

Microfluidica

Electrostática & Electrocinética



universidad de buenos aires - exactas
departamento de Física
Juan José Giambiagi



Microfluidica

Gradiente de Presiones y Campos Eléctricos

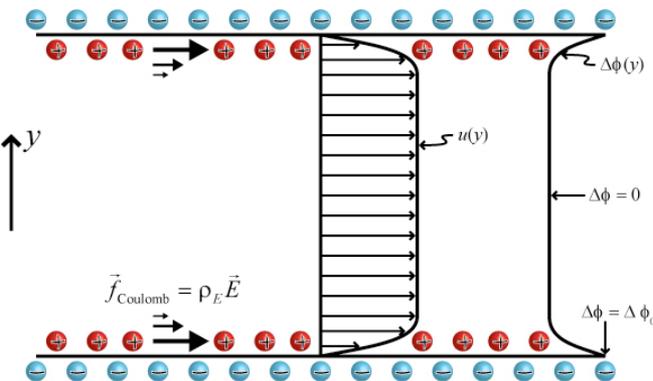
Fuerzas mas importantes para mover **fluidos** y **partículas** suspendidas en los fluidos

(en todos los casos las condiciones de borde y tensiones superficiales son fundamentales)

Clasificación

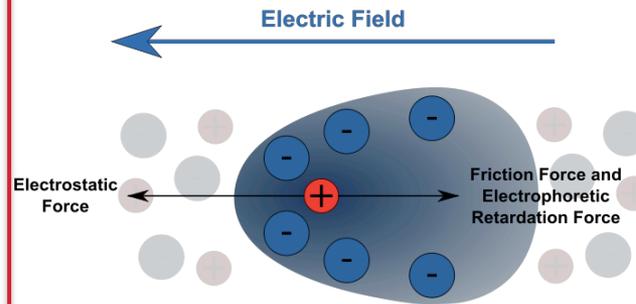
Electro-osmosis

Campo eléctrico +
Superficies con carga neta +
solución con electrolitos
→ genera convección



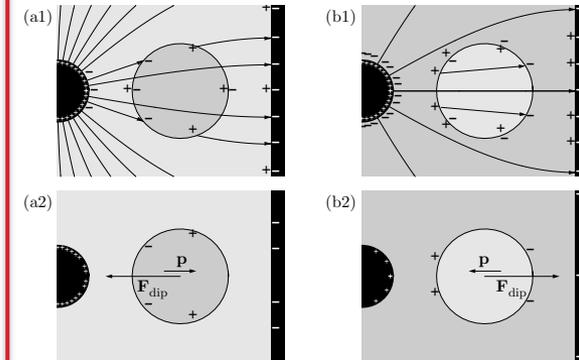
Electroforesis

Campo eléctrico +
Superficies sólida con carga neta
o partícula cargada +
→ Fuerza neta en la partícula



Dielectroforesis

Campo eléctrico +
No uniforme +
partícula neutra +
Polarización de los materiales
→ Fuerza neta en la partícula



Método de transporte y manipulación de fluidos y partículas en microfluidica.

Ventajas: - Origen en las interfaces → ideal para miniaturización (ley de escala a favor!)

Microfluidica

Electrocinética

Mus usado como método de transporte y manipulación de fluidos y partículas en microfluidica.

Ventajas: - Se origina en las interfaces → ideal para miniaturización (ley de escala a favor!)

- Funciona muy bien con vidrio y PDMS y con soluciones acuosas
- Mucha experiencia y resultados disponibles (especialmente en separación)
- Fácil de fabricar, integrar y controlar en microfluidica

Desventajas: - Funciona únicamente en sistemas con cargas eléctricas o polarizables

- Voltajes y campos eléctricos altos (puede ser un problema o limitación)
- Puede producir calor en la muestra (calentamiento por resistencia)
- No sirve si uno quiere evitar la separación de cargas!

Muchos aspectos de **Electrocinética** se desarrollaron en areas aplicadas

Partículas coloidales y dispersiones;

Separación usando tubos capilares (electroforesis en capilares);

Transporte en medios porosos;

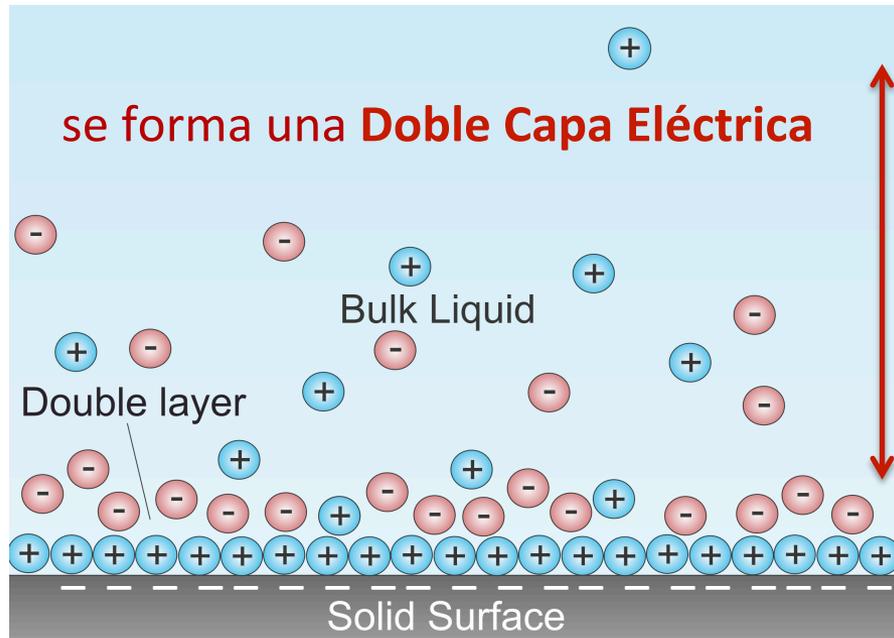
Caso paradigmático del tipo de problemas y aplicaciones:

Transporte de soluciones acuosas en un capilar de vidrio

Microfluidica

Electrocinetica

Cuando un dieléctrico (vidrio) es sumergido en una solución con electrolitos ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$)
 La superficie usualmente termina con carga neta
 (disociación de grupos $-\text{SiOH}$; adsorción de iones OH^- ; depende del PH)



capa difusa:

