

A young boy with dark hair and glasses, wearing a patterned scarf, is looking upwards with a surprised expression. He is in a room with ornate, patterned wallpaper. The text 'IL MANTELLO DELL'INVISIBILITA'' is overlaid on the left side of the image.

IL MANTELLO DELL'INVISIBILITA'

di **Filippo Maria Campana**

Premessa:

$$k_0 = \omega/c_0$$

$$k_z = \sqrt{\omega^2/c_0^2 - k_x^2 - k_y^2}$$

$$\epsilon \rightarrow -1$$

L'**interazione tra luce e materia** è la chiave per sfruttare e controllare la luce.

Elettricità, magnetismo e luce creano una danza, convertendosi l'uno nell'altra.

Un **metamateriale** è un materiale rifrangente, in grado di 'piegare' la luce.

Sir **John Pendry**, nel 2006 creò un metamateriale che rendeva un oggetto invisibile alla radiazione elettromagnetica delle microonde: questo venne considerato il primo passo verso un dispositivo mascherante la luce visibile. Da allora in poi, la progettazione di nuovi metamateriali ha permesso la creazione di sistemi per rendere gli oggetti invisibili (dispositivi di occultamento o, all'opposto, per ottenere una risoluzione delle immagini di gran lunga superiore al normale (lenti multifunzione ad altissima risoluzione).

Rendere gli oggetti reali invisibili, non è fantasia ma realtà.

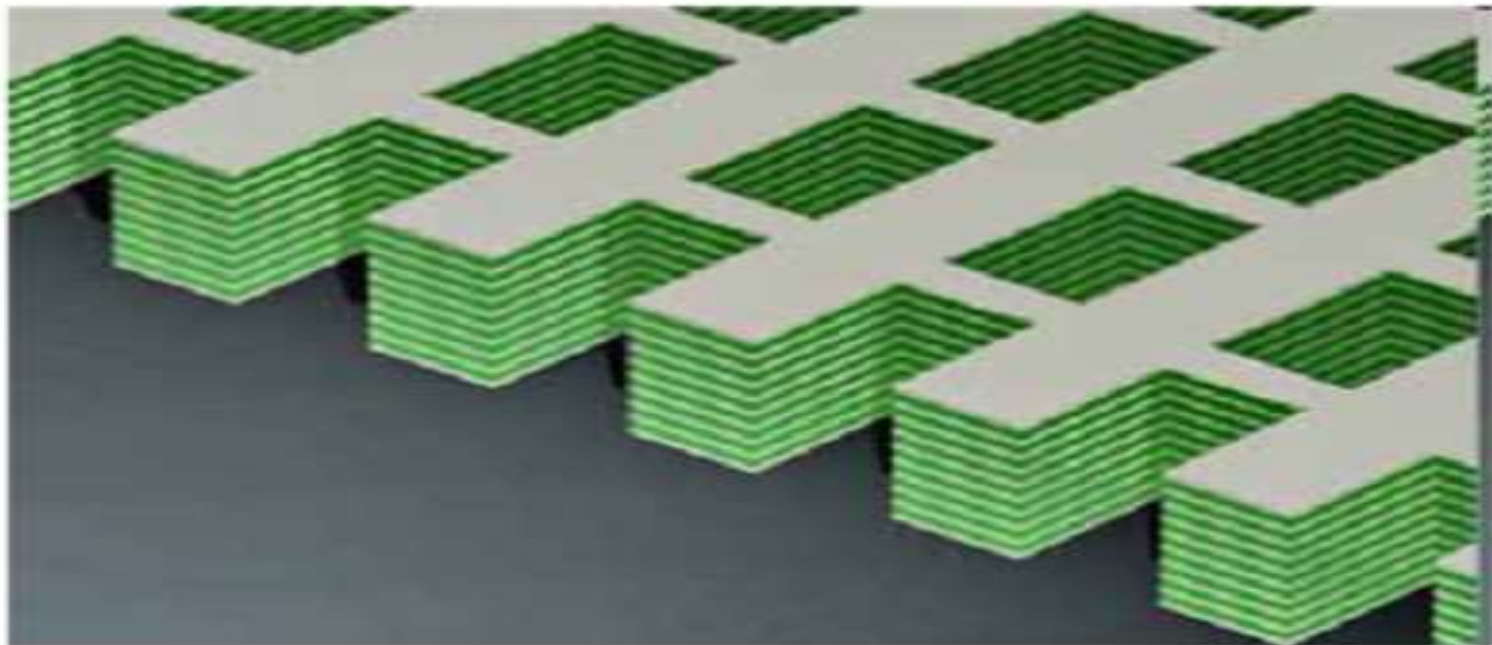
I metamateriali aprono un **nuovo mondo** di progetti evolutivi.

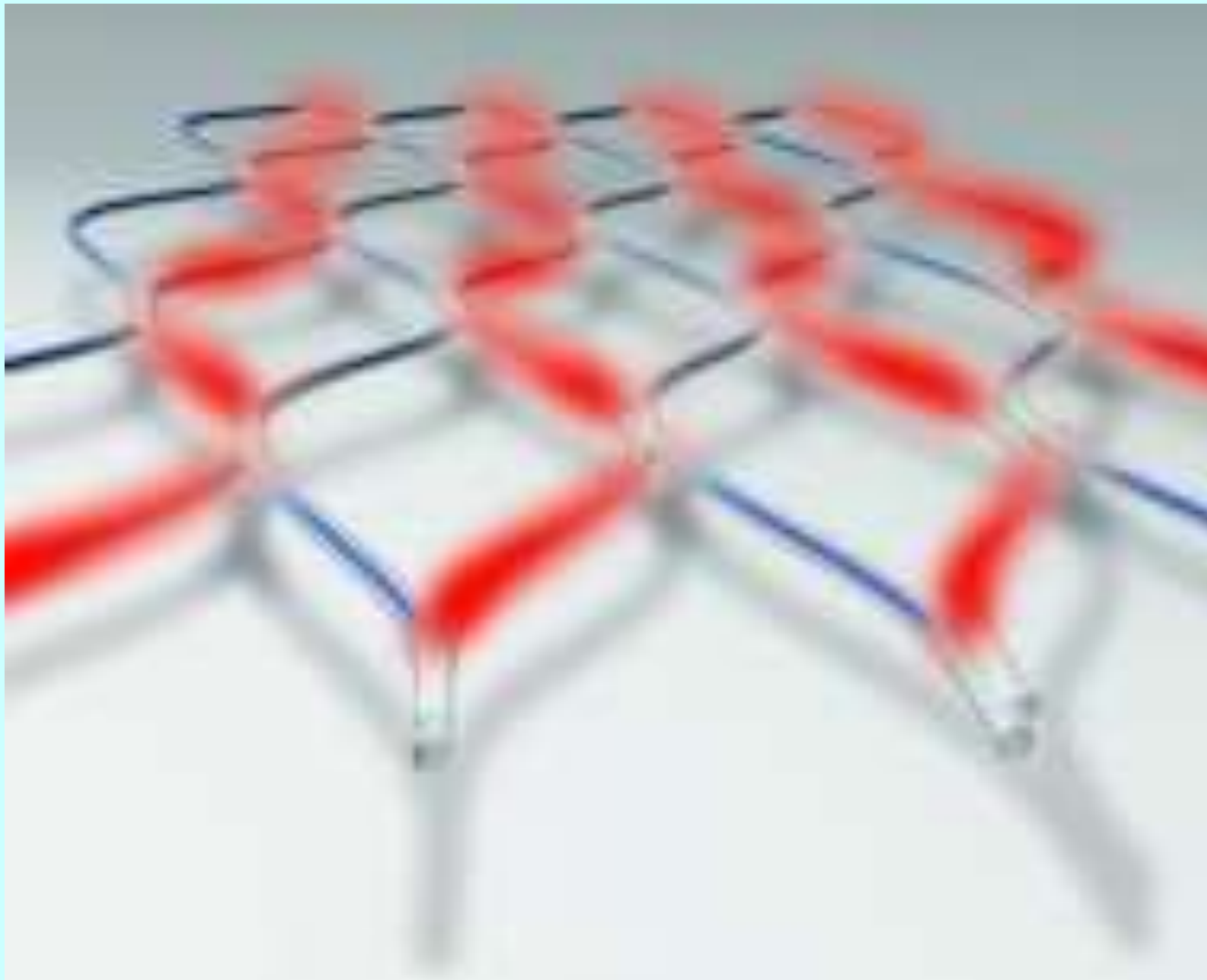


Un **METAMATERIALE** è un materiale **creato artificialmente** con **proprietà peculiari** che lo differenziano dagli altri materiali.

Il termine “**METAMATERIALE**” fu coniato nel 1999 da *Rodger M. Walser* dell'Università del Texas ad Austin, questa la definizione:

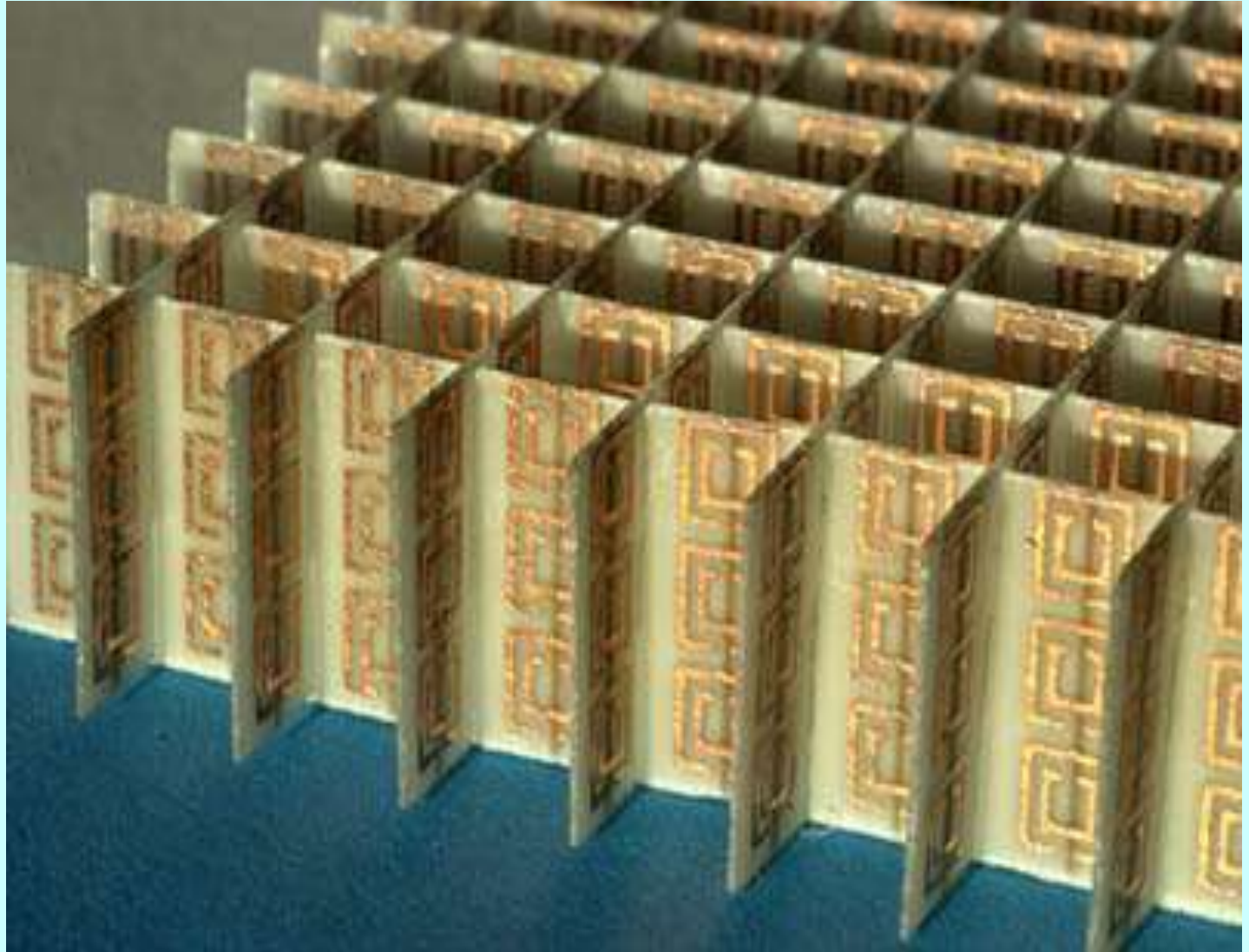
È un composto macroscopico avente una architettura tridimensionale cellulare periodica e sintetica progettata per **produrre** una **combinazione ottimizzata**, non disponibile in natura, di **due o più risposte a una specifica sollecitazione**.



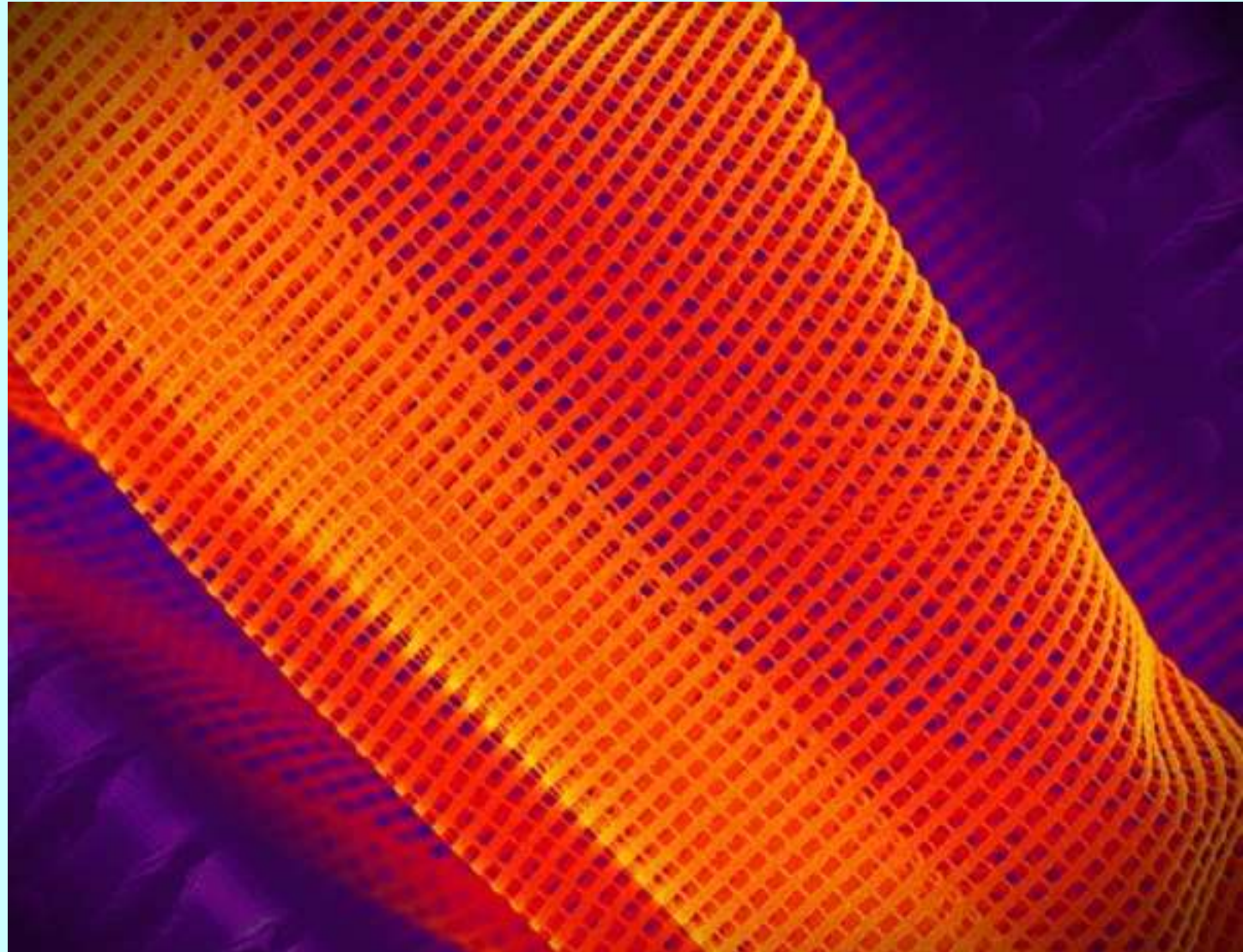


Le **caratteristiche macroscopiche** dipendono soprattutto dalla propria **struttura geometrica realizzativa**, piuttosto che direttamente dalla propria struttura molecolare (cioè dalla composizione).

