μπορούν ν' αλληλεπιδράσουν με τα χρωμοσώματα.

Μιτωτική Άτρακτος

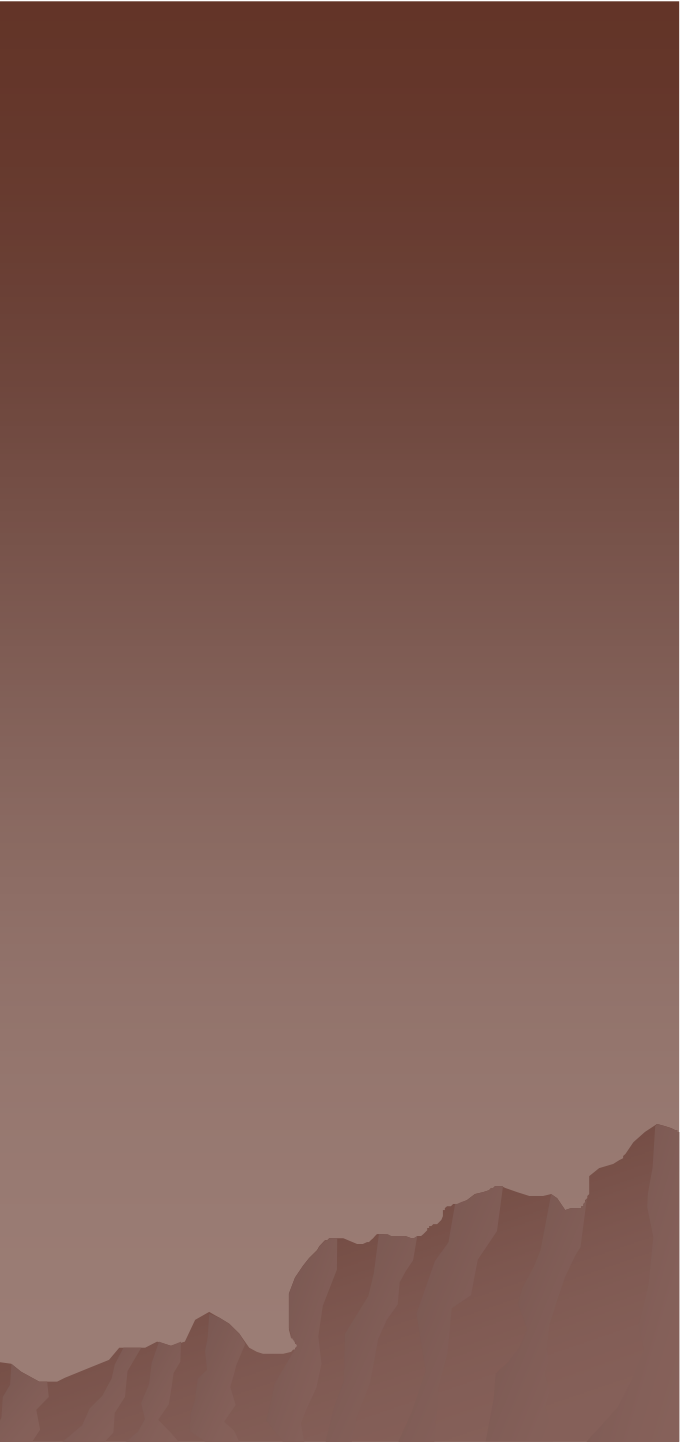
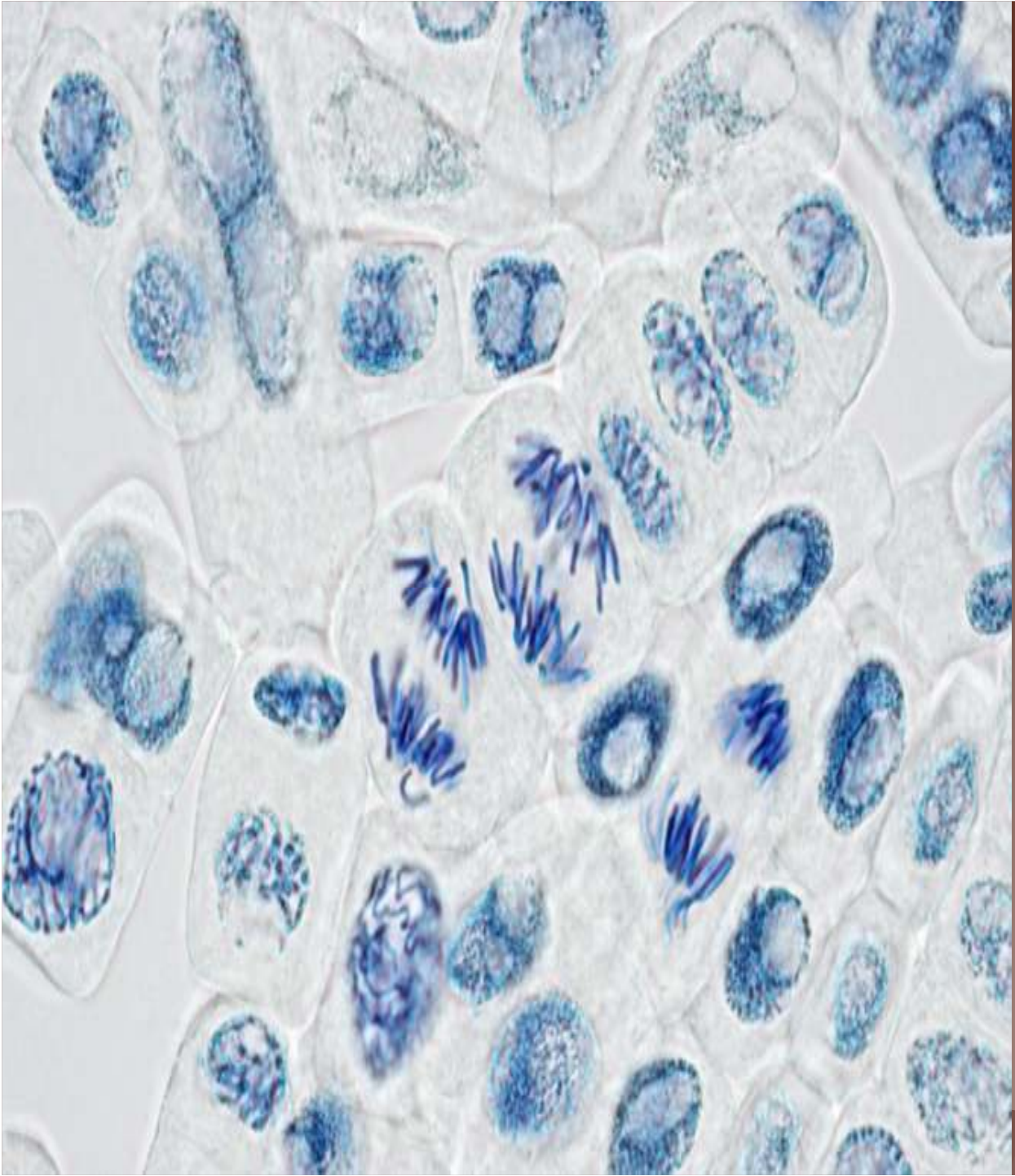
- ◆ Διεκπαιρεύνει τη διαίρεση του πυρήνα.
- ◆ Αποτελείται από μικροσωληνίσκους και ποικίλες πρωτεΐνες που αλληλεπιδρούν με αυτούς μεταξύ των οποίων και οι κινητήριες πρωτεΐνες.
- ◆ Στα ευκαρυωτικά κύτταρα είναι υπεύθυνη για το διαχωρισμό των διπλασιασμένων χρωμοσωμάτων και την κατανομή ενός αντιγράφου του κάθε χρωμοσώματος σε κάθε θυγατρικό κύτταρο.
- ◆ Η μιτωτική άτρακτος αρχίζει να συναρμολογείται κατά την Πρόφαση.

