

Microfluidica

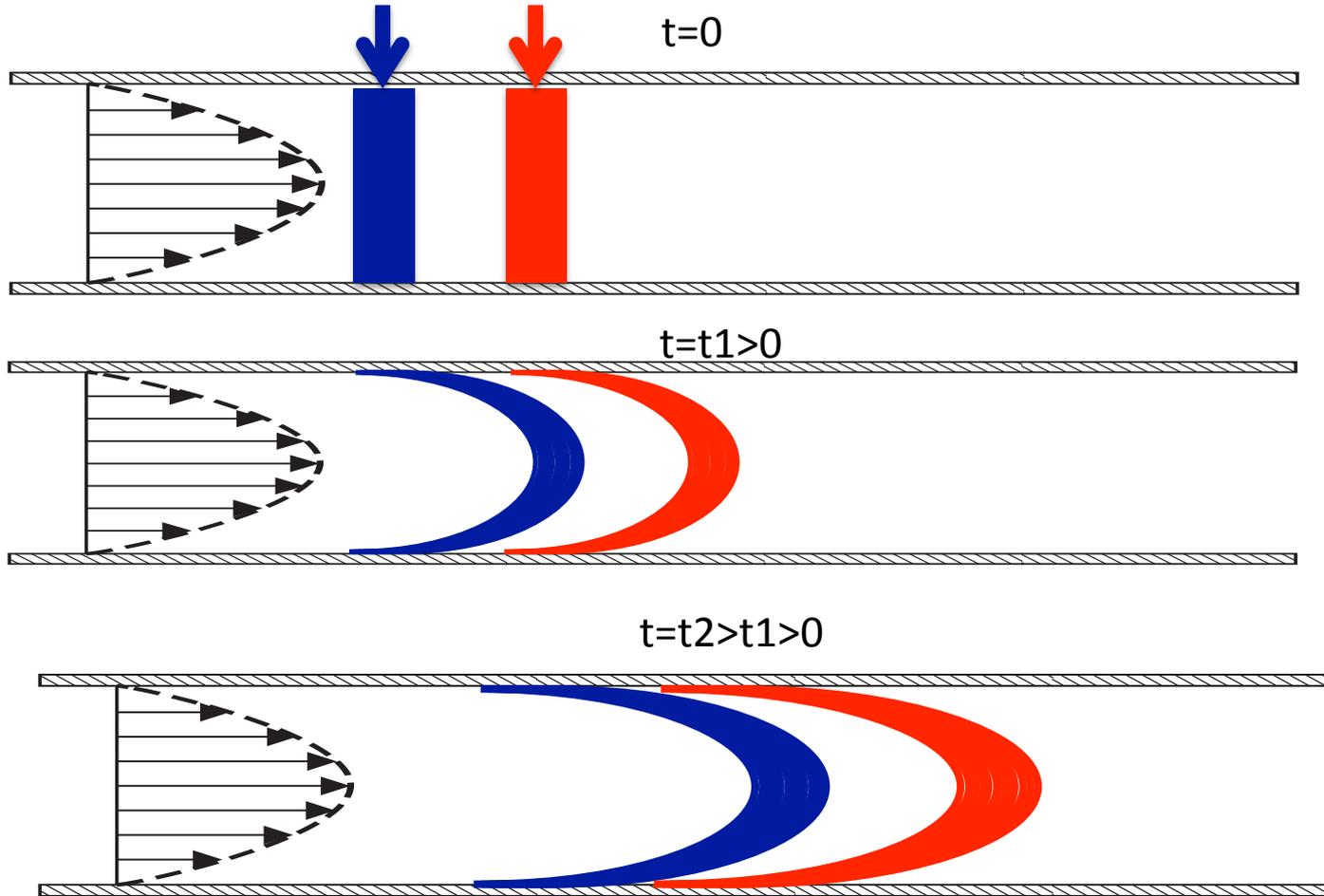
Cuando la difusión no alcanza!
Dispersión de Taylor-Aris
Caos y los Métodos de mezclado

Microfluidica

Dispersión de Taylor-Aris

Consideremos el transporte de dos especies distintas en un tubo:

Al inicio, inyectamos las dos especies por separado

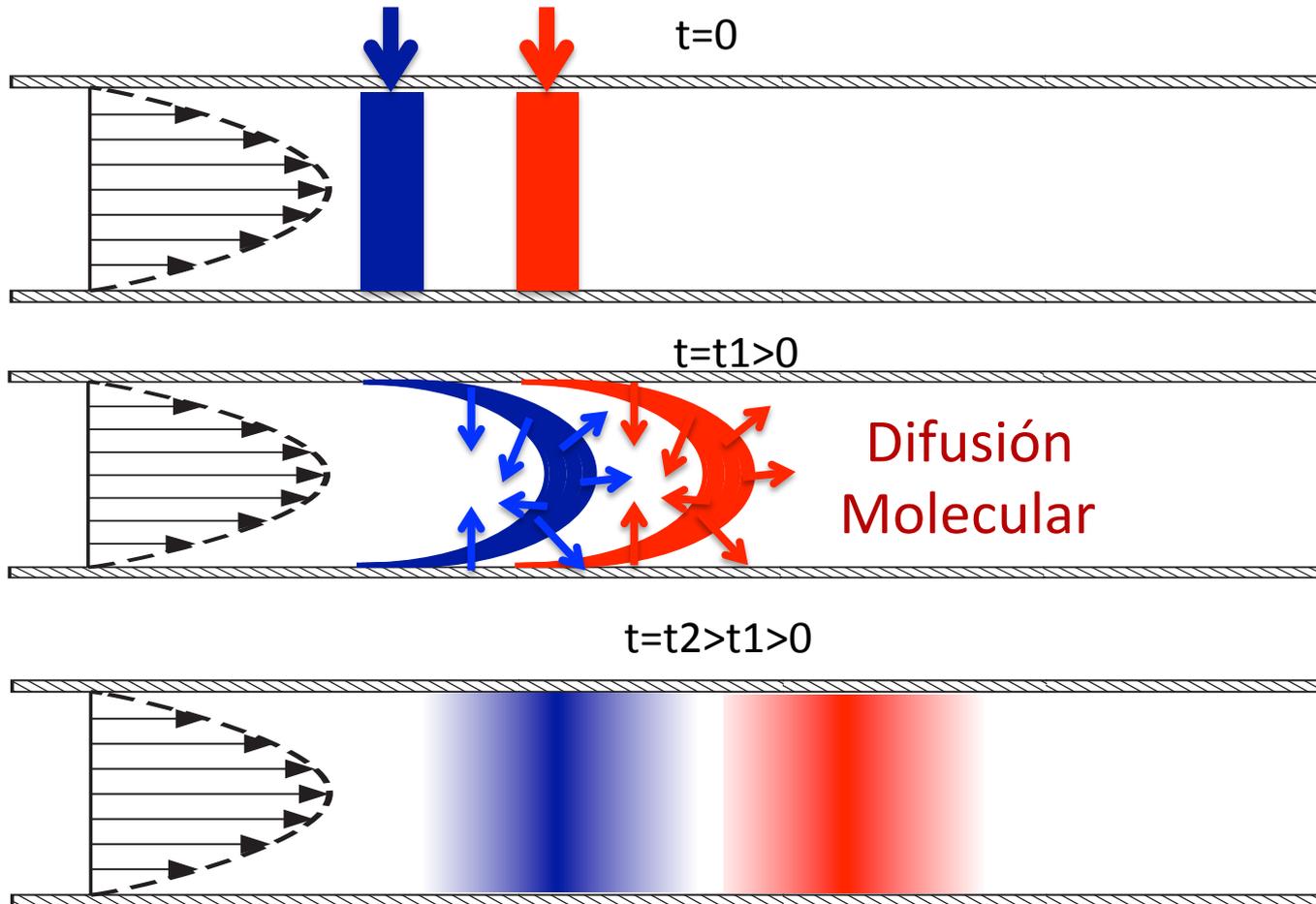


Microfluidica

Dispersión de Taylor-Aris

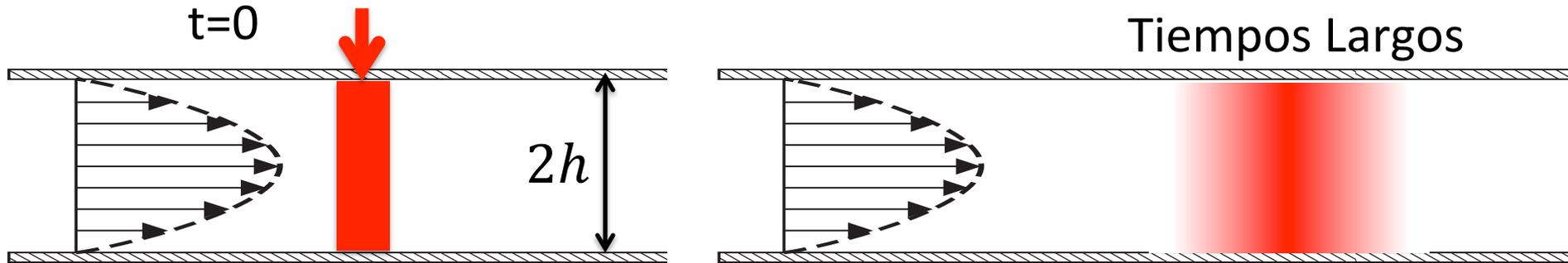
Consideremos el transporte de dos especies distintas en un tubo:

Al inicio, inyectamos las dos especies por separado



Microfluidica

Dispersión de Taylor-Aris



Como definimos tiempos largos?

Mezcla transversal depende:

De la difusividad D_M y del ancho del canal \rightarrow Ley de escala?

Tiempo de mezcla $t_D \sim h^2/D_M$

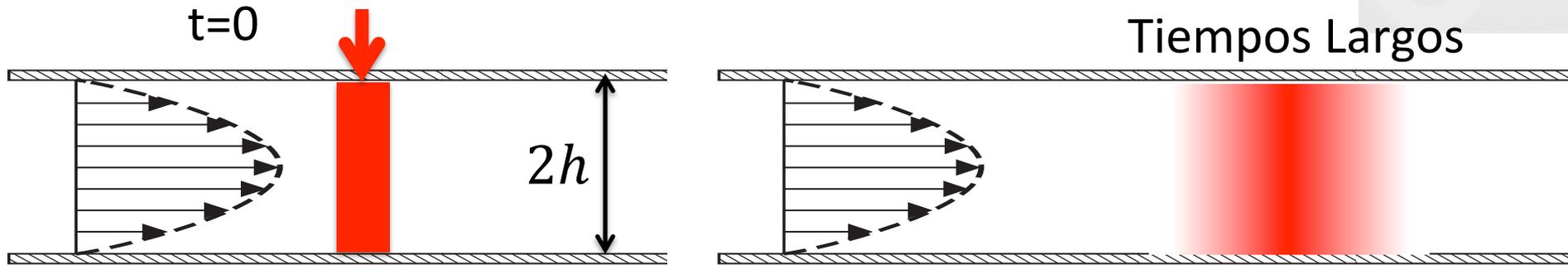
Taylor y Aris mostraron que para $t \gg t_D$

Es equivalente a un proceso de difusión: **Dispersión hidrodinámica**

$$C(x, t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_H t}} \exp\left(-\frac{(x - Vt)^2}{4D_H t}\right)$$

Microfluidica

Dispersión de Taylor-Aris



$$C(x, t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_H t}} \exp\left(-\frac{(x - Vt)^2}{4D_H t}\right)$$

V es la velocidad media; D_H es el coeficiente de dispersión hidrodinámico

Cual es el origen físico de la dispersión?

Diferencias (distribución) de velocidades

Que pasa si la difusión transversal es muy-rápida

Las moléculas se mueven a la velocidad promedio \rightarrow no hay dispersión

Que pasa si no hay difusión?

Se separan cuadráticamente!

Microfluidica

Dispersión de Taylor-Aris

t=0



2h

Tiempos Largos

$$C(x, t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_H t}} \exp\left(-\frac{(x - Vt)^2}{4D_H t}\right)$$

$$D_H = D_M (1 + K Pe^2)$$

Aumenta con el número de Peclet????

K depende de:

la geometría del canal (sección transversal) y del perfil de velocidades

$$D_H = D_M + K \frac{h^2 V^2}{D_M}$$

Cuanto mayor es la difusión menor es la dispersión!

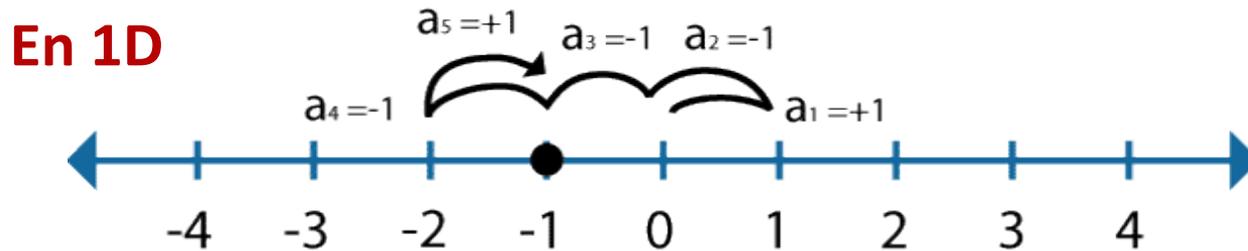
Placas paralelas: Poiseuille flow: $K=1/48$;

Couette flow: $K=1/30$;