La **microstruttura interna** di un materiale è altrettanto importante della composizione chimica nella determinazione di molte **proprietà**, tra le quali quelle elettromagnetiche, (ottica e fotonica).

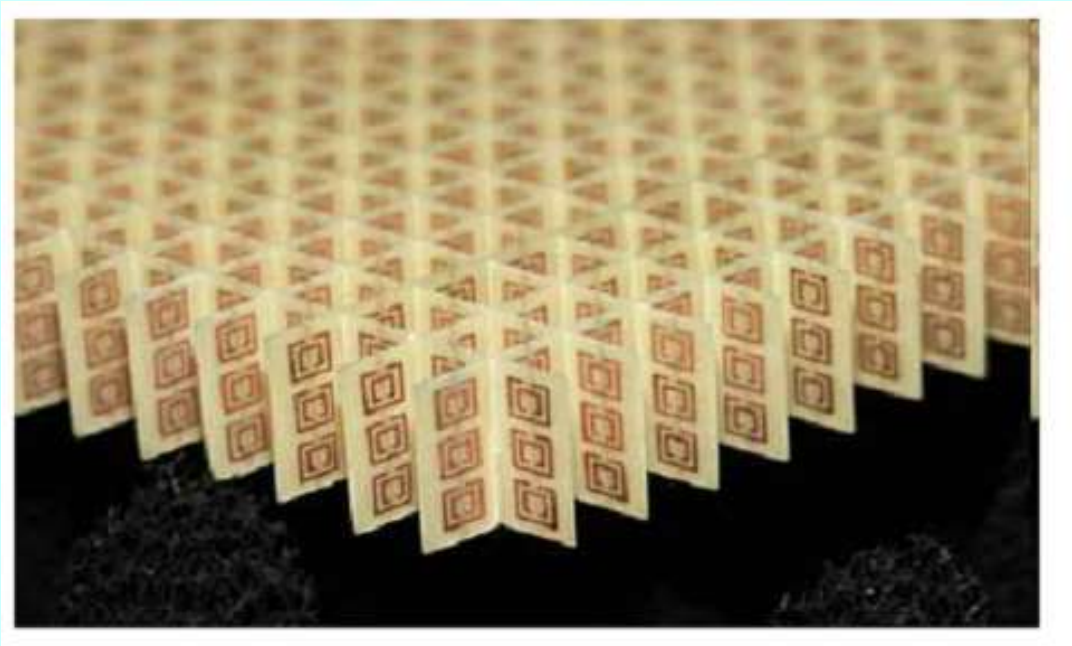


Progettando opportunamente una struttura, in modo **ordinato** e **ripetitivo**, è possibile ottenere, partendo da materiali convenzionali, **proprietà inattese**.



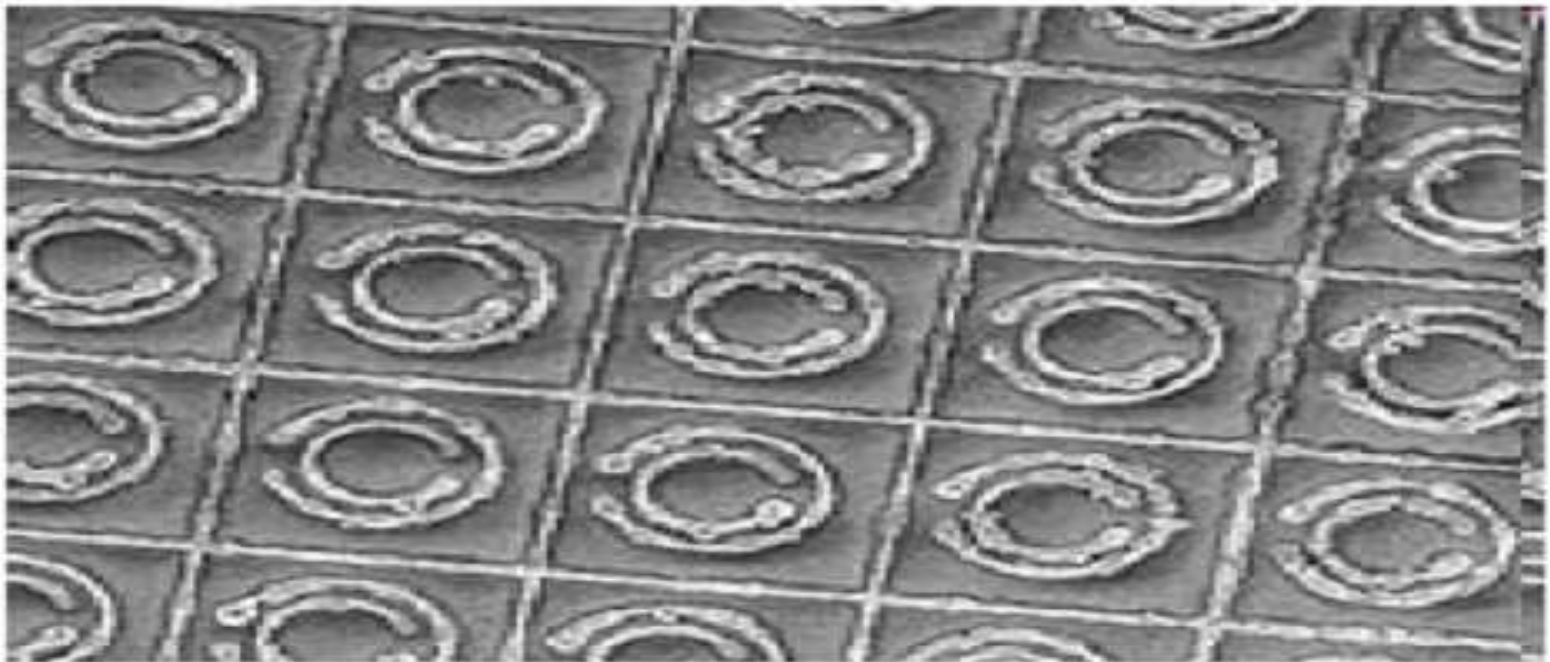
Alla *Duke University Pratt School of Engineering* e all'*Imperial College di Londra* è stato realizzato un **metamateriale con indice di rifrazione negativo rispetto alle microonde** con un array di piccole antenne risonanti metalliche di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda delle microonde.

Il metallo utilizzato come materiale non ha la proprietà dell'indice di rifrazione negativo, ma **la assume come metamateriale avendo quella nuova, particolare struttura geometrica.**



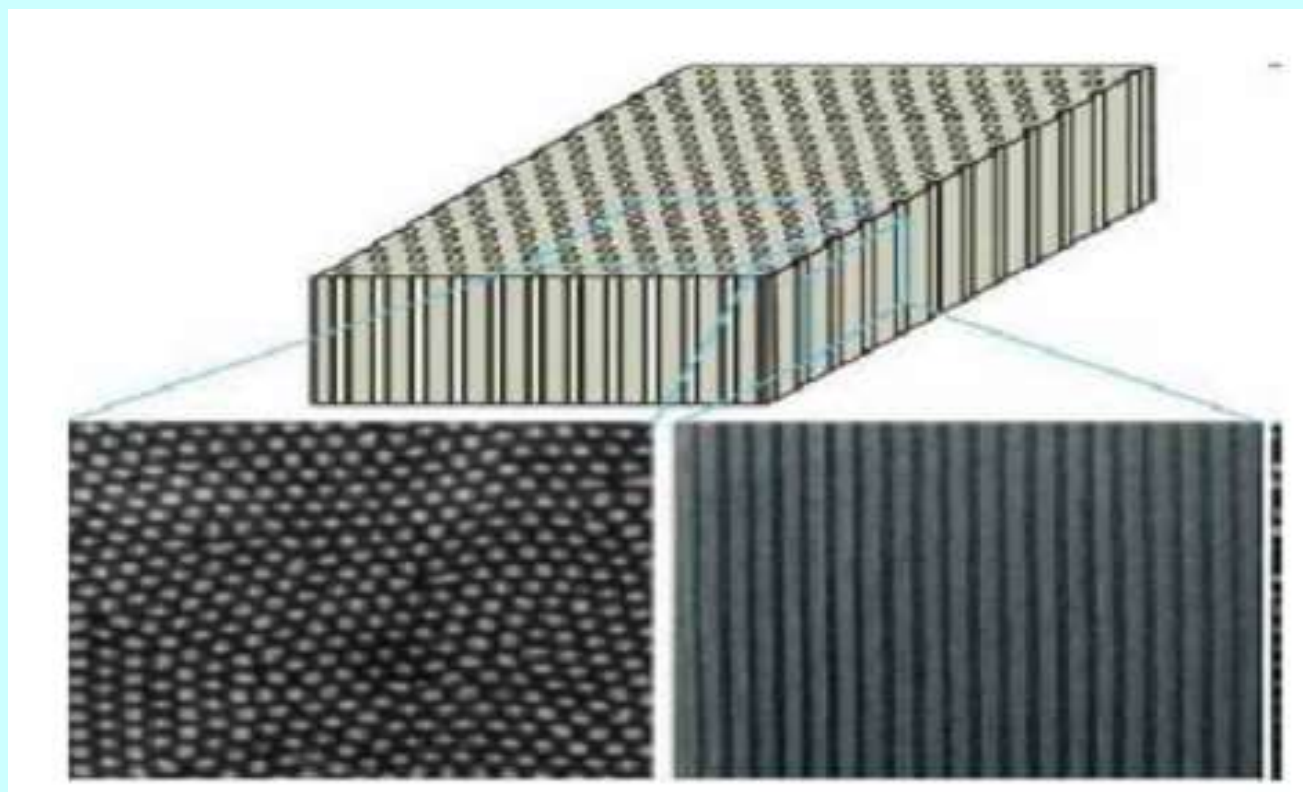
Per personalizzare ancora maggiormente le proprietà della materia, anche il requisito della **composizione chimica può essere modificata**: possiamo, ad esempio, aggiungere piombo al vetro e aumentare il suo indice di rifrazione.

Sfruttando sia la chimica che la microstruttura dei materiali possiamo produrre materiali che possiedono qualità non presenti in natura e di grande potenziale.

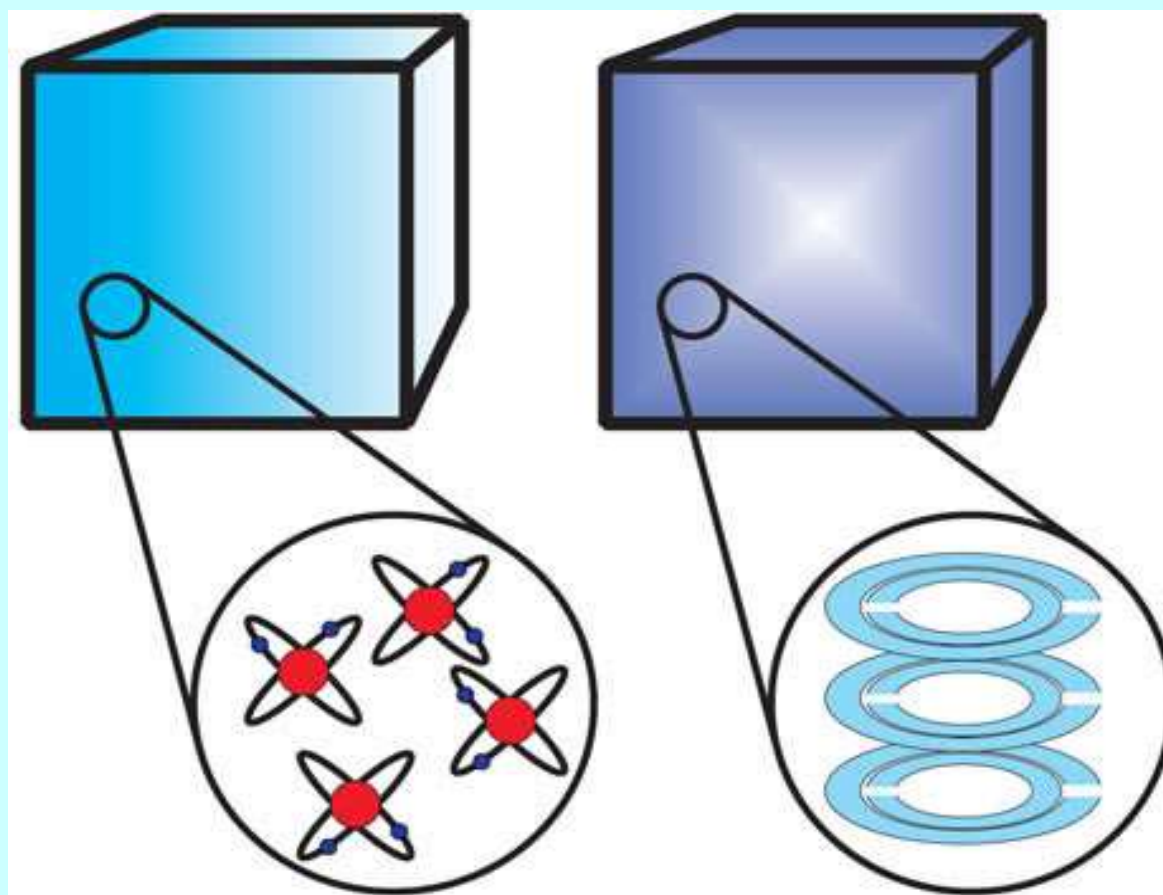


I metamateriali hanno una struttura che possiede una minore lunghezza d'onda della radiazione alla frequenza operativa.

Essi ci danno accesso a una gamma estremamente estesa di proprietà elettromagnetiche.



Un metamateriale interessa le **onde elettromagnetiche**, avendo caratteristiche strutturali più piccole della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica con cui interagisce.



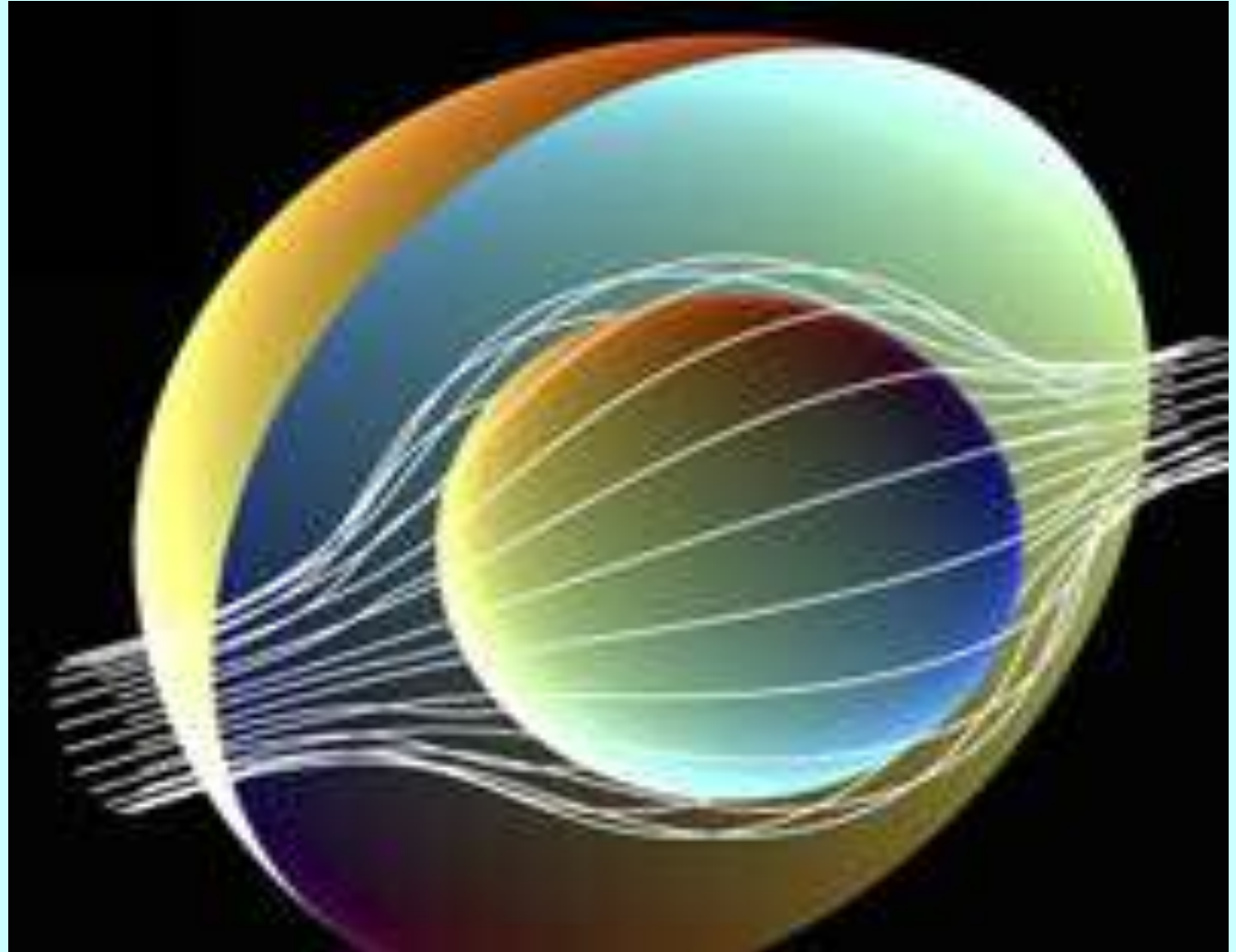
Se un metamateriale si trova a funzionare come materiale omogeneo descritto da un indice di rifrazione, le sue **caratteristiche devono essere più piccole della lunghezza d'onda.**

Per la **luce visibile**, la cui la lunghezza d'onda è minore di un micrometro (560 nanometri per la luce del sole), *le strutture sono generalmente la metà di questa dimensione o più piccole*, meno di **280 nanometri**.

