

# Cristales fotónicos, metamateriales, y estructuras naturales

*Diana C. Skigin*

Grupo de Electromagnetismo Aplicado  
Departamento de Física  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Universidad de Buenos Aires

# Materiales artificiales

Materiales microestructurados con un tamaño típico (separación, radio, período)

## Cristales fotónicos

El tamaño típico de la estructura es del orden de la longitud de onda

## Metamateriales

El tamaño típico de la estructura es mucho menor que la longitud de onda

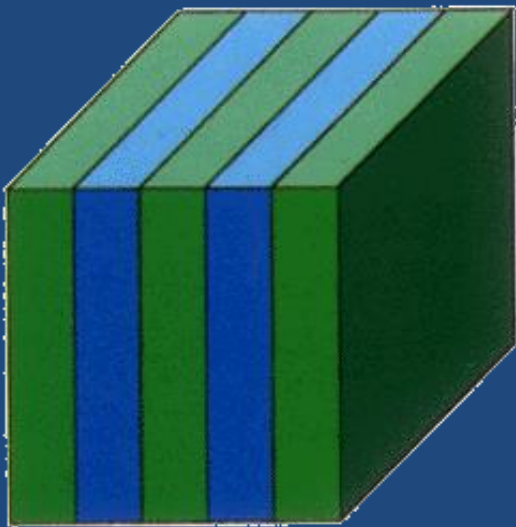
El tamaño típico de la estructura dependerá de la zona del espectro en la que uno quiera lograr alguna respuesta particular.



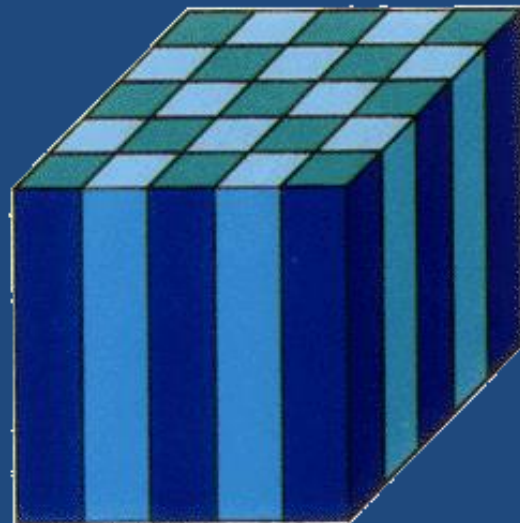
**Los materiales artificiales son escalables !**

Podemos clasificar los cristales fotónicos en:

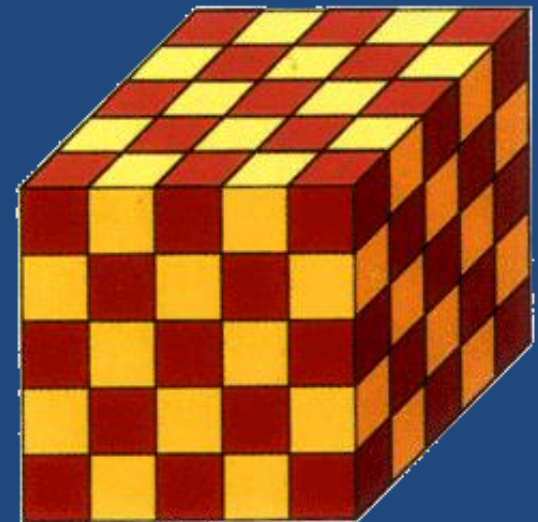
**1D**



**2D**



**3D**



Los diferentes colores representan diferentes materiales en los cuales la luz viaja con distintas velocidades

## ¿Qué hace a los cristales fotónicos tan especiales?

- Que se pueden producir bandas prohibidas para la luz

### ¿Qué son bandas prohibidas?

Son rangos de frecuencia del espectro electromagnético que no pueden atravesar el material.

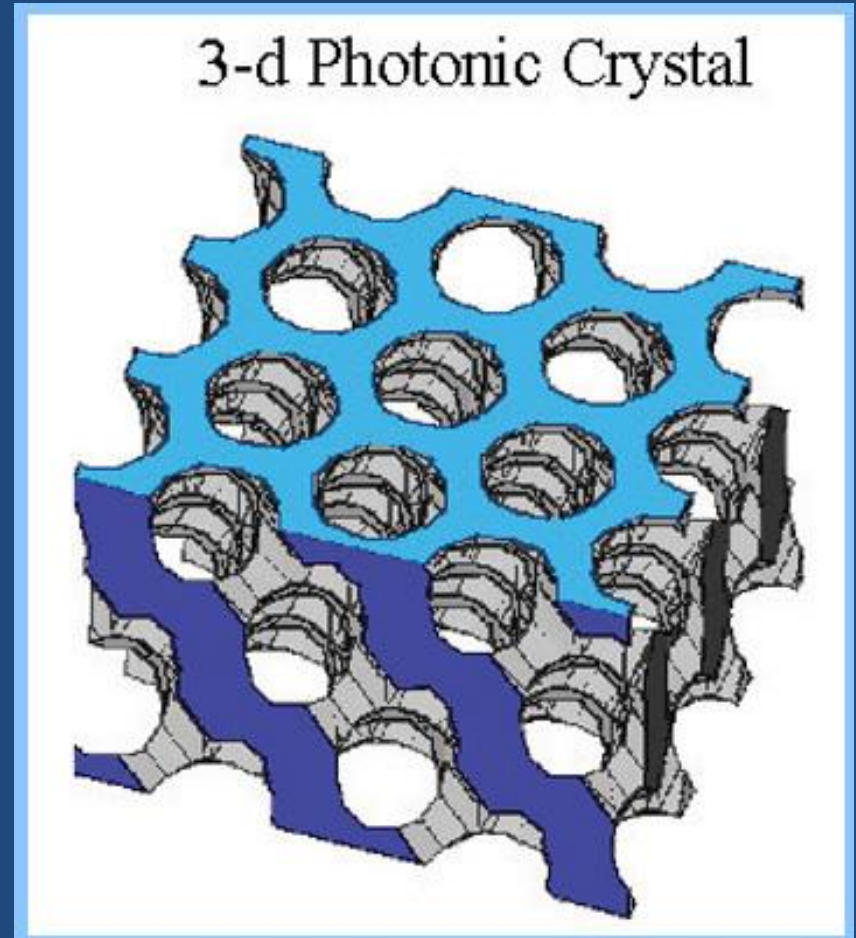
- Que se pueden producir fenómenos nuevos
- Que se puede diseñar la estructura para lograr un objetivo particular

Los primeros materiales microestructurados se fabricaron para longitudes de onda grandes

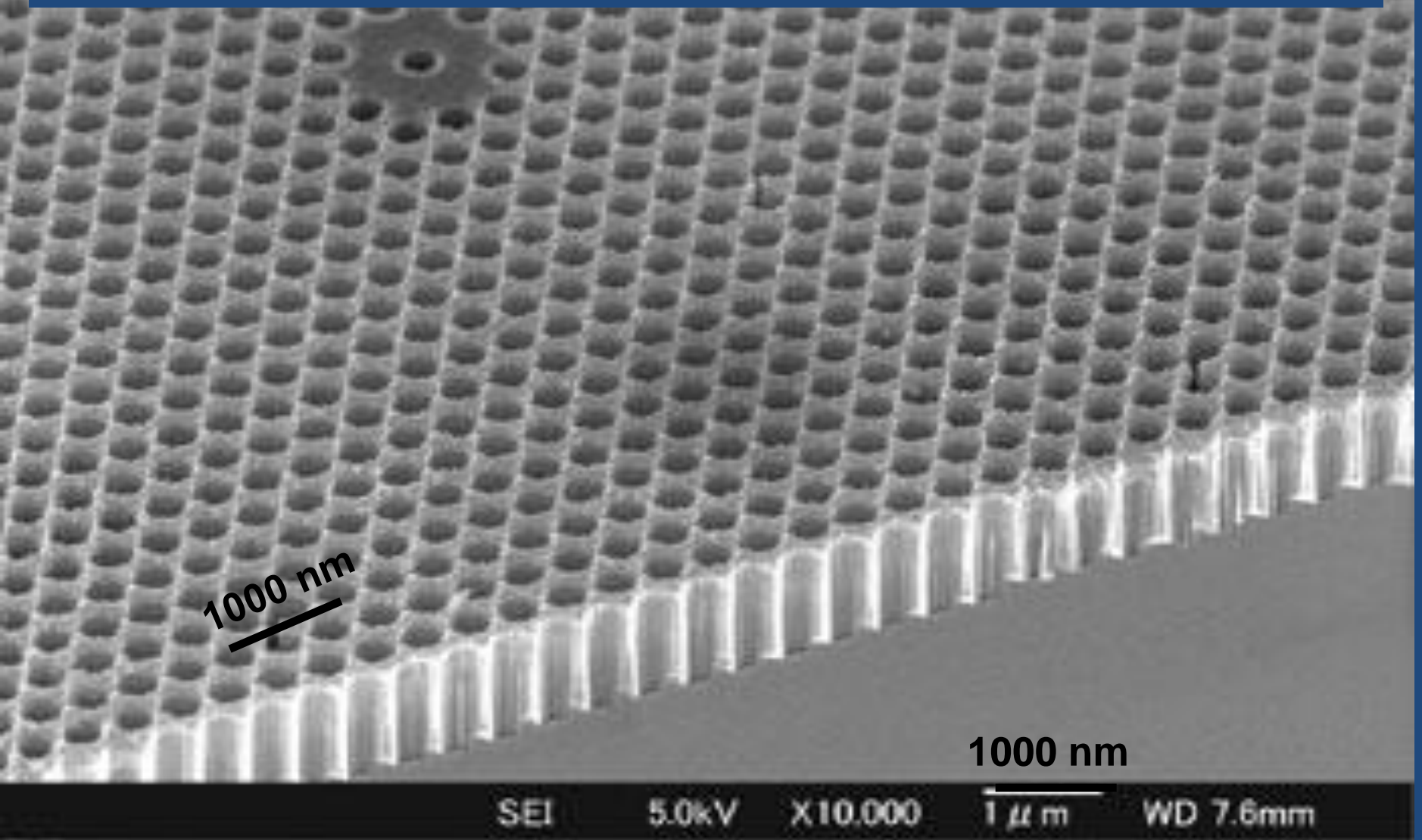
El primer cristal fotónico en 3 dimensiones fue fabricado en 1991

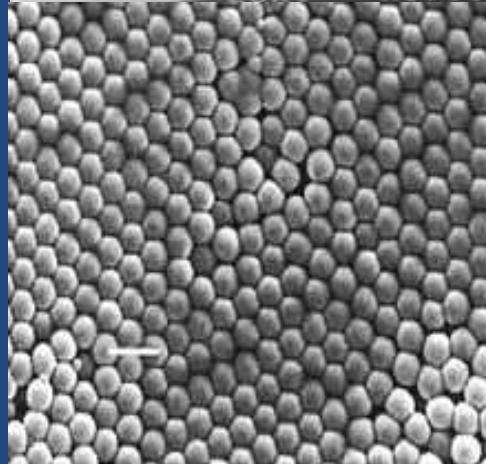
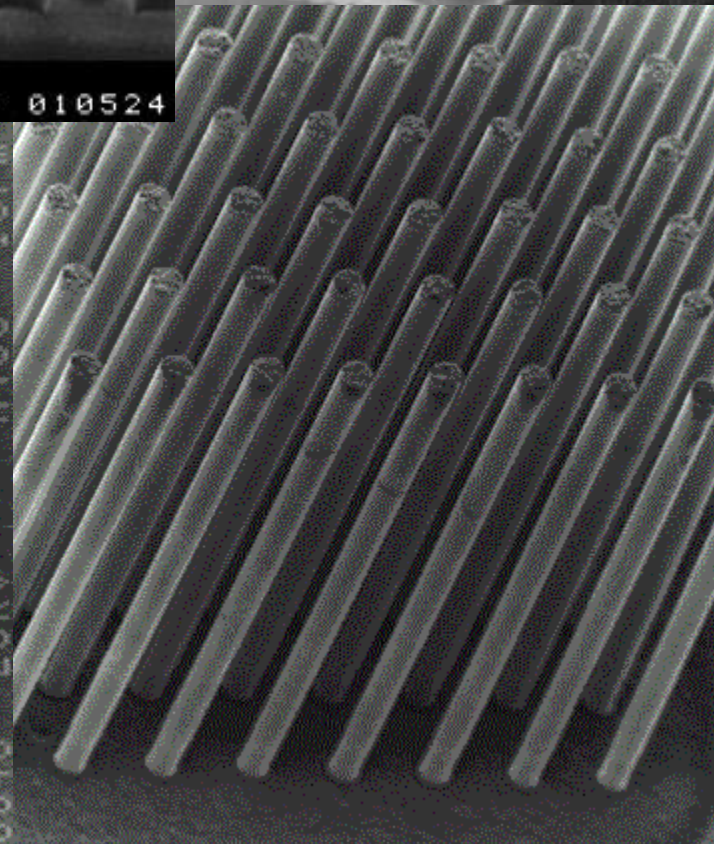
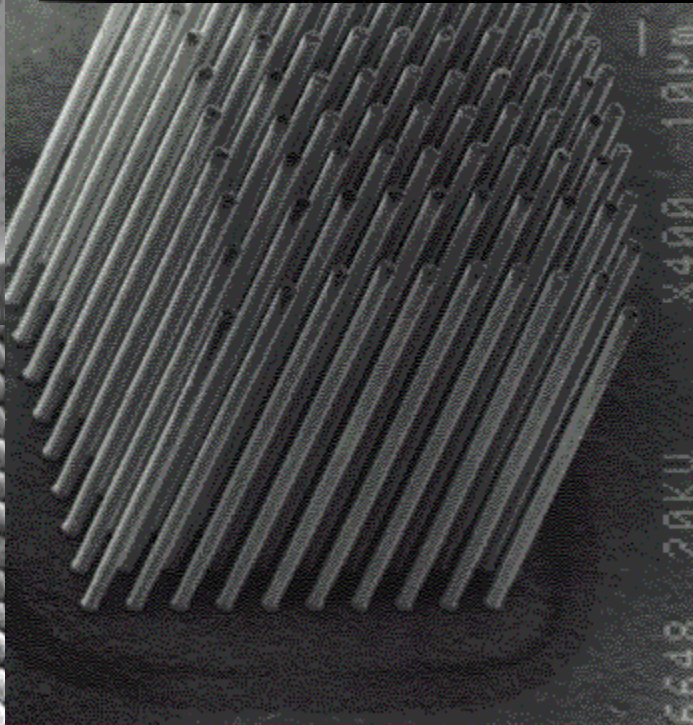
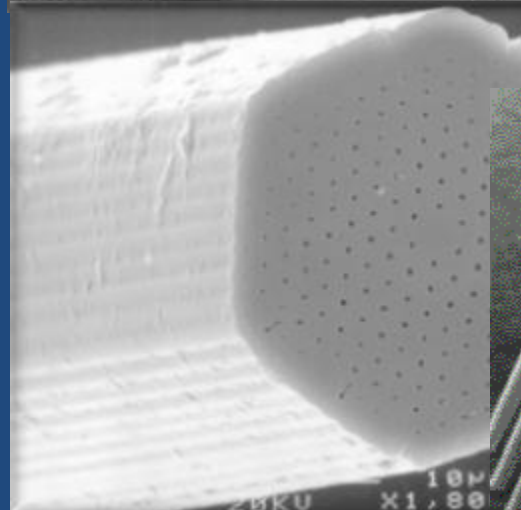
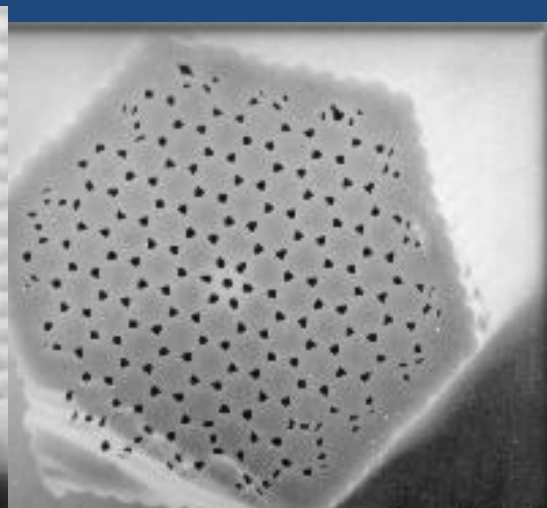
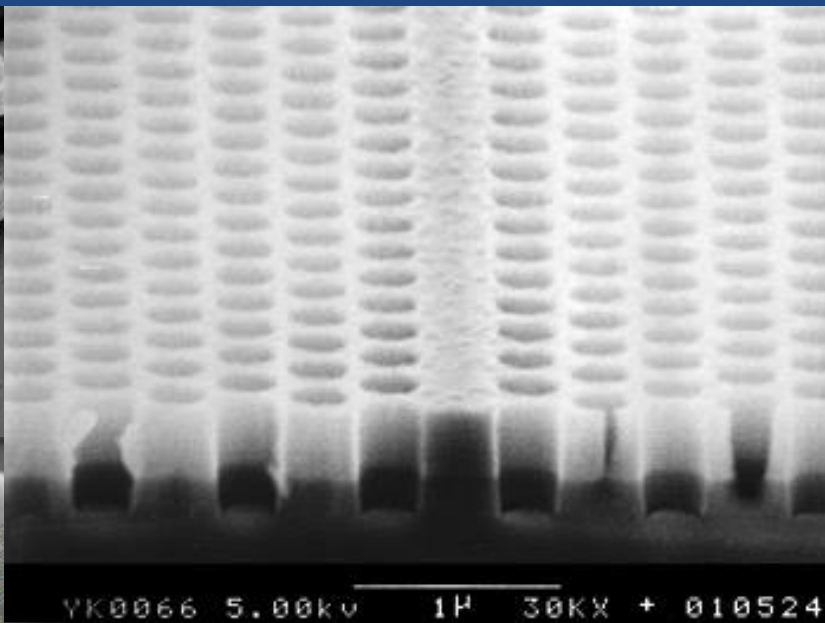
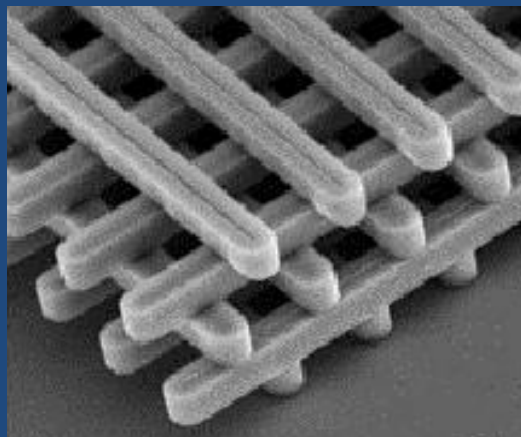
Con agujeros de 6mm de diámetro taladrados en un bloque de cerámica (índice de refracción = 3.6)

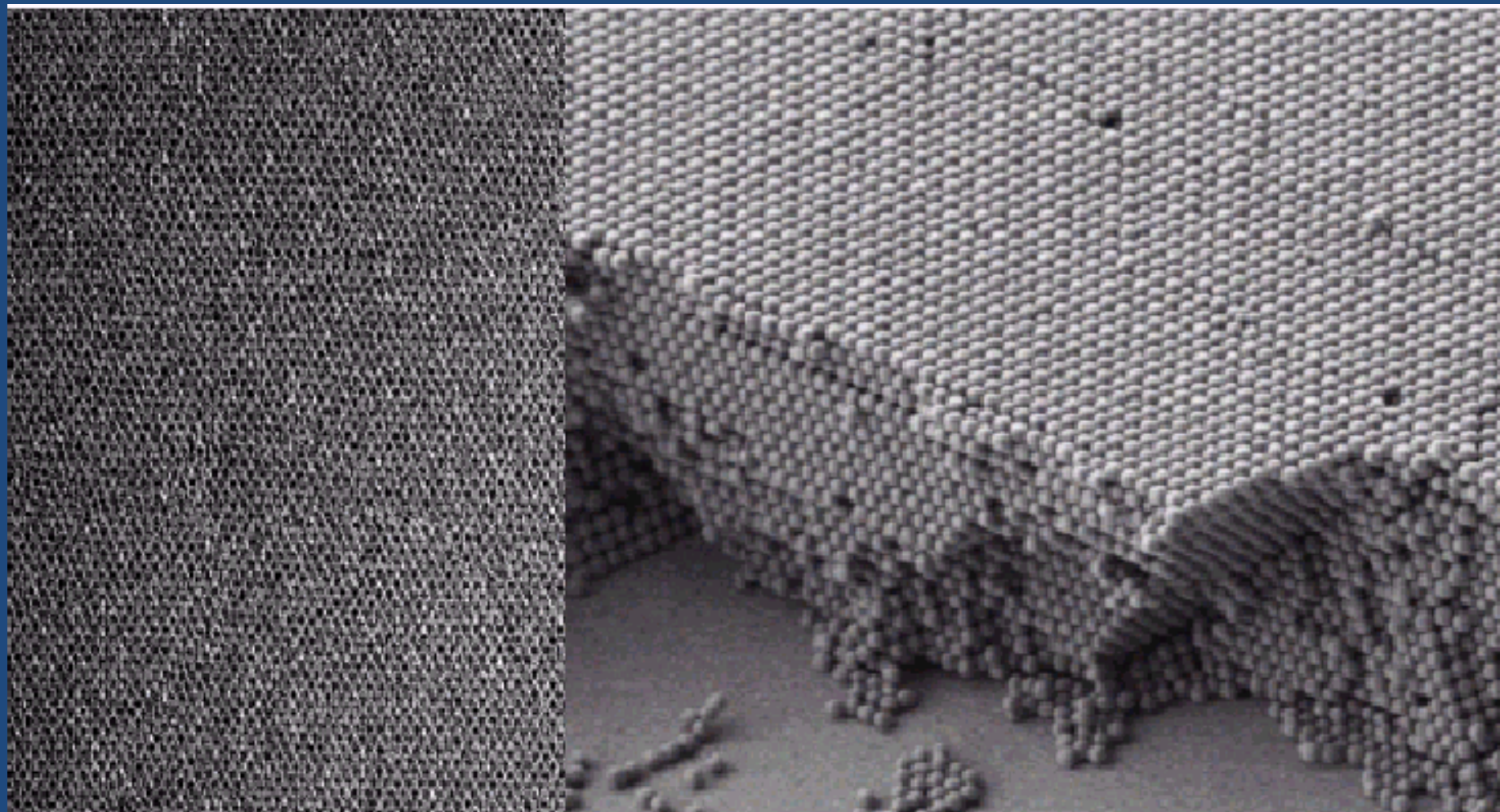
Rechaza microondas de 13-16 GHz en todas las direcciones



Si queremos obtener efectos para la luz visible, los tamaños típicos tienen que ser del orden de la **diezmilésima parte del milímetro** (mucho más difícil de fabricar!!!)





