

# CASIMIR Y LA LEVITACION CUANTICA

Roger Leiton,  
Concepcion, Septiembre 2007

*“... it appears that quantum mechanics is not a bad preparation for optics”*

Dennis Gabor, 1956.

## *Parte 1: Introduccion*

- ✓ **1873:** *J. van der Waals* introduce las fuerzas intermoleculares debiles para explicar las desviaciones de la ley de gases ideales. Pero la fisica subyacente no era conocida.
- ✓ **1930:** *London* demostro que estas fuerzas podrian ser entendidas en el contexto de la mecanica cuantica (QM), con un potencial de interaccion entre dipolos a corta distancia de:

$$V_{\text{eff}} \sim 1/R^6$$

- ✓ **Febrero 1948:** *Casimir & Polder* introducen el concepto de *retardo* en la energía de interacción entre dos átomos neutros utilizando QED (debido que la velocidad de la luz es el límite para transporte de información). El potencial de interacción entre dipolos queda:

$$V_{\text{eff}} \sim 1/R^7$$

- ✓ *Bohr* sugiere a *Casimir* que la energía de punto cero sería responsable por la fuerza intermolecular.
- ✓ **Mayo 1948:** *Casimir* cambia el enfoque para la acción a distancia entre moléculas a la acción local de los campos. Propone una fuerza de atracción entre placas conductoras (fuerza Casimir) provocada por las fluctuaciones del vacío.

# EFEECTO CASIMIR

Retarded van der Waals-London  
(entre atomos o moleculas)

Casimir-Polder  
(atomos y superficies)

Fuerza de Casimir  
(entre superficies  
/objetos materiales)

# Magnitud del efecto Casimir:

$$P = \frac{F}{L^2} = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4}$$

$$P \approx 1 \cdot 10^{-15} \text{ N/m}^2 \quad \text{at } d=1 \text{ mm}$$

$$P \approx 1 \text{ mN/m}^2 \quad \text{at } d=1 \mu\text{m}$$

$$P \approx 1 \text{ atm} \quad \text{at } d=10 \text{ nm}$$

$$\sim 100 \text{ N/m}^2$$

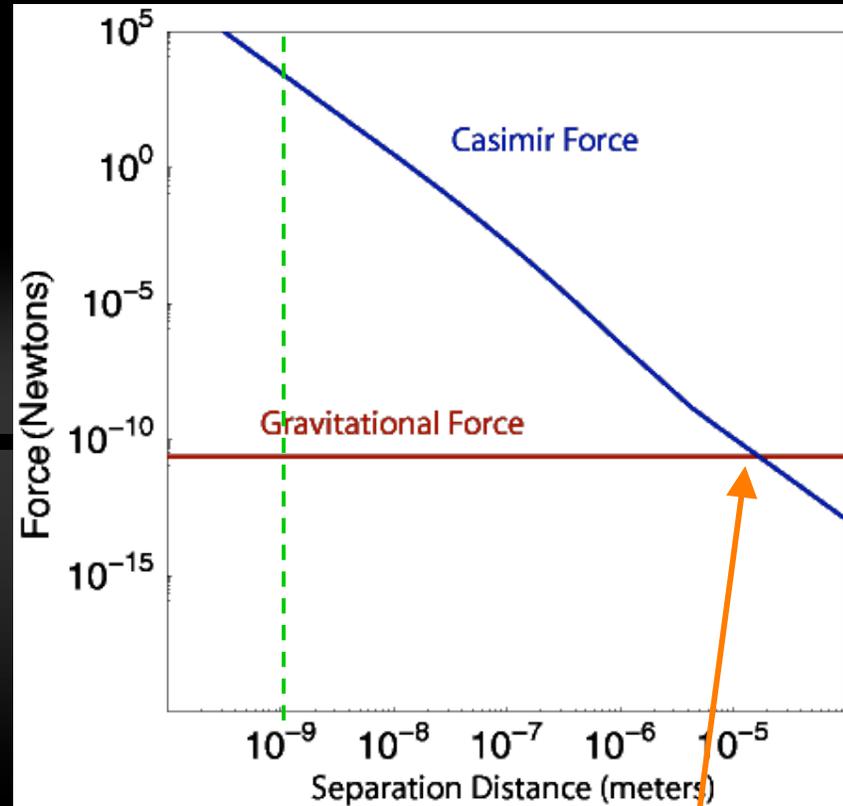
(for ideal metals)

# Fuerza de Casimir entre Dos Monedas



Fuerza Gravitacional:  
~ peso de una *E. Coli*  
~  $10^{-11}$  N

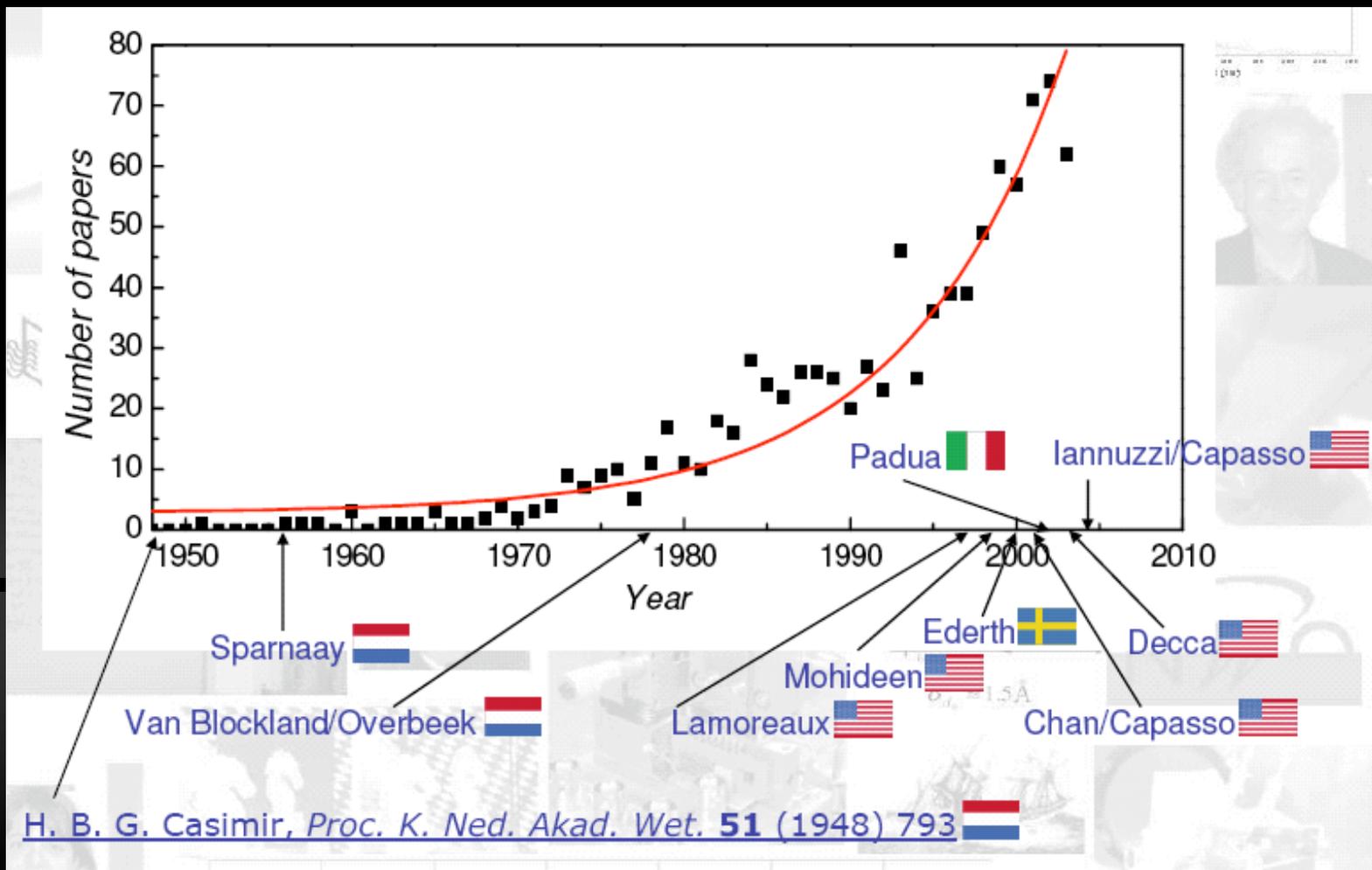
A 1 nm, la fuerza de Casimir entre monedas > 3100 N!



