



# CHM\_E\_B6 (και GCHM\_C661) Αιωρήματα & Γαλακτώματα



Εαρινό εξάμηνο Ακ. Έτους 2021-22  
Μάθημα 7ο

# ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΠΛΗ ΣΤΙΒΑΔΑ(ΗΔΣ)

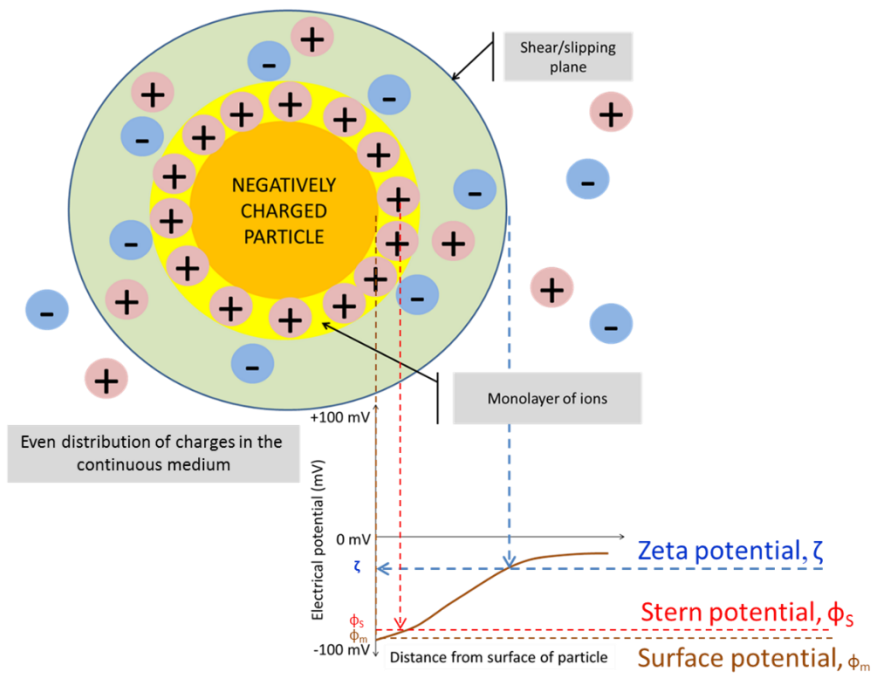
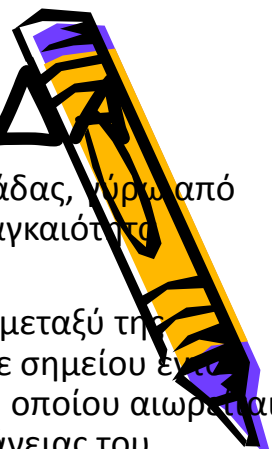
Περιοχή μοριακών διαστάσεων στο όριο μεταξύ δύο ουσιών **μεταξύ των οποίων υφίσταται ηλεκτρικό πεδίο.**

Κάθε μια από τις ουσίες αυτές περιέχει ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια, ιόντα, η μόρια στα οποία υφίσταται διαχωρισμός φορτίων – πολικά μόρια).

Στην ΗΔΣ, υφίσταται έλξη μεταξύ αντιθέτως φορτισμένων σωματιδίων τα οποία έχουν την τάση να συσσωρεύονται το ένα στην επιφάνεια του άλλου, παραμένοντας ωστόσο σε μια απόσταση το ένα από το άλλο λόγω του συγκεκριμένου μεγέθους των, ή λόγω της παρουσίας ουδέτερων μορίων τα οποία τα περιβάλλουν.

Η ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια.

# Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΠΛΗ ΣΤΙΒΑΔΑ



Ο σχηματισμός της ηλεκτρικής διπλής στιβάδας, γύρω από φορτισμένο σωματίδιο, οφείλεται στην αναγκαιότητα εξουδετέρωσης του φορτίου του.

Ανάπτυξη δυναμικού (της τάξεως των mV) μεταξύ της επιφάνειας του σωματιδίου και οιαδήποτε σημείου εντός του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, εντός του οποίου αιωρείται. Το μέγεθος του δυναμικού αυτού της επιφάνειας του σωματιδίου, εξαρτάται από το ηλεκτρικό φορτίο και από το πάχος της ηλεκτρικής διπλής στιβάδας.

Συναρτήσει της αποστάσεως από την επιφάνεια, η πτώση του δυναμικού είναι γραμμική εντός της στιβάδας Stern και εκθετικά στη διαχυτή διπλοστιβάδα, και μηδενίζεται στο όριο της διπλοστιβάδας με το διάλυμα.

Τα φορτισμένα σωματίδια, όταν ευρεθούν εντός ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται με σταθερή ταχύτητα και αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **ηλεκτροφόρηση**.

Η κινητικότητα των σωματιδίων εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του μέσου και από το ιξώδες του καθώς και από το δυναμικό στο όριο μεταξύ κινουμένου σωματιδίου και του ρευστού εντός του οποίου κινείται. Το όριο αυτό είναι γνωστό ως επίπεδο ολίσθησης και είναι εκείνο το επίπεδο στο οποίο συναντώνται το επίπεδο Stern με το διάχυτο μέρος της διπλοστιβάδας.

Η σχέση μεταξύ του δυναμικού  $\zeta$  και του δυναμικού της επιφάνειας, εξαρτάται από τα ιόντα στο διάλυμα (συγκέντρωση και είδος).

Το δυναμικό αυτό είναι πολύ σημαντικό για την περιγραφή των απώσεων μεταξύ ηλεκτρικών διπλοστιβάδων





Στα προηγούμενα, είδαμε τρόπους με τους οποίους είναι δυνατόν να μετρηθούν **χαρακτηριστικές παράμετροι** της ηλεκτρικής διπλής στιβάδας.

Τα μοντέλα, τα οποία αναπτύχθηκαν για την περιγραφή της ηλεκτρικής διπλής στιβάδας αποτελούν προσπάθειες περιγραφής, όσο γίνεται λεπτομερέστερα, του τρόπου κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου και του ηλεκτρικού δυναμικού στη γειτονία φορτισμένης ηλεκτρικής διπλής στιβάδας.

Επειδή δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με άμεσο τρόπο το ηλεκτρικό δυναμικό μιας οποιασδήποτε επιφάνειας σωματιδίου σε μια διασπορά, θα πρέπει τα μοντέλα τα οποία αναπτύχθηκαν να υποβληθούν σε δοκιμές, όσο γίνεται αυστηρότερες.

Ένας από τους τρόπους εξαγωγής περισσότερων πληροφοριών για τη δομή της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας είναι οι μετρήσεις των **ηλεκτροκινητικών παραμέτρων**



# Ηλεκτροκινητικά φαινόμενα

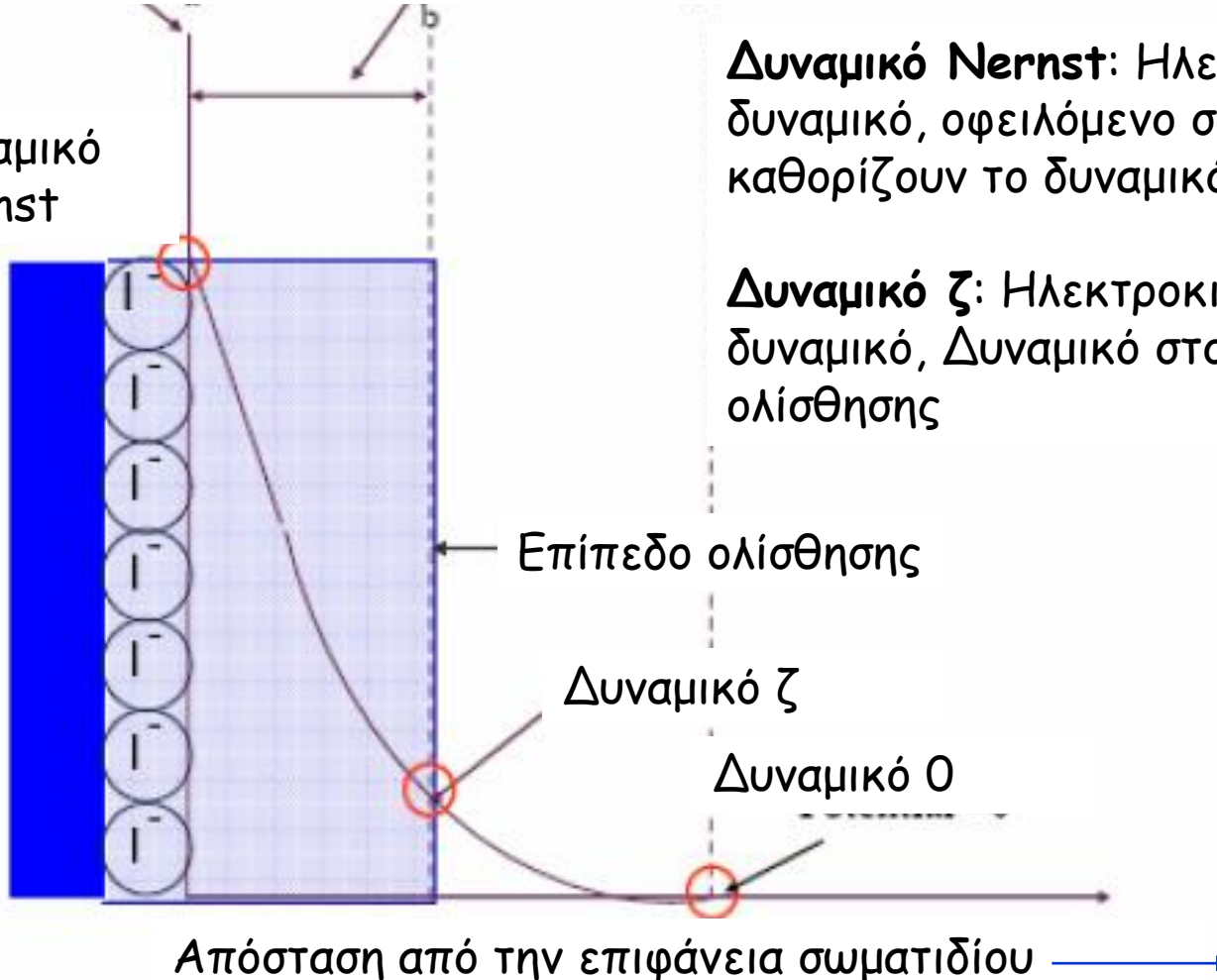


Επιφάνεια  
σωματιδίου

Ίοντα αντιθέτου φορτίου και  
μόρια ύδατος

Δυναμικό  
Nernst

↑  
Δυναμικό /mV



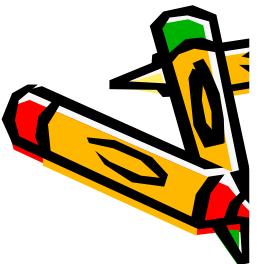
**Δυναμικό Nernst:** Ηλεκτροχημικό δυναμικό, οφειλόμενο στα ιόντα που καθορίζουν το δυναμικό