Per le **microonde**, le strutture necessitano una dimensione dell'ordine di un **decimetro**.

I metamateriali a frequenza delle microonde sono di solito artificiali, costruiti come apparati (*arrays*) di elementi elettricamente conduttivi (come doppiino di filo metallico) che hanno caratteristiche induttive e capacitive idonee.

Possiamo ipotizzare e sperimentare la costruzione di un *materiale che modifica la curvatura della luce* che lo circonda. Ottenuto un materiale del genere, in linea di principio, possiamo costruire un **mantello dell'invisibilità**.



Il più grande potenziale dei metamateriali è la possibilità di creare una **struttura con un indice di rifrazione negativo**, poiché questa proprietà non si trova in natura.

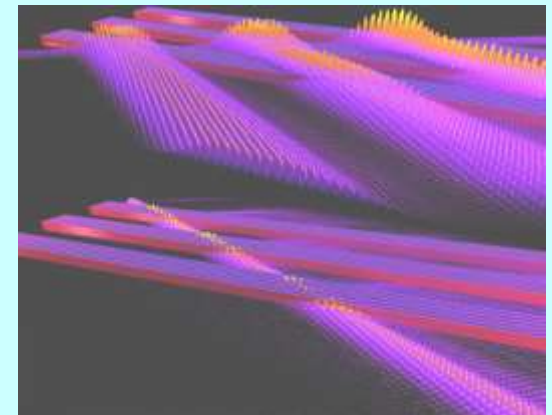
Quasi tutti i materiali incontrati in ottica, come vetro o acqua, hanno valori positivi sia per la **permittività** ϵ che per la **permeabilità magnetica** μ .

Molti metalli (come argento e oro) hanno ϵ negativo alle lunghezze d'onda visibili.

Un materiale avente ϵ o μ (ma non entrambi) negativi, è opaco alla radiazione elettromagnetica.

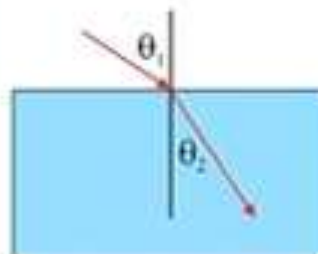
N può essere determinato da $N = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$.

↖
indice di rifrazione





Refraction of Light – Snell/Descartes



Willebrord Snell van Roijen
(or Snellius) (1580- 1626)

René Descartes (1596 –1650)

The Snell-Descartes law of refraction:

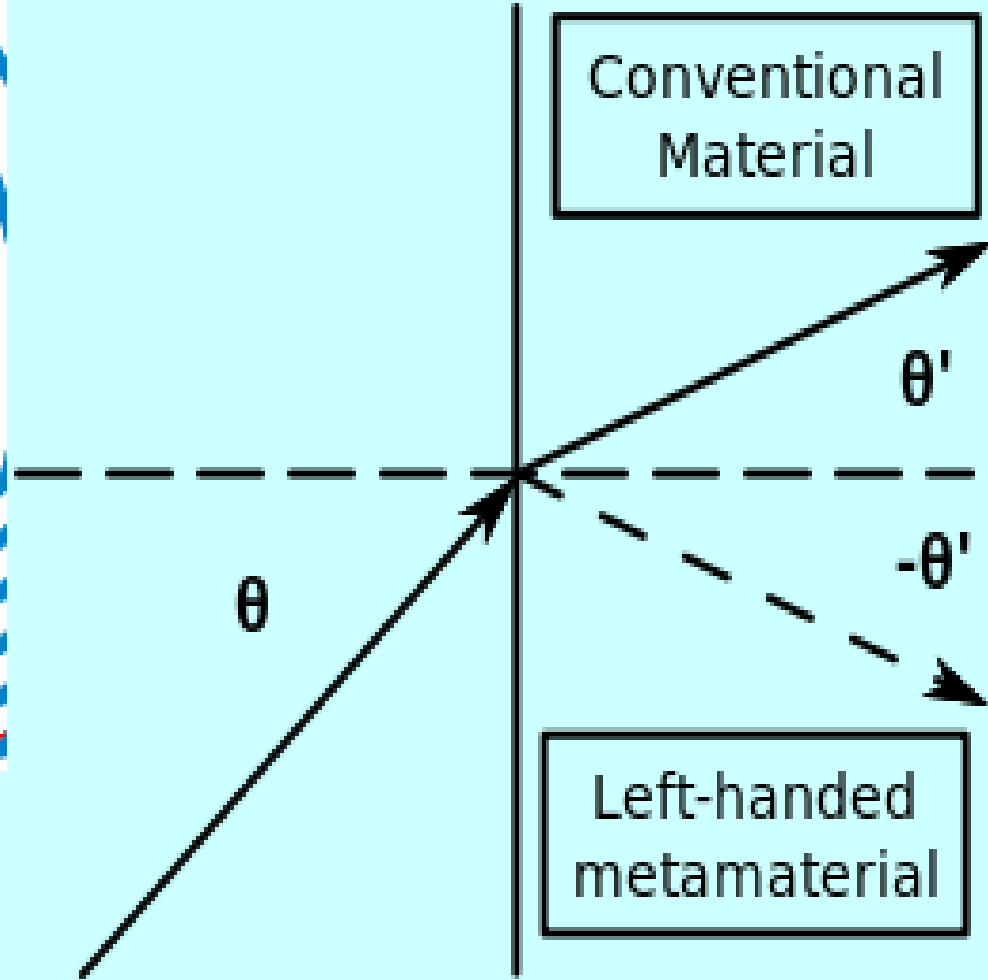
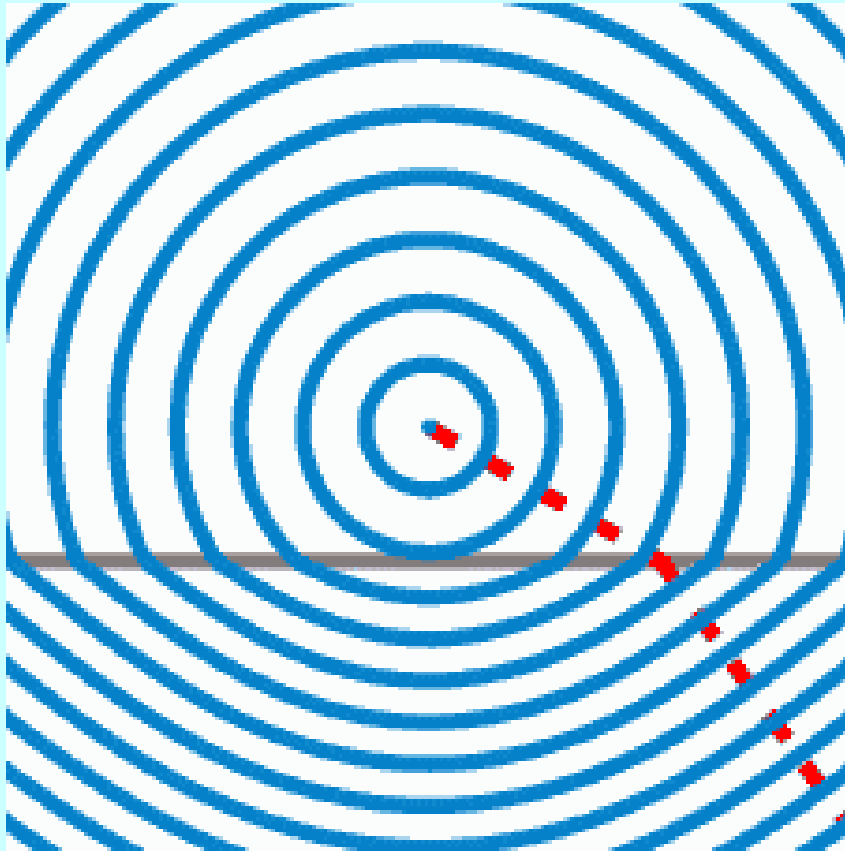
$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

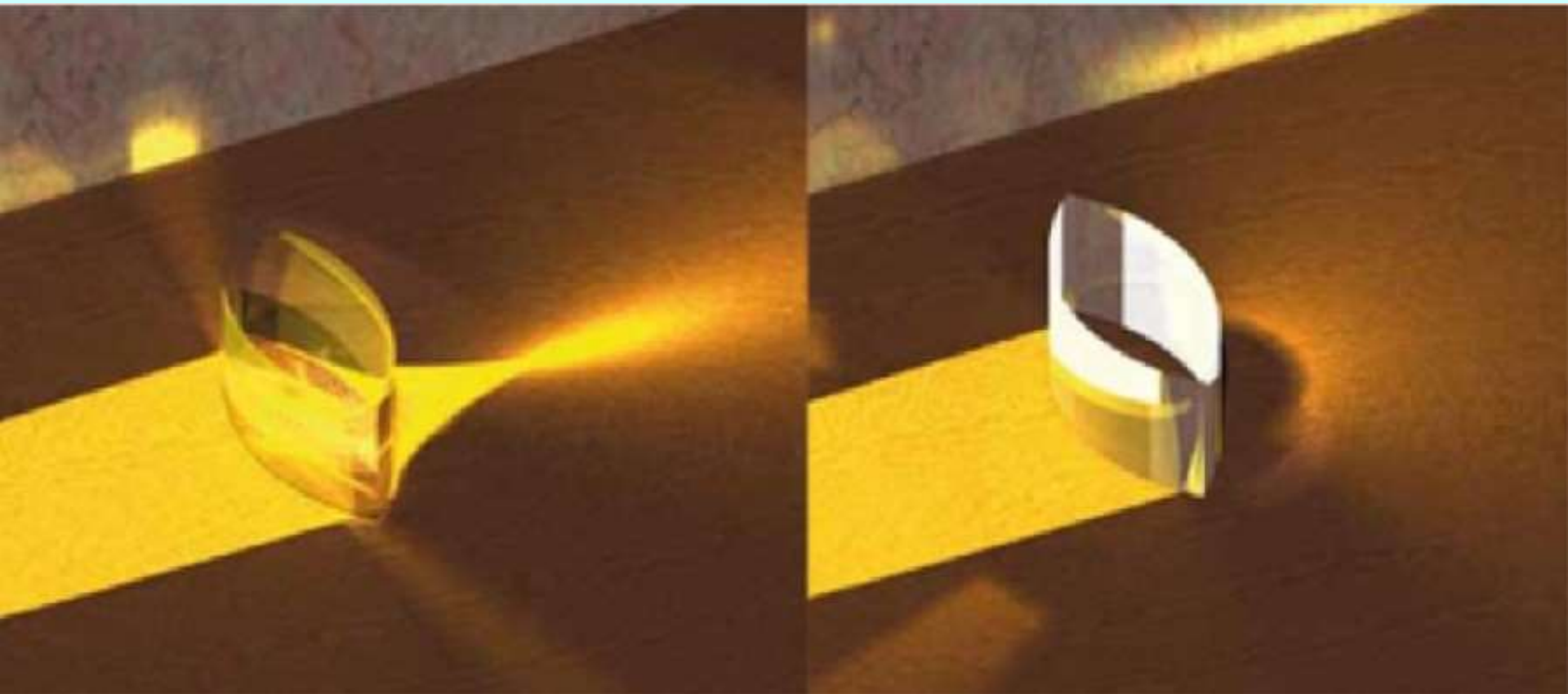
where n is the refractive index of the material

Imperial College
© Imperial College 2013

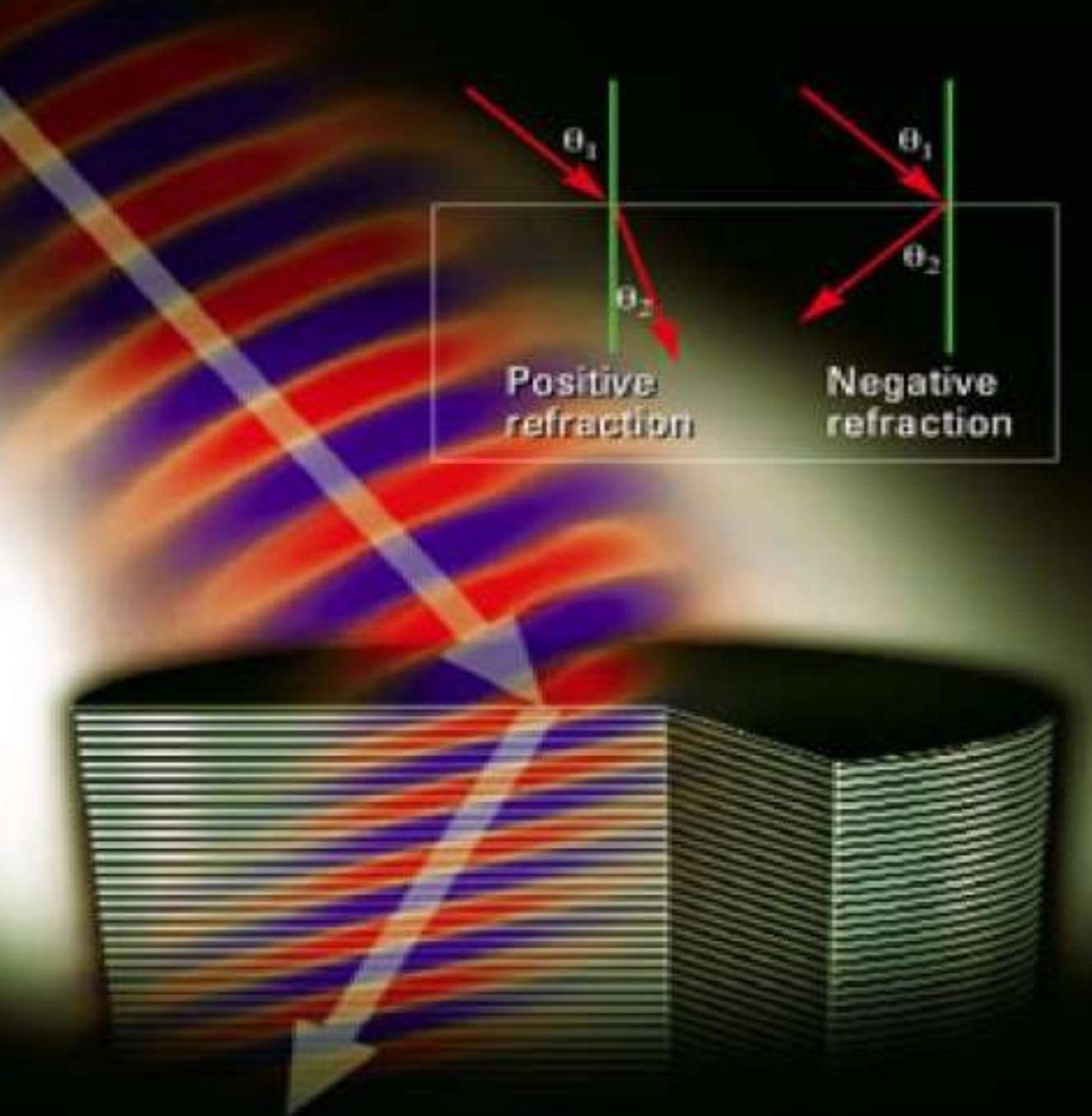
BERGAMO SCIENZA
XI EDIZIONE 4-20 OTTOBRE 2013

IL MANTELLO DELL'INVISIBILITÀ





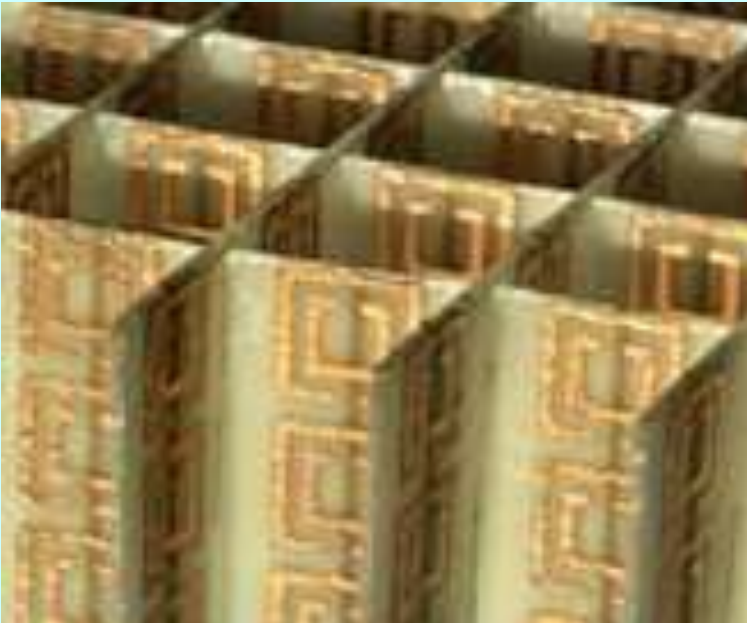
Confronto tra una lente biconvessa con n positivo (a sinistra) e un'altra con n negativo (a destra)



La spiegazione è legata al valore negativo del seno dell'angolo di rifrazione che porta a un angolo di rifrazione negativo orientato in modo simmetrico rispetto ai mezzi con indice di rifrazione positivo.