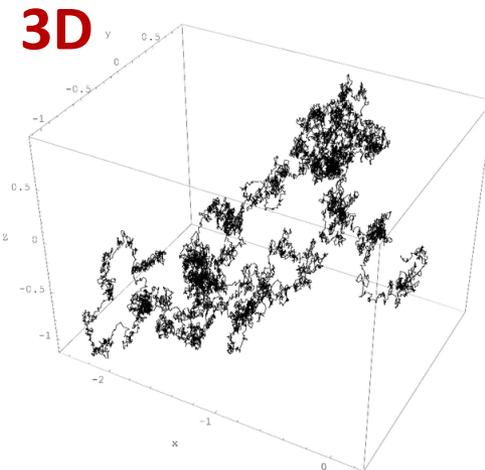
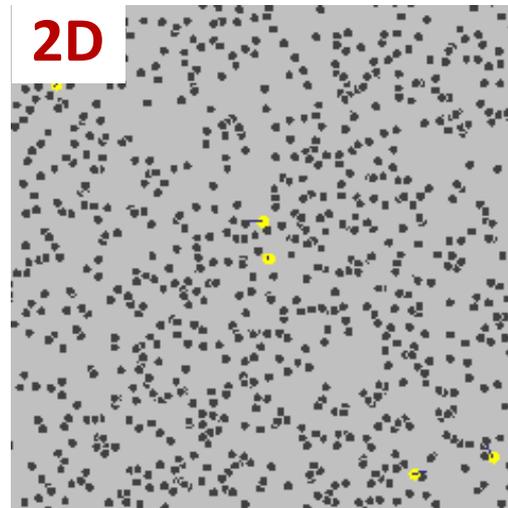
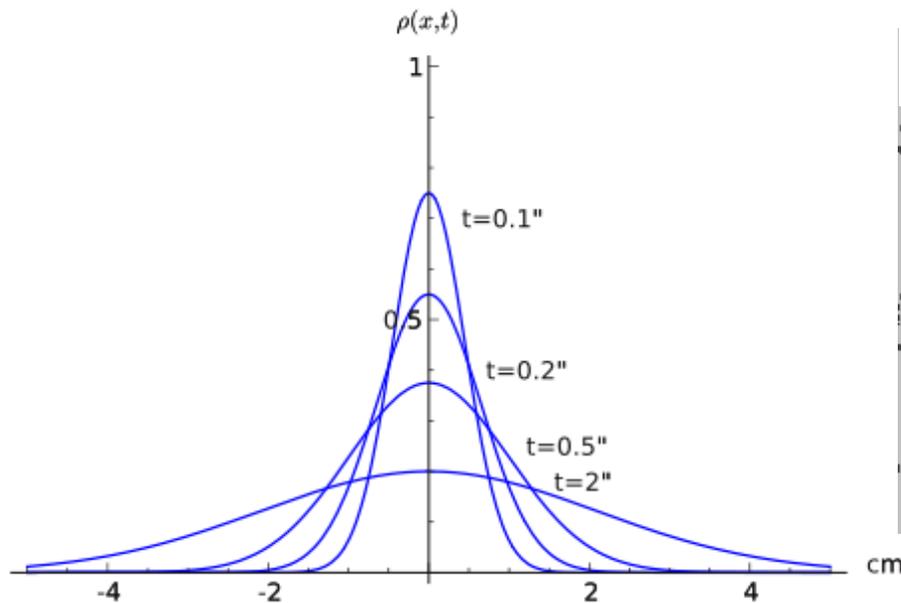
Microfluidica

Difusión como movimiento aleatorio: origen microscópico

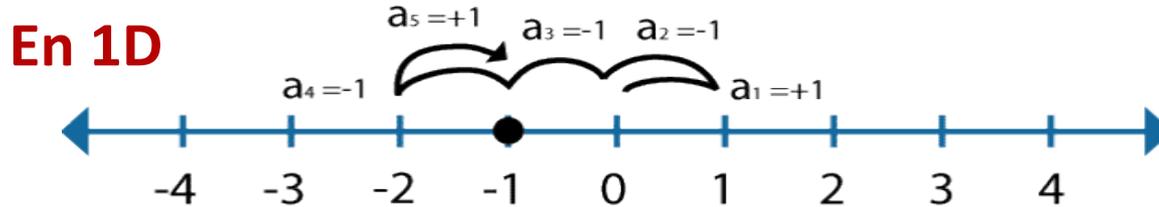
El movimiento Browniano puede representarse como una caminata de pasos aleatorios



A tiempos largos:
Distribución Gaussiana de probabilidad



Microfluidica



A que llamamos tiempos largos?

Si τ_D es el tiempo entre *saltos independientes* (perdida de correlación)

→ Tiempos largos corresponde a $t \gg \tau_D$ (numero de saltos $\gg 1$)

Si $\Delta x = l$ es el tamaño característico de los saltos

(y τ_D es el tiempo entre saltos independientes (sin correlación))

entonces la difusividad es:

$$D = \frac{\Delta x^2}{\Delta t} = \frac{l^2}{\tau_D}$$

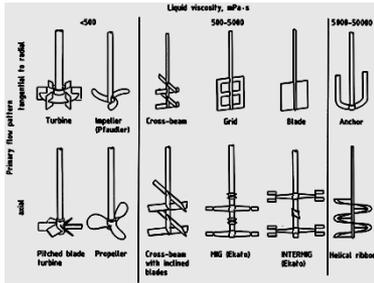
Podemos estimar la dispersión de Taylor-Aris con este resultado?

$$\Delta t = ? \frac{h^2}{D_M} \quad \Delta x = ? V \Delta t = \frac{V h^2}{D_M} \quad D_H = \frac{\Delta x^2}{\Delta t} = \frac{V^2 \Delta t^2}{\Delta t} = V^2 \Delta t = \frac{V^2 h^2}{D_M}$$

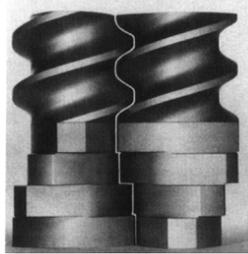
Microfluidica

Mezcla de fluidos en el régimen de Stokes

Mezcladores



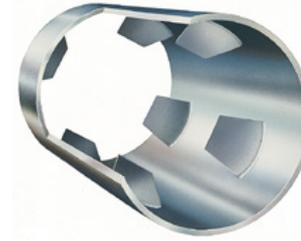
Twin Screw Extruder



Flujo Turbulento



Vortex[®] de alta eficiencia



Kenics[®]

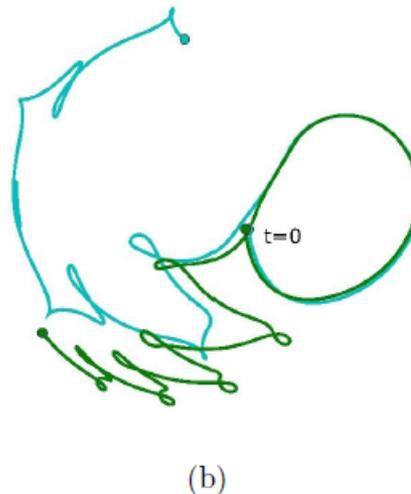
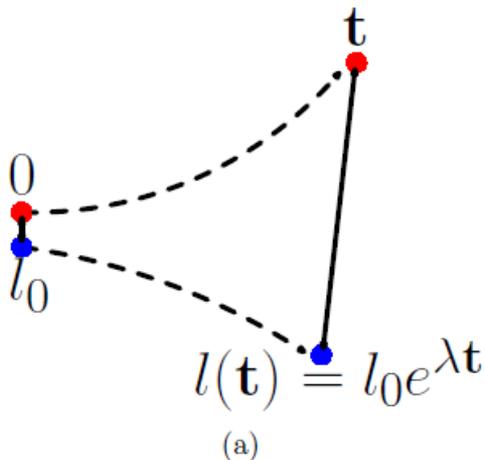


Ross ISG[®]



Que es lo que se busca lograr con el flujo con estos mezcladores?
Mezclado Caótico!