**Δυναμικό ζ:** Ηλεκτροκινητικό δυναμικό, Δυναμικό στο επίπεδο ολίσθησης

Επίπεδο ολίσθησης

Δυναμικό ζ

Δυναμικό 0

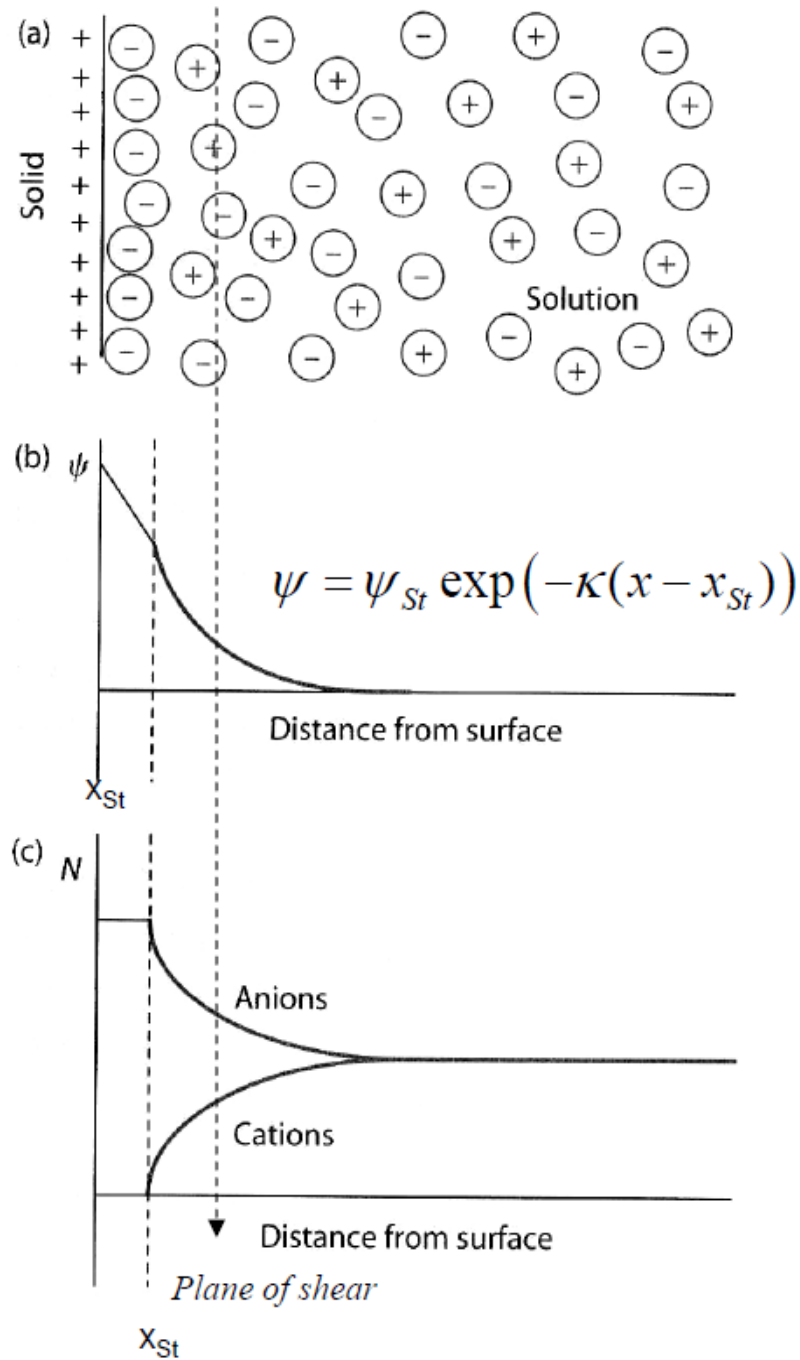


Μια επιφάνεια σε επαφή με ηλεκτρολυτικό διάλυμα, κατά κανόνα έχει φορτίο,  $\sigma_0$ . Αυτό το φορτίο έχει ως συνέπεια τη δημιουργία δυναμικού,  $\psi_0$ , στην επιφάνεια, και ενός φθίνοντος δυναμικού,  $\psi$ , καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια προς τη μεριά του διαλύματος. Συνέπεια είναι η αναδιάταξη των ιόντων.

**Δύο περιοχές:** Η στιβάδα Stern αμέσως μετά την επιφάνεια, όπου σημασία έχει το μέγεθος των ιόντων ενώ έξω από αυτήν είναι η διάχυτη διπλοστιβάδα.

Λόγω της διαφοράς φορτίου μεταξύ επιφάνειας του στερεού και της διάχυτης διπλοστιβάδας, η σχετική κίνηση της μιας περιοχής ως προς την άλλη θα προκαλέσει διαχωρισμό φορτίου και συνεπώς τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού.

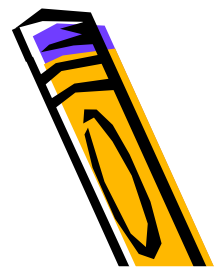
Διαφορετικά, η εφαρμογή δυναμικού μπορεί να προκαλέσει τη σχετική αυτή κίνηση των δύο φάσεων.



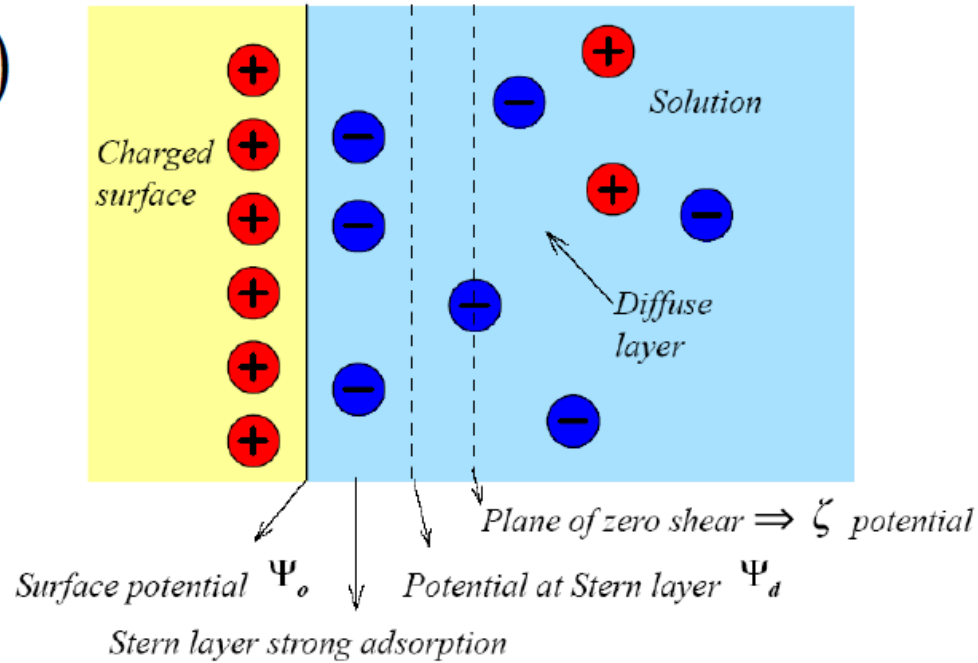
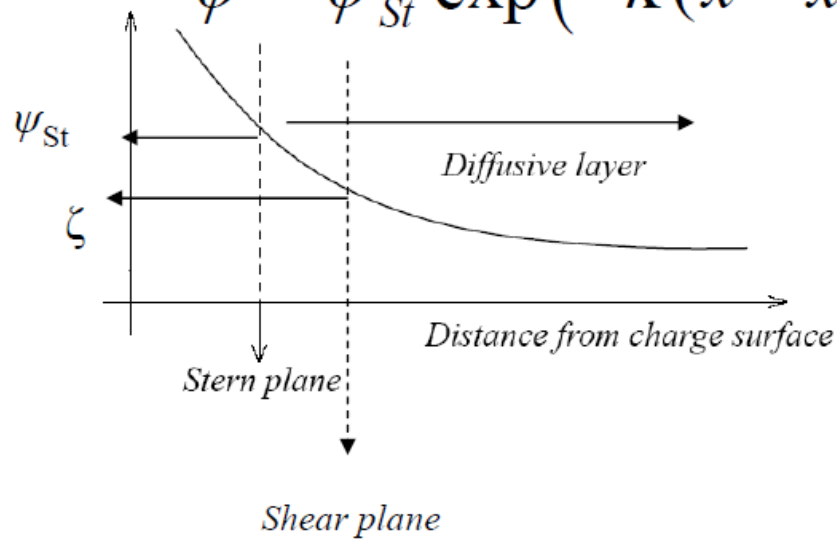
Η σχετική κίνηση επιφάνειας - υγρού γίνεται στο επίπεδο ολίσθησης. Το δυναμικό στο επίπεδο αυτό είναι γνωστό ως **δυναμικό  $\zeta$**  και η τιμή του υπολογίζεται από μετρήσεις των **ηλεκτροκινητικών φαινομένων**. Το δυναμικό  $\zeta$  είναι σχεδόν το ίδιο με το δυναμικό Stern οπότε δίνει μια ιδέα για το δυναμικό στο επίπεδο από το οποίο και πέρα εκτείνεται η διάχυτη διπλοστιβάδα



# Ηλεκτροκινητικό δυναμικό



$$\text{Potential } \psi = \psi_{St} \exp(-\kappa(x - x_{st}))$$



Το ηλεκτροκινητικό ή δυναμικό  $\zeta$  είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό στο επίπεδο ολίσθησης

Θετικά φορτισμένο σωματίδιο με αρνητική ιοντική ατμόσφαιρα

Το επίπεδο ολίσθησης είναι πολύ κοντά στο εξωτερικό μέρος της στιβάδας Stern με αποτέλεσμα το δυναμικό Stern να προσεγγίζει το δυναμικό  $\zeta$  σε χαμηλή συγκέντρωση ηλεκτρολύτη