- ⇨ Los iones se mueven *libremente* (ambos signos);
- ⇨ Teoría de Guy-Chapman
 Equilibrio en mecánica estadística: distribución de Boltzmann para los iones y ecuación de Poisson (electrostática).
- ⇨ Concentraciones decaen exponencialmente:
 Longitud de Debye λ_D ó κ^{-1} .
- ⇨ Depende del potencial en la superficie ψ_s .

capa de Stern:

- ⇨ Primera capa con los iones opuestos;
- ⇨ Interacción electrostática con el sólido;
- ⇨ En general no se mueve
 (aun con campo eléctrico paralelo a la superficie)

Distribución de Boltzmann

$$n = n_{\infty} \exp\left(-\frac{z_i e \psi}{k_B T}\right)$$

Aprox. Debye-Hückel

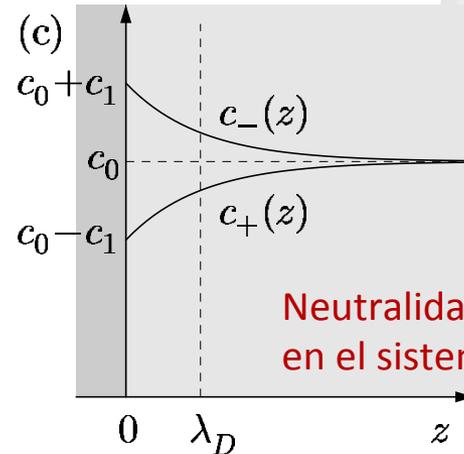
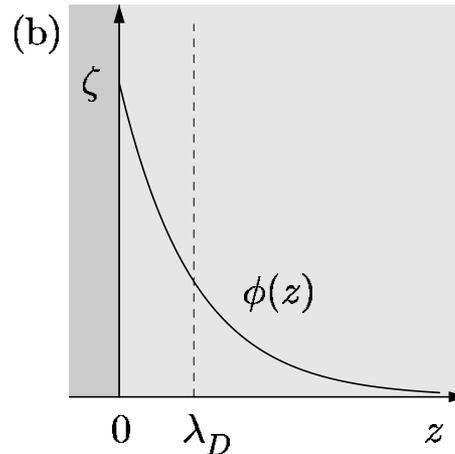
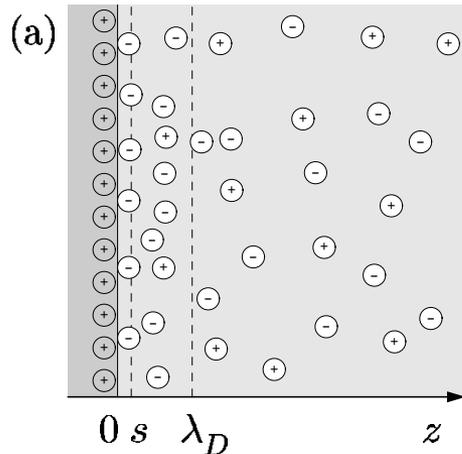
$$\psi = \psi_s \exp(-\kappa x)$$

Longitud de Debye

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{D\epsilon}{\sigma}\right)^{1/2} = \left(\frac{\epsilon k_B T}{2e^2 z^2 n_{\infty}}\right)^{1/2}$$

Microfluidica

Capa de Debye, neutralidad eléctrica y flujo electro-osmótico



Neutralidad: Carga neta en el sistema = 0

$$\lambda_D = \left(\frac{D\epsilon}{\sigma} \right)^{1/2} = \left(\frac{\epsilon k_B T}{2e^2 z^2 n_\infty} \right)^{1/2}$$

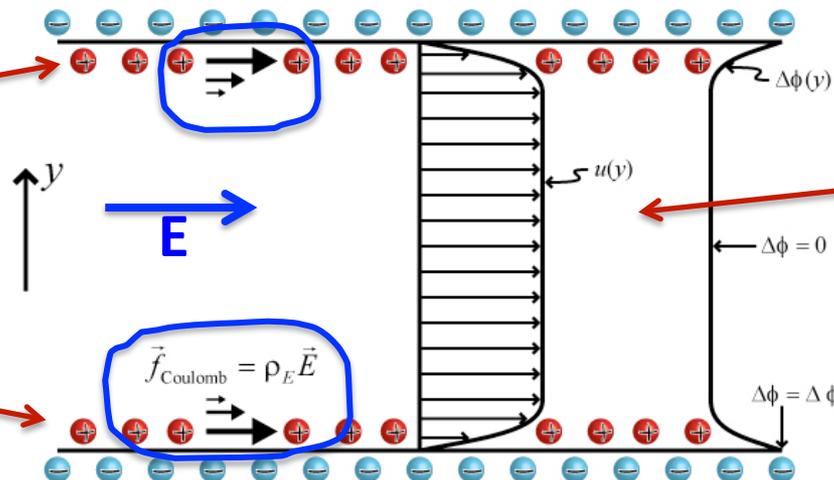
Longitud de Debye es muy pequeña !

Concentración de iones $10^{-3} \text{ M} \rightarrow \lambda_D \sim 10 \text{ nm}$

(0.0006g of NaCl) $10^{-5} \text{ M} \rightarrow \lambda_D \sim 100 \text{ nm}$

Tubo de vidrio, Agua, Campo Eléctrico \rightarrow Electro-osmosis

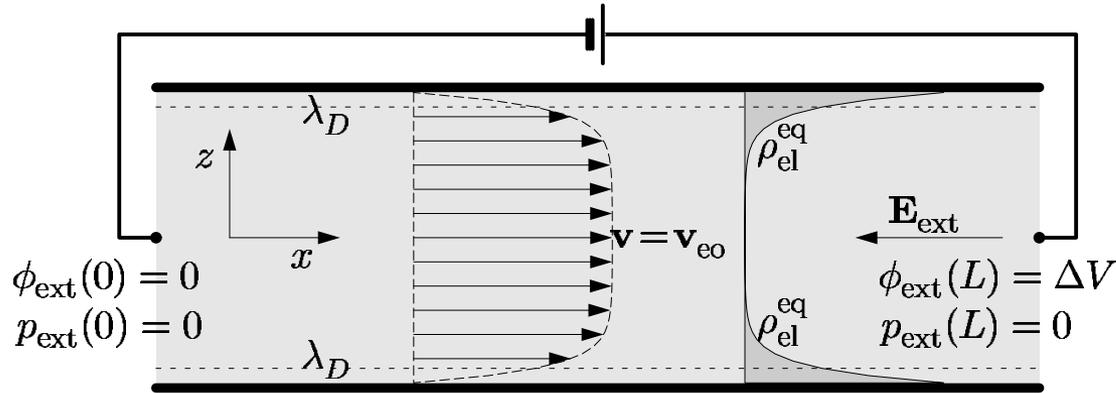
Capa de Debye
Carga neta positiva
Fuerza en la dirección del campo



