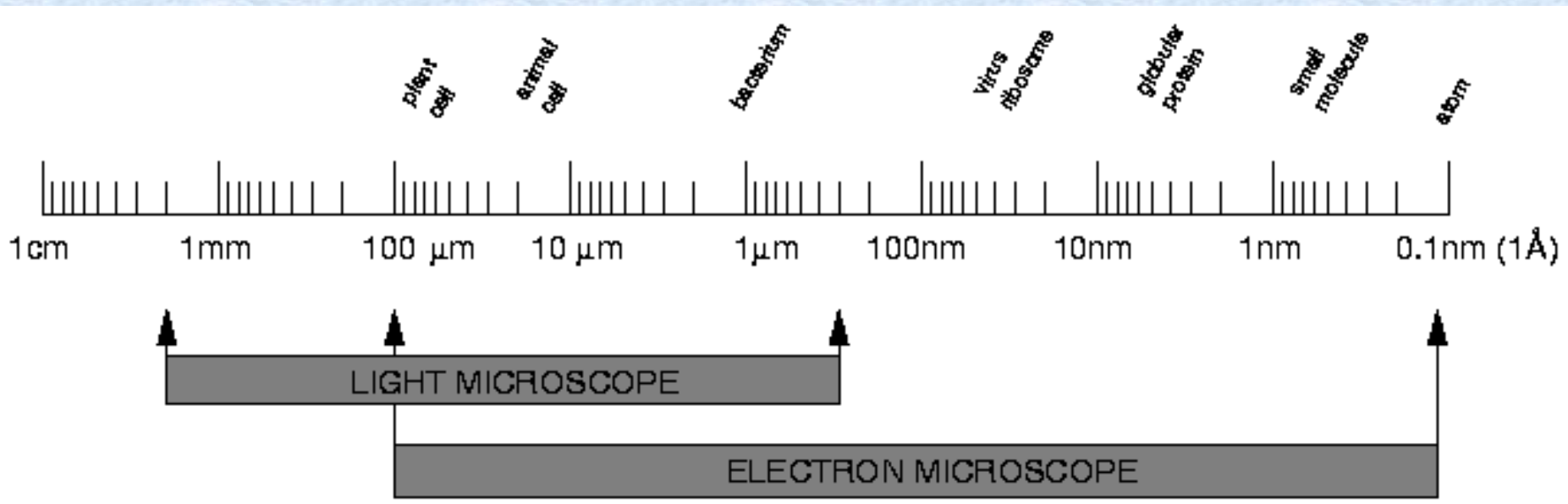
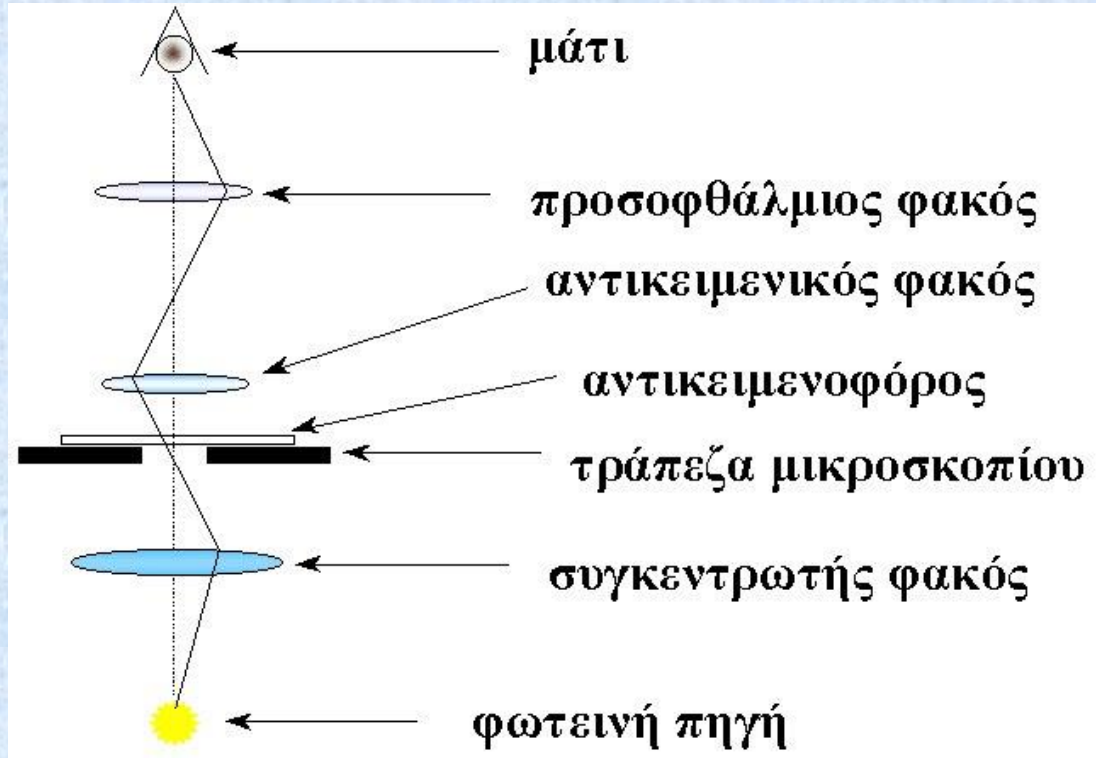


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Μικροσκόπηση είναι η τέχνη και επιστήμη της παρατήρησης αντικειμένων τόσο μικρών, που ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν μπορεί να διακρίνει





Στην ερώτηση «σε τι υπερέχει το Ηλεκτρ. Μ. έναντι του Οπτ. Μ.» οι περισσότεροι απαντούν: **Μεγέθυνση.**

Η απάντηση αν και σωστή είναι δευτερεύουσας σημασίας. Ο κύριος λόγος είναι η:

**Διακριτική Ικανότητα**: Η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων του δείγματος που μπορεί να διακριθούν ως δύο ξεχωριστές οντότητες.

Το Ο.Μ. διακρίνει μέχρι ενός ορίου, το οποίο δεν έχει να κάνει με το πόσο τέλειο ή όχι είναι το όργανο, αλλά με την **φύση του φωτός.**

Ο **Ernst Abbe** απέδειξε ότι φως μήκους κύματος  $\lambda$  που ταξιδεύει σε μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$  και συγκλίνει σε ένα σημείο με γωνία, θα σχηματίσει ένα spot με ακτίνα:

$$d = 0.61 \lambda / n \eta\mu\theta$$

Αριθμητικό άνοιγμα  $A = n \eta\mu\theta$

Εφ' όσο λοιπόν το φως που χρησιμοποιούν τα οπτικά μικροσκόπια συνήθως έχει ένα μέσο μήκος κύματος  $\lambda=500 \text{ nm}$  και το αριθμητικό άνοιγμα (A) ενός πολύ καλού φακού είναι 1.6, τότε η διακριτική ικανότητα του οπτικού μικροσκοπίου δε μπορεί να ξεπεράσει τα  $d=200 \text{ nm}=0.2 \text{ }\mu\text{m}$  και η "χρήσιμη μεγέθυνση" περίπου τη τιμή 1600X.

Ο τύπος λοιπόν μας λέει πως για να καλυτερέψουμε τη διακριτική ικανότητα θα πρέπει να μικρύνουμε το  $\lambda$  και να αυξήσουμε το A.

Επειδή το ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητο μόνο στο ορατό μέρος της Η/Μ ακτινοβολίας, είμαστε αναγκασμένοι να το χρησιμοποιούμε για να σχηματίσουμε το κατάλληλο είδωλο μέσα στον εγκέφαλο.

Αλλά έτσι οι πληροφορίες που μπορούμε να συλλέξουμε περιορίζονται από το μήκος κύματος του φωτός.

*Δεν μπορούμε να δούμε αντικείμενα σε μέγεθος μικρότερο από το  $\frac{1}{2}$  του  $\lambda$  του φωτός δηλ.*

$\frac{1}{2}$  των  $\sim 500\text{nm} = 250 \text{ nm}$  όσο τέλειο και αν είναι το Ο.Μ.

Πώς λοιπόν μπορούμε να αυξήσουμε την διακριτική ικανότητα έτσι ώστε να συλλέξουμε περισσότερες πληροφορίες για το χώρο γύρω μας?

**Λύση:** Χρήση ακτινοβολίας με μικρότερο μήκος κύματος

Εντούτοις δημιουργούνται τα παρακάτω προβλήματα αν χρησιμοποιήσουμε φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος:

1. Το μάτι δεν είναι ευαίσθητο σε ακτινοβολίες UV με  $\lambda < 400\text{nm}$
2. Ακτινοβολίες με  $\lambda < \text{U.V.}$  δεν ανακλώνται ούτε κάμπτονται για τον σχηματισμό ειδώλων
3. Έχουν μεγάλη ενέργεια, επομένως ακατάλληλες για π.χ. βιολογικά παρασκευάσματα.



Η ηλεκτρονική μικροσκοπία εκμεταλλεύεται την κυματική φύση των ταχέων κινουμένων ηλεκτρονίων.

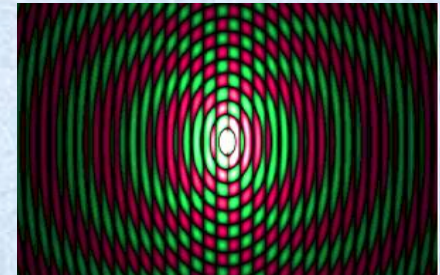
Έτσι, ενώ το ορατό φως καλύπτει περιοχή μηκών κύματος από 4000 έως 7000 Angstroms, τα ηλεκτρόνια επιταχυνόμενα σε 10000 keV έχουν ένα μήκος κύματος 0,12 Angstroms

# Κυματικές ιδιότητες σωματιδίων

Το 1924, ο Louis de Broglie πρότεινε την κυματική φύση των ηλεκτρονίων.

Για κάθε σωματίδιο ύλης με μάζα  $m$  και ταχύτητα  $v$  συνυπάρχει και η κυματική συνιστώσα που συνδέεται με την ορμή μέσω της εξίσωσης:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

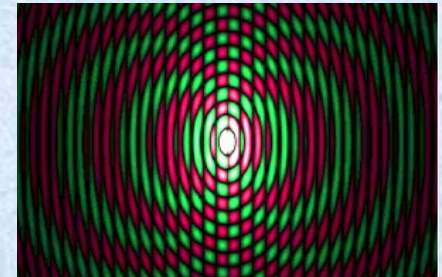


# Γιατί ηλεκτρόνια

Ένα ηλεκτρονιοσκόπιο χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων αντί για φως για την απεικόνιση αντικειμένων.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Louis-Victor Pierre Raymond  
de Broglie (1892 – 1987).  
Nobel Prize in Physics (**1929**)



# Γιατί ηλεκτρόνια

Τα ηλεκτρόνια έχουν φορτίο και μπορούν να επιταχυνθούν σε ένα ηλεκτρικό πεδίο με διαφορά δυναμικού. Αν η ενέργεια που αποκτά είναι  $eV$ , αυτή εξισώνεται σε κινητική

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad \text{όπου } V \text{ (σε Volts) είναι το δυναμικό}$$

Η ορμή είναι

$$mv = \sqrt{2meV}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \Rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{h^2}{2m \times e \times V}}$$

## Άσκηση

Εκτιμήστε το μήκος κύματος ηλεκτρονίων που έχουν επιταχυνθεί από την ηρεμία μέσω μιας διαφοράς δυναμικού 40 kV.

## Απάντηση

Για να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση de Broglie, πρέπει να ξέρουμε την ορμή του ηλεκτρονίου.

$$e\Delta\phi = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}, \quad \text{όπου } p \text{ είναι η ορμή.}$$

Υπολογίζουμε την ορμή  $p$ .

$$\lambda = h / p$$

$$1 \text{ V C} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

Οπότε, βρέθηκε η λύση του προβλήματος με την **χρήση ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ**, η δέσμη των οποίων διαθλάται και κάμπτεται για τον σχηματισμό ειδώλων

Το  $\lambda$  δέσμης ηλεκτρονίων είναι 100 χιλιάδες φορές μικρότερο του αντίστοιχο της ορατής ακτινοβολίας

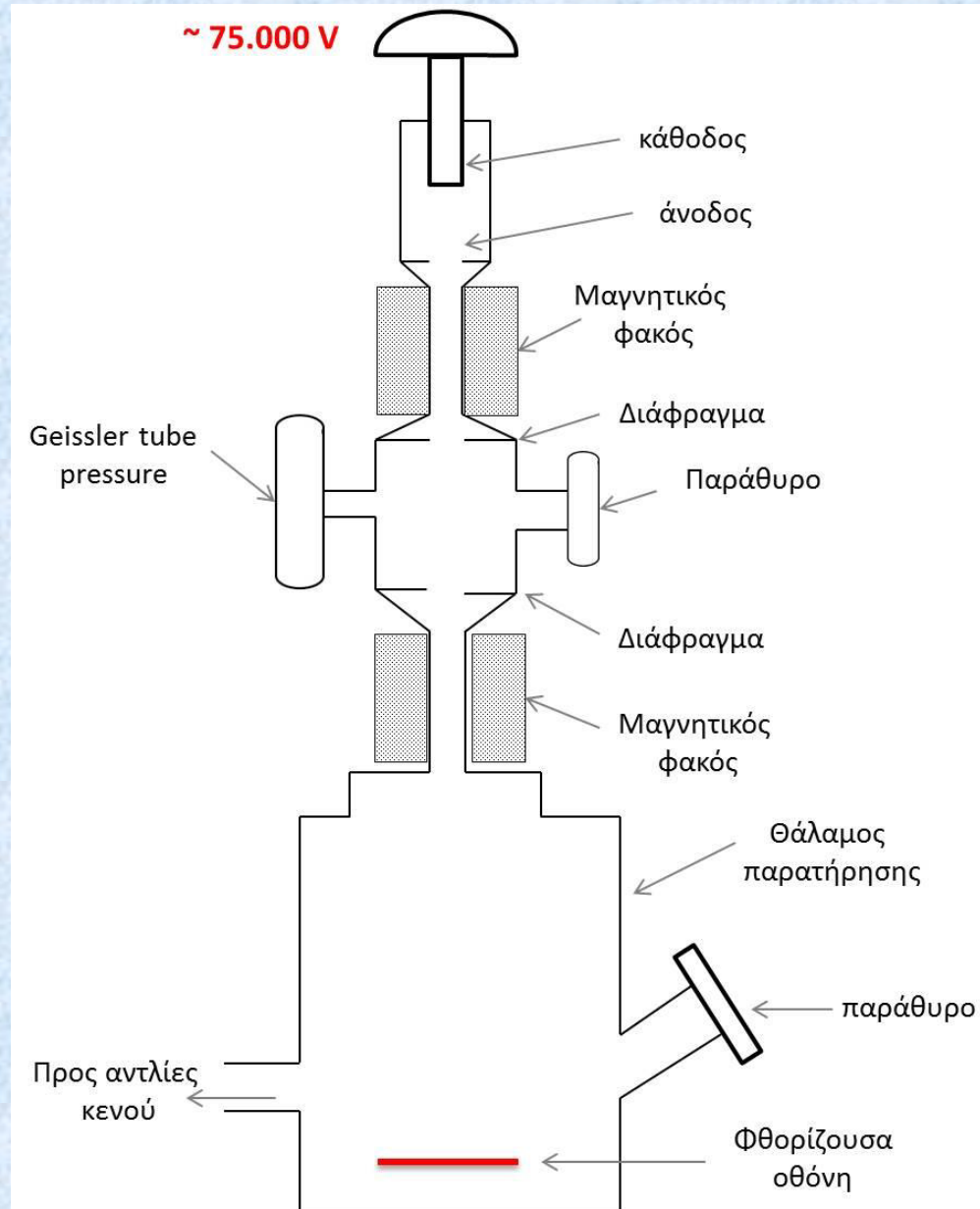
Το βασικό πλεονέκτημα από την χρήση ηλεκτρονίων είναι ότι οι οπτικές αρχές είναι ίδιες με το Ο.Μ. δηλαδή υπακούουν στις αρχές του φωτός. Έτσι η κατανόηση του Η.Μ. προϋποθέτει γνώση και κατανόηση της αρχής λειτουργίας του Ο.Μ.