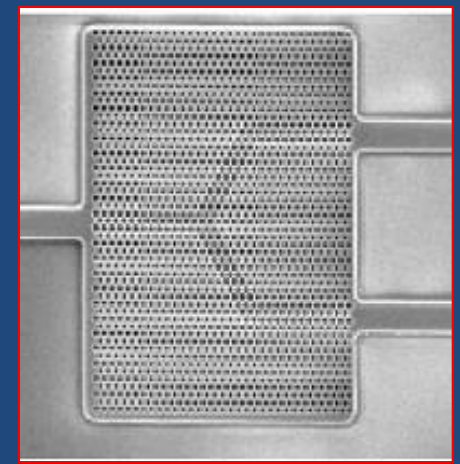
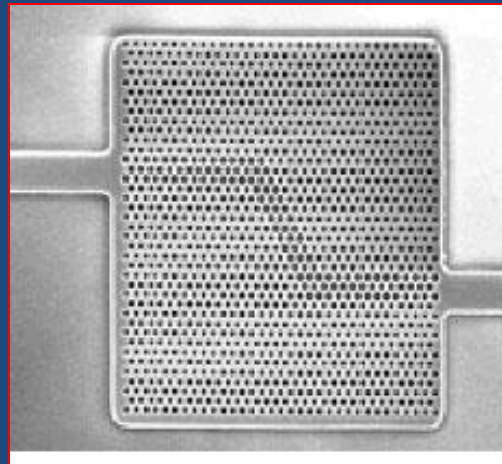
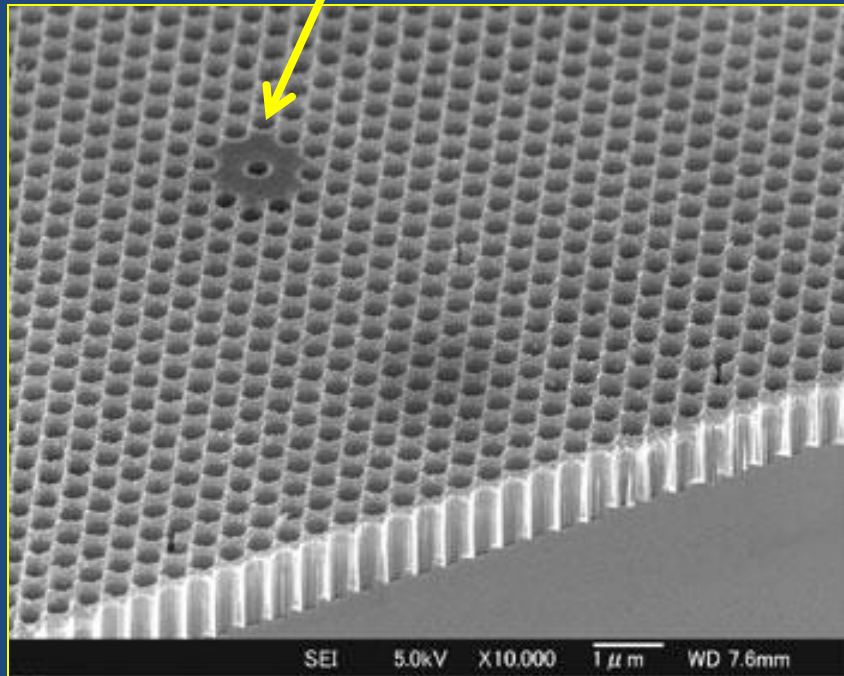
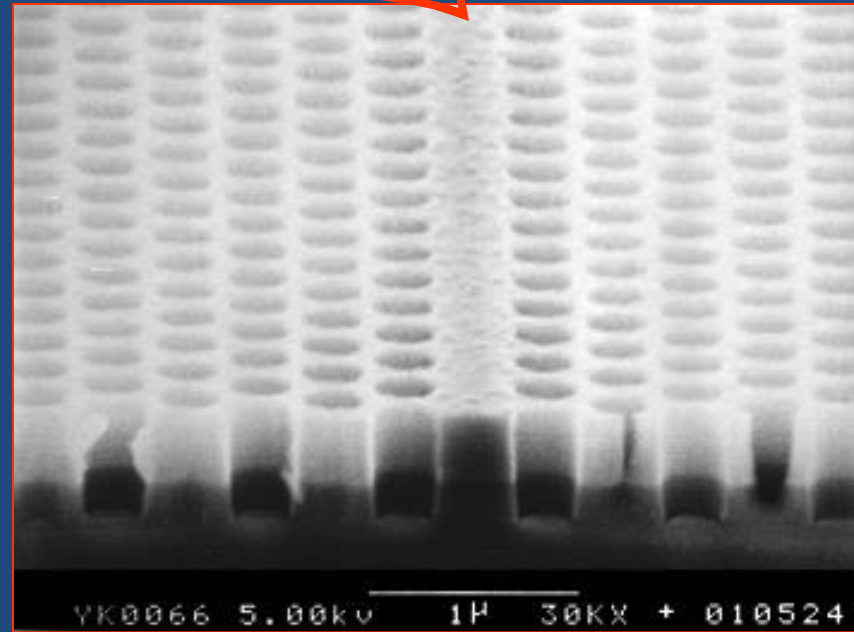
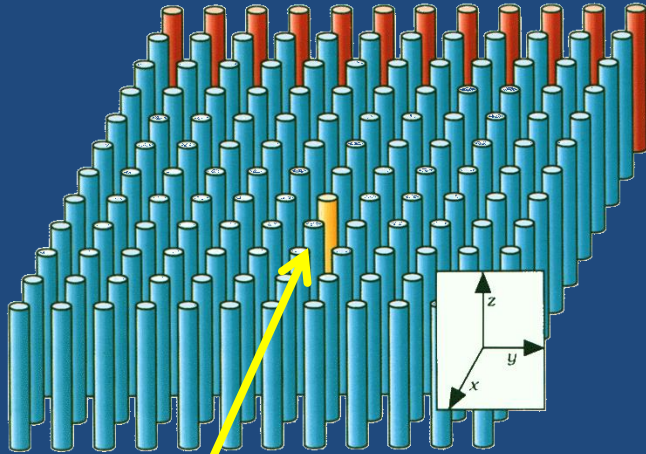


1 micron silica spheres

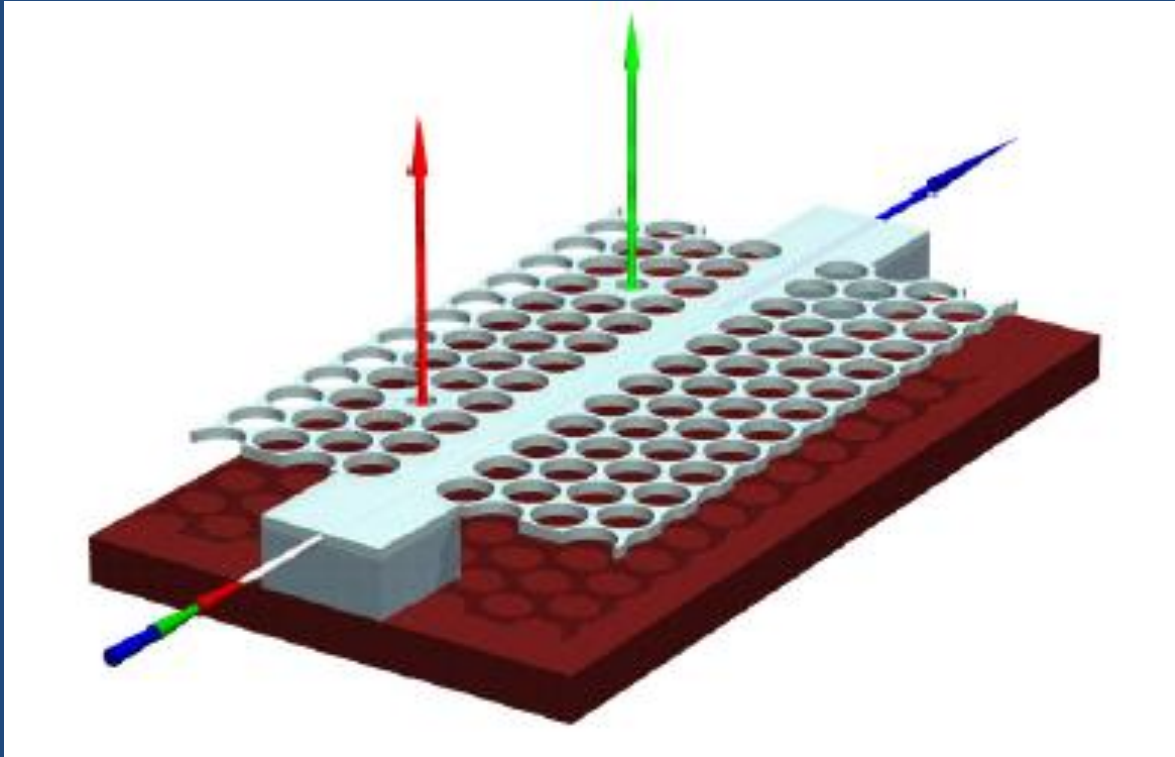
50.0um



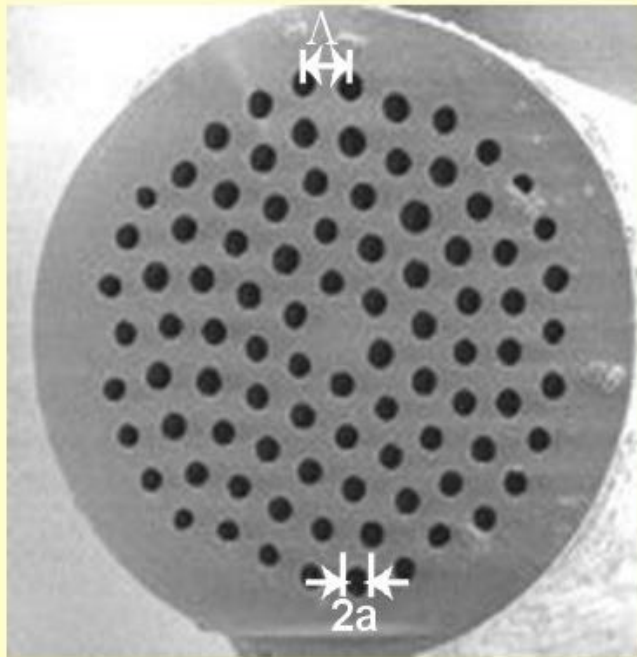
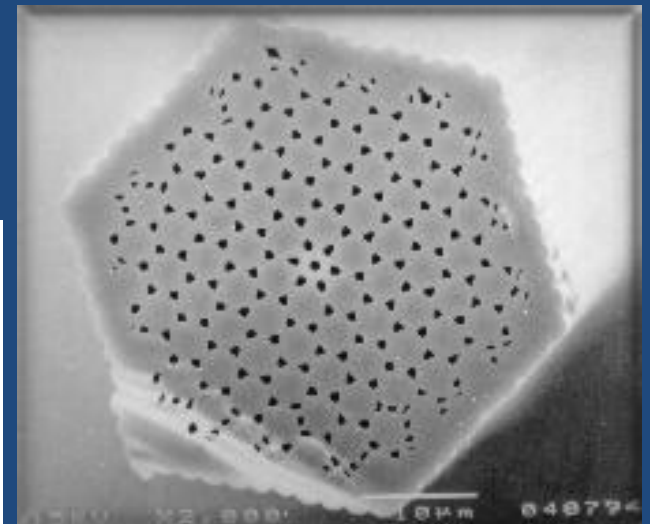
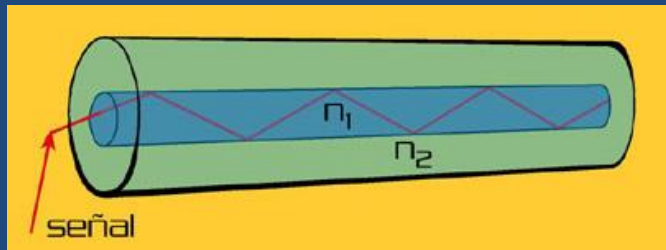
# Confinamiento y guiado



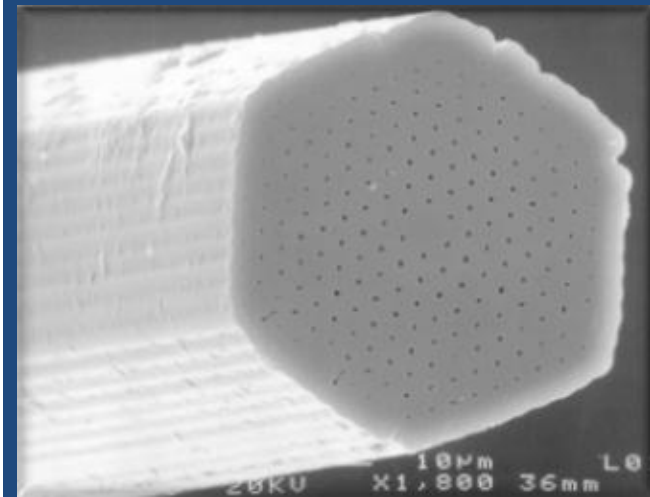
**Guiado:** eligiendo adecuadamente los parámetros de la estructura (tamaños, distribución, material) puede diseñarse un filtro que sólo guíe la luz de cierta frecuencia (azul), mientras que todas las demás se dispersan en todas direcciones



# Fibras ópticas de cristal fotónico



Crystal Fibre



From Crystal Fibre web page: <http://www.crystal-fibre.com>

# Aplicaciones en telecomunicaciones

Microelectrónica



Miniaturización de los microchips



Chips comunicados por cables de cobre



Alta disipación de energía



Límite en la velocidad de transporte de la información

- Telecomunicaciones fotónicas
- Computación óptica



La luz como portador de información



Comunicación a través de conductos fotónicos



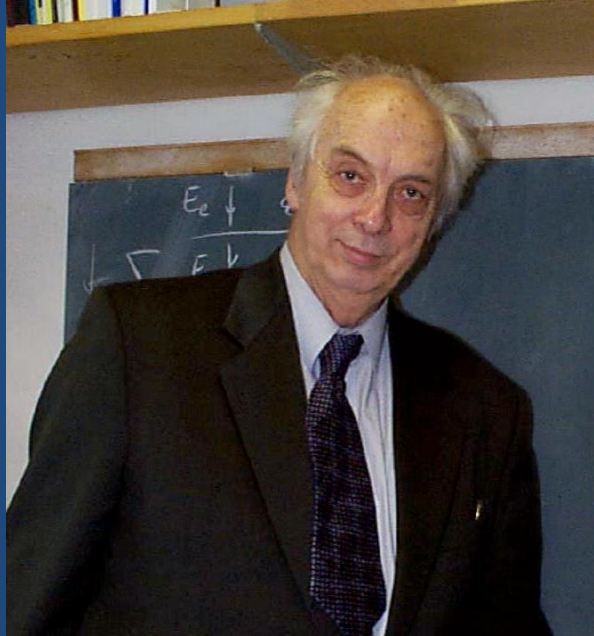
Se evita la disipación



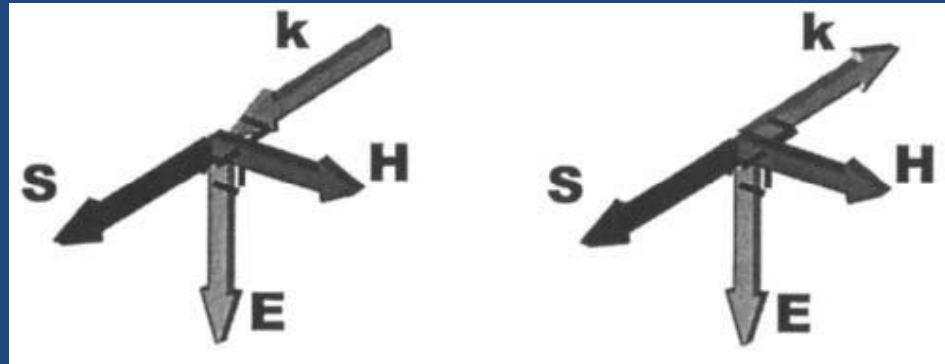
Aumenta la velocidad de transporte de la información

# Metamateriales: comienzos...

Victor Veselago, 1968



- Exploró **teóricamente** la posibilidad de tener materiales con **índice de refracción negativo**.
- Demostró que estos materiales **NO violan ninguna ley fundamental de la física**.
- Estos materiales fueron llamados "left-handed" (LHM), y luego se mostró que algunas de las propiedades electromagnéticas más fundamentales de estos materiales serían opuestas a las de los materiales convencionales o "right-handed" (RHM).

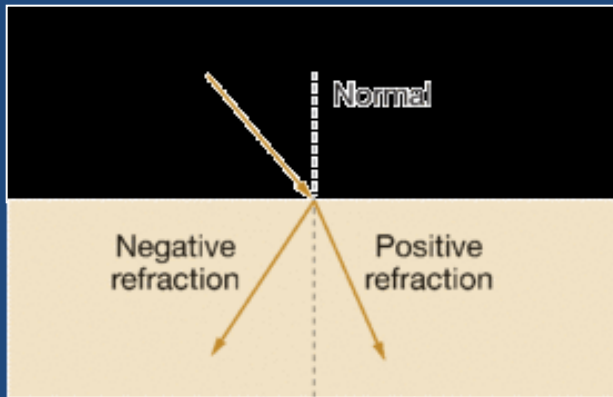


RHM

LHM

Los materiales isótropos y homogéneos que soportan este tipo de propagación deben tener *índice de refracción negativo*, definido como la rama negativa de la raíz en la definición:  $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$

# Refracción negativa



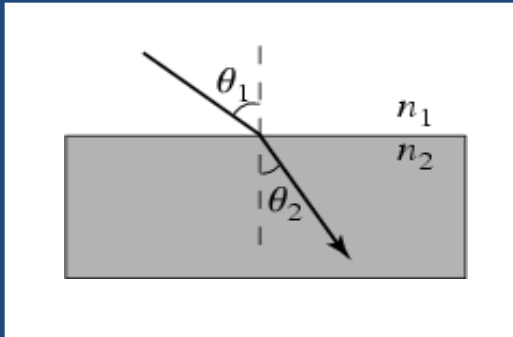
- La dirección del haz transmitido depende del índice de refracción de ambos materiales.
- Ley de Snel (componentes paralelas a la interfaz de los vectores de onda incidente y transmitido iguales) :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

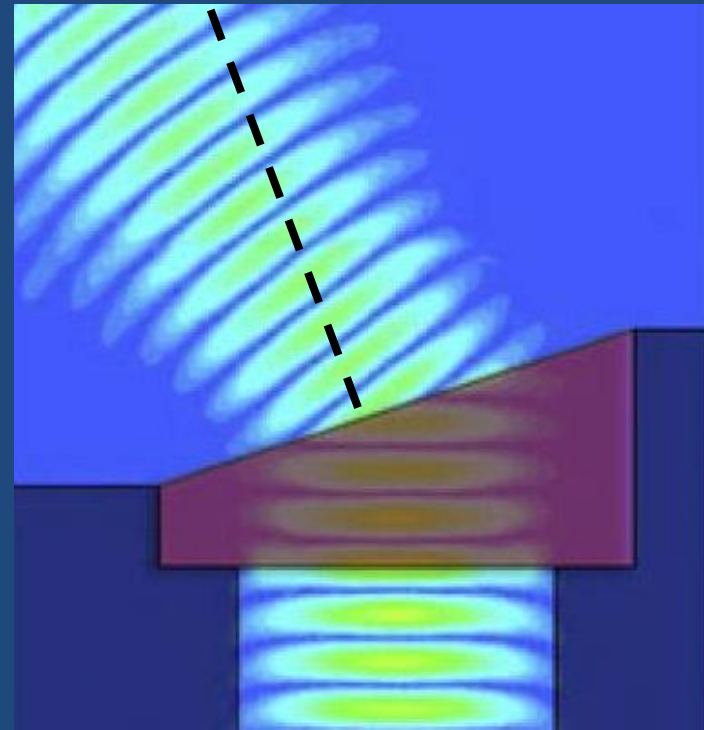
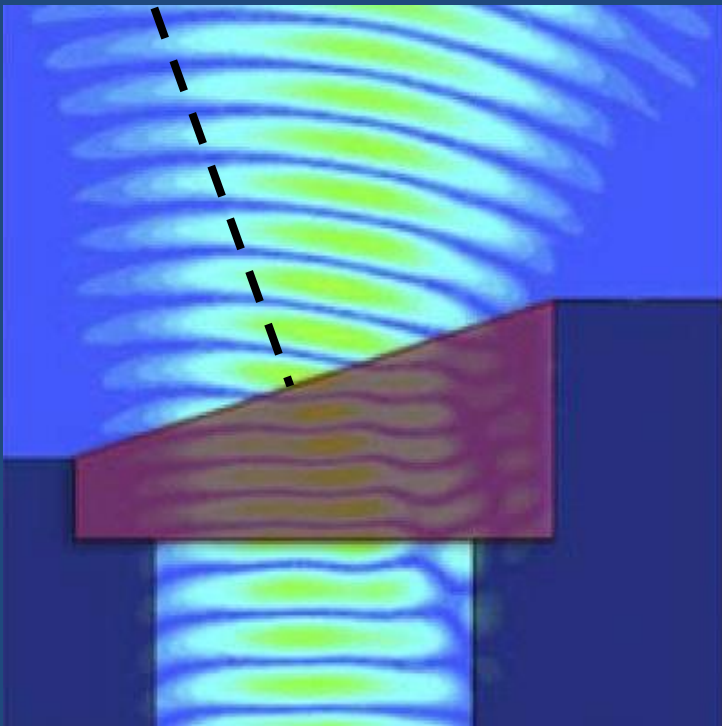
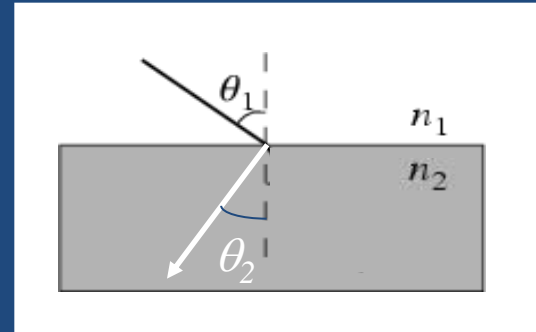
- En el caso de un **material natural**, al incidir desde el aire el haz refractado se dobla hacia la normal, pero nunca emerge del mismo lado de la normal que el haz incidente, ya que en general  $n > 1$ .
- Un haz incidente sobre un **metamaterial** desde un material convencional, se refracta hacia el mismo lado de la normal que el haz incidente.