Συσταλτικός Δακτύλιος

- ◆ Στα ζωϊκά κύτταρα και σε πολλούς μονοκύτταρους ευκαρυώτες φέρει σε πέρας τη διαίρεση του κυτταροπλάσματος (κυτταροκίνηση).
- ◆ Αποτελείται από νημάτια ακτίνης και μυοσίνης σε διάταξη δακτυλίου γύρω από τον ισημερινό του κυττάρου.
- ◆ Αρχίζει να συναρμολογείται προς το τέλος της μίτωσης ακριβώς κάτω από την κυτταρική μεμβράνη.
- ◆ Καθώς συστέλλεται, έλκει τη μεμβράνη προς τα μέσα και έτσι διαιρεί το κύτταρο στα δύο.

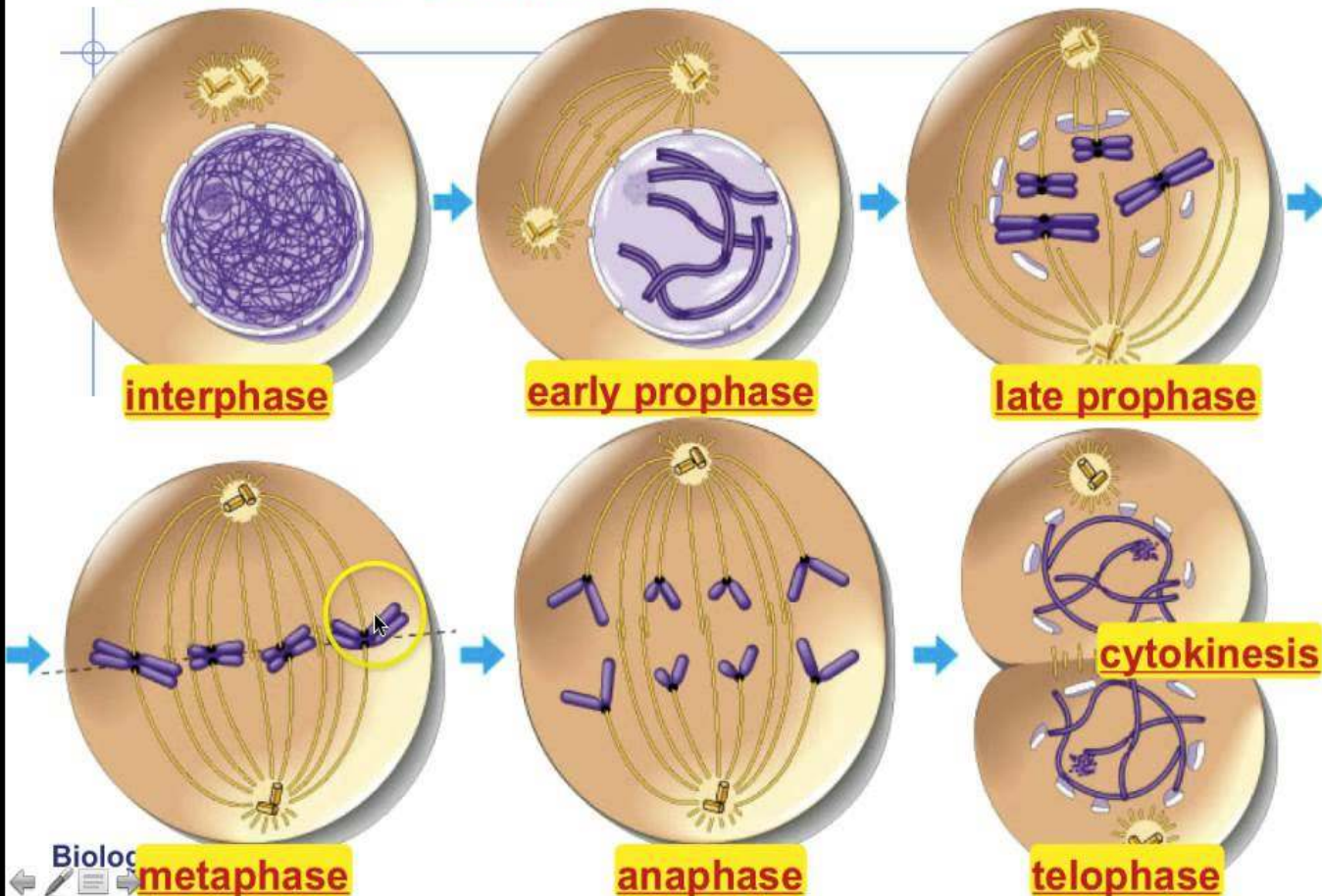
Φάση M

- ◆ Αποτελείται από 6 στάδια σε αυστηρή χρονική ιεράρχηση:
 1. Πρόφαση
 2. Προμετάφαση
 3. Μετάφαση
 4. Ανάφαση
 5. Τελόφαση
 6. Κυτταροκίνηση