1 nanometro

~ 10 micron

F. Casimir = F. gravedad



***Por que el renovado interes en la Fuerza de Casimir?***

# *Impacto del Efecto Casimir en la Fisica*

## **Es un tema multidisciplinario :**

- ✓ **QFT**: QCD (quark-gluon interaction); Kaluza-Klein theories; SUperSYmmetry, Supergravity and string theory.
- ✓ **Materia Condensada**: atraccion y repulsion de material a cortas distancias; propiedades de peliculas, tension superficial.
- ✓ **Gravitacion, Astrofisica y Cosmologia**: polarizacion del vacio e inflacion; defectos topologicos y formacion de estructuras.
- ✓ **Fisica atomica**: niveles de energia; procesos radiativos; corrimientos de energia
- ✓ **Fisica matematica**: ha estimulado el desarrollo de tecnicas de regularizacion y renormalizacion basadas en la funcion zeta.
- ✓ **Nano-ingenieria**: influencia y control de la fuerza de Casimir permitiria mejorar mecanismos a nano escalas

# ***CAUSAS DEL EFECTO CASIMIR***

- ✓ **Casimir (1948)**: fluctuaciones del vacio donde cada modo de oscilacion del campo electromag. tiene un valor de
- ✓ **Lifshitz (1956)**: aproximacion mas realista, considera de las placas como conductores no perfectos ( $\epsilon_0 \neq \infty$ ) fluctuaciones de carga y corriente en el cuerpo del material (no requiere cuantizacion del campo electromagnetico).
- ✓ Otros: **Schwinger et al.(1978), Milonni (1982)**: no recurren a las fluctuaciones del vacio.

***Es la fuerza de Casimir suficiente prueba para la existencia de la energia del vacio electromagnetico?***

## *Correcciones: de lo ideal a lo practico*

- ✓ Propuesta original de Casimir es una idealizacion:
  - ✓ Placas paralelas: experimentalmente muy complicado
  - ✓ placas son conductores perfectos (conductividad infinita)
  - ✓ geometria: sin rugosidades en las superficies
  - ✓ temperatura:  $T_{placas} = 0 \text{ }^\circ\text{K}$

# Conductividad

Para placas planas paralelas (Lifshitz 1956):

$$F(a) = -\frac{\pi^2 \hbar c (\epsilon_0 - 1)^2}{240 a^4 (\epsilon_0 + 1)^2} \varphi(\epsilon_0) S$$

Si constante dielectrica  $\epsilon_0 \rightarrow \infty$ , conductor ideal (Casimir)

$\varphi(\epsilon_0)$ : funcion tabulada (...?)

# *Rugosidades en la superficie*

- ✓ Causa errores en la determinación de la fuerza:

$$F'(d) \approx F(d) \left[ 1 + 4 \left( \frac{A}{d} \right)^2 \right]$$

**A** : rugosidad (roughness) que en promedio es de ~ 30 nm o menos para superficies pulidas con alta calidad óptica. Para correcciones mejores es peligroso usar el promedio a menos que el periodo de la rugosidad sea mucho más grande o mucho más corta que la separación entre las placas.

# Temperatura

- ✓ Casimir:  $T_{placas} = 0 \text{ °K}$ .
- ✓ De Teoria de campo cuantica termica : a separaciones mas grandes que  $\sim$ micrometros la correccion por temperatura es mas importante y viceversa.

$$P(z) = -\frac{k_B T}{4\pi z^3} \zeta(3),$$

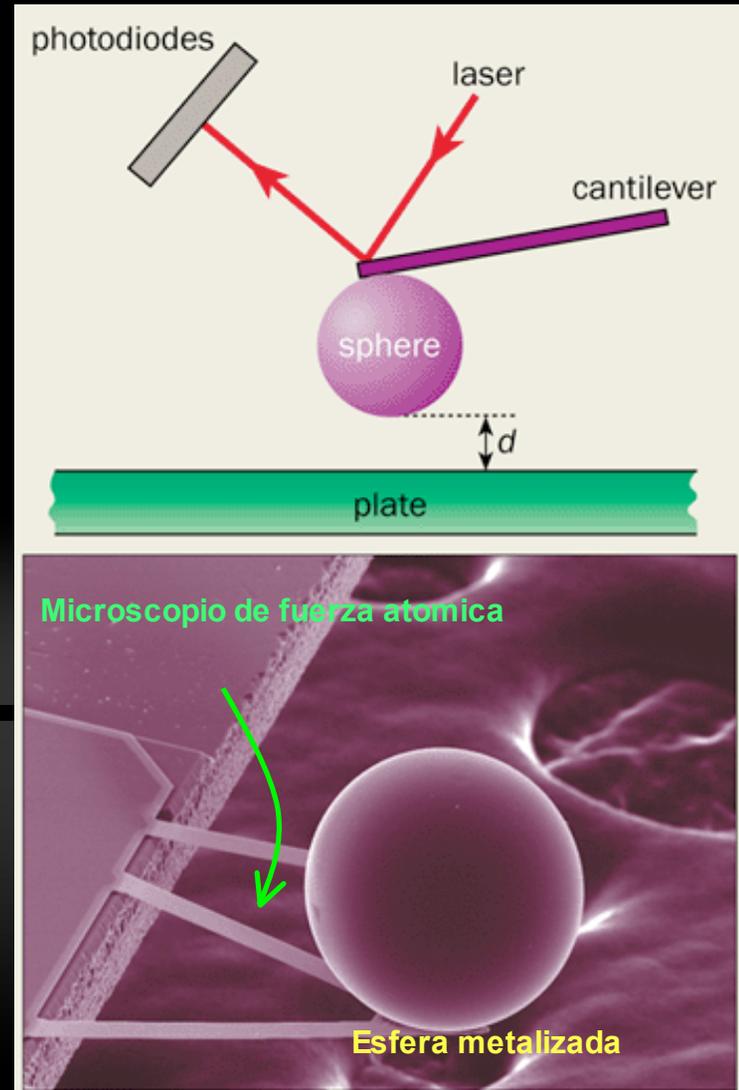
## *Mohideen et al. (1998)*

Midio la Fuerza de Casimir entre una placa metalizada y una esfera metalizada sujeta al la punta de prueba de un microscopio de fuerza atomica. Cuando la esfera se acerca a la placa, la Fuerza de atraccion de Casimir produce el desplazamiento de la punta.