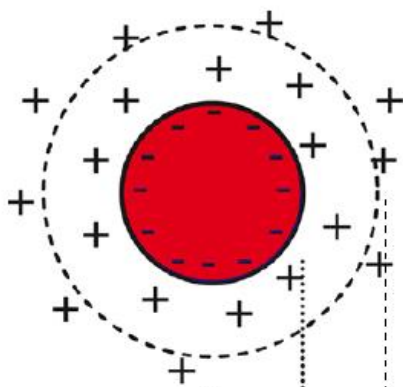
$$\zeta \approx \psi_{St}$$



16 Μαΐ



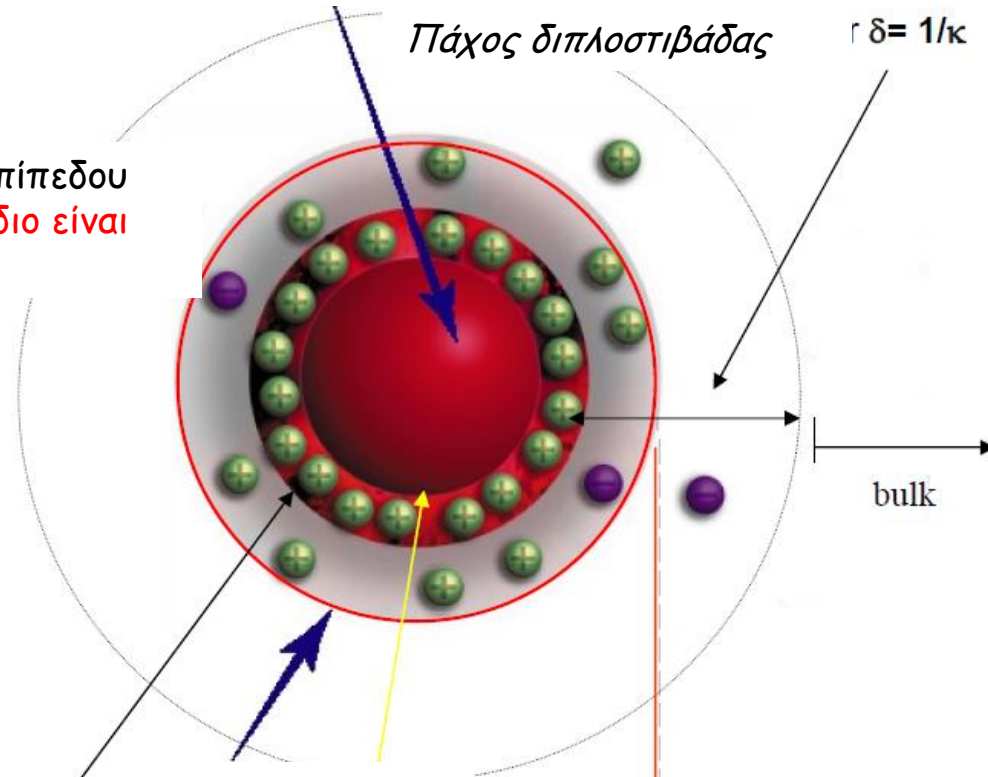
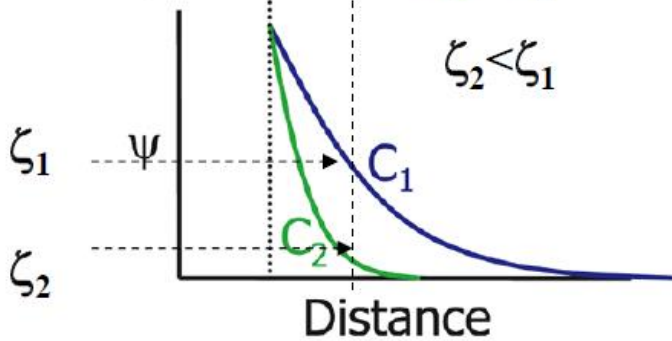
# Ηλεκτροκινητικό δυναμικό σωματιδίων



Στο εσωτερικό του επίπεδου ολίσθησης το σωματίδιο είναι μια ενιαία οντότητα

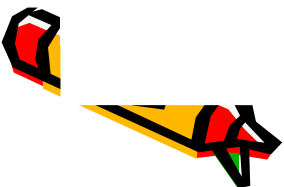
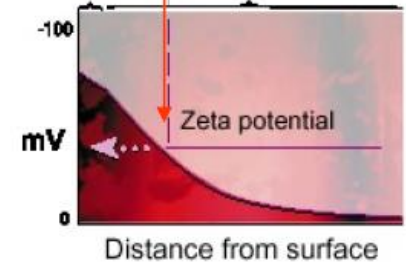
$$C_2 > C_1$$

$$\zeta_2 < \zeta_1$$

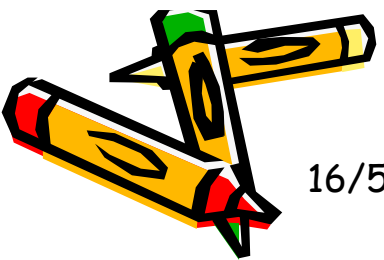
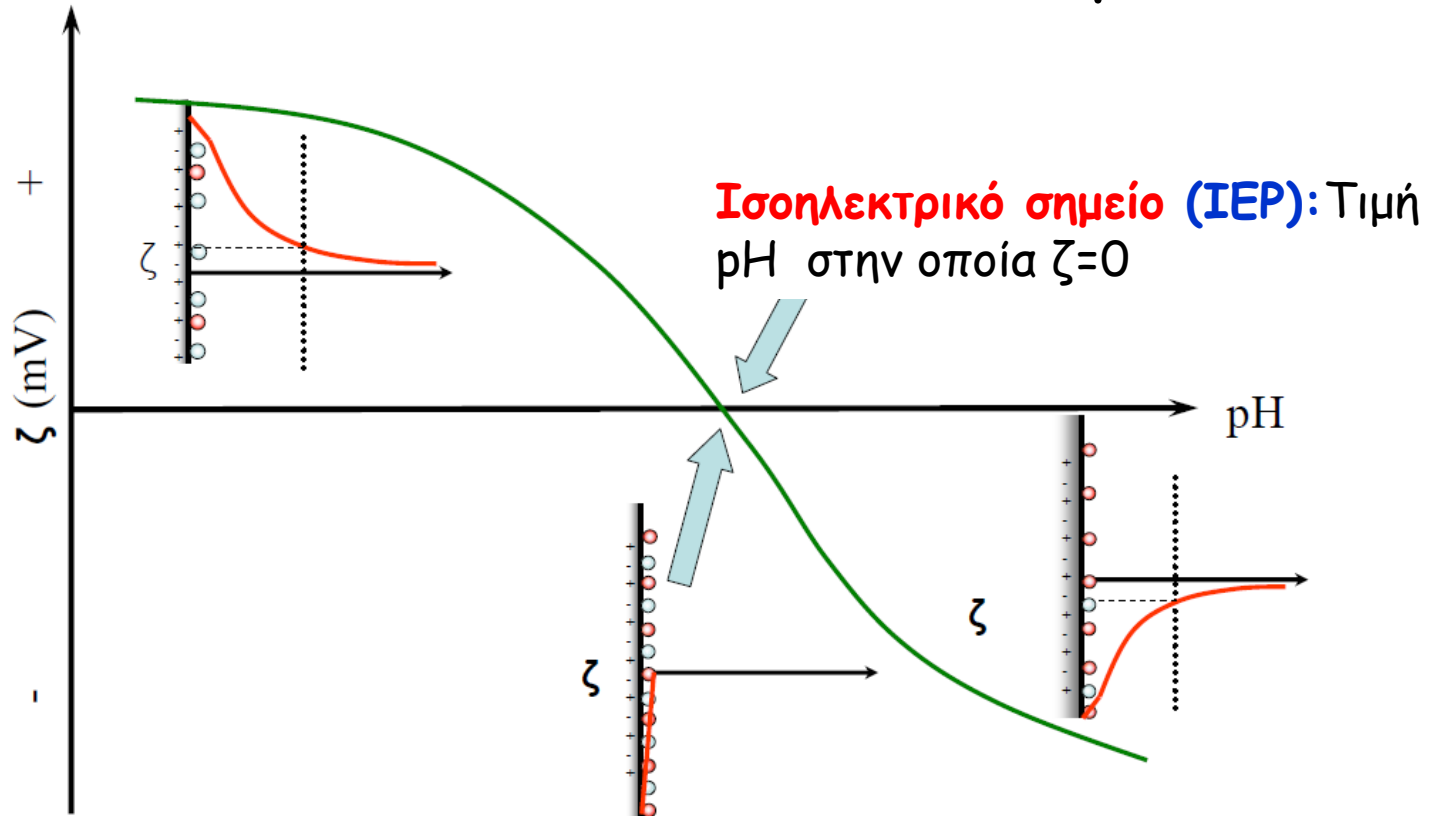


Επίπεδο ολίσθησης

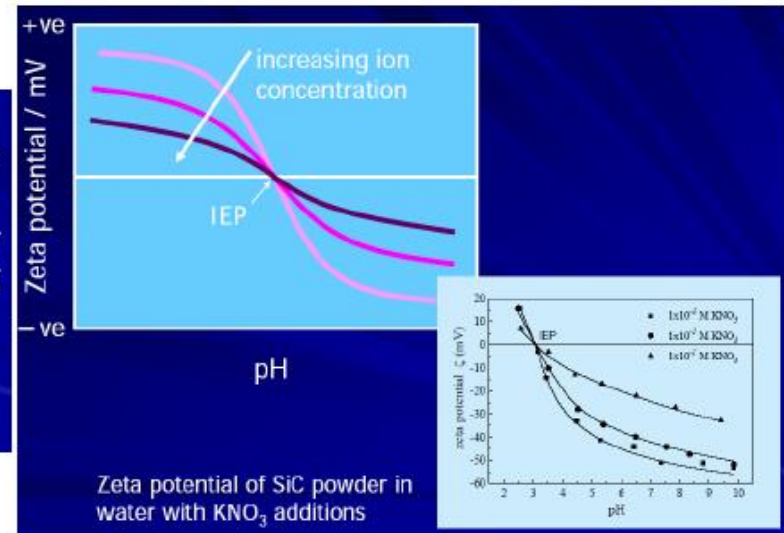
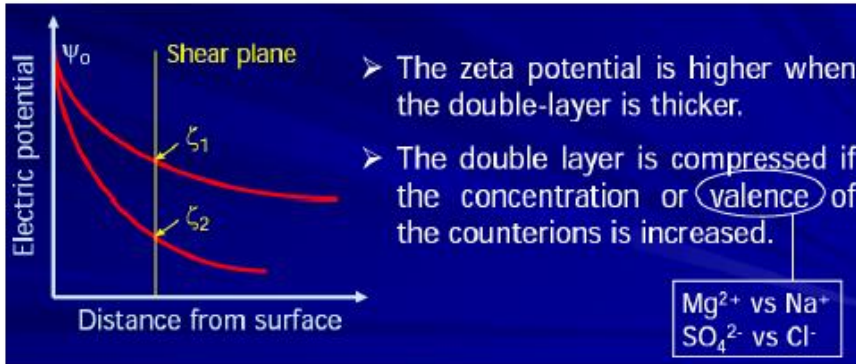
διεπιφάνεια