# Un inocente cambio de signo produce un comportamiento inesperado

## Refracción positiva

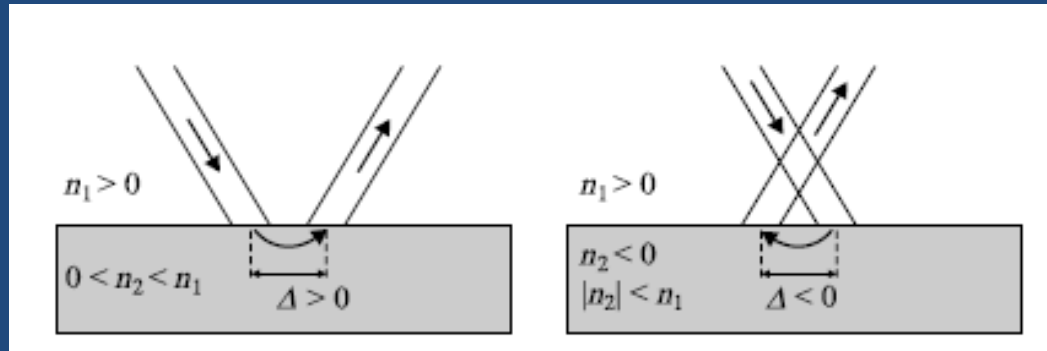


## Refracción negativa



# Otros efectos en LHM

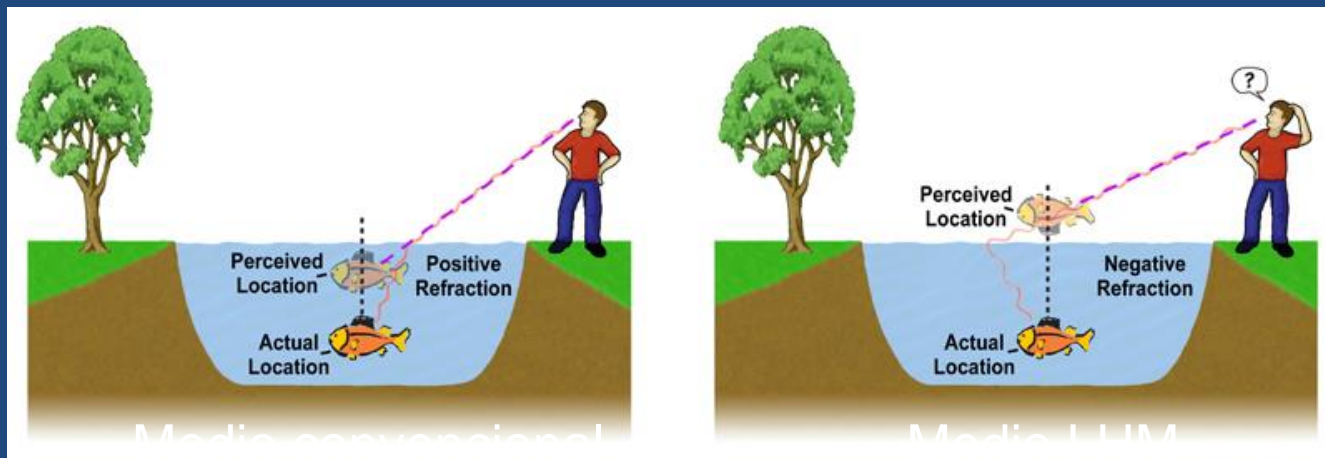
- Efecto Goos-Hanchen invertido:



Medio convencional

Medio LHM

- Formación de imágenes:

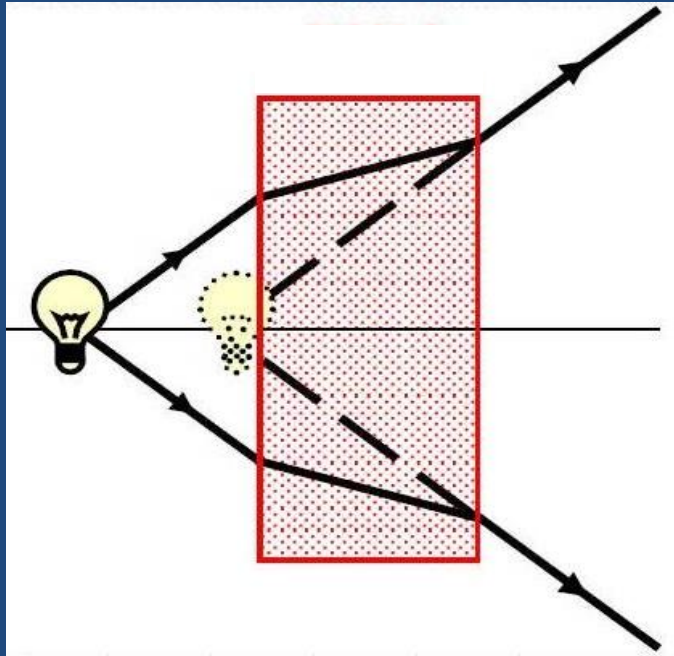


Medio convencional

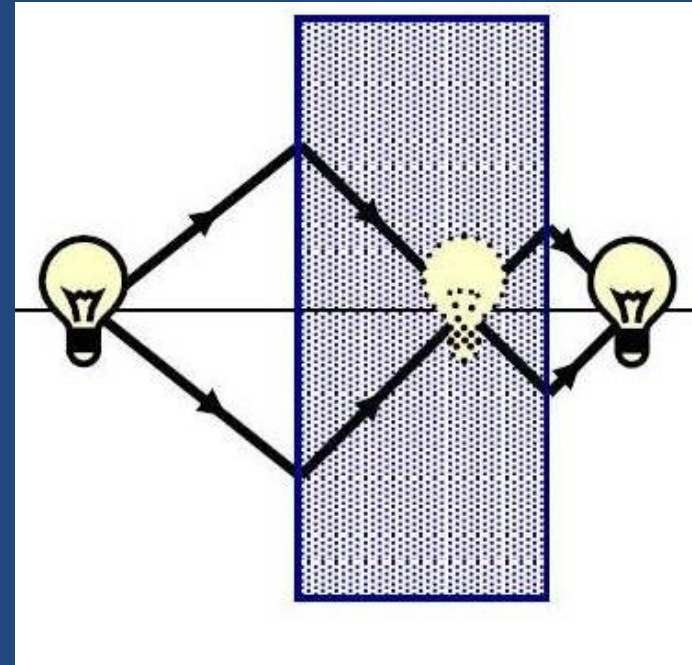
Medio LHM



# Refracción positiva



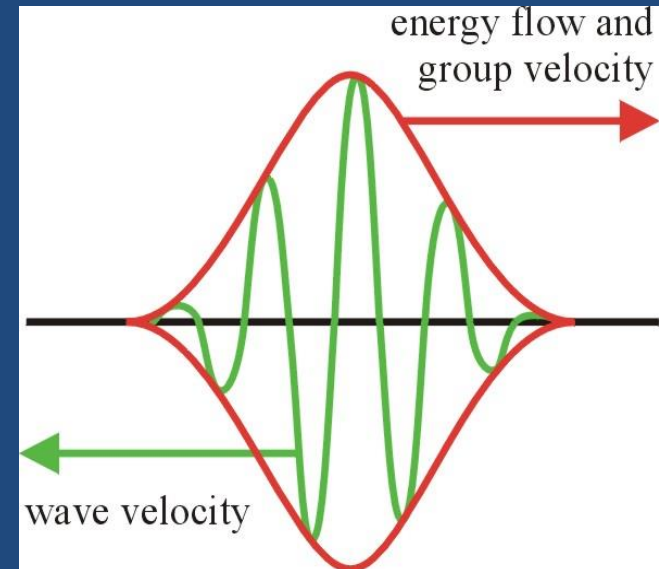
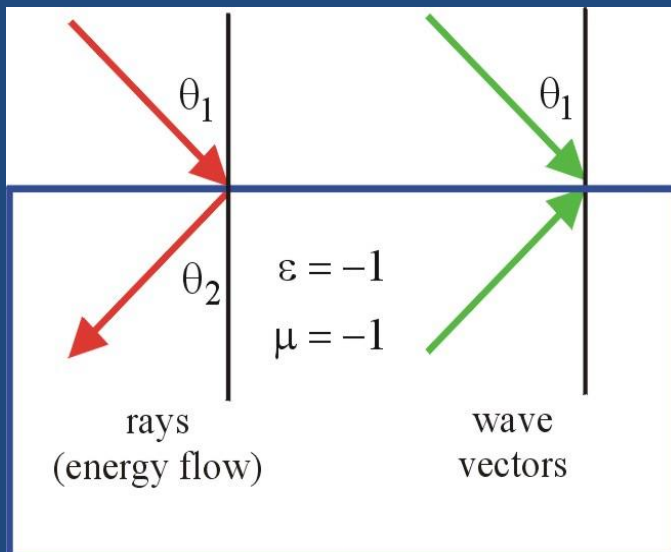
# Refracción negativa



Lente plana

# Velocidad de fase y velocidad de grupo

La dirección del vector de Poynting es opuesta a la del vector de onda



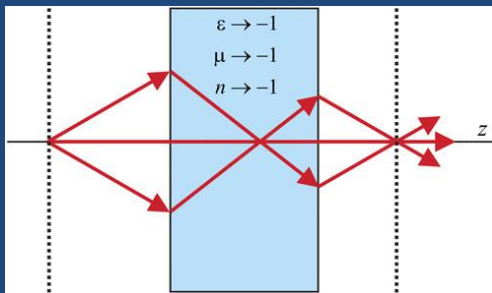
Refracción



Lentes



Formación de imágenes



# La lente perfecta

Pendry, PRL 85, 3966 (2000)  
(32 años después de Veselago)

Propone una realización concreta de un material con estas características:

Microondas



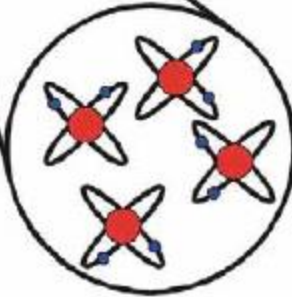
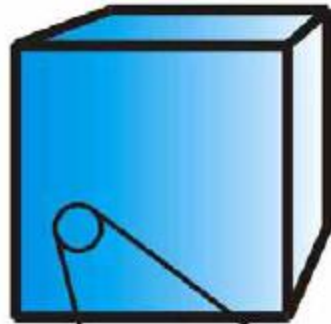
Metamateriales

Trasciende las propiedades de sus componentes

Trasciende las propiedades de los materiales naturales

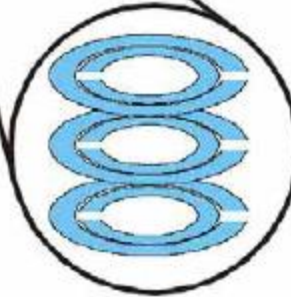
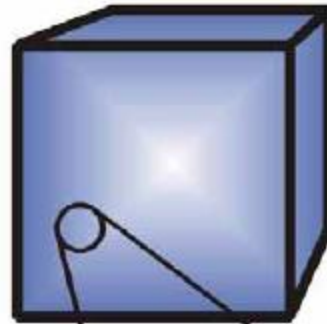
# Parámetros constitutivos efectivos

**Material  
natural**



$\epsilon, \mu$

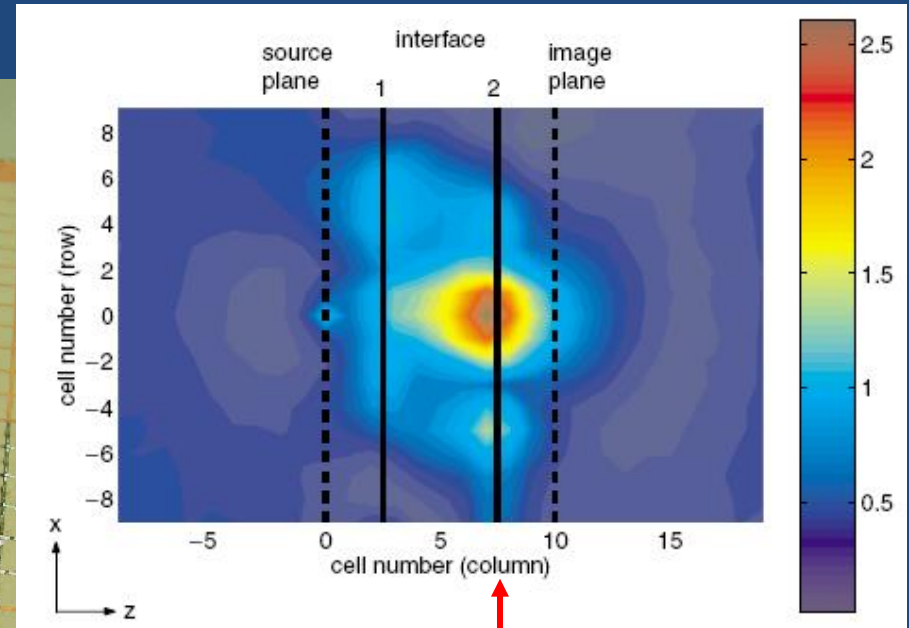
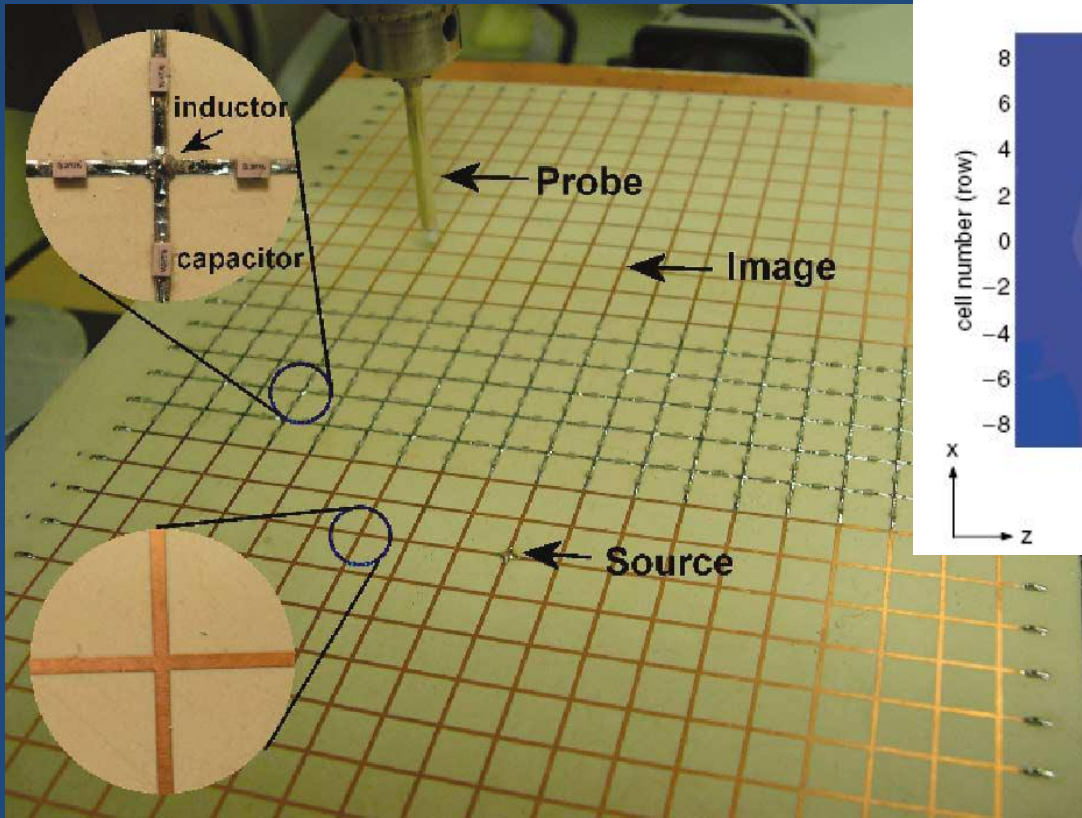
**Metamaterial**



$\epsilon, \mu$

# 1er intento: superlente en microondas

Grbic y Eleftheriades, 2004



Intensificación en la segunda interfaz.

A 1.057 GHz el medio LHM tiene índice de refracción  $-1$ .  
Se obtiene una resolución de  $1/5$  de la long. de onda

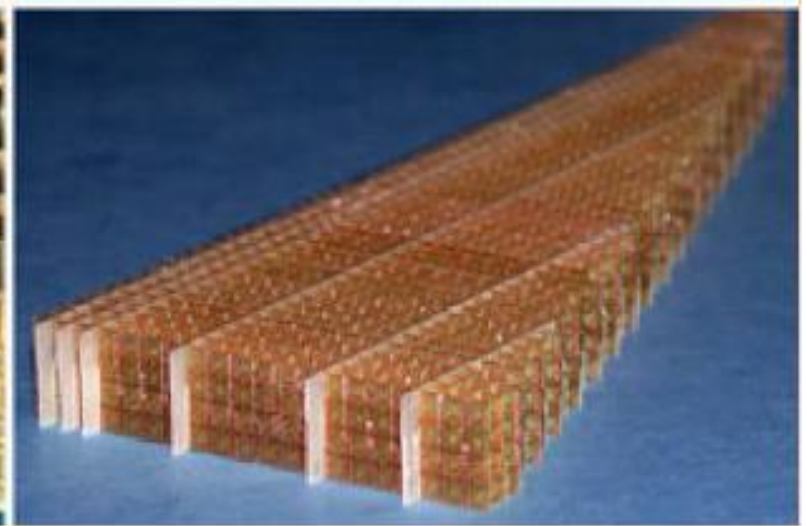
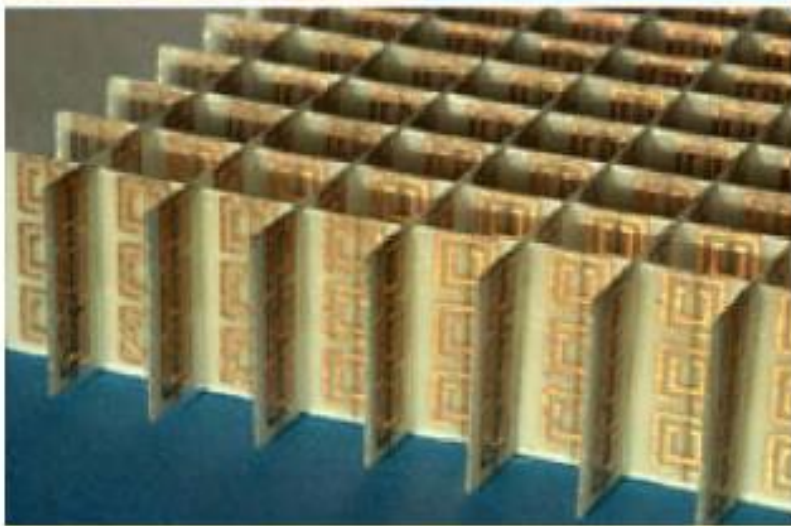
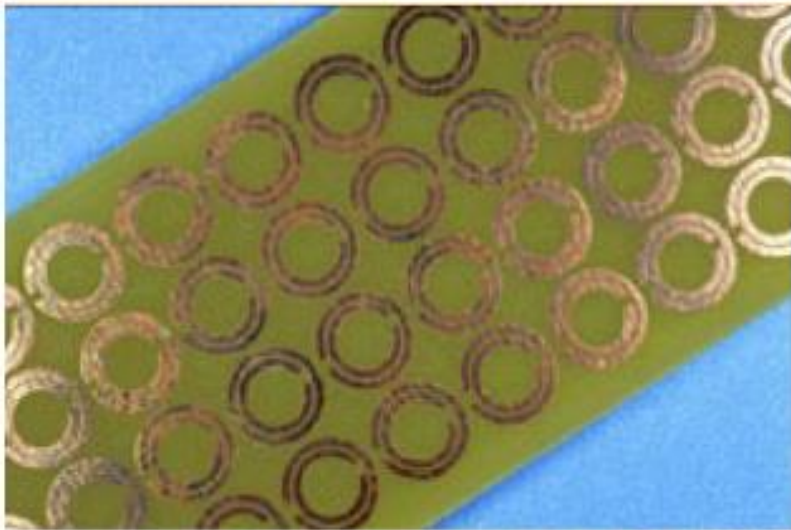
# ¿Cómo lograr un índice negativo?