La luce viene rifratta in modo negativo in materie dove sia ϵ che μ sono **negativi** e ciò è stato confermato già nel 1968 dal professor Victor Veselago,

Fondamentale è stata la pubblicazione del primo esperimento di rifrazione negativa, RA Shelby, DR Smith, S. Schultz, Science 292, 77 (2001).



Questa è una struttura che **rifrange negativamente**, creata al UCSD (The University California, San Diego) sfruttando il concetto di 'split ring resonator'.

Essa è in grado di dare una risposta magnetica negativa e una risposta elettrica negativa.

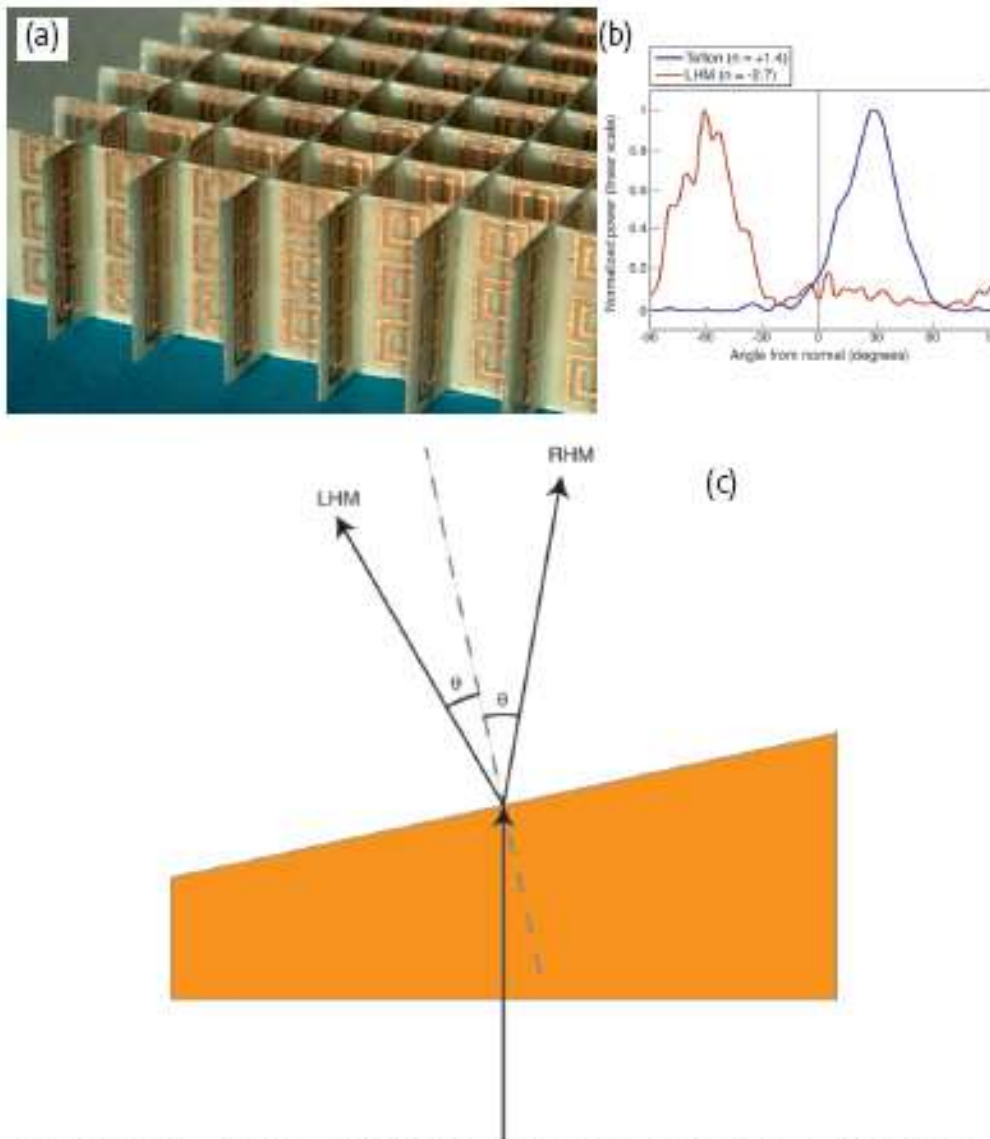


Fig. 3 (a) An NI MM formed by SRRs and wires deposited lithographically on opposite sides of a standard circuit board. The height of the structure is 1 cm. (b) The power detected as a function of angle in a Snell's law experiment performed on a Teflon sample (blue curve) and an NI sample (red curve). (c) A schematic showing the geometry used to experimentally verify the NI of refraction.

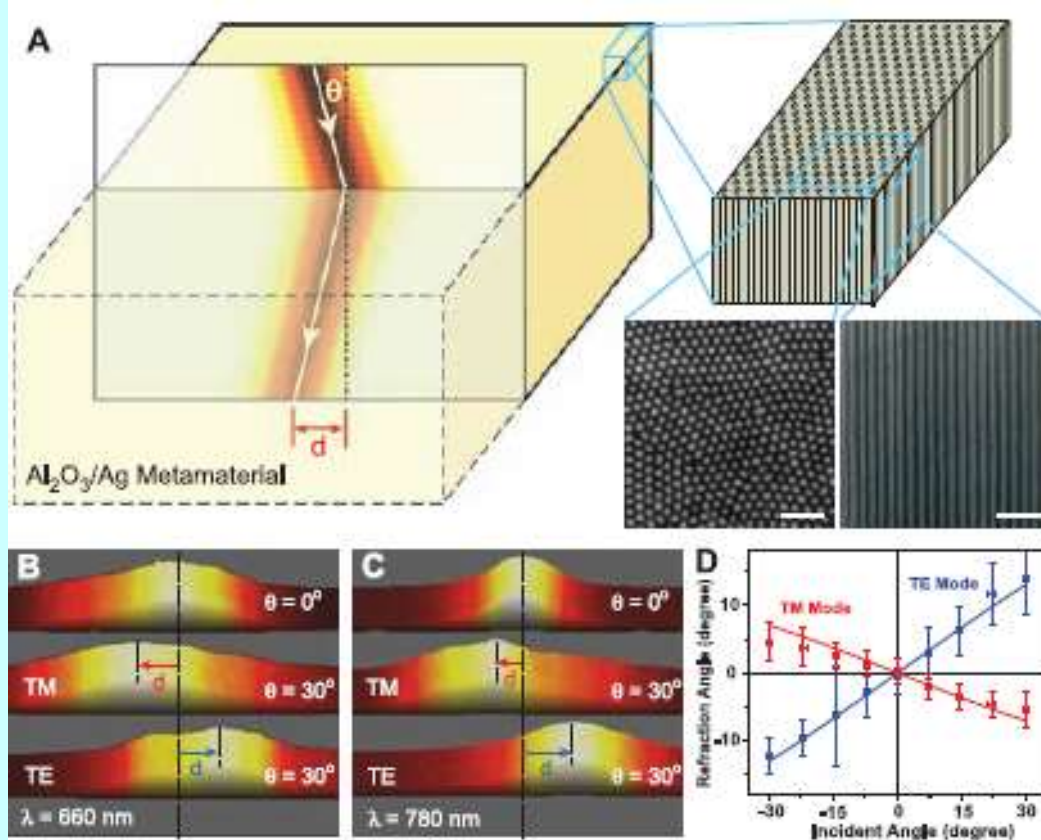
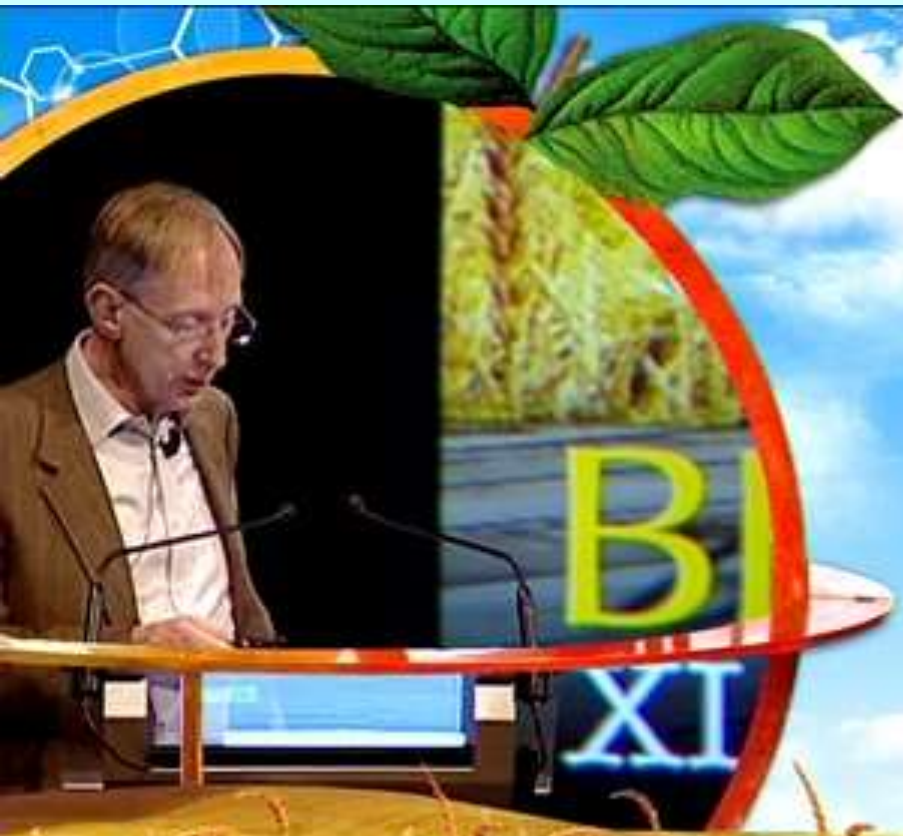


Fig. 1. Negative refraction in bulk metamaterial at visible frequencies. **(A)** (Left) Schematic of negative refraction from air into the silver nanowire metamaterials. (Right) Nanowires embedded in an alumina matrix, as well as scanning electron microscopy images showing the top and side view of the nanowires (60-nm wire diameter and 110-nm center-to-center distance). The scale bars indicate 500 nm. Measured beam intensity at the existing surface of the metamaterial slab at the wavelength of 660 nm **(B)** and 780 nm **(C)**. The lateral displacement (d) of TM polarized light shows the negative refraction in the metamaterial at both wavelengths, whereas TE light undergoes positive refraction. The horizontal sizes of **(B)** and **(C)** are 5 μm and 12 μm , respectively. **(D)** The dependence of refraction angles on incident angles and polarizations at 780-nm wavelength. The negative refraction occurs for broad incident angles. The experiment data agree well with calculations (solid curves) using the effective medium theory. The sample thicknesses in **(B)** and **(C)** are 4.5 μm and 11 μm , respectively.

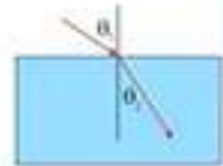


Transformation Optics

a new vision for electromagnetism & how it developed

The old optics

- ray approximation
- refraction at discrete interfaces
- limited material properties



the new vision

- beyond the ray approximation
- near field optics i.e. manipulate **D** and **B** as well as the rays
- sub wavelength optics
- exploit the potential of metamaterials



BERGAMO SCIENZA
XI EDIZIONE 4-20 OTTOBRE 2013

IL MANTELLO DELL'INVISIBILITÀ

Making Light Flow Like Water

Distort the coordinate system, $(x, y, z) \rightarrow (u, v, w)$, and the trajectory of any rays of light as well. A coordinate transformation implies a refractive index change.

Then use transformation theory to calculate the refractive index that gives the distorted ray trajectories.

$$n' = n g(u, v, w)$$

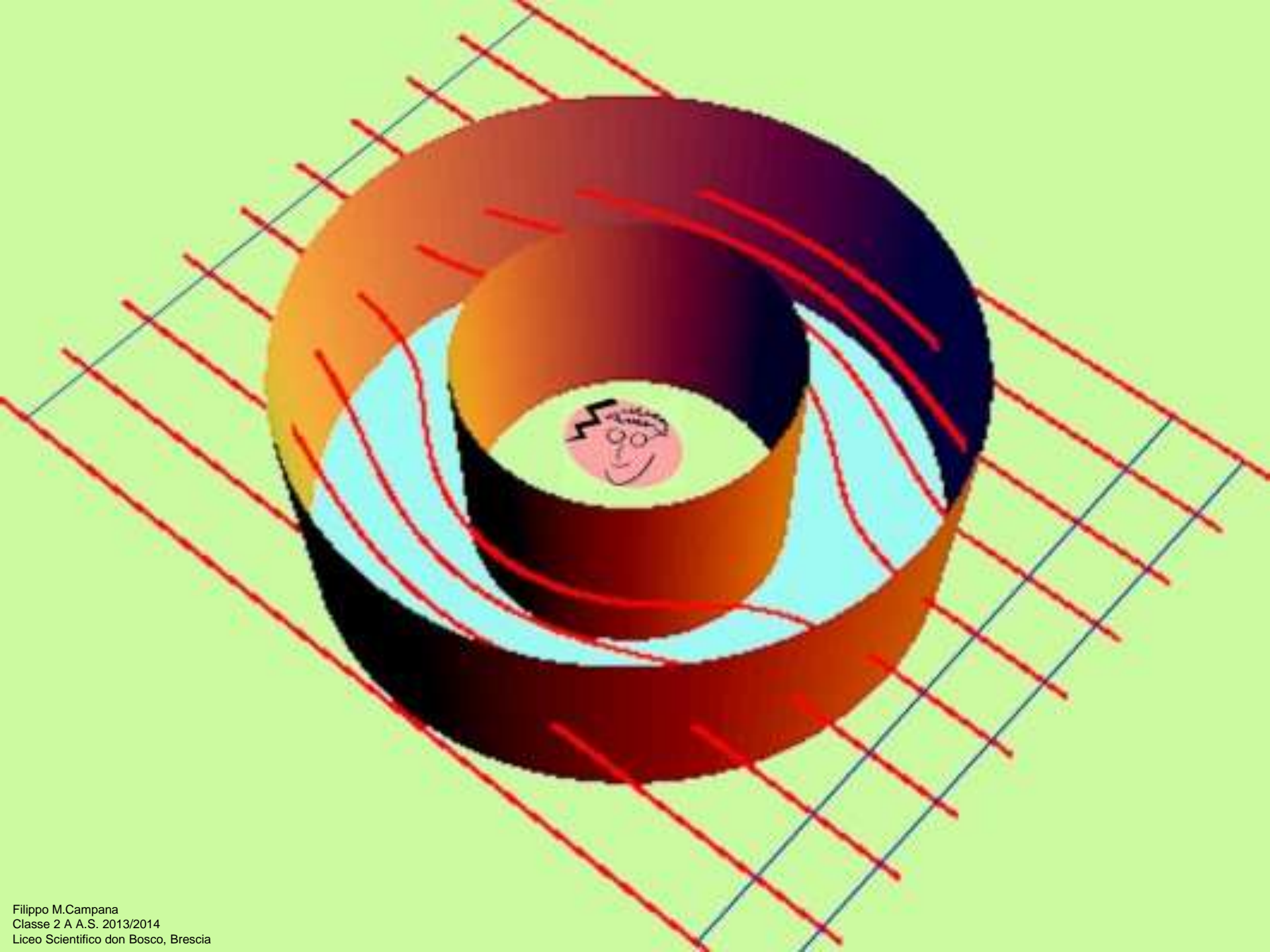
where $g(u, v, w)$ is obtained from the coordinate transformation.

