



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BRESCIA



**CNR-INO**

ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA  
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

# METASUPERFICI in ELETTROMAGNETISMO

Costantino De Angelis

[costantino.deangelis@unibs.it](mailto:costantino.deangelis@unibs.it)

**SPAISS 2022 XVI Edizione:  
Strumenti per la Scienza – Cefalù  
25-30 luglio 2022**



Fabio Baron

Nanofotonica  
METASUPERFICI

o de Ceglia,

Campi  
Elettromagnetici

Nanofotonica  
METASUPERFICI

ini,

ea Tog

# NanoOptics @UniBS\_INO: People



Luca Carletti



Camilla Baratto



Gina Ambrosio



Domenico de Ceglia



Andrea Locatelli



Maria A. Vincenti



Costantino De Angelis



Davide Rocco



Now also @UNIPA

Andrea Tognazzi



Paolo Franceschini



Marco Gandolfi

# People Principali collaborazioni

Politecnico  
di Milano

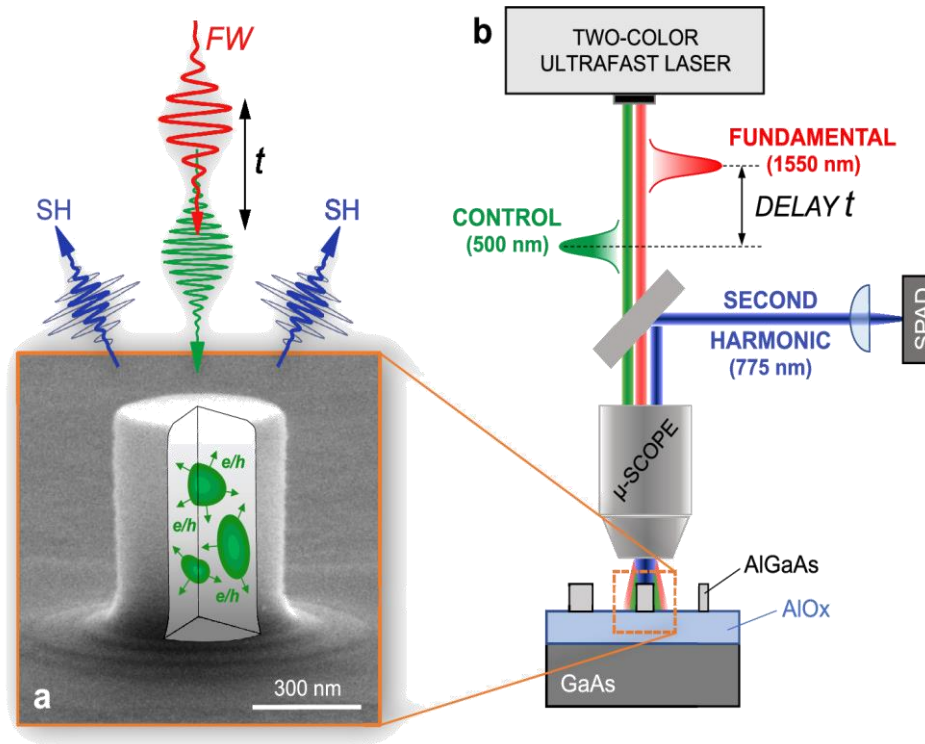


M. Celebrano  
G. Cerullo  
B. Della Valle  
P. Biagioni  
L. Duò  
A. Zilli  
M. Finazzi

M. Petrov  
A. Bogdanov  
K. Koshelev  
O. Pashina  
G. Zograf  
K. Frizuk  
S. Makarov



ITMO  
@Saint Petersburg



D. Neshev  
Y. Kivshar



Australian National  
University in Canberra

G. Marino  
C. Gigli  
G. Leo



University of Paris

# Funding



*PRIN 2017 project (2019-2022):*  
Nonlinear photonics in metasurfaces (**NOMEN**)

*CNR Joint lab 2019-2021 with University of Paris*  
Nonlinear photonics with nanoantennas (**OMEN**)



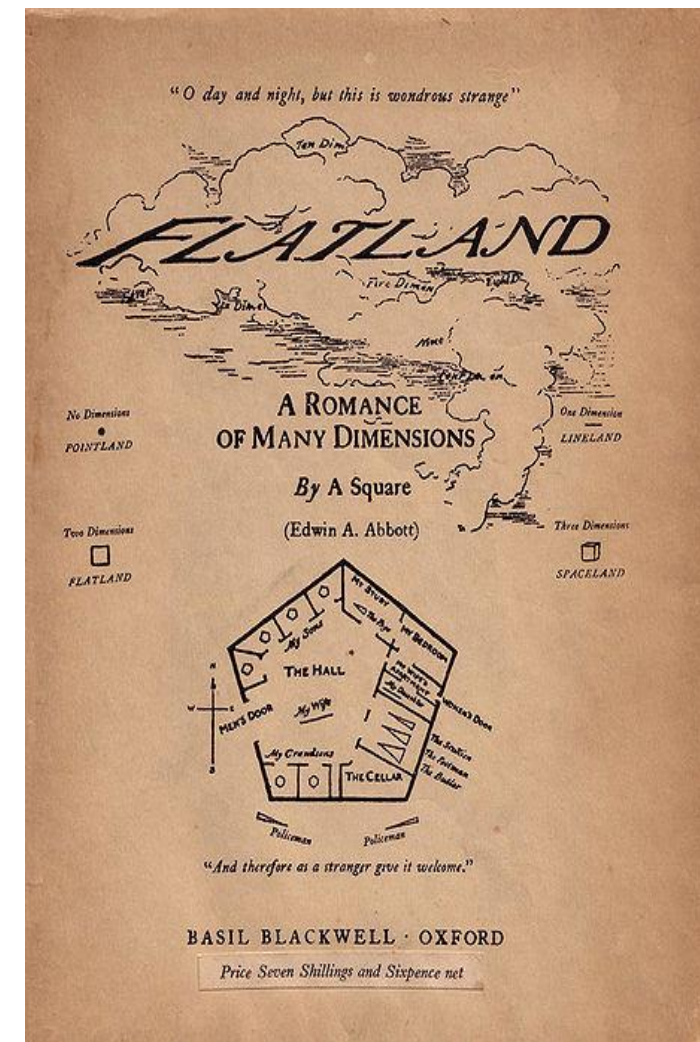
*FET Open Project **METAFAST** (2020-2024)*

*PRIN 2020 project (2022-2025): Multiscale  
Metasurfaces for Tera Hertz Generation and  
Radiation by Optical Rectification*



# Outline

- ***Filmare la natura***
- ***Su tempi sempre più brevi***
- ***In spazi sempre più piccoli***
- ***Metasuperfici***