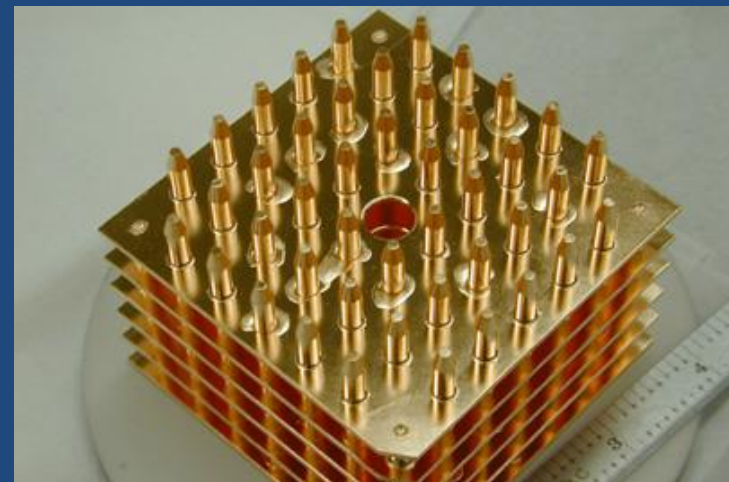
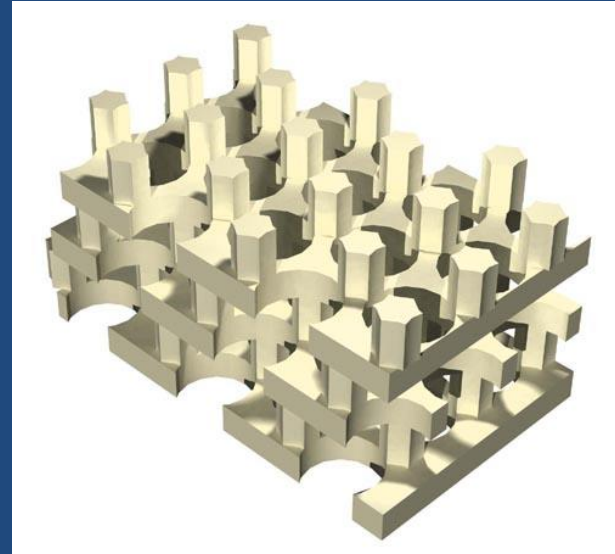
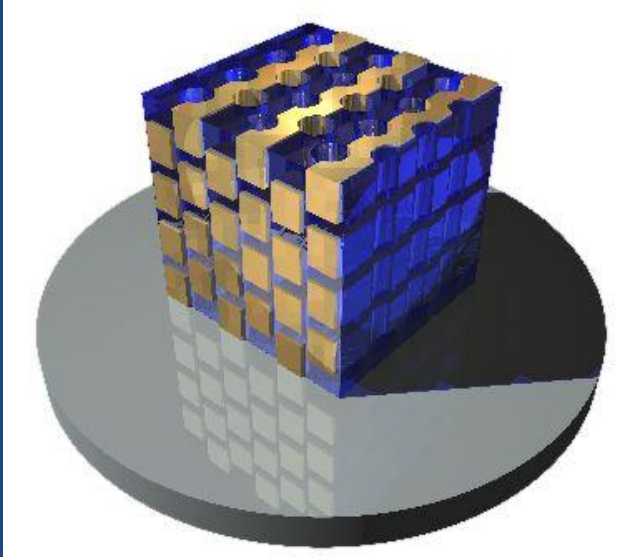
Ajustando los parámetros del diseño es posible fabricar una estructura que presente  $\epsilon$  y  $\mu$  negativos, al menos para una única frecuencia.

- Medio discreto compuesto por una combinación de celdas unitarias de tamaño pequeño comparado con la longitud de onda.
- Los parámetros constitutivos de dicho medio provienen de las propiedades de cada celda individual, a través de algún método de homogenización.
- Metamaterial  $\neq$  Cristal fotónico (sus propiedades residen en la periodicidad).
- Procedimiento estándar para diseño:
  - sistema de alambres ( $\epsilon < 0$ ) (en microondas)
  - sistema de SRRs ( $\mu < 0$ )
- Y en el rango óptico?
  - achicamiento de las celdas unitarias
  - cambio de las propiedades de los materiales

# Juntando todo: $\epsilon$ y $\mu$ negativos



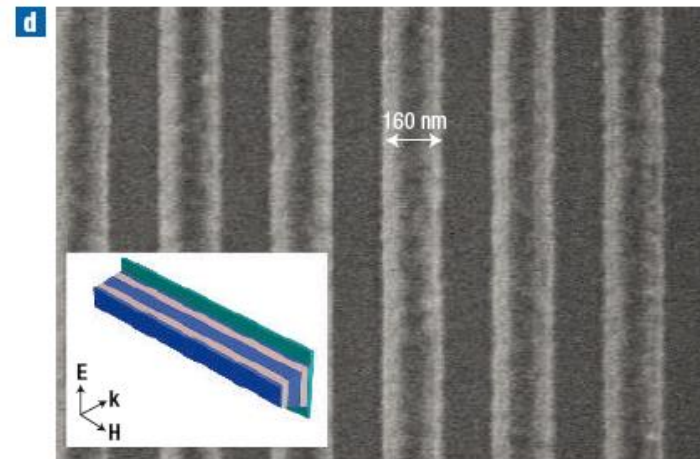
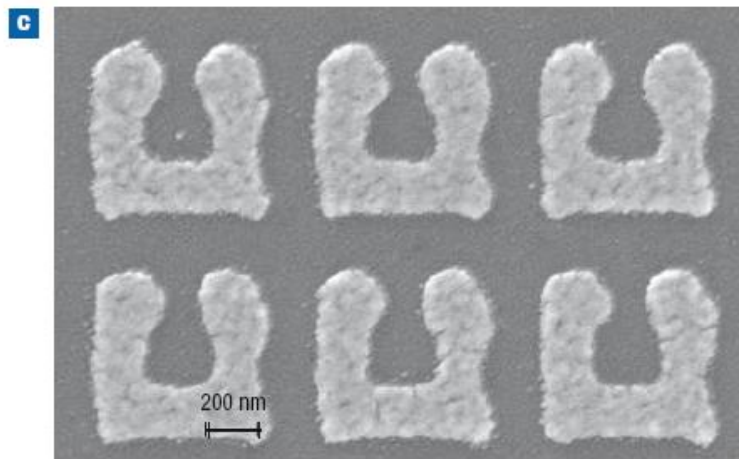
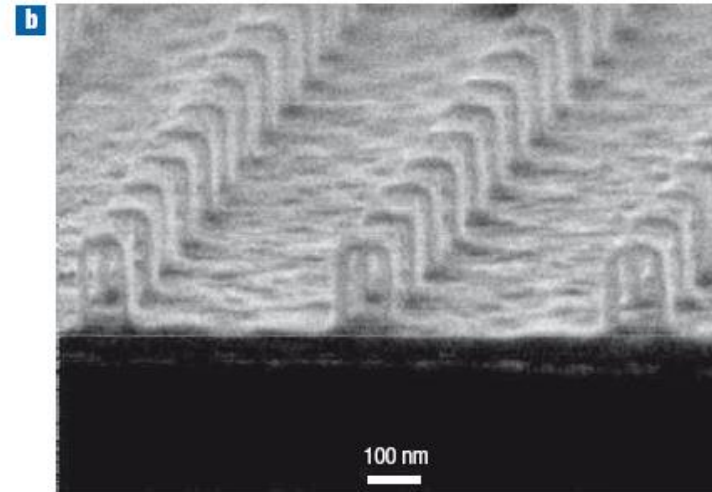
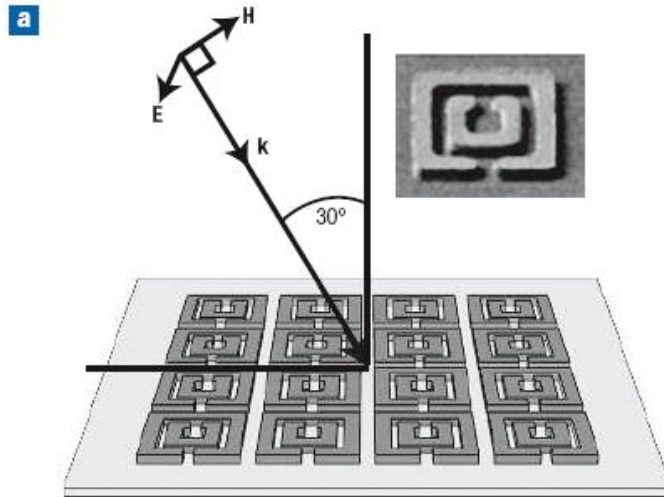
# Ejemplos de estructuras 3D: Metamateriales





# Aumentando la frecuencia de trabajo...

1 THz Metamateriales con  $\mu < 0$  60 THz



85 THz

$\lambda = 725 \text{ nm}$

# Algunos inconvenientes...

- Los metamateriales fabricados combinando alambres y SRRs tienen grandes pérdidas
- Se dificulta la “escalabilidad” hacia el rango óptico
- Son anisótropos:  $\epsilon$  y  $\mu$  son tensores, y la propagación depende fuertemente de la dirección y del estado de polarización

## Además, en el rango óptico...

- La respuesta electromagnética de los metales es muy diferente que a frecuencias bajas.
- $\epsilon$  del metal (inclusiones) puede ser comparable al del material en el que están las inclusiones.
- Aparece la posibilidad de excitar plasmones superficiales, lo cual abre una nueva manera de obtener valores negativos de  $\epsilon$  y  $\mu$ .

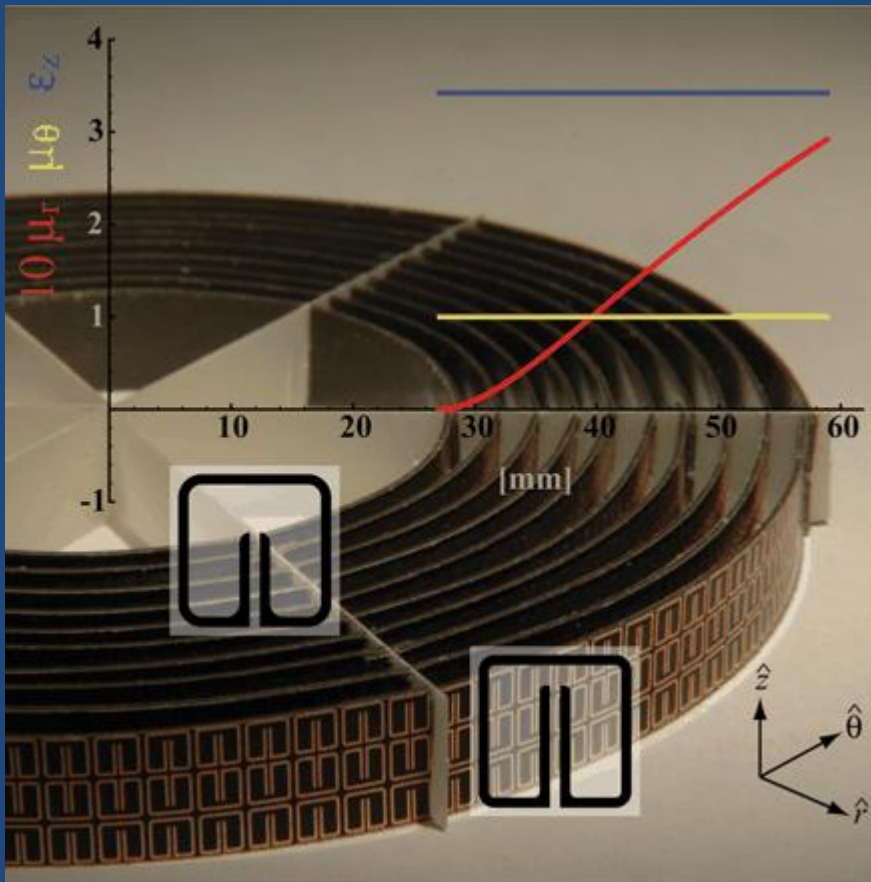
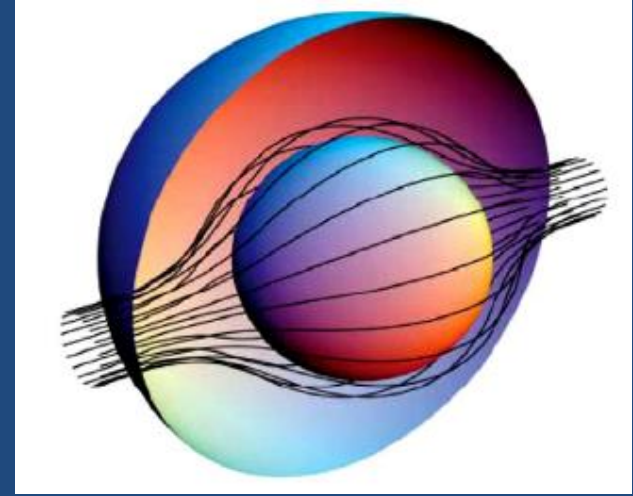
# Invisibilidad



# Invisibilidad

## Primera demostración experimental de invisibilidad 2D

Schurig, Smith, 2006

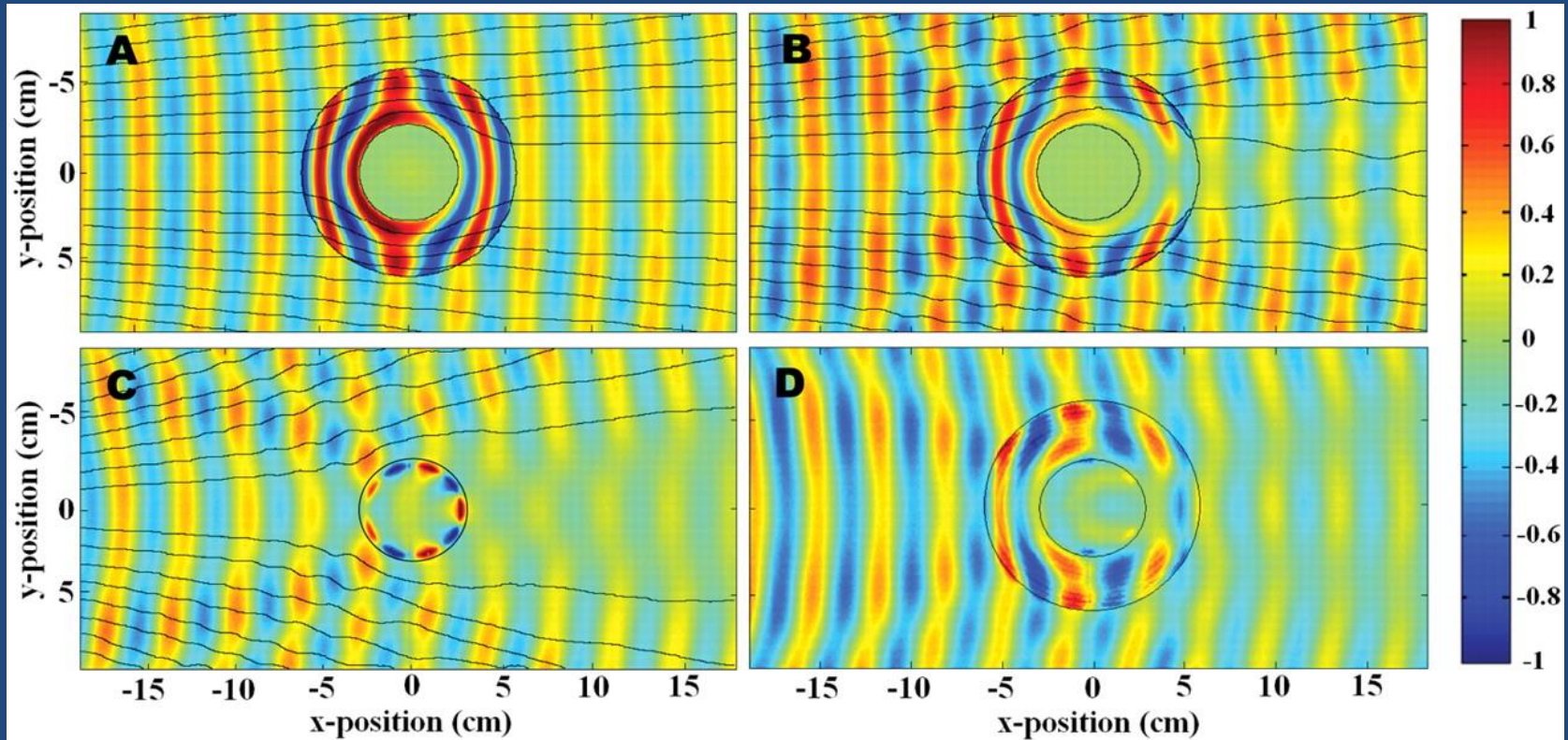


- Se desea recubrir al objeto con un manto tal que produzca que el campo electromagnético lo rodee tangencialmente, sin reflejarse ni alterarse por la presencia del objeto.
- **Transformación de coordenadas: hallar el  $\epsilon$  y el  $\mu$  que producen dicho efecto.**
- Los medios que resultan de una transformación de coordenadas son anisótropos.
- Los elementos de cada anillo son diferentes, y esto provee el  $\epsilon$  y el  $\mu$  necesarios para el efecto de invisibilidad

# Invisibilidad

Simulaciones numéricas

(videos)



Resultados experimentales

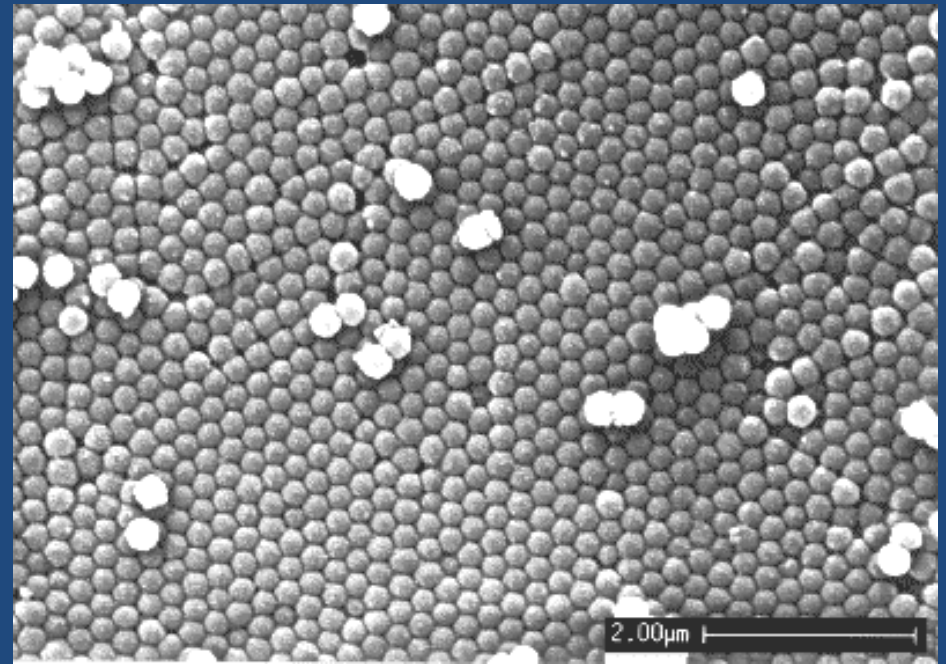
# ¿Qué falta?

- Desarrollar Metamateriales que operen a longitudes de onda más cortas
- Perfeccionar los métodos de construcción a escala industrial en el rango de microondas (ya salió el primer teléfono celular que incluye una antena de Metamaterial que permite reducir la interferencia de ondas de radio y el tamaño del teléfono!)
- Disminuir las pérdidas de los metamateriales
- Ampliar el ancho de banda de funcionamiento
- Desarrollar nuevas aplicaciones que aprovechen las ventajas de estos materiales
- Desarrollar métodos numéricos para el estudio de estos materiales complejos, y para el diseño de los mismos con fines específicos.