$\lambda_D \ll h$
Centro del tubo:
fluido neutro \rightarrow
fuerza electrica = 0

Microfluidica

$\Delta\psi$ (Electro-osmosis) + Δp



Como encontramos la solución? → 1er paso: Dividimos el problema en dos ($Re \ll 1$; Stokes)

Transporte debido al campo eléctrico:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho_{el} \mathbf{E}_{ext}$$

$$0 = 0 + \mu \frac{d^2 v}{dz^2} + \rho_{el}^{eq} \mathbf{E}_{ext}$$

$$\frac{d^2}{dz^2} (\mu v + \epsilon \psi^{eq} E) = 0$$

No-deslizamiento $v(z = \pm \frac{h}{2}) = 0$ $\psi^{eq}(z = \pm \frac{h}{2}) = \zeta$

$$v(z) = (\zeta - \psi^{eq}(z)) \frac{\epsilon E}{\mu}$$

Nueva fuerza
Campo eléctrico externo

Densidad de cargas libres
Ecuación de Poisson

$$\epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = \epsilon \frac{d^2 \psi^{eq}}{dz^2} = \rho_{el}^{eq}$$

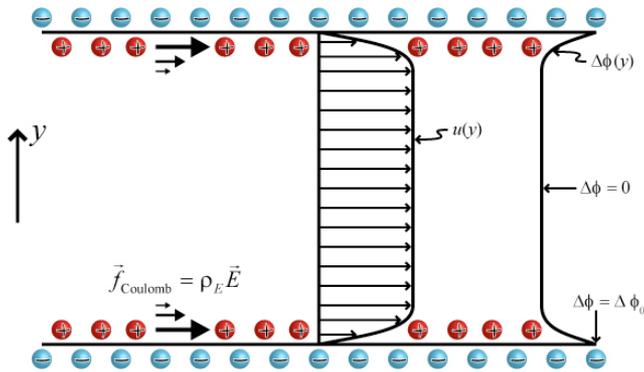
ζ = Potencial Zeta

$\zeta \neq \psi_s$???

Potencial en la capa de Stern

Microfluidica

Electro-osmosis



$$v(z) = (\zeta - \psi^{eq}(z)) \frac{\epsilon E}{\mu}$$

Perfil plano de velocidades !

Velocidad de flujo electro-osmótico:

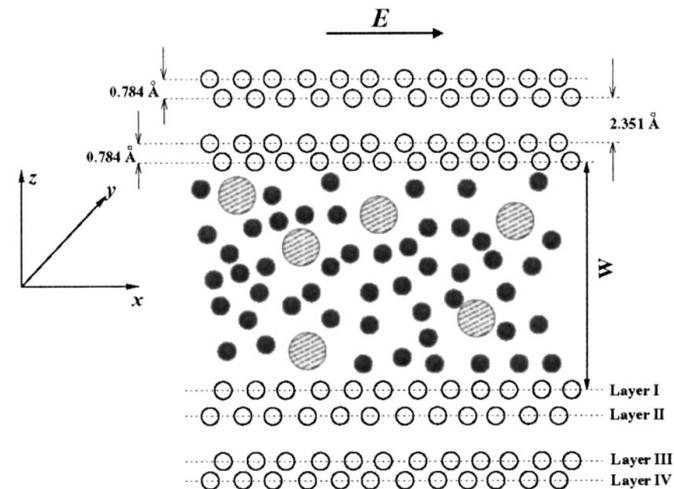
$$v_{eof} = \frac{\epsilon \zeta}{\mu} E$$

Movilidad: $v_{eof} = \mu_{eof} E$

$$\mu_{eof} = \frac{\epsilon \zeta}{\mu}$$

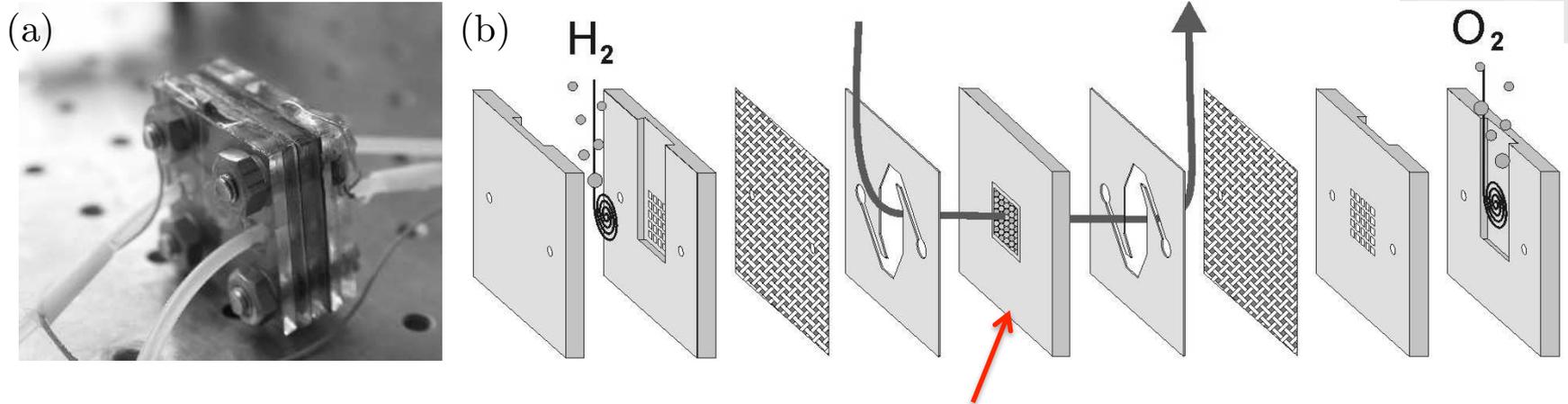
Que pasa en Nanofluidos?