Dos elementos inicialmente juntos se separan exponencialmente!



Distancia $\sim \exp(\lambda t)$
 λ =Exponente de Lyapunov

Microfluidica

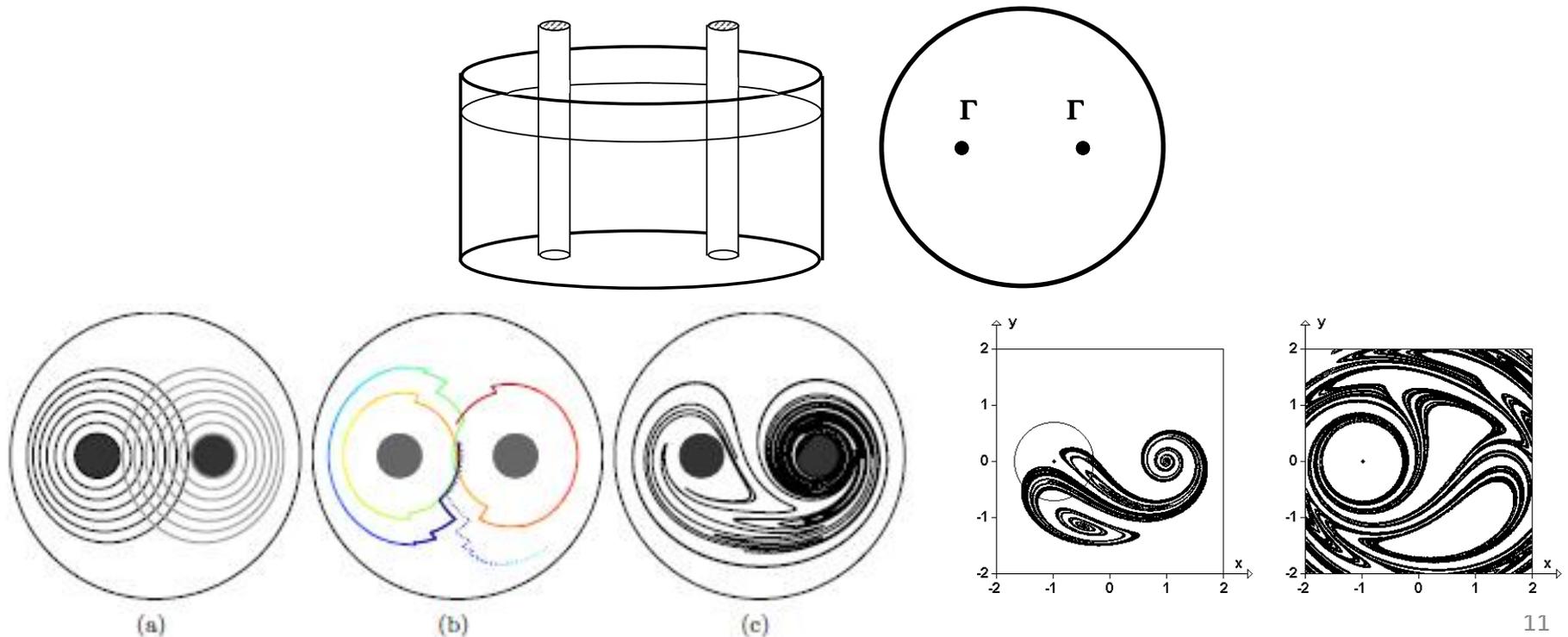
Mezclado caótico en fluidos: como se logra?

Métodos/Opciones dependen del número de Reynolds

Re Alto: Flujos Turbulentos

Re Bajo: Advección caótica (H. Aref)

Ejemplo de Advección con caos: 2 Vórtices Intermitentes



Microfluidica

Elementos esenciales en mezclado caótico:

Estiramiento y plegado del elementos del fluido!
(*stretching and folding*)



Idea: Reducir la escala característica de las heterogeneidades hasta que la difusión molecular resulta eficiente en el mezclado

Ejemplo:

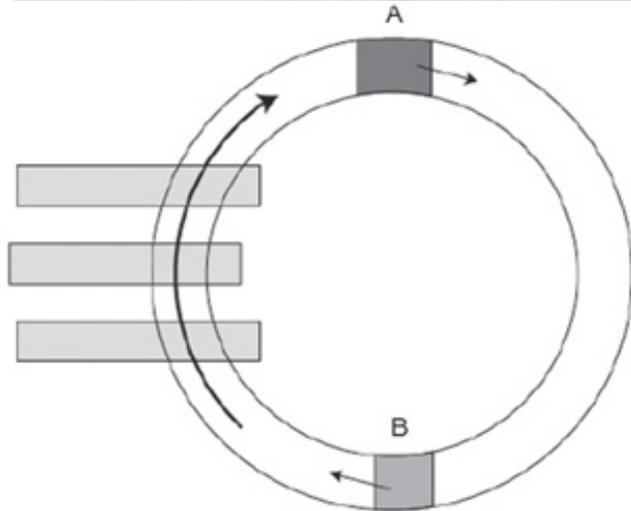
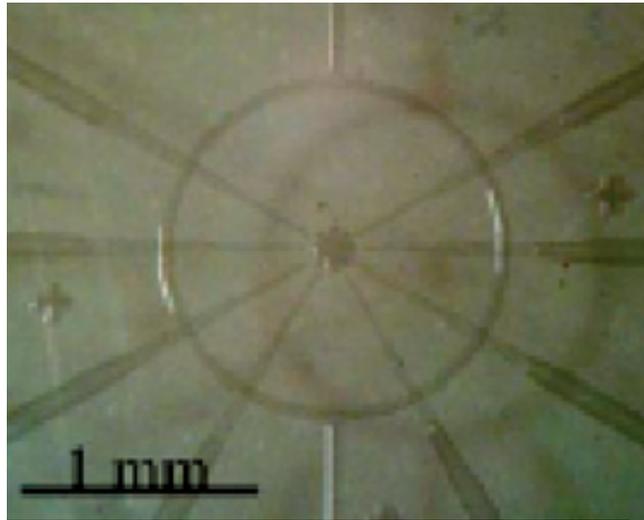
Consideremos la difusión molecular de un pigmento $D \sim 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$
a cuanto hay que reducir el tamaño de las heterogeneidades para mezclar el orden de 10 segundos?