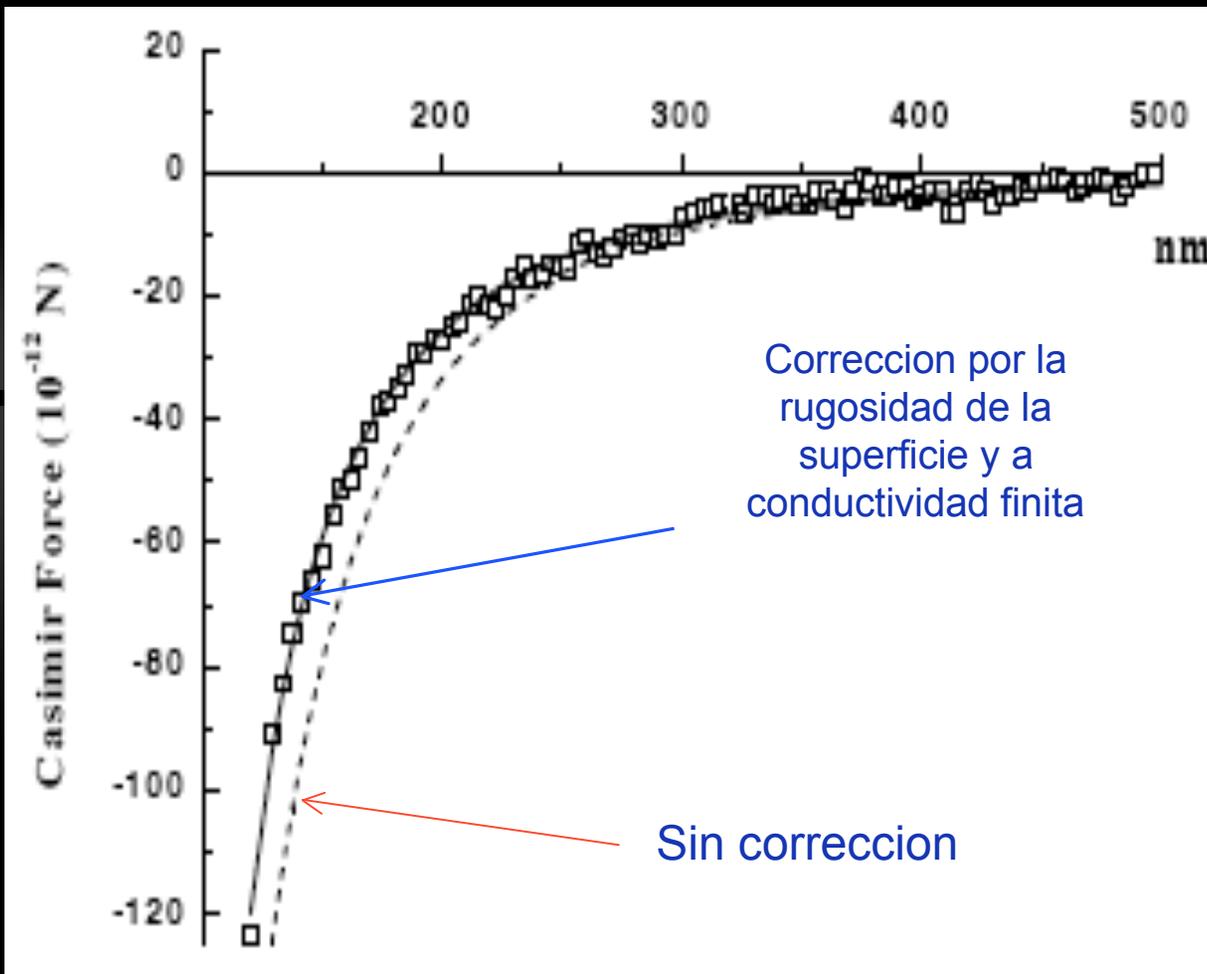
$$F(z) = -\frac{\pi^3 \hbar c R}{360 z^3}$$

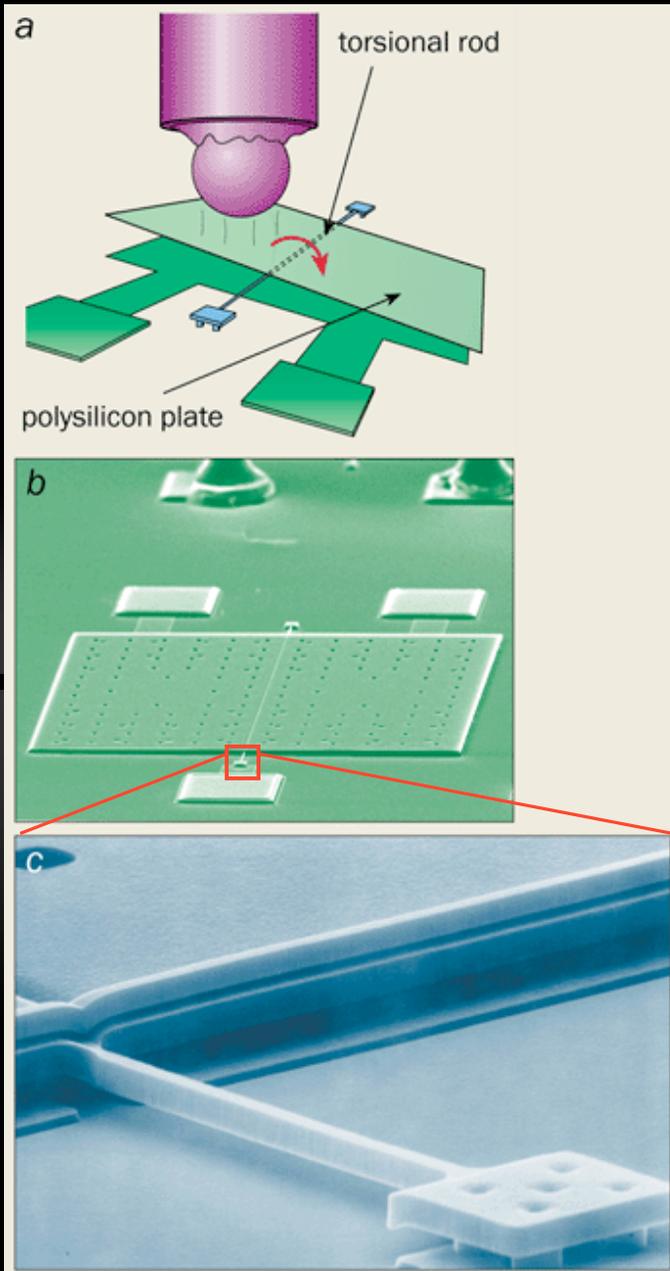
Para una esfera y placa ideales

Este desplazamiento se monitorea con un haz de laser que se refleja en la parte superior del soporte de la esfera e incide en unos fotodiodos, que registran la luz reflejada.