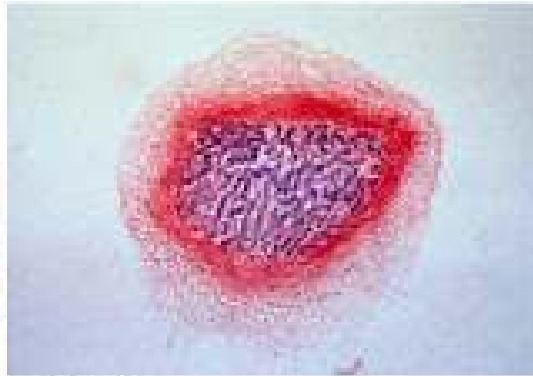
Φάση Μ

Overview of mitosis





Interphase



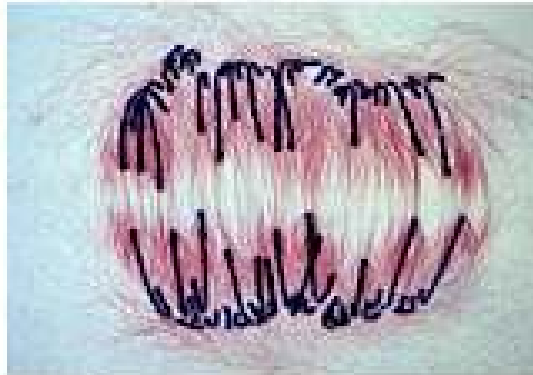
Prophase



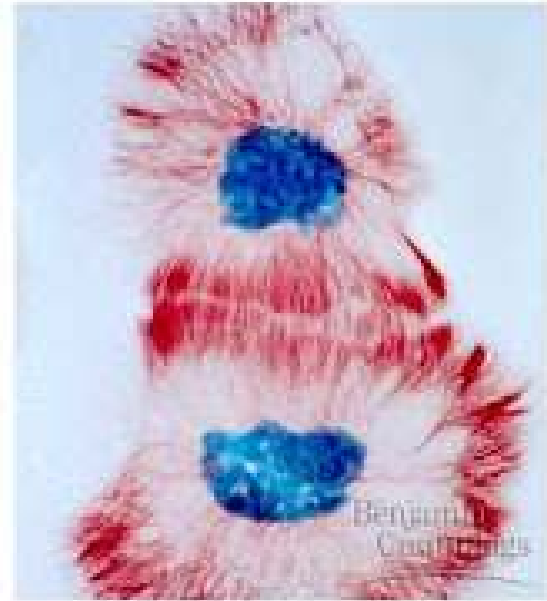
Prometaphase



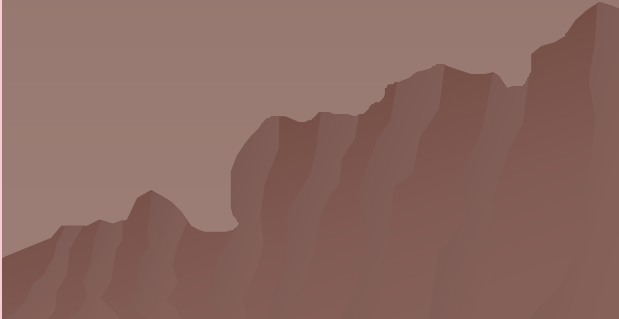
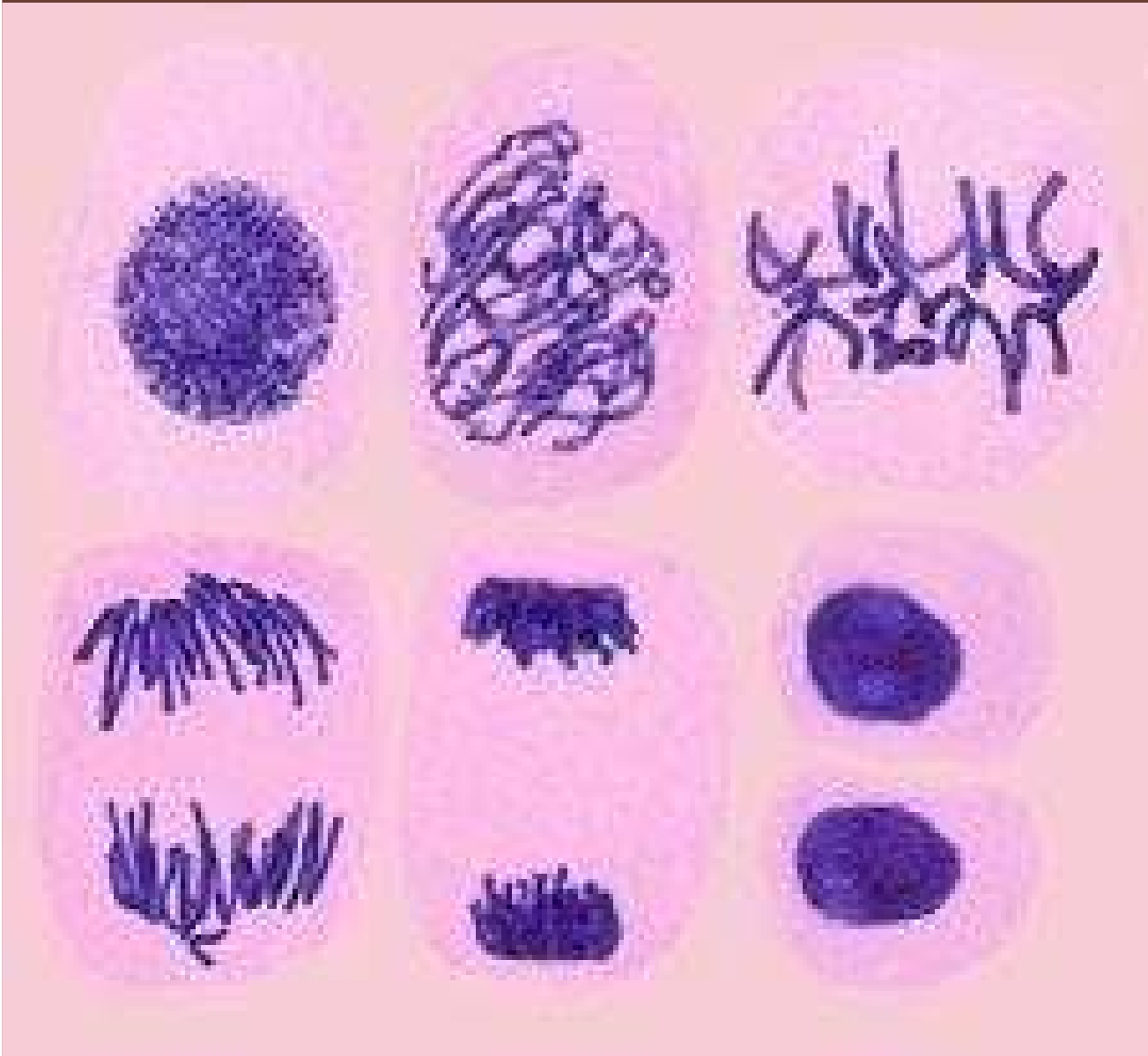
Metaphase



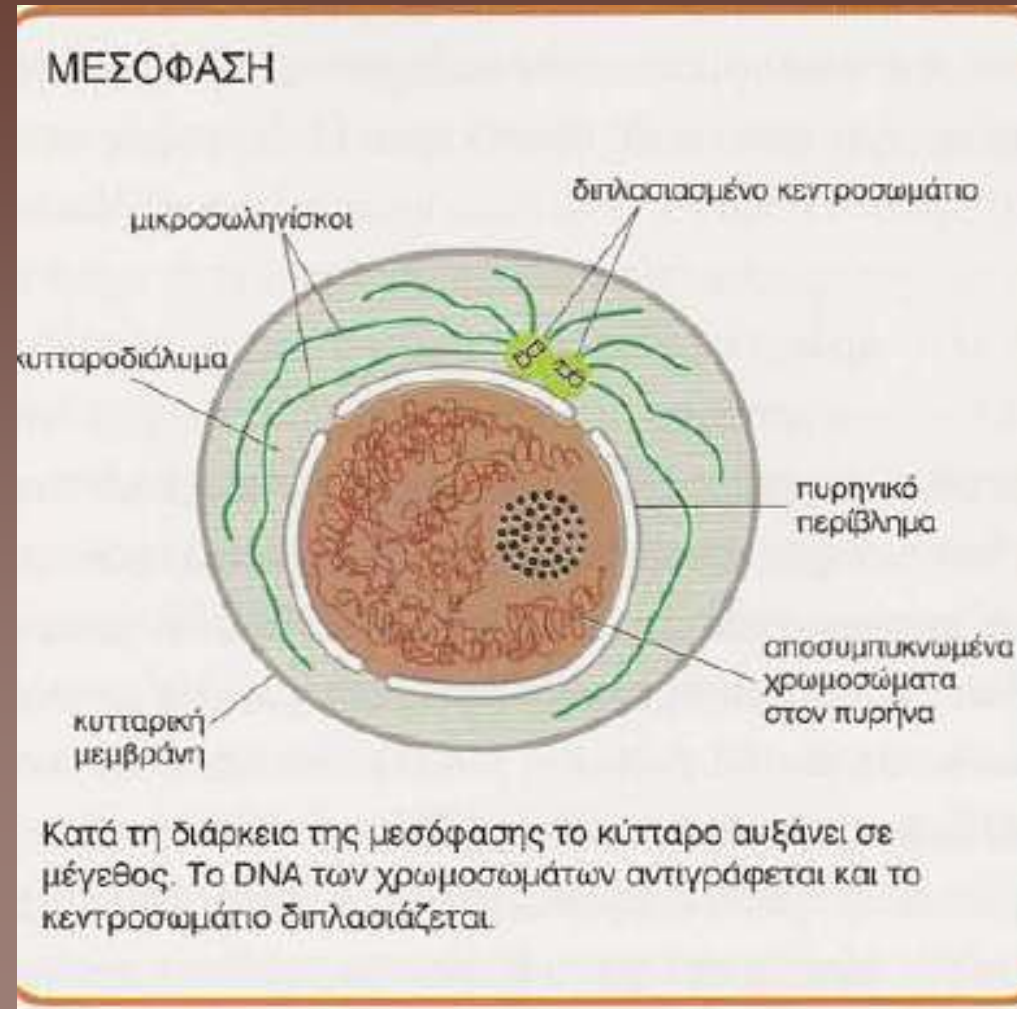
Anaphase



Telophase



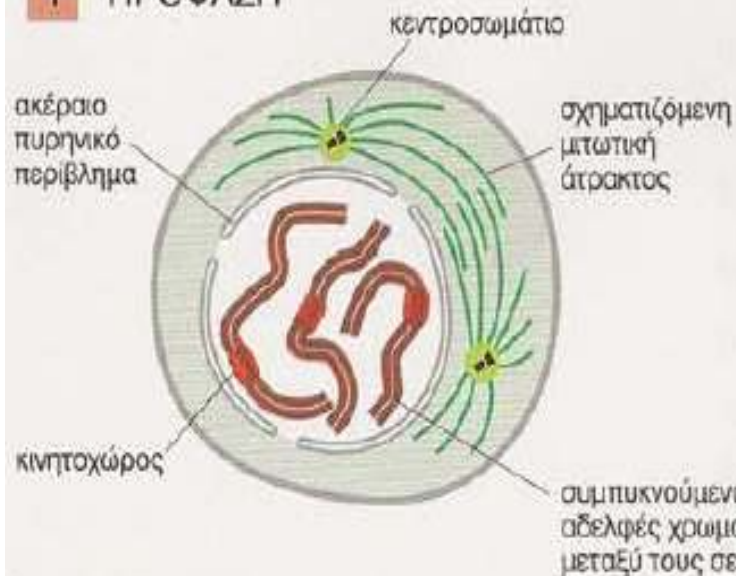
ΜΕΣΟΦΑΣΗ



ΠΡΟΦΑΣΗ - Prophase

- ◆ Τα αντιγραμμένα χρωμοσώματα συμπυκνώνονται και η μιτωτική άτρακτος αρχίζει να συναρμολογείται έξω από τον πυρήνα.