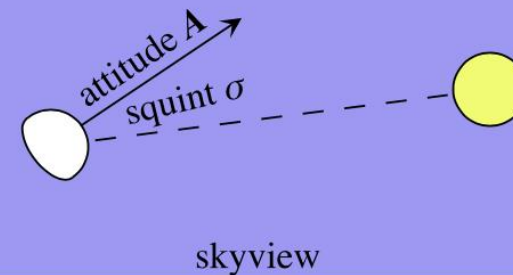


# Magie in ottica

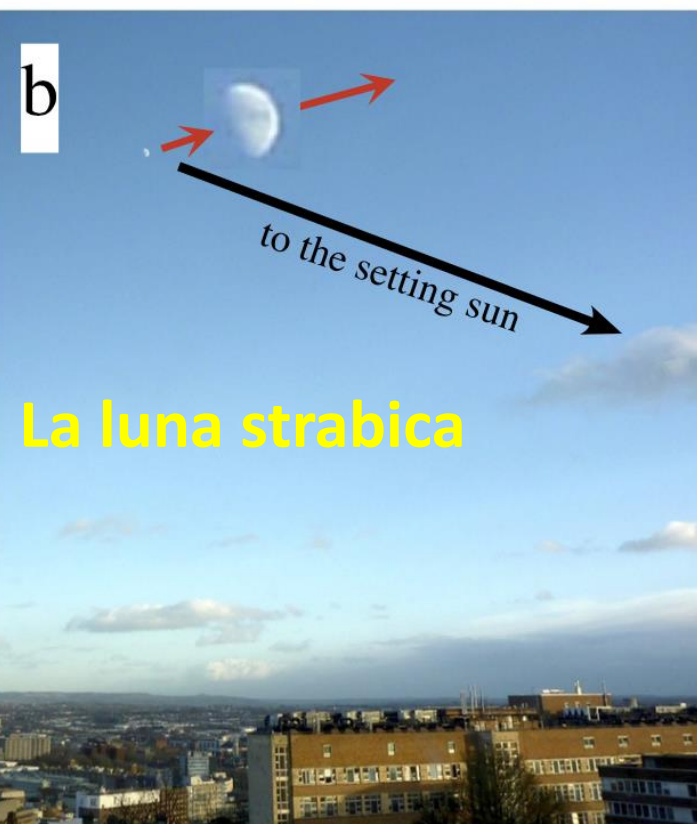
## Il miraggio



a



b

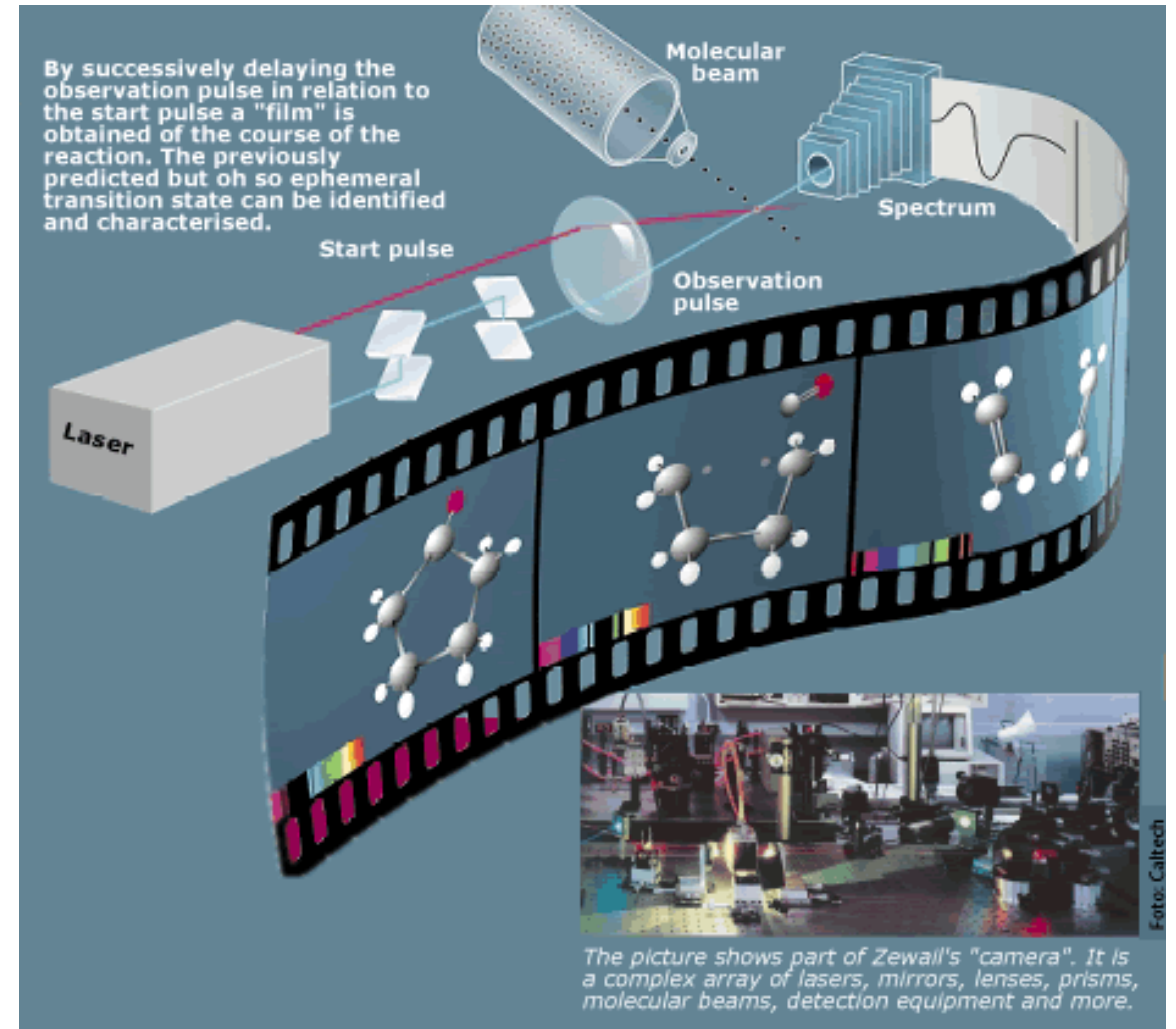


“Filmare” la natura.

Spettroscopia risolta nel tempo

---

Su un milionesimo di millimetro e per qualche miliardesimo di milionesimo di secondo





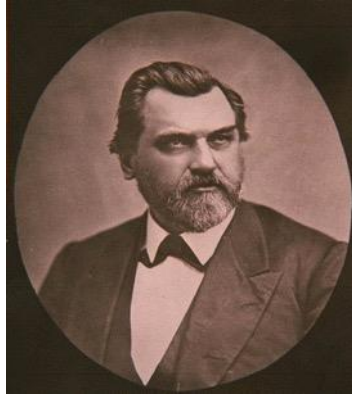
## Dipinto del secolo diciannovesimo



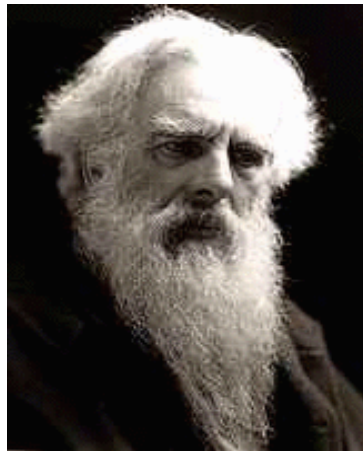
Le zampe anteriori si estendono in avanti e  
le posteriori si estendono all'indietro?