# Ejemplos de la Naturaleza

## Opalos



## Gema

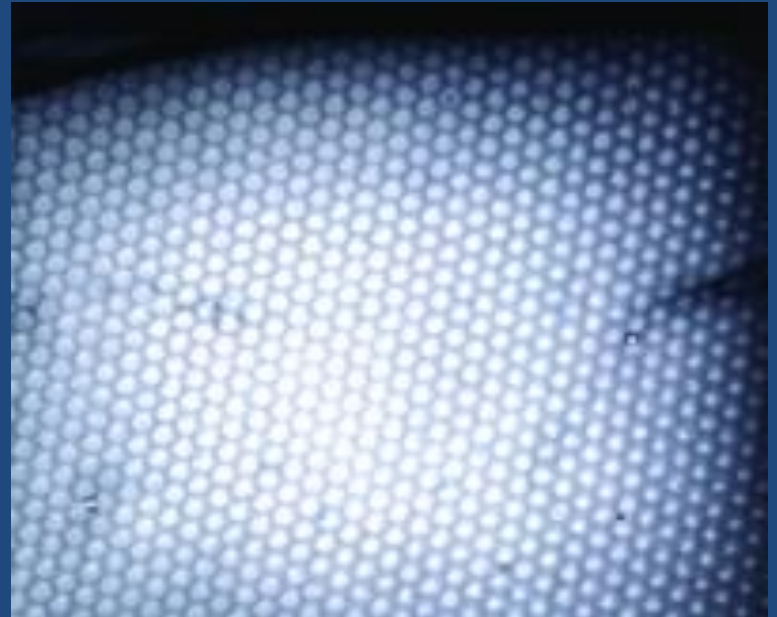
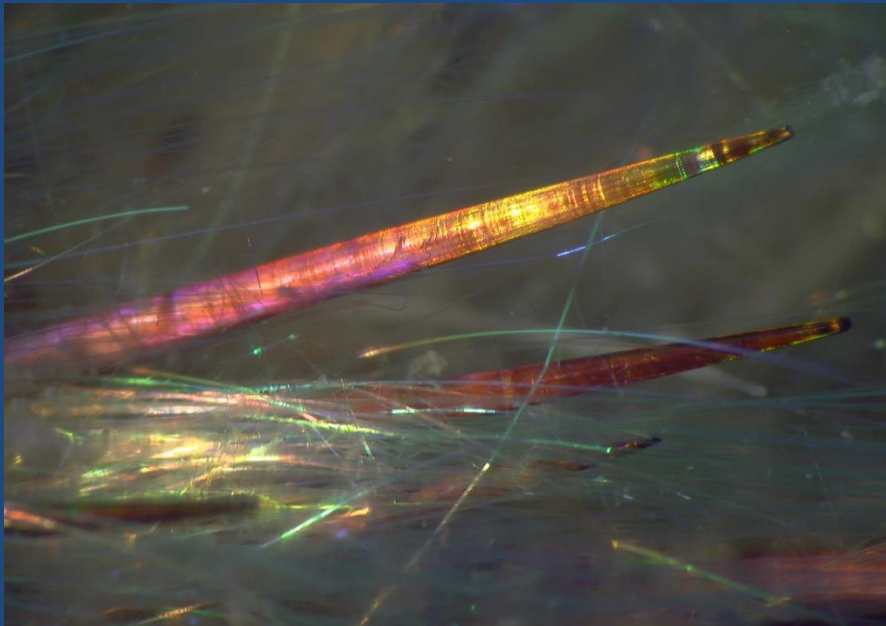
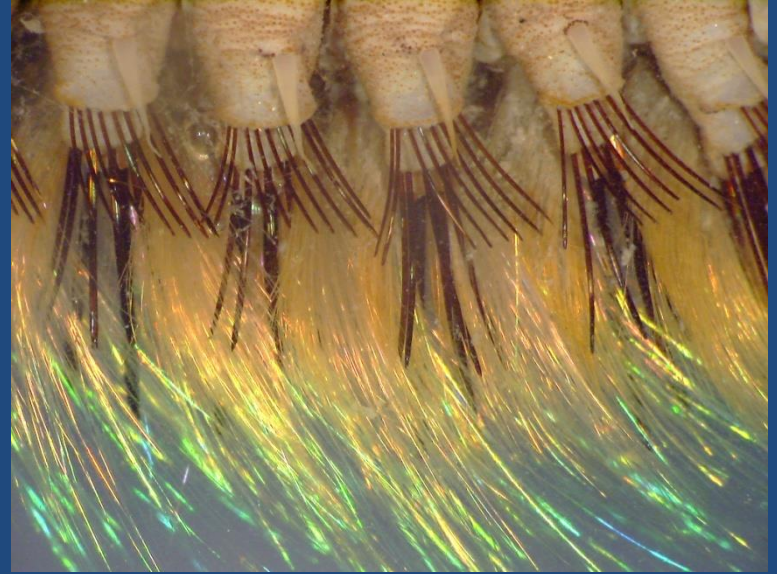
## Ejemplos de la Naturaleza

Gusanos Polychaete: Ratón de mar





# Ratón de mar

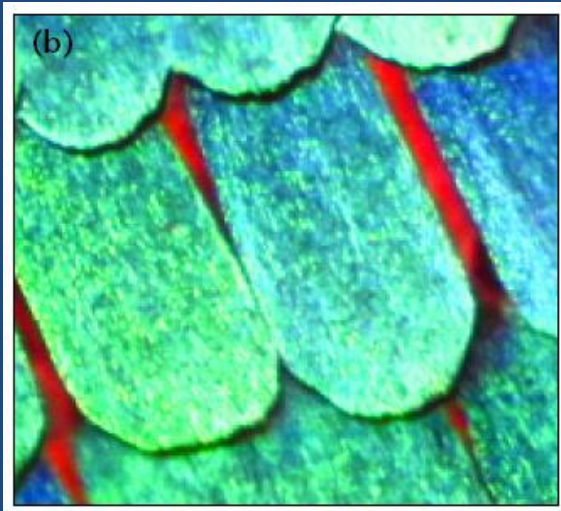


## Ejemplos de la Naturaleza

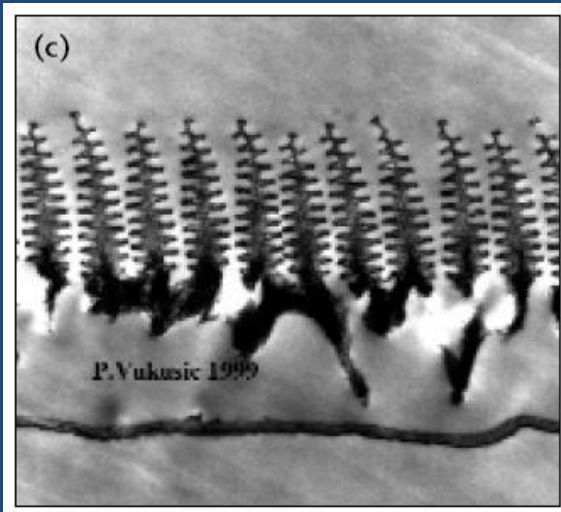
Mariposa Morpho rethenor



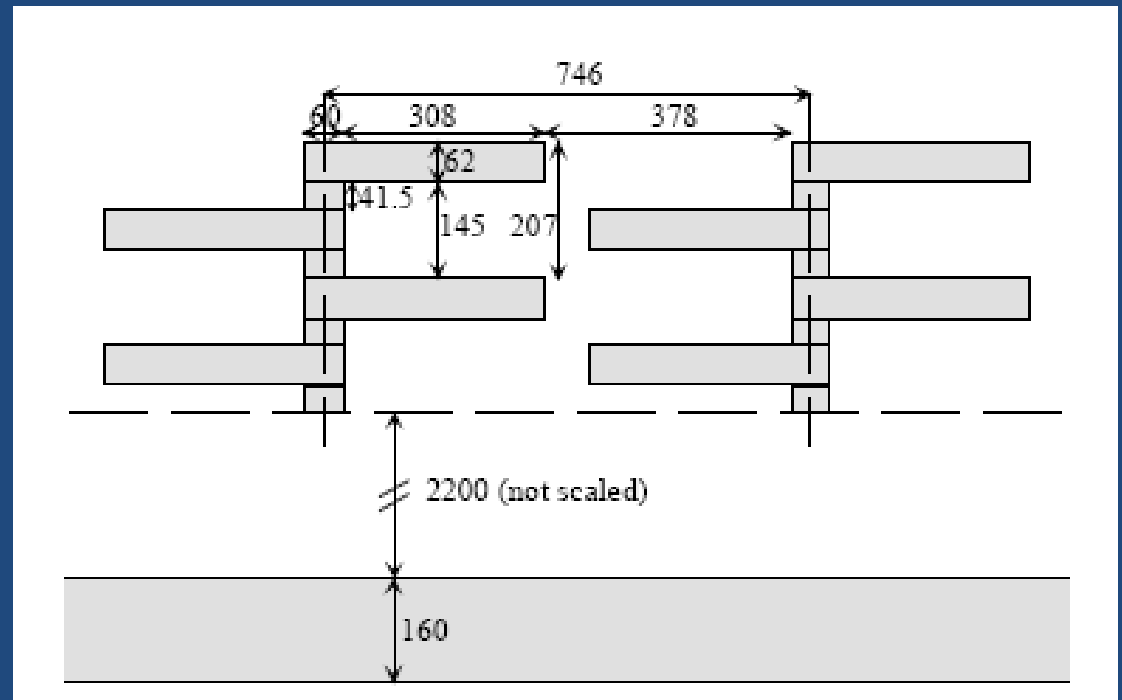
# Ejemplos de la Naturaleza: Mariposa Morpho rhetenor



Escama de  $200\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$



Corte transversal de la escama



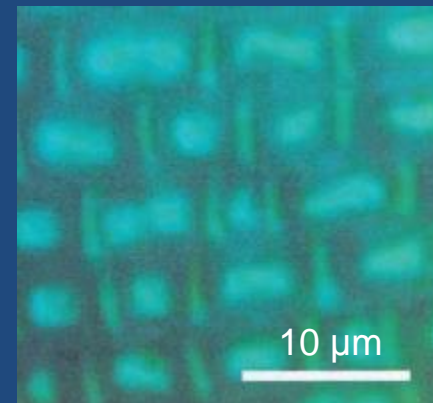
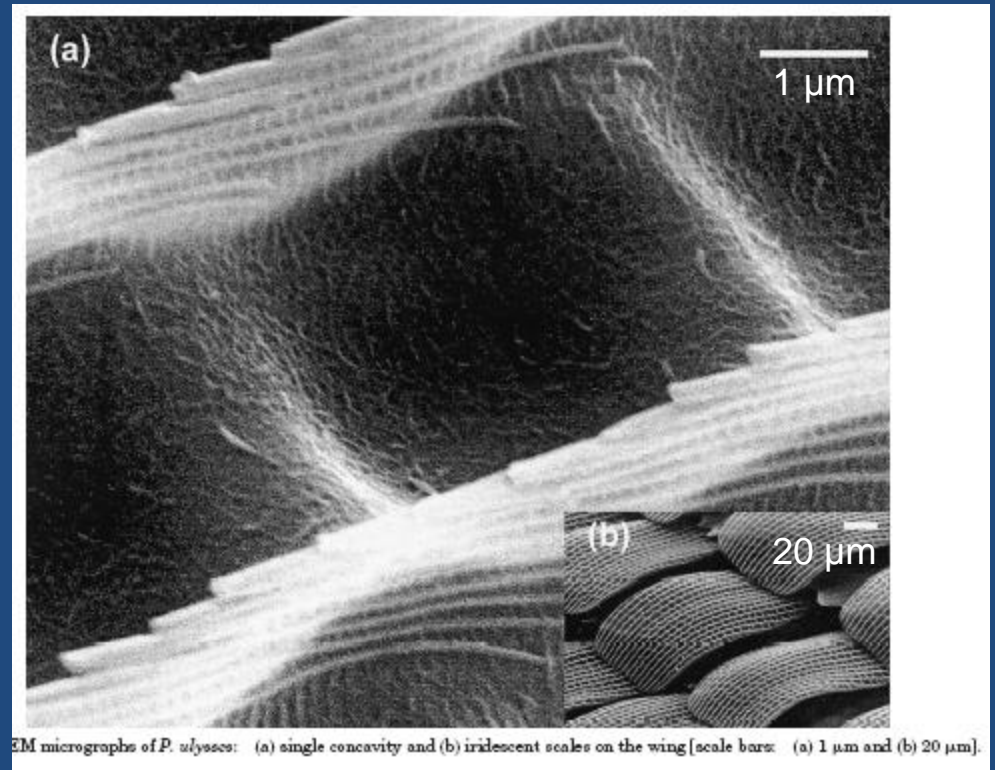
Estructura modelada

# Ejemplos de la Naturaleza

## Mariposas: Papilio



*Ulyses*

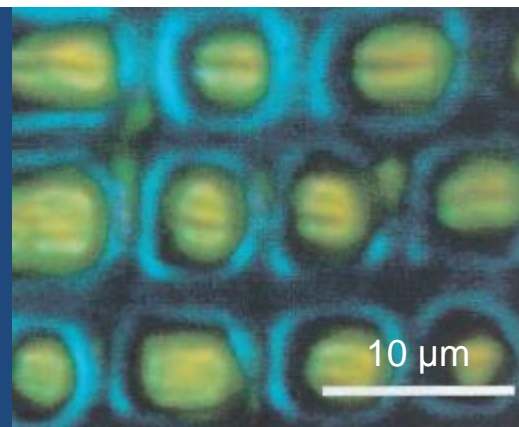
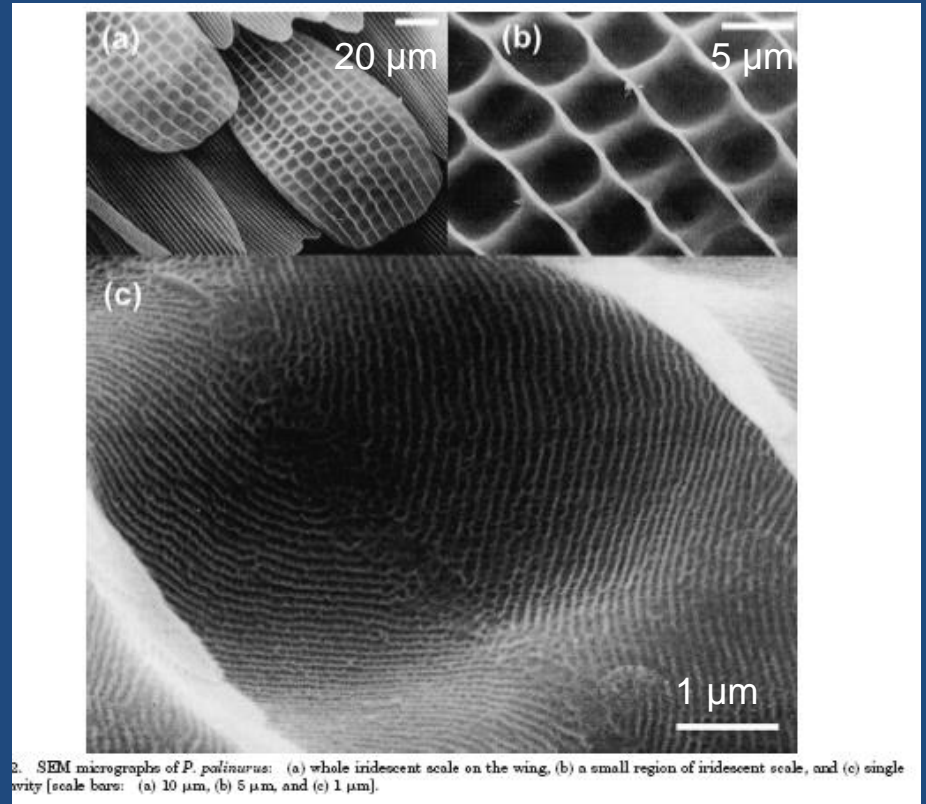


# Ejemplos de la Naturaleza

## Mariposas: Papilio

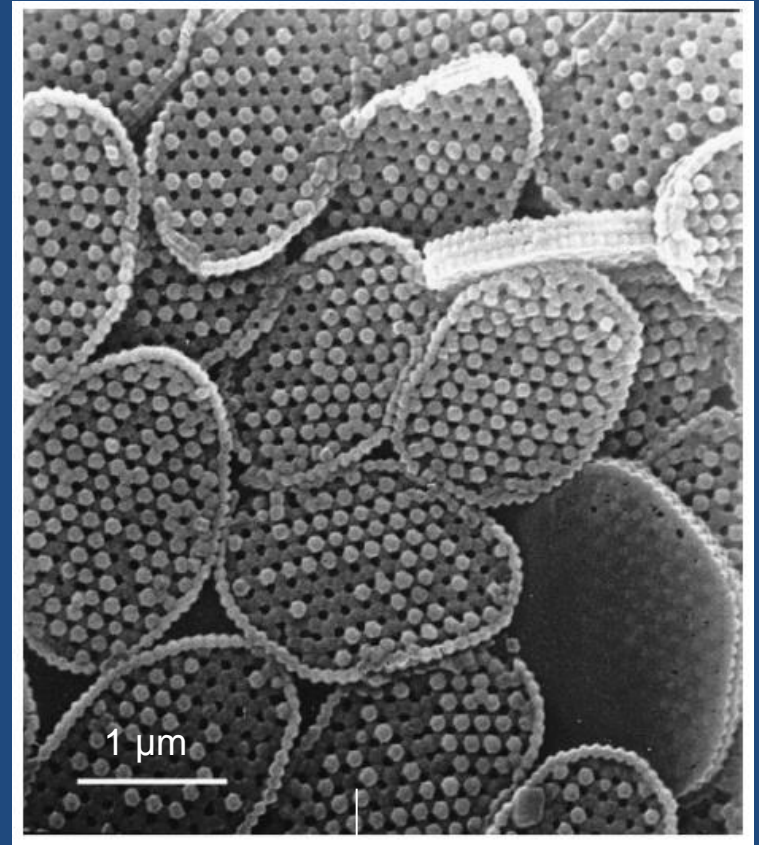


*Palynurus*



# Ejemplos de la Naturaleza

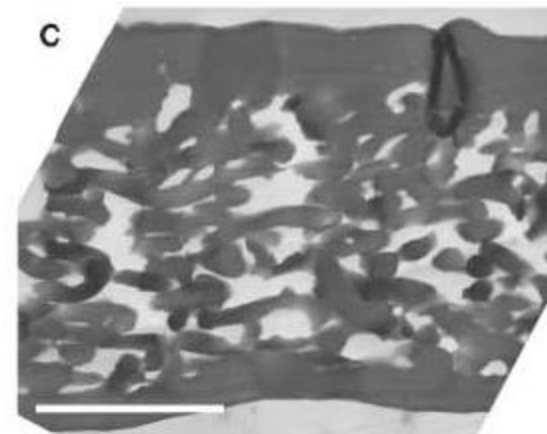
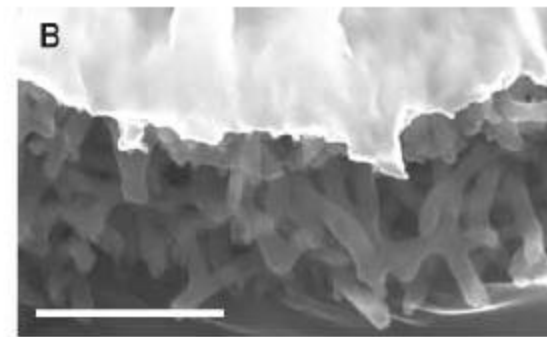
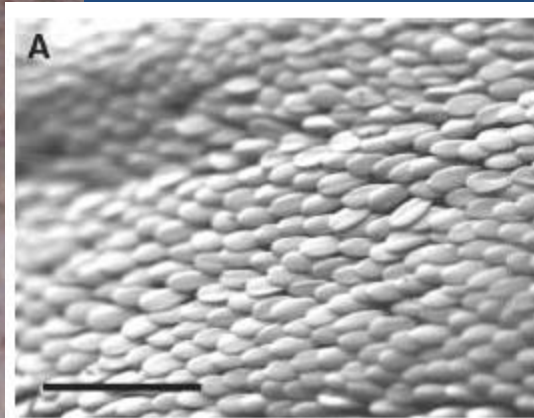
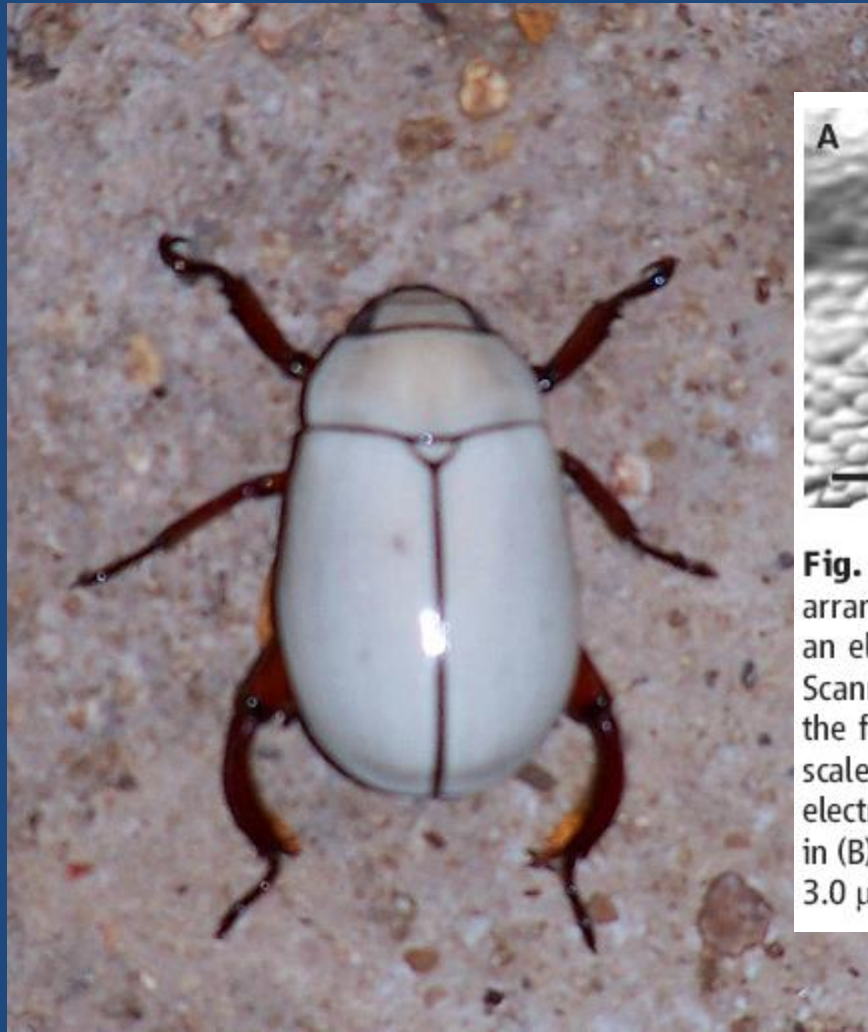
Algas: holococolitos



radio 0.045 μm

# Ejemplos de la Naturaleza

## Insectos: Escarabajo blanco



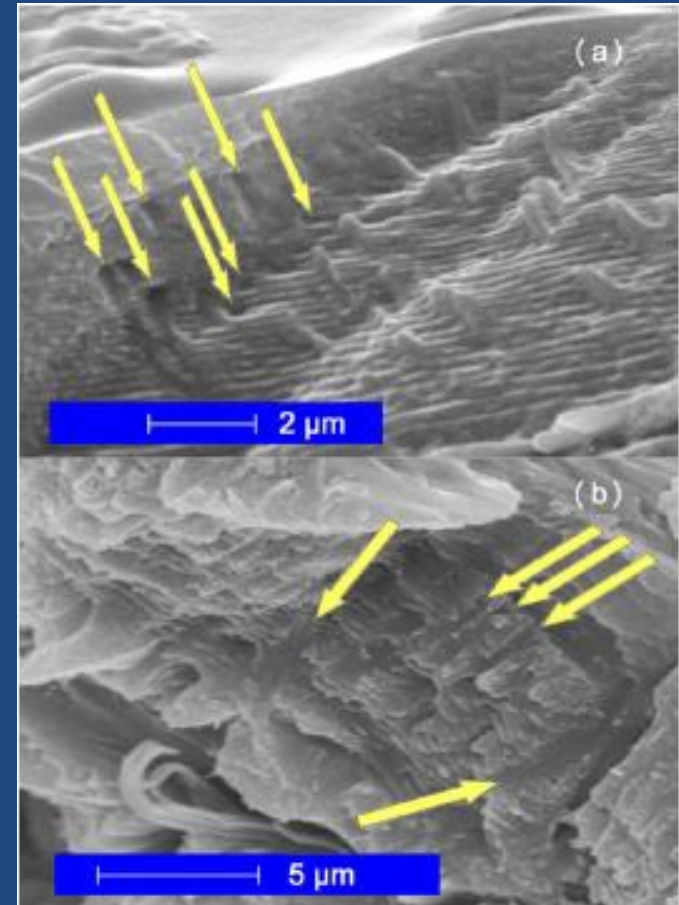
**Fig. 1.** (A) Optical image showing the arrangement of white scales imbricating an elytron of a *Cyphochilus* beetle. (B) Scanning electron micrograph showing the fractured edge of one of the white scales shown in (A). (C) Transmission electron micrograph of the section shown in (B). Scale bars indicate 1.0 mm (A) and 3.0  $\mu\text{m}$  [(B) and (C)].