Las capas de Debye se superponen !?
 Algunas predicciones de comportamiento anormal con simulaciones de dinámica molecular.



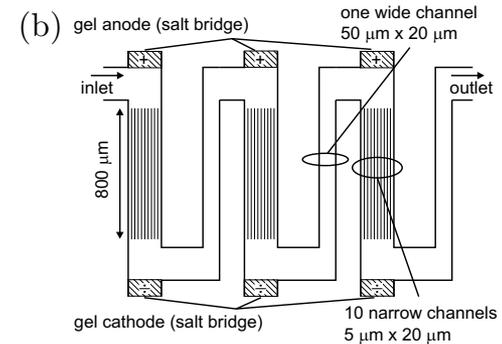
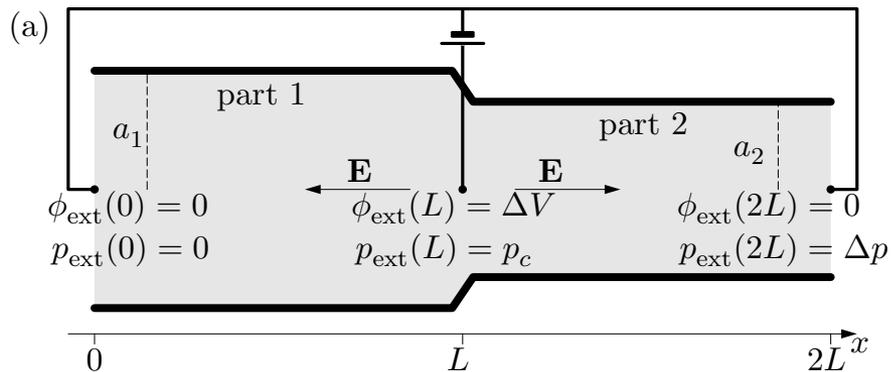
Microfluidica

Bomba electro-osmótica con múltiples canales



Fritas de vidrio por las cual pasa el flujo creando múltiples canales en paralelo

Canales en series para reducir la caída de voltaje (usando la diferencia de flujo dependiendo del tamaño)



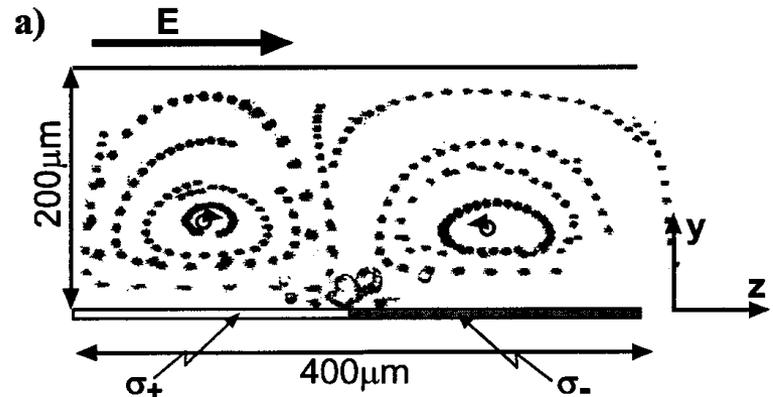
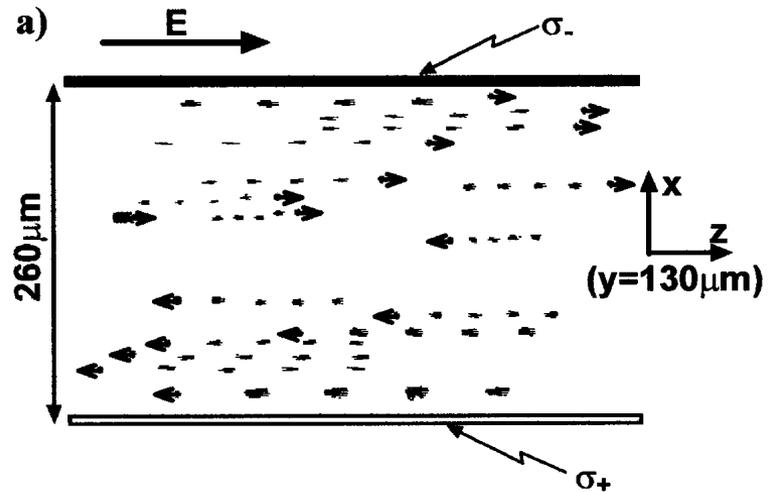
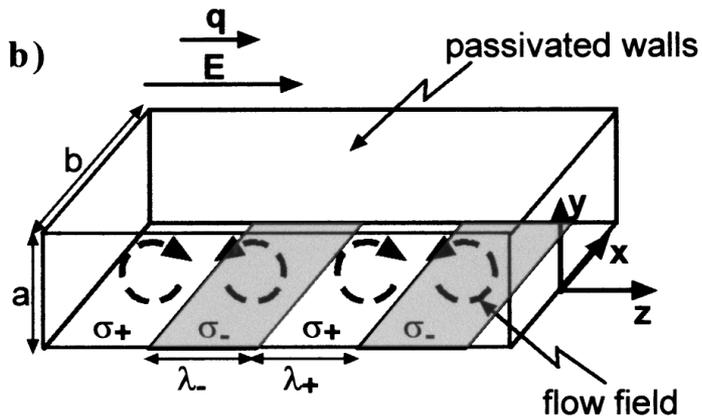
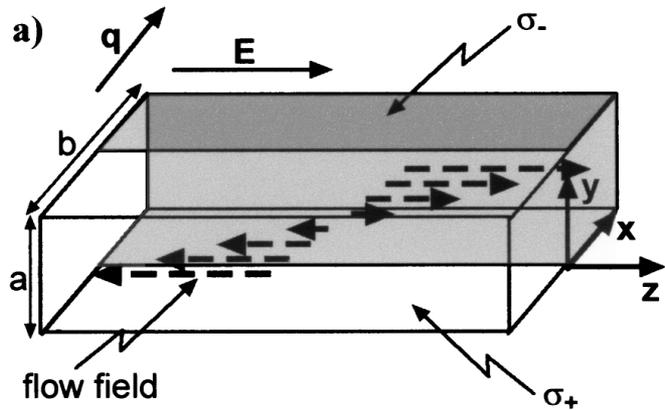
En ambos casos hay que analizar el componente debido a Δp
 Para poder empujar fluido en contra de una diferencia de presiones!