# Esfera-placa (Klimchitskaya & Mohideen, 1999)





## ***Torques de Casimir*** ***(Capasso et al. 2007; Lucent Technology)***

- ✓ placa suspendida en una barra de torsion de solo unos micrometros de diametro. Cuando la esfera metalizada se acerca, la fuerza de Casimir entre los dos objetos hace rotar la placa en torno a la barra.



**metamateriales  
con indice de refraccion  
negativo  
y posibles lentes perfectos**

# ***Meta materiales*** (<http://metamaterials.net>)

Termino acuñado por *Rodger Walser* (U. of Texas) en 1999 para:

- ✓ materiales que obtienen sus propiedades a partir de su estructura mas que de su composicion.
- ✓ Particularmente, *no se encuentran* en la Naturaleza; son de estructura periodica,
- ✓ De especial importancia en optica y electromagnetismo.
- ✓ Con estructura de dimensiones tanto o mucho mas pequeñas que las longitudes de onda de la radiacion electromagnetica con que interactuan (para radiacion visible, metamateriales de ~280 nano-metros)

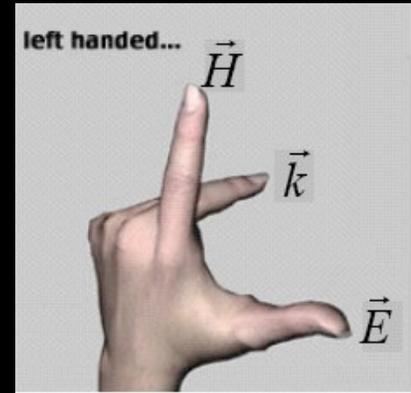
# *Metamaterials bi-anisotropicos o de la mano izquierda*

- ✓ *Veselago* (1968) Permitividad electrica y permeabilidad magnetica negativas

$$\varepsilon < 0 \quad , \quad \mu < 0$$

- ✓ Nuevas propiedades opticas:
  - ✓ Indice de refraccion negativos
  - ✓ Corrimientos Doppler inversos

# Ondas Electromagneticas Planas



$$k \times E = \frac{\omega}{c} \mu H$$

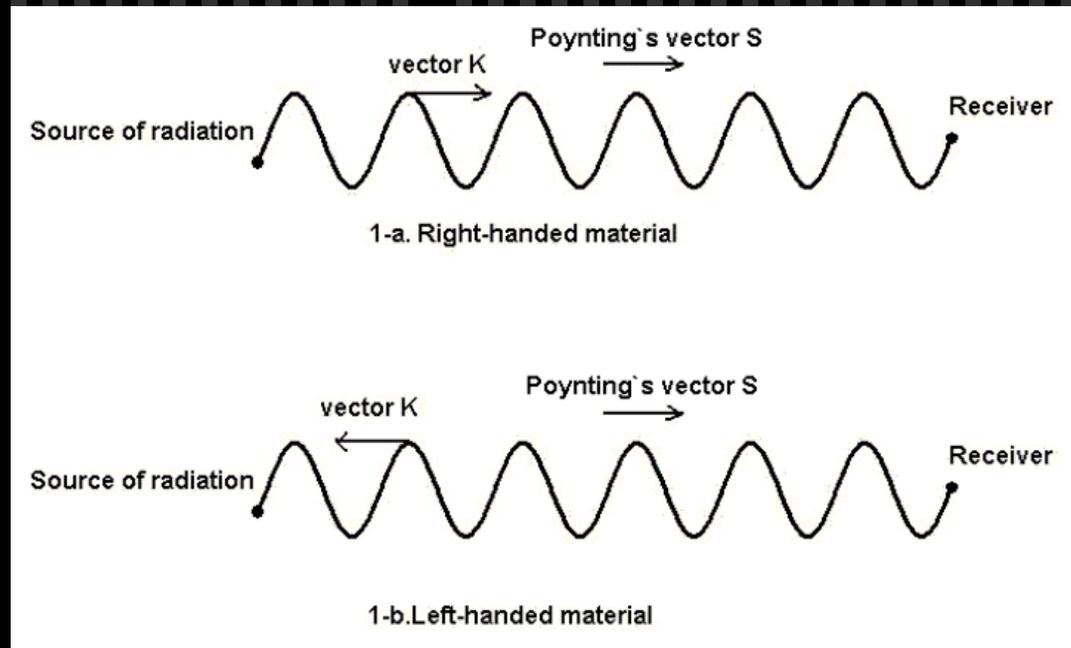
$$k \times H = -\frac{\omega}{c} \epsilon E$$

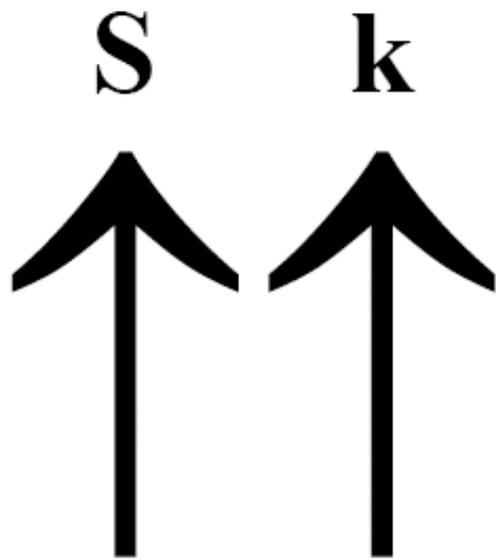
$$S = E \times H$$

## Indice de Refraccion

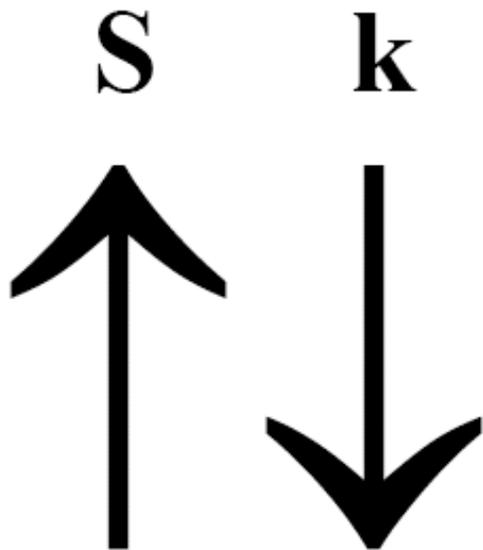
$$n = \frac{c}{v_{fase}} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

$$k = \frac{\omega}{v_{fase}} = \omega \left( \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{c} \right) = \frac{\omega}{c} n$$