## Ejemplos de la Naturaleza: *Charidotella egregia*



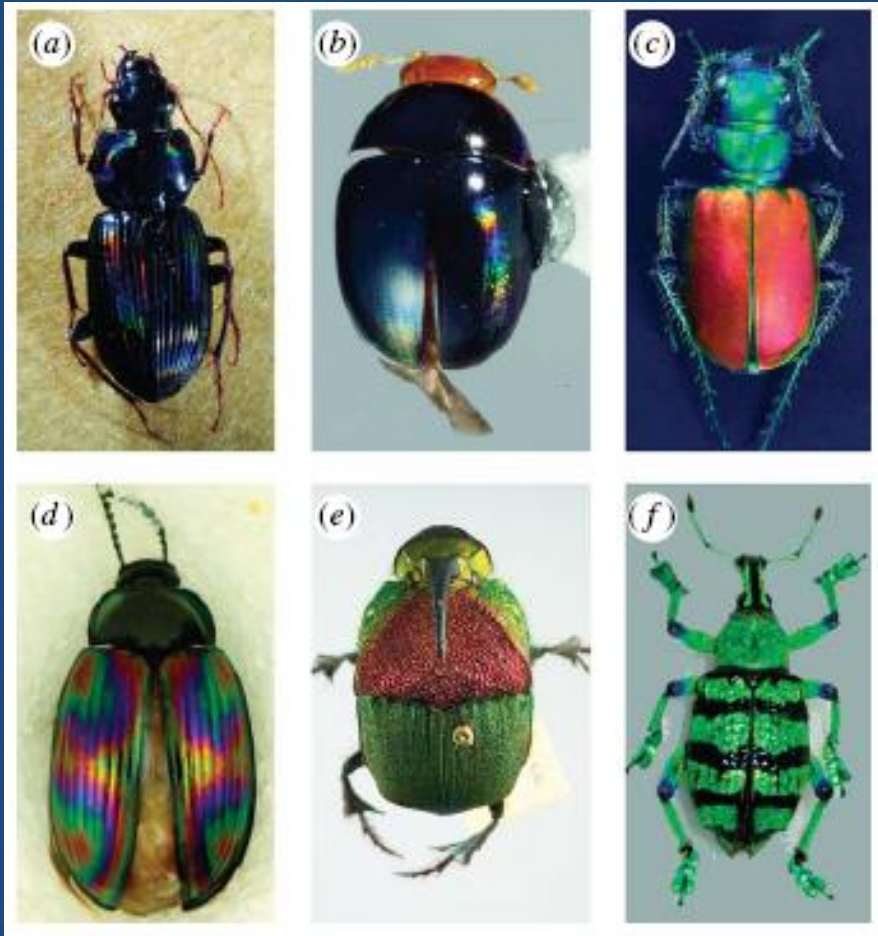


# Ejemplos de la Naturaleza: *Charidotella egregia*



# Color en estructuras naturales

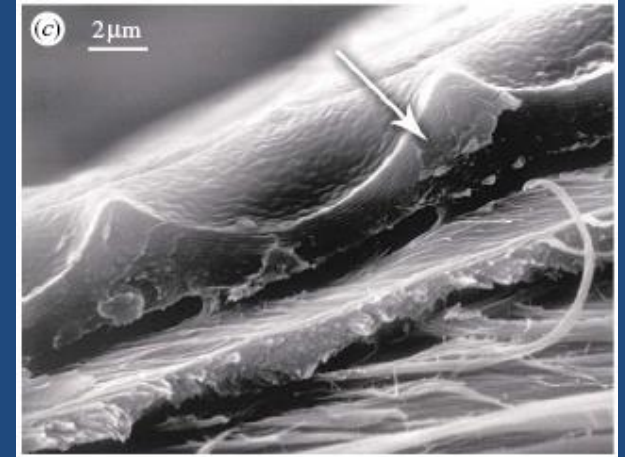
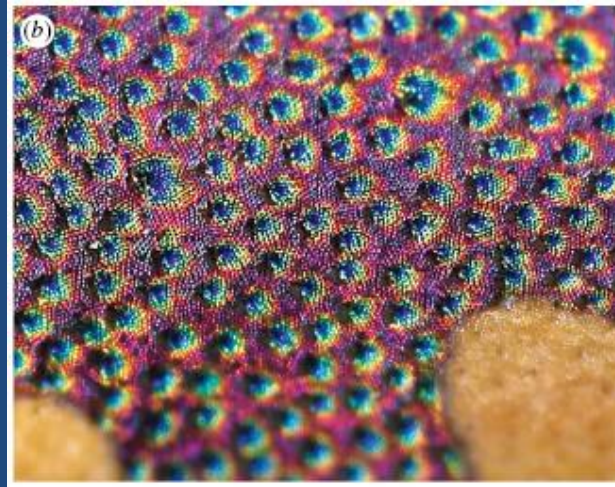
## Escarabajos



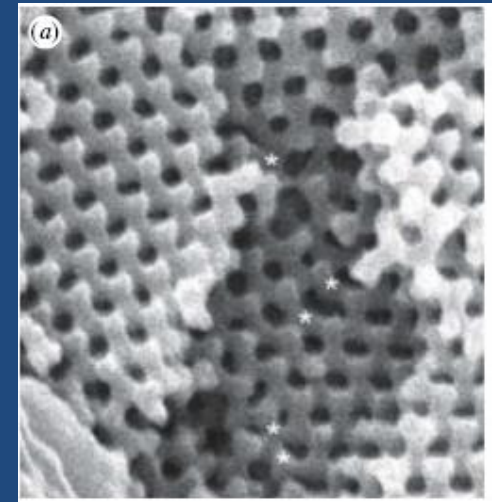
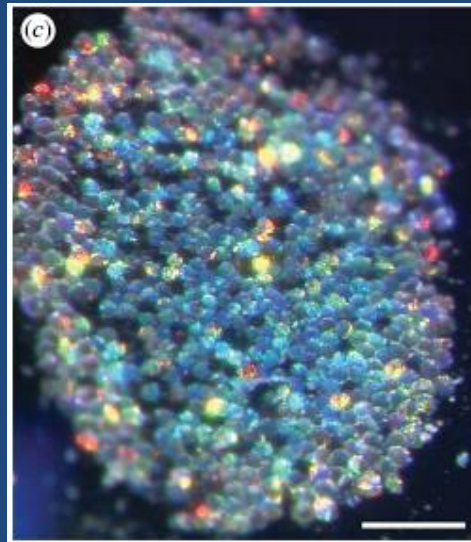
# Color en estructuras naturales



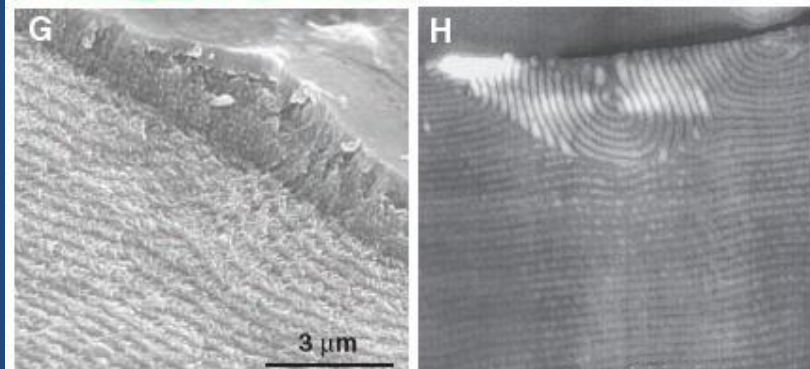
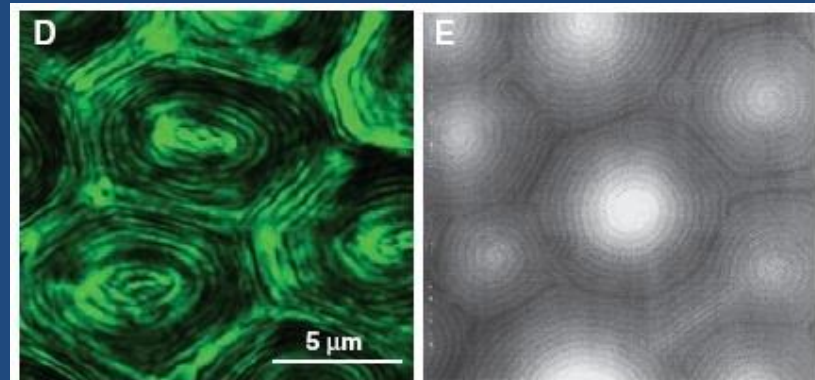
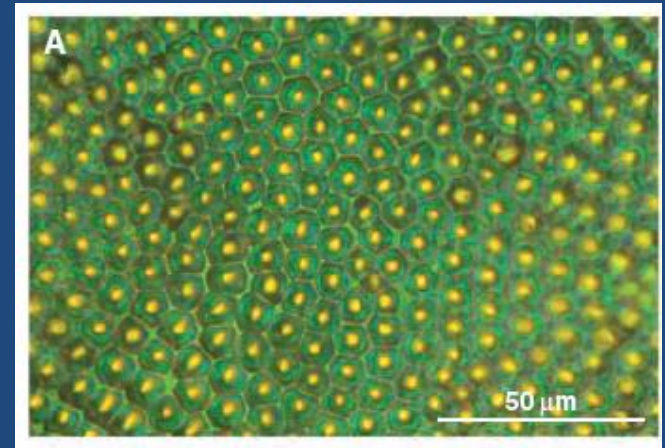
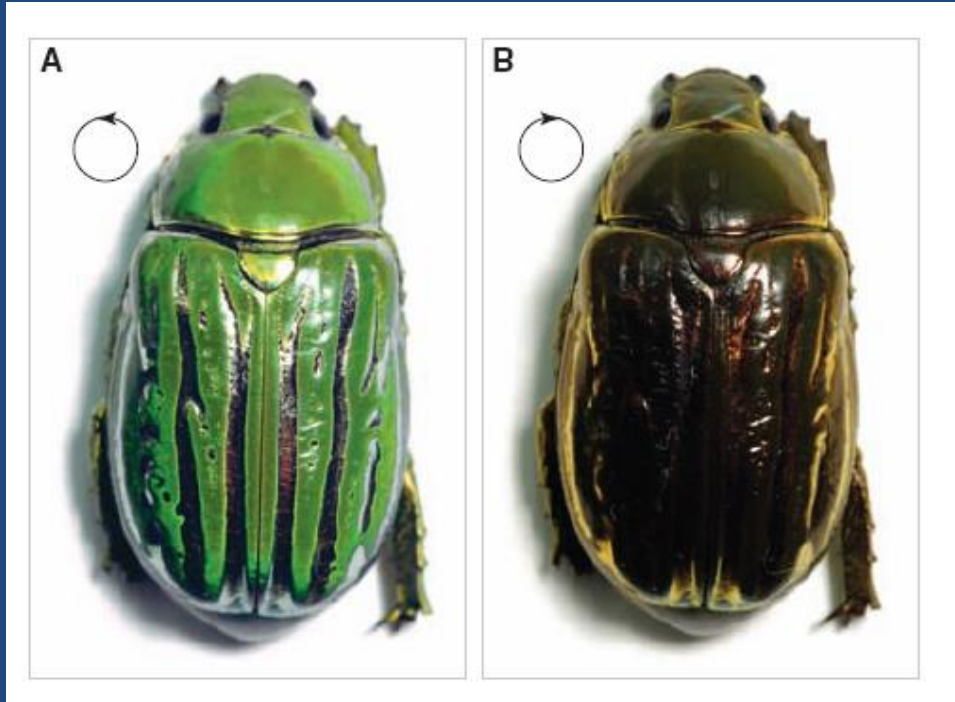
*Cicindela repanda*



*Pachyrrhynchus gemmatus*



# Escarabajos con otros efectos



## Color en estructuras naturales

Tipos de estructura:

- red de difracción
- multicapas
- cristal fotónico
- aleatoria

Propiedades de color:

- iridiscencia
- efecto metalizado

Funciones biológicas:

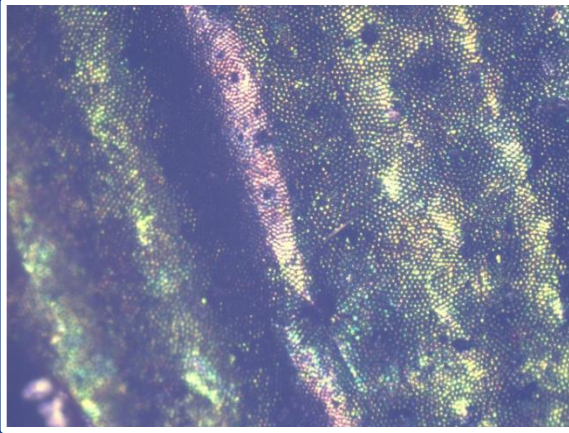
- regulación térmica
- comunicación
- camuflaje
- aumento de la eficiencia de absorción (microlentes)
- almacenamiento de energía solar

## Escarabajos: *Ceroglossus suturalis*

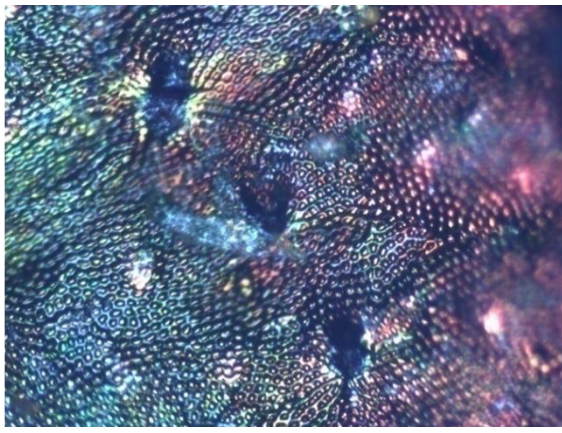


En colaboración con : - Institut Charles Delaunay-Laboratoire de Nanotechnologie et D´Instrumentation Optique, UTT, Francia  
- Centro de Investigaciones Ópticas, La Plata, Argentina  
- Dep. de Entomología, MACN

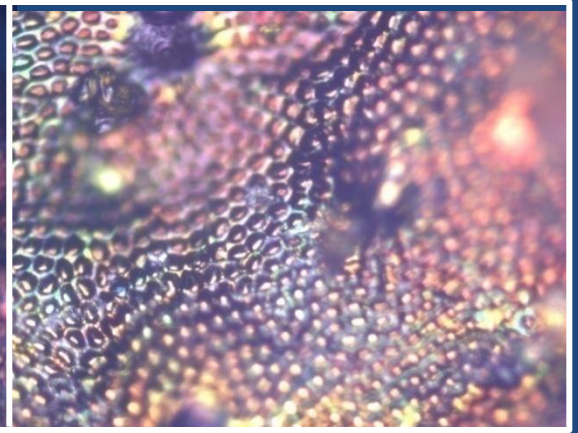
# Escarabajos: *Ceroglossus suturalis*



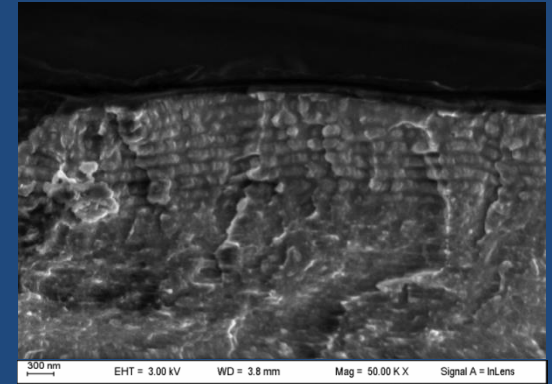
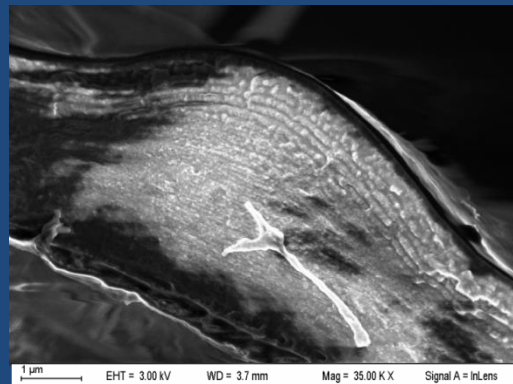
50X