# Δυναμικό ζ: Επίδραση του pH

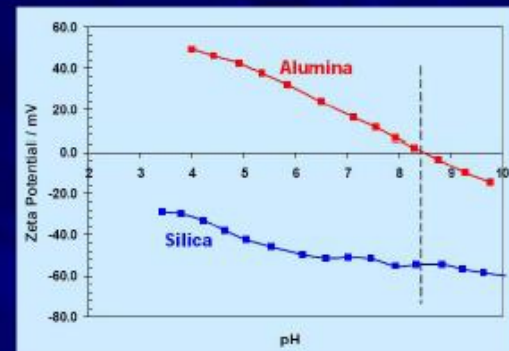


# Ισοηλεκτρικό σημείο



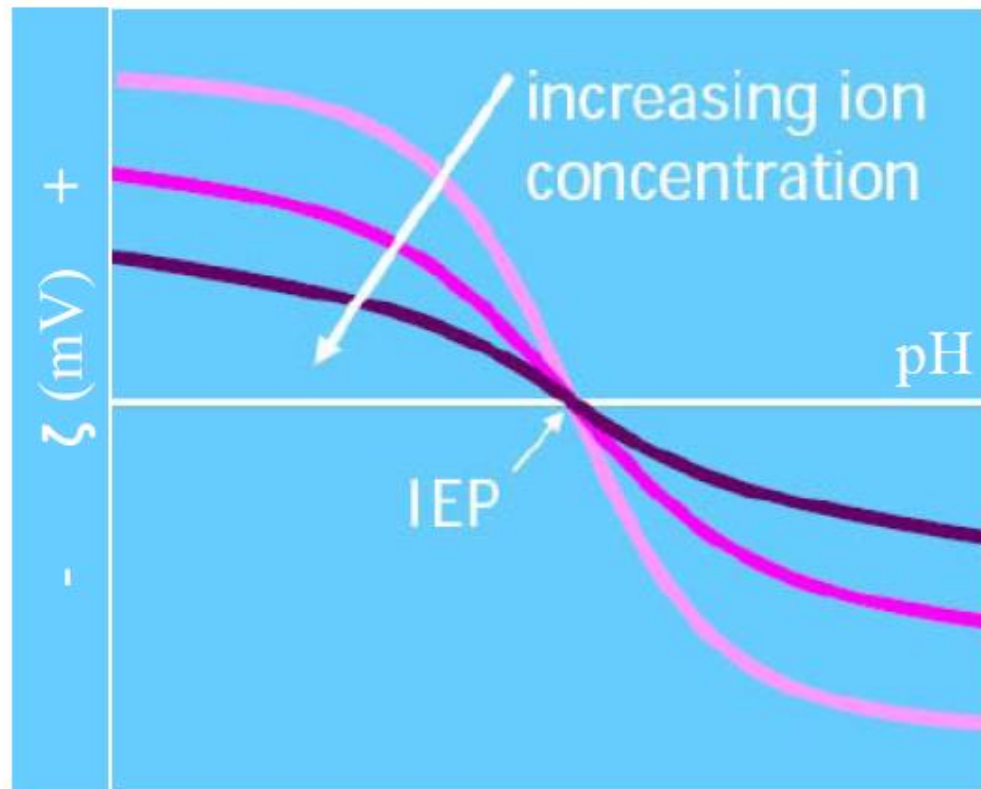
## Isoelectric Point

- The pH at which the zeta potential is zero (i.e. where there is no net charge at the slipping plane) is termed the **isoelectric point, IEP**.
- For a charged hydrated surface, changing the pH from the isoelectric point will initially increase the absolute value of the zeta potential and then it will level off due to the compression of the double layer.
- When a polyelectrolyte is adsorbed onto a particle surface, the zeta potential also initially increases rapidly and then more slowly.



Different materials have their IEPs at different pH values. This means that mixtures of powders will coagulate if there are opposite charges on the different particles, e.g. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> at pH < 8.5.

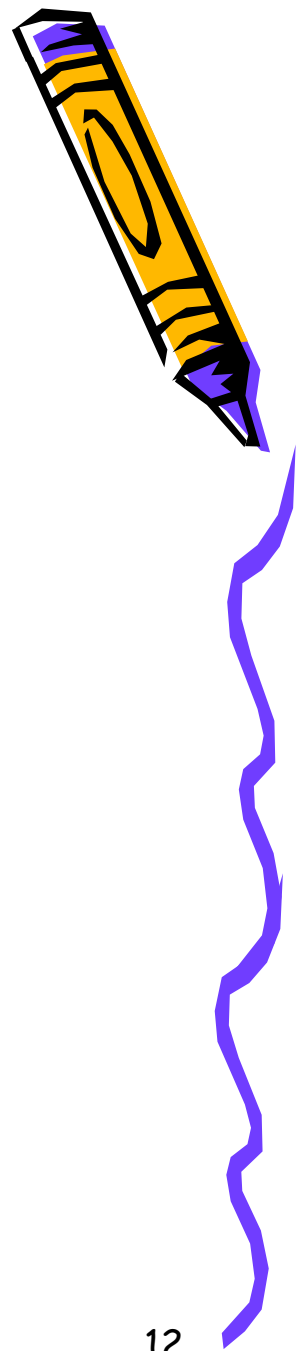
# Ισοηλεκτρικό σημείο-επίδραση συγκέντρωσης ιόντων



16/5/2024

Αιωρήματα- Γαλακτώματα

12





**Ηλεκτροκινητική:** Όρος ο οποίος αναφέρεται σε όλες τις διεργασίες, στις οποίες η οριακή στιβάδα μεταξύ μιας ηλεκτρικά φορτισμένης φάσης και μιας άλλης εξαναγκάζεται να κάνει κάποια εργασία διάτμησης (ολίσθηση).

Το φορτίο, το οποίο είναι προσκολλημένο στη μια φάση (π.χ. Του στερεού) κινείται στην περίπτωση αυτή προς μια κατεύθυνση και το αντίστοιχο φορτίο το οποίο συνδέεται με την άλλη φάση, με την οποία η πρώτη είναι σε επαφή, κινείται προς την αντίθετη.

Από την ανάλυση της σχετικής κίνησης (της μιας φάσης ως προς την άλλη) είναι δυνατόν να εξαχθούν πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο η διπλοστιβάδα αντιδρά στο πεδίο διάτμησης.

Στην καλύτερη περίπτωση, είναι δυνατόν να υπολογισθεί η κατανομή του κινούμενου φορτίου μεταξύ των δύο φάσεων. Υπό την προϋπόθεση ότι τα μοντέλα τα οποία έχουμε για τη διπλοστιβάδα είναι ακριβή, θα πρέπει τα ηλεκτροκινητικά αποτελέσματα να είναι σε συμφωνία.



# Ηλεκτροκινητικά φαινόμενα



**Ηλεκτρο-ώσμωση (Electroosmosis):** Σχετική κίνηση ρευστού ως προς μια φορτισμένη (ηλεκτρικά) επιφάνεια με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού

**Ηλεκτροφόρηση (Electrophoresis):** Παρουσία ηλεκτρικού πεδίου τα σωματίδια κινούνται σχετικά με ένα στάσιμο ή και κινούμενο ρευστό

**Δυναμικό ροής (Streaming potential):** Ιόντα που περιέχονται σε διαλύματα εξαναγκάζονται να κινηθούν μέσα από τριχοειδείς μικρο-διαύλους λόγω εφαρμοζόμενης υδροστατικής πίεσης απουσία ηλεκτρικού πεδίου. Στην ροή αντιτίθενται ηλεκτροιζώδη φαινόμενα

**Διηλεκτροφόρηση (dielectrophoresis):** Κίνηση διηλεκτρικών σωματιδίων σε χωρικά ανομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο



- Αν αιώρημα φορτισμένων σωματιδίων αφεθεί να καθιζήσει, η κίνηση των σωματιδίων λόγω της καθίζησης, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ του άνω και του κάτω μέρους του αιωρήματος.
- Η διεργασία αυτή είναι γνωστή ως φαινόμενο Dorn και το αντίστοιχο δυναμικό είναι γνωστό ως *δυναμικό καθίζησης*.



# Ηλεκτροώσμωση

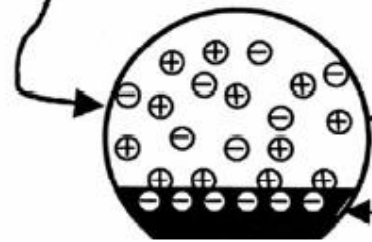
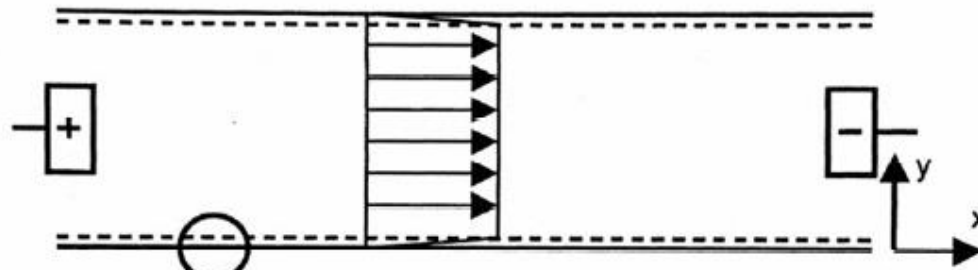


- Ο όρος αυτός, αναφέρεται στην κίνηση ενός υγρού, λόγω εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου. Η κίνηση αυτού του είδους λαμβάνει χώρα, όταν εφαρμοσθεί ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα πορώδους δισκίου.
- Στην απλούστερη μορφή του το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου,  $E$ , σε τριχοειδή σωλήνα παράλληλα προς τον άξονα του σωλήνα.
- Η ροή, οφείλεται στην παρουσία ηλεκτρικής διπλοστιβάδας στα τοιχώματα του τριχοειδούς.
- Σε γυάλινο τριχοειδή σωλήνα, ο οποίος περιέχει ηλεκτρολυτικό διάλυμα το ηλεκτρικό φορτίο στα τοιχώματα οφείλεται στη διάσπαση των σιλανο-ομάδων της επιφάνειας του γυαλιού ( $-SiOH$ ) ή στην επιλεκτική προσρόφηση ιόντων  $OH^-$  και κατά κανόνα είναι αρνητική. Αντισταθμίζεται από ίσο και αντίθετο φορτίο του ηλεκτρολύτη.



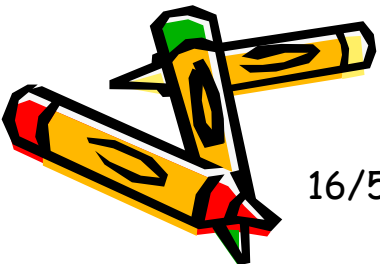


# Ηλεκτρούσμωση



Ηλεκτρική διπλή στιβάδα

Αρνητικά φορτισμένο τοίχωμα



Η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου, έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση των ιόντων της διπλοστιβάδας προς το ένα ή το άλλο ηλεκτρόδιο.

Επειδή τα ιόντα θα είναι του αυτού φορτίου η κίνησή τους, έχει ως συνέπεια τη δημιουργία δύναμης σώματος η οποία ασκείται στο υγρό στη μεριά της διπλοστιβάδας με αποτέλεσμα την κίνηση του υγρού.

