

# Jugando con membranas delgadas: aplicación a la medición de fuerzas

Chantal Tassius<sup>1</sup>, Roberto Bernal<sup>2</sup>, Francisco Melo<sup>1</sup>  
& Jean-Christophe Géminard<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Física No Lineal, Universidad de Santiago (Chile)

<sup>2</sup> Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University (USA)

<sup>3</sup> Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure, Lyon (France)

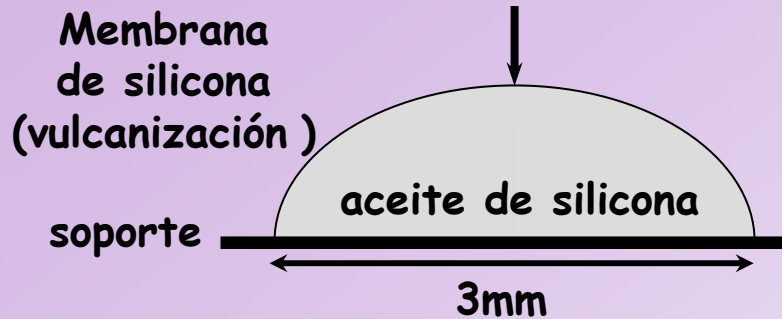
# Plan de la presentación

- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- Los estudios preliminares
- Las mediciones de las constantes características
- Las condiciones para observar pliegues
- Conclusiones y perspectivas

# Plan de la presentación

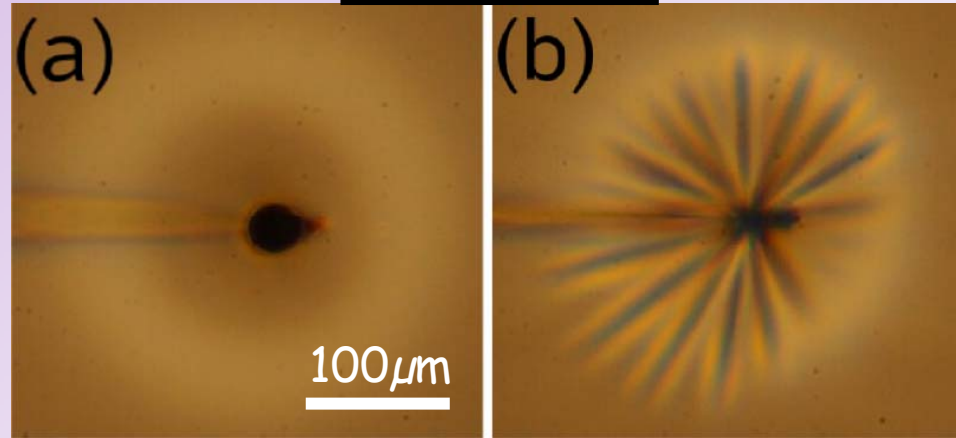
- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- Los estudios preliminares
- Las mediciones de las constantes características
- Las condiciones para observar los pliegues
- Conclusiones y perspectivas

# ¿ Qué tipo de membranas usamos?



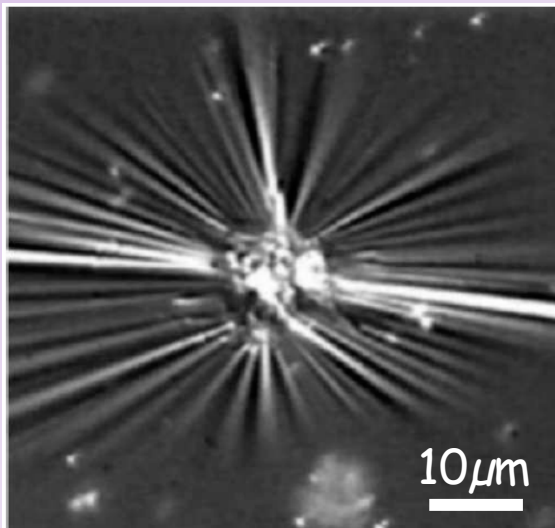
$\delta$ : *desplazamiento vertical de la membrana*

$\delta = 2.5 \mu\text{m}$



membrana plana

membrana con radio de curvatura  $R=2.5\text{mm}$



Contracción radial de un **fibroblasto** muriéndose

**fibroblasto** : célula involucrada en la cicatrización de las heridas

*K.Burton, D.L.Taylor, Nature, 385, 1997*

# ¿ Cómo se hacen las membranas de silicona ?



ajuste de la distancia  
muestra-llama

Jeringa con aceite o gota  
sobre soporte sólido



Mechero Bunzen  
transformado  
(llama plana)

motor de paso

control de la  
velocidad de rotación

# ¿ Por qué se producen pliegues ?

E modulo de Young

h espesor de la membrana

$A_m$  amplitud de la deformación fuera del plano de la membrana

D dimensión típica de la membrana

energía de flexión:  $U_B \sim Eh^3 A_m^2 / D^4$

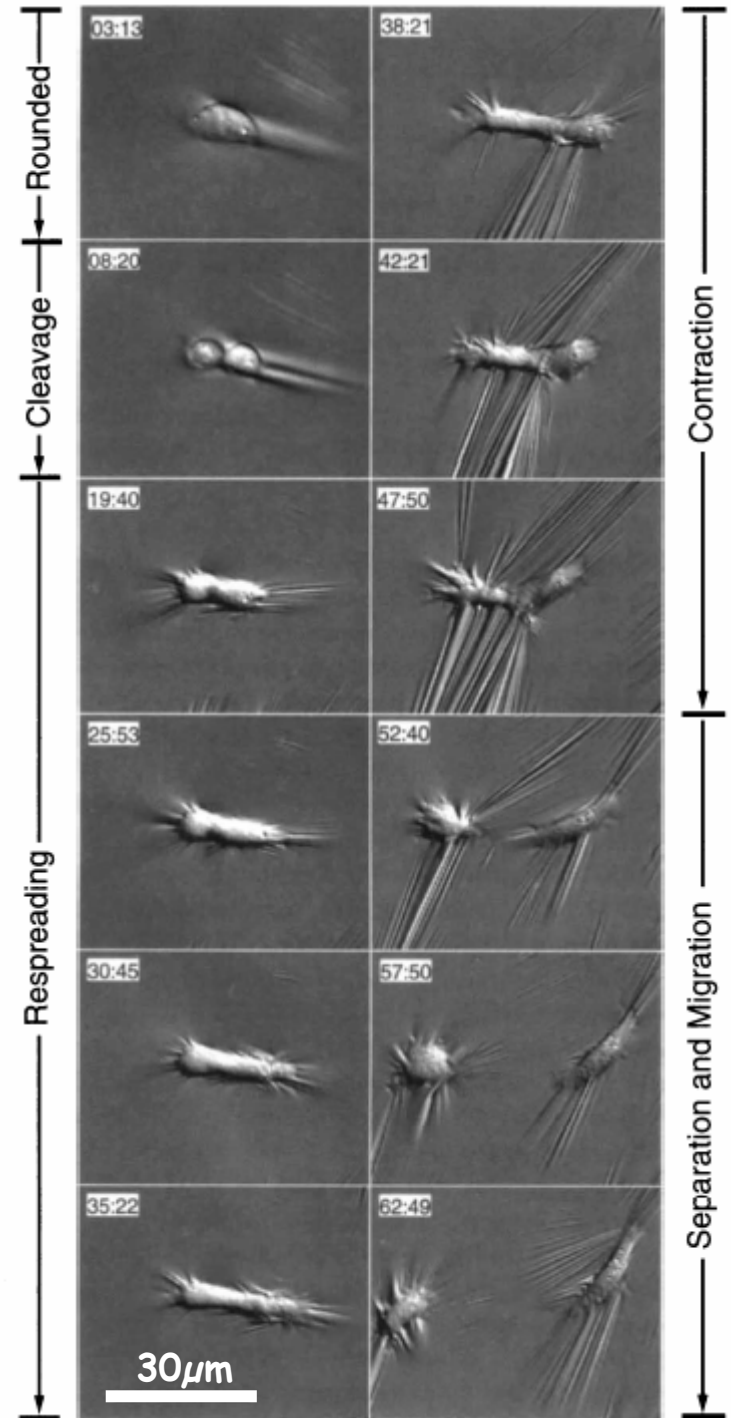
energía de contracción:  $U_S \sim Eh A_m^4 / D^4$