Είναι απαραίτητο να εξετάσει κανείς πρώτα με κάποια λεπτομέρεια τους τρόπους με τους οποίους μια ενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων αντιδρά με το δείγμα. Όταν επομένως τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν επί της ύλης παρατηρούνται τα εξής φαινόμενα:

- Το δείγμα αφήνει να περάσουν ηλεκτρόνια
- Η δέσμη σαρώνει την επιφάνεια και συλλέγονται δευτερογενή ηλεκτρόνια
- Το δείγμα απορροφά ηλεκτρόνια



# Τυπική δομή οργανολογίας ηλεκτρονιακού μικροσκοπίου TEM



# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, **SEM**) εκμεταλλεύεται τις αλληλεπιδράσεις των ταχέως κινουμένων ηλεκτρονίων με το προς εξέταση δείγμα

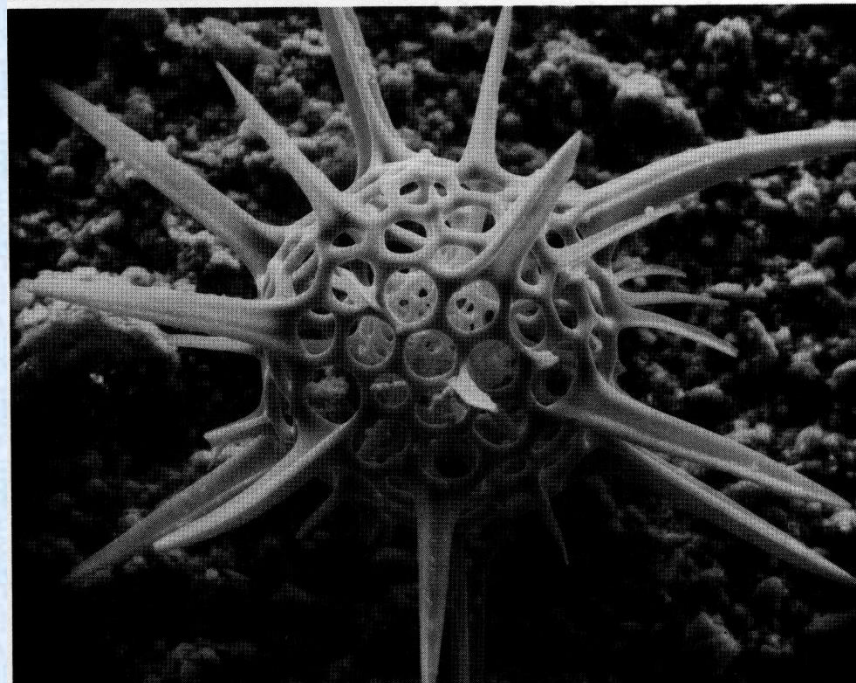
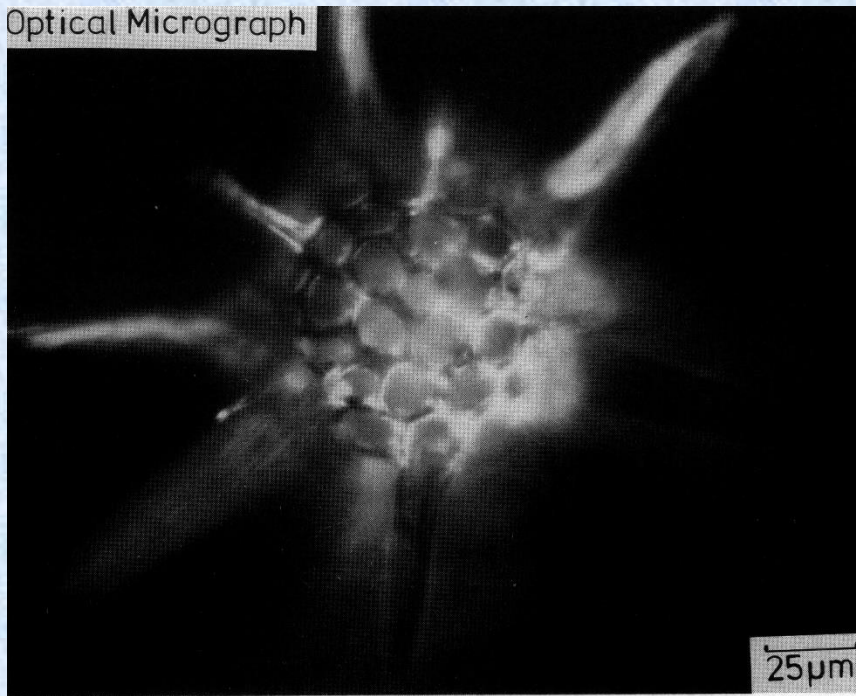
## ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Βασίζεται στην παραγωγή μιας δέσμης ηλεκτρονίων σε κενό, η οποία ευθυγραμμίζεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών συγκεντρωτικών φακών και με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών πηνίων σαρώνει όλη την επιφάνεια του δείγματος.

Η μέθοδος απεικόνισης στηρίζεται πρωταρχικά στη συλλογή των **δευτερογενών ηλεκτρονίων** που εκδιώκονται από το δείγμα μετά από μία, ή περισσότερες μη ελαστικές σκεδάσεις.

Μπορεί να βασιστεί επίσης και στη συλλογή των υψηλής ενέργειας **οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων** που παράγονται σε διεύθυνση σχεδόν  $180^\circ$  σε σχέση με τη δέσμη ηλεκτρονίων.

Optical Micrograph



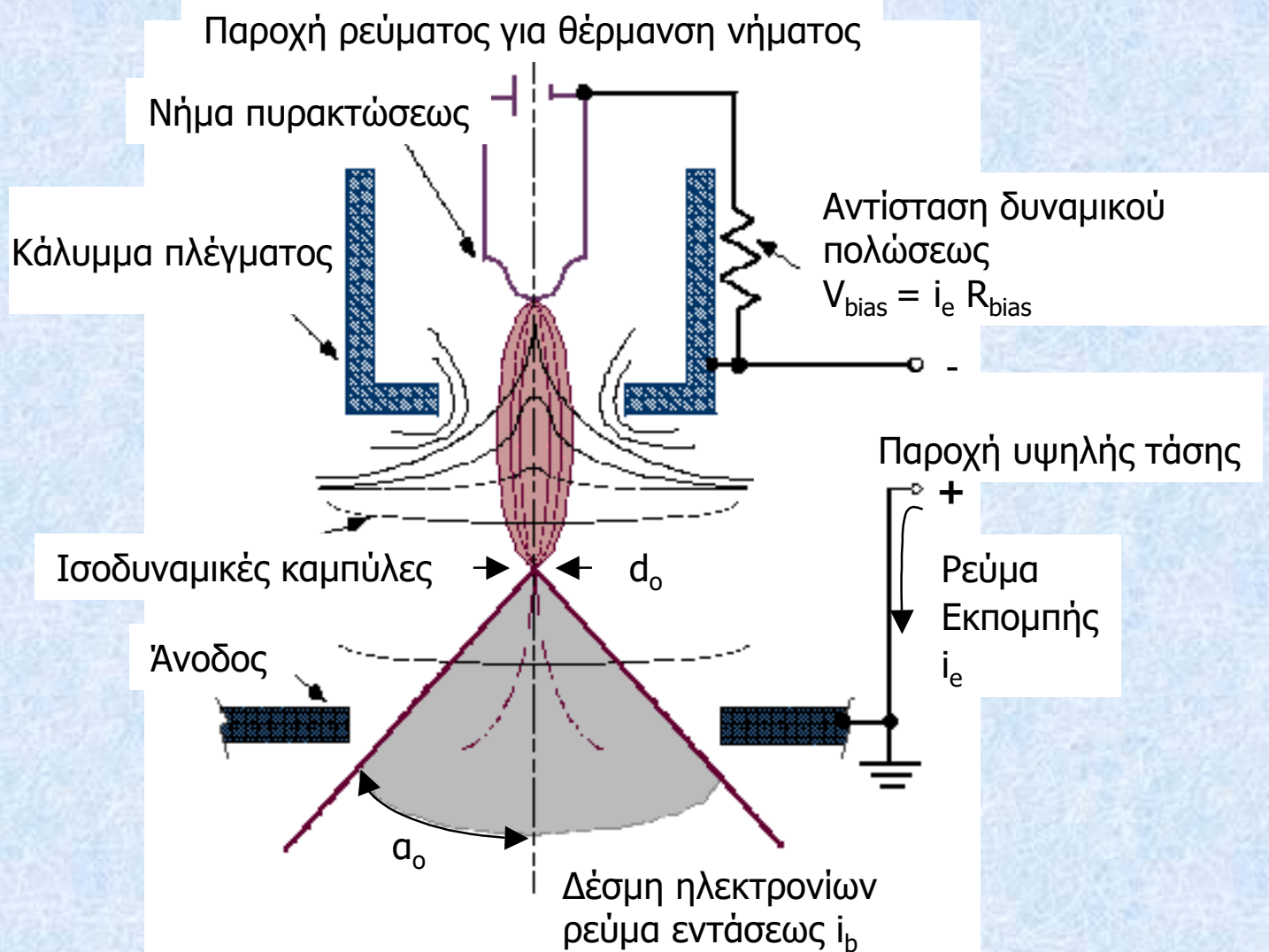
# ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ

## *Ηλεκτρονικό οπτικό σύστημα*

Αποτελείται από την πηγή ηλεκτρονίων και 2 ή περισσότερους ηλεκτρομαγνητικούς φακούς σε συνθήκες κενού.

Η πηγή παράγει ηλεκτρόνια και τα επιταχύνει δίνοντας τους ενέργεια της τάξης 1-40 keV. Οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί χρησιμοποιούνται ώστε να μειώσουν το πλάτος της δέσμης των ηλεκτρονίων και να επιτύχουν η δέσμη ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δείγμα να είναι λεπτή και καλά εστιασμένη.

Η πηγή ηλεκτρονίων είναι ουσιαστικά ένα νήμα μετάλλου (βολφράμιο) που θερμαίνεται μέσω παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και παίζει το ρόλο της καθόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την **εκπομπή ηλεκτρονίων** προς όλες τις κατευθύνσεις.



Περνώντας η δέσμη ηλεκτρονίων από την άνοδο, λόγω διαφοράς δυναμικού λαμβάνει χώρα η επιτάχυνση της δέσμης (**1-40 kV**)

Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική και ακολούθως σε κινητική

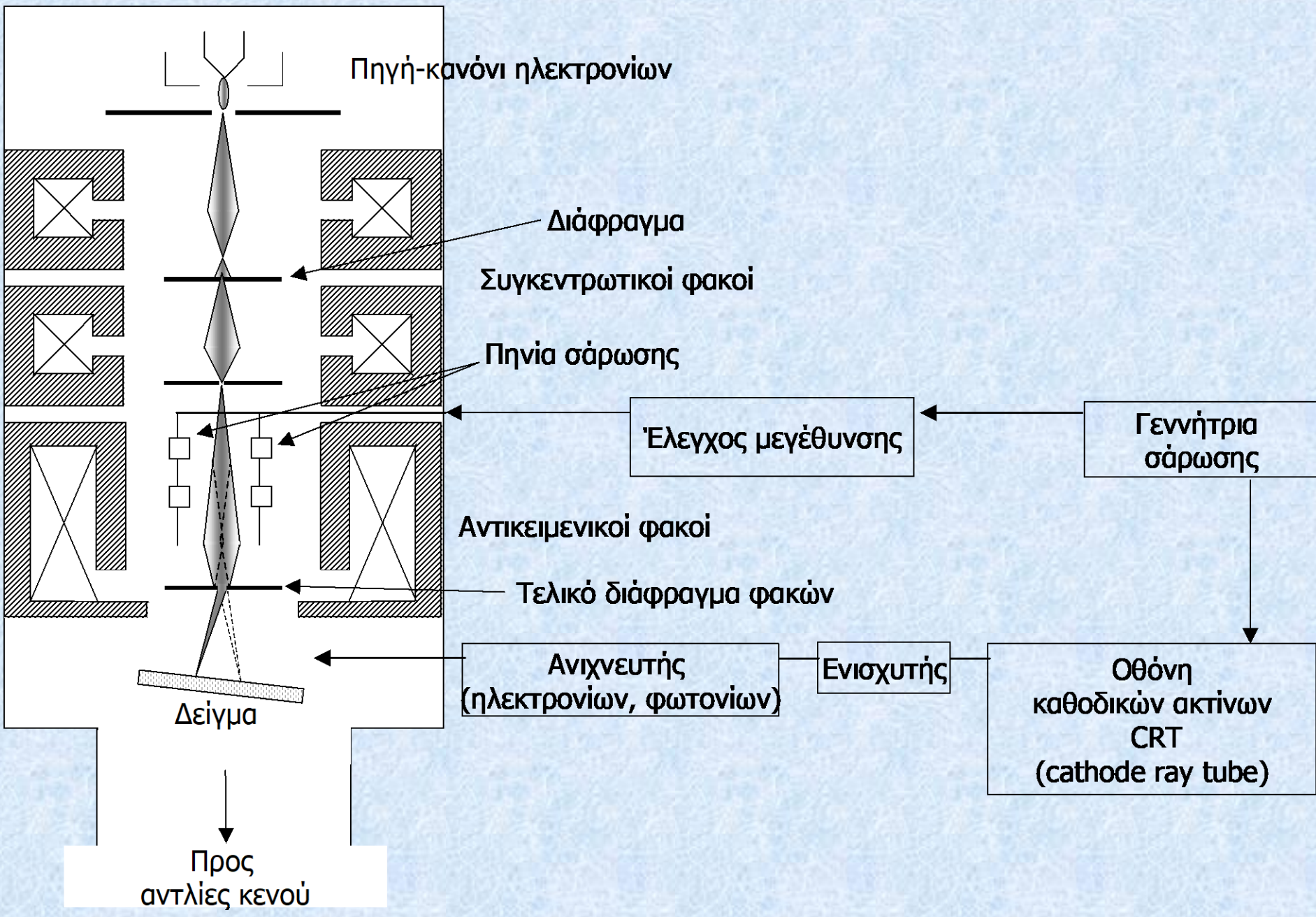
Οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί χρησιμοποιούνται μετά την πηγή ηλεκτρονίων ώστε να περιορίσουν το πλάτος της δέσμης ηλεκτρονίων στο σημείο συμβολής της πηγής ( $d_o=10-50 \mu\text{m}$  για θερμιονική πηγή) στο τελικό πλάτος δέσμης που προσπίπτει στο δείγμα ( $1 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$ ).