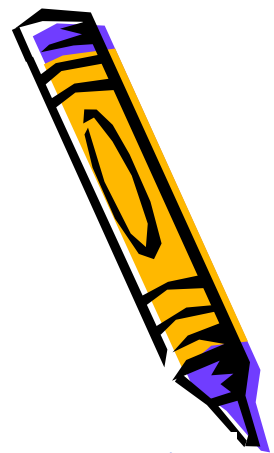
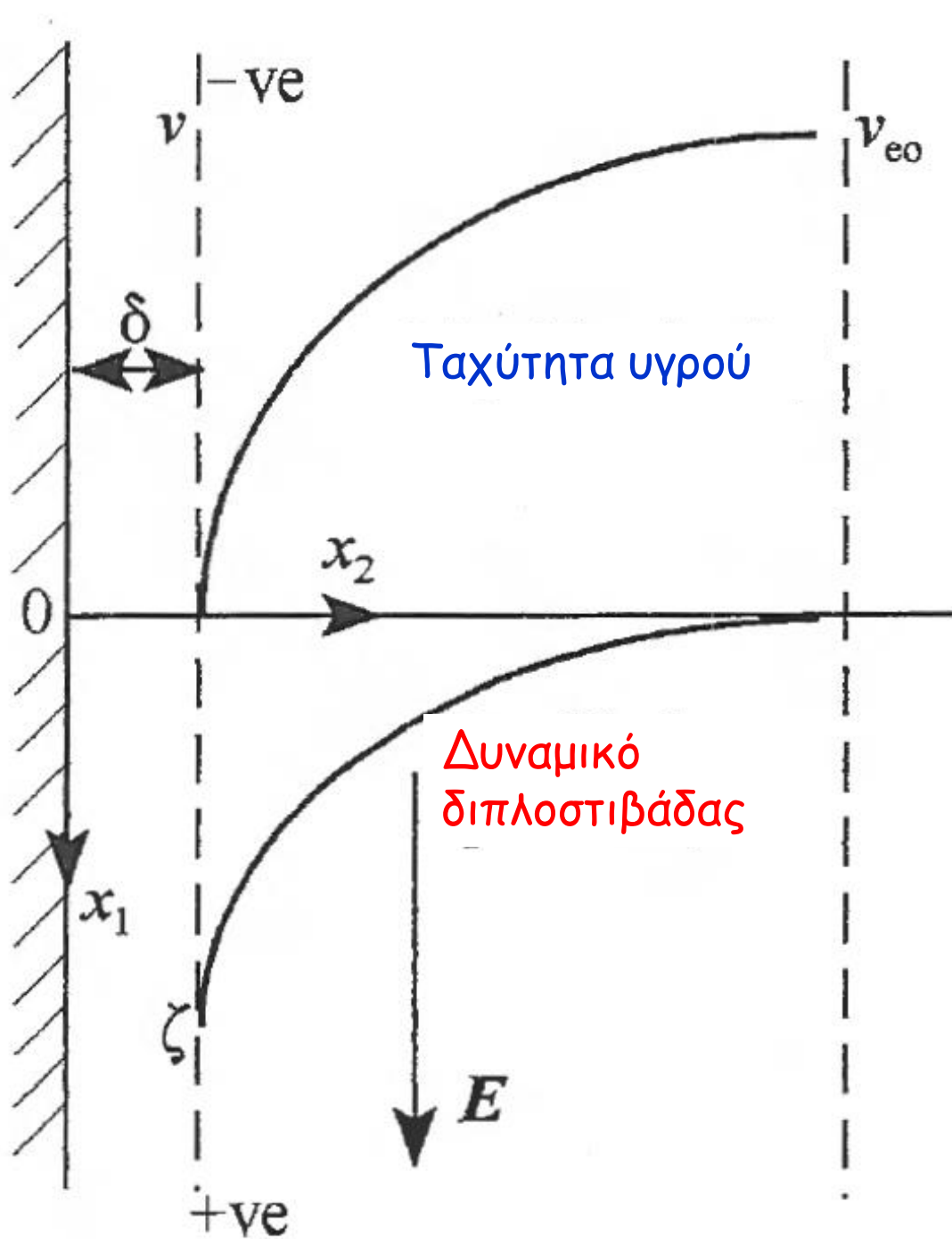
Κατά κανόνα, η ακτίνα του σωλήνα είναι πολύ μεγαλύτερη από το πάχος της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανάλυση της ροής στη διπλοστιβάδα με την παραδοχή ότι είναι επίπεδη (η διπλοστιβάδα).

Επειδή το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι παράλληλο προς τη διπλοστιβάδα, η μετακίνηση των ιόντων δεν επηρεάζει την πυκνότητα φορτίου  $\rho_e$ : (Καθώς τα ιόντα κινούνται προς το ηλεκτρόδιο αντικαθίστανται από άλλα ιόντα του αυτού φορτίου). Κατά συνέπεια η δύναμη θα είναι:

$$F = \rho_e E = -\epsilon_0 \epsilon_r \nabla^2 \psi_e E$$



16 May 2024



Ηλεκτροσωματική  
ροή πλησίον  
στερεάς επιφάνειας  
Παράθεση πεδίου  
ταχυτήτων και  
δυναμικού

Δεδομένου του ότι η ροή επιβάλλεται λόγω του δυναμικού  $E$ , και με δύο συνιστώσες ( $x_1$ , παράλληλη,  $x_2$  κάθετη προς την επιφάνεια) να συνεισφέρουν στη δύναμη, το ισοζύγιο δυνάμεων είναι:

$$\eta \frac{d^2 v_1}{dx_2^2} - \frac{\partial p}{\partial x_1} = -\rho_e E$$

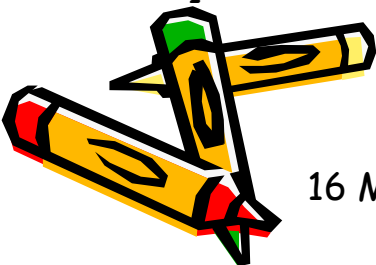
και

$$-\frac{\partial p}{\partial x_2} = \rho_e \frac{d\psi_e}{dx_2}$$

Υπετέθη ότι η ροή του ρευστού είναι παράλληλη προς τα τοιχώματα με αποτέλεσμα η συνιστώσα  $v_1$  να είναι ανεξάρτητη του  $x_1$ . Η κατακόρυφη συνιστώσα θεωρείται ότι δεν επηρεάζει και παραλείπεται στο ισοζύγιο δυνάμεων.

Απουσία βαθμίδας πίεσης και με αμελητέα τη βαρύτητα,  $\eta$ ,  $\rho$  θα είναι ανεξάρτητη της  $x_1$  οπότε:

$$\eta \frac{d^2 v_1}{dx_2^2} = -\rho_e E = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d^2 \psi_e}{dx_2^2} E$$



# Ηλεκτροφόρηση: Οι τύποι Smoluchowski και Huckel



Ο όρος ηλεκτροφόρηση αναφέρεται στην κίνηση αιωρούμενων σωματιδίων κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στο αιώρημα.

Πειραματικά, έχει βρεθεί ότι η ταχύτητα των σωματιδίων είναι ανάλογη προς την ισχύ του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για σφαιρικού σχήματος σωματίδια η σχέση είναι:

$$v = \mu_E E$$

Όπου η  $\mu_E$  ονομάζεται **ηλεκτροφορητική κινητικότητα** του σωματιδίου. Συνδέεται με το δυναμικό  $\zeta$ . Υποτίθεται ότι ένα σωματίδιο υπάρχει σε ένα άπειρο υγρό. Η παλαιότερη λύση του προβλήματος δόθηκε από τον Smoluchowski (1921) για  $ka \gg 1$  (λεπτή διπλοστιβάδα). Η επεξεργασία του προβλήματος ήταν η αυτή με την περίπτωση της ηλεκτροώσμωσης



Σύμφωνα με [Schmoluchowski](#) η σχέση μεταξύ ταχύτητας σωματιδίου και δυναμικού ζ είναι:

$$v = [\epsilon\zeta/\eta]E$$

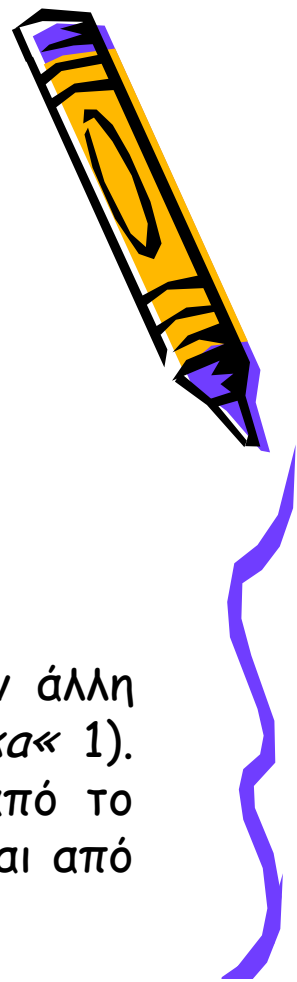
Οπότε, η ηλεκτροφορητική κινητικότητα θα είναι:

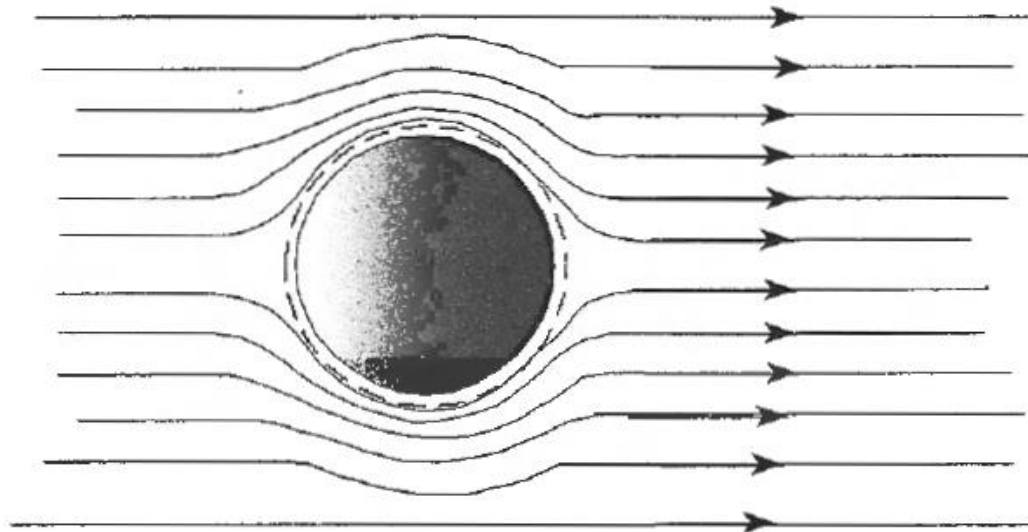
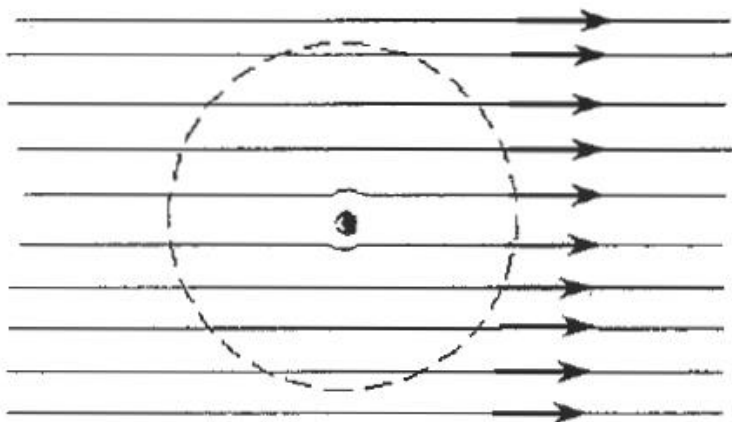
$$\mu_E = \epsilon\zeta/\eta.$$