La flexión cuesta menos que la contracción cuando h (espesor de la membrana) va disminuyendo

Ejemplo de aplicación de las membranas de silicona a un enfoque descriptivo de la división celular

*K.Burton, D.L.Taylor, Nature, 385, 1997*

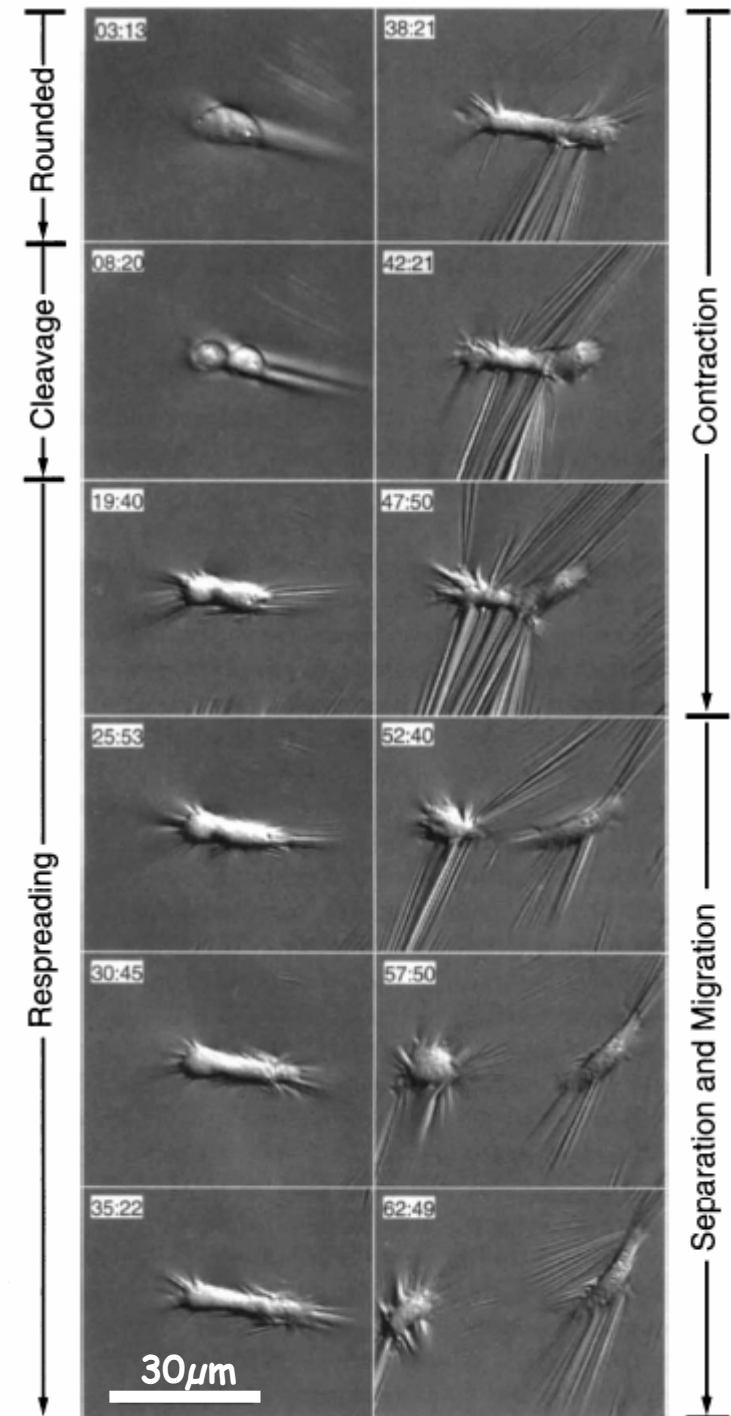


# Ejemplo de aplicación de las membranas de silicona al estudio de la división celular

¿ Se podrá deducir el valor de las fuerzas locales del perfil de pliegues ?

- características elásticas de las membranas
- condiciones de aparición de los pliegues

*K.Burton, D.L.Taylor, Nature, 385, 1997*

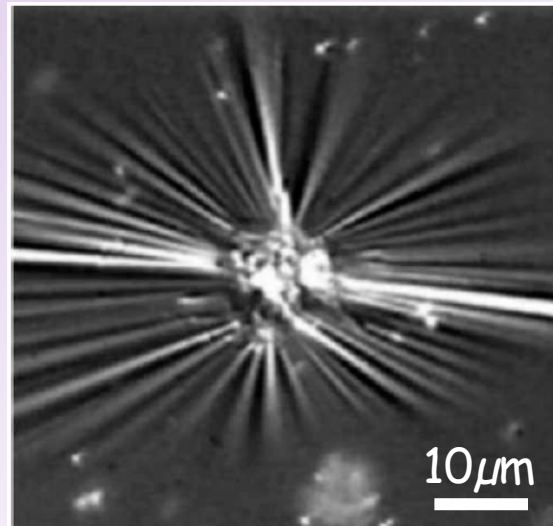
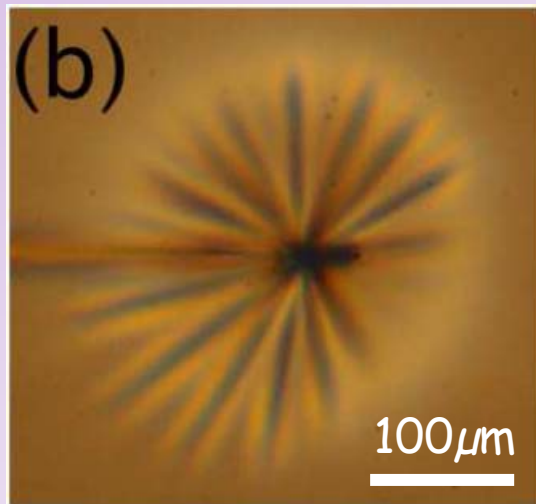
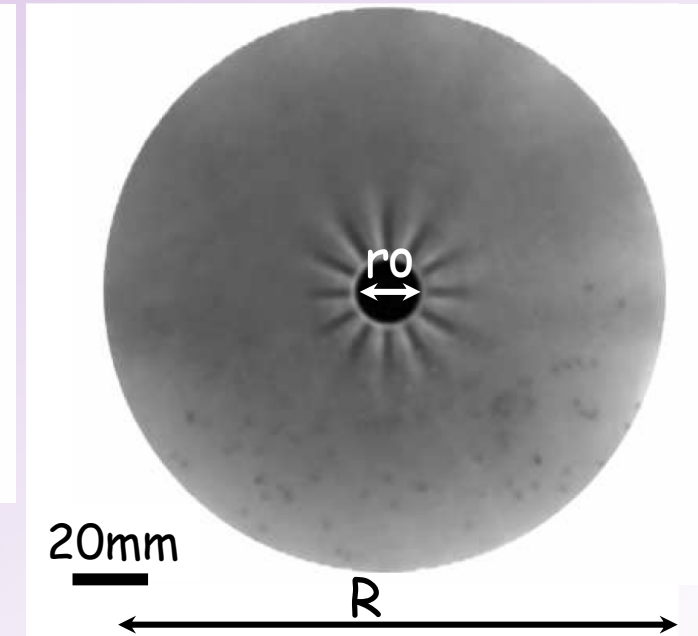
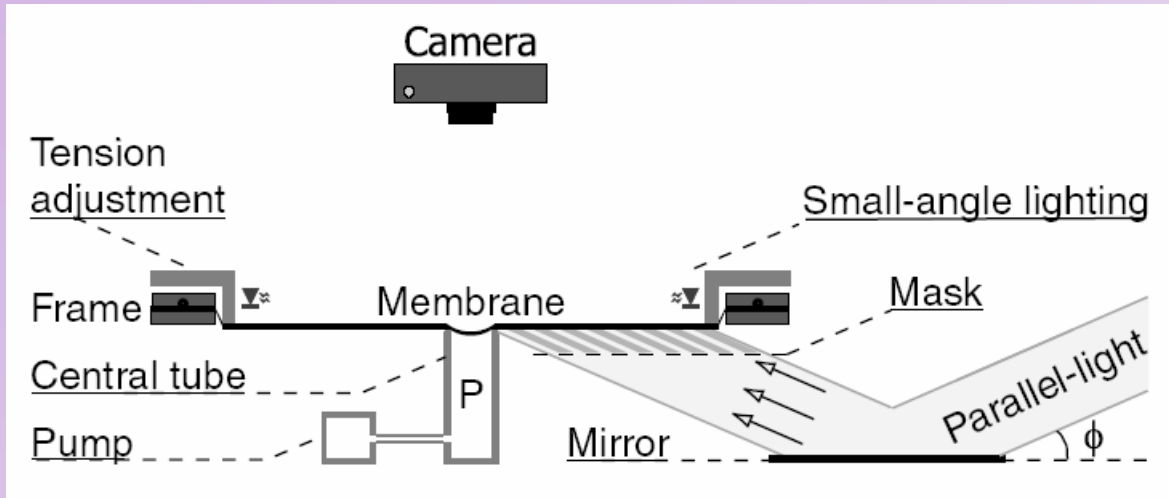