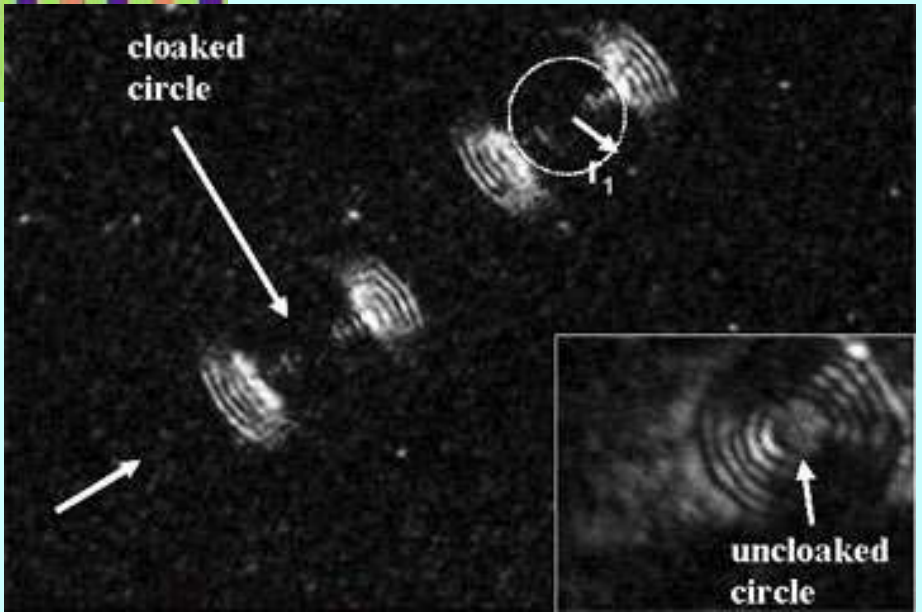
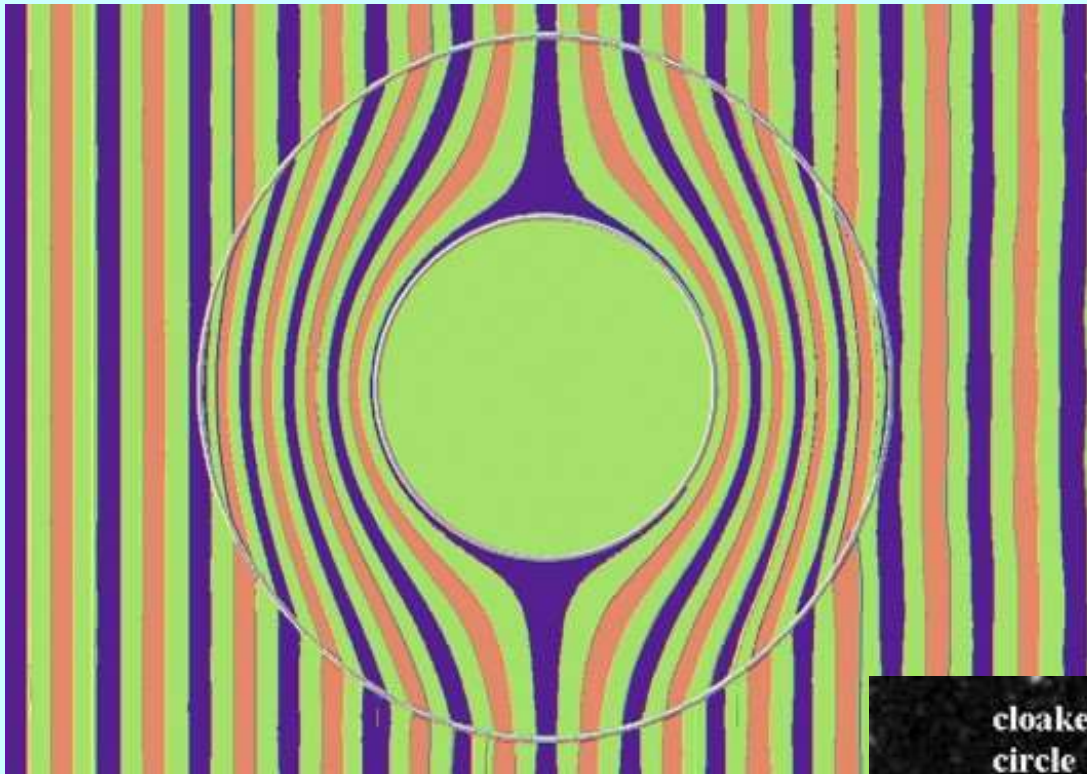
Imperial College
London

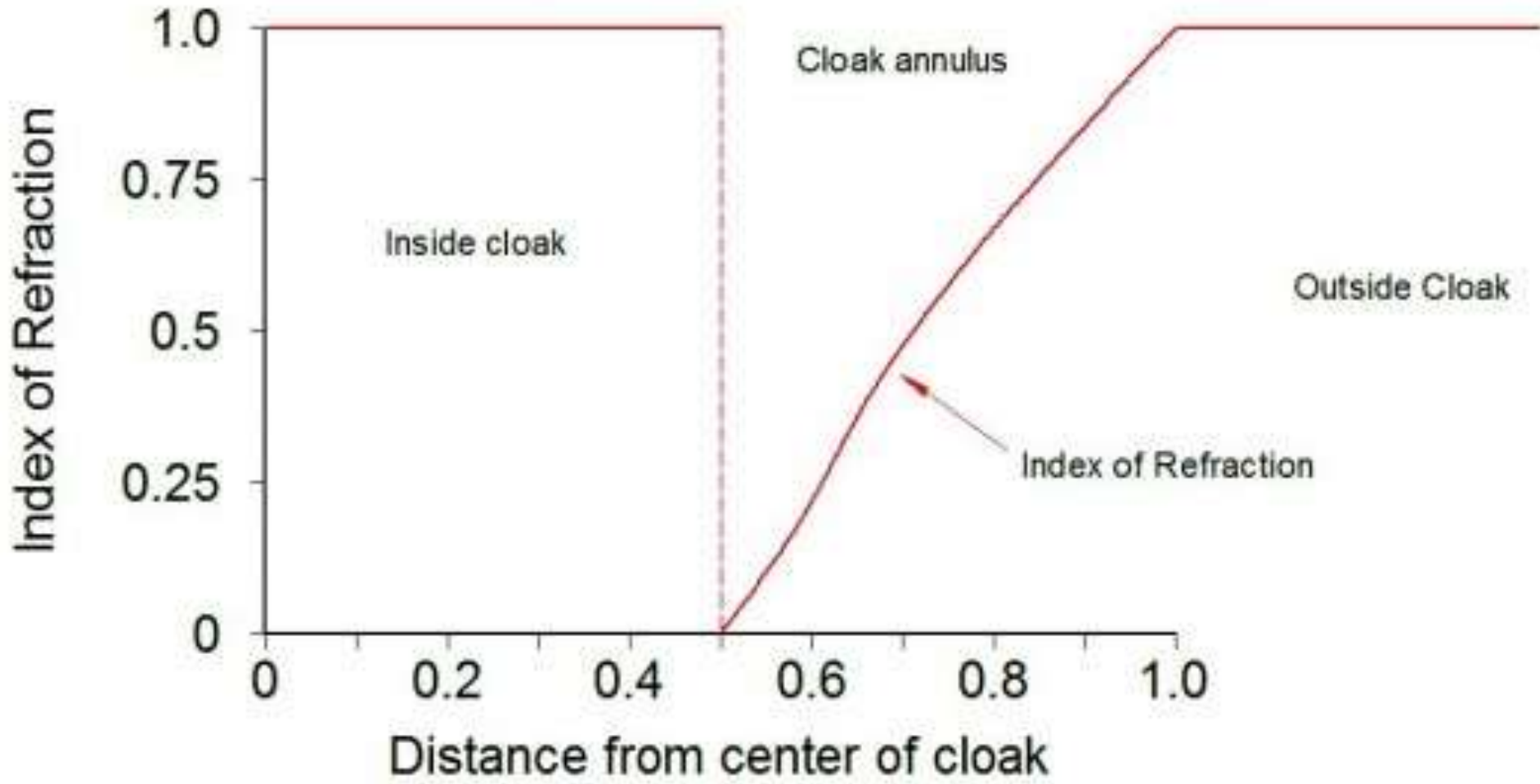
BERGAMO SCIENZA
XI EDIZIONE 4-20 OTTOBRE 2013

IL MANTELLO DELL'INVISIBILITÀ

Si tratta di un'**OTTICA TRASFORMAZIONALE**: se siamo in grado di schiacciare lo spazio, riusciremo a **distorcere la direzione della luce**.



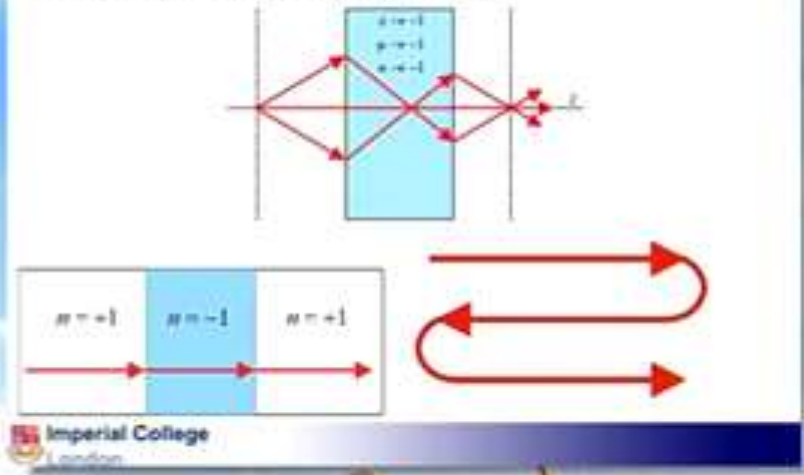






Transformation optics & negative refraction

The Veselago lens can be understood in terms of transformation optics if we allow "space" to take on a negative quality i.e. space can double back on itself so that a given event exist on several manifolds:



BERGAMO SCIENZA
XI EDIZIONE 4-20 OTTOBRE 2013

IL MANTELLO DELL'INVISIBILITÀ

Dobbiamo creare un **gradiente**, per fare deviare la luce come noi desideriamo.

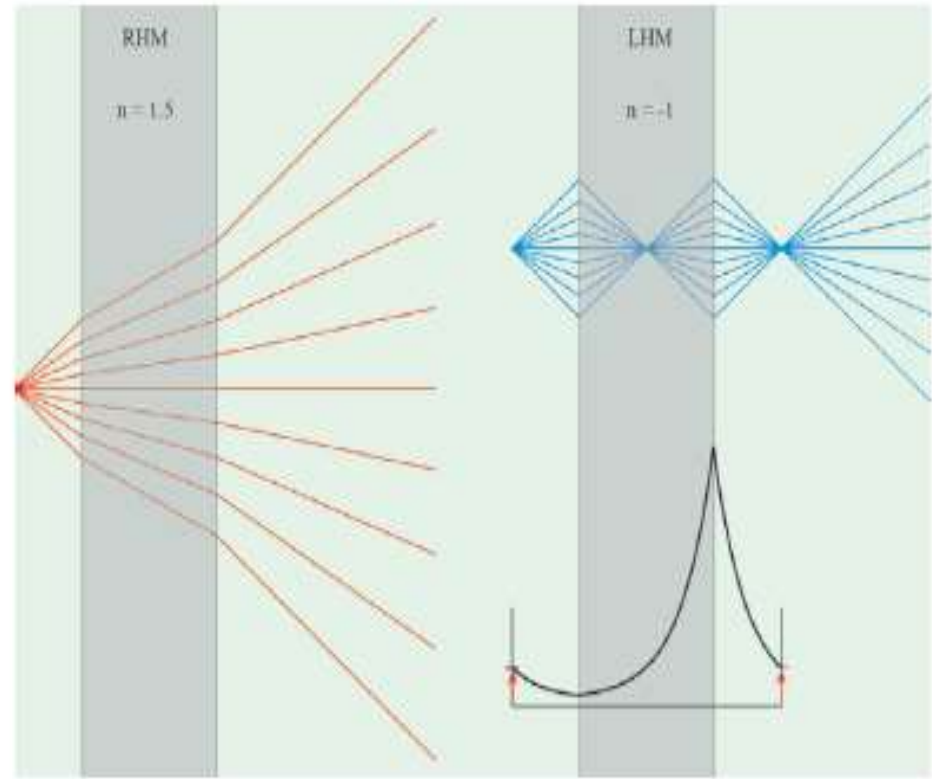
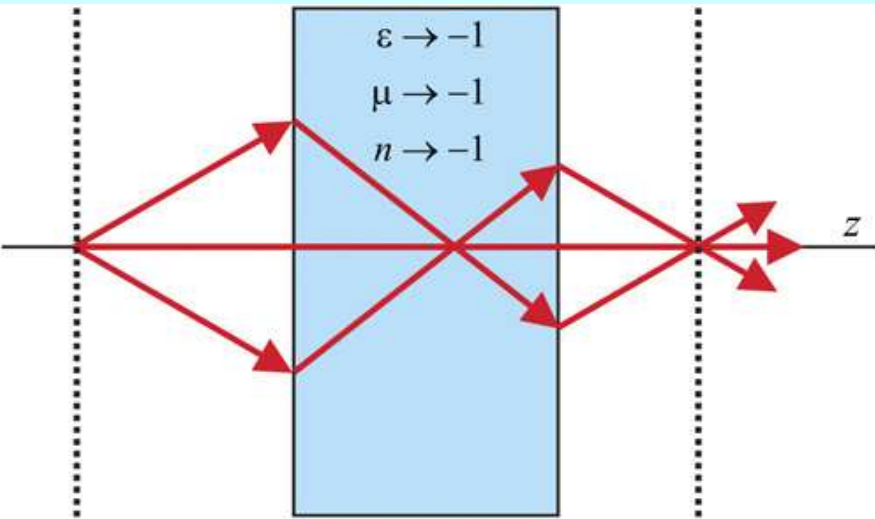


Fig. 1 A normal slab of flat glass (gray) is shown on the left illuminated by a point source (red lines). The rays diverge and refract at the interface according to Snell's Law (eq 2). On the right, a flat slab of NI material is shown with rays from a point source (blue lines) incident upon it. In this case the rays refract at the interface, again governed by Snell's law, but this time with an index of $n = -1$. Also shown on the bottom right is the evanescent component (black line) of this point source, which is also focused by this unique lens.