Ο Hückel ( 1924) έλυσε το πρόβλημα της ηλεκτροφόρησης για την άλλη ακραία περίπτωση της πολύ μεγάλης ηλεκτρικής διπλοστιβάδας ( $ka \ll 1$ ). Στην περίπτωση αυτή οι γραμμές του πεδίου δεν επηρεάζονται από το σωματίδιο και η δύναμη η οποία σκείται στο σωματίδιο αντισταθμίζεται από την οπισθέλκουσα λόγω του ιξώδους του ρευστού, οπότε:

$$\mu_E = v/E = Q/6\pi\eta a = [2\epsilon\zeta/3\eta] (1 + ka) \approx 2\epsilon\zeta/3\eta$$

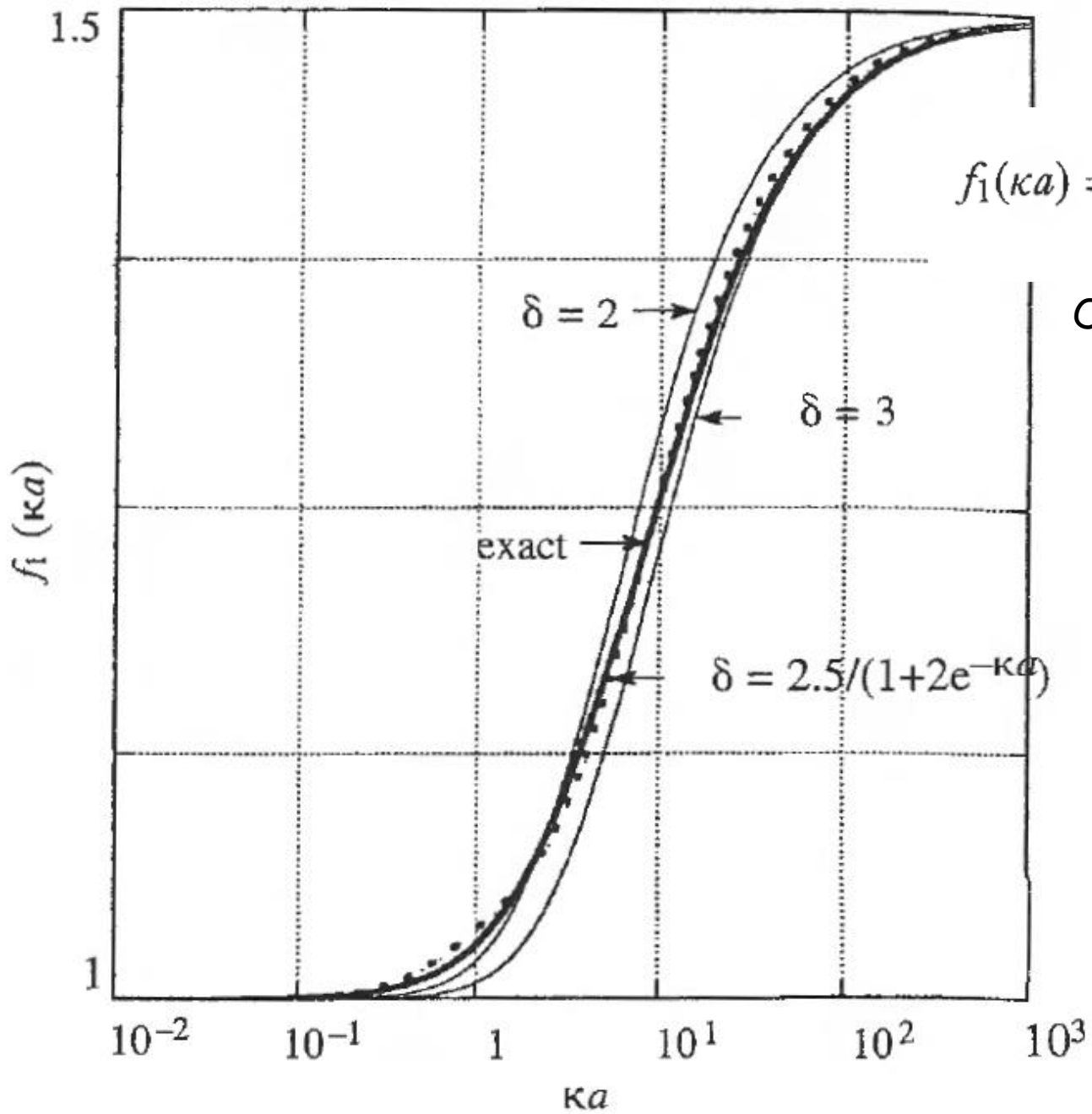
Τη διαφορά μεταξύ των δύο σχέσεων γεφύρωσε ο Henry (1931) ο οποίος έλαβε υπόψη τον τρόπο με τον οποίο τα σωματίδια επηρεάζουν τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου στη γειτονία του





$$\mu_E = [2\epsilon\zeta/3\eta]f_1(ka)$$

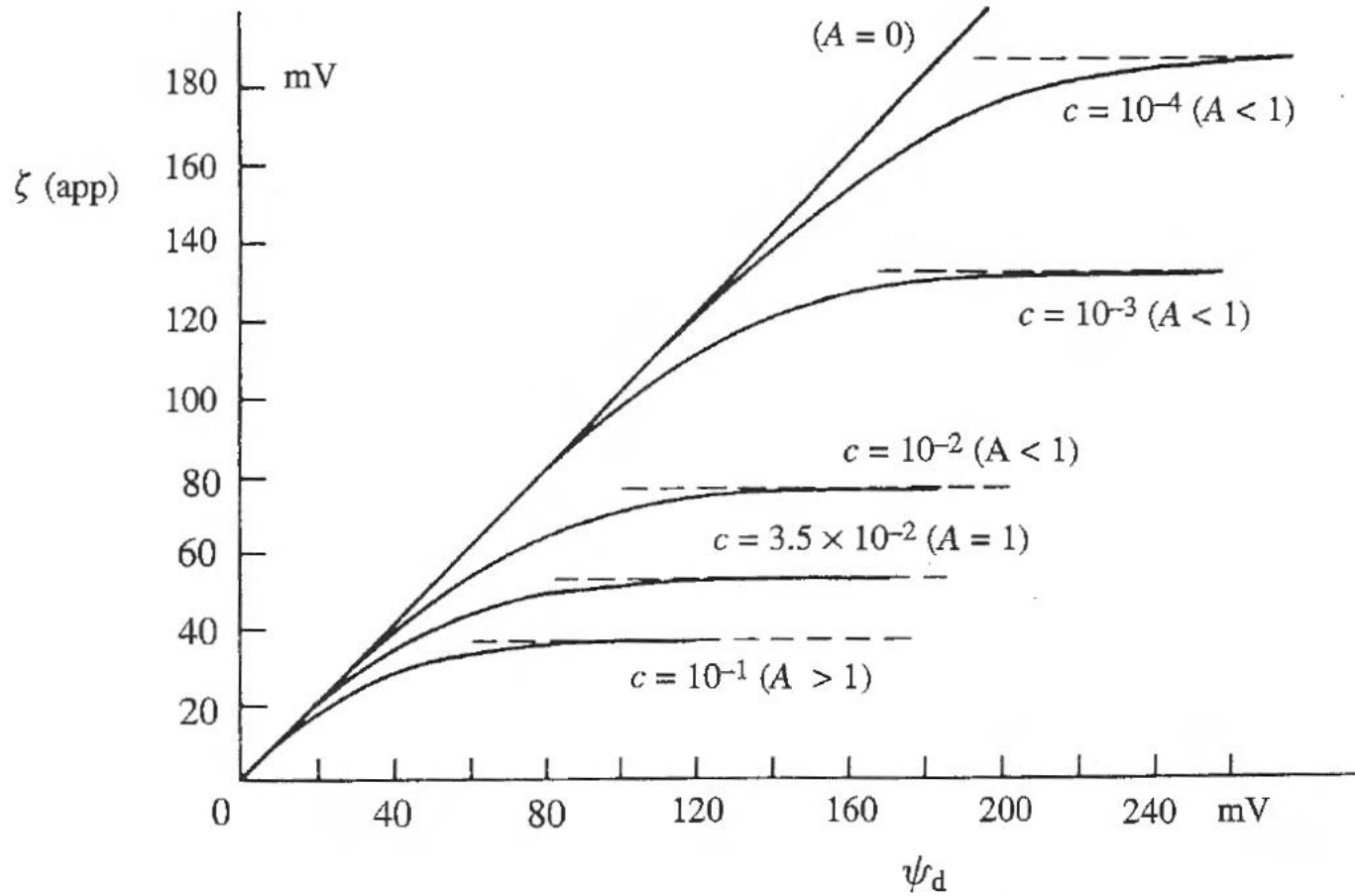
Όπου η  $f(ka)$  είναι μονοτόνως μεταβαλλόμενη συνάρτηση η οποία παίρνει τιμές από 1.0 για  $ka = 0$  έως 1.50 για  $ka = \infty$ . Προφανώς στο κάτω όριο συμπίπτει με τη λύση Hückel και στο άνω όριο με την εξίσωση Smoluchowski. Σε υψηλές τιμές  $ka$  η δύναμη επί του σωματιδίου οφείλεται αποκλειστικά στην ηλεκτροφορητική επιβράδυνση : Τα ιόντα της διπλοστιβάδας συμπαρασύρουν το ρευστό κατά την κίνησή τους και το σωματίδιο κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση. Σε πολύ χαμηλές τιμές της  $ka$  η διπλοστιβάδα υφίσταται τις ίδιες δυνάμεις αλλά δεν μεταφέρονται στο πολύ μικρού μεγέθους σωματίδιο. Το σωματίδιο στην περίπτωση αυτή συγκρατείται από το ιξώδες του ρευστού.



$$f_1(\kappa a) = 1 + \frac{1}{2[1 + \delta/\kappa a]^3}$$

Ohshima (1996)





Φαινόμενο ηλεκτροκινητικό δυναμικό συναρτήσεως του δυναμικού στο OHP, όταν η τιμή του  $\Psi_d$  καθορίζεται από ιζωδοηλεκτρικά φαινόμενα.  $c$  γραμμομοριακή συγκέντρωση

# Το δυναμικό ροής

Το **δυναμικό ροής** (Streaming potential) είναι το δυναμικό το οποίο αναπτύσσεται στα άκρα τριχοειδούς, μεμβράνης, πορώδους διαφράγματος-εμβόλου, όταν ένα υγρό υπό (υδροστατική) πίεση αναγκάζεται να διέλθει δι αυτών.

Η διαφορά πίεσης,  $\Delta P$ , συνδέεται με την ταυτόχρονη μεταφορά φορτίου και μάζας η οποία λαμβάνει χώρα με διάφορους μηχανισμούς. Στην ηλεκτρόσμωση, η επιφάνεια του τριχοειδούς, της μεμβράνης ή των πόρων σε πορώδες έμβολο, φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικής διπλοστιβάδας. Το υγρό κινείται υπό την επίδραση πίεσης και μεταφέρει το καθαρό φορτίο, εκείνο το οποίο βρίσκεται στο κινητό μέρος της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας (διάχυτη διπλοστιβάδα).

Το αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη ενός μόνιμου ρεύματος συναγωγής. Λόγω της ανάπτυξης του ηλεκτρικού αυτού ρεύματος λόγω μόνης της ροής του ρευστού (χωρίς δηλαδή την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού) ονομάζεται **ηλεκτρικό ρεύμα ροής,  $I_s$** .