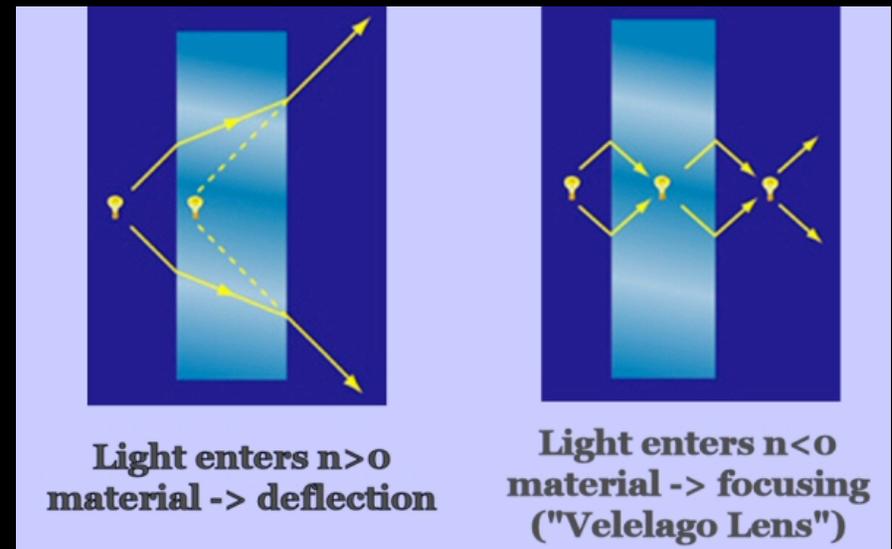
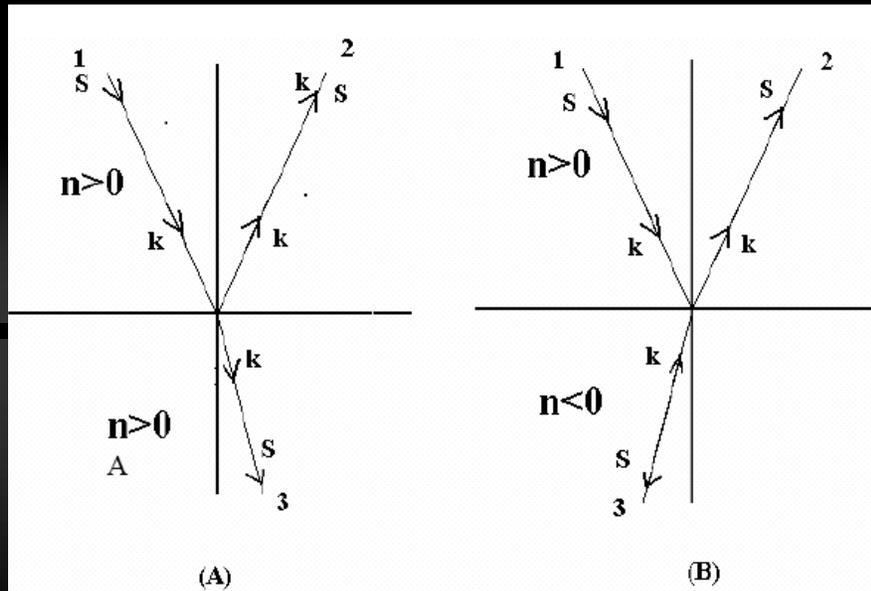


$$\varepsilon, \mu > 0 \quad \frac{kc}{\omega} = n > 0$$

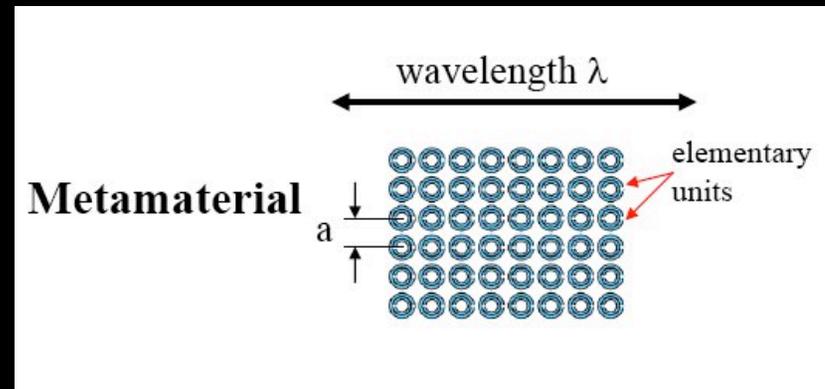


$$\varepsilon, \mu < 0 \quad \frac{kc}{\omega} = n < 0$$

# Metamateriales con refraccion negativa

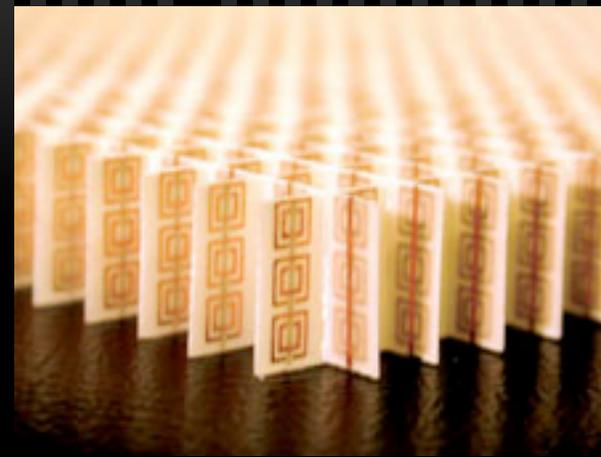
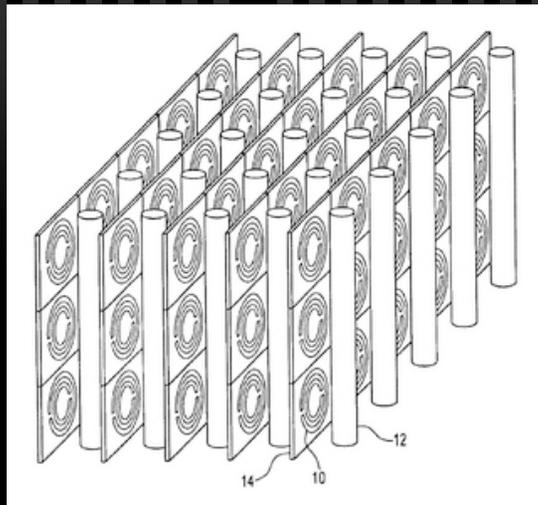