100X

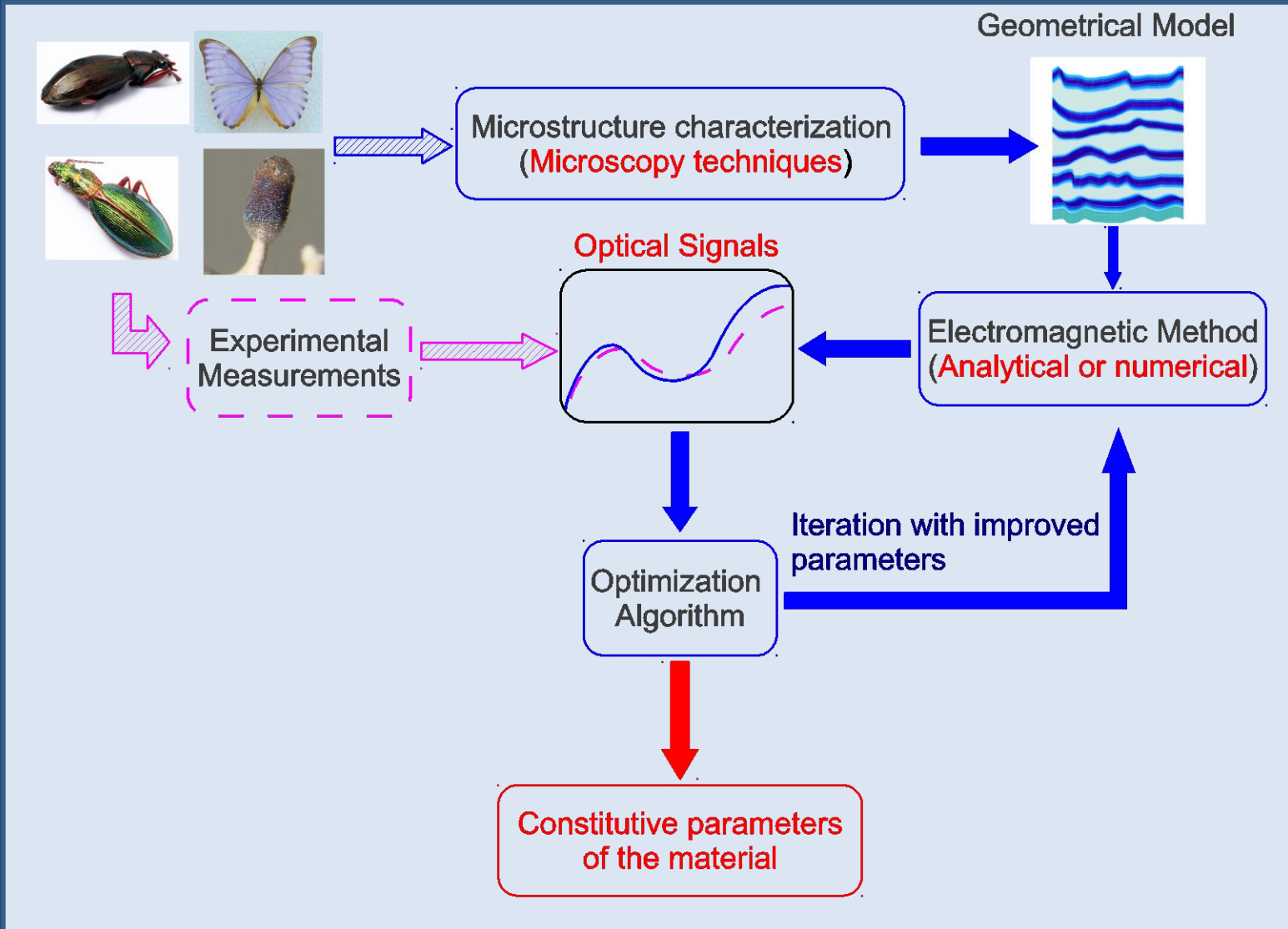


200X



SEM corte transversal

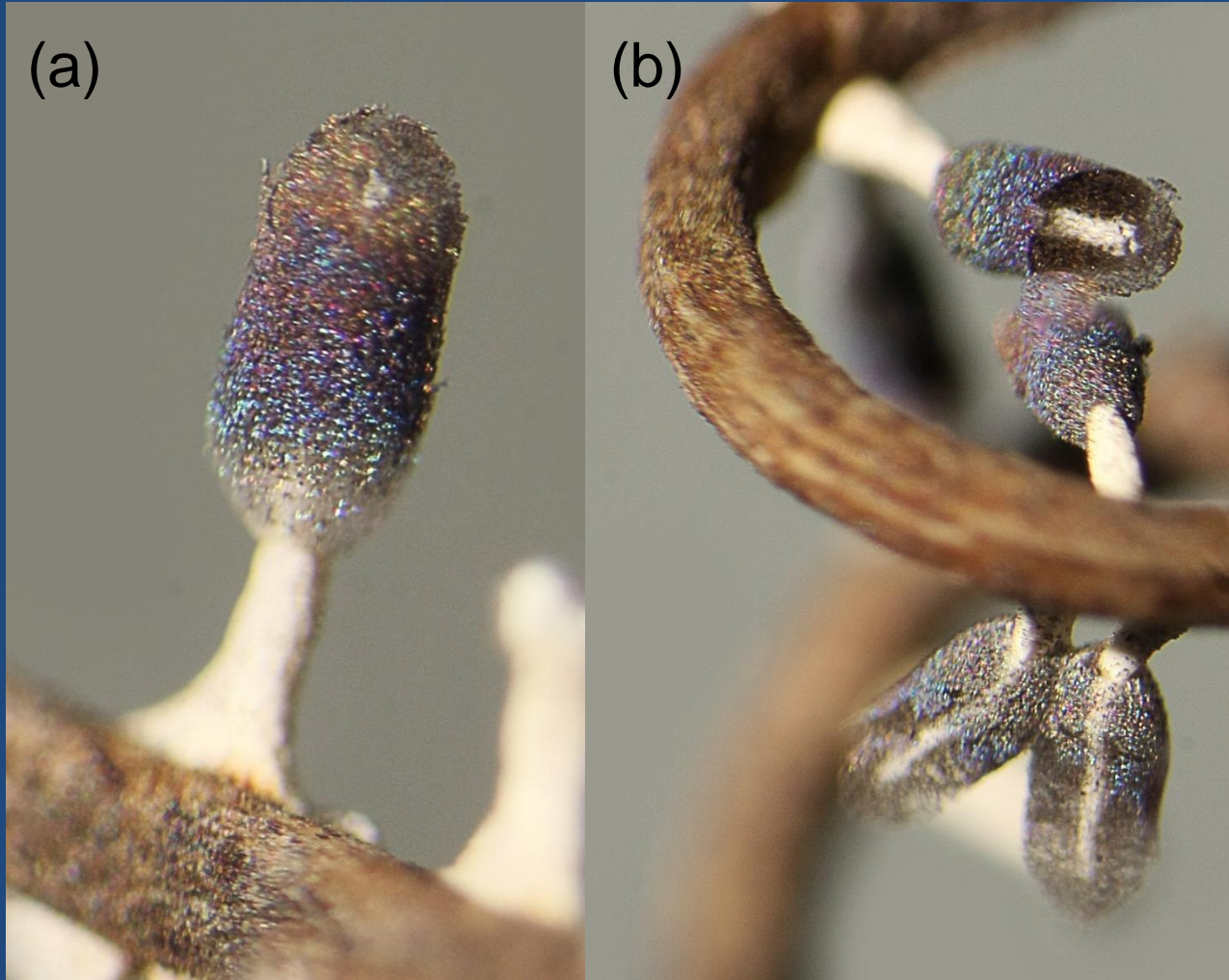
# Método de retrieval





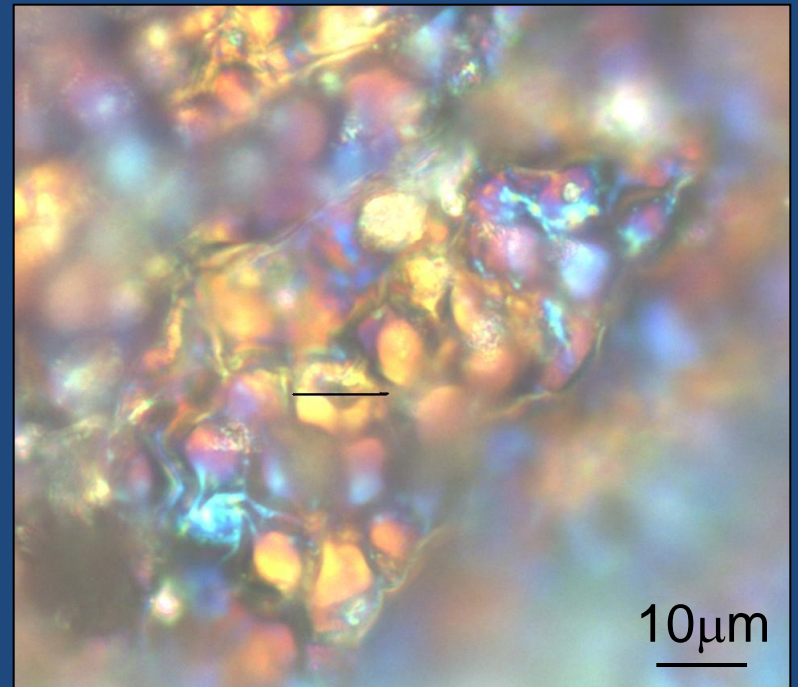
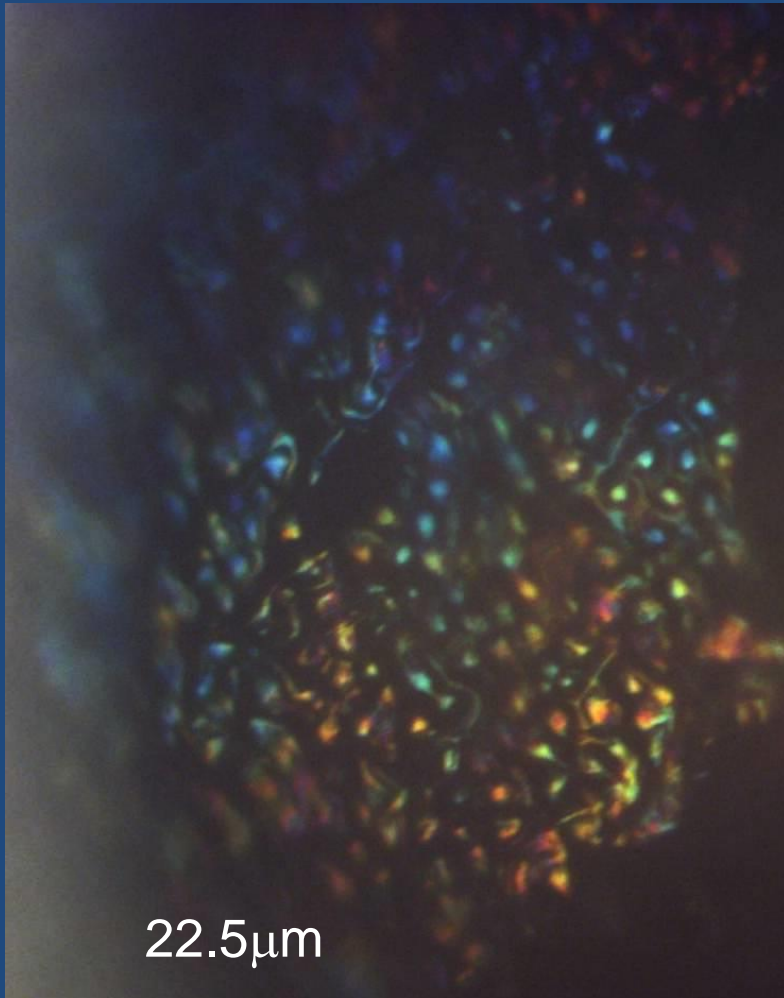
# Hongo Myxomycetes: *Diachea leucopoda*

Fotos tomadas con lupa



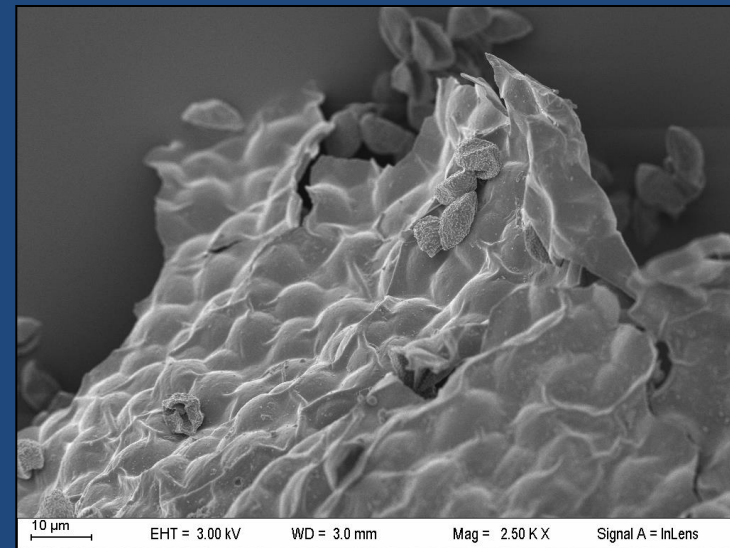
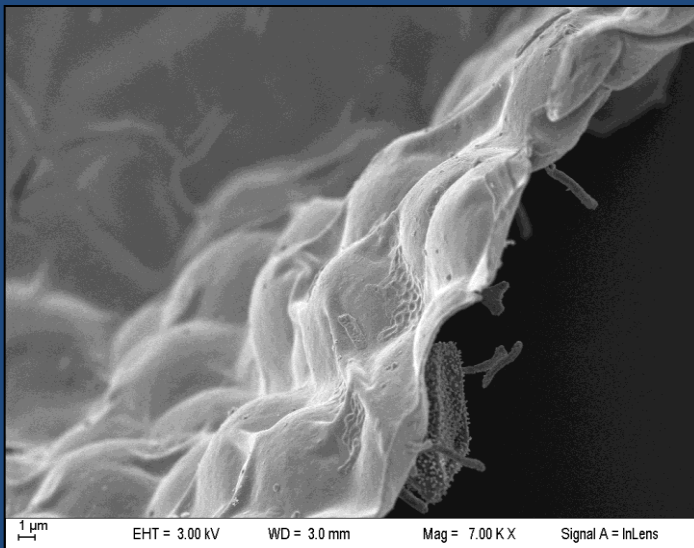
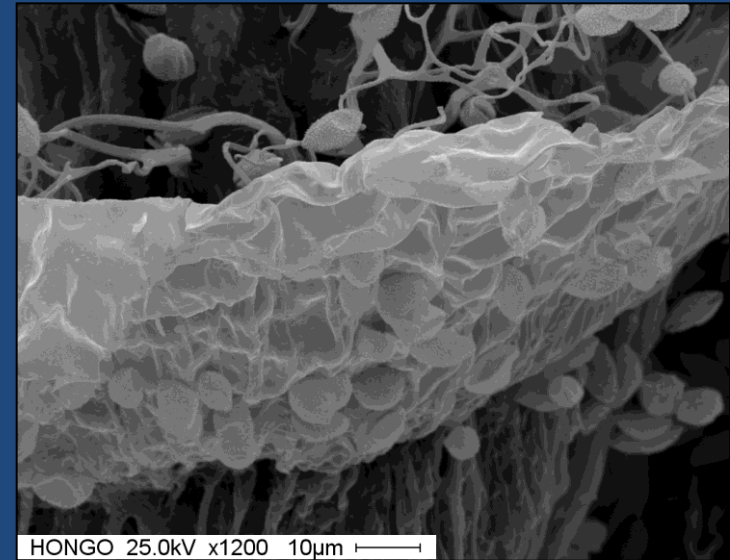
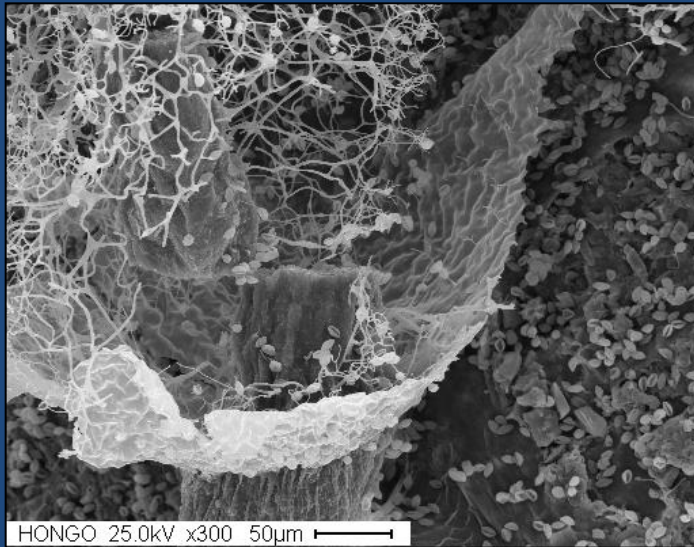
# Hongo Myxomycetes: *Diachea leucopoda*

Fotos tomadas con microscopio óptico

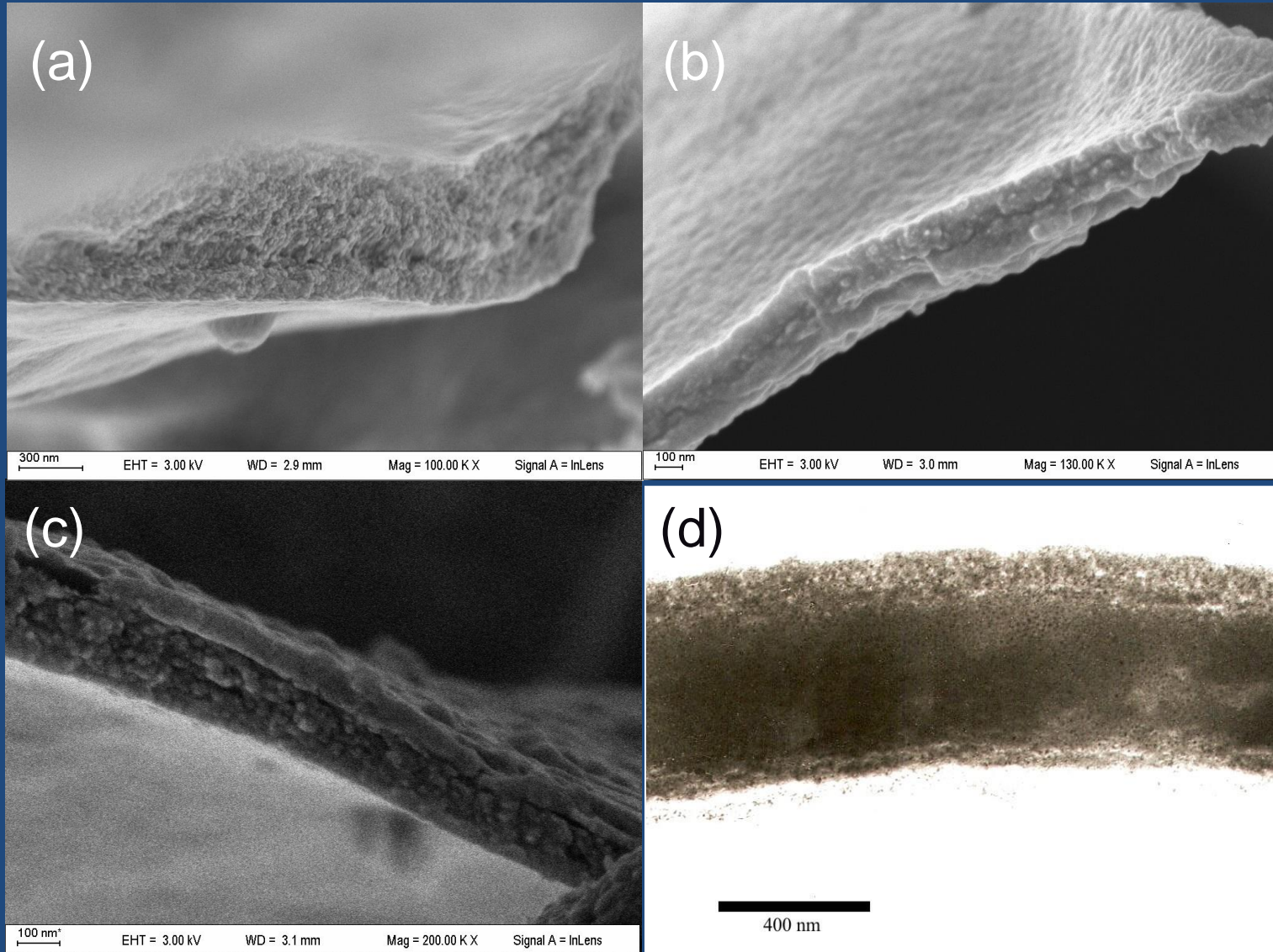


# Hongo Myxomycetes: *Diachea leucopoda*

## Topografía del peridio



# Hongo Myxomycetes: *Diachea leucopoda*



# Hongo Myxomycetes: *Diachea leucopoda*



HALLAZGO DE CIENTIFICOS DE LA UBA



DIANA SKIGIN

El hongo *Diachea leucopoda* mide un milímetro

## Hongos iridiscentes, un efecto luminoso

Los colores de los *Diachea leucopoda* se deben a la interferencia de la luz con las escamas

**SUSANA GALLARDO**  
PARA LA NACION

Muchas de las coloridas mariposas son, en realidad, transparentes. Sus colores no se deben a un pigmento, sino a la estructura de las escamas que revisten sus alas. Ahora se ha descubierto que ciertos hongos también poseen esta propiedad, que se conoce como color estructural.

“Pudimos determinar en una especie de hongos llamados *Diachea leucopoda* que el efecto de puntillado multicolor que presentan al microscopio es el resultado de la interferencia de la luz sobre la estructura de su cobertura transparente”, explica la doctora Diana Skigin, investigadora del Grupo de Electromagnetismo Aplicado, en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA (Fceyn). El trabajo acaba de publicarse en *Optics Express*. La primera autora es Marina Inchaussandague, del mismo departamento, y también participan las biólogas Cecilia Carmarán y Sonia Rosenfeldt, del Departamento de Biodiversidad y Biología Experimental de la Fceyn.

El color estructural es una propiedad presente en muchas especies animales y vegetales, así como en algunos minerales, que poseen iridiscencia debido a efectos de interferencia de la luz. La causa

reside en una microestructura tridimensional muy particular, con formas que se repiten a intervalos regulares. Cualquier pigmento absorbe luz en una determinada longitud de onda y refleja la que no absorbe. Pero los colores que se observan en el hongo *Diachea leucopoda* no dependen del pigmento del tejido, sino de la luz reflejada por la microestructura de su superficie. “La luz recorre diferentes caminos y puede intensificarse más o menos”, comenta Skigin, investigadora del Conicet.

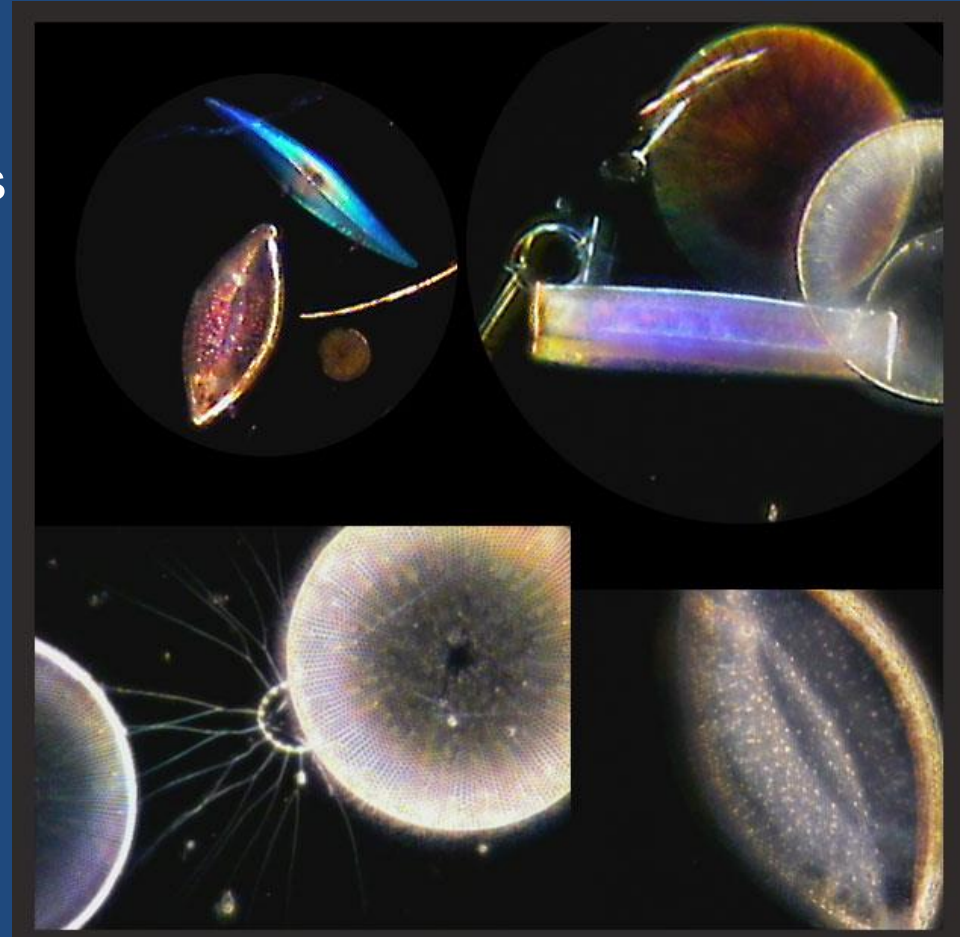
Y agrega: “Mientras que el color del pigmento se ve igual desde todos los ángulos, éste es el resultado de la reflexión selectiva que, por lo general, está presente en estructuras periódicas, formadas por muchas capas”. Mediante técnicas microscópicas, las investigadoras pudieron caracterizar la cubierta de los hongos, que presenta protuberancias de 10 micrones de diámetro.