# Plan de la presentación

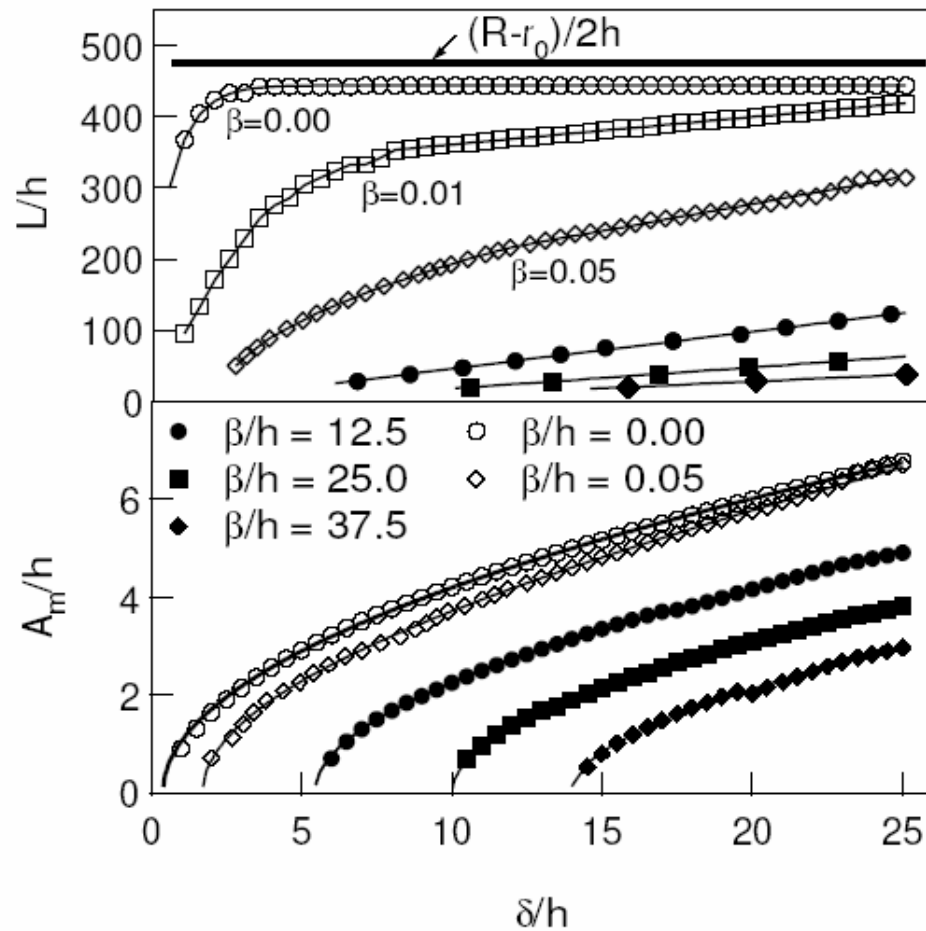
- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- **Los estudios preliminares**
- Las mediciones de las constantes características
- Las condiciones para observar los pliegues
- Conclusiones y perspectivas

# Preliminares: membranas macroscópicas dispositivo experimental

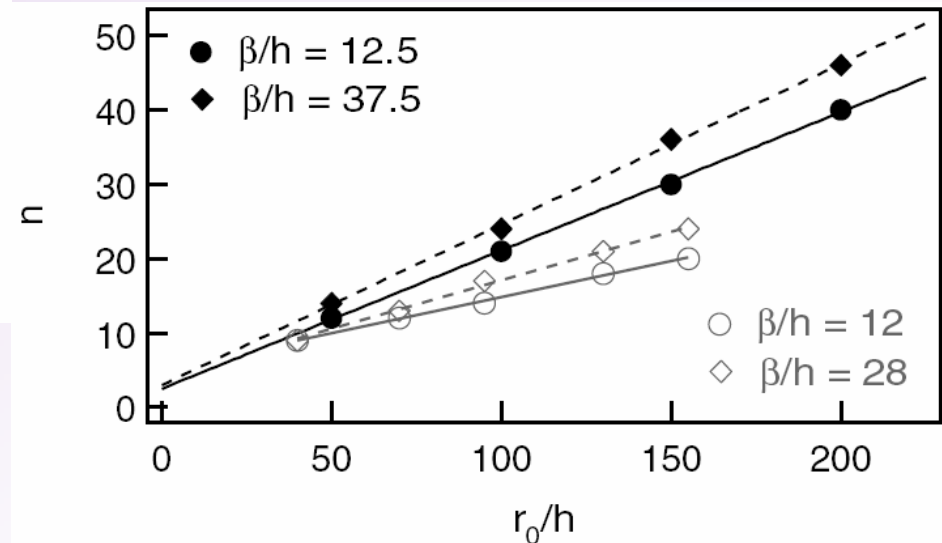


# Preliminares: membranas macroscópicas (*planas*)

## Resultados



$L$ : longitud del pliegue  
 $\delta$ : desplazamiento de la membrana  
 $A_m$ : amplitud de la deformación  
 $\beta$ : tensión inicial de la membrana  
 $h$ : **espesor de la membrana**  
 $n$ : número de pliegues



## Preliminares: membranas macroscópicas

### Conclusiones

- la amplitud y la longitud de los pliegues aumentan con  $\delta$  sobre un umbral dependiendo de la tensión inicial
- la amplitud y la longitud de los pliegues son muy dependientes de la tensión inicial
- el número de pliegues sigue una ley lineal del  $\rho$  y cambia poco con la tensión inicial

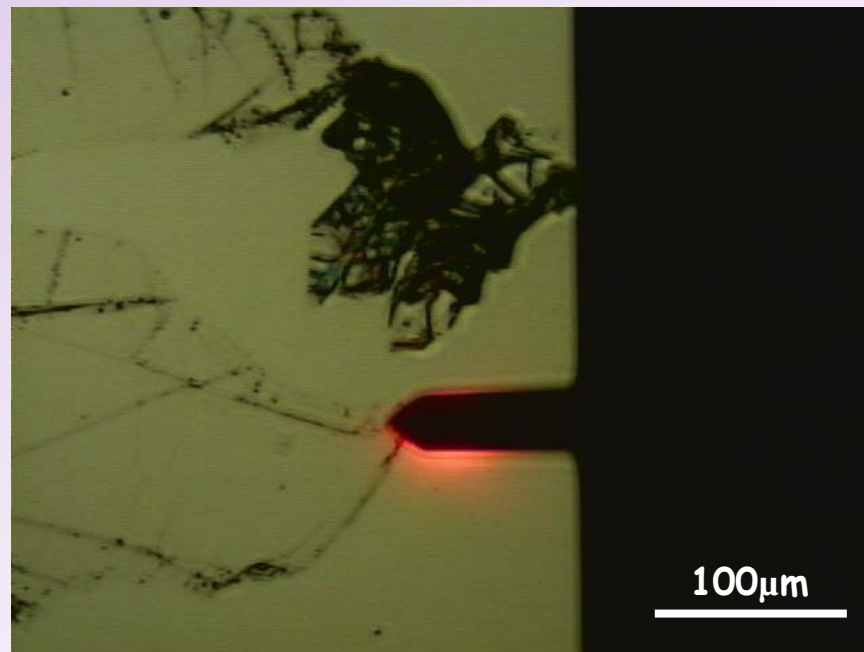
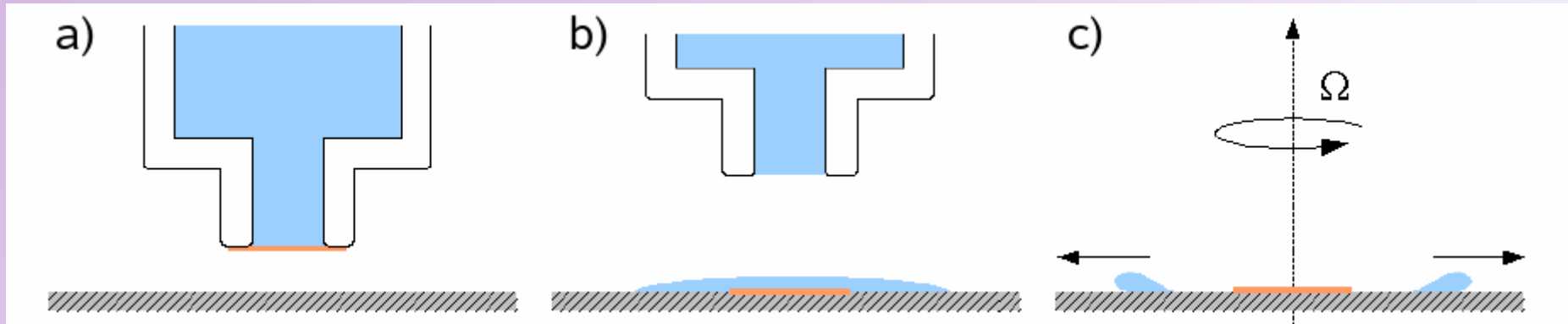
- medición de la tensión inicial de la membrana
- medición de la amplitud del pliegue