# Experimentos



- ✓ Pendry et al. 1998:  $\epsilon < 0$  para microondas
- ✓ Pendry et al. 1999:  $\mu < 0$  para microondas
- ✓ Smith et al. 2000 . Anillos + cables:  
 $\epsilon < 0$  &  $\mu < 0$  simultaneamente para micro-ondas

Medio con  $\epsilon < 0$  &  $\mu < 0$   
macroscopicos: altera  
propiedades del campo  
magnetico

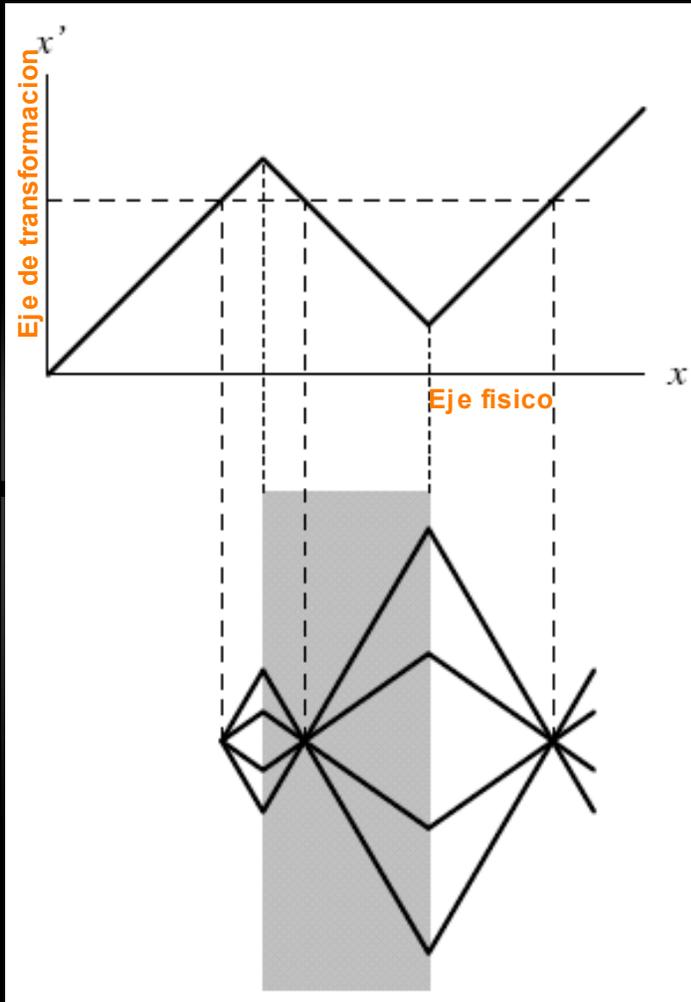


# *Transformation materials*



- ✓ Efectúan una transformación de coordenadas
- ✓ Mapean los campos electromagnéticos en el espacio físico, incluyendo el efecto del medio, a una equivalencia del electromagnetismo en coordenadas transformadas donde el espacio está vacío
- ✓ Metamateriales podrían efectuar estas transformaciones

# *Lentes perfectos negativamente refractantes* (Pendry 2000)



La transformación de  $x'$  a  $x$  es o triple o univalente. El segmento triple-valuado en el eje físico corresponde a la región focal del lente: la fuente puntual tiene 2 imágenes, una dentro del lente y otra fuera.

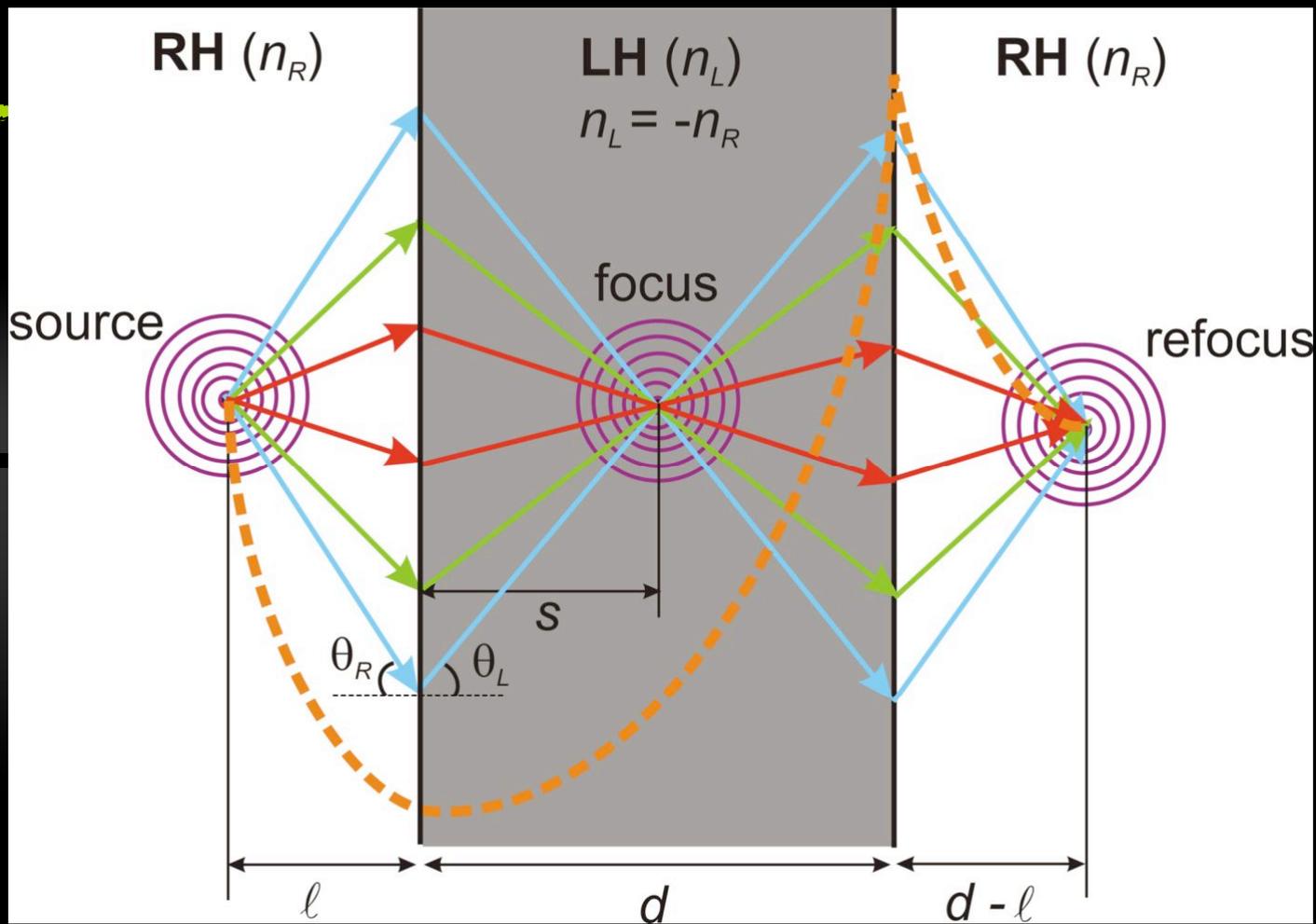
- ✓ Ya que el dispositivo asegura una transformación exacta, las imágenes son perfectas con una resolución bajo el límite normal de difracción: un lente perfecto!!
- ✓ No es en rigor un lente (concentra rayos paralelos) sino un dispositivo de para reproducir imágenes de objetos en 3-D.
- ✓ Pero, **COMO SE SUPERA EL LIMITE DE DIFRACCION?**

# Ondas Desvanescentes

- ✓ Los detalles mas finos de una imagen son transmitidos por las ondas desvanescentes ( $\lambda_{desvanescente} < \lambda_{incidente}$ ). Se crean cuando una onda electromagnetica incidente sobre la interface de dos medios dielectricos de diferentes indices de refraccion experimenta reflexion interna total.