1 ΠΡΟΦΑΣΗ



Κατά την πρόφαση, κάθε διπλασιασμένο χρωμόσωμα που αποτελείται από δύο αδελφές χρωματίδες συμπυκνώνεται. Έξω από τον πυρήνα συναρμολογείται η μιτωτική άτρακτος ανάμεσα στα δύο κεντροσωμάτια που έχουν αντιγραφεί και απομακρυνθεί το ένα από το άλλο.

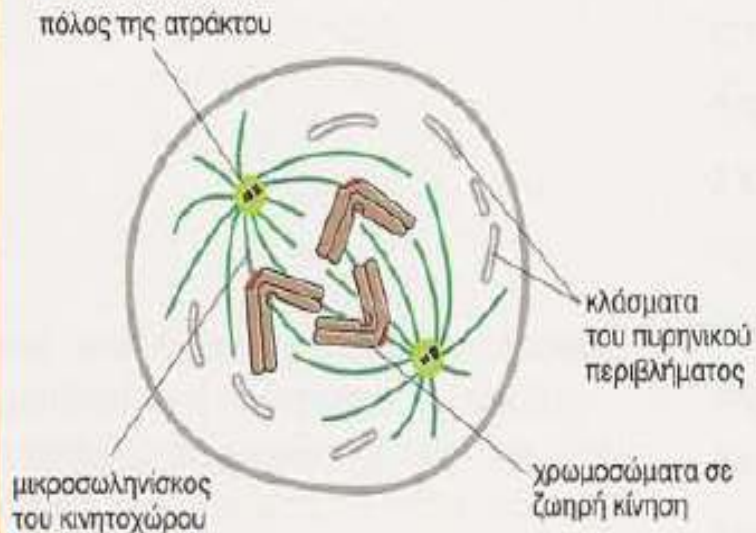


χρόνος = 0 min

ΠΡΟΜΕΤΑΦΑΣΗ - Prometaphase

- ◆ Το πυρηνικό περίβλημα θρυμματίζεται, οπότε οι μικροσωληνίσκοι της ατράκτου, μπορούν πλέον να προσδεθούν στα χρωμοσώματα.

2 ΠΡΟΜΕΤΑΦΑΣΗ



Η προμετάφαση αρχίζει απότομα με την αποδόμηση του πυρηνικού περιβλήματος. Τα χρωμοσώματα μπορεί πλέον να προσδεθούν στους μικροσωληνίσκους της ατράκτου μέσω των κινητοχώρων τους και να μετακινηθούν.



χρόνος = 79 min

Μετάφαση - Metaphase

- ◆ Η μιτωτική άτρακτος συγκεντρώνει όλα τα χρωμοσώματα στο κέντρο της (ισημερινός)

3 ΜΕΤΑΦΑΣΗ



Κατά τη **μετάφαση** τα χρωμοσώματα παρατάσσονται στον ισημερινό της ατράκτου, στο μέσον της απόστασης ανάμεσα στους πόλους της. Οι ζευγαρωμένοι μικροσωληνίσκοι των κινητοχώρων πάνω σε κάθε χρωμόσωμα συνάπτονται στους αντίθετους πόλους της ατράκτου.

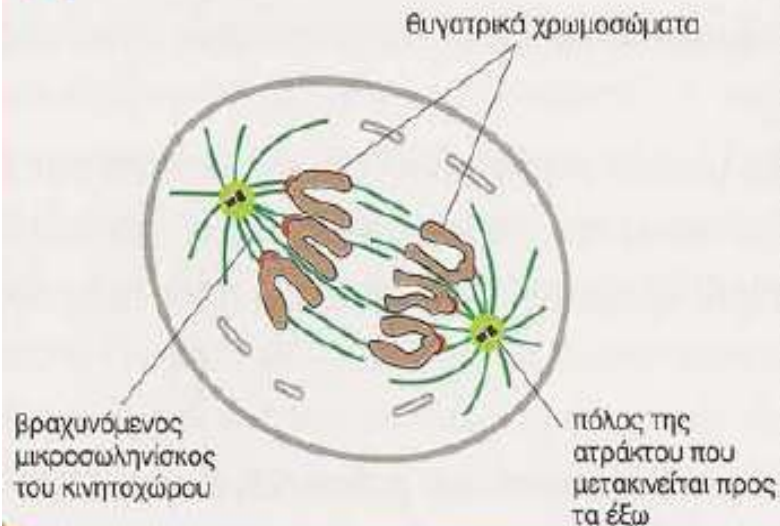


χρόνος = 250 min

Ανάφαση - Anaphase

- ◆ Οι δύο αδερφές χρωματίδες κάθε αντιγραμμένου χρωμοσώματος διαχωρίζονται και συγχρόνως έλκονται από την άτρακτο στους 2 αντίθετους πόλους του κυττάρου.

4 ΑΝΑΦΑΣΗ



Κατά την **ανάφαση** οι ζευγαρωμένες χρωματίδες διαχωρίζονται συγχρονισμένα, έτσι ώστε να σχηματιστούν δύο θυγατρικά χρωμοσώματα. Κάθε χρωματίδη έλκεται αργά προς τον σύστοιχο πόλο της άτρακτου. Οι μικροσωληνίσκοι των κινητοχώρων βραχυνονται και ταυτόχρονα οι πόλοι της άτρακτου απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο. Οι δύο αυτές διεργασίες συμβάλλουν στο διαχωρισμό των χρωμοσωμάτων.

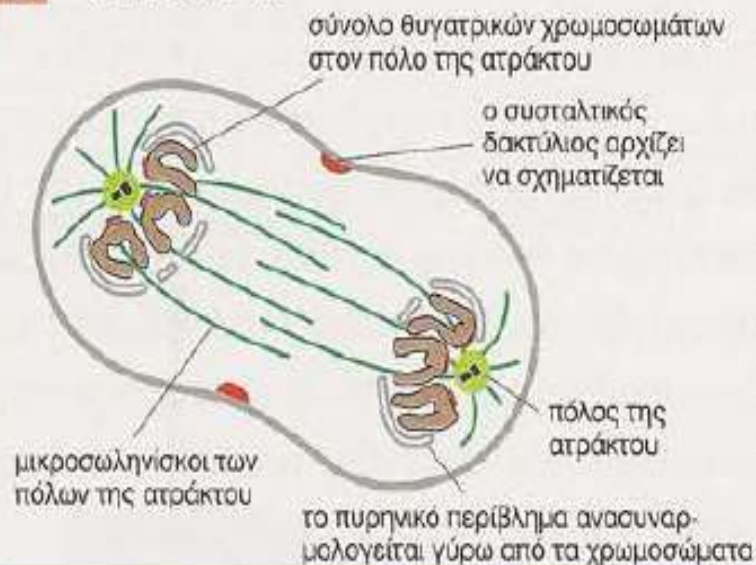


χρόνος = 279 min

Τελόφαση - Telophase

- ◆ Γύρω από την κάθε ομάδα των διαχωρισμένων χρωμοσωμάτων ανασυναρμολογείται ένα πυρηνικό περίβλημα ώστε να σχηματιστούν 2 πυρήνες.