*Le derby d'Epsom*, Theodore Gericault, 1821

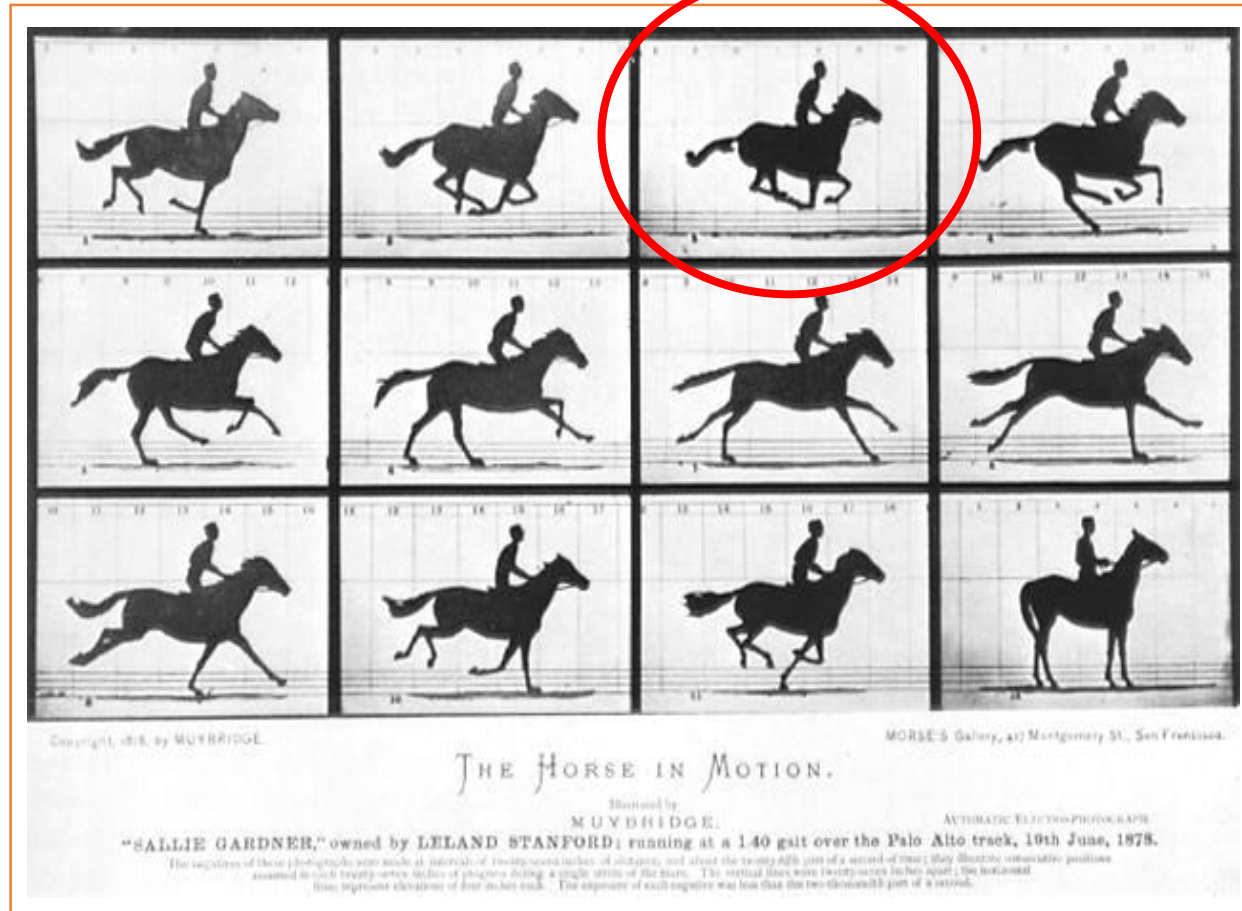
# “freezing in” motion



Leland Stanford



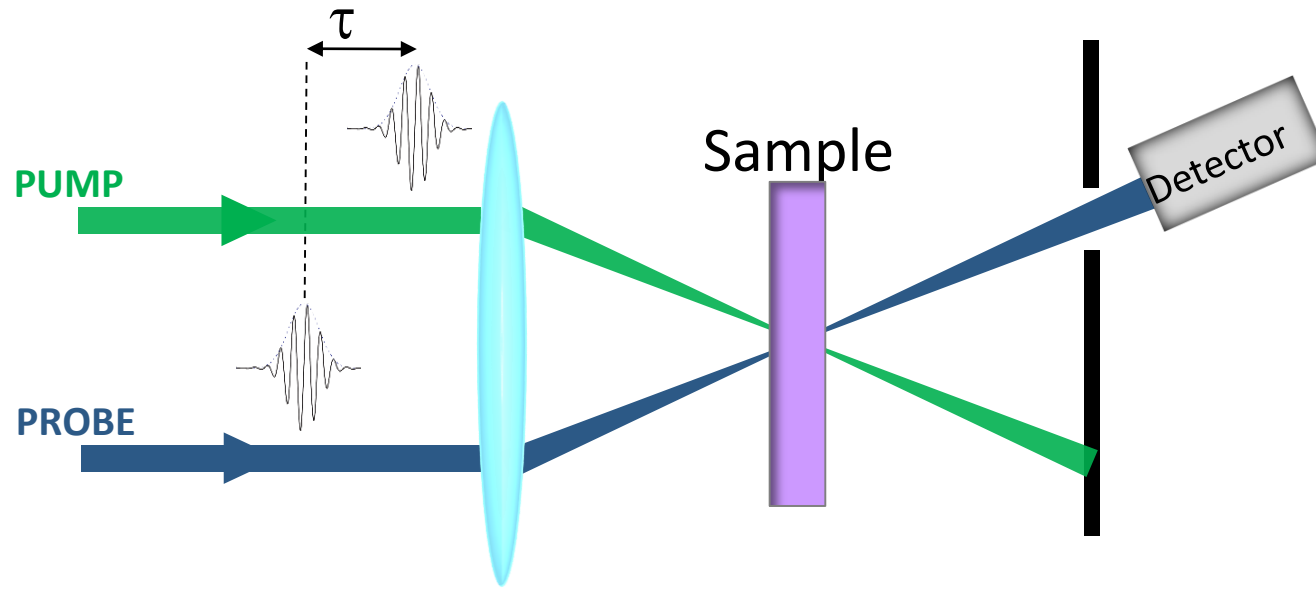
Eadweard  
Muybridge



C'è un istante nel quale le zampe del cavallo al galoppo sono tutte e quattro sollevate da terra? Sì (Eadweard Muybridge, 1878, risoluzione di  $10^{-3}$  sec)