Decaen exponencialmente en la interfase de los materiales dispersivos ==> no pueden ser enfocados ==> origen del **LIMITE DE DIFRACCION**

- ✓ Pendry 2000: metamateriales con  $n < 0$  amplificarian las OE ==> **LENTES PERFECTOS**



# Superlente (Fang et al. 2005)



40 nm

Longitud de onda incidente: 365nm.

objeto



Imagen con superlente

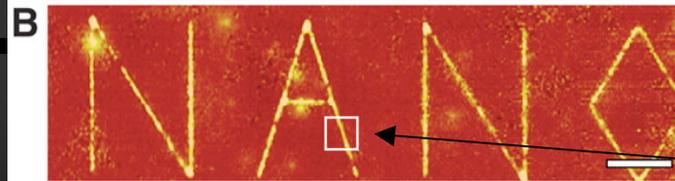
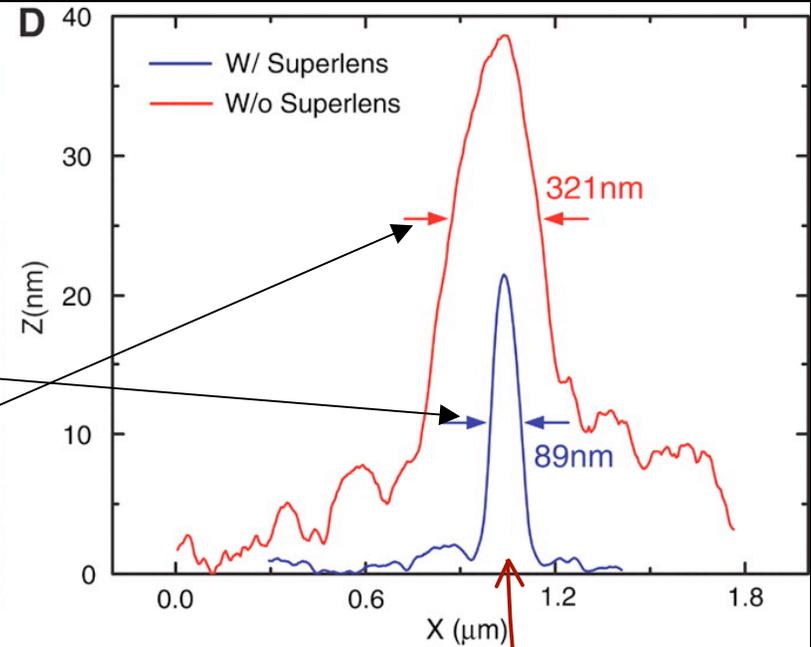
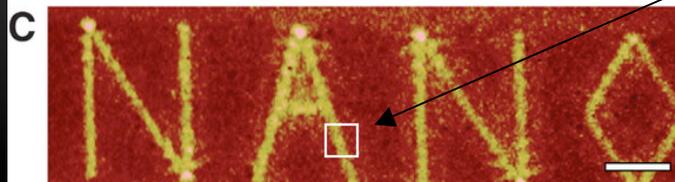


Imagen control sin superlente



*Bajo el limite de difraccion!!*



*Y todo esto, para que?*

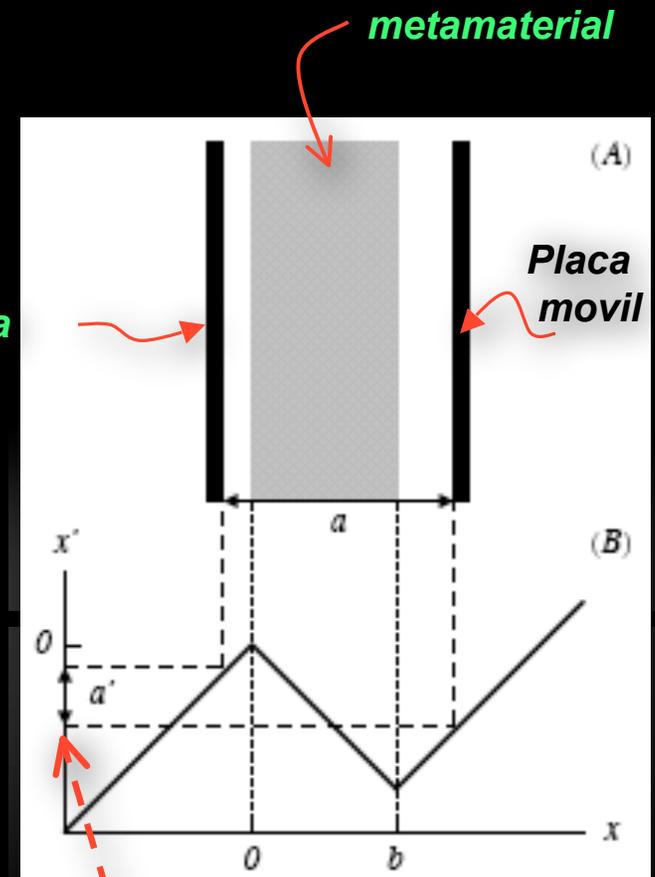
*Lentes perfectos + Casimir =?*

# Levitación Cuántica

(Leonhard & Philbin, July 2007)

Una placa podría ubicarse sobre la otra a una distancia donde la fuerza repulsiva de Casimir equipare el peso de la placa: **LEVITACION!**

Placa fija



metamaterial

Placa móvil

$$x' = \begin{cases} x & \text{for } x < 0 \\ -x & \text{for } 0 \leq x \leq b \\ x - 2b & \text{for } x > b \end{cases}$$

Repulsion!!!

$$a' = |a - 2b|$$

Transformación propuesta para producir la repulsión



Fuerza de Casimir  
es un gran  
problema para el  
funcionamiento  
de *Micro y Nano*  
*Electromechanical*  
*Systems (MEMS,*  
*NEMS)*  
=  
“stiction”

Los elementos  
moviles colapsan en  
las superficies  
cercanas resultando  
en su adhesion  
permanente

El control de partes moviles por medio de metamateriales que induzcan una fuerza de Casimir repulsiva evitaria la stiction en NEMS Y MEMS.