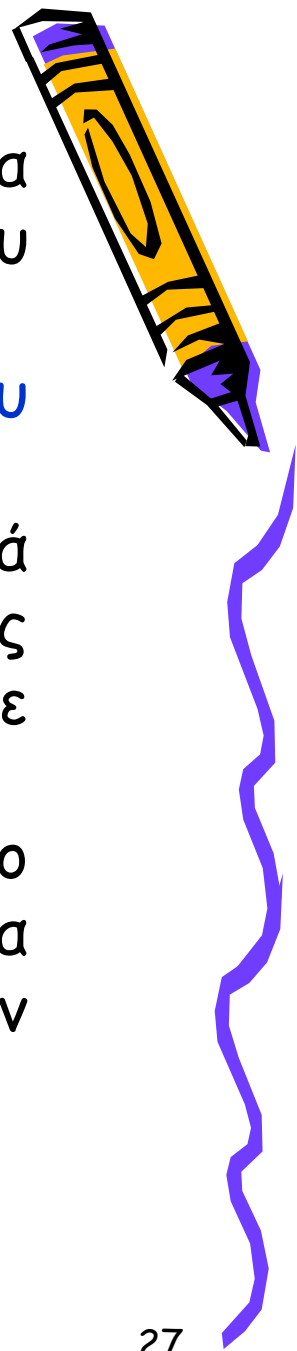


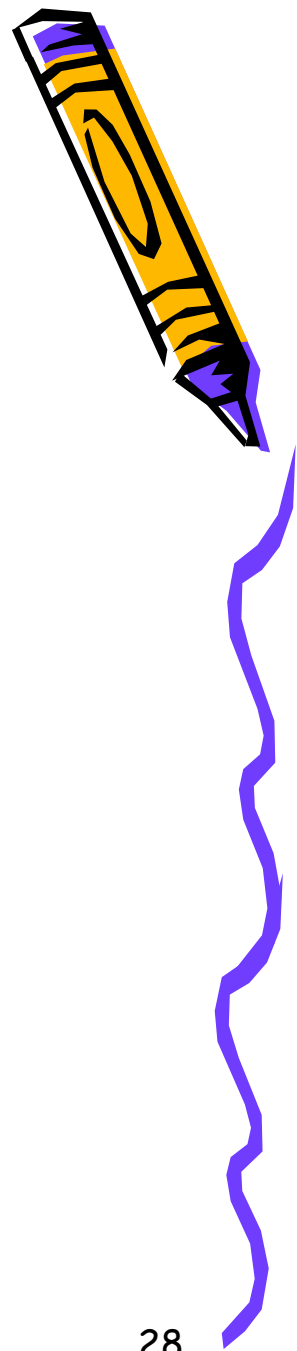
Λόγω της μεταφοράς ιόντων λόγω ροής στα άκρα του τριχοειδούς συσσωρεύονται ιόντα αντιθέτου φορτίου

Ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού κατά μήκος του τριχοειδούς

Το δυναμικό αντιτίθεται στην μηχανική μεταφορά του φορτίου με την δημιουργία κίνησης ιόντων προς την αντίθετη κατεύθυνση και σε μικρότερο βαθμό με ηλεκτροώσμωση

Η μεταφορά φορτίου, λόγω αυτών των δύο διεργασιών, ονομάζεται **ρεύμα διαρροής**. Το ρεύμα αυτό αυξάνει αυξανόμενης της συσσώρευσης ιόντων μέχρι την επίτευξη μιας μόνιμης κατάστασης

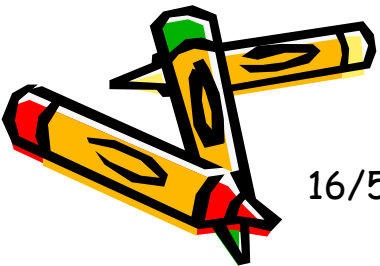




Στην μόνιμη κατάσταση, το ρεύμα διαρροής και το ρεύμα ροής αλληλοαναιρούνται

Η διαφορά δυναμικού η οποία αντιστοιχεί στην μόνιμη κατάσταση, αντιστοιχεί σε μια μέγιστη τιμή που ονομάζεται **δυναμικό ροής**

Το δυναμικό αυτό πρέπει να μετρείται συναρτήσει της πίεσης με βολτόμετρο υψηλής αντίστασης εισόδου