$$\Delta x \sim 10^{-3} \text{cm} (10 \mu\text{m})$$

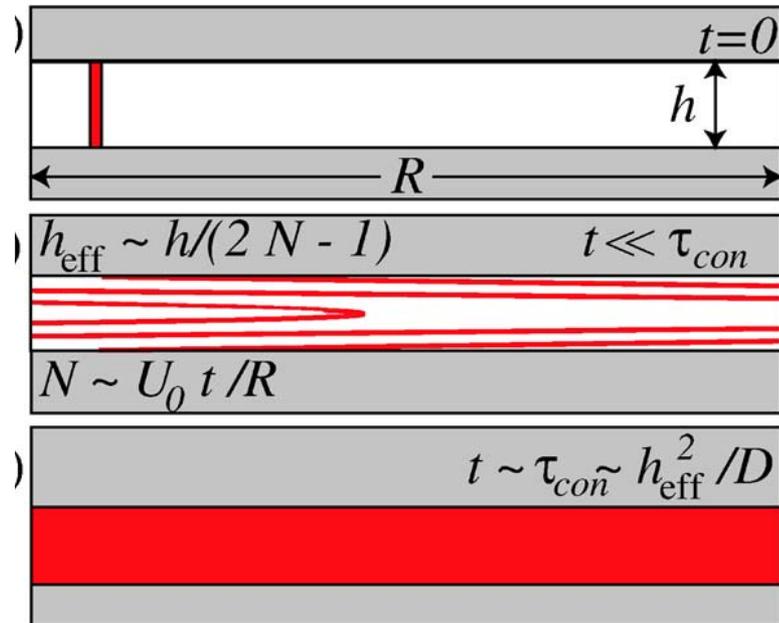
Microfluidica

Ayudando el mezclado mediante convección

Ejemplo #1



El número de vueltas reduce la distancia entre los distintos fluidos

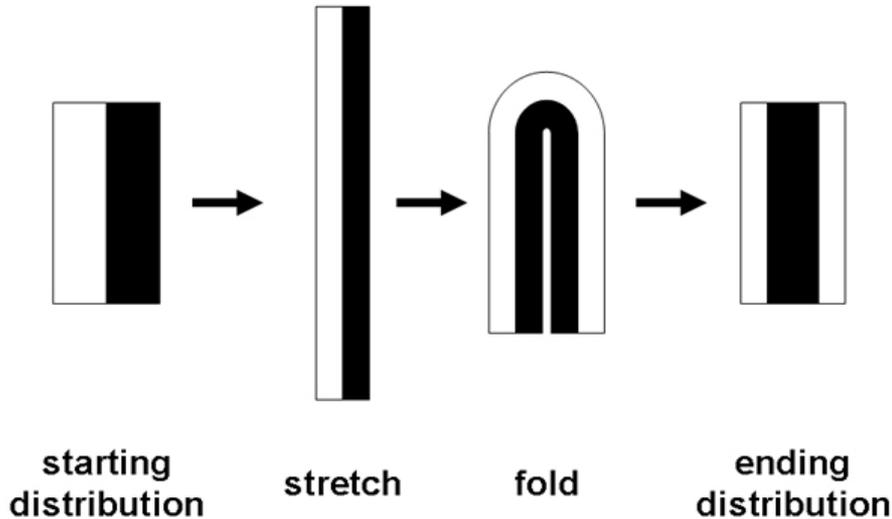


La mejora es *solo* lineal con N

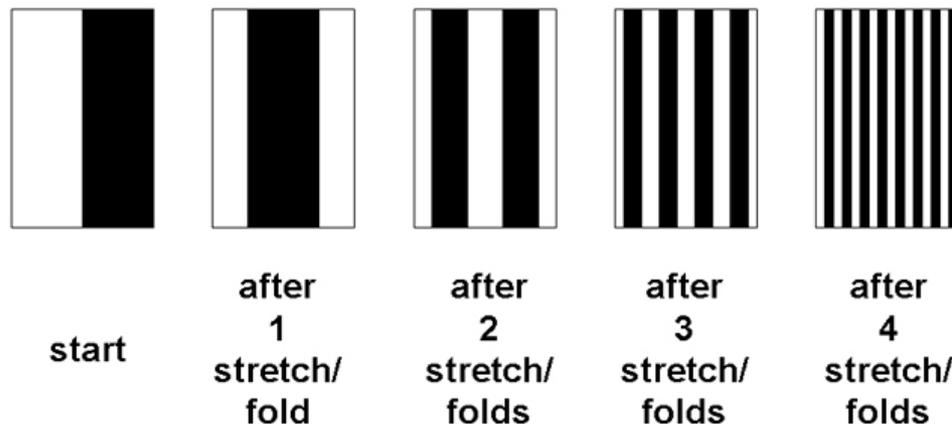
Microfluidica

Transformación del panadero

La mejor implementación del proceso de **estiramiento y doblado**



- El tamaño de las tiras se reduce exponencialmente!!
- El proceso de estiramiento genera una separación exponencial !!
- Como puede implementarse: en presencia de **convección axial** pero sin partes móviles ?



Reemplazando el tiempo por el movimiento a lo largo del dispositivo!!

Microfluidica

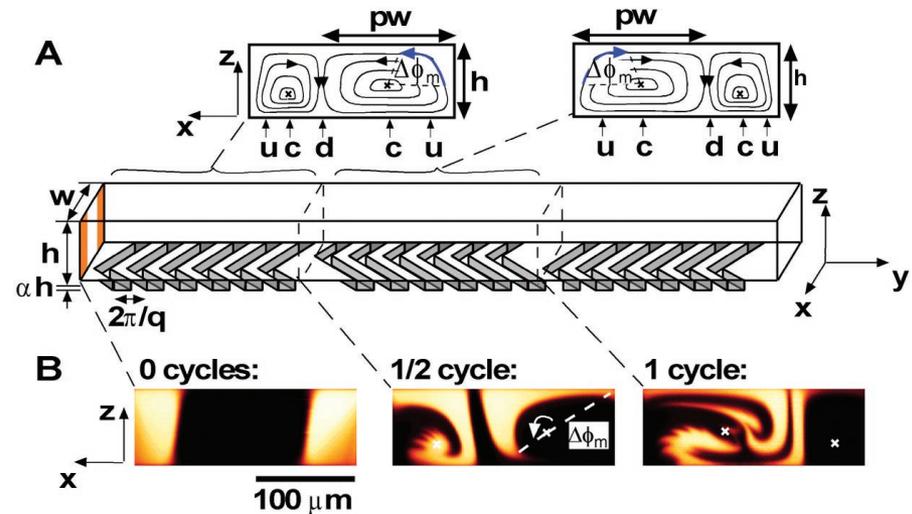
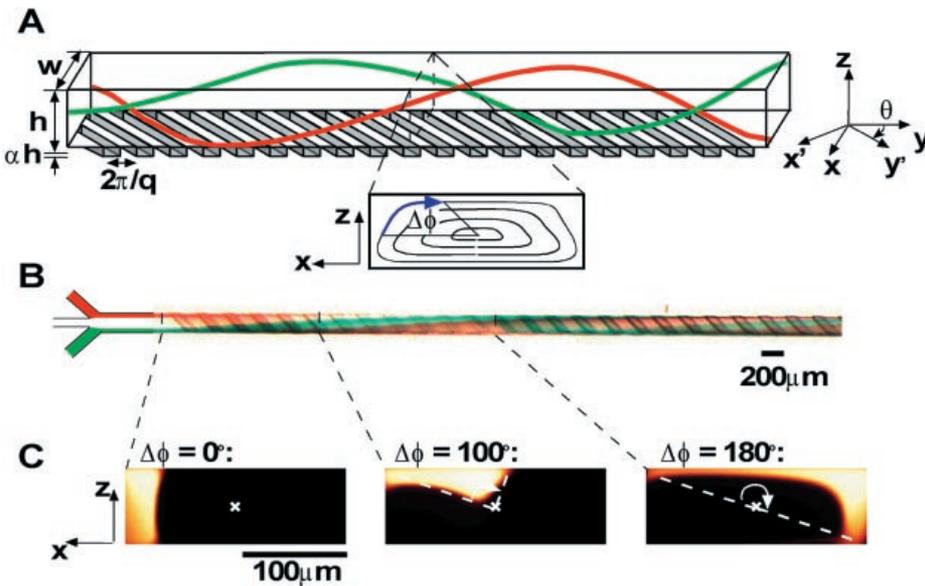
Mezclado por convección!