# Plan de la presentación

- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- Los estudios preliminares
- **Las mediciones de las constantes características**
- Las condiciones para observar los pliegues
- Conclusiones y perspectivas

# Mediciones de las constantes características espesor de la membrana

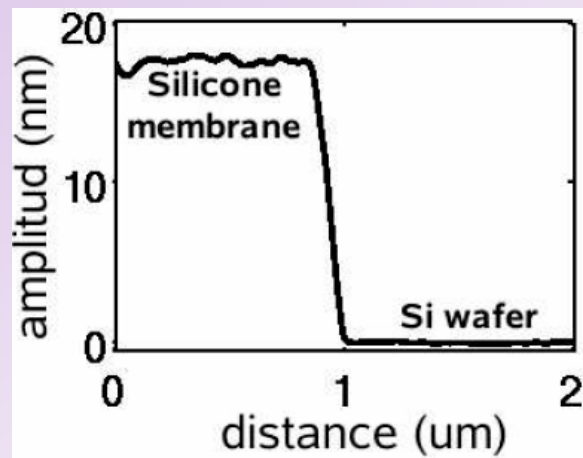
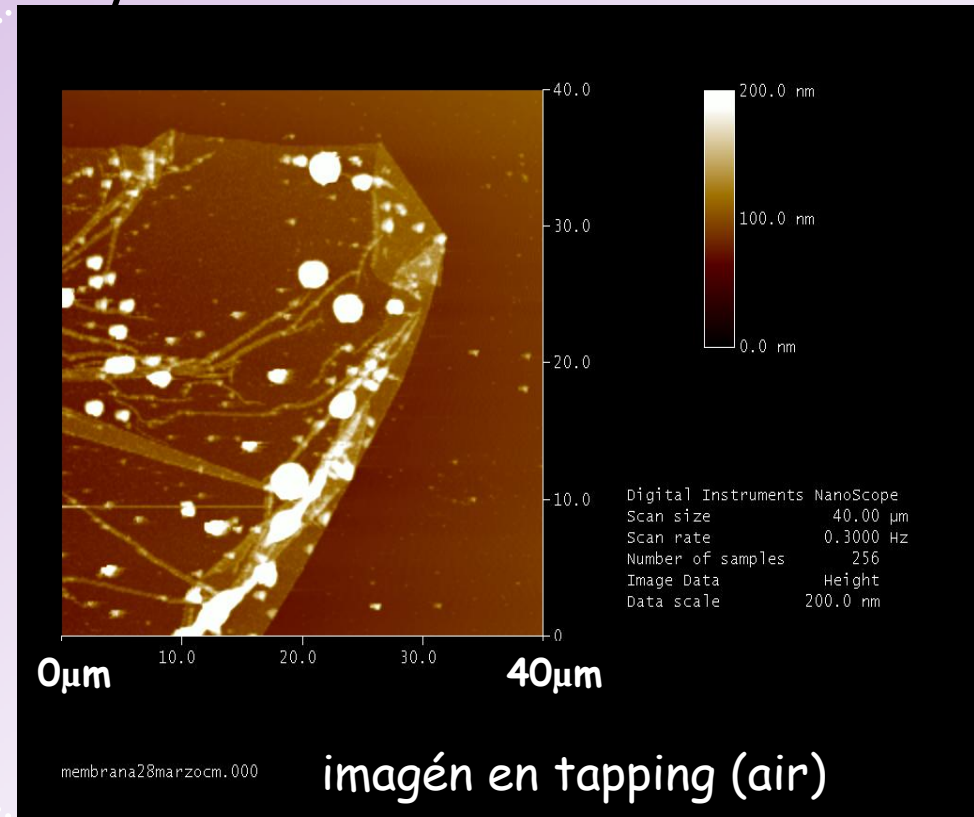
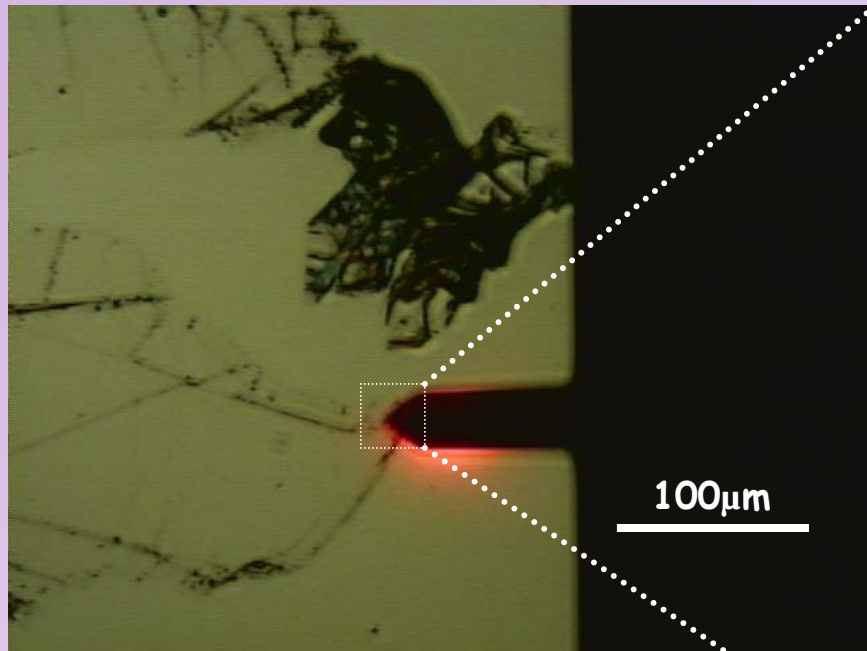
## *Preparación de la muestra*