5 ΤΕΛΟΦΑΣΗ



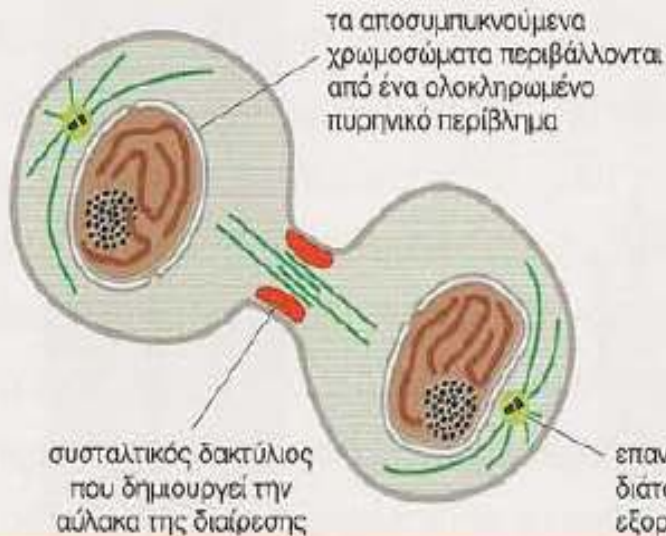
Κατά τη διάρκεια της **τελόφασης** οι δύο ομάδες των θυγατρικών χρωμοσωμάτων φτάνουν στους πόλους της ατράκτου. Γύρω από κάθε ομάδα συναρμολογείται ένα νέο πυρηνικό περίβλημα και έτσι ολοκληρώνεται ο σχηματισμός των δύο πυρήνων και σηματοδοτείται το τέλος της μίτωσης. Η διαίρεση του κυτταροπλάσματος αρχίζει με τη συναρμολόγηση του συσταλτικού δακτυλίου.



Κυτταροκίνηση

- ◆ Ολοκληρώνεται στο τέλος της τελόφασης οπότε ο πυρήνας και το κυτταρόπλασμα κάθε θυγατρικού κυττάρου επανέρχονται στη μεσόφαση.
- ◆ Σηματοδοτεί το τέλος της Φάσης Μ.

6 ΚΥΤΤΑΡΟΚΙΝΗΣΗ



Κατά τη διάρκεια της **κυτταροκίνησης** ενός ζωικού κυττάρου, το κυτταρόπλασμα διαιρείται στα δύο από τον συσταλτικό δακτύλιο ακτίνης και μιοσίνης που περισφίγγει το κύτταρο για να δημιουργήσει δύο θυγατρικά κύτταρα, το καθένα με το δικό του πυρήνα.

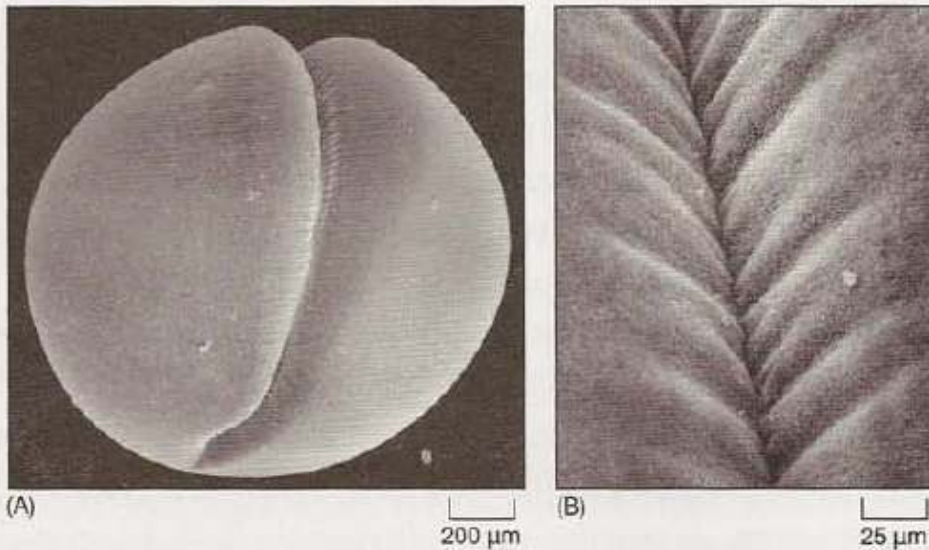


χρόνος = 362 min

Κυτταροκίνηση

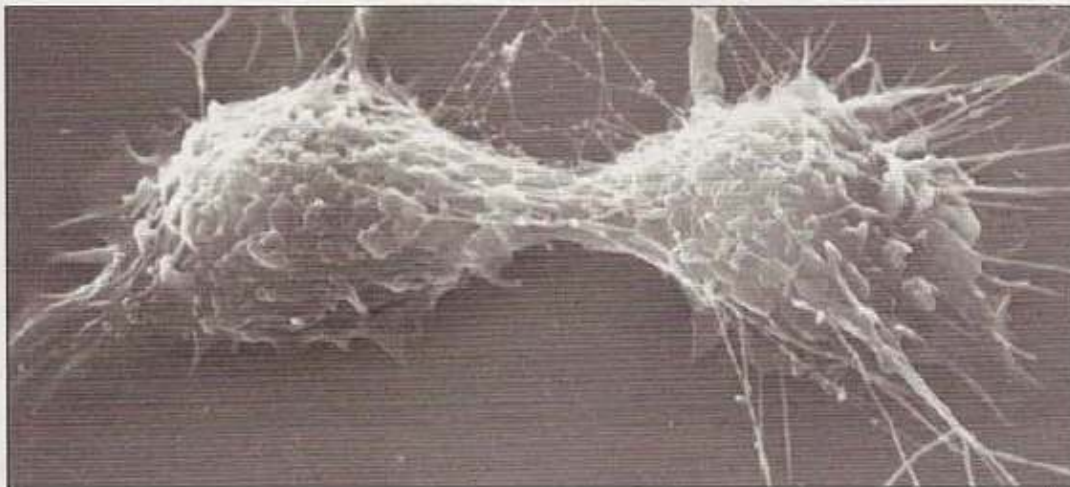
- ◆ Το επίπεδο αυλάκωσης και η χρονική εξέλιξη της κυτταροκίνησης καθορίζονται από τη μιτωτική άτρακτο.
- ◆ Η πρώτη ορατή ένδειξη είναι η συρρίκνωση και η αυλάκωση της κυτταρικής μεμβράνης κατά την ανάφαση.
- ◆ Η αυλάκωση συμβαίνει πάντα κάθετα προς τον επιμήκη άξονα της μιτωτικής ατράκτου.
- ◆ Ο **συσταλτικός δακτύλιος** αποτελείται από ινίδια ακτίνης και μυοσίνης.

Κυτταροκίνηση



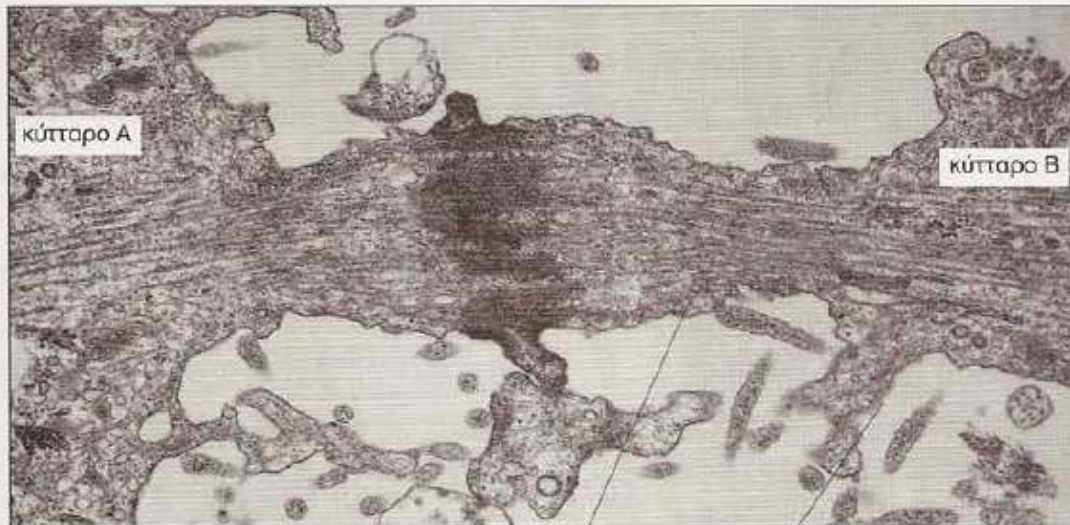
Εικόνα 19-19. Ηλεκτρονιομικρογραφία σά-
ρωσης της πρώιμης αυλάκωσης σ' ένα γονι-
μοποιημένο ωάριο βατράχου. Η αυλάκωση
της κυτταρικής μεμβράνης προκαλείται από
τη δράση του υποκείμενου συσταλτικού δα-
κτυλίου. Η αύλακα της διαίρεσης είναι ασυνή-
θιστα σαφής σε αυτό το γιγαντιαίο σφαιρικό
κύτταρο. (A) Άποψη της επιφάνειας του ωαρί-
ου σε μικρή μεγέθυνση. (B) Η επιφάνεια σε με-
γαλύτερη μεγέθυνση. (Από H.W. Beams και
R.G. Kessel, *Am. Sci* 36:270-290, 1976).