Tiempo en sistemas tradicionales $\leftarrow \rightarrow$ Posición a lo largo del dispositivo

Ejemplo #2 Diseño de *espiga escalonada* (*staggered herringbone*)

Una serie de barreras en diagonal desvían el fluido lateralmente y generan recirculación!!

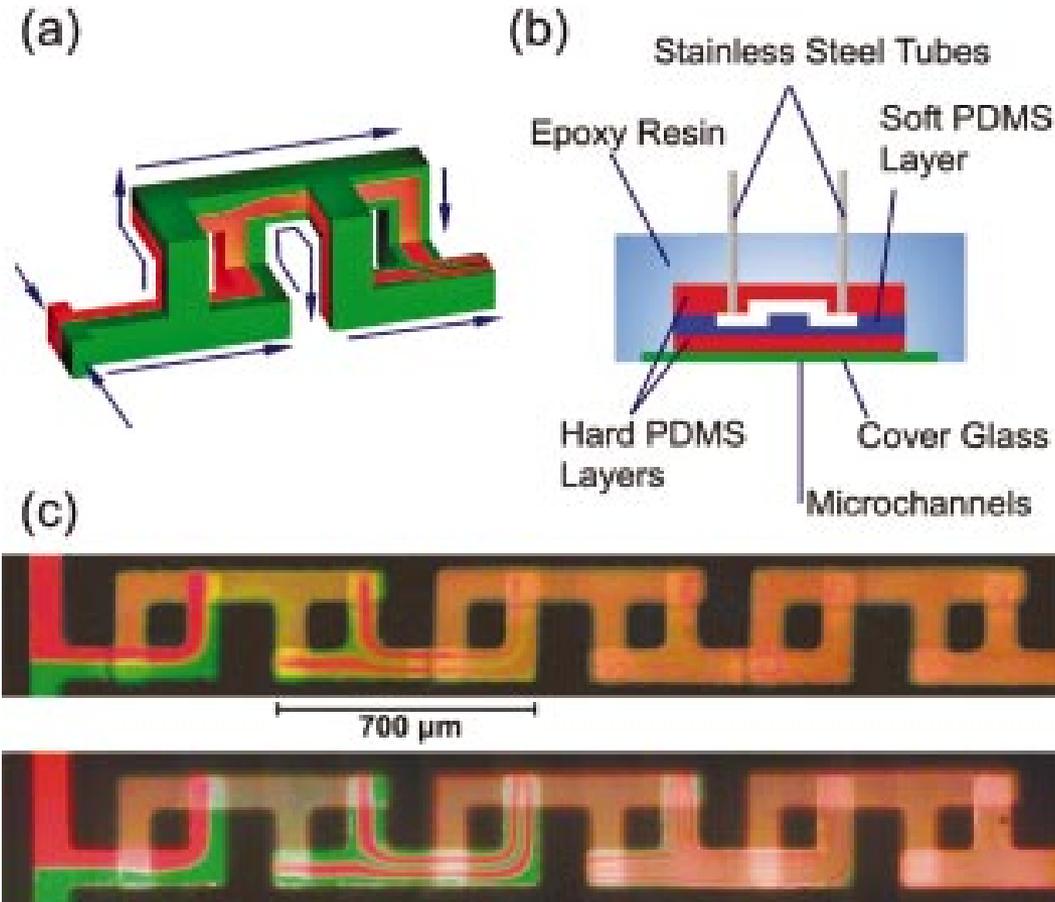
Diseño: generar dos zonas de recirculación que se alternan a lo largo del dispositivo!
(como los vortices intermitentes)