# Mediciones de las constantes características

## espesor de la membrana

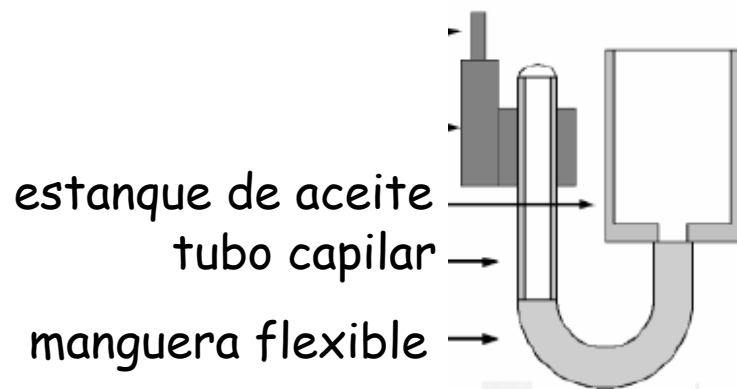
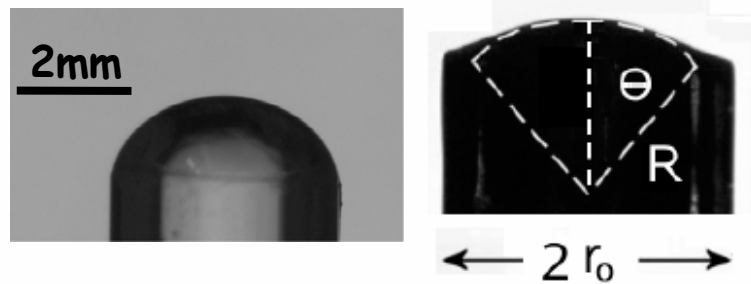
*Medición con el microscopio de fuerza atómica*



$$h = 24 \pm 5 \text{ nm}$$

# Mediciones de las constantes características tensión inicial ( $T_0$ ) y módulo elástico (B)

*Dispositivo experimental*





# Mediciones de las constantes características tensión inicial ( $T_0$ ) y módulo elástico ( $B$ )

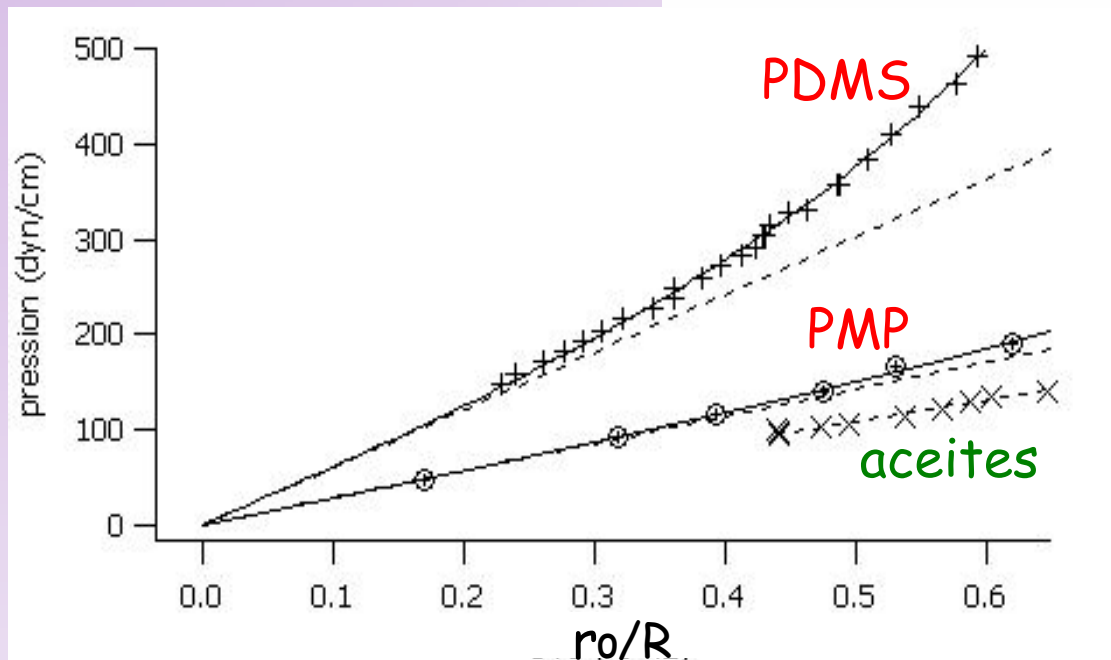
## Resultados

$\gamma$ : tensión de superficie

$C=1/R$ : curvatura

Ley no lineal

$$\Delta P \approx 2T_0C + 2.66B \frac{\arcsin(Cr_0) - Cr_0}{r_0}$$



término considerando la  
componente elástica de la  
tensión (*factor numérico  
resultando de simulaciones*)

Ley de Laplace

$$\Delta P = \rho gh = \frac{2\gamma}{R}$$

## Mediciones de las constantes características tensión inicial ( $T_0$ ) y módulo elástico ( $B$ )

### *Resultados*

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 60.5 \pm 0.5 \text{ mN/m} \\ B = 240 \pm 10 \text{ mN/m} \end{array} \right\} \text{PDMS}$$

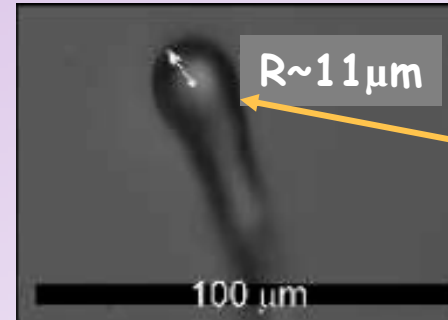
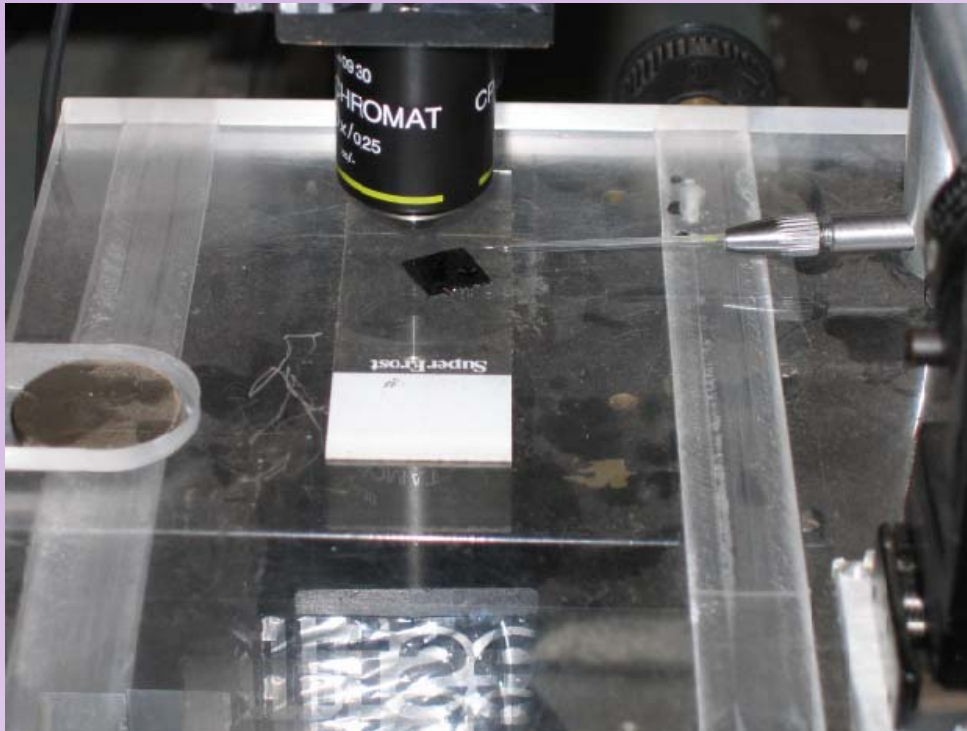
$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 27 \pm 1 \text{ mN/m} \\ B = 20 \pm 10 \text{ mN/m} \end{array} \right\} \text{PMP}$$

- método válido para la medición de tensión inicial ( $T_0$ ) y módulo elástico ( $B$ ), si  $B$  y  $T_0$  no son de la misma orden
- ¿ Se podrá medir  $B$  de otra manera si es de la misma orden que  $T_0$ ?