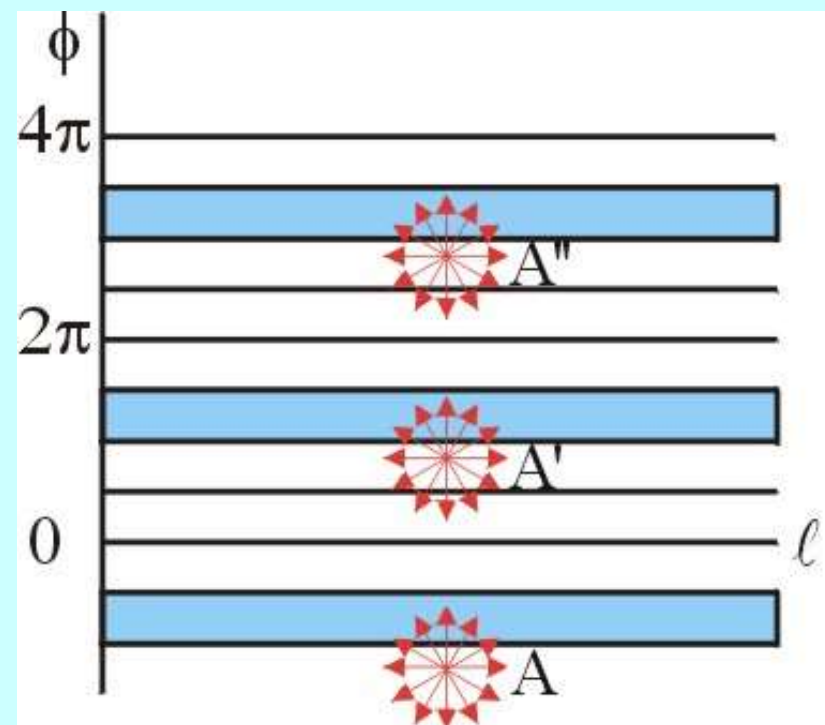
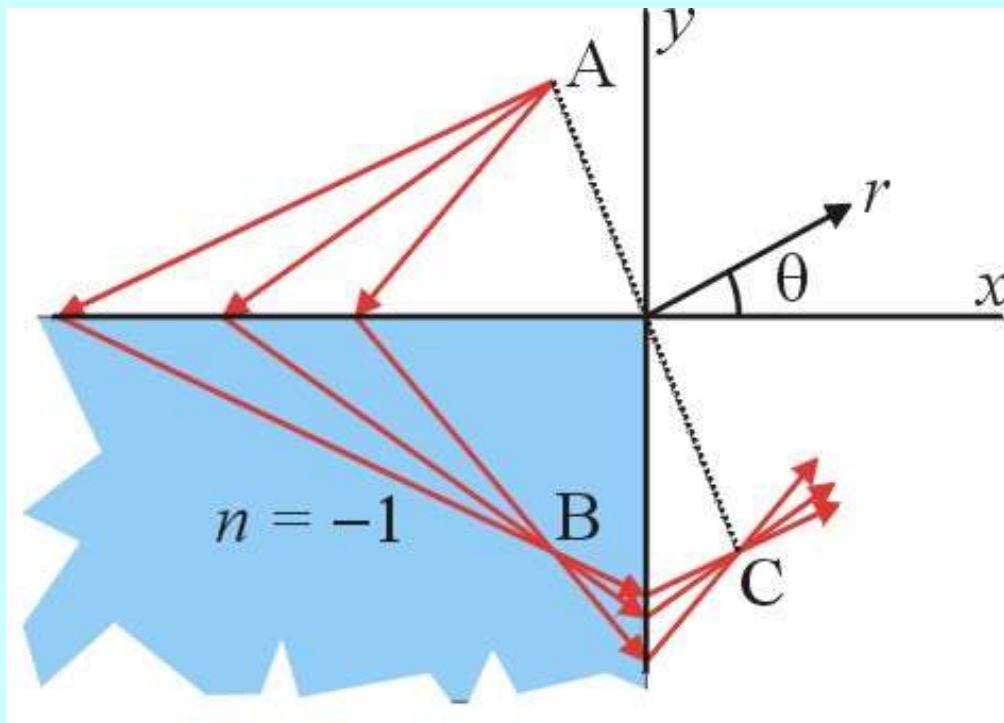
No Cloak

Perfect Cloak

Blue Cloak?

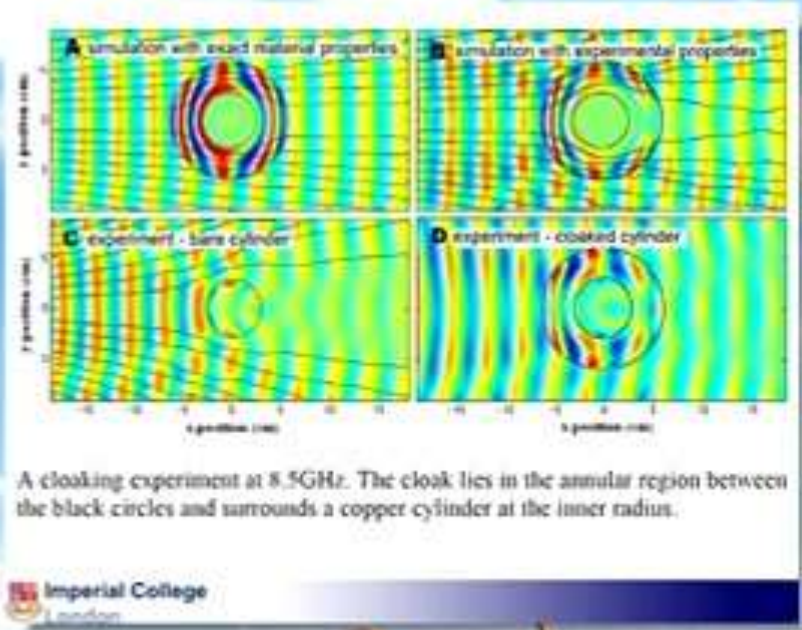
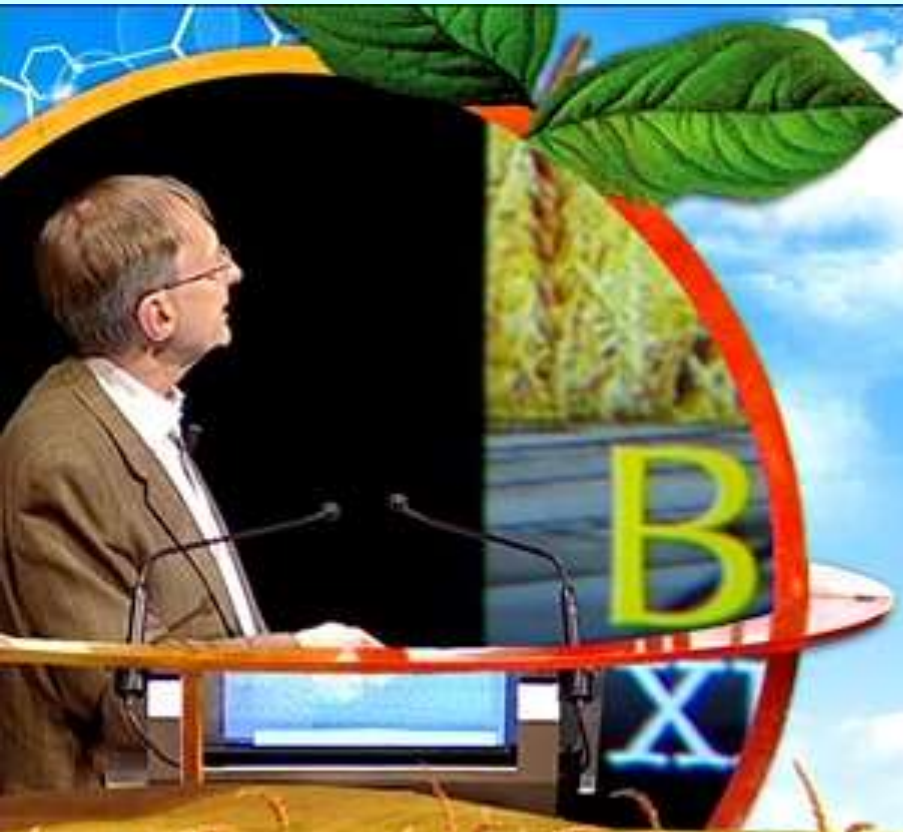
Per costruire un mantello dell'invisibilità, sono 2 gli obiettivi che dobbiamo raggiungere:

- a) che la **radiazione non raggiunga l'oggetto nascosto**
- b) che **l'oggetto nascosto non getti ombra**.



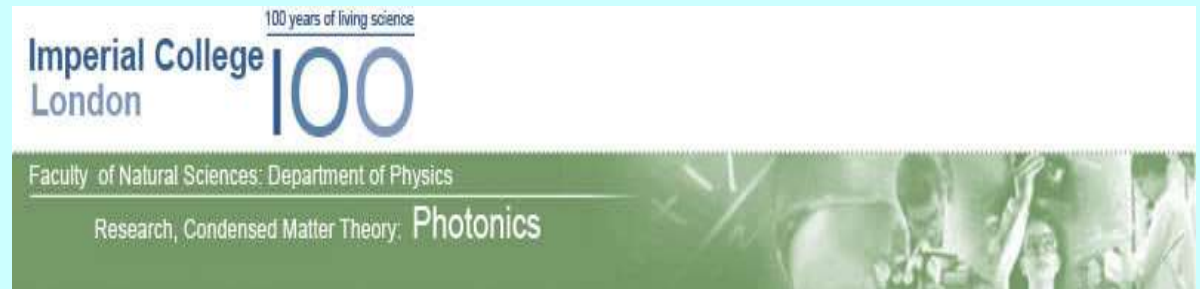


Con un fronte d'onda deviato perfettamente, non ho neppure l'ombra e vedo solo ciò che è dietro all'oggetto.





La Duke University e l'Imperial College London sono attualmente impegnati nella ricerca di metamateriali in questo ambito e sono **riusciti a nascondere** un oggetto allo spettro delle microonde utilizzando speciali anelli concentrici; le microonde hanno subito l'influenza dalla presenza dell'oggetto nascosto (swiss roll).



John Pendry

room 808 Blackett

tel.: +44-20-7594-7606

FAX.: +44-20-7594-7604

email: j.pendry@imperial.ac.uk

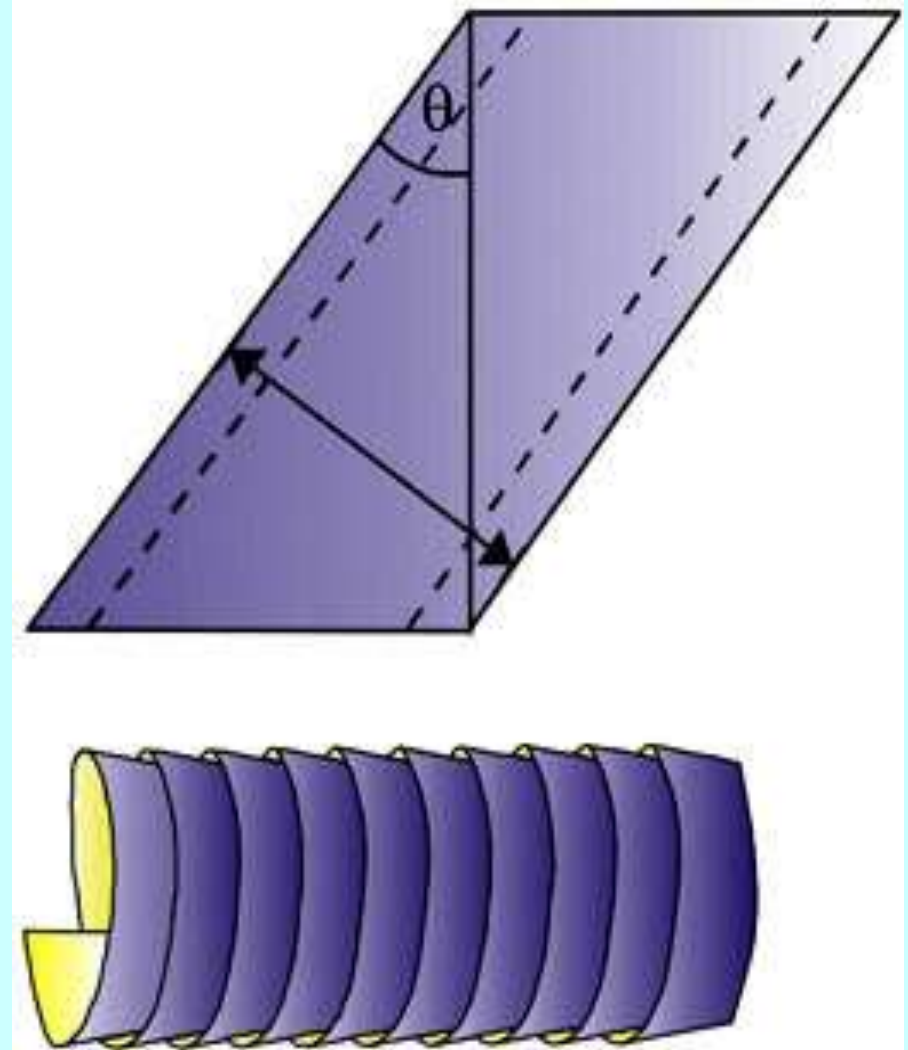


Alcuni metamateriali sono progettati per lavorare nella regione MHz dello spettro. Risonanze a frequenze così basse richiedono alta capacità e induttanza e ciò si è realizzato nella struttura " **Swiss roll** " una struttura chirale ideata da Pendry, che comprende un nastro d'oro avvolto ad elica intorno ad un cilindro.



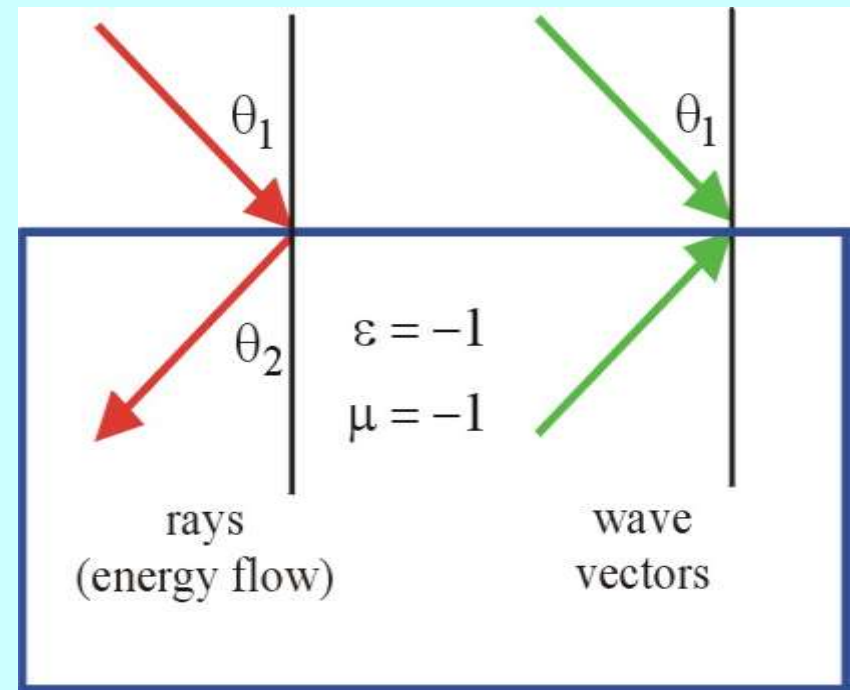
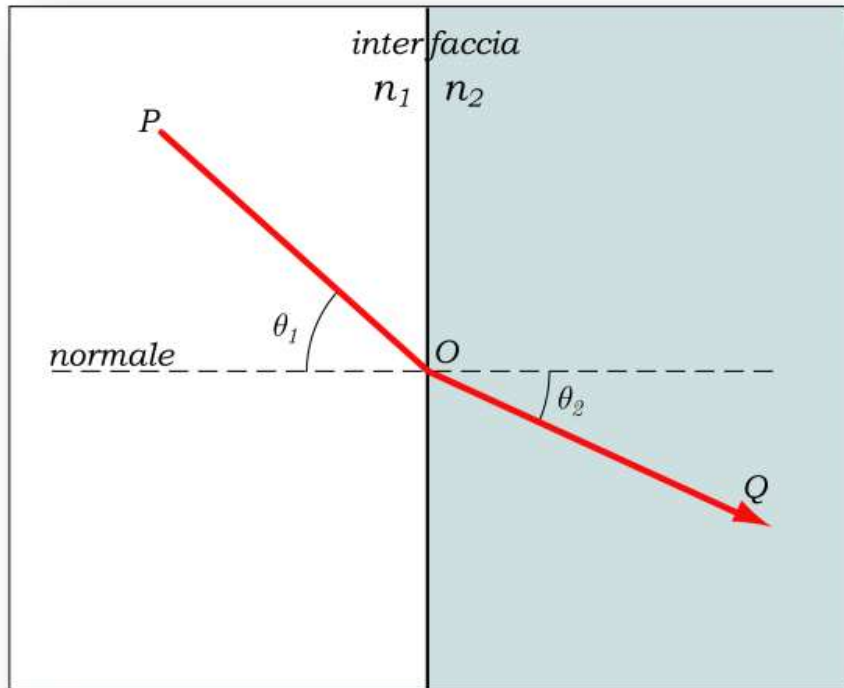
SWISS ROLL di Pendry:

I materiali naturali sono fatti di atomi, dipoli. Questi dipoli modificano la velocità della luce per un fattore n (l'indice di rifrazione). L'anello e il filo sono dipoli atomici: il filo è un atomo ferroelettrico, mentre l'anello è l'induttore L e la sezione aperta un condensatore C . L'anello perciò come un intero agisce da *circuito LC*. Quando il campo elettromagnetico passa attraverso l'anello, viene a crearsi una corrente indotta e il campo generato risulta perpendicolare al campo magnetico della luce. La risonanza magnetica risulta con una permeabilità negativa, come pure l'indice di rifrazione. La lente non è veramente piatta, poiché la capacità della struttura impone un'inclinazione per l'induzione elettrica.