Microfluidica

Algunos ejemplos de electro-osmosis

“Patterning Electro-osmotic Flow with Patterned Surface Charge”

Stroock, A. D., Weck, M., Chiu, D. T., Huck, W. T. S., Kenis, P. J. A., Ismagilov, R. F., and Whitesides, G. M.
Physical Review Letters 84, no. 15 (2000): 3314–3317.



Microfluidica

Campos Eléctricos AC

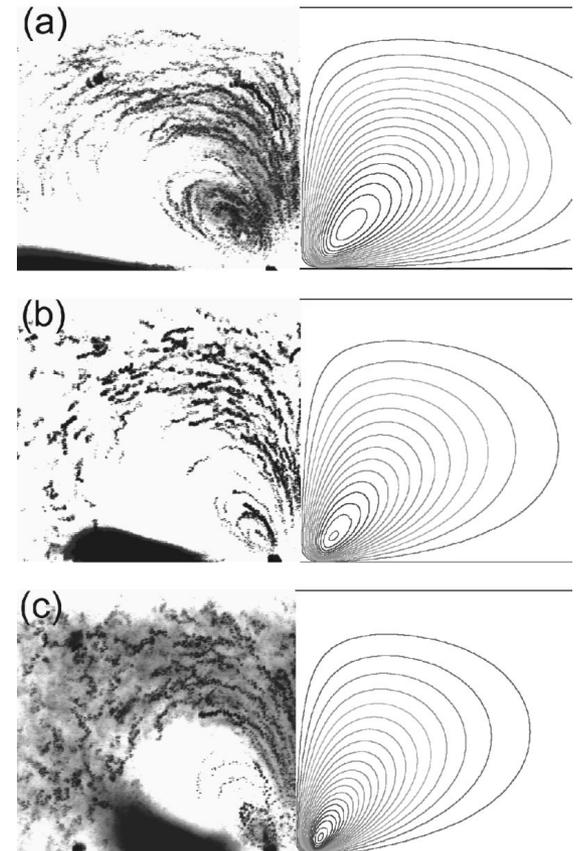
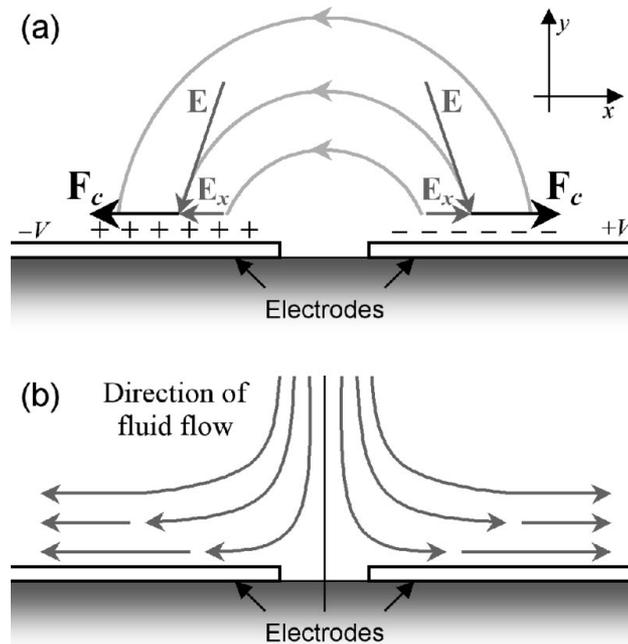
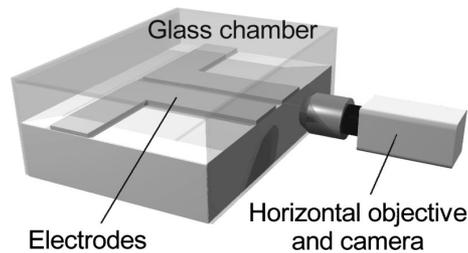
“Fluid Flow Induced by Nonuniform Ac Electric Fields in Electrolytes on Microelectrodes

I. Experimental Measurements; Phys. Rev. E **61**, (2000): 4011-4018

II. A Linear Double-layer Analysis; Phys. Rev. E **61**, (2000): 4019-4028

III. Observation of Streamlines and Numerical Simulation; Phys. Rev. E **66**, (2002): 026305

Green, N. G., Ramos, A., González, A., Morgan, H., and Castellanos, A.



Eligiendo la frecuencia correcta del campo eléctrico.

Baja: Las cargas apantallan el campo.

Alta: Las cargas no llegan a moverse

Microfluidica

Electroforesis

Movimiento de partículas cargadas en un fluido y en presencia de un campo eléctrico
Fundamental en métodos tradicionales y dispositivos de microfluidica para separación

Caso I: El fluido tiene baja o cero conductividad eléctrica
(pocas o ninguna carga libre $\rightarrow \lambda_D \sim \infty$)

$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \mathbf{F}_{\text{drag}} + \mathbf{F}_{\text{el}} = -6\pi\mu a\mathbf{V} + Ze\mathbf{E}$$

$$\mathbf{V} = \frac{Ze}{6\pi\mu a} \mathbf{E} \quad \begin{array}{l} Ze \text{ es la carga neta} \\ a \text{ es el radio de la partícula} \end{array} \quad \text{Movilidad: } \mu_e = \frac{Ze}{6\pi\mu a}$$

Caso II: Partículas pequeñas. Si $\lambda_D \gg a$ entonces podemos considerar el fluido como aislante
Cual es la primera corrección?