# Plan de la presentación

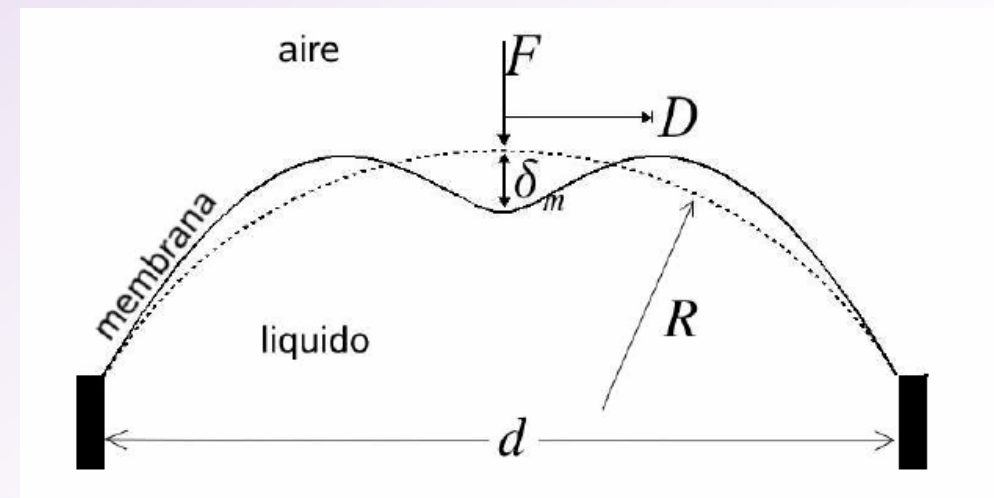
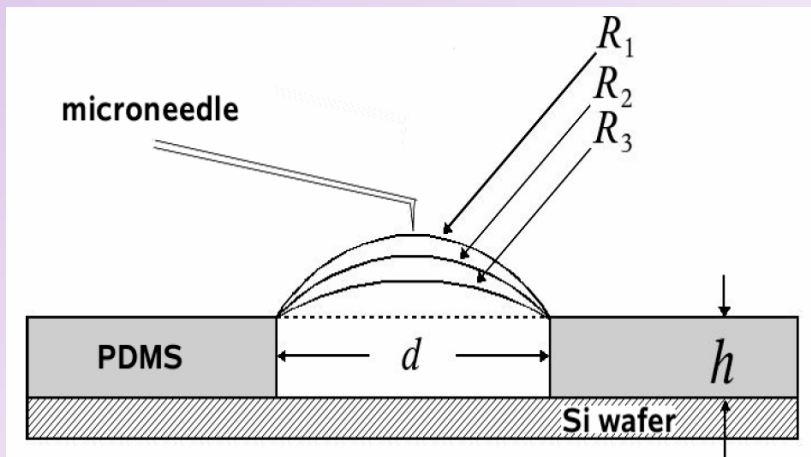
- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- Los estudios preliminares
- Las mediciones de las constantes características
- **Las condiciones para observar los pliegues**
- Conclusiones y perspectivas

# Pliegues: dispositivo microscópico

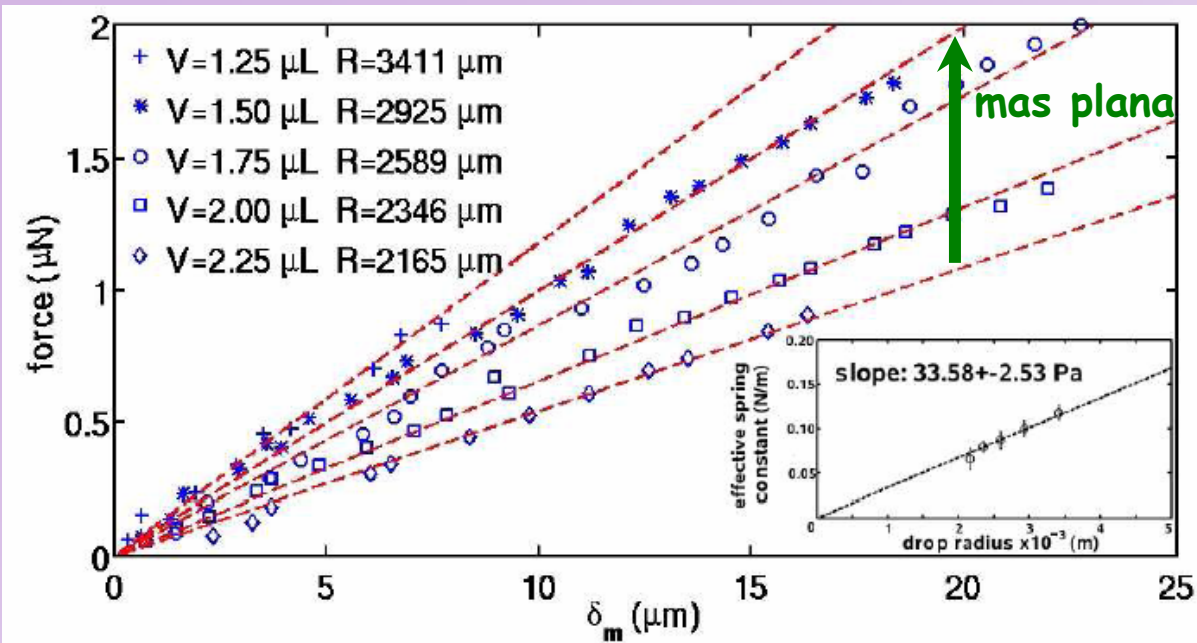


vidrio fundido

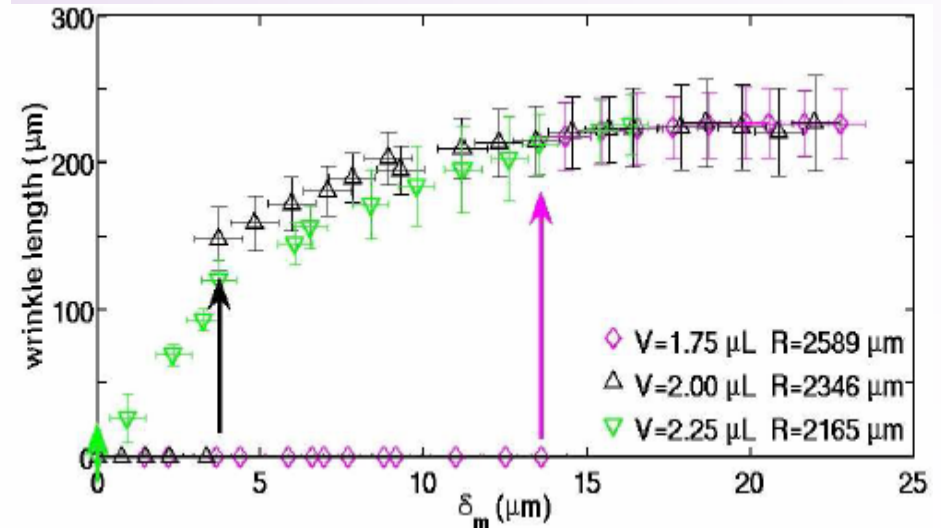
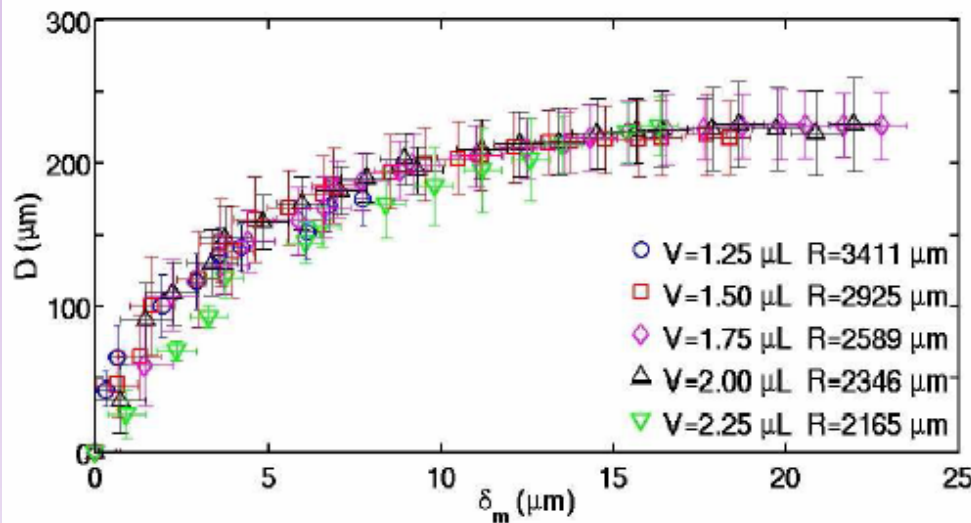
$R_1 \sim 2.5 \text{ mm}$   
 $h \sim 500 \mu\text{m}$   
 $d = 3 \text{ mm}$