# *Ejemplo posible aplicacion:* *Airbags*

- ✓ contienen MEMS para medir las violentas desaceleraciones y decidir cuando debe actuar el mecanismo.

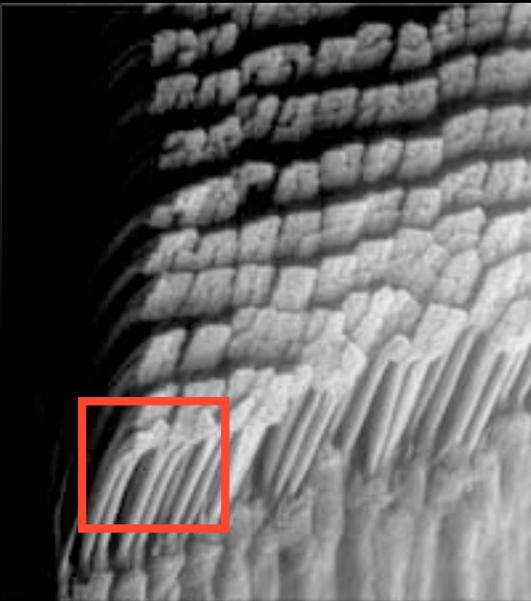
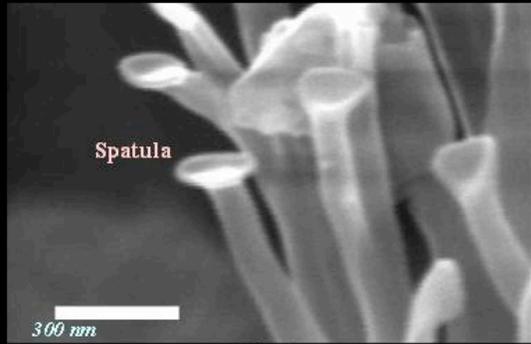
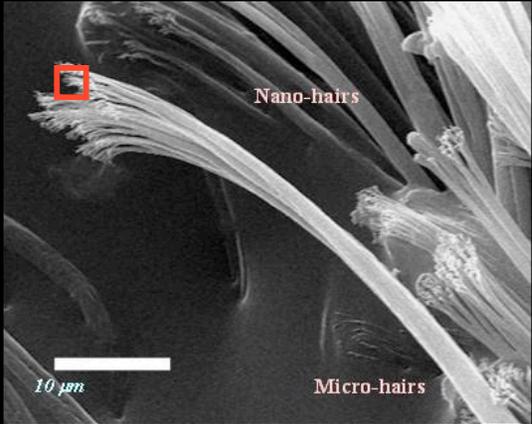


ASI 10.0kV 12.5mm x5.00k SE(M)

100um



# Gecko



Gecko Man?

# ***QUE PASA EN CHILE?***



## **PROYECTO DE LEY QUE PROHÍBE Y SANCIONA LA IMPORTACIÓN Y FABRICACIÓN EN CHILE DE PRODUCTOS NANOTECNOLÓGICOS**

A nuestro juicio, desarrollar la actividad económica de producir o internar productos fabricados con nanotecnología es contrario a la moral, pues los efectos de esta tecnología son tan desconocidos, pero presumiblemente tan enormes, que dar riendo suelta a esta actividad no tendría vuelta atrás. Sus efectos tampoco. Asimismo, el orden social (orden público) tal como lo conocemos, podría ser vulnerado y modificado de manera tal que estas tecnologías pueden ser terriblemente nocivas para nuestras formas de vida y de vivir en sociedad.

**ALEJANDRO NAVARRO BRAIN**  
**SENADOR**

Oficina Congreso, Fono 32-2504582, Fax 32-2504631, email: [anavarro@senado.cl](mailto:anavarro@senado.cl)  
Oficina Regional, Las Heras 305, Penco, Fono: 41-2450310, Fax: 41-2450334



# Referencias

- ✓ “New Developments in the Casimir Effect”,  
**Bordag et al. , 2001, quant-ph/0106045.**
- ✓ “*Casimir Forces and Quantum Electrodynamical Torques: Physics and Nanomechanics*”,  
**F. Capasso, 2007, IEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 13, 400.**
- ✓ “*On the attraction between two perfectly conducting plates*”  
**Casimir, 1948, Proc. Kon. Nederland. Akad. Wetensch, B51, 793.**
- ✓ “*The Influence of Retardation on the London-van der Waals Forces*”  
**Casimir & Polder, 1948, Physical Review, 73, 360.**
- ✓ “*Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens*”,  
**Fang et al., Science, Vol 308, 2005, 534.**
- ✓ “Experiment and Theory in the Casimir Effect”,  
**Klimchtskaya and Mostepanenko, 2006, Contemporary Physics, 47, 131.**
- ✓ “*Quantum Levitation by left-handed metamaterials*”,  
**Leonhard & Philbin, 2007, New J. Phys., 8, 118.**
- ✓ “*The Casimir force: background, experiments, and applications*”,  
**Lamoreaux, 2005, Rep. Prog. Phys, 68, 201.**
- ✓ “*Quantum Optics of Spatial Transformation Media*”,  
**Leonhard & Philbin, 2007, New J. Phys., 8, 247.**

# Referencias (cont.)

- ✓ *“The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids”*  
Lifshitz, **Sov. Phys. JETP, 2, 73.**
- ✓ *“The Quantum Vacuum”*  
Milonni (**Academic Press, San Diego, 1994**)
- ✓ *“Negative Refraction Makes a Perfect Lens”*,  
Pendry, **2000, Phys. Rev. Lett., 85, 3966.**
- ✓ *“Casimir Effect in Dielectrics”*  
Schwinger et al., **1978, Annals of Physics, 115, 1.**
- ✓ *“Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity”*  
Smith et al., **2000, Phys. Rev. Lett., 84, 4184.**
- ✓ *“Research on Negative Refraction and backward-wave media: A Historical Perspective”*  
Tret'yakov, **2005, EPFL Latsis Symposium “Negative Refraction : revisiting electromagnetics from microwaves to optics”, Lausanne, 28.2-2.03.2005.**
- ✓ *“Electrodynamics of Media with simultaneously negative Electric Permittivity and Magnetic Permeability”*,  
Veselago, **1968, Sov. Phys. Usp., 10, 509.**
- ✓ *“Discussion on Negative Refraction and Perfect Lens”*  
Zheng & Zhang, **Progress in Electromagnetics Research Symp., Hangzhou, China.**
- ✓ Y WIKIPEDIA y la WEB, por supuesto...
- ✓ **PARA REIR (...o llorar): PROYECTO DE LEY QUE PROHÍBE Y SANCIONA LA IMPORTACIÓN Y FABRICACIÓN EN CHILE DE PRODUCTOS NANOTECNOLÓGICOS**  
**<http://sil.congreso.cl/docsil/proy5173.doc>**