La carga en la superficie cambia. Se mide con el potencial Zeta

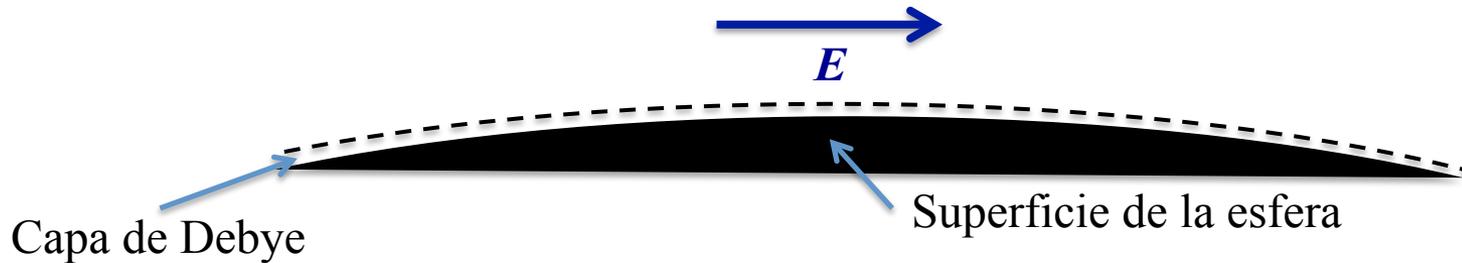
$$\sigma_q = \epsilon \left. \frac{d\psi}{dr} \right|_{r=a} = \frac{\zeta}{a} \quad \begin{array}{l} \text{Podríamos haberlo obtenido} \\ \text{con una simple ley de escala!} \end{array}$$

$$q = 4\pi a \zeta \quad \rightarrow \quad \mu_e = \frac{2\epsilon\zeta}{3\mu}$$

Microfluidica

Electroforesis

Caso III: Partículas grandes. Si $a \gg \lambda_D$ no hay carga neta \rightarrow no se mueven?



Moviéndonos junto con la esfera, cual es la velocidad del fluido?

Igual al caso de electro-osmosis! \rightarrow Cambiando al marco de referencia del fluido:

$$v_{\text{eof}} = \frac{\epsilon \zeta}{\mu} E \quad \rightarrow \quad v_p = \frac{\epsilon \zeta}{\mu} E$$

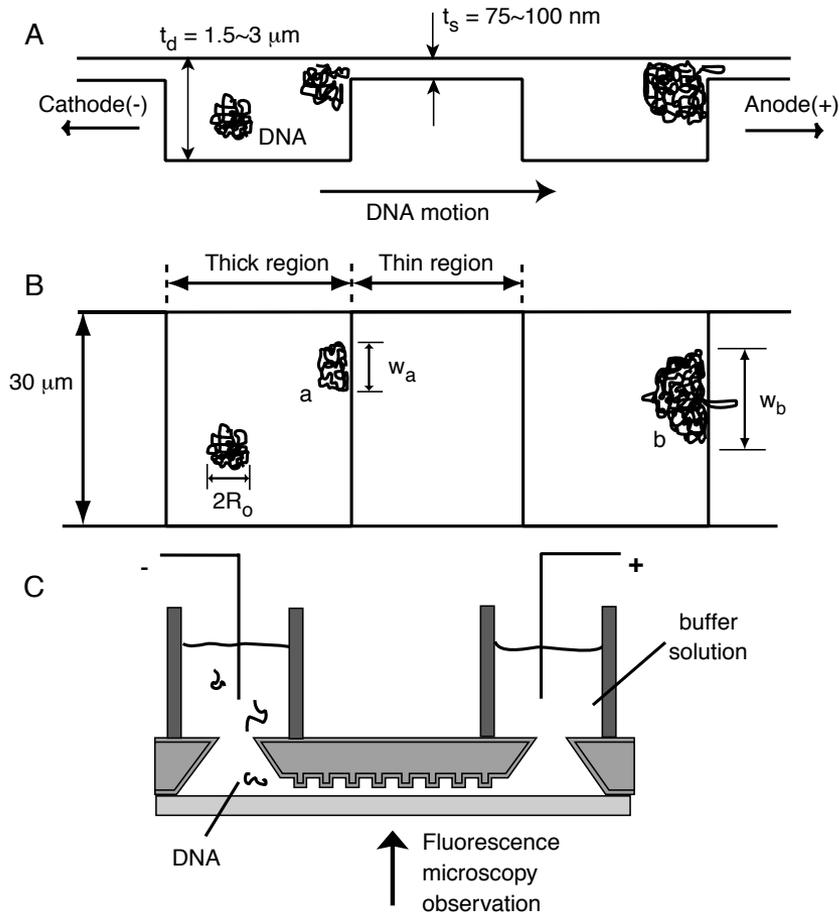
Comentarios:

- La movilidad (y velocidad) es independiente del tamaño (importante en separaciones!)
- Los casos mas interesantes son los intermedios y mucho mas complicados
- Por otro lado: En todo el rango de λ_D la movilidad solo cambia en un factor 2/3!!
- Macromoléculas flexibles: ADN !!
- Mas populares y mas desarrollados : Electroforesis en geles y Electroforesis en capilares

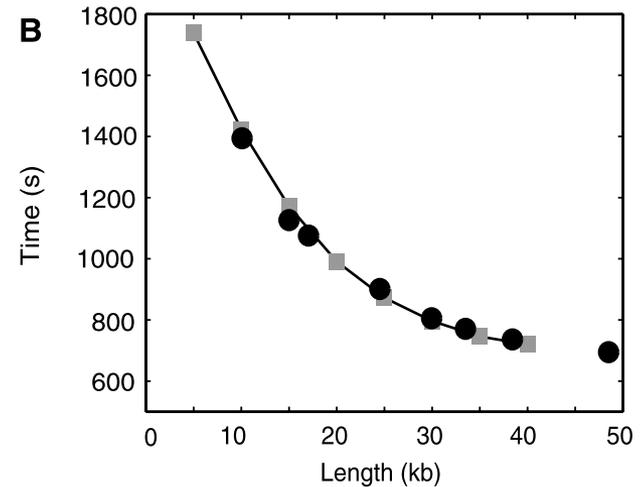
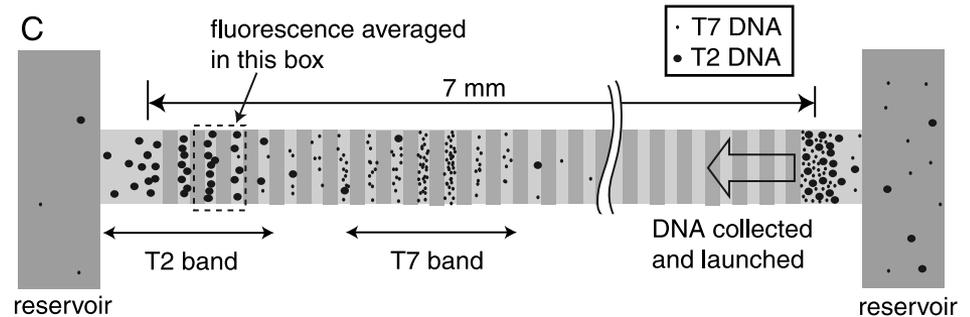
Microfluidica

Electroforesis con trampas entrópicas

Idea: A las moléculas les “cuesta” entropía entrar a las zonas angostas



Las moléculas mas grandes migran mas rápido !?