Τα ηλεκτρόνια μπορούν να εστιαστούν με χρήση είτε ηλεκτρικών, είτε μαγνητικών πεδίων. Τα περισσότερα ηλεκτρονικά μικροσκόπια χρησιμοποιούν Ηλεκτρομαγνητικούς φακούς οι οποίοι παρουσιάζουν λιγότερα σφάλματα-εκτροπές.



## Αντικειμενικοί φακοί

Είναι οι **τελευταίοι στη σειρά φακοί του SEM**. Ο ρόλος τους είναι να εστιάζουν την δέσμη ηλεκτρονίων σε συγκεκριμένο σημείο του δείγματος, να καθορίζουν δηλαδή το σημείο εστίασης (focus-objective) και να ελέγχουν την ταχύτητα σάρωσης αυτού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια δύο πηνίων που με τη σειρά τους ελέγχονται από τη γεννήτρια σάρωσης.



# Σύστημα ελέγχου και σάρωσης

Προκειμένου να αναπαραχθεί εικόνα, πρέπει να προσδιοριστούν οι αλληλεπιδράσεις της δέσμης με όλα τα σημεία του δείγματος.

Με τη βοήθεια ζευγών πηνίων, η δέσμη σαρώνει ένα γραμμικό πλαίσιο κουκκίδων στο δείγμα (**πλέγμα σάρωσης, raster**)

Η μεγέθυνση της εικόνας είναι ουσιαστικά ο λόγος του μεγέθους της οθόνης παρατήρησης και του γραμμικού μεγέθους του αποτυπώματος της δέσμης-σαρωτή. Έτσι, όταν ένα πλαίσιο κουκκίδων πλάτους 100  $\mu\text{m}$  στο δείγμα εμφανίζεται σε μία οθόνη πλάτους 10 cm επιτυγχάνεται μεγέθυνση 1000x.

## ΠΛΑΤΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ικανότητα ανάλυσης (resolution) προσδιορίζεται από τη διάμετρο της δέσμης ηλεκτρονίων. Πιο μικρή διάμετρος δίνει υψηλότερο resolution

Η διάμετρος δίνεται από τη σχέση

$$d = (4i_p / \beta\pi^2\alpha_f^2)^{1/2}$$

όπου  $i_p$  είναι το ρεύμα της δέσμης,  $\beta$  η φωτεινότητα της δέσμης (ελέγχεται από πηγή),  $\alpha_f$  η γωνία σύγκλισης (προσδιορίζεται από τη διάμετρο του aperture και την απόσταση μεταξύ aperture και επιφάνειας δείγματος)

Για να έχουμε ελάχιστη διάμετρο, πρέπει να αυξηθεί η φωτεινότητα και η γωνία

$$d = (4i_p / \beta \pi^2 \alpha_f^2)^{1/2}$$

# ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΓΜΑ

Όταν η δέσμη έρχεται σε επαφή με το δείγμα, λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις που γενικά χωρίζονται σε 2 κατηγορίες

α) αυτές που οφείλονται σε **ελαστικές σκεδάσεις**, όπου η ενέργεια του σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου είναι ίση με αυτή της προσπτώσεως.

β) σε **μη ελαστικές σκεδάσεις**, όπου η ενέργεια είναι μικρότερη από αυτήν της προσπτώσεως

**ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΔΥΟ, ΑΛΛΑΖΕΙ Η ΤΡΟΧΙΑ**

Μέσω **ελαστικών σκεδάσεων** παράγονται τα λεγόμενα **οπισθοσκεδαζόμενα** ηλεκτρόνια, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή εικόνας.

Η παραγωγή τέτοιου είδους ηλεκτρονίων μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος των ατόμων στα οποία πέφτει η δέσμη. Μεγάλα άτομα δείχνουν φωτεινότερα στην τελική εικόνα. Τα λαμβανόμενα σήματα ανταποκρίνονται στη χημική σύσταση του δείγματος.

Όταν η νέα τροχιά του ηλεκτρονίου σχηματίζει γωνία  $\theta=90-180^\circ$  τότε τα ηλεκτρόνια αυτά καλούνται **οπισθοσκεδαζόμενα**. Στην κατηγορία όμως αυτή ανήκουν και ηλεκτρόνια τα οποία αν και σκεδάζονται σε  $\theta < 90^\circ$ , μέσω συνδυαζόμενων φαινομένων καταφέρνουν να διαφεύγουν από το δείγμα.





# ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η υψηλή ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων επιτρέπει την εισχώρησή τους σε μεγάλο βάθος (μέχρι 450 nm) διαπερνώντας οποιαδήποτε επιφανειακή πρόσμιξη ή ακαθαρσία.

Έτσι, η παραγωγή (δραπέτευση) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων μεταβάλλεται άμεσα και μόνο **με τον ατομικό αριθμό του δείγματος**.

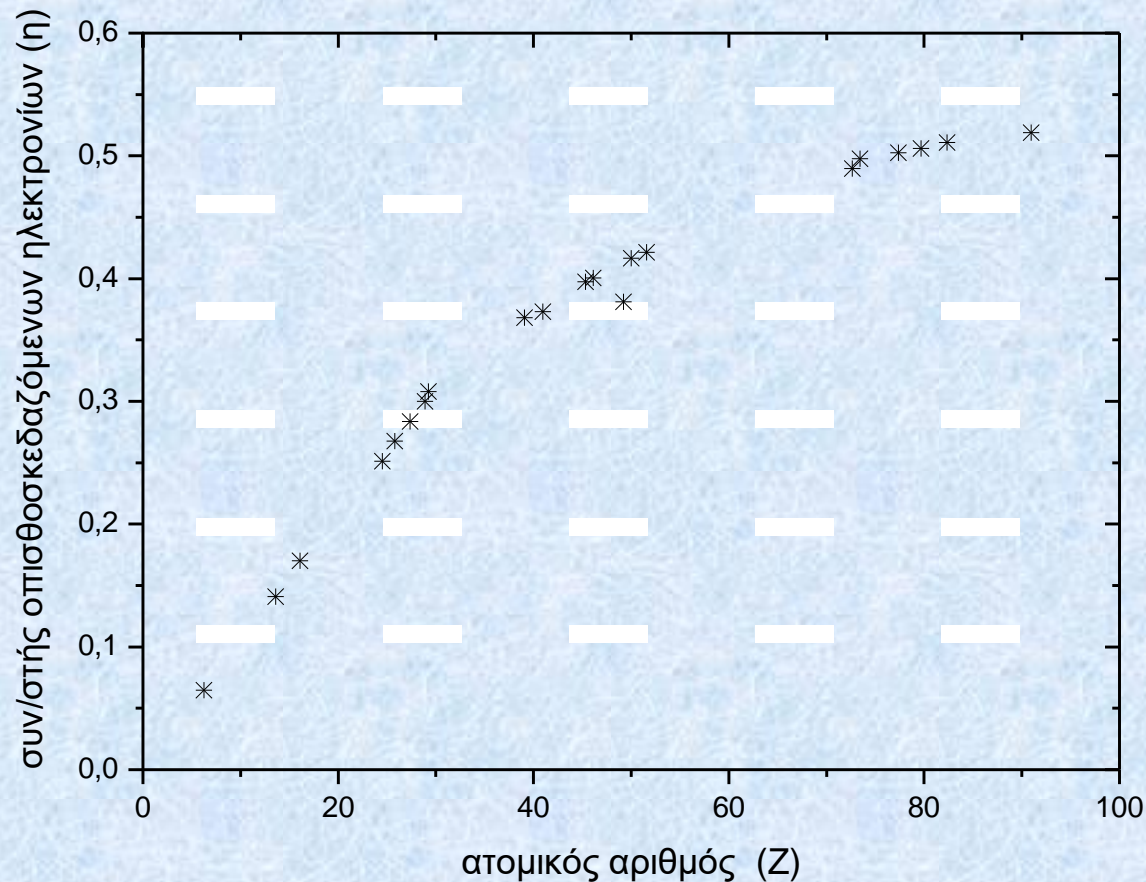
Αυτή η διαφορά στα ποσοστά παραγωγής έχει σαν αποτέλεσμα τα στοιχεία με **υψηλότερο ατομικό αριθμό να εμφανίζονται φωτεινότερα** από αυτά με χαμηλότερο ατομικό αριθμό.

# ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Αυτή η αλληλεπίδραση χρησιμοποιείται ώστε να διαφοροποιήσει τα μέρη του δείγματος που έχουν διαφορετικό μέσο ατομικό αριθμό.

Έτσι, τα λαμβανόμενα σήματα ανταποκρίνονται στη χημική σύσταση, το χημικό κοντράστ, τοπογραφικές διαφορές του δείγματος κτλ.

Παρατηρούμε επίσης ότι με την αύξηση του  $Z$  ο ρυθμός αύξησης του  $\eta$  μειώνεται και φτάνει για  $Z=70$  σε σχεδόν μηδαμινή τιμή. Έτσι, καταλήγουμε στο ότι γενικά τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι κατάλληλα για τον προσδιορισμό του χημικού κοντράστ δηλαδή της διάκρισης δύο γειτονικών διαφορετικών ατόμων κυρίως **όταν αυτά έχουν μικρό ατομικό αριθμό**.



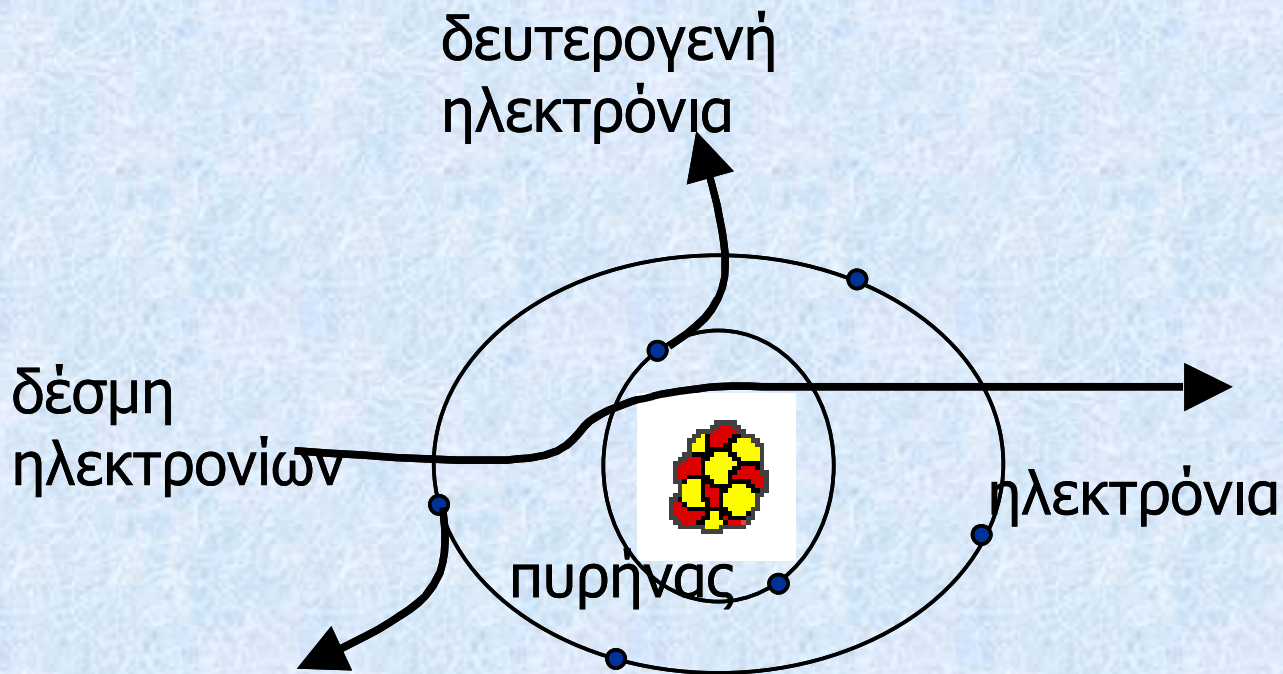


*Η φωτογραφία αυτή απεικονίζει ένα κράμα αργιλίου – χαλκού και λήφθηκε με χρήση των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.*

*Το φωτεινό τμήμα αντιστοιχεί κυρίως σε χαλκό ενώ το σκοτεινό κυρίως σε αργίλιο.*

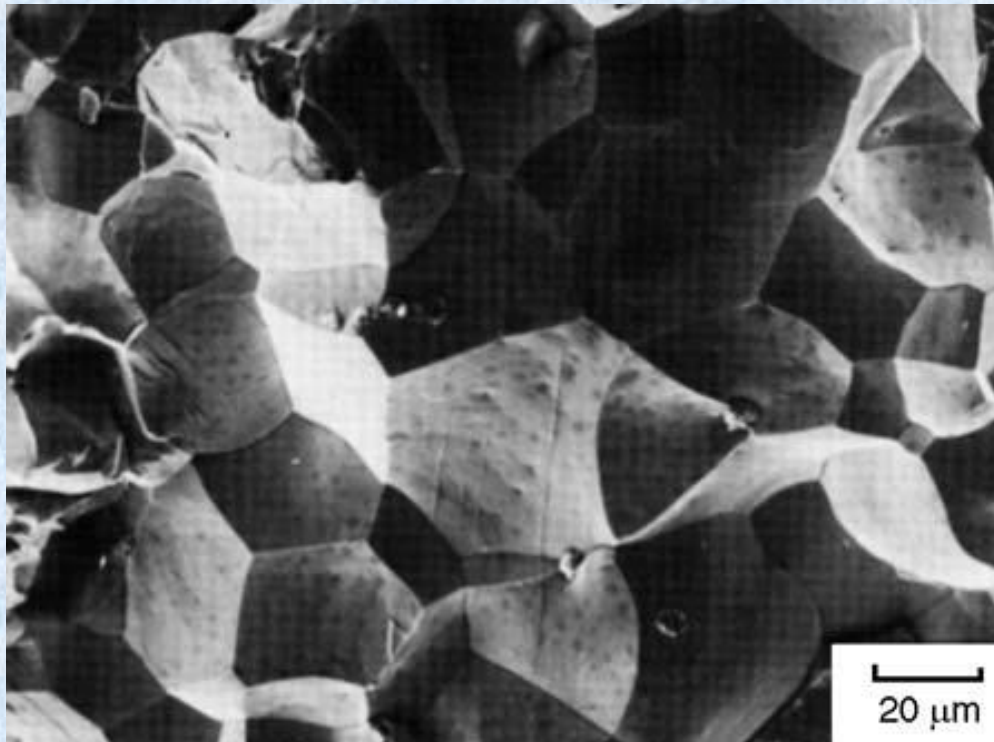
Κατά τις **μη ελαστικές σκεδάσεις**, η ενέργεια της δέσμης μεταφέρεται στα άτομα του δείγματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους των ατόμων, τα οποία δραπέτεύουν.