Κυτταροκίνηση



(Α)

10 μm

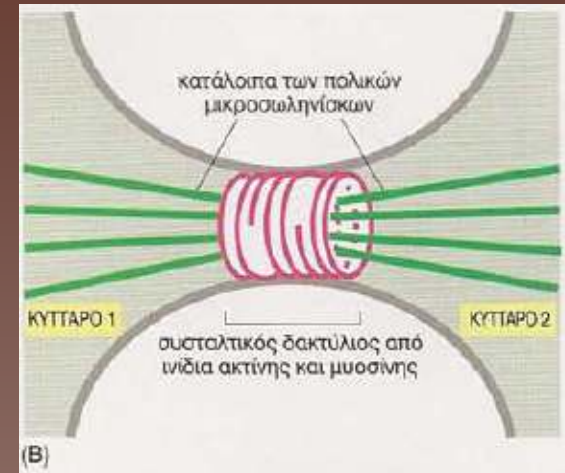


(Γ)

μικροσωληνίσκοι που απέμειναν
ανάμεσα στους πόλους

κυτταρική
μεμβράνη

1 μm



(Β)

Εικόνα 19-20. Ο συσταλτικός δακτύλιος. (Α) Ηλεκτρονιομικρογραφία σάρωσης ενός ζωικού κυττάρου σε καλλιέργεια κατά τα τελευταία στάδια της διαίρεσης. (Β) Σχηματική απόδοση της μεσαίας περιοχής ενός παρόμοιου κυττάρου. Εμφανίζεται ο συσταλτικός δακτύλιος κάτω από την κυτταρική μεμβράνη και τα κατάλοιπα των δύο ομάδων των πολικών μικροσωληνίσκων. (Γ) Συμβατική ηλεκτρονιομικρογραφία ενός διαιρούμενου ζωικού κυττάρου. Η αυλάκωση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί, αλλά τα θυγατρικά κύτταρα παραμένουν συνδεδεμένα με μια λεπτή κυτταροπλασματική γέφυρα που περιέχει τα κατάλοιπα των επικαλυπτόμενων πολικών μικροσωληνίσκων της κεντρικής ατράκτου. (Α, με την άδεια του Guenter Albrecht-Buehler. Γ, με την άδεια του J.M. Mullins).

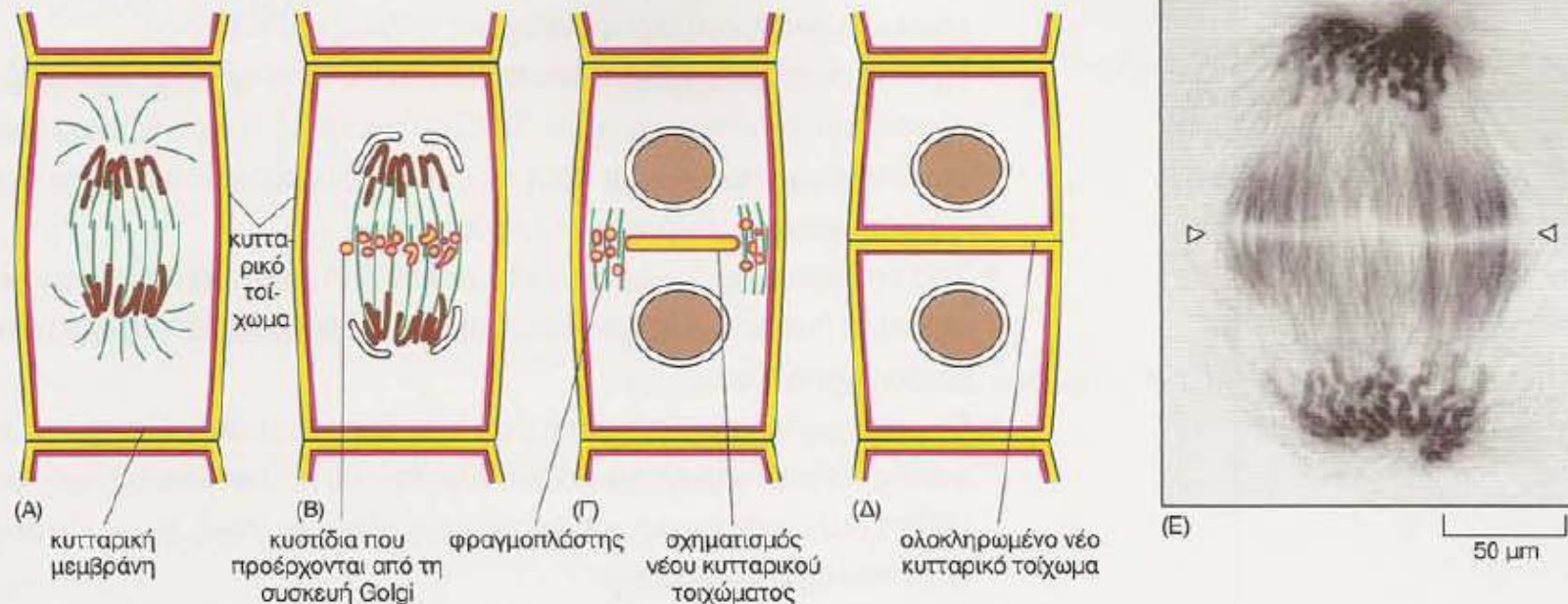
Κυτταροκίνηση – Συσταλτικός Δακτύλιος

- ◆ Συναρμολογείται κατά την ανάφαση και προσκολλάται σε πρωτεΐνες που βρίσκονται στην κυτταροπλασματική πλευρά της κυτταρικής μεμβράνης.
- ◆ Είναι μία πρόσκαιρη δομή: συναρμολογείται για να επιτελέσει την κυτταροκίνηση και σταδιακά απομακρύνεται καθώς εξελίσσεται η κυτταροκίνηση και αποσυναρμολογείται τελείως μόλις διαιρεθεί το κύτταρο.