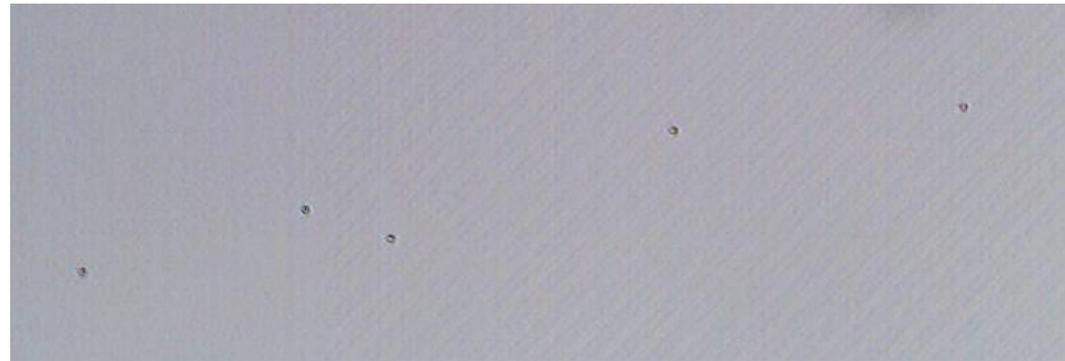
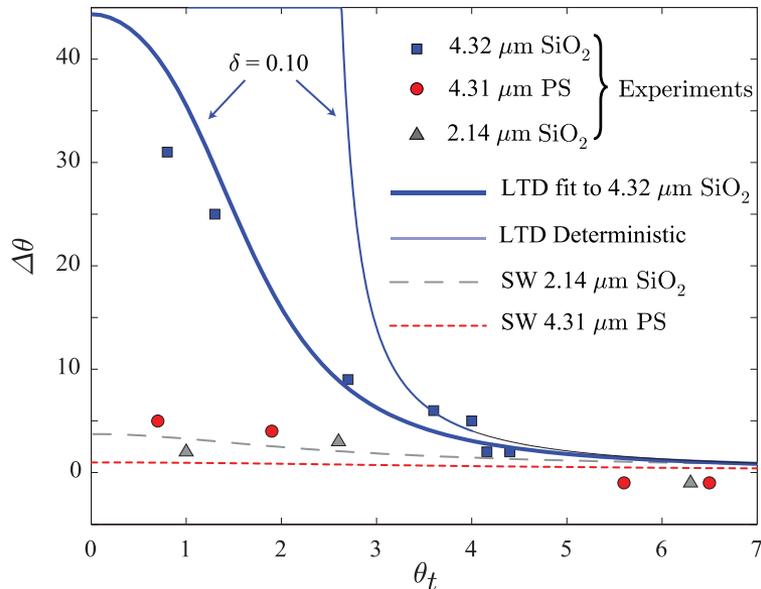
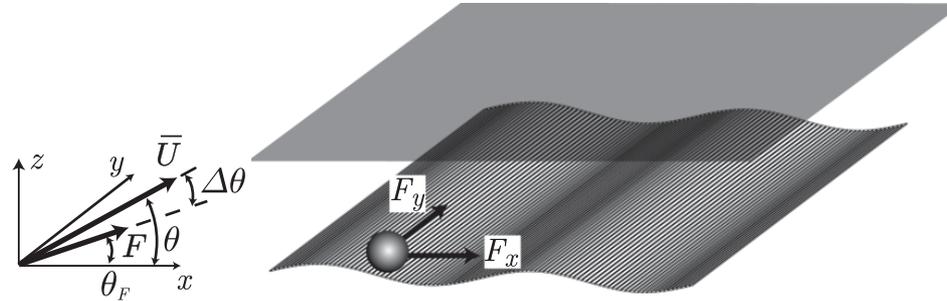
Microfluidica

Transporte en potenciales periódicos

Descripción con el potencial de energía libre

Sirve para fuerzas que varían y también para el caso entrópico

Además una modificación simple induce separación bidimensional



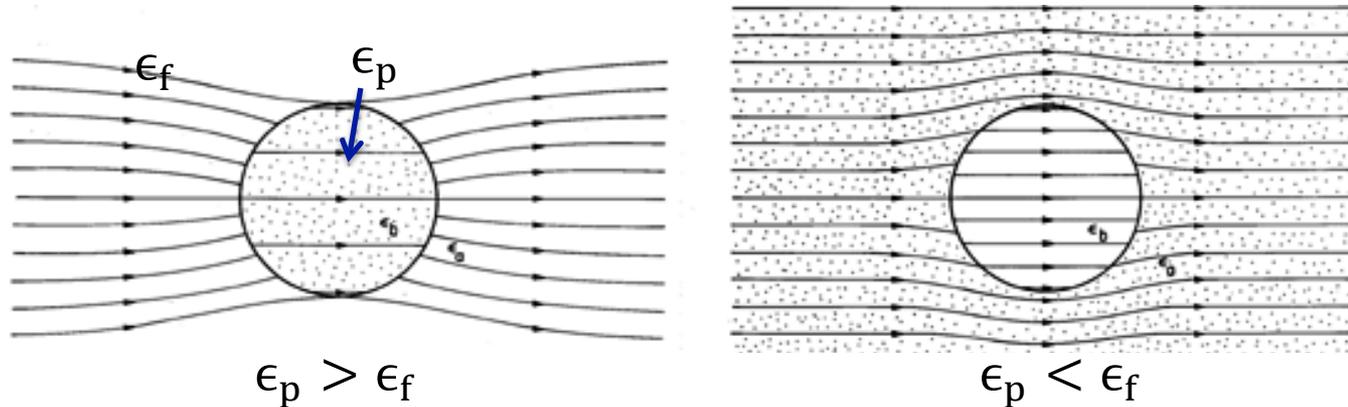
Microfluidica

Dielectroforesis

No hay carga neta en las partículas;

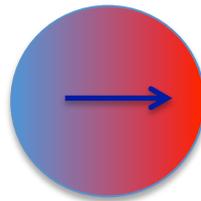
La fuerza proviene de la inducción de momento dipolar en presencia de un campo Eléctrico