Η ανίχνευση δευτερογενών ηλεκτρονίων δίνει πληροφορίες για την ύπαρξη ιχνοστοιχείων καθώς και για την **τοπογραφία**

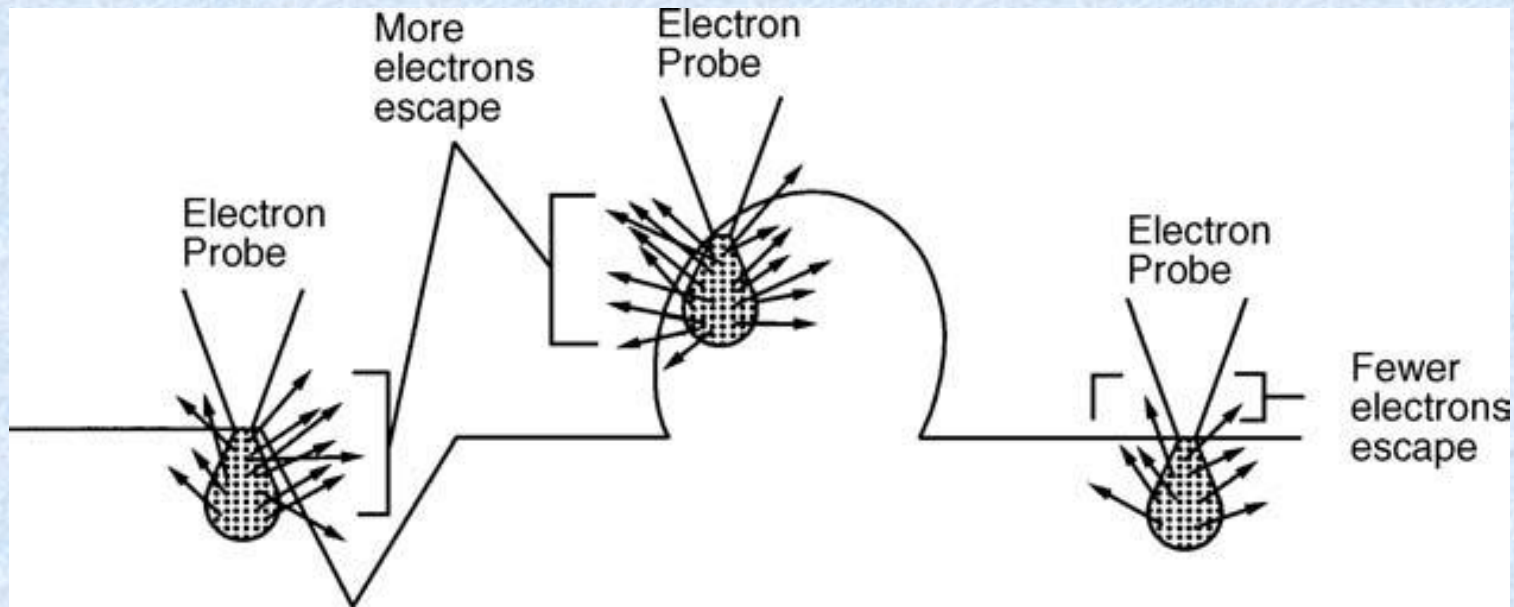


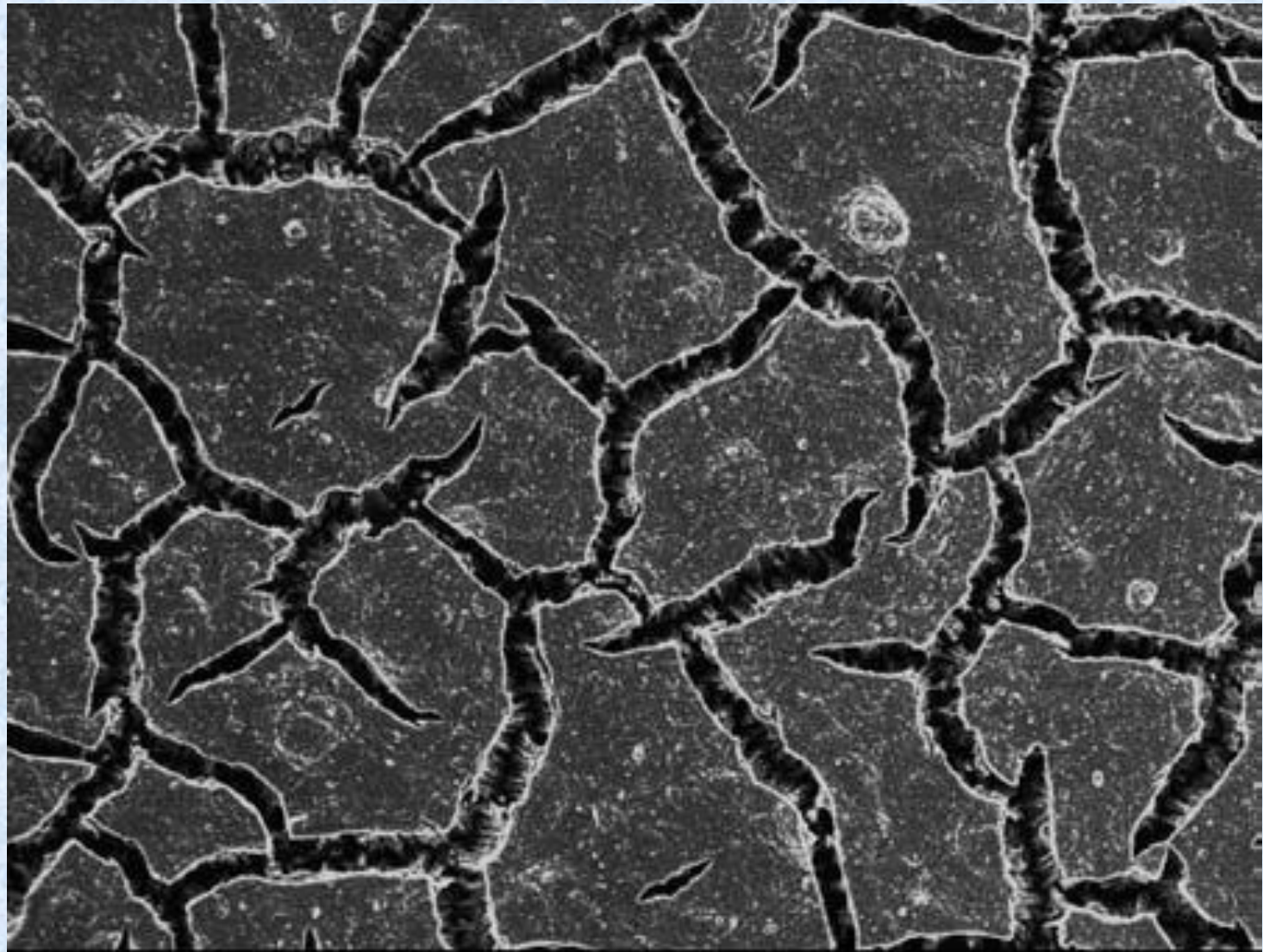
Το τοπογραφικό contrast αναφέρεται σε γεωμετρικές κυμάνσεις του δείγματος  
Συμβαίνει επειδή τα ηλεκτρόνια σήματος προέρχονται από την επίδραση δύο  
παραγόντων: της **τροχιάς** και του **αριθμού των ηλεκτρονίων**

Η πρώτη επίδραση προέρχεται λόγω διαφοροποιήσεων του προσανατολισμού  
του δείγματος σε σχέση με τον ανιχνευτή



Η επίδραση του **αριθμού των ηλεκτρονίων** δημιουργεί φωτεινές περιοχές στο δείγμα όπου δεν αντιστοιχούν σε επιφανειακά περιγράμματα. Όταν η δέσμη προσπίπτει σε επιφάνεια υπό γωνία, περισσότερα ηλεκτρόνια δραπέτεύουν από ότι όταν προσπίπτει κάθετα. Οπότε, άκρες σφαιρικών σωματιδίων, κοιλότητες, ανυψωμένες περιοχές φαίνονται πιο φωτεινές





HKUST

SEI

5.0 kV

X1,000

10µm

WD 7.6mm



Κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή αρκετών δευτερογενών ηλεκτρονίων.

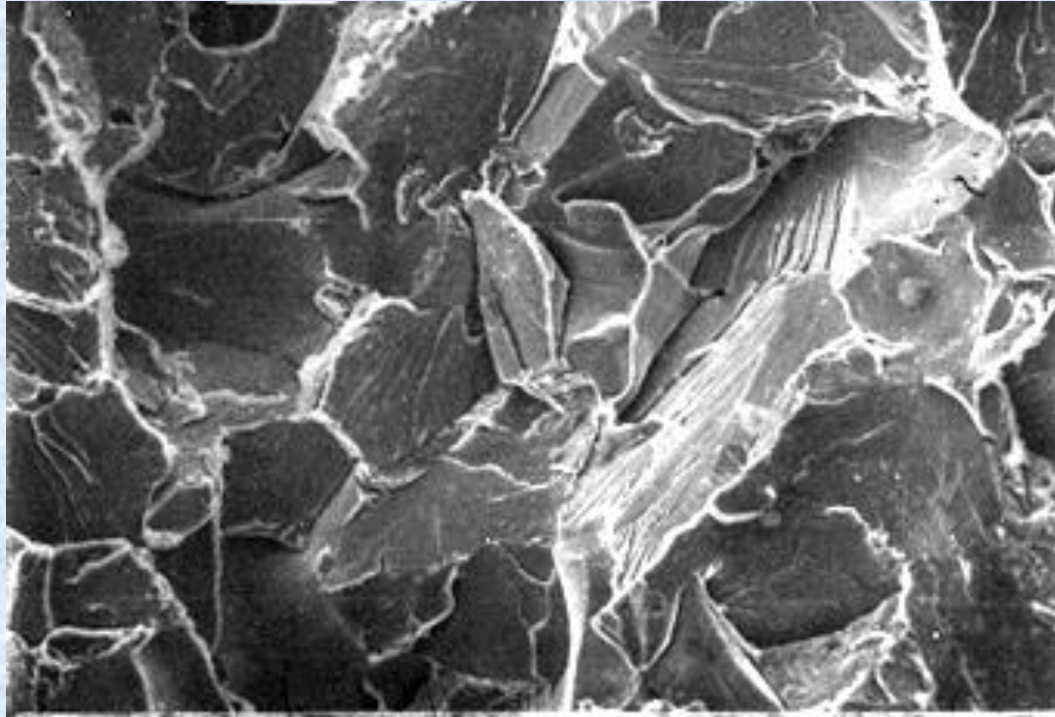
Σημαντικό είναι και το βάθος στο οποίο δραπτεύουν τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, το οποίο φθάνει μόλις τα 5-50 nm σε αντίθεση με τα οπισθοσκεδαζόμενα τα οποία παράγονται σε αρκετά μεγαλύτερο βάθος (μέχρι 50-300 nm).

# ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων σχετίζεται άμεσα με την τοπογραφία του δείγματος.

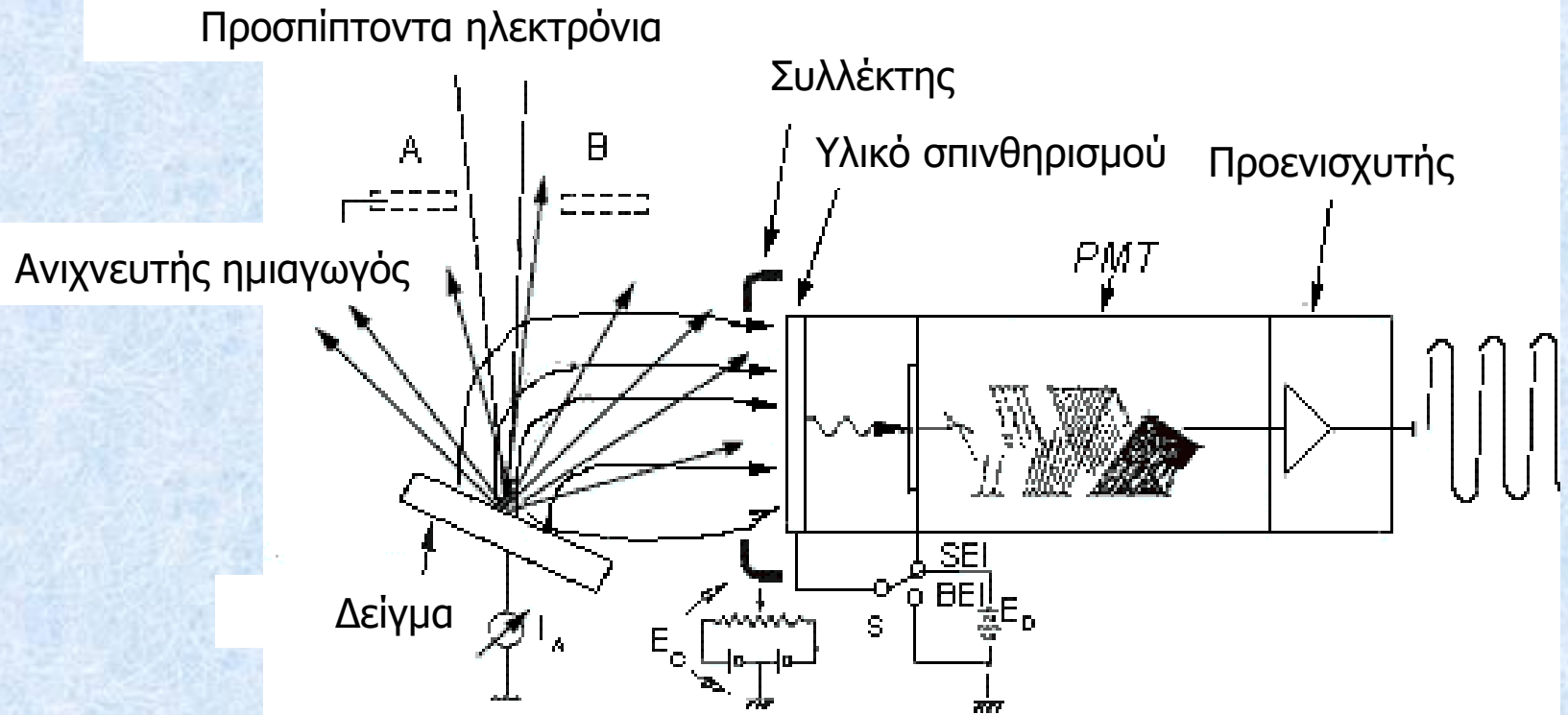
Είναι σημαντική η εξάρτηση του συντελεστή δευτερογενών ηλεκτρονίων από τη φύση των μοριακών δεσμών, την ύπαρξη τυχόν ιχνοστοιχείων στο δείγμα και από ατέλειες που παρουσιάζει η κρυσταλλική δομή του δείγματος.