Κυτταροκίνηση – Φυτικά κύτταρα

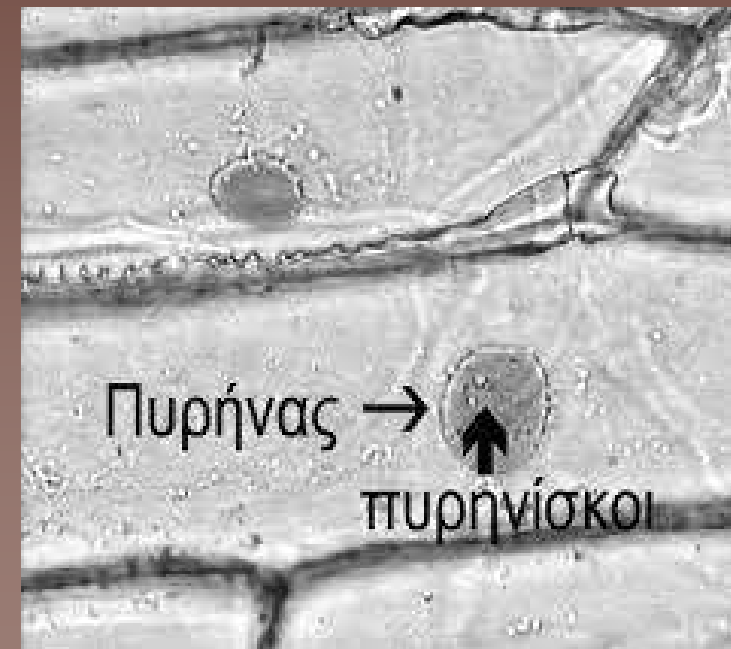
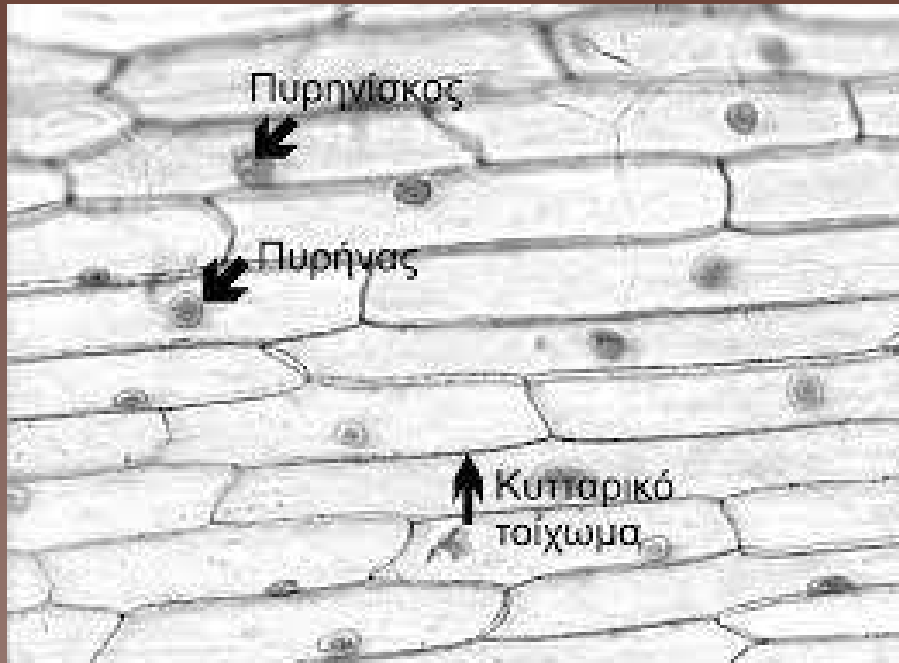
- ◆ Τα δύο θυγατρικά κύτταρα διαχωρίζονται από την κατασκευή ενός νέου τοιχώματος στο εσωτερικό του διαιρούμενου κυττάρου.
- ◆ Το νέο κυτταρικό τοίχωμα αρχίζει να συναρμολογείται στο κυτταρόπλασμα ανάμεσα στις δύο ομάδες των διαχωρισμένων χρωμοσωμάτων στην αρχή της τελόφασης.
- ◆ Η διεργασία συναρμολόγησης καθοδηγείται από το **φραγμοπλάστη (phragmoplast)**, μία δομή που σχηματίζεται από τα κατάλοιπα των διαπολικών μικροσωλινίσκων στον ισημερινό της παλιάς μιτωτικής ατράκτου.

Κυτταροκίνηση – Φυτικά κύτταρα

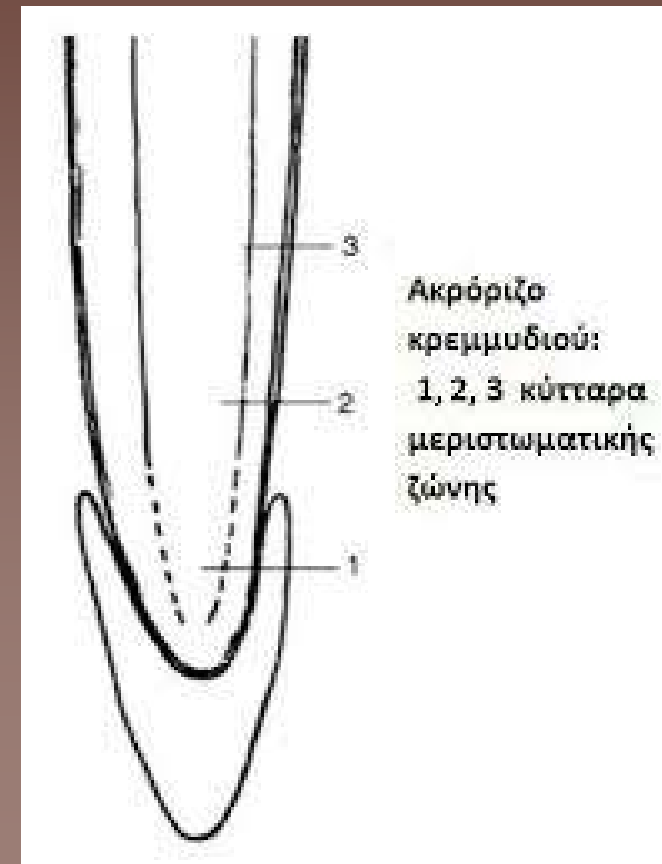
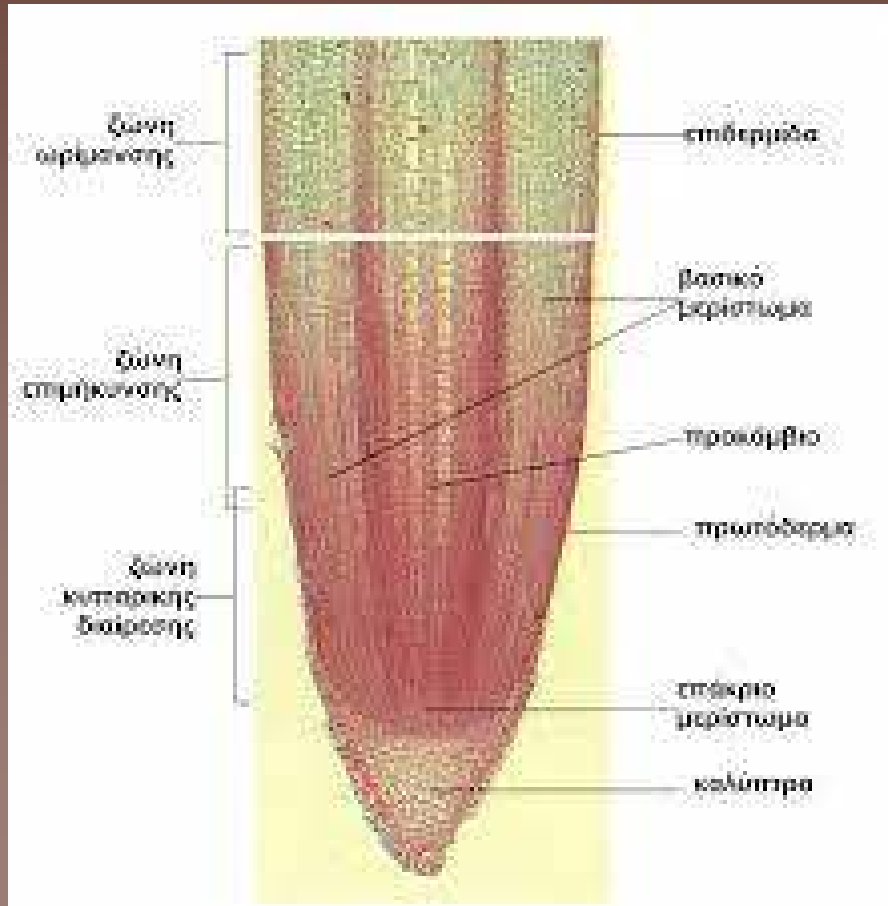