Esfera en un campo eléctrico uniforme

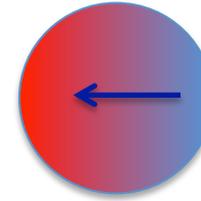


Mas polarizable

Menos polarizable

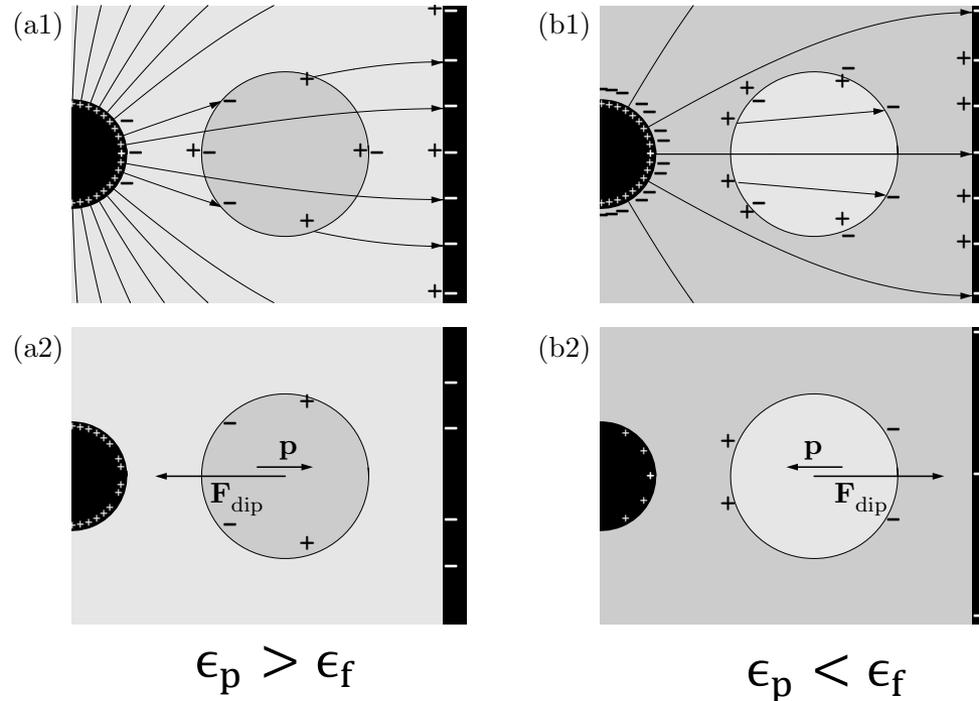


Dipolo inducido \mathbf{P}
Caso lineal $\mathbf{P} \sim \mathbf{E}$



Campo eléctrico uniforme \rightarrow la fuerza neta sigue siendo cero!

Dielectroforesis: Campo eléctrico no uniforme



- Momento dipolar de la esfera es proporcional al campo E
- Fuerza actuando en un dipolo depende de la diferencia del campo eléctrico, ΔE

$$\mathbf{F}_{\text{DEP}} = 2\pi a^3 \epsilon_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_p}{\epsilon_f + 2\epsilon_p} \nabla E^2$$

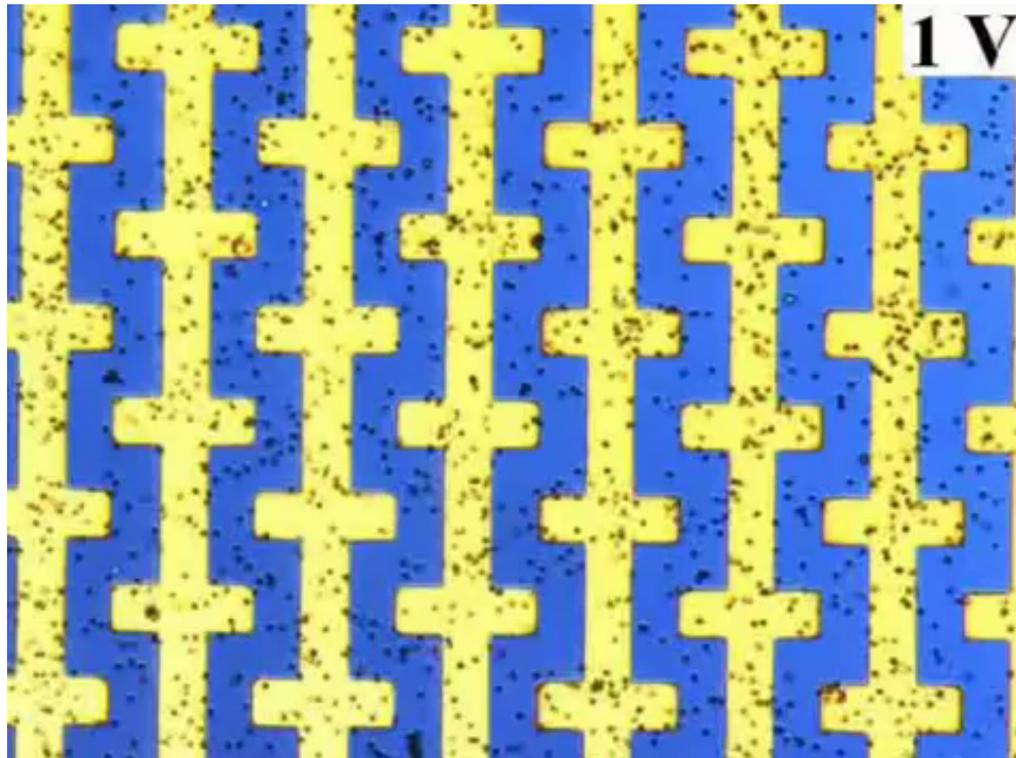
Importante: Relaciones equivalentes se obtienen con campos alternos

Pero la relación de permitividades depende de la frecuencia y puede cambiar de signo

Microfluidica

Dielectroforesis: Dependencia con la frecuencia

$$\mathbf{F}_{\text{DEP}} = 2\pi a^3 \epsilon_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_p}{\epsilon_f + 2\epsilon_p} \nabla E^2 \quad K = \epsilon_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_p}{\epsilon_f + 2\epsilon_p}$$



Videos de *Lab on a chip* en youtube