Για τους παραπάνω λόγους τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι κατάλληλα για διαπίστωση επιφανειακών ακαθαρσιών, προσμίξεων και άλλων μικρολεπτομερειών που συμπληρώνουν τις βασικές μας γνώσεις για τη σύνθεση του δείγματος.



*Η φωτογραφία αυτή απεικονίζει την επιφάνεια θραύσης μεταλλικού δείγματος και λήφθηκε με χρήση των δευτερογενών ηλεκτρονίων.*

# Σύστημα ανίχνευσης



Οι αλληλεπιδράσεις της δέσμης με τα άτομα του δείγματος διαμορφώνουν την εικόνα.

Μετά την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στο δείγμα παράγονται δευτερογενή ή και σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια που συλλέγονται από ειδικό ανιχνευτή.

Το σήμα πολλαπλασιάζεται και χρησιμοποιείται για να παραχθεί η εικόνα συσχετίζοντας ένα-ένα τα σημεία σάρωσης του δείγματος και τα σημεία της οθόνης ενός καθοδικού σωλήνα ακτίνων (CRT, Cathode Ray Tube)

## Συμπερασματικά...

Με τη συλλογή των **δευτερογενών** ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται η **τοπογραφική** **σάρωση** του δείγματος λαμβάνοντας ολοκληρωμένη εικόνα για την επιφάνεια του δείγματος, για τις προσμίξεις και ακαθαρσίες ακόμα και σε περιοχές ιδιαίτερα σκοτεινές.

Τα **οπισθοσκεδαζόμενα** ηλεκτρόνια χρησιμεύουν κυρίως στον εντοπισμό των **διαφορών της χημικής σύστασης του δείγματος**.

Πριν την παρατήρηση του δείγματος, σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάζεται να γίνει πριν επικάλυψη του δείγματος με ένα υπέρλεπτο υμένιο από αγώγιμο υλικό (σωματίδια χρυσού κ.ά.)

Δείγματα τα οποία επικαλύπτονται είναι αυτά που παρουσιάζουν ευαισθησία στη δέσμη ηλεκτρονίων, όπως βιολογικά δείγματα.

Επιπλέον, τα μη αγώγιμα υλικά όπως δείγματα πολυμερών. Οι μονωτές έχουν την τάση να λειτουργούν ως παγιδευτές ηλεκτρονίων. Η συσσώρευση ηλεκτρονίων στην επιφάνεια ονομάζεται **φόρτιση**, δείχνοντας τοπικά πολύ φωτεινές περιοχές...

Η παρουσία ενός υμενίου αγωγίμου υλικού δρα ως ένα κανάλι, μέσω του οποίου απομακρύνονται τα ηλεκτρόνια φόρτισης από την επιφάνεια του υλικού-μονωτή.

### **Μειονεκτήματα**

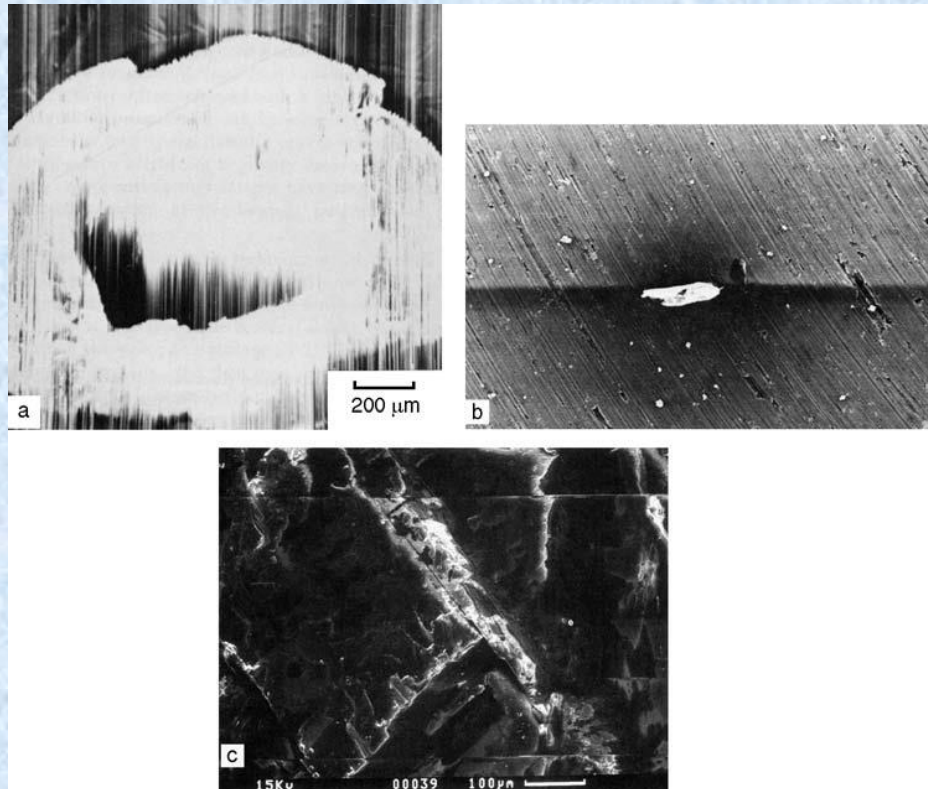
- Χάνεται το κοντράστ φωτεινότητας από στοιχεία διαφορετικού ατομικού αριθμού
- Υπάρχει πάντα πιθανότητα να αλλοιωθεί η μορφολογία της επιφάνειας δείγματος



# ΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ SEM

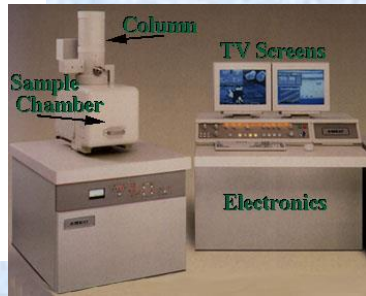
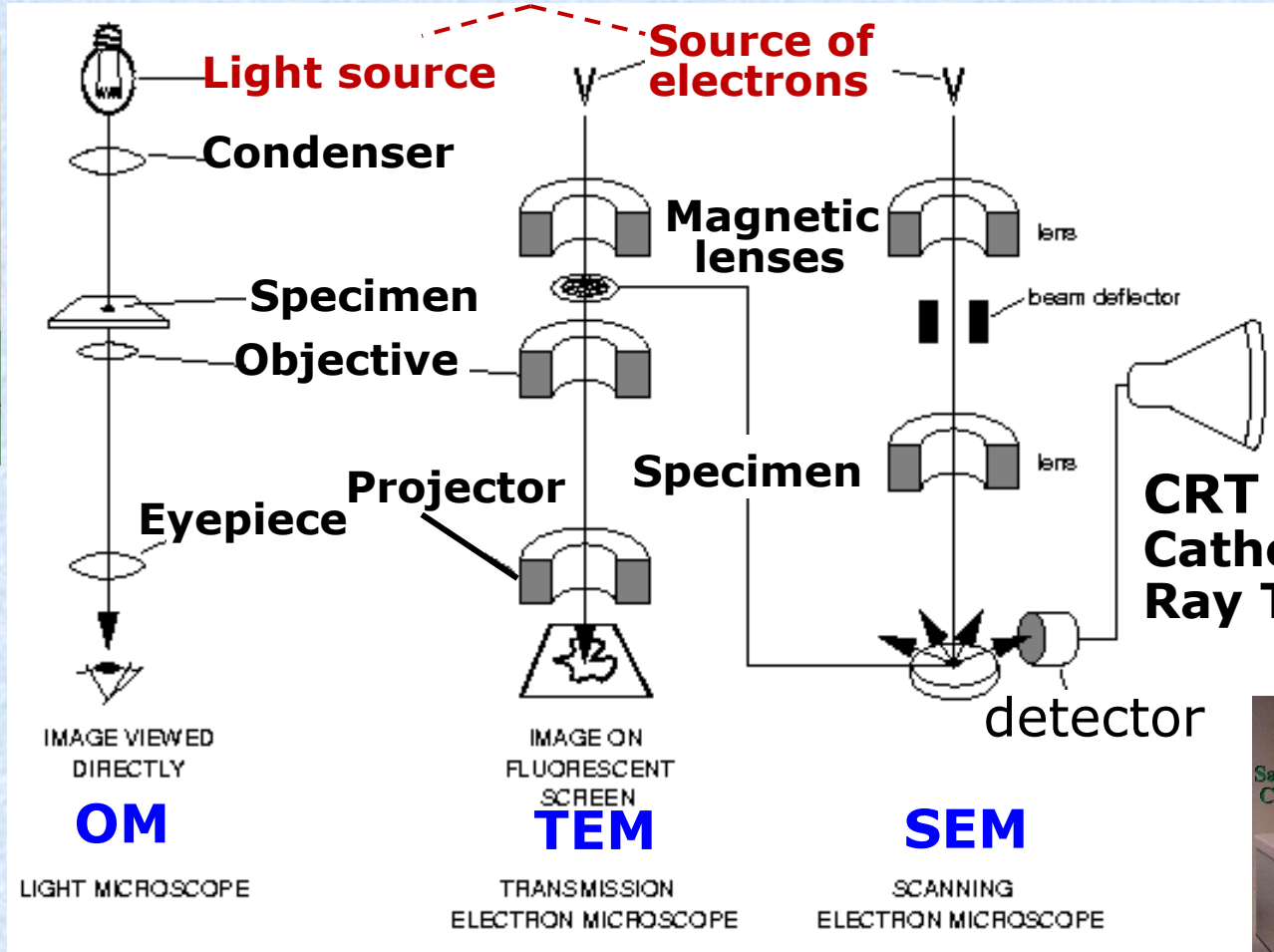
Συνήθως συμβαίνουν φαινόμενα **φόρτισης της επιφάνειας** σε δείγματα που έχουν χαμηλή αγωγιμότητα

Συμβαίνει όταν υπάρχει συσσώρευση περίσσειας ηλεκτρονίων, η οποία και οδηγεί σε «χτίσιμο» φορτισμένων περιοχών



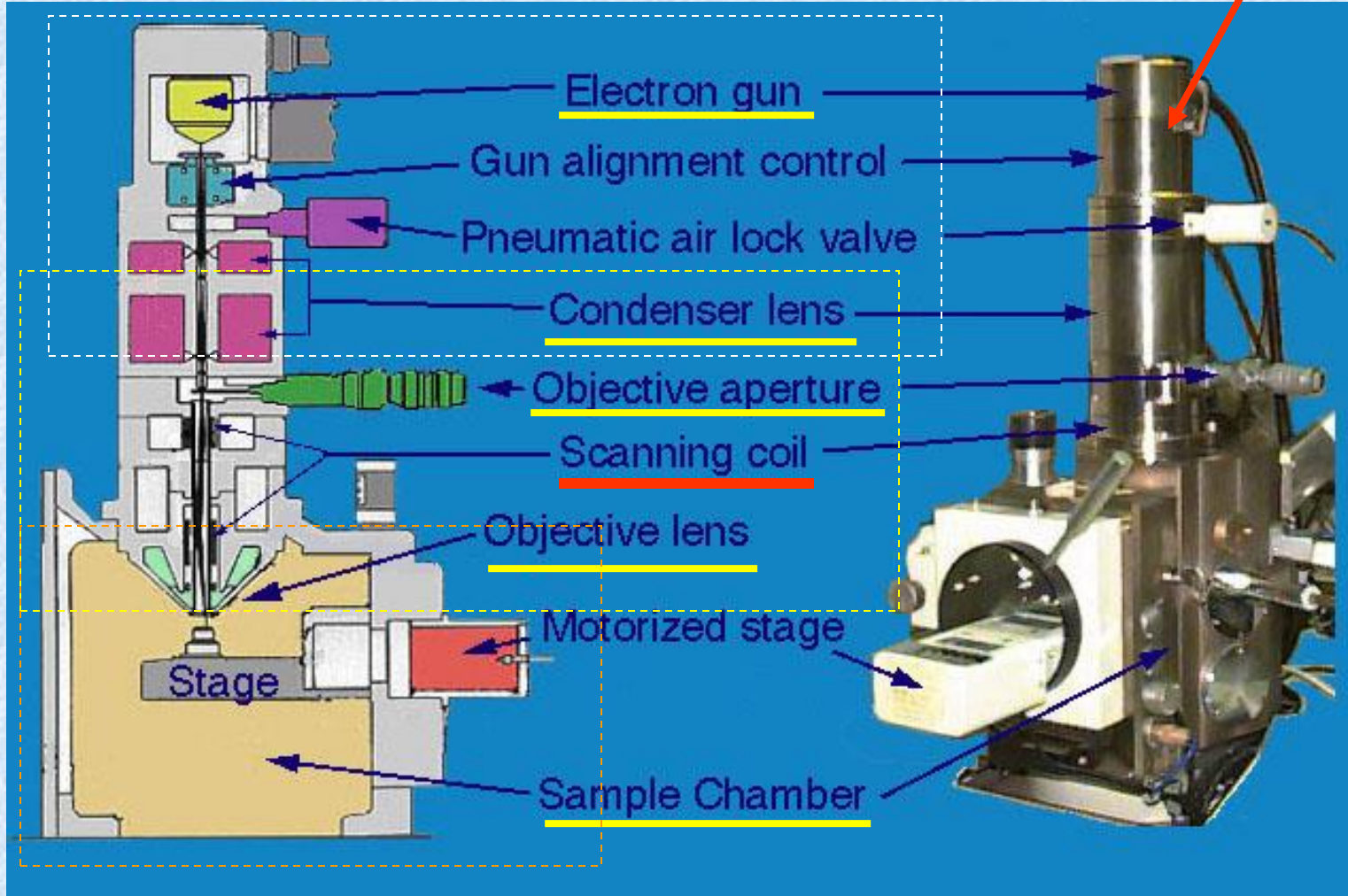
# Σύγκριση των OM, TEM και SEM

Probe



# Μια ματιά μέσα στην οργανολογία SEM

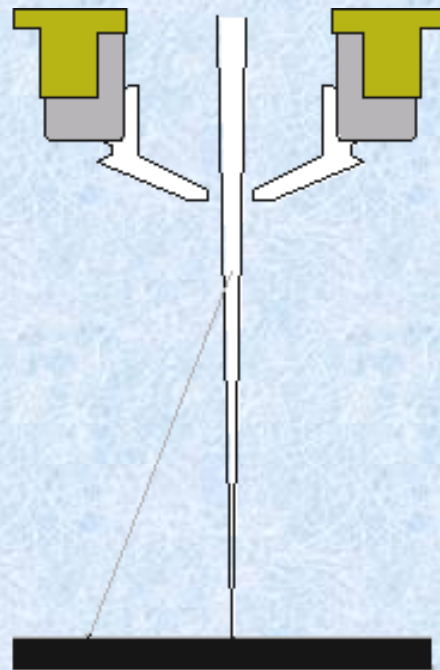
Στήλη



# Τα ηλεκτρόνια χρειάζονται κενό...

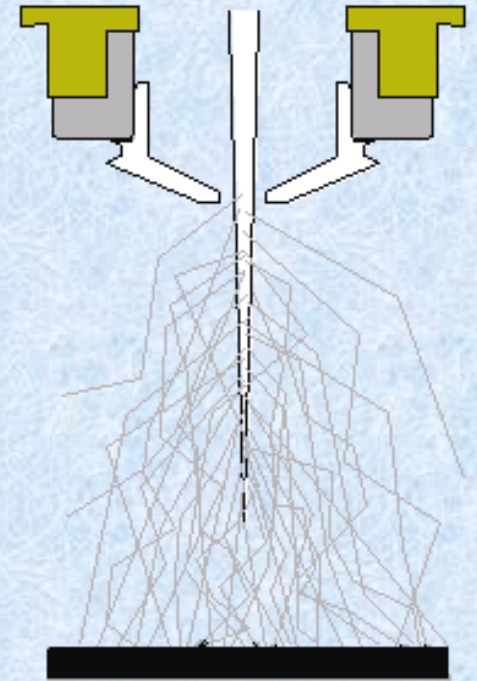
Ένα ικανοποιητικό κενό στο θάλαμο είναι της τάξης περίπου  $4 \times 10^{-5}$  Pa (το οποίο είναι  $3 \times 10^{-7}$  torr)