Eadweard Muybridge posizionò svariate macchine fotografiche lungo la pista e la macchina fotografica veniva comandata da un filo che a sua volta veniva urtato dal cavallo

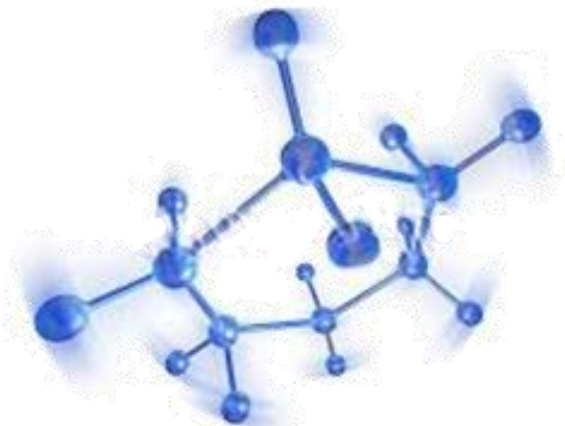
# La tecnica “pump-probe”



- La pompa “illumina” la scena (eccita il sistema)
- In un secondo momento un impulso ritardato (il **probe**) viene usato per misurare i cambiamenti di trasmissione indotti dalla pompa:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T_{ON}(\lambda_{pr}, \tau) - T_{OFF}(\lambda_{pr}, \tau)}{T_{OFF}(\lambda_{pr}, \tau)}$$

## Risoluzione temporale necessaria per osservare la dinamica molecolare



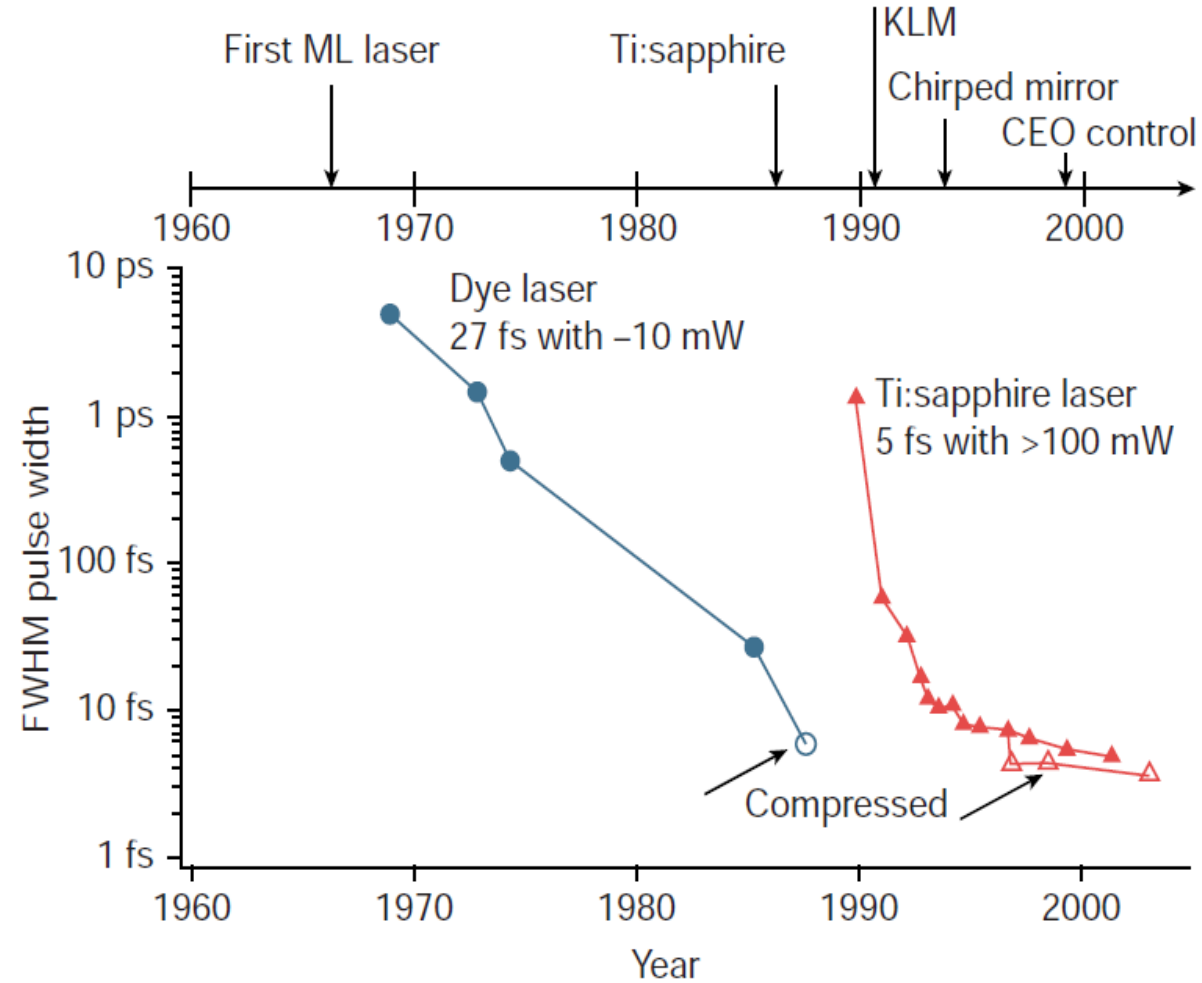
- **Gli atomi si muovono a una velocità dell'ordine di  $10^3$  m/s**
- **Siamo interessati a spostamenti di  $10^{-10}$  m**
- **La risoluzione temporale richiesta è:**

$$\Delta t = 10^{-13} \text{ s} = 100 \text{ fs}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ fs} &= 10^{-15} \text{ s} \\ 1 \text{ fs} : 1 \text{ s} &= 1 \text{ s} : 32 \cdot 10^6 \text{ anni} \end{aligned}$$

# Generazione di impulsi corti

- Prima del laser: interruttore Kerr (10 ns)
- Dopo il laser: mode-locking



# Sistemi per spettroscopia pump-probe

- **Accordabilità**

Dell'impulso di pompa per variare l'eccitazione del sistema

Dell'impulso di probe per verificare il comportamento del sistema a diverse lunghezze d'onda

- **Impulsi brevissimi per monitorare eventi “veloci”**

**SFIDA: generare impulsi di due colori diversi accordabili, sincronizzabili e di breve durata.**

# Antenne

Le antenne sono strumenti capaci di estrarre energia da una onda elettromagnetica (antenne riceventi)

o

di convertire una eccitazione localizzata di tipo elettrico o magnetico in una onda elettromagnetica (antenne trasmettenti)