Εικόνα 19-22. Η κυτταροκίνηση σ' ένα φυτικό κύτταρο. Στην αρχή της τελόφασης, ενώ τα χρωμοσώματα έχουν ήδη διαχωριστεί (Α), ένα νέο κυτταρικό τοίχωμα αρχίζει να σχηματίζεται μέσα στο κύτταρο, στον ισημερινό της παλαιάς ατράκτου (Β). Οι πολικοί μικροσωληνίσκοι της μιτωτικής ατράκτου που απομένουν και κατά την τελόφαση σχηματίζουν τον φραγμοπλάστη και καθοδηγούν τα κυστιδία προς το κέντρο της ατράκτου. Εδώ, μεμβρανικά κυστιδία που προέρχονται από τη συσκευή Golgi και είναι γεμάτα με υλικό του κυτταρικού τοιχώματος συντήκονται για να σχηματίσουν το νέο κυτταρικό τοίχωμα (Γ), το οποίο αναπτύσσεται προς την περιφέρεια για να φτάσει στην κυτταρική μεμβράνη και στο αρχικό κυτταρικό τοίχωμα. Η κυτταρική μεμβράνη και η μεμβράνη που περιβάλλει το νέο κυτταρικό τοίχωμα (και οι δύο με κόκκινο χρώμα) συντήκονται και έτσι διαχωρίζουν πλήρως τα δύο θυγατρικά κύτταρα (Δ). Στο (Ε) παρουσιάζεται μια μικρογραφία ενός φυτικού κυττάρου σ' ένα στάδιο της τελόφασης που αντιστοιχεί στο (Β). Το κύτταρο έχει χρωσθεί έτσι ώστε να αναδειχθούν τόσο οι μικροσωληνίσκοι όσο και οι δύο ομάδες των θυγατρικών χρωμοσωμάτων. Η εντόπιση του αυξανόμενου νέου κυτταρικού τοιχώματος υποδηλώνεται από τις αιχμές των βελών. (Ε. Με την άδεια του Andrew Bajer).

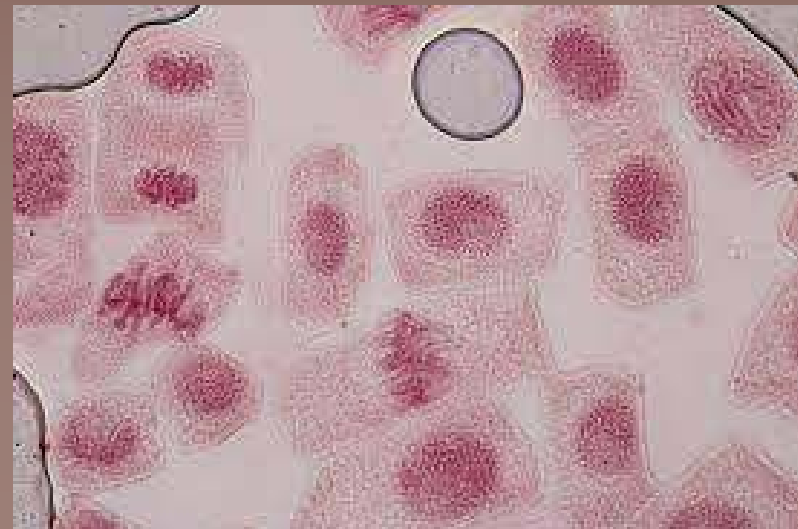
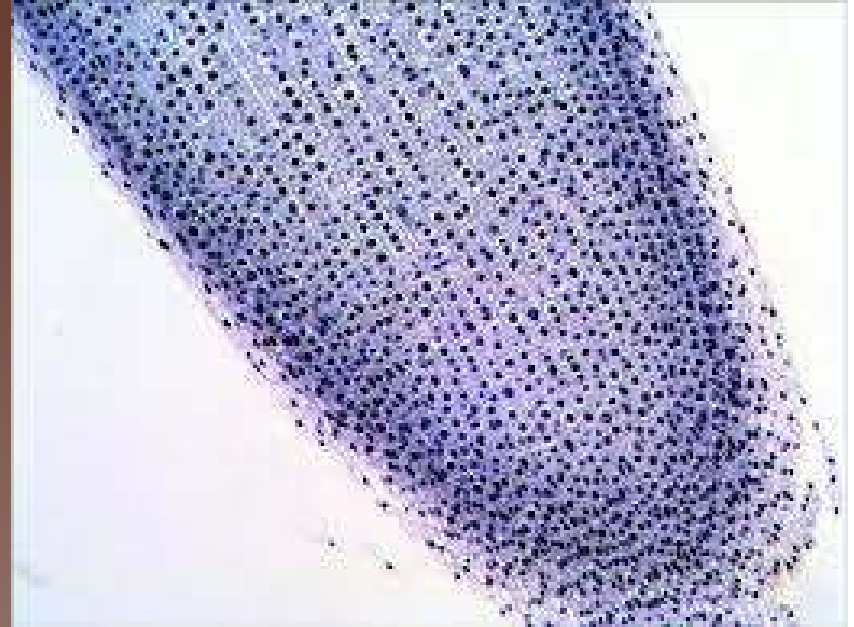
Κύτταρα Κρεμμυδιού στο Οπτικό Μικροσκόπιο



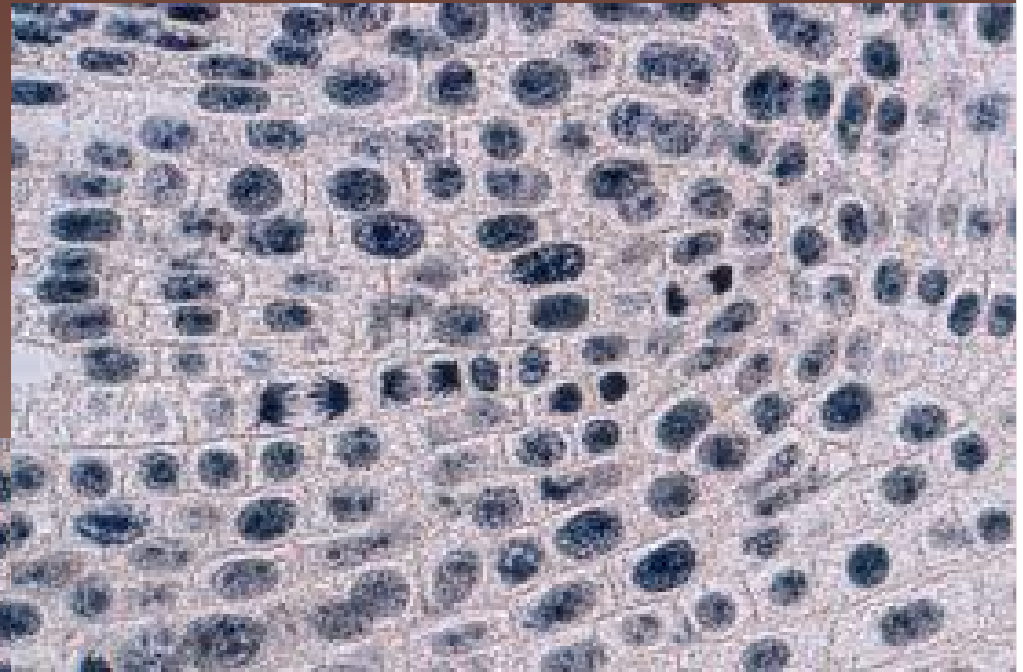
Ακρορρίζιο Κρεμμυδιού



Μίτωση στο Οπτικό Μικροσκόπιο



Μίτωση στο Οπτικό Μικροσκόπιο



Βιβλιογραφία

- ◆ Alberts et.al. 2015. Βασικές Αρχές Κυτταρικής Βιολογίας. Κεφάλαιο 18: Ο Κύκλος της Κυτταρικής Διαίρεσης (3^η Έκδοση). Εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης
- ◆ Cooper GM και Hausman RE. 2011. Το κύτταρο: Μία Μοριακή Προσέγγιση. Κεφάλαιο 16: Ο Κυτταρικός κύκλος Ακαδημαϊκές Εκδόσεις Ι.Μπάσδρα και ΣΙΑ Ο.Ε.