Κενό



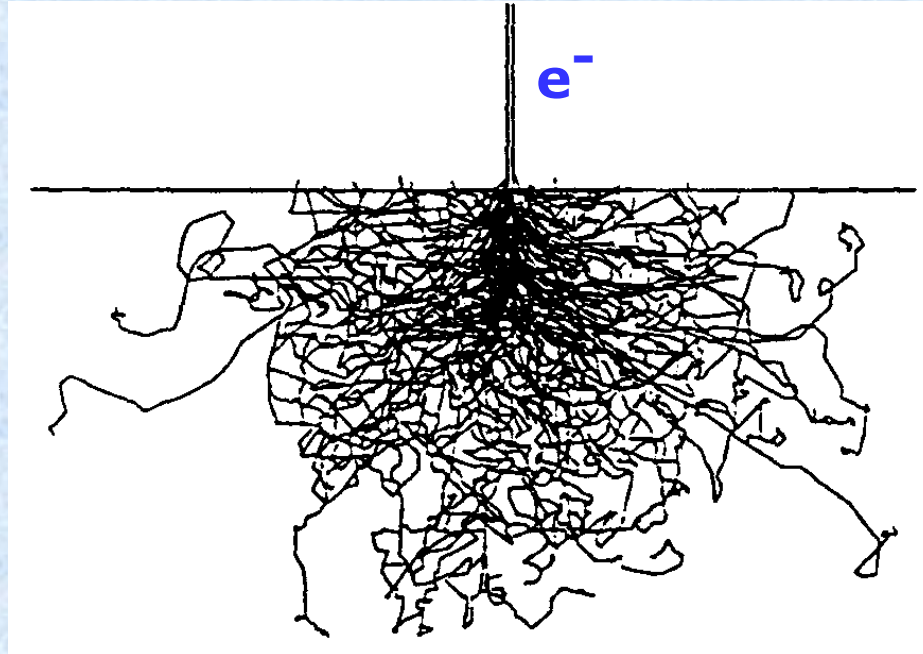
Όχι σκέδαση

Αέρας



Ολική σκέδαση

# Όγκος αλληλεπίδρασης: I



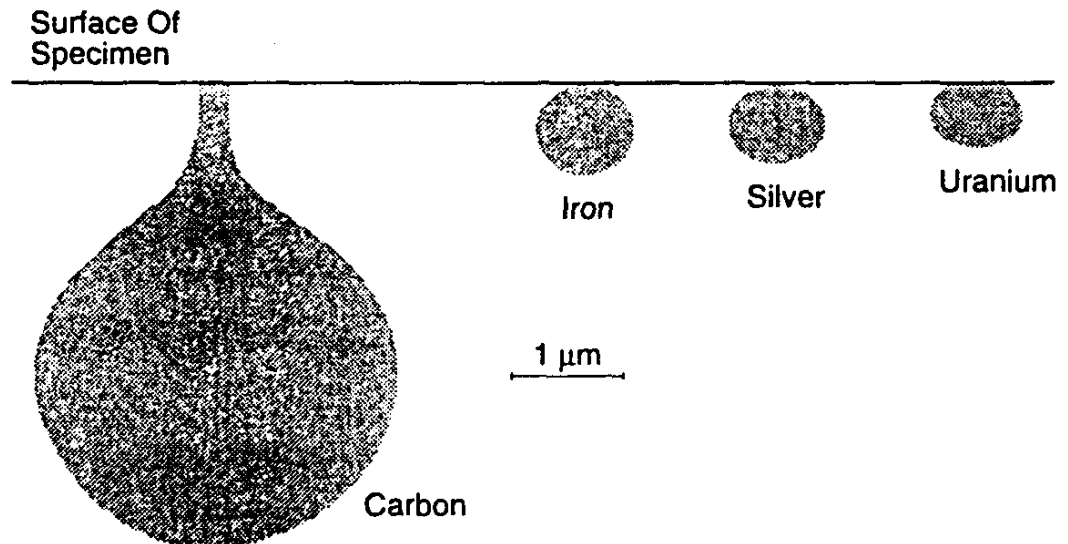
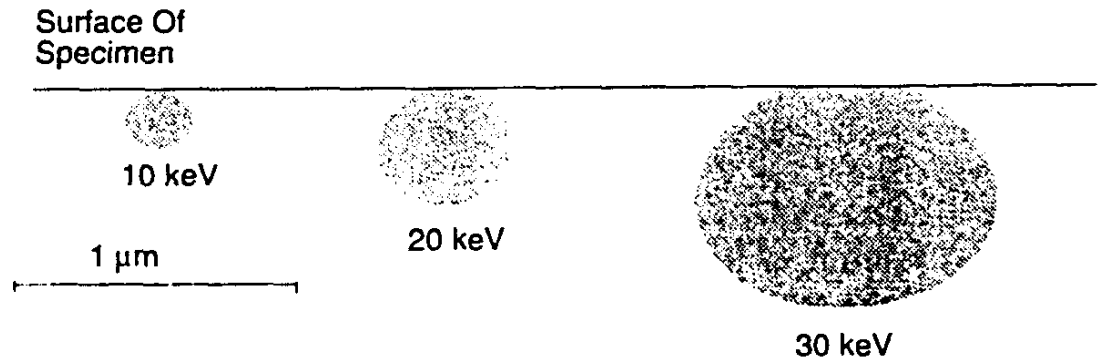
Προσομοιώσεις από 100 τροχιές ηλεκτρονίων

Τα ηλεκτρόνια δεν διαγράφουν ευθείες τροχιές μέσα στο δείγμα, αλλά ένα μονοπάτι τύπου zig-zag.

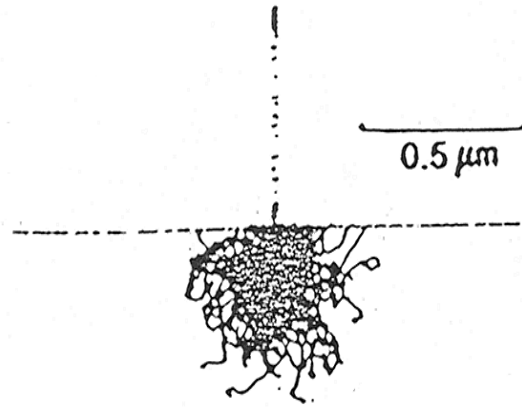
# Όγκος αλληλεπίδρασης: II

Η διείσδυση εξαρτάται από το δυναμικό επιτάχυνσης (**acceleration voltage**) δηλαδή την ενέργεια των ηλεκτρονίων.

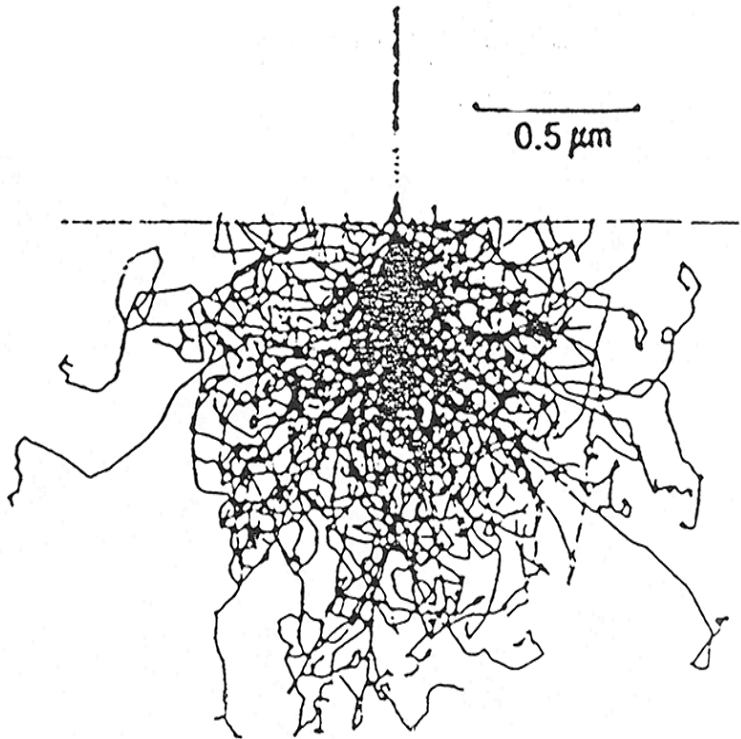
Επίσης εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των στοιχείων του δείγματος (**atomic number**)



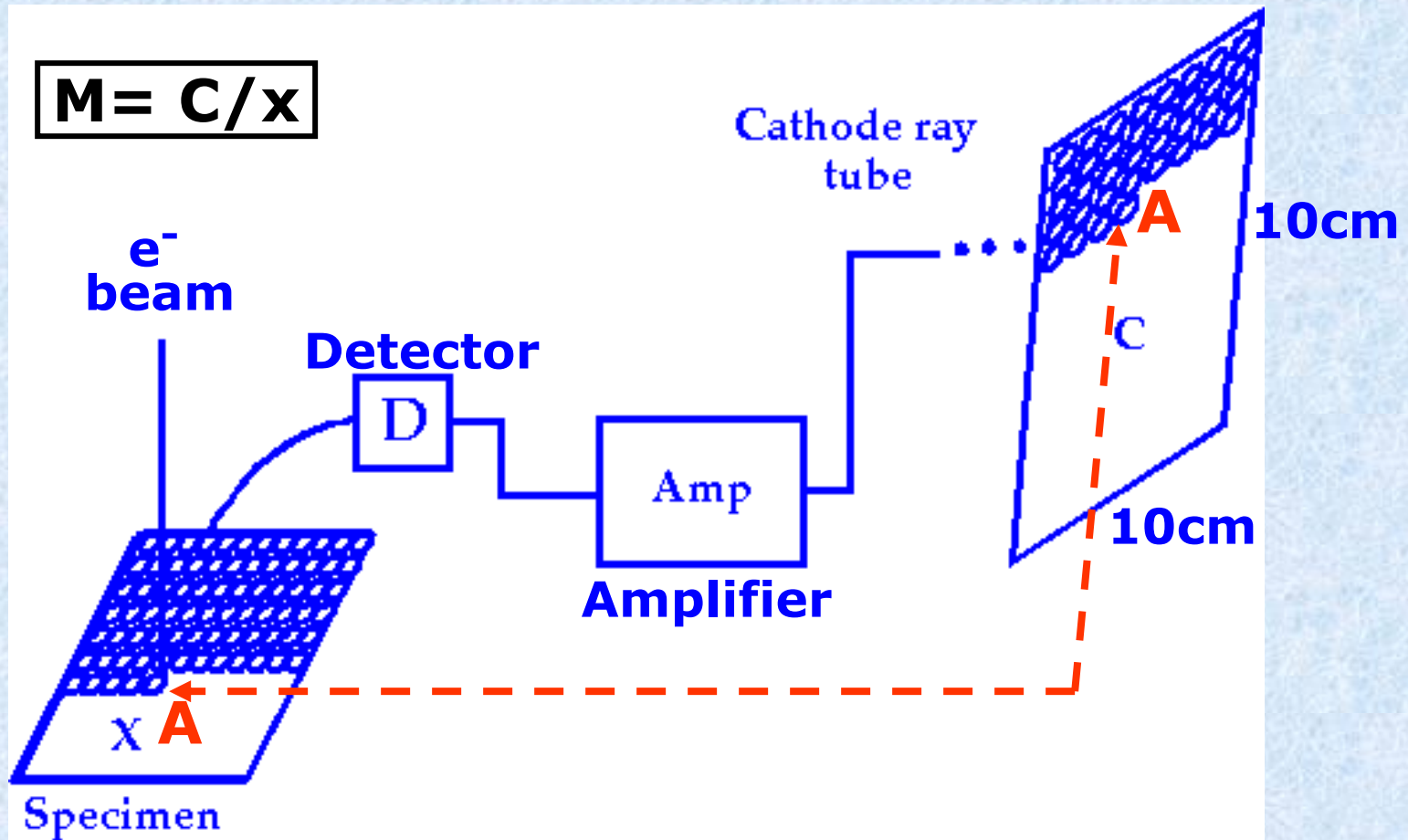
(a) 10 kV



(b) 20 kV



# Σχηματισμός εικόνας και μεγέθυνση στο SEM



Η δέσμη χαρτογραφεί γραμμικά το δείγμα (raster pattern) σε συγχρονισμό με τη δέσμη σε ένα καθοδικό σωλήνα ακτίνων (CRT).