Microfluidica

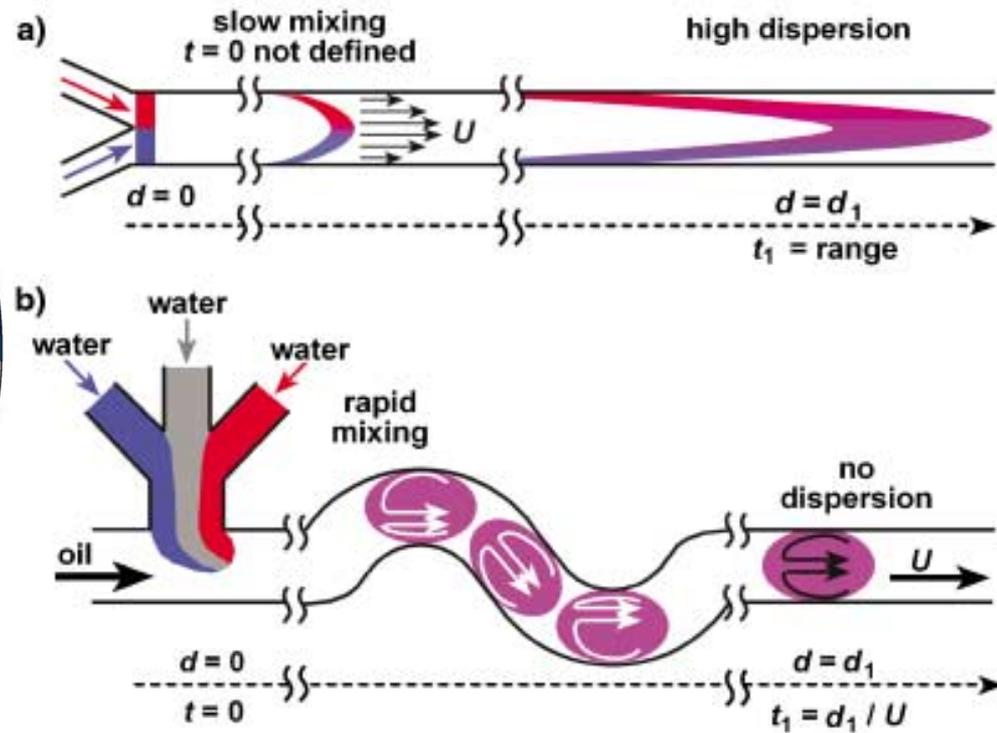
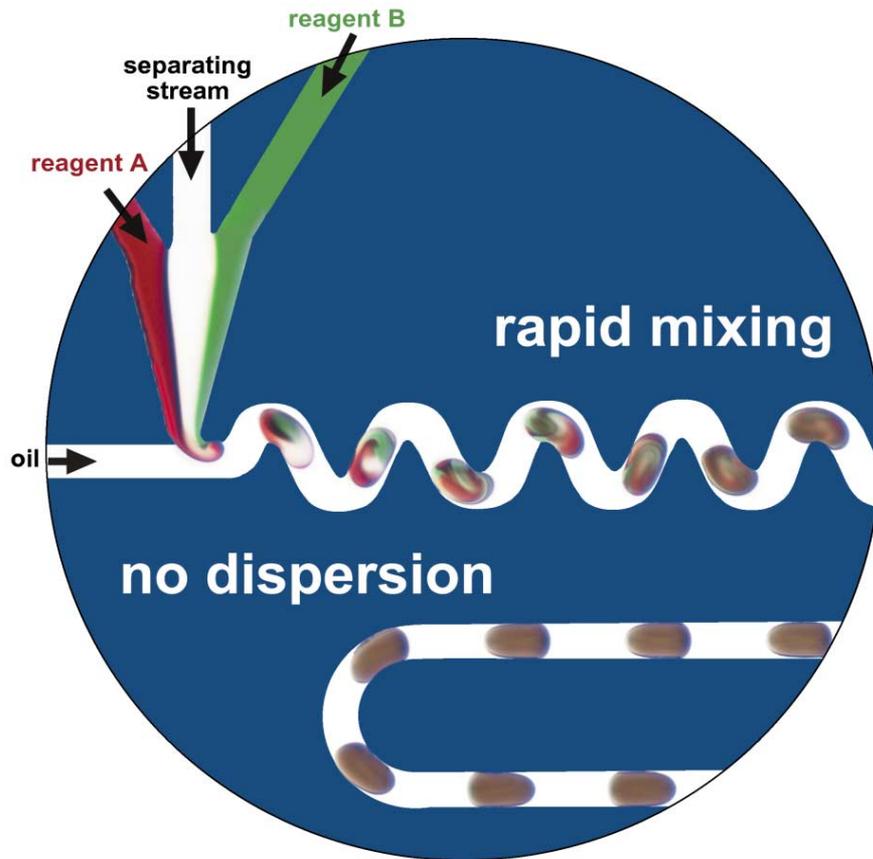
Mezclado por convección

Ejemplo #3: Implementación de la transformación del panadero



Mezclado por convección: sistemas bifásicos

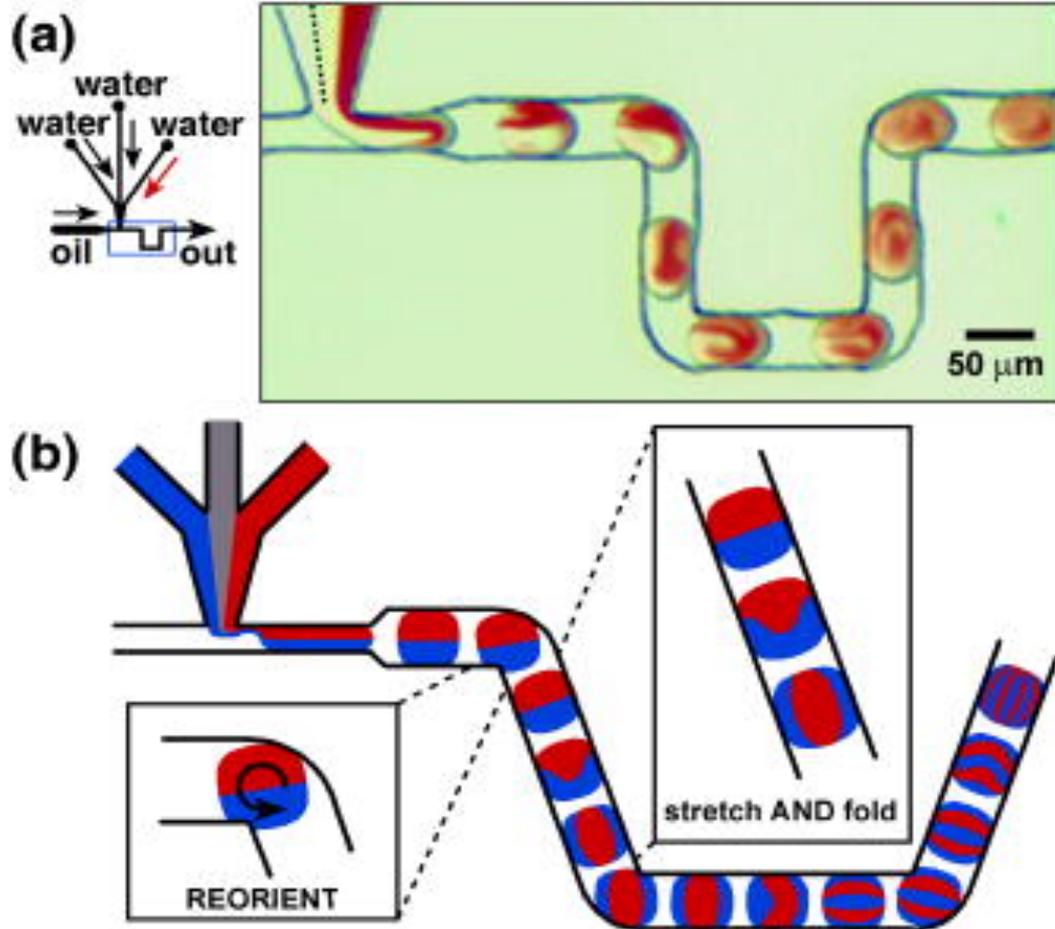
Ejemplo #4: Utilizando el flujo inducido dentro de gotas en tubos con curvas