Pero, ¿para qué sirve estudiar los colores estructurales en seres vivos? “El objetivo es aprovechar y fabricar estructuras similares a las halladas en la naturaleza, por ejemplo, para el diseño de circuitos ópticos y la fabricación de nanomateriales”, concluye Skigin.

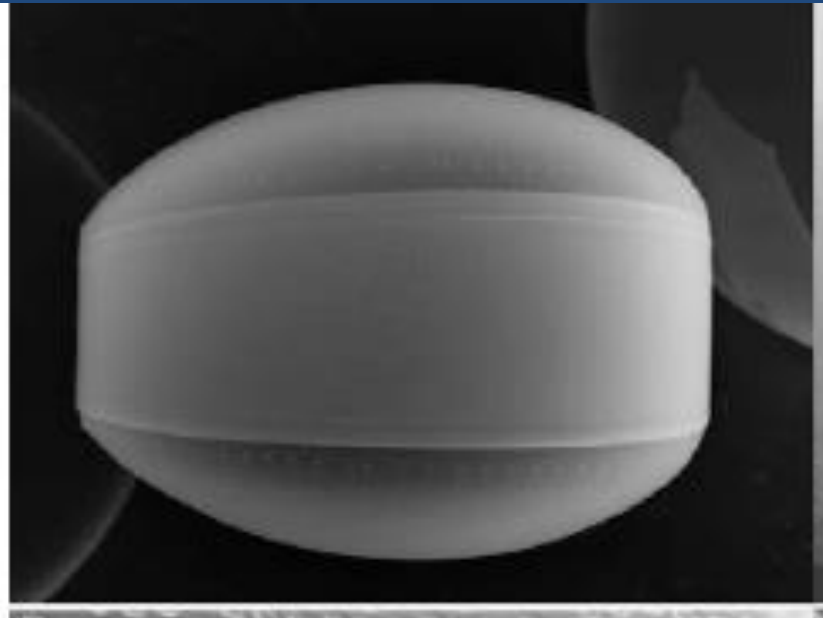
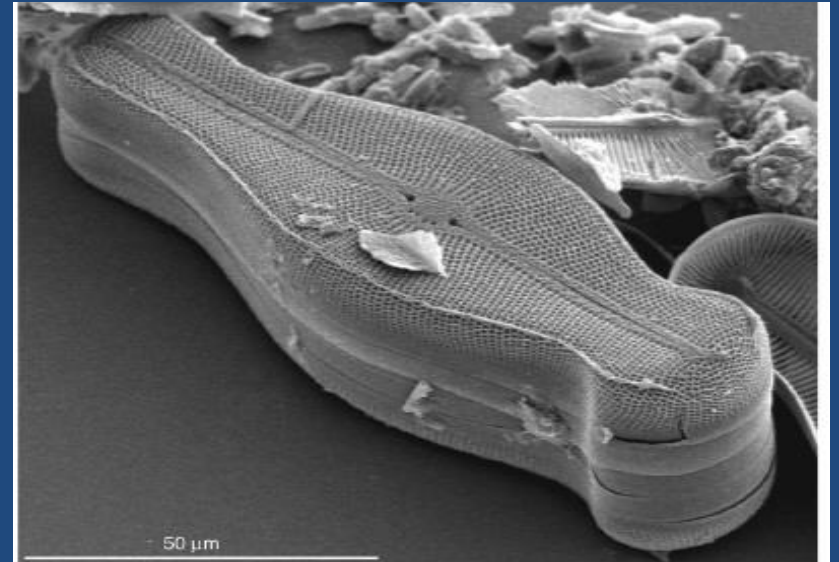
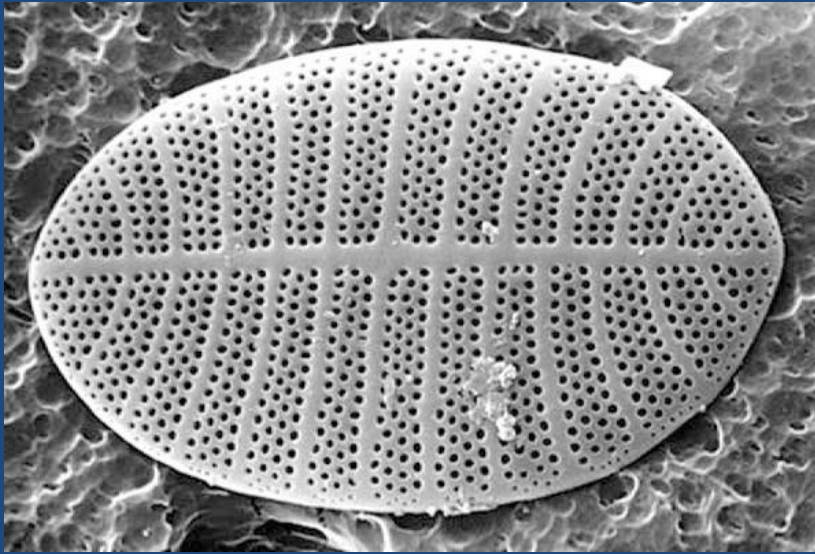
Centro de Divulgación Científica de la Facultad de Ciencias Exactas, UBA

# Diatomeas

- Algas unicelulares microscópicas.
- Amplia distribución en aguas dulces y marinas.
- Cubierta de dióxido de silicio.
- Gran diversidad de formas.
- Estructura regular de canales y poros micrométricos y nanométricos.
- Variedad de aplicaciones:  
fabricación de dispositivos fotónicos y nanomateriales artificiales, filtros, detección de vapores orgánicos y gases, entre otras.

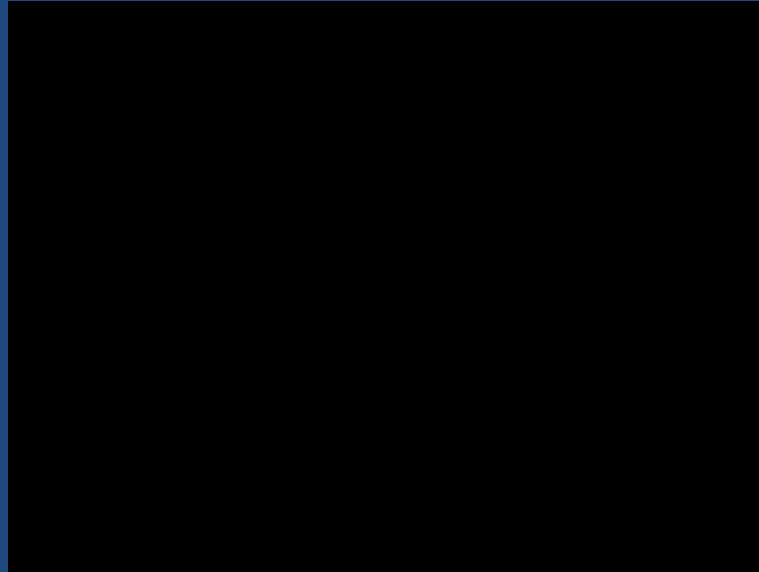


# Diatomeas

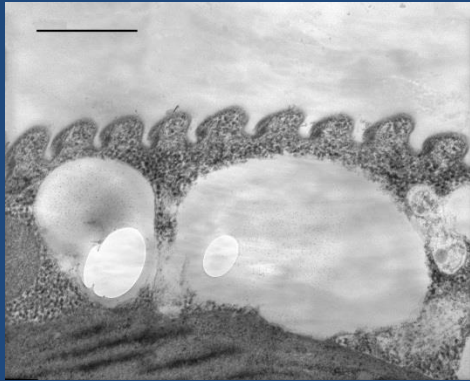




# Euglenas



# Euglenas



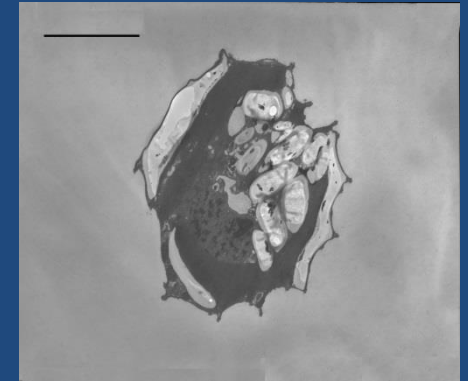
*Euglena gracilis*

scale bar: 0.44  $\mu\text{m}$



*Peranema trichophorum*

scale bar: 0.57  $\mu\text{m}$



*Monomorphyra megalopsis*

scale bar: 6.7  $\mu\text{m}$ .

**PELICULA CORRUGADA  
PERIODICAMENTE**

**PELICULA CUASI  
PLANA**

**IRRADIACION CON LUZ UV-B DURANTE 8 HORAS**



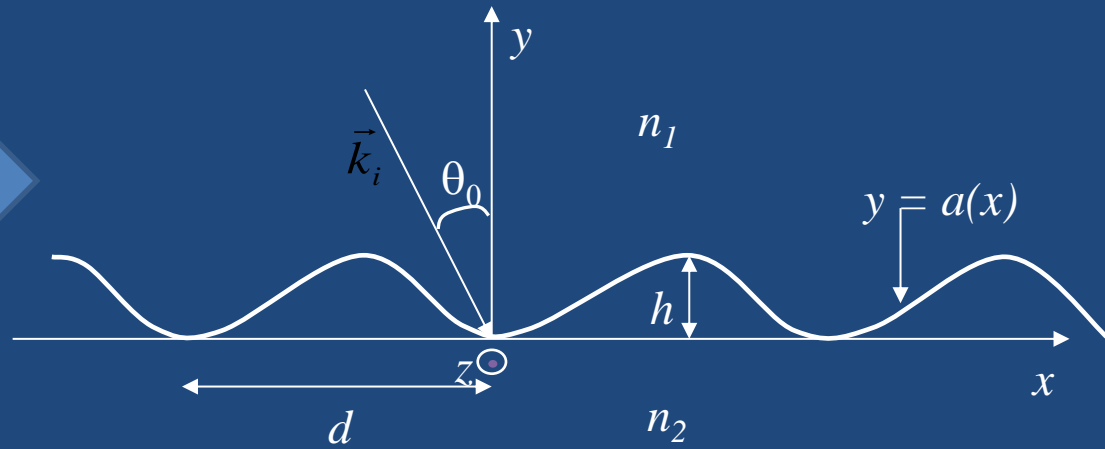
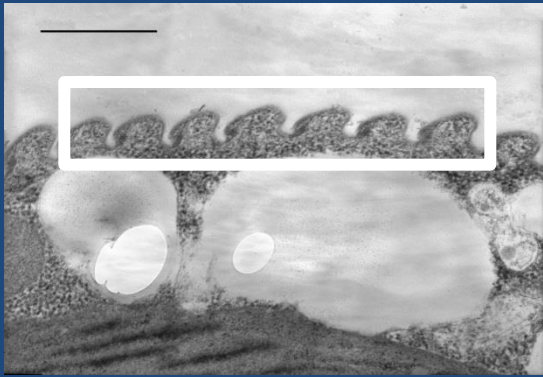
**SOBREVIVEN**



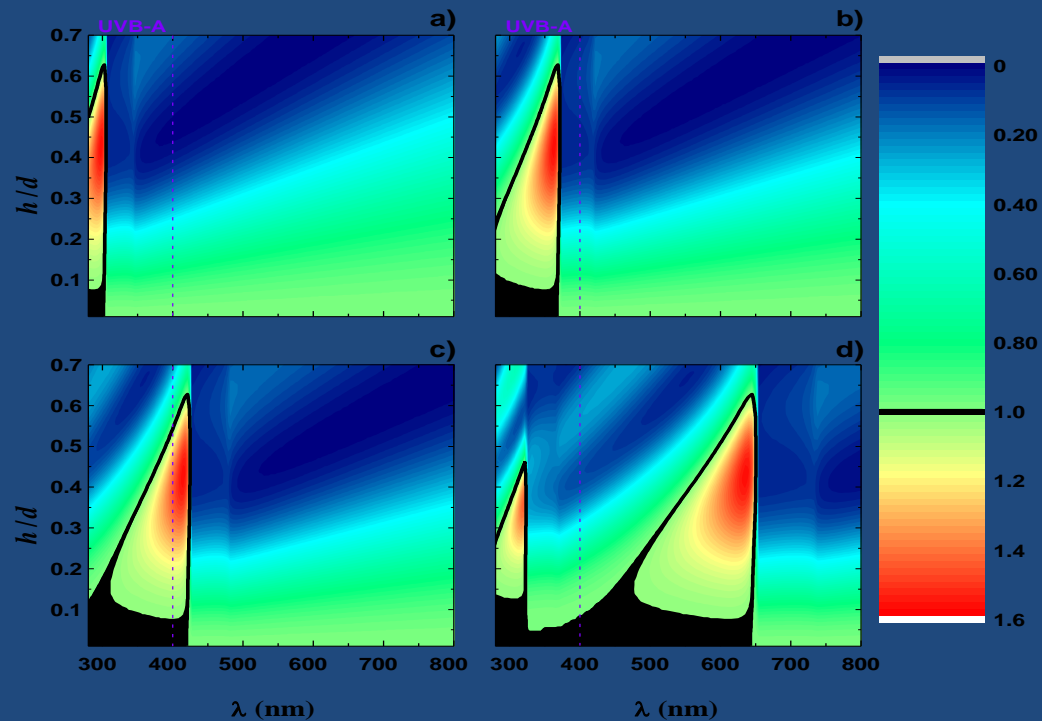
**NO SOBREVIVEN**

¿El corrugado de la película de *E. gracilis* y de *P. trichophorum* contribuye a la protección contra la radiación UV?

# Euglenas







Simulaciones  
numéricas:  
reflectancia total  
normalizada



(a)  $d = 0.256 \mu\text{m}$ ; (b)  $d = 0.276 \mu\text{m}$ ; (c)  $d = 0.315 \mu\text{m}$ ; (d)  $d = 0.495 \mu\text{m}$

La Naturaleza ha inspirado muchos desarrollos en distintas áreas...

## Biomimética

- Microestructuras de la hoja del loto  Desarrollo de pinturas y fibras de fácil limpieza
- Color estructural de las mariposas  Maquillajes en base a productos fotónicos sin pigmentos
- Adhesión de las lagartijas a las paredes  Diodos de luz de alta emisión  
Desarrollo de adhesivos sintéticos
- Escarabajo blanco  Papel de alta calidad  
Fabricación de nuevas fuentes de luz blanca  
Pinturas, plásticos

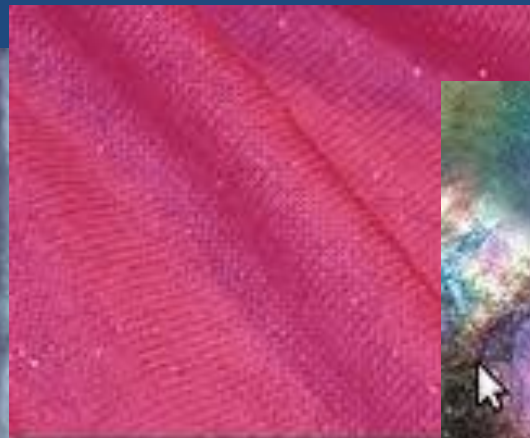
## Existen muchas más aplicaciones de estos materiales...

- Telecomunicaciones y computación óptica
- Sensores de distintos tipos: diagnóstico, detección de gases en la atmósfera, etc.
- Intensificación de campo en cavidades, para lograr efectos no lineales, con una sintonización casi perfecta.
- Filtros, por ejemplo en el rango audible podrían usarse para filtrar el ruido del tránsito en una autopista.
- Nuevos láseres más eficientes

# Aplicaciones tecnológicas: telas



Las mariposas Morpho conservan un azul vibrante durante toda su vida, sin necesidad de una capa de pintura para tener un acabado mate. Las escamas de sus alas están hechas de varias capas de proteínas que refractan la luz de diferentes maneras, y el color que vemos a menudo se debe enteramente a los juegos de luz y de la estructura en lugar de la presencia de pigmentos. Las fibras producidas no utilizan ni colorantes ni pigmentos. Se crea el color por medio del espesor variable y la estructura de las fibras. El consumo de energía y los residuos industriales se reducen debido a que no hace falta ningún proceso de tintura.



# Aplicaciones tecnológicas: maquillaje



Imitando la forma en que se manipula la luz y el color en las escamas de la mariposa *Morpho* y en otros sistemas naturales coloreados estructuralmente , pero usando materiales sintéticos inertes para formar una serie de micro y nanoestructuras periódicas, L'Oreal ha producido un avance revolucionario y exitoso de sus productos cosméticos con el desarrollo de un diseño inspirado en la naturaleza.



Este lápiz labial da tonos iridiscentes que se inspiran en conchas de mar, el agua y las playas y su juego de la luz. La colección incluye algunas sombras que son fotónicas y capturan la luz de diferentes maneras y en diferentes tonos.

# Aplicaciones tecnológicas: pantallas



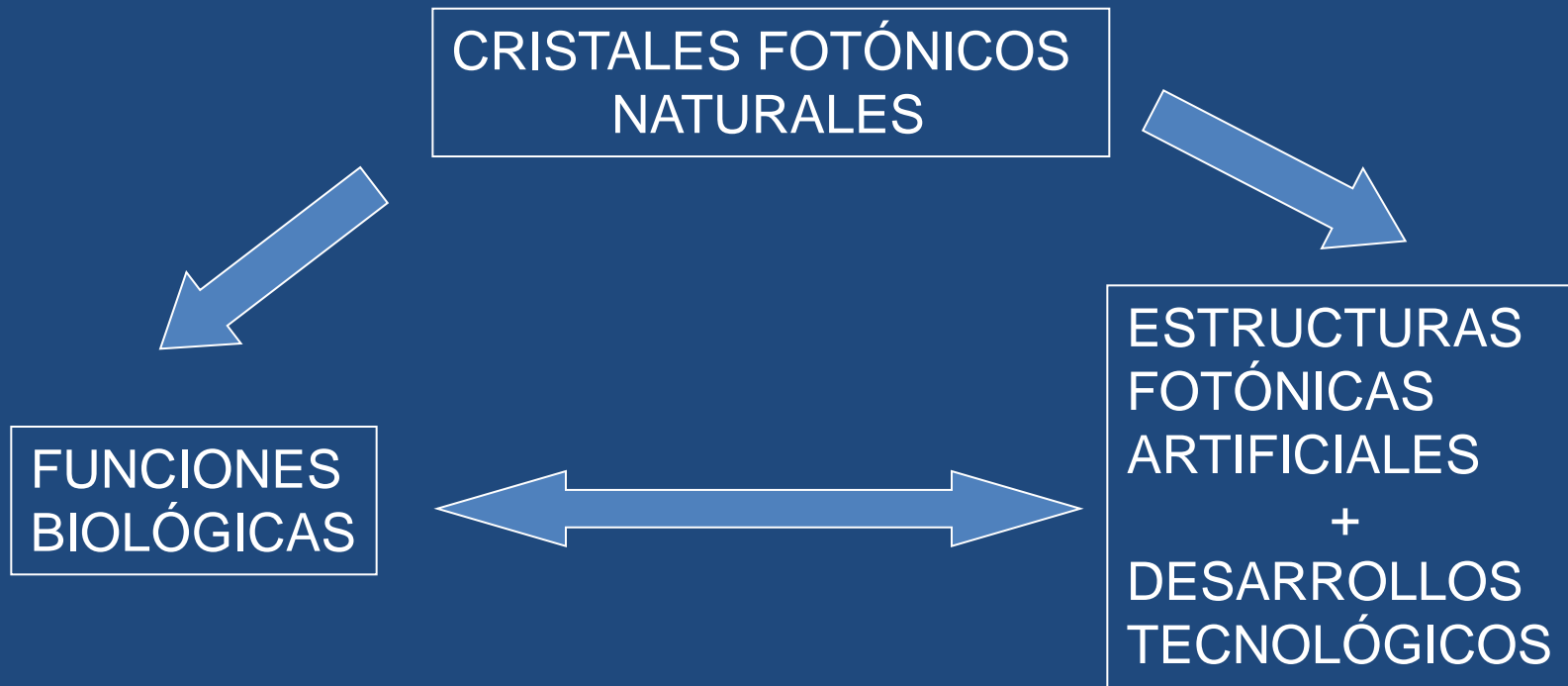
Pantalla para dispositivos móviles: una verdadera innovación tecnológica que ofrece bajo consumo de energía y la excelente calidad de visualización en una amplia gama de condiciones ambientales, incluyendo luz solar brillante. La pantalla refleja la luz para que las longitudes de onda específicas interfieran entre sí para generar color. El fenómeno que hace que las alas de una mariposa brillen es el mismo proceso utilizado en las pantallas mirasol de Qualcomm. Además de incrementar las capacidades de los dispositivos móviles, este tipo de pantallas minimiza el consumo de energía.



# Aplicaciones tecnológicas: pinturas



## Para redondear...



*“La alegría de ver y entender es el más perfecto don de la Naturaleza”*

*Albert Einstein*