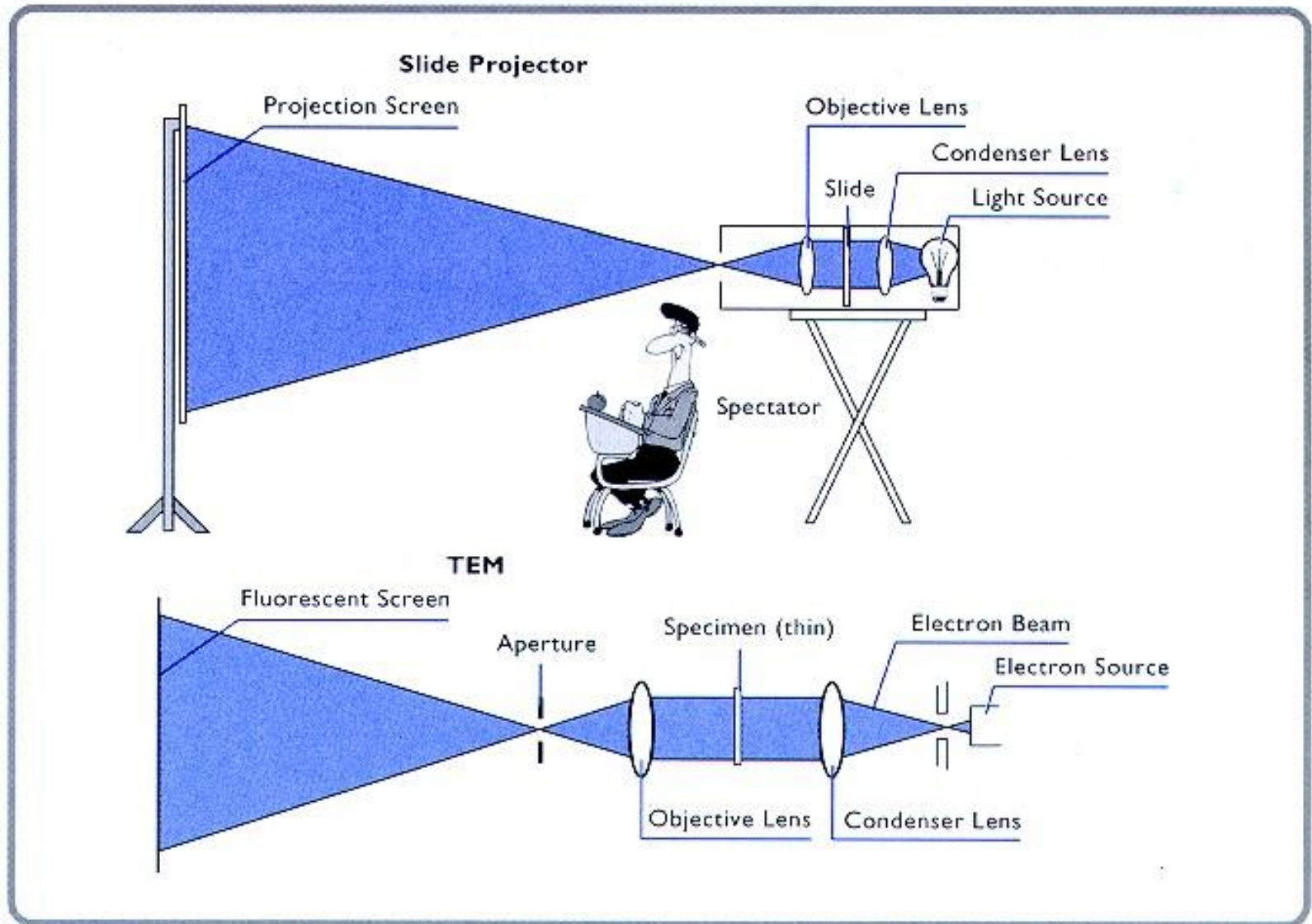


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

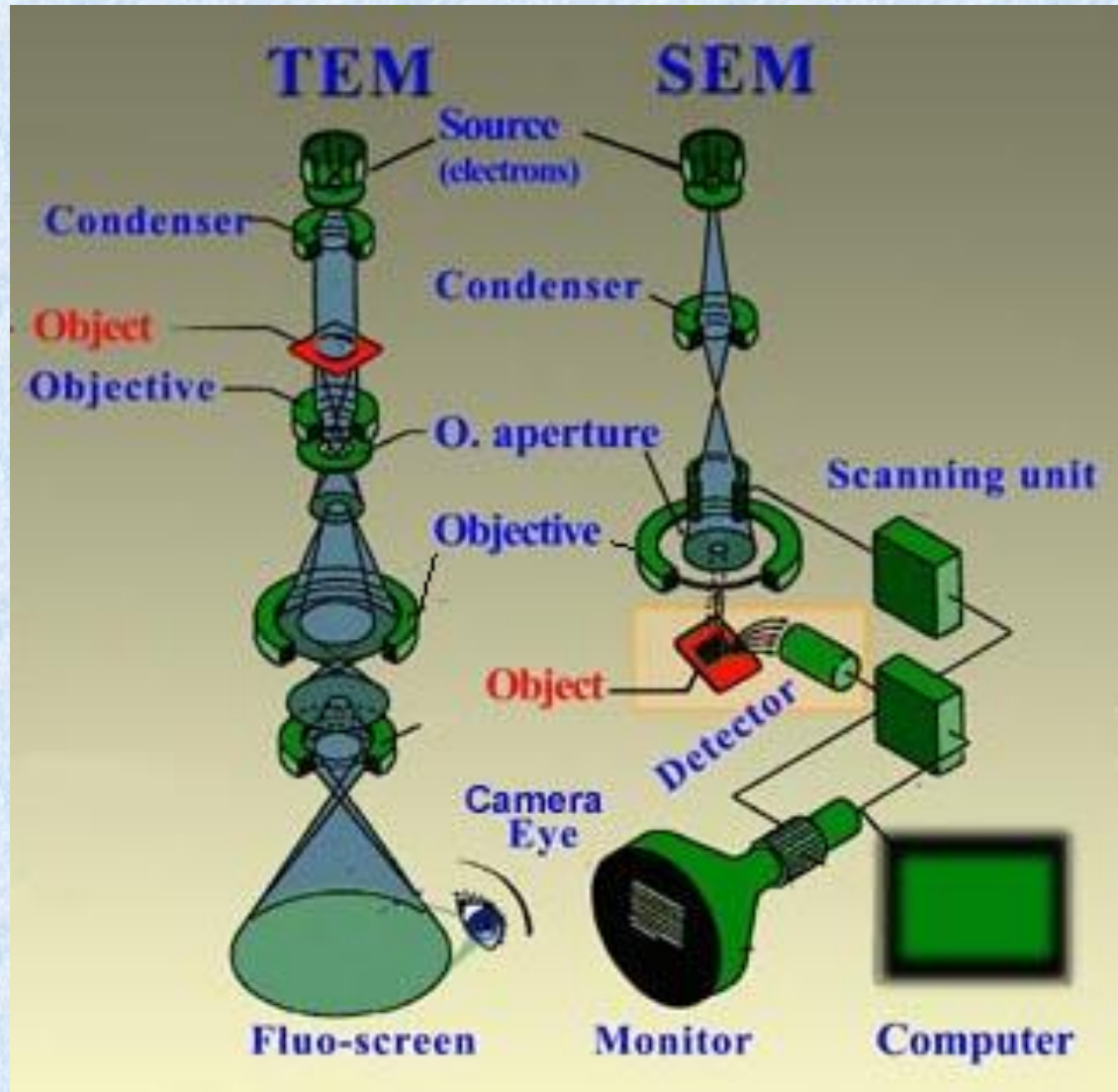
Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης (transmission electron microscope, TEM) είναι παρόμοιο/ανάλογο με ένα οπτικό μικροσκόπιο διαπερατότητας.

Οι κύριες διαφορές είναι ότι στο TEM, η δέσμη του ορατού φωτός αντικαθίσταται από μια δέσμη ηλεκτρονίων, ενώ οι γυάλινοι φακοί αντικαθίστανται από ηλεκτρομαγνητικούς.

Ένα μικροσκόπιο TEM είναι ανάλογο με ένα προτζέκτορα διαφανειών, με μια μικρή διαφορά...

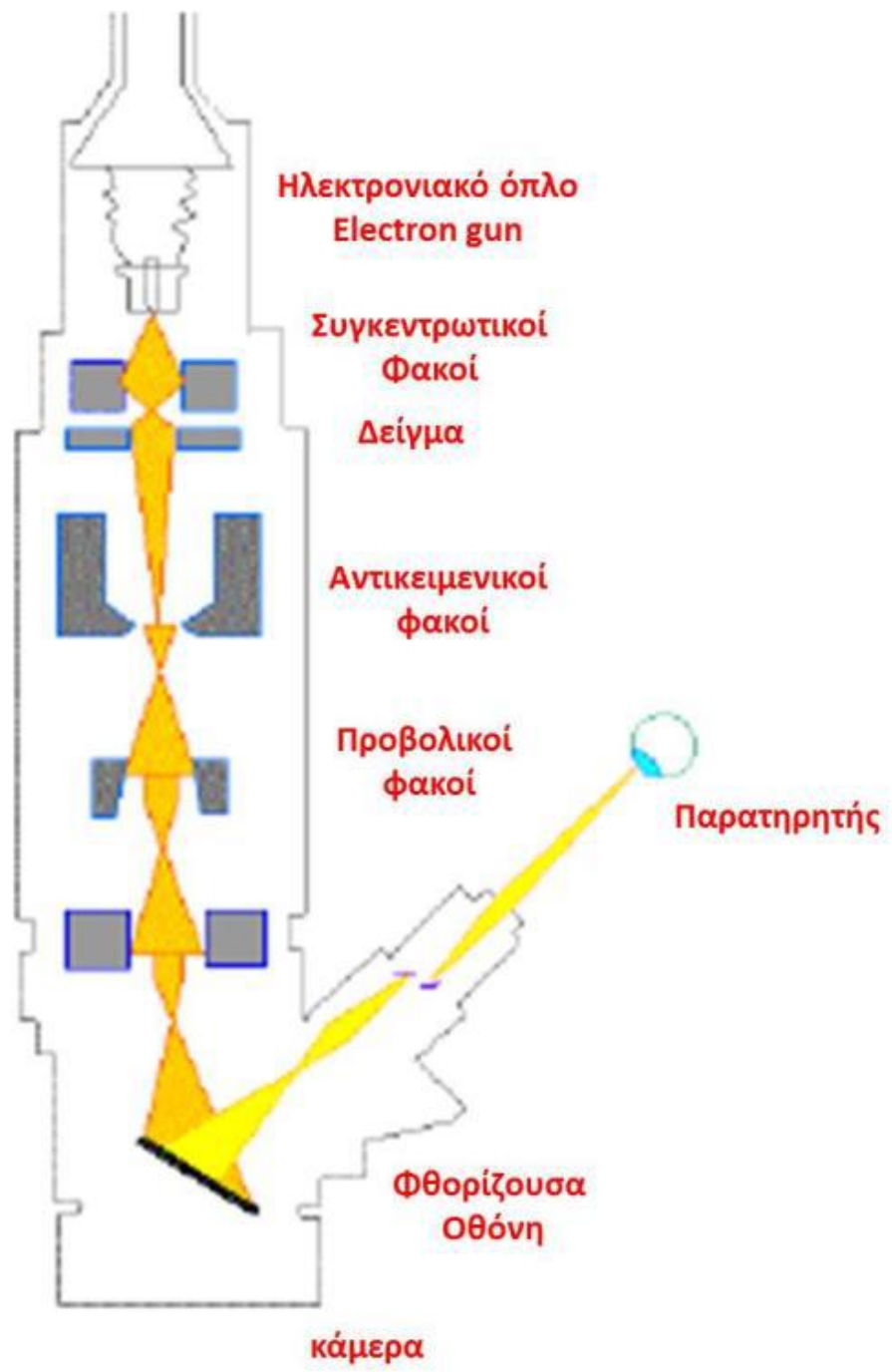


(SEM) και TEM



Το ηλεκτρ. μικροσκόπιο διέλευσης (TEM) είναι βασικά ένα όργανο το οποίο αποτελείται από μία πηγή ηλεκτρονίων στο πάνω άκρο, ένα σύστημα παρακολούθησης (οθόνη ή φωτογραφική πλάκα) στο κάτω άκρο, μία βάση για την τοποθέτηση του δείγματος και φυσικά έναν κατάλληλο συνδυασμό φακών

Για να λειτουργήσει το Η.Μ. χρειάζονται ακόμη δύο εξαρτήματα. Ένα σύστημα για την δημιουργία του κενού της κολώνας και φυσικά οι ηλεκτρικές παροχές και τα ηλεκτρονικά ρύθμισης.