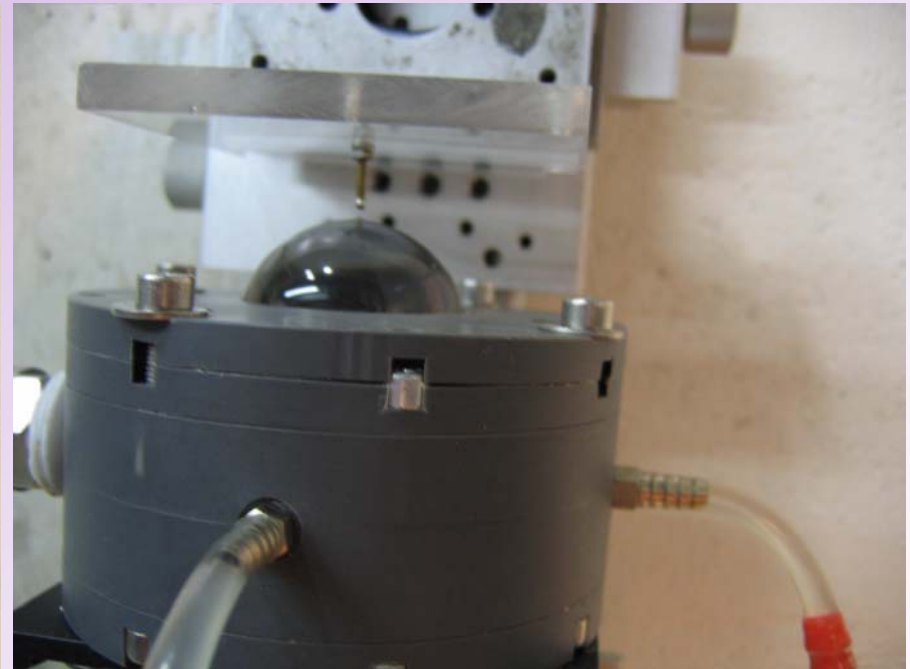
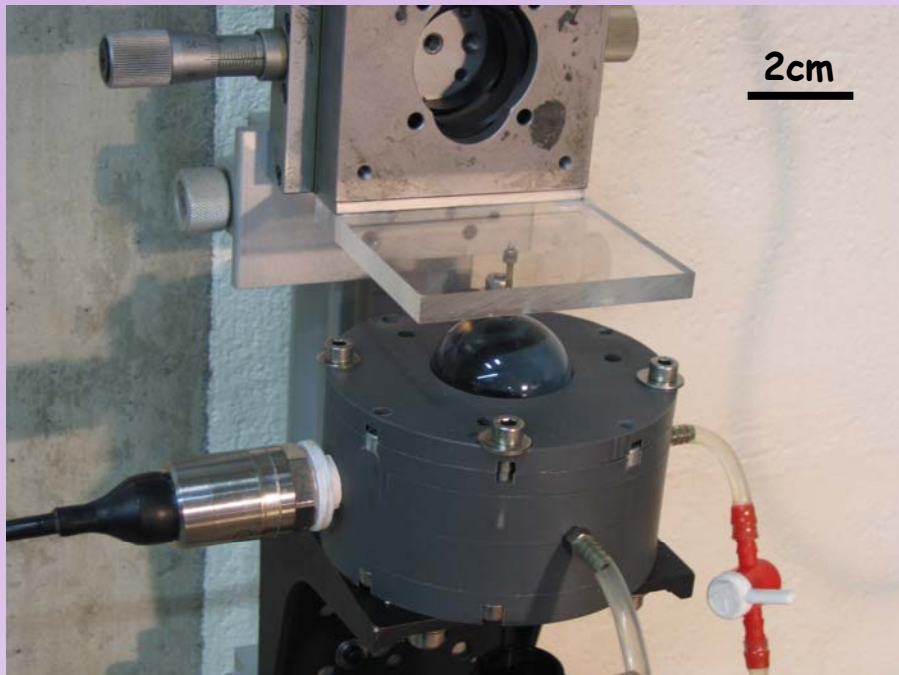
# Pliegues: dispositivo microscópico (resultados)



- ley lineal  $F(\delta)$
- constante dependiendo de  $R$
- valor-limite de  $D$
- umbral de aparición de los pliegues



## Pliegues: dispositivo macroscópico

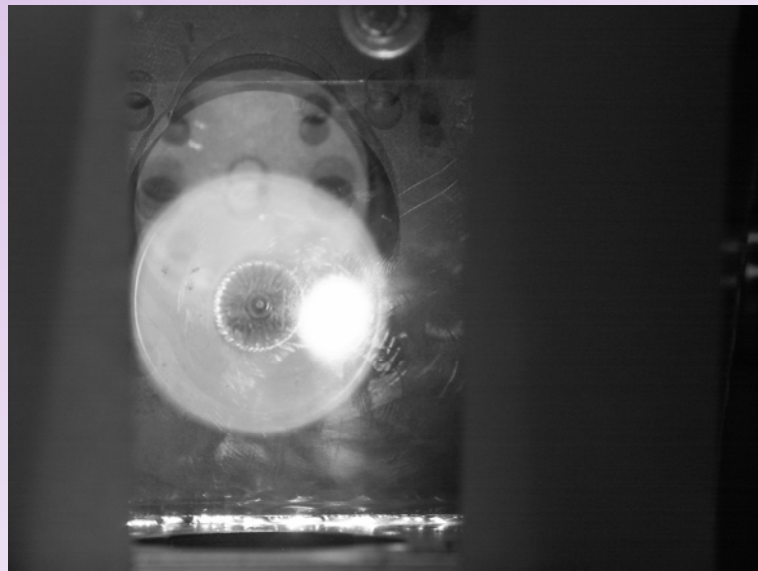
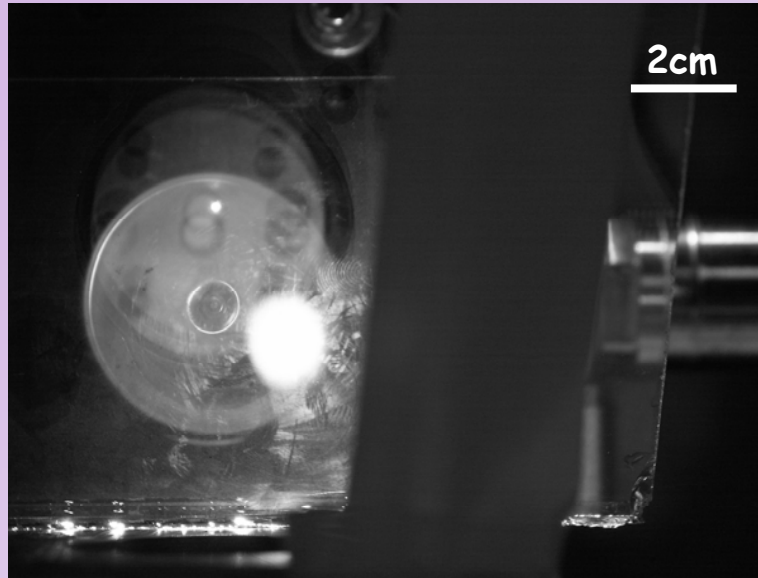