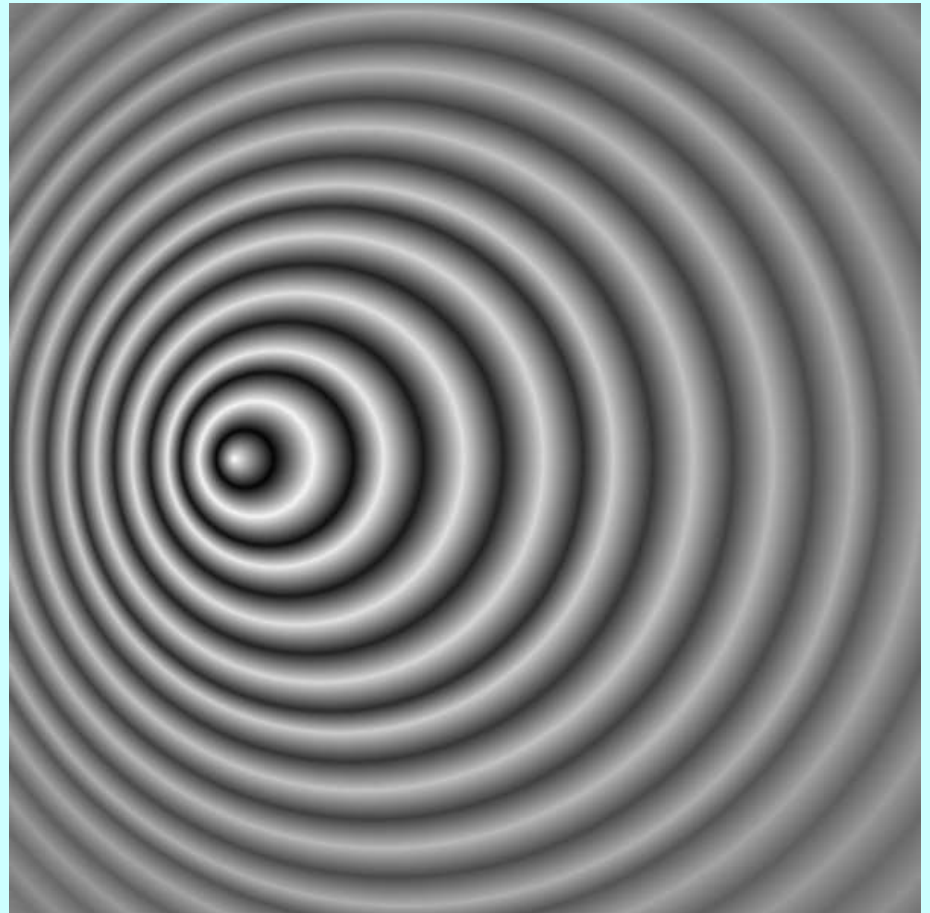
I metamateriali con \mathbf{N} negativo hanno numerose proprietà *sorprendenti*:

1) La **Legge di Snell**: i raggi saranno rifratti sullo *stesso* lato della normale penetrante il materiale.



I metamateriali con n negativo hanno numerose proprietà *sorprendenti*:

2) L'**effetto Doppler** è rovesciato: una sorgente di luce muovendosi verso l'osservatore sembra ridurre la sua frequenza.



I metamateriali con ϵ negativo hanno numerose proprietà *sorprendenti*:

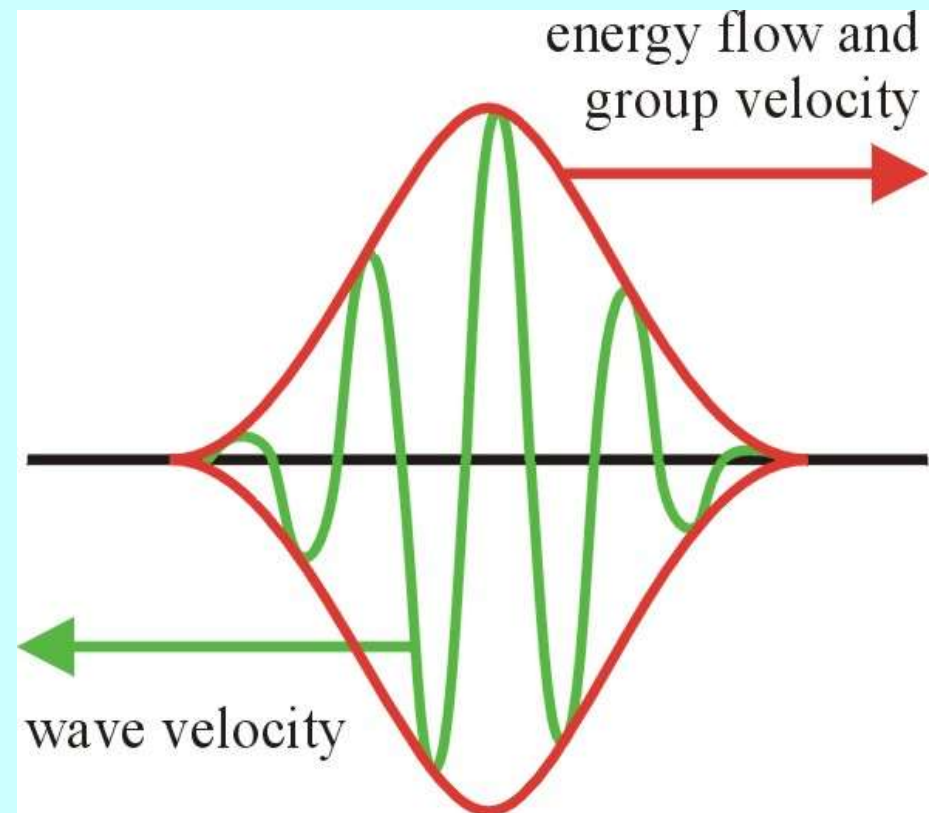
3) emettono la **radiazione elettromagnetica di Cherenkov**: le molecole, polarizzate da una particella carica in moto che le attraversa, emettono una luce azzurrognola e il mezzo attraversato non è "trasparente" alla luce visibile.



I metamateriali con ϵ negativo hanno numerose proprietà *sorprendenti*:

4) Il **vettore di Poynting** di media durata, flusso di energia associato alla propagazione del campo elettromagnetico, è **antiparallelo alla velocità di fase**.

Questo significa che al contrario di un materiale *right-handed*, i fronti d'onda si muovono in **direzione opposta** al flusso di energia.



Applicazioni dei metamateriali 1

I metamateriali possono essere un punto di partenza per costruire **dispositivi mascheranti o dispositivi di occultamento (cloaking device)**. Un tale dispositivo coinvolge gli oggetti circostanti coprendoli (mascherandoli) con una conchiglia che simula nei suoi pressi il passaggio di luce.

Questa 'coperta plasmonica' lavorerebbe per **nascondere la diffusione della luce attraverso la risonanza con luce illuminata**, che potrebbe rendere gli oggetti "quasi invisibili a un osservatore". Lo schermo plasmonico sarebbe sintonizzato a un oggetto che si tiene nascosto, sopprimendo solo una specifica lunghezza d'onda - un oggetto reso invisibile alla luce rossa sarebbe ancora visibile nella multi-lunghezza d'onda della luce del giorno.

Applicazioni dei metamateriali 1

Si pensa si possano utilizzare i metamateriali per l'occultamento di velivoli o navi ai radar e alla radiazione ottica. Secondo la rivista PhysicsWorld ci sarebbe un progetto della Britannia Royal Navy College di raggiungere l'obiettivo entro 10 anni.



Applicazioni dei metamateriali 2

Manipolazione di frequenze comprese tra i 300 GHz e i 10 THz. Queste frequenze non possono essere gestite nè dalle apparecchiature elettroniche (frequenza eccessivamente elevata) né dalle apparecchiature ottiche (frequenze troppo basse).

Ricercatori del Los Alamos National Laboratory utilizzando metamateriali sono riusciti a manipolare segnali entro questo intervallo di frequenze.



Applicazioni dei metamateriali 3

La NASA ha offerto un grant a J.N.Munday per lo studio della pressione della radiazione di metamateriali ottici sintonizzabili per la propulsione e la direzione di razzi senza parti in movimento.



Jeremy N. Munday
University of Maryland, College Park



“Radiation pressure on tunable optical metamaterials for propulsion and steering without moving parts”



Jeremy N. Munday

University of Maryland, College Park



“Radiation pressure on tunable optical metamaterials for propulsion and steering without moving parts”

Research objectives

- Determine the effect of radiation pressure on metals, dielectrics, and metamaterials to elucidate the role of photon momentum.
- Control of radiation pressure on materials by modulation of the reflectivity.

Summary

We will use an atomic force microscope-based technique to measure the radiation pressure exerted on materials with switchable reflectivity. This project will involve both the development and fabrication of unique metamaterials and the subsequent measurement of optical forces on these materials. Possible applications include lightweight structures for solar sail propulsion and steering.

Basic Science:

- Potential resolution to photon momentum controversies.
- Advance understanding of optically engineered materials.

NASA:

- New, lightweight structure concept for solar sails.
- New attitude control technique without mechanical motion.
- Development of a technique to measure photon radiation pressure to evaluate the performance of potential solar sail materials.

Impact

“Radiation pressure on tunable optical metamaterials for propulsion and steering without moving parts”

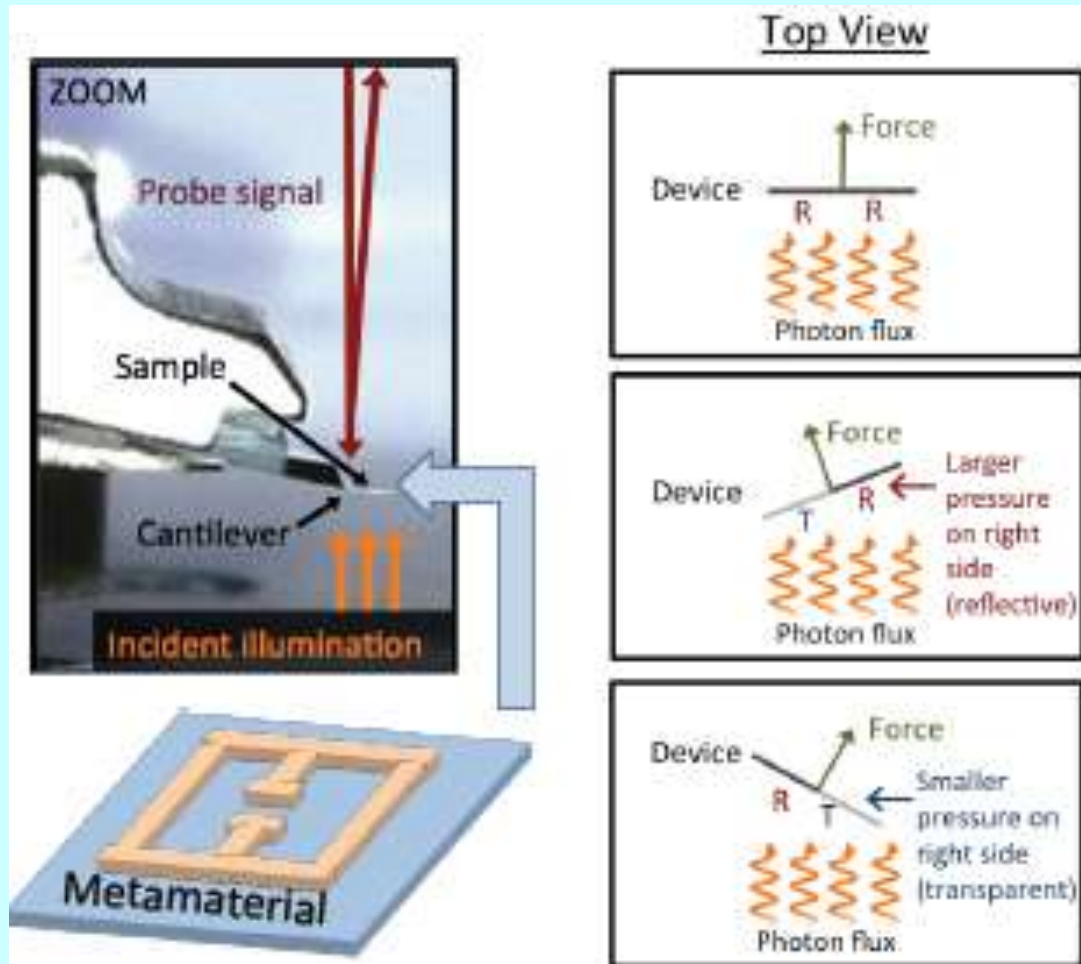


Figure. Left: Experimental setup to measure radiation forces based on an atomic force microscope. Lower panel shows a metamaterial, i.e. an optically engineered structure that is significantly smaller than the wavelength of light. Such structures can be designed to have a particular optical response. **Right:** Concept of steering without mechanical parts. By changing the optical reflectivity locally, a torque is exerted on the spacecraft causing it to turn.

Applicazioni dei metamateriali 4

Si pensa si possano utilizzare i metamateriali per **guidare** le **onde termiche e acustiche**, aprendo nuove prospettive nel campo dell'**isolamento termico e acustico** degli edifici.



Applicazioni dei metamateriali 5

...la **SUPERLENTE**, una lente perfetta creata sfruttando le due proprietà della rifrazione negativa:

- l'onda possiede *un'avanzamento di fase* invece che un ritardo di fase dei materiali convenzionali;
- *le onde evanescenti incrementano in ampiezza appena si allontanano dalla loro origine.*

La prima superlente con indice di rifrazione negativo fornì una risoluzione tre volte migliore del limite di diffrazione e fu collaudata alle frequenze della microonda, presso l'Università di Toronto nel 2007.