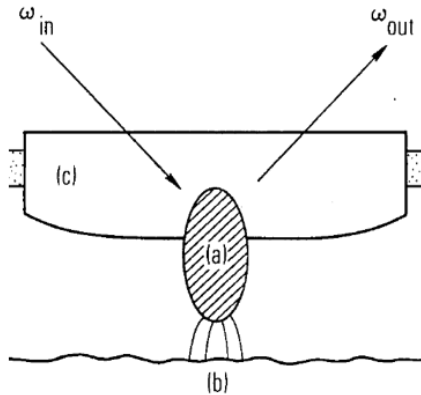
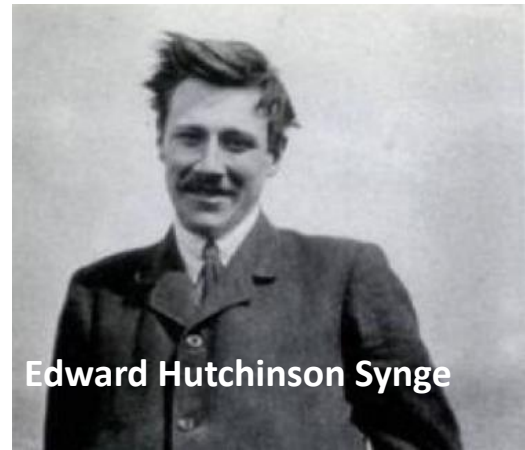


Il dipolo hertziano (Karlsruhe, 1887)

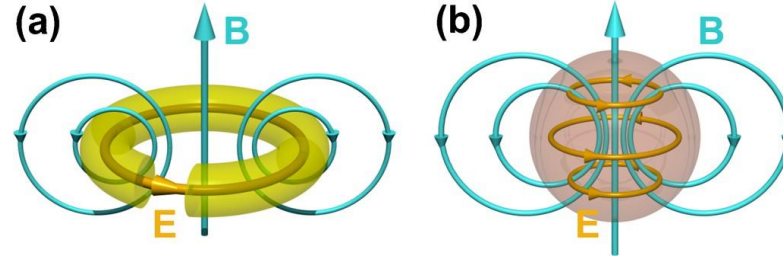


Il monopolo marconiano (Poldhu, 1901)

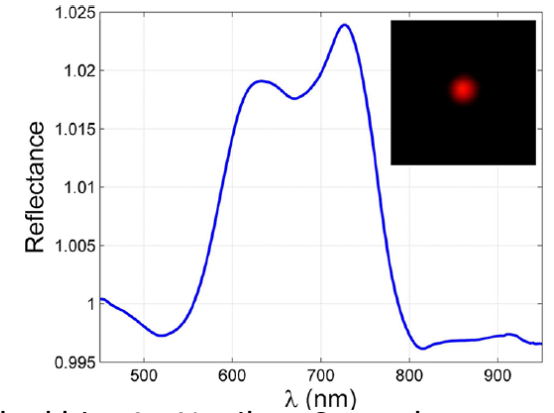
# Nanoantenne



J. Wessel, "Surface-enhanced optical microscopy", *J. Opt. Soc. Am. B* 2, 1538 (1985).

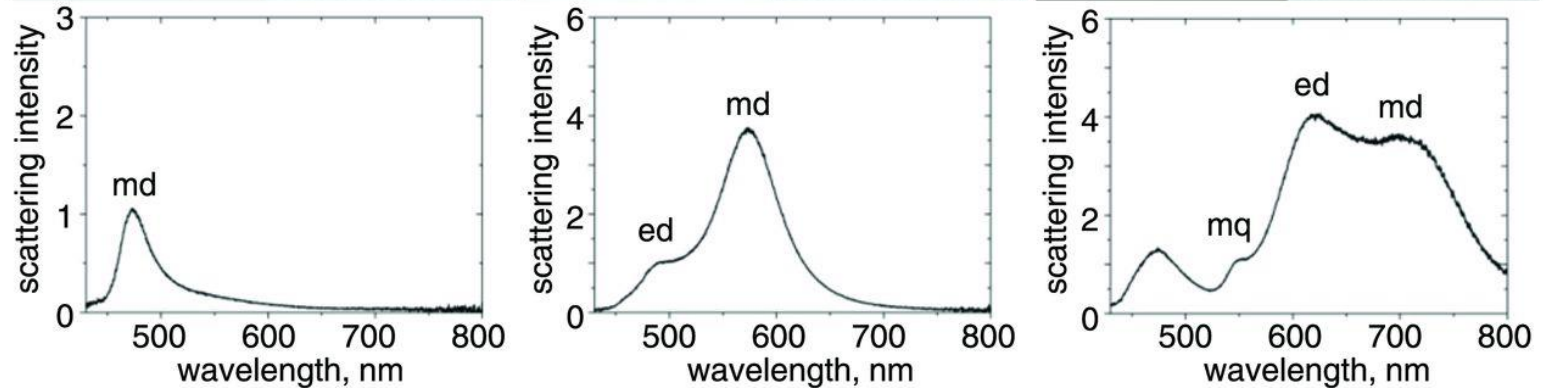
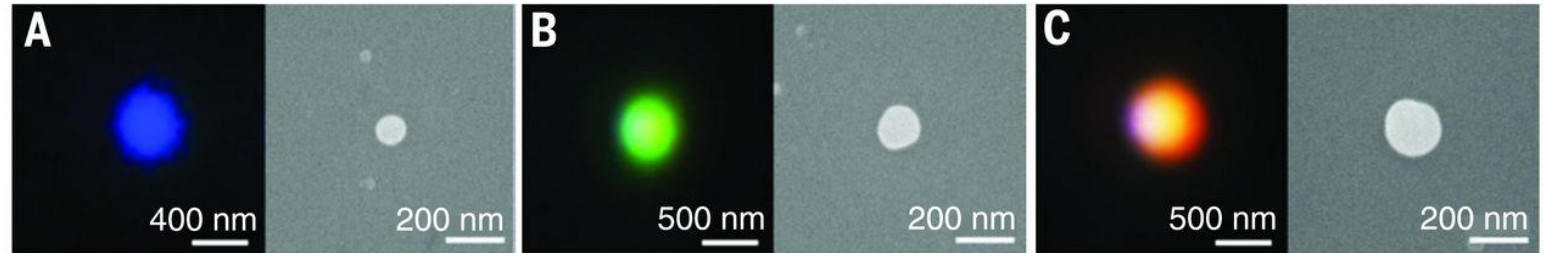


Kuznetsov, A., Miroschnichenko, A., *et al.* Magnetic light. *Sci Rep* 2, 492 (2012).