Cambio de escala para manejar más fácilmente los distintos parámetros

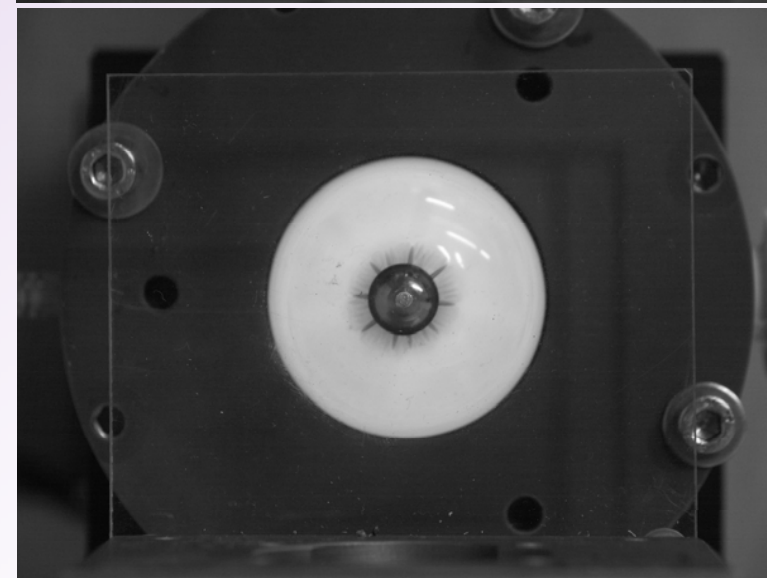
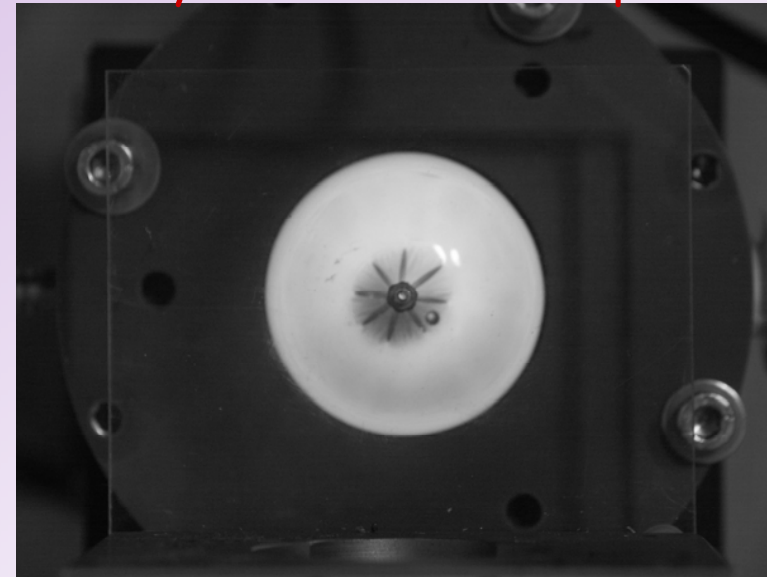
- medición de la presión
- control de  $T_0$  y  $R$
- tamaño de la 'punta'

# Pliegues: dispositivo macroscópico *Resultados preliminares*

Evolución de  $D$  con  $\delta$



Evolución del número de pliegues con  $\delta$  y el tamaño de la 'punta'



# Dispositivo macroscópico: otros resultados *(J.C. Géminard & Q. Puydt)*

## • Simulaciones

mejor modelo

➔ ley no lineal  $\Delta P = f(R)$

➔ ley  $F = g(\delta)$

$$F \approx \xi B^{1-\nu} T_0^\nu \delta$$

$$\xi = 1.143 \pm 0.002$$

$$\nu = 0.881 \pm 0.003$$

## • Experimentos

indentación



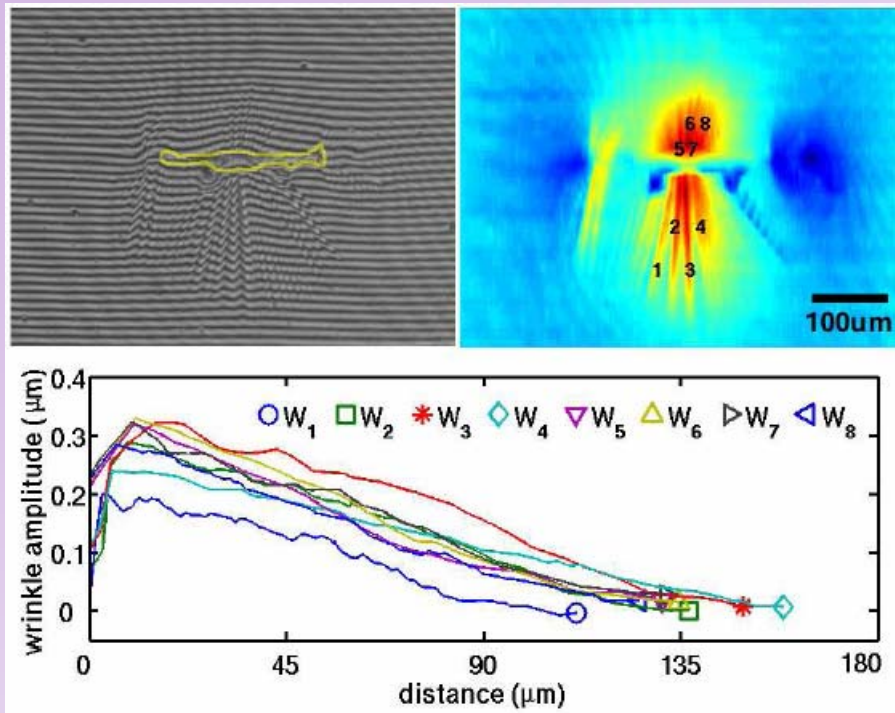
# Plan de la presentación

- Las membranas que estudiamos. Aplicaciones a la Biofísica
- Los estudios preliminares
- Las mediciones de las constantes características
- Las condiciones para observar los pliegues
- **Conclusiones y perspectivas**

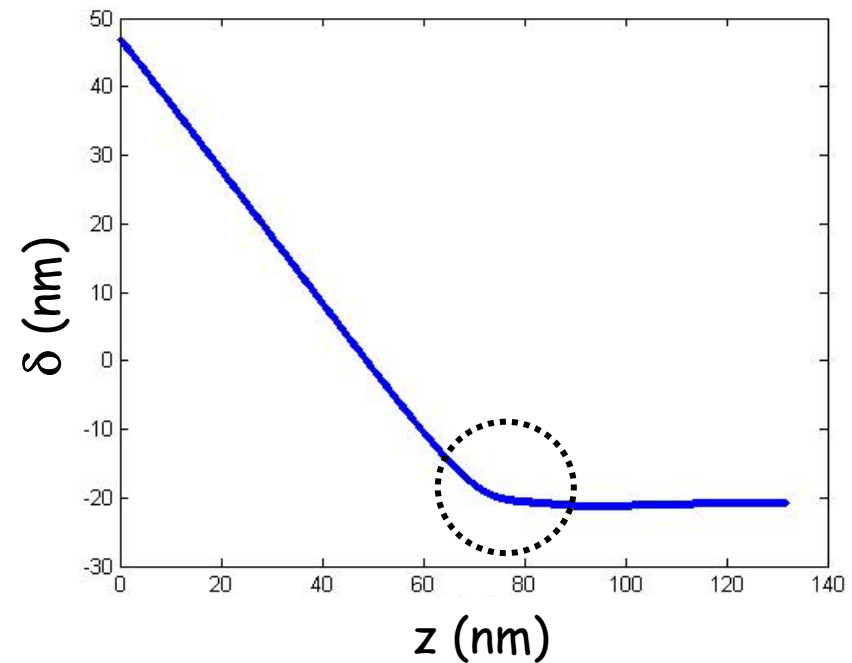
# Aplicaciones

## *Sugerencias para los experimentos de Biofísica*

Medición de la amplitud de los pliegues (interferometría)



Medición local de  $T_0$  (curva de fuerza con microscopio de fuerza atómica)



$$F \approx \xi B^{1-\nu} T_0^\nu \delta$$

$\delta$ : deflexión del cantilever

$F = k \delta$ ,  $k$ : constante de restitución del cantilever

# Conclusiones y perspectivas

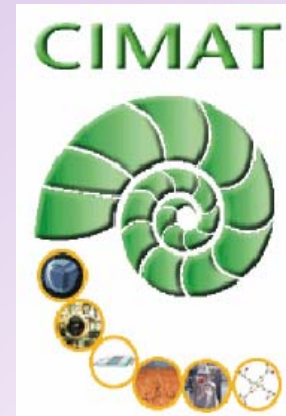
- Mejorar la comprensión de la aparición de pliegues en tales membranas
- Proponer un protocolo de medición de fuerzas celulares con esas membranas
- Proponer modelos para las curvas de fuerza en microscopía de fuerza atómica (indentación de membranas delgadas)

# Agradecimientos

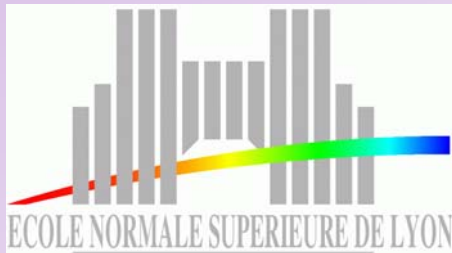
A todos por su presencia...



Laboratorio de Física  
no Lineal de la USACH  
Francisco Melo  
Roberto Bernal  
Leonardo Caballero (AFM)



Fernando Lund



Jean-Christophe Géminard  
Quentin Puydt

A todos los miembros del laboratorio de Física no Lineal de la USACH, permanentes o no, chilenos o no