# Σύστημα Φωτισμού

Πηγή Ηλεκτρονίων

Πηγή ηλεκτρονίων

Συγκεντρωτικός Φακός 1

Συγκεντρωτικός Φακός 2

## Επίπεδο Δείγματος

Φακοί Ηλεκτρονίων

Χώρος Δείγματος

Δείγμα

X-rays

## Τμήμα Παρακολούθησης

Παράθυρο Παρατήρησης

Αντικειμενικός Φακός

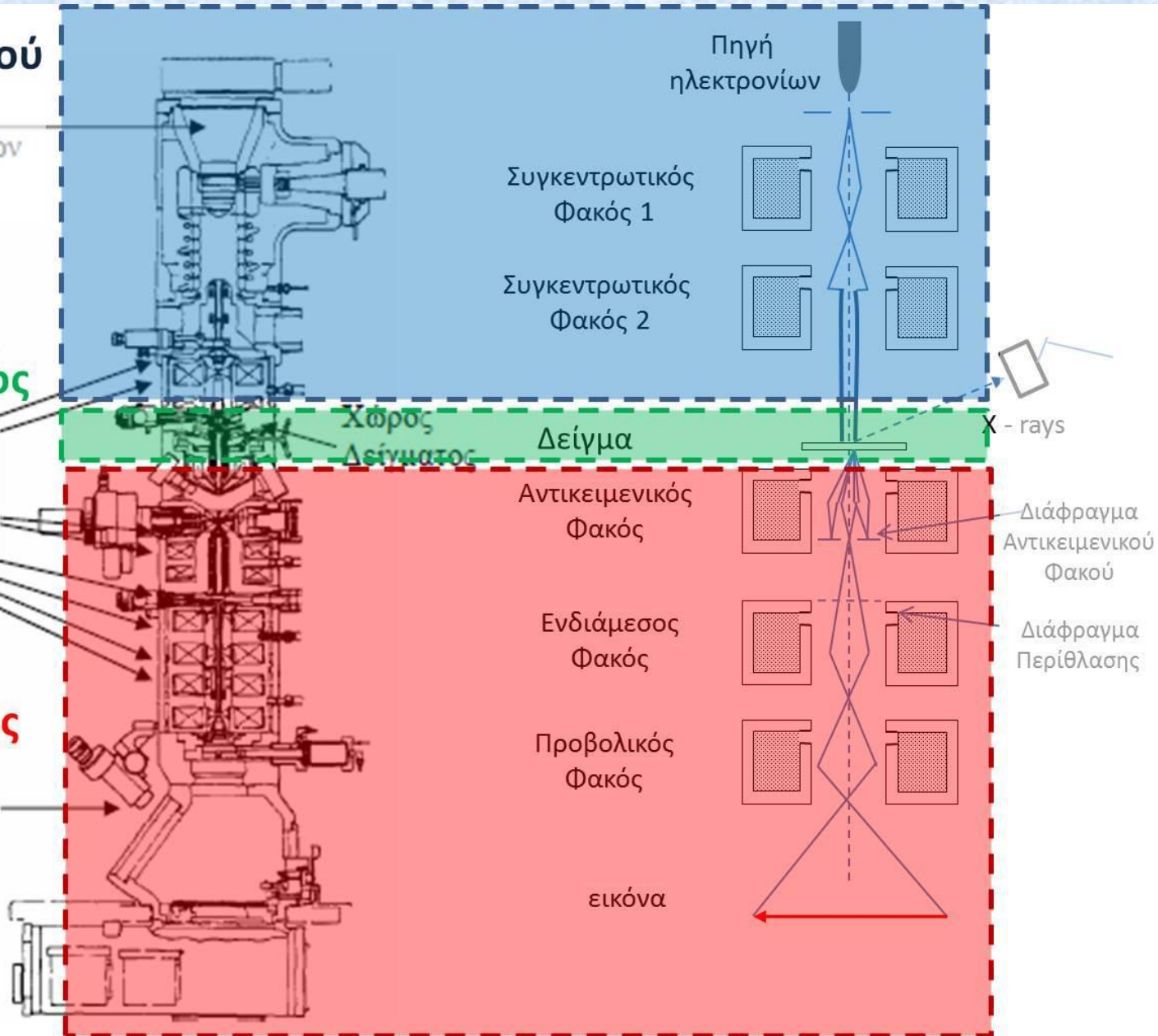
Ενδιάμεσος Φακός

Προβολικός Φακός

εικόνα

Διάφραγμα Αντικειμενικού Φακού

Διάφραγμα Περίθλασης



Η **κολώνα** χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα

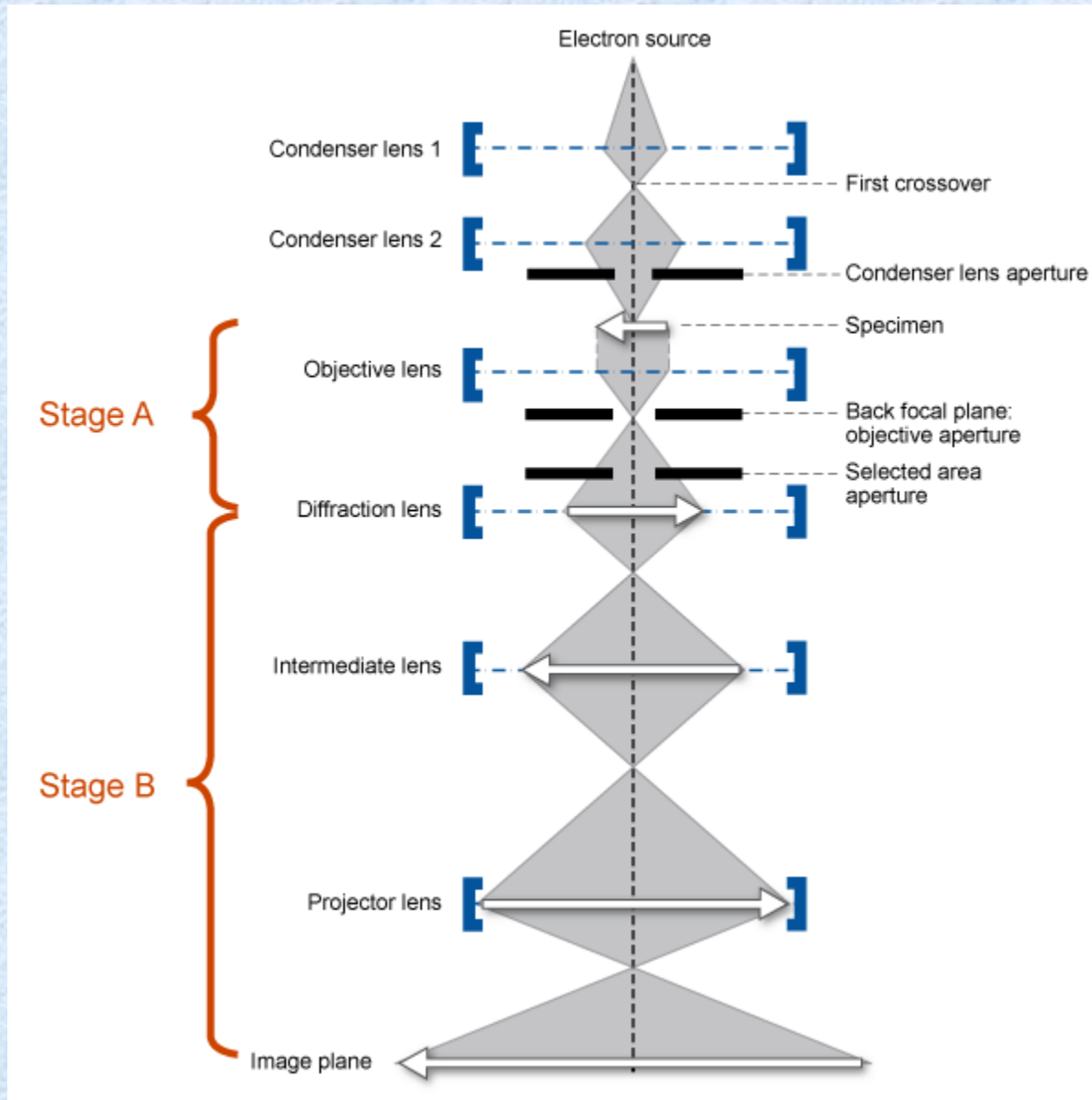
1. Το σύστημα φωτισμού, που περικλείει την πηγή ηλεκτρονίων και τον ή τους φακούς συμπύκνωσης της δέσμης,
2. Το τμήμα σχηματισμού εικόνας και το δείγμα, και
3. Το τμήμα παρακολούθησης ή καταγραφής του ειδώλου

$$E = e V$$

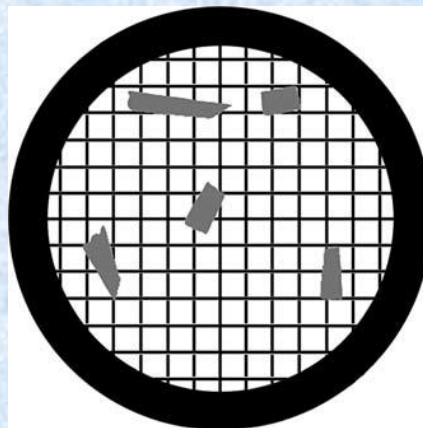
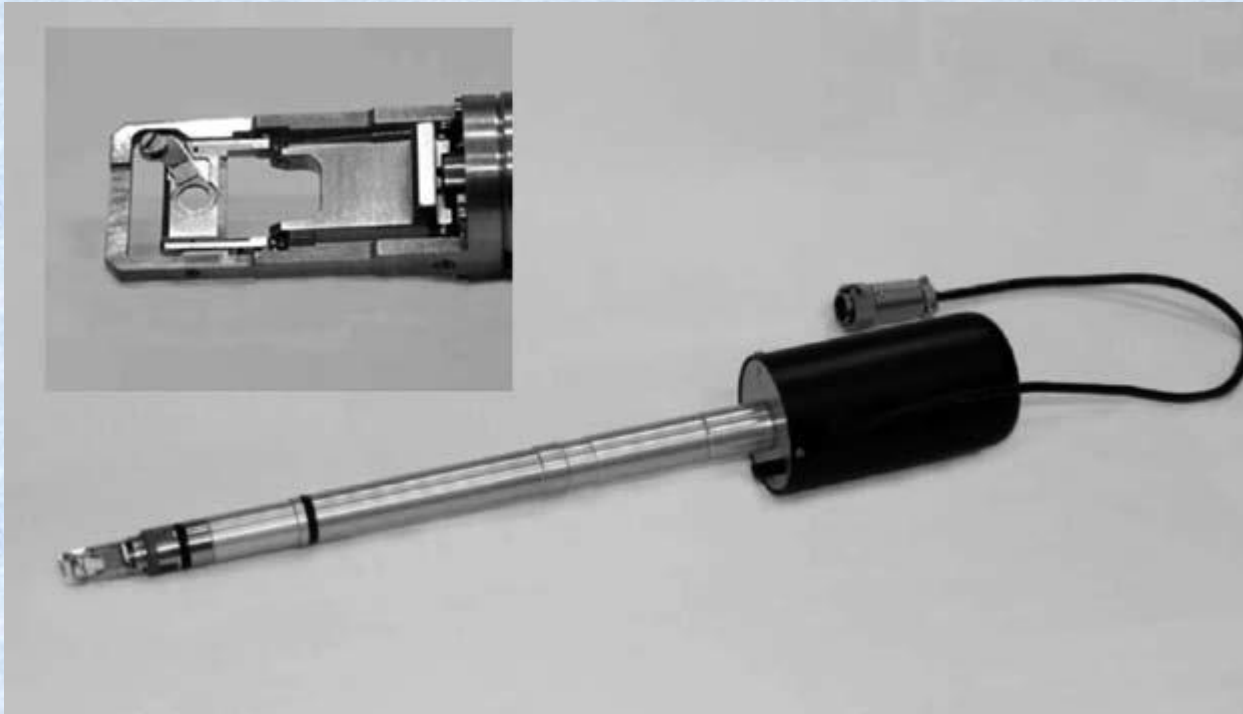
Πηγή ηλεκτρονίων: παρόμοια με την περίπτωση του SEM



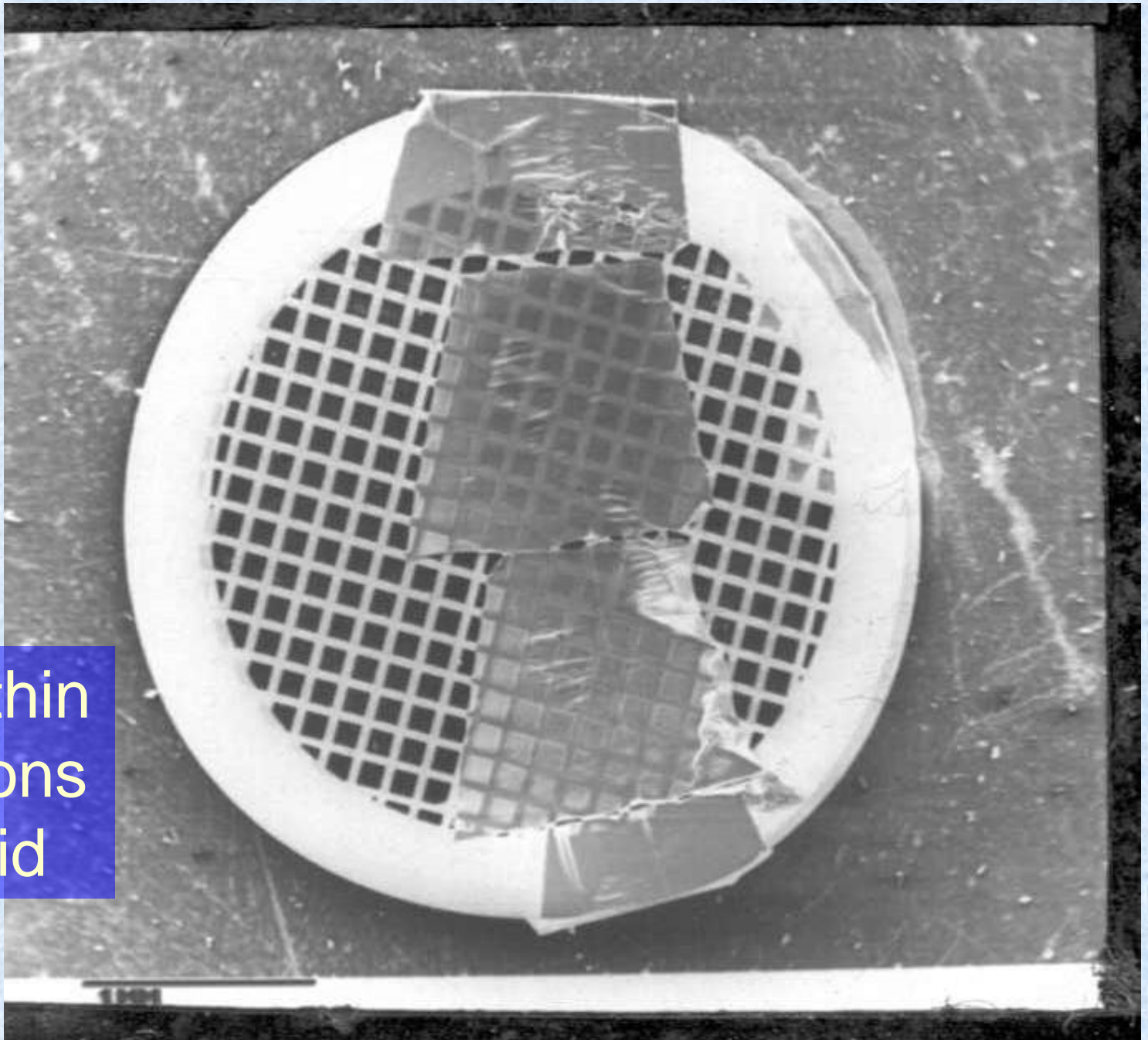
# Ηλεκτρομαγνητικοί φακοί: Επίδραση μαγνητικής δύναμης στη δέσμη ηλεκτρονίων



# Holder δείγματος



Ultrathin  
sections  
on grid



# Εξίσωση Abbe

$$R = 0.61\lambda / \mu \eta \mu \alpha$$

Δυναμικό επιτάχυνσης (kV)    Μήκος κύματος ηλεκτρονίου (nm)    Resolution (nm)

40

0.006

0.56

100

0.0037

0.35

500

0.0014

0.13

**Διακριτική ικανότητα** ονομάζεται η μικρότερη απόσταση δύο σημείων του αντικειμένου τα οποία διακρίνονται ως διαφορετικά σημεία του ειδώλου

Το παρατηρούμενο αντικείμενο πρέπει να έχει επαρκή αντίθεση (contrast), δηλαδή διαφορά φωτεινότητας μεταξύ δύο γειτονικών σημείων.

Η αντίθεση στο Ο.Μ. προέρχεται λόγω διαφορών στην απορρόφηση φωτός σε διάφορες περιοχές του δείγματος.

Ωστόσο, στο TEM, η απορρόφηση ηλεκτρονίων **ΔΕΝ** παίζει το βασικό ρόλο για τη δημιουργία ειδώλου. Το contrast βασίζεται στην **εκτροπή (deflection)** των ηλεκτρονίων από τη πρωτογενή διεύθυνση διέλευσης, όταν περνάνε μέσω του δείγματος

Η αντίθεση παράγεται όταν υπάρχει διαφορά στον αριθμό των ηλεκτρονίων τα οποία σκεδάζονται μακριά από την δέσμη διέλευσης

Το ποσό της σκέδασης ηλεκτρονίων σε ένα σημείο του δείγματος εξαρτάται από την **πυκνότητα μάζας**

Διαφορές στο **πάχος** και στην **πυκνότητα** του υλικού έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικό βαθμό εκτροπής ηλεκτρονίων (έκταση σκέδασης ηλεκτρονίων) οπότε και ποικιλία στην ένταση ηλεκτρονίων που φθάνουν στην οθόνη του ειδώλου

Η φωτεινότητα προσδιορίζεται από την ένταση της δέσμης ηλεκτρονίων που διαπερνά τη χαμηλότερη επιφάνεια του δείγματος

# TEM - transmission electron microscopy

Πώς προκύπτει η χρωματική αντίθεση

Διαφορές στην πυκνότητα μάζας.

Περιοχές με μεγαλύτερο προφίλ ύψους φαίνονται πιο σκοτεινές