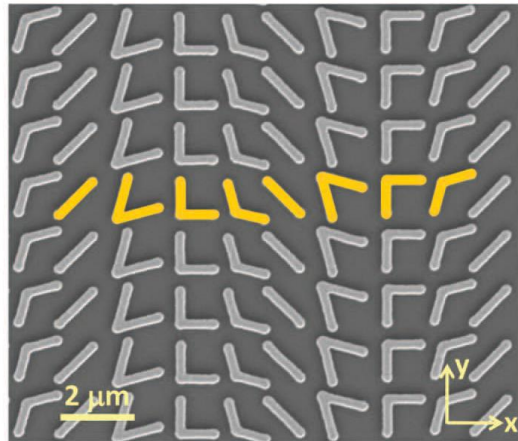


Evlyukhin, A., Novikov, S., *et al.* Demonstration of Magnetic Dipole Resonances ..., *Nano Lett.* 12, 3749 (2012).

Risposta ottica magnetica!!!!



Arseniy I. Kuznetsov *et al.* *Science* 2016;354:aag2472





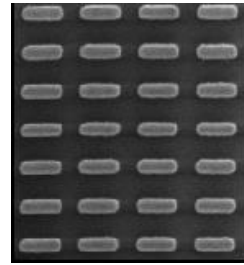
# Nanoantennas

Continuous technological advancement in electronic and optical components at the nanoscale.

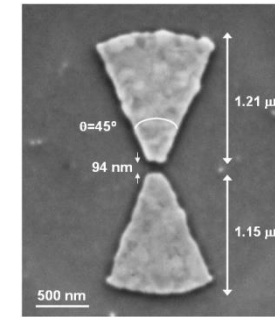
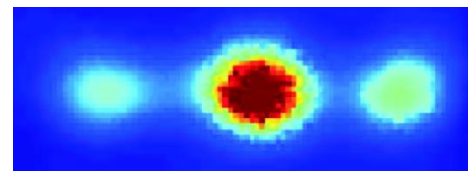
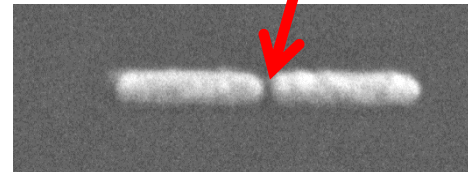
- Intense research activity in the field of “*plasmonics*”.



Monopole antenna on a fiber aperture  
*Taminiau et al., Nature Phot. 2, 2008*



Array of nanoantennas  
*Vecchi et al., PRL 102, 2009*

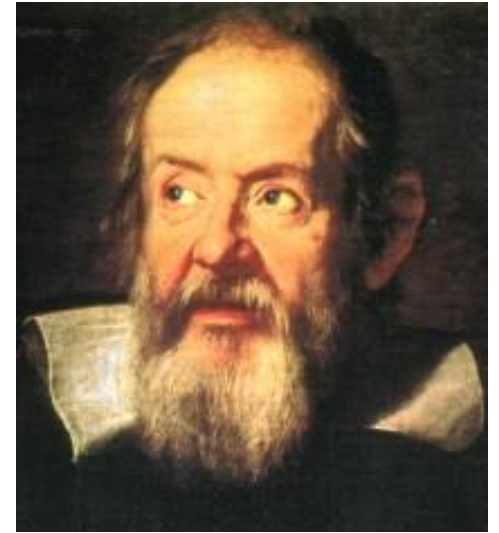


Bow-tie antenna on a quantum cascade laser  
*Yu et al., Opt. Express 15, 2007*

Gold dipole with 4-nm gap  
*Ghenuche et al., PRL 101, 2008*

# Antenne ottiche - Nanoantenne

*« ...gli oggetti piccoli in natura non si comportano come repliche scalate di oggetti più grandi, ma possono avere al contrario proprietà diverse ..... »*



**Galileo «Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze» (1638)**

- Le interazioni fra luce e materia sono più importanti se gli oggetti sono piccoli (micro- e nano-scala)
- Possibilità di focalizzare la luce oltre il limite della diffrazione

**Importantissime applicazioni**

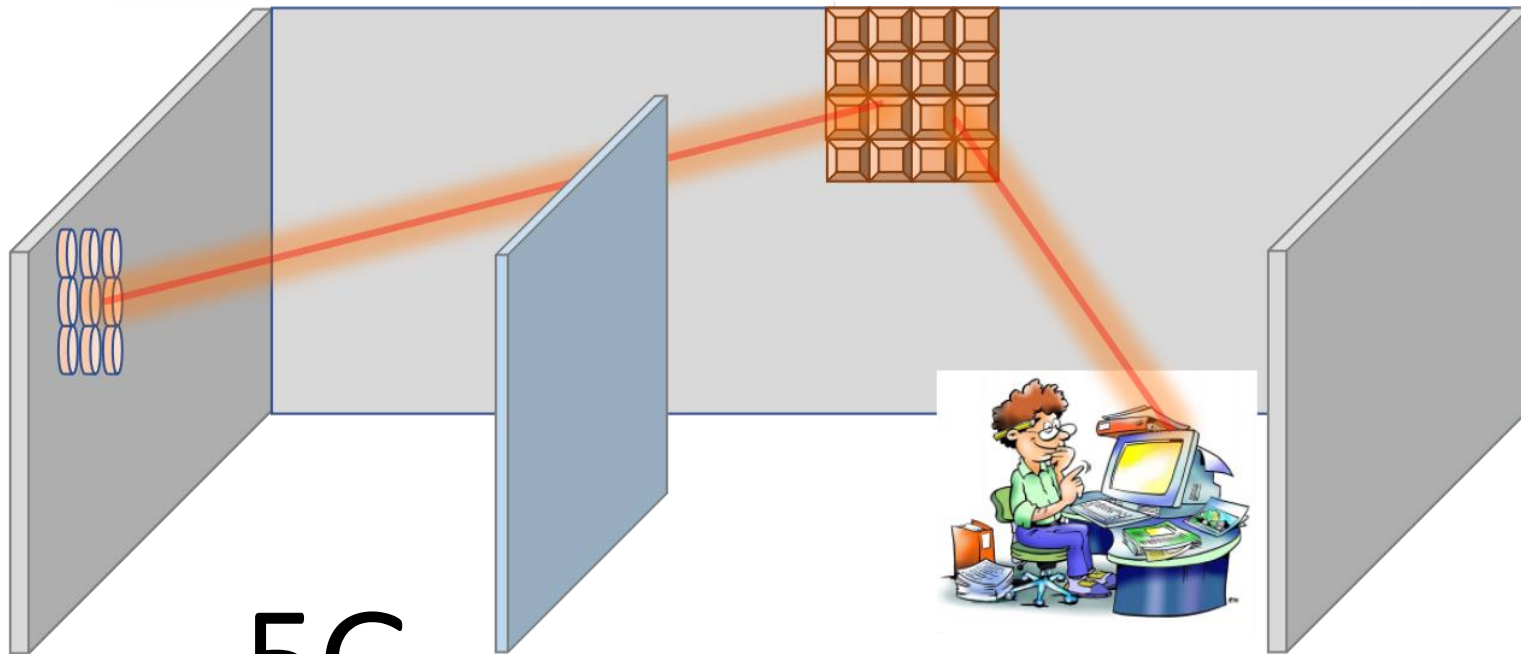
# Metasuperfici



**Metasuperfici: superfici decorate con strutture “sub-wavelength” che interagiscono con il campo elettromagnetico (nanoantenne)**

# Metasuperfici

*On the Reflection and Transmission of Electric Waves by a Metallic Grating.* By Prof. HORACE LAMB, F.R.S. Received May 11th, 1898. Read May 12th, 1898.