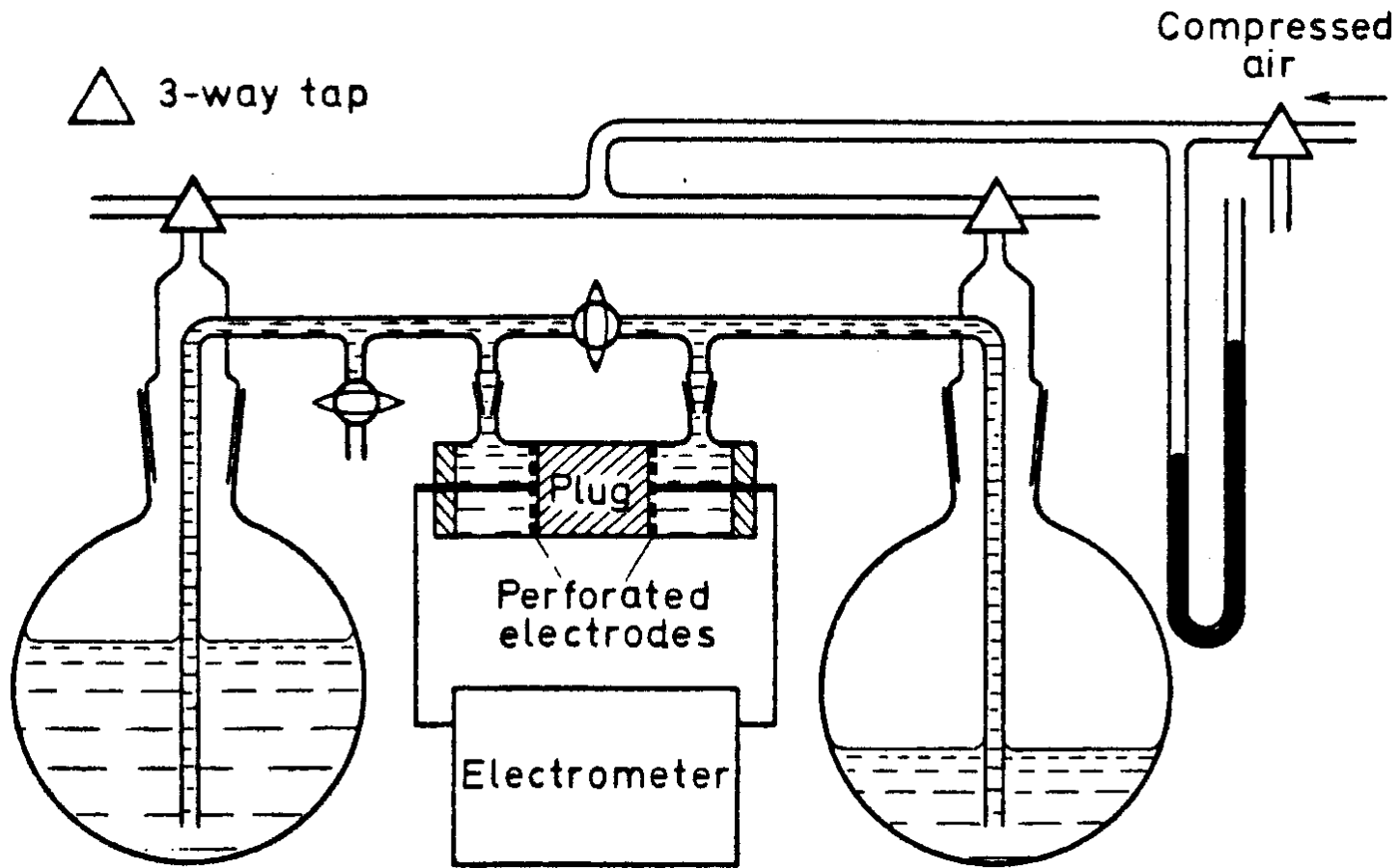
16/5/2024

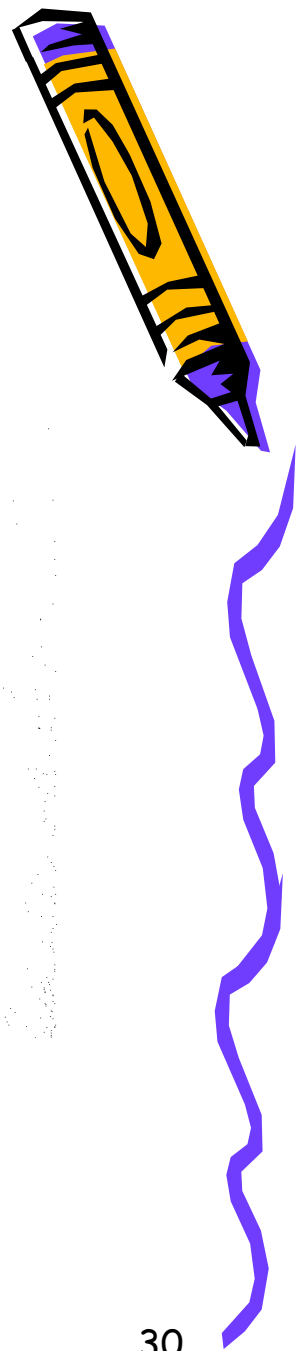
Αιωρήματα- Γαλακτώματα

28

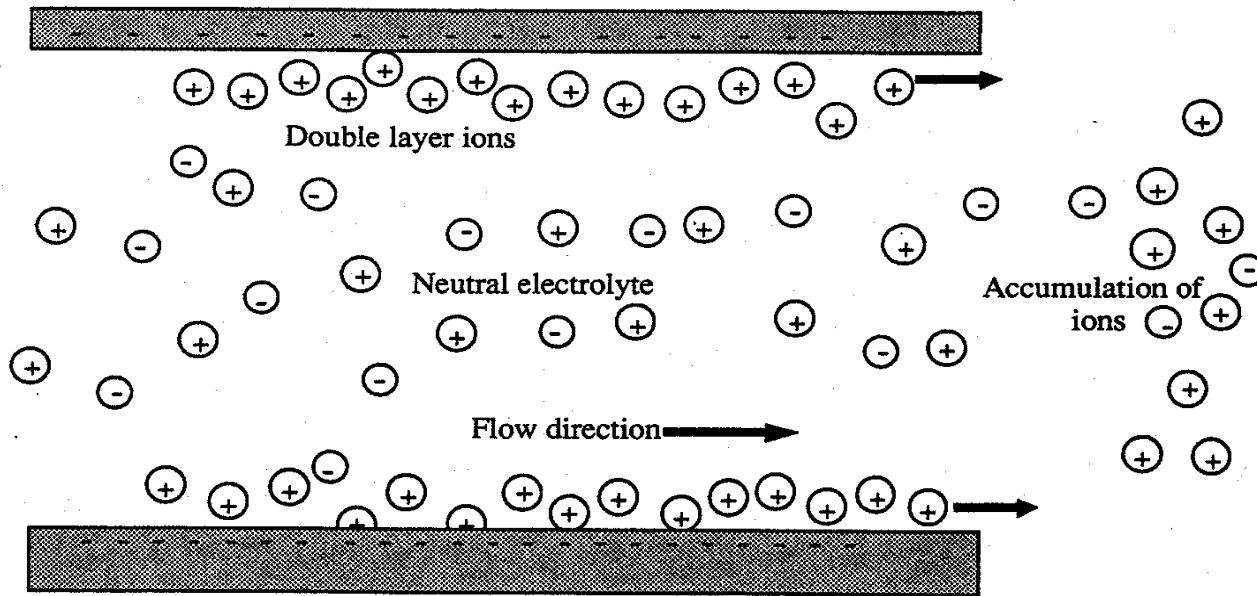


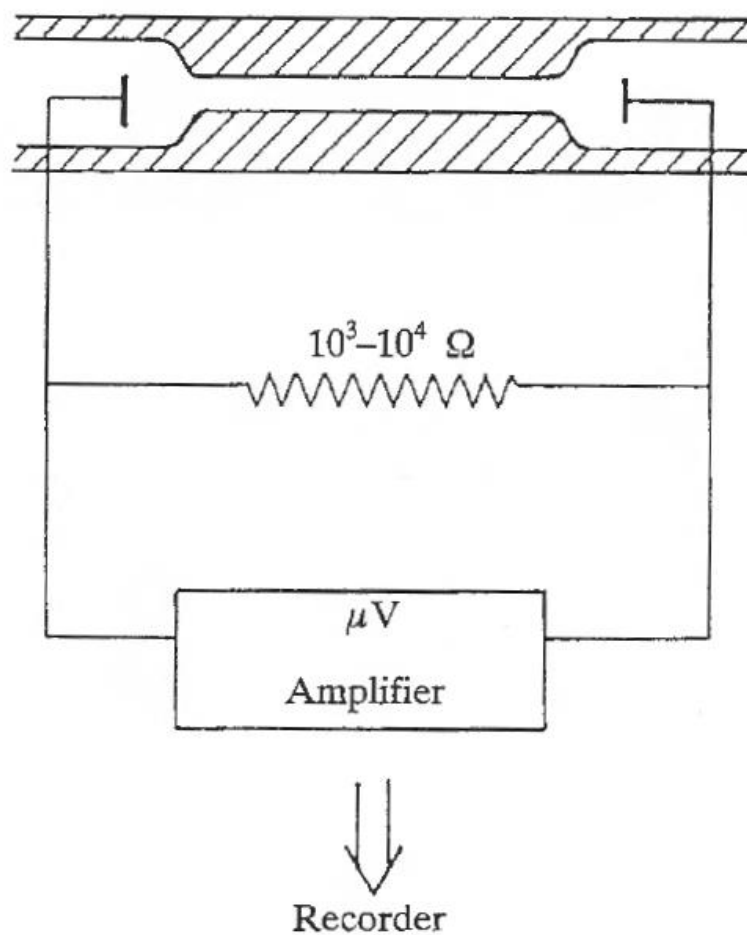
# Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του δυναμικού ροής





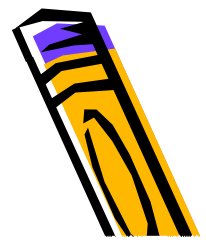
# Ρεύμα Ροής - Ρεύμα Διαρροής Μεταφορά Φορτίου και Μάζας





Μέτρηση ρεύματος ροής. Τα ηλεκτρόδια καλύπτονται με Pt για την αποφυγή πόλωσης και ροής του ρευστού. Η αντίσταση πρέπει να είναι μικρή σε σύγκριση με την αντίστοιχη του κελτίου και ο ενισχυτής microvolt θα πρέπει να έχει σύνθετη αντίσταση εισόδου περίπου  $1 M\Omega$ .

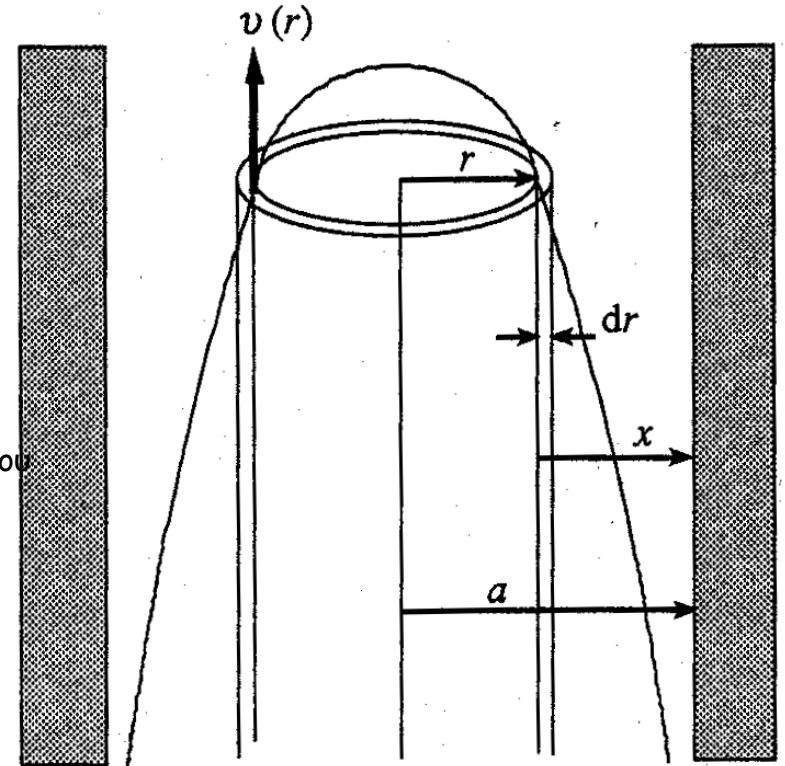
# Δυναμικό ροής σε απλό τριχοειδές



Στρωτή Ροή ( $Re < 2000$ )  
 Πάχος Διπλοστοιβάδας  $\ll$   
 Διάμετρος τριχοειδούς  
 Χαμηλή Ιοντική Ισχύς

$$\frac{E_s}{P} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\eta \left( K^L + \frac{2K^\sigma}{r} \right)}$$

$\epsilon \epsilon_0 \zeta$  — Επιφ. Αγωγ. σωματιδίου  
 $\eta$  — Ιξώδες ηλ/τη  
 $K^L$  — Ειδ. Αγωγ. Ηλ/τη  
 $\frac{2K^\sigma}{r}$  — Ακτίνα τριχοειδούς



Υψηλή Ιοντική Ισχύς

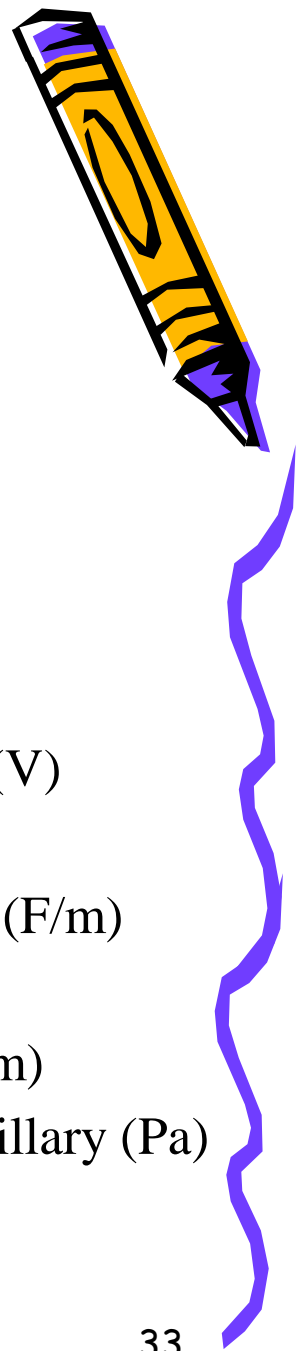
$$\frac{E_s}{P} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\eta K^L} \frac{R^C}{R^0}$$

$\frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\eta K^L}$  — Ειδική αγωγιμότητα στον τριχοειδή  
 $\frac{R^C}{R^0}$  — Ειδική αγωγιμότητα ηλεκτρολύτη





# Υπολογισμός του ζ-δυναμικού από μετρήσεις του δυναμικού ροής



$$\frac{\exp(Ze\zeta / 2kT)}{\kappa a} \ll 1$$

$\kappa$  = Debye parameter  
 $a$  = particle radius  
 $\zeta$  = zeta potential

$$\Delta E = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \zeta}{\eta K_E} \Delta p$$

$\Delta E$  = Potential over capillary (V)  
 $\epsilon_r$  = media dielectric constant  
 $\epsilon_0$  = permittivity of free space (F/m)  
 $\eta$  = medium viscosity (Pa·s)  
 $K_E$  = solution conductivity (S/m)  
 $\Delta p$  = pressure drop across capillary (Pa)

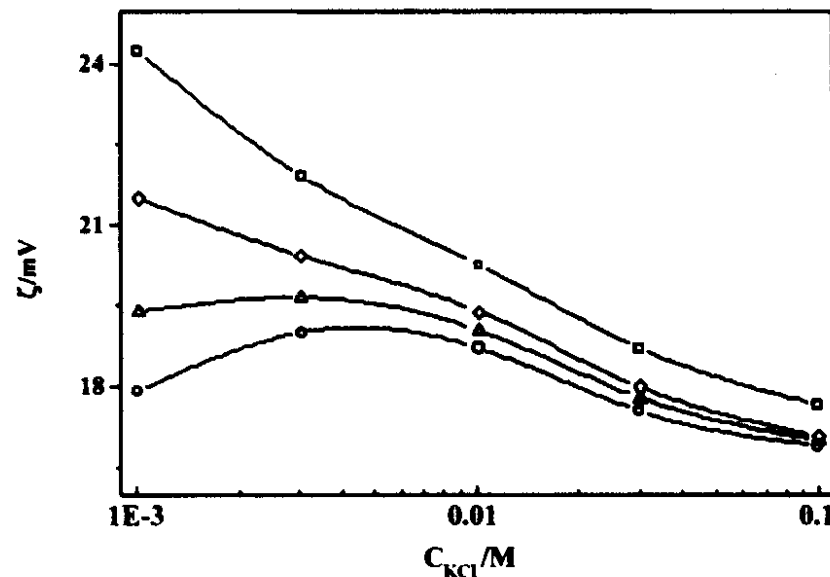


# Δυναμικό ροής σε πορώδη δισκία (plugs)



$$\frac{E_s}{P} = \frac{1}{K^*} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 R T}{\eta F} \left\{ \frac{F \zeta}{R T} [1 + 3\varphi f(0)] - \left[ \frac{F \zeta}{R T} - \frac{2}{z_1} \ln 2 \right] g(Du_2) \right\}$$

$$\frac{E_s}{P} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta (1 - 1.2\varphi)}{\eta K^*}$$



φ: κλάσμα όγκου του στερεού στο πορώδες έμβολο (plug)

K\*: αγωγιμότητα εμβόλου