Microfluidica

Mezclado por convección: sistemas bifásicos

Ejemplo #5: Implementando la transformación del panadero dentro de las gotas



Tiempo característico de mezclado como función del número de Peclet

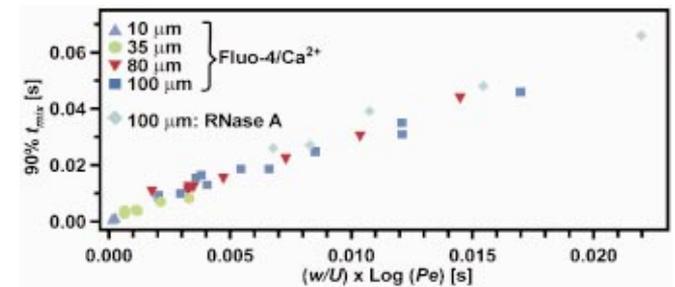


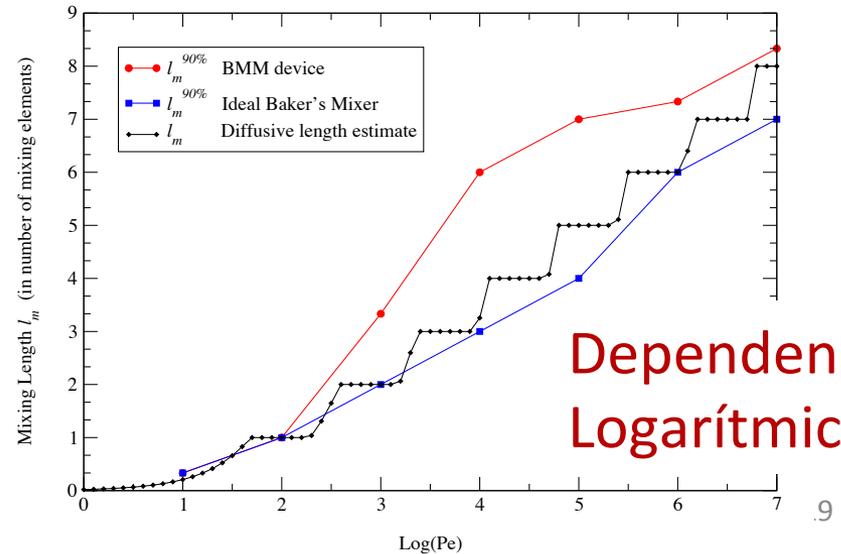
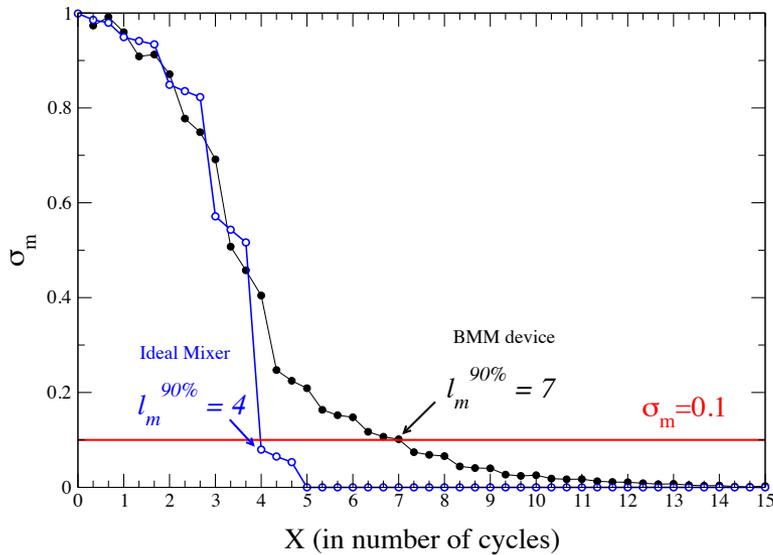
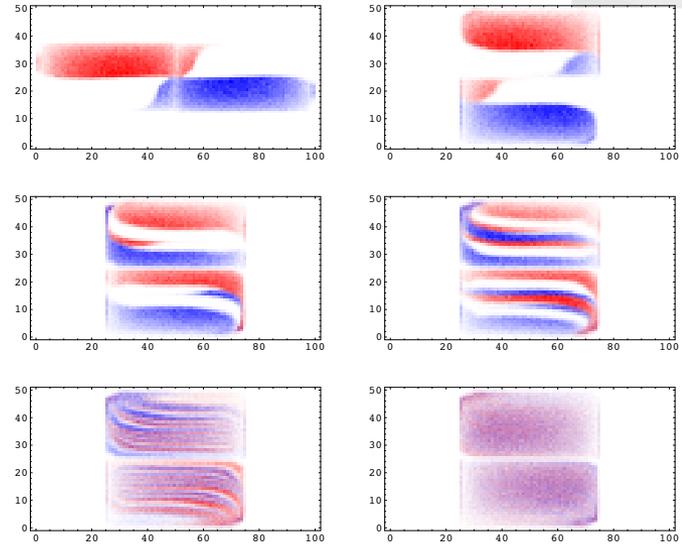
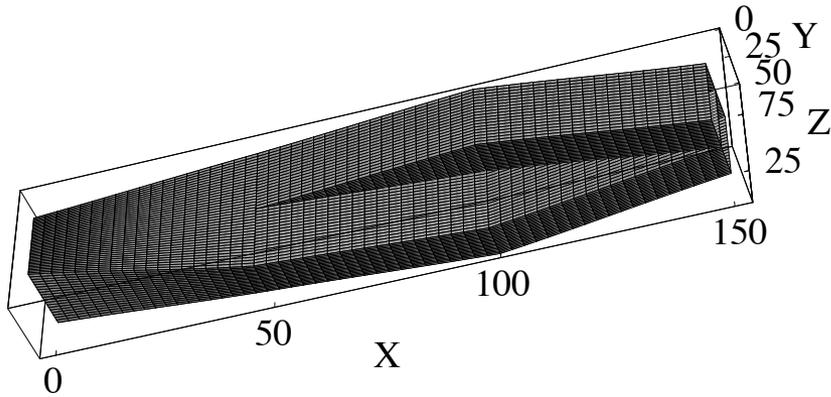
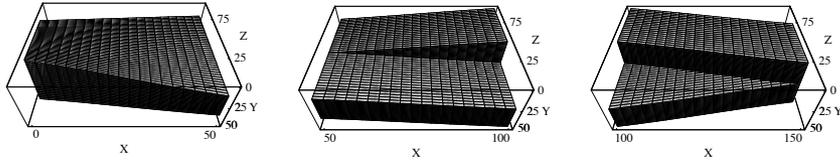
FIG. 4. (Color) Entire experimental data set from Fig. 3 collapses on a line when plotted versus $(w/U)\log(Pe)$, in agreement with the scaling equation.

Dependencia Logarítmica!!

Microfluidica

Nuestra implementación de la transformación del panadero

Teoría y simulaciones

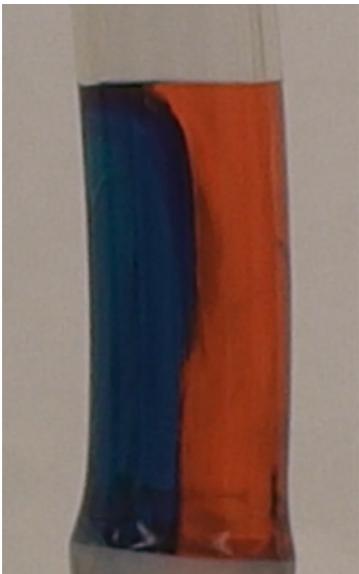


Dependencia Logarítmica!!

Microfluidica

Nuestra implementación de la transformación del panadero

Experimentos usando un impresora 3D



~.5cm

~300um²⁰