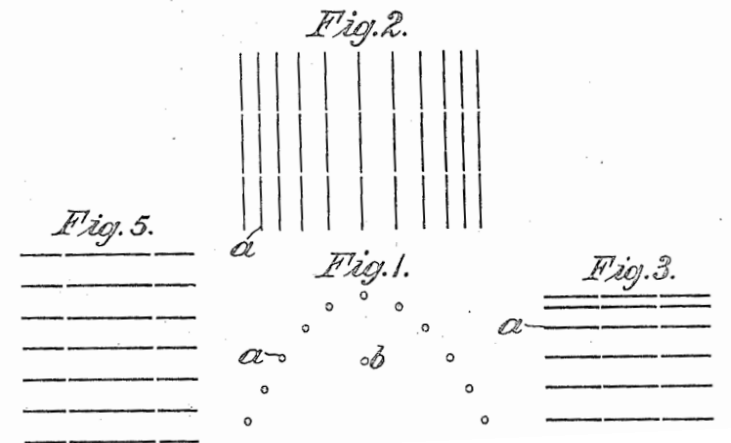


5G

G. MARCONI & C. S. FRANKLIN.  
REFLECTOR FOR USE IN WIRELESS TELEGRAPHY AND TELEPHONY.  
APPLICATION FILED FEB. 26, 1919.

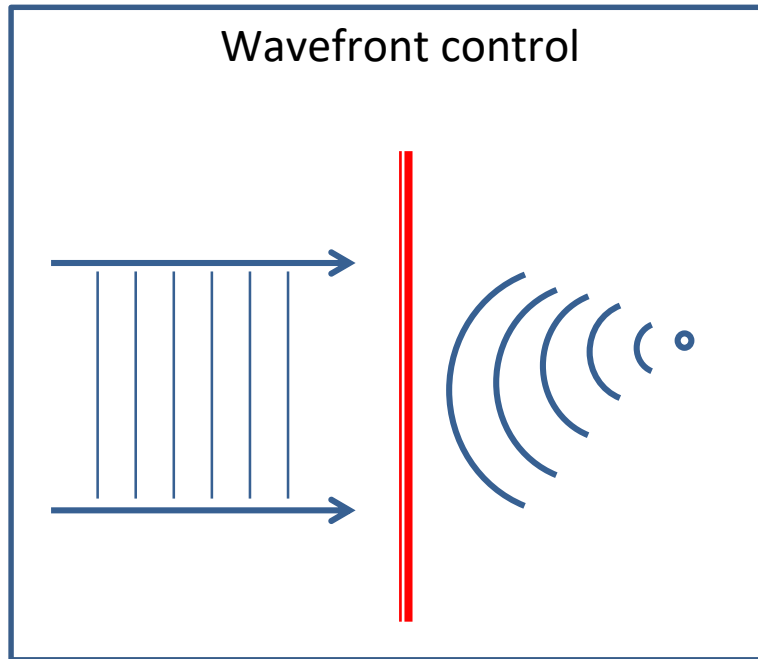
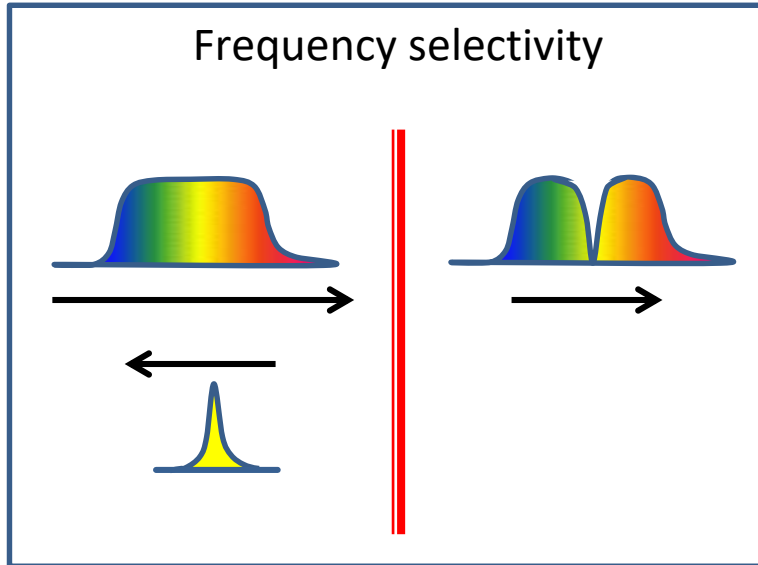
1,301,473.

Patented Apr. 22, 1919.



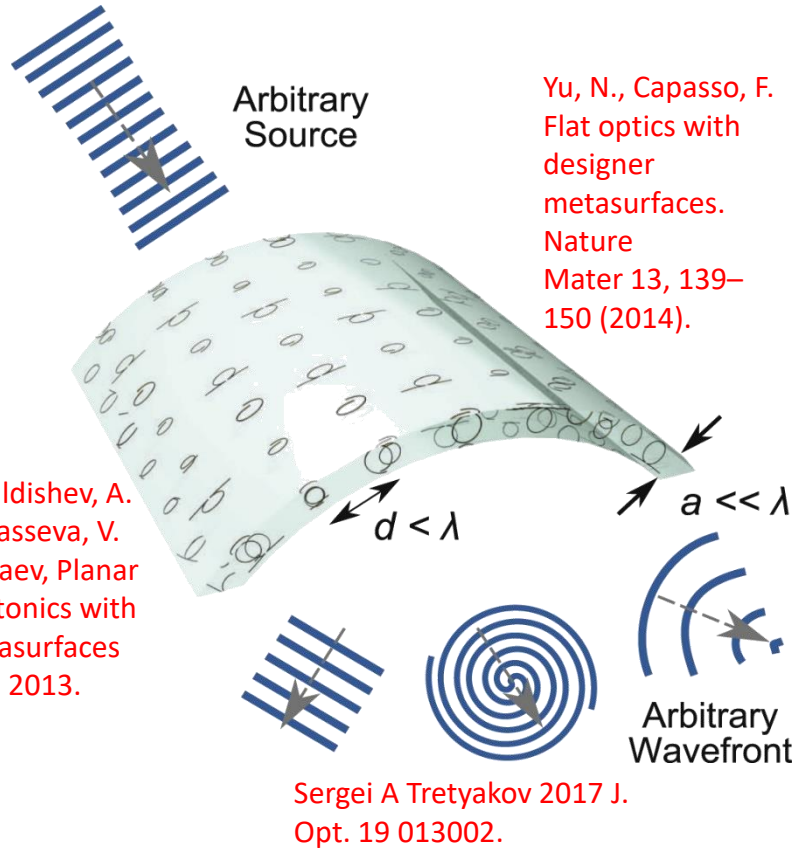
Giulio Marconi,  
Charles Samuel Franklin Inventor  
By Sheffield & Beale  
Attorneys.