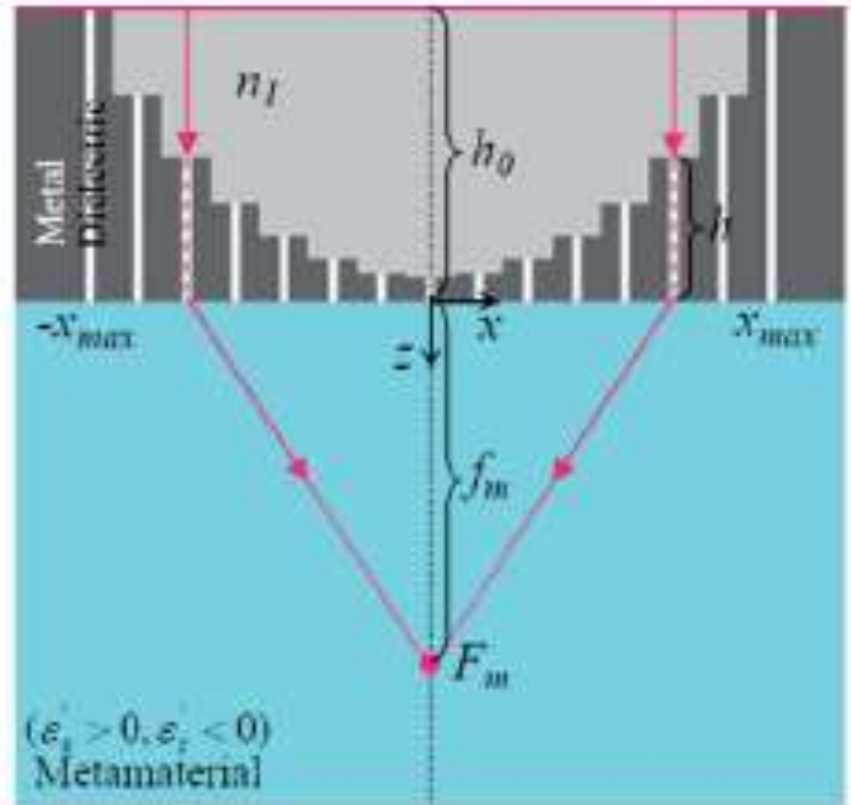
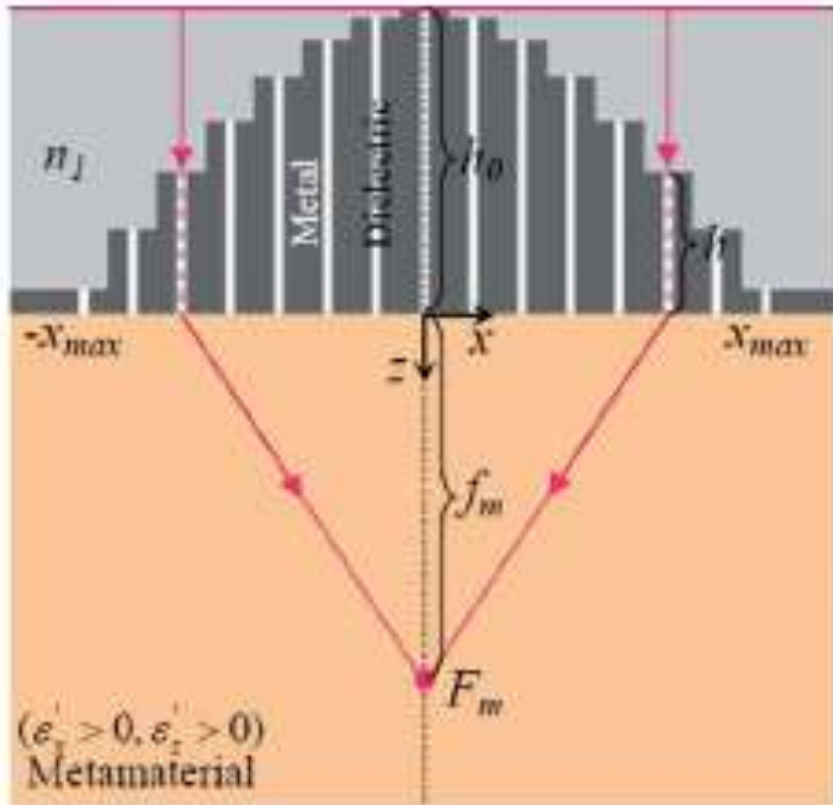


Fig. 4 Schematics of (a) an elliptic metalens and (b) a hyperbolic metalens with a height tuning PWC.



SUPER RISOLUZIONE!

Top panel: original object
 middle panel: image viewed through the silver lens
 bottom panel: image without the lens

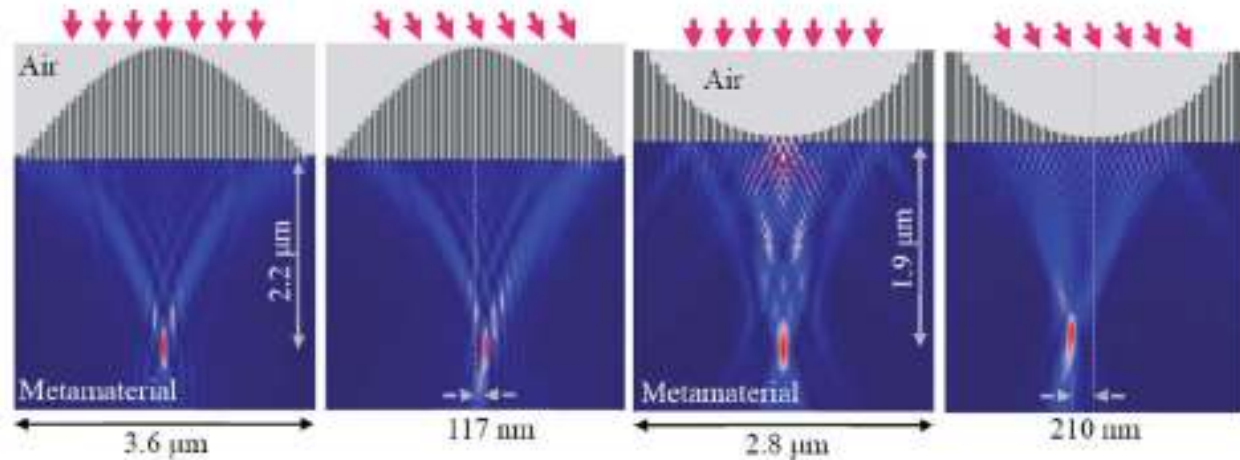


Fig. 5 Simulations of an elliptic metalens with a height tuning PWC, illuminated by (a) a normal and (b) a tilted plane wave, respectively, and simulations of a hyperbolic metalens with a height tuning PWC, illuminated by (c) a normal and (d) a tilted plane wave, respectively.

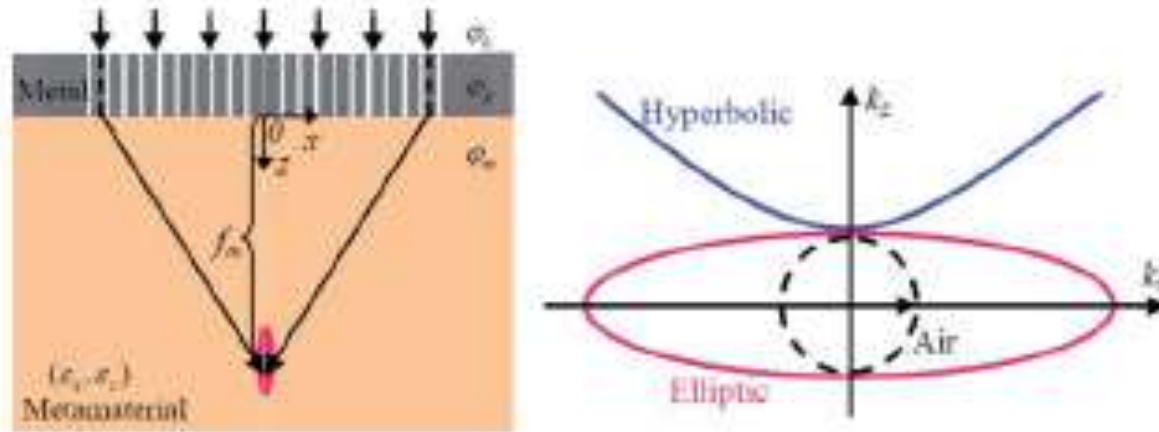
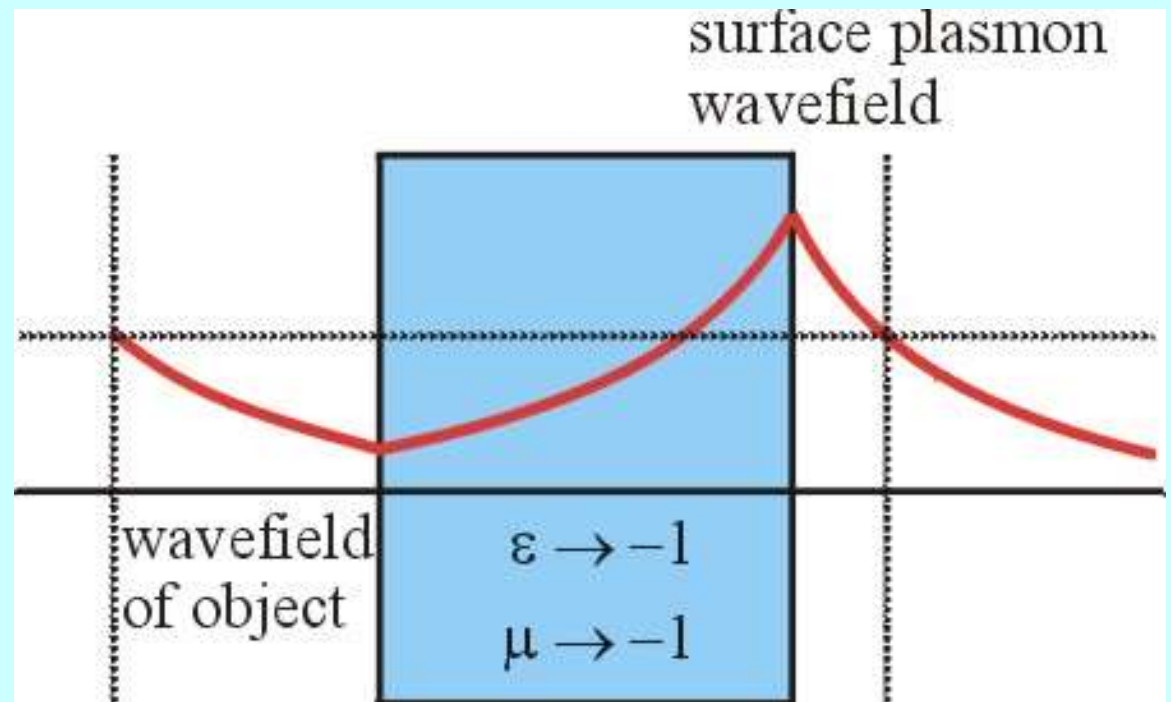


Fig. 1 (a) Schematic of a metalens. (b) Non-flat EFCs of the metamaterial for a metalens, exemplified by an ellipse and a hyperbola.

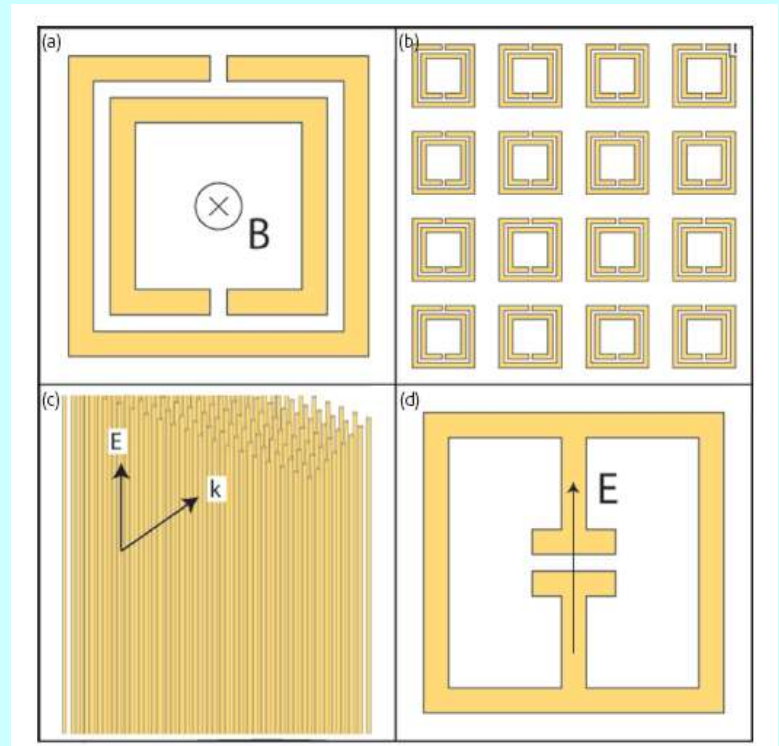
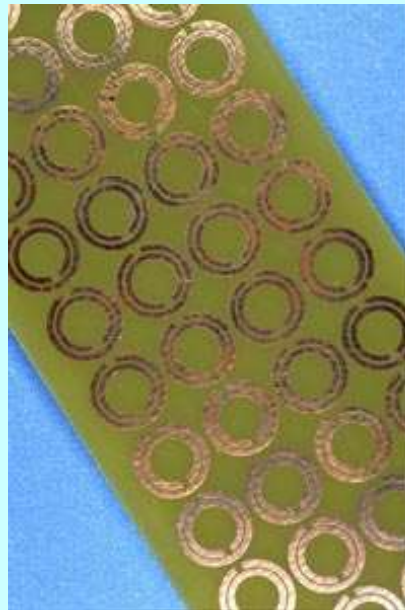
$$\epsilon \rightarrow -1, \mu \rightarrow -1$$



Applicazioni dei metamateriali 7

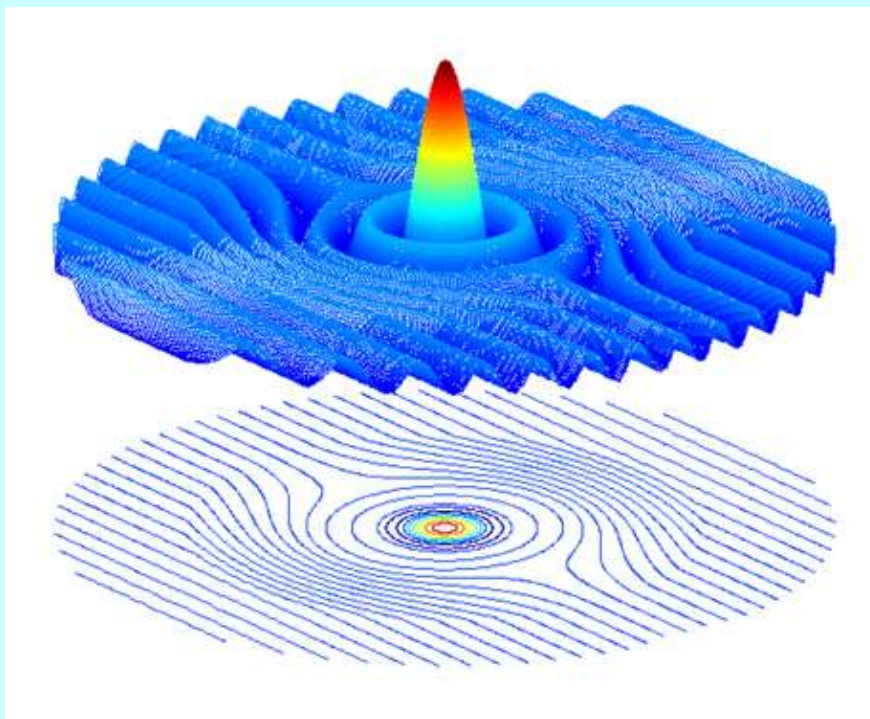
I metamateriali sono stati proposti per progettare **antenne agili**. Una ricerca ha dimostrato che pellicole sottili di metamateriali possono fortemente **ridurre la dimensione dei circuiti risonanti** che generano le microonde, permettendolo perfino ai più piccoli cellulari e altri dispositivi a microonde.

es. di un metamateriale progettato per dare una **risposta magnetica** a circa 10 GHz.
Gli anelli di rame sono di circa 1 cm di diametro.



Applicazioni dei metamateriali 8

È stato teorizzato che i metamateriali potrebbero essere progettati per **flettere la materia circostante a causa delle loro proprietà subatomiche**. Similmente un mantello di materia potrebbe per esempio piegare un proiettile attorno a una persona piuttosto che assorbire l'impatto come fanno i tradizionali giubbotti antiproiettile.



FONTI

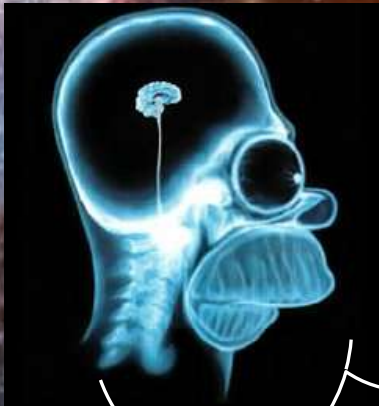
- <http://people.ee.duke.edu/~drsmith/>
- <http://www.bergamoscienza.it/ITA/Default.aspx?SEZ=6&PAG=71&NOT=448>
- http://www.nasa.gov/pdf/678819main_munday_summary.pdf
- http://www.cmth.ph.ic.ac.uk/photonics/New_photonics/
- <http://act.ucsd.edu/cwp/tools/search?q=metamaterials&site=cascade-cwp>
- <http://it.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>
- <http://metamaterials.net/>
- http://www.emtalk.com/tut_4.htm
- <http://physicsworld.com/>
- <http://theuniversaleducation.com/>
- <http://www.tomshw.it/cont/news/metamateriali-ecco-le-basi-per-diventare-invisibili/31978/1.html>
- <http://www.lescienze.it/topics/news/metamateriali-1149859/>
- <http://punto-informatico.it/2217230/PI/News/stealth-no-realmente-invisibili.aspx>
- http://www.thelivingmoon.com/49electric_universe/03files/Cloaking_Device_005.html





...mi sta scoppiando il cervello...

...cervello????!?





...grazie per
l'attenzione!

Campy