# Metasuperfici



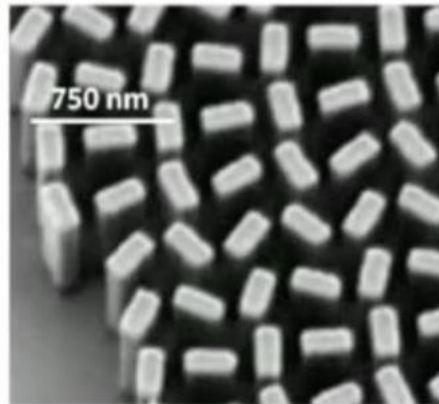
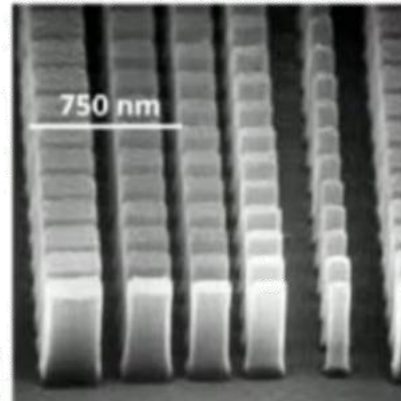
**Il mantello  
dell'invisibilità  
di Harry Potter**

# Metalenti



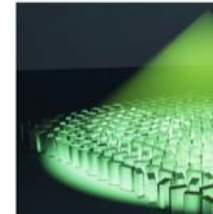
Yu, N., Capasso, F. Flat optics with designer metasurfaces. Nature Mater 13, 139–150 (2014).

Philippe Lalanne, et al., "Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff," J. Opt. Soc. Am. A 16, 1143-1156 (1999)

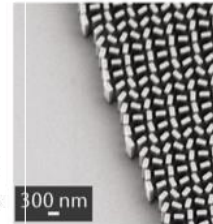


Chen, W.T. engineer

b Visible

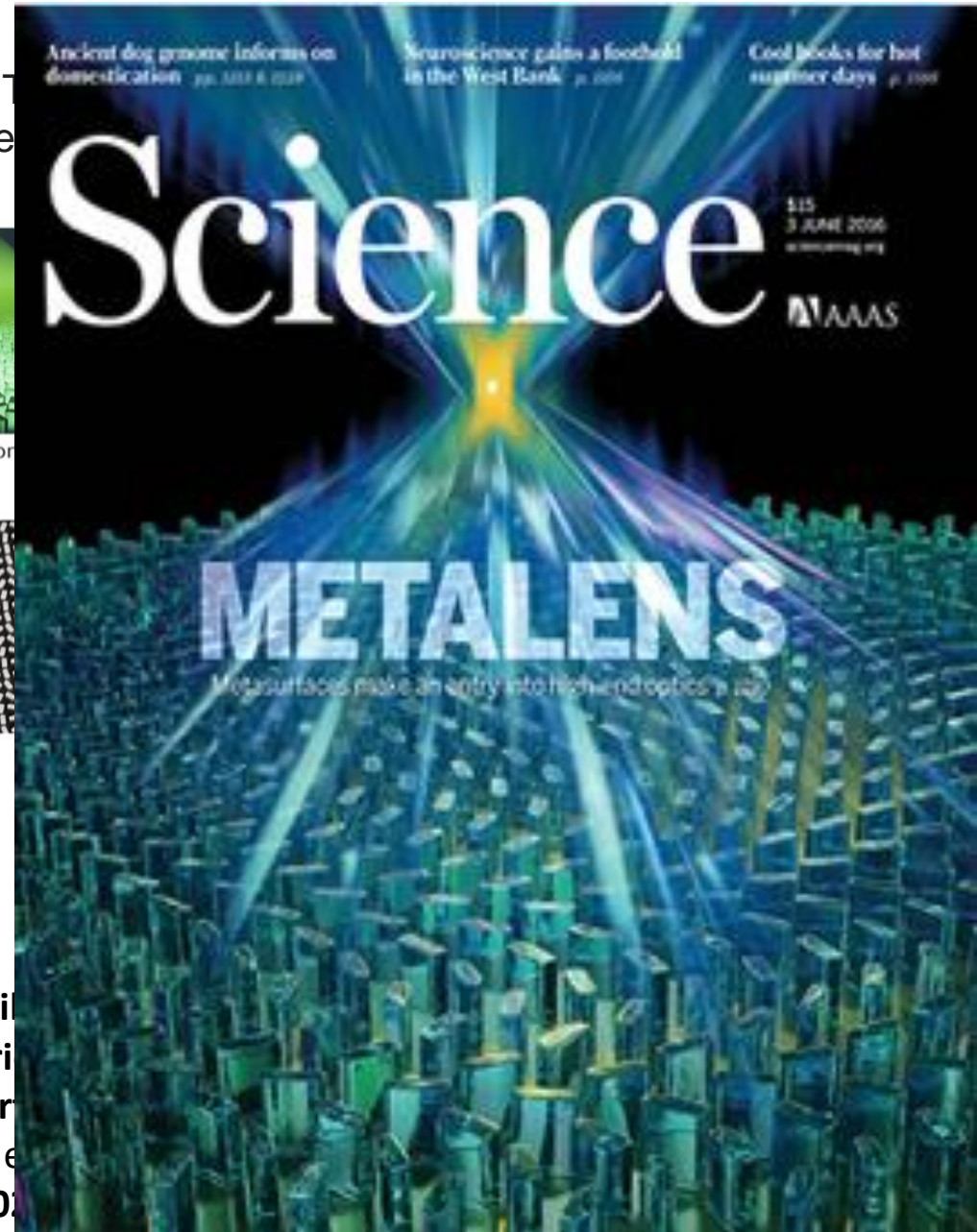


Single-crystal silicon 67% at  $\lambda = 532$  nm



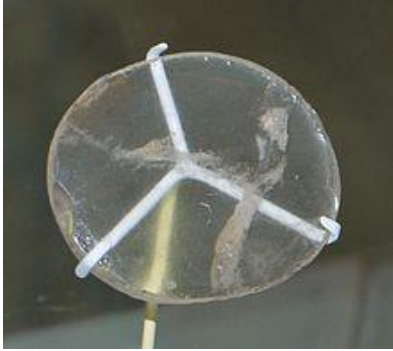
TiO<sub>2</sub> metalens 86% at  $\lambda = 405$  nm

Chiral Bi Dielectric Metasurfaces Tanaka, et al Nano 2013





## VII secolo ac: Lente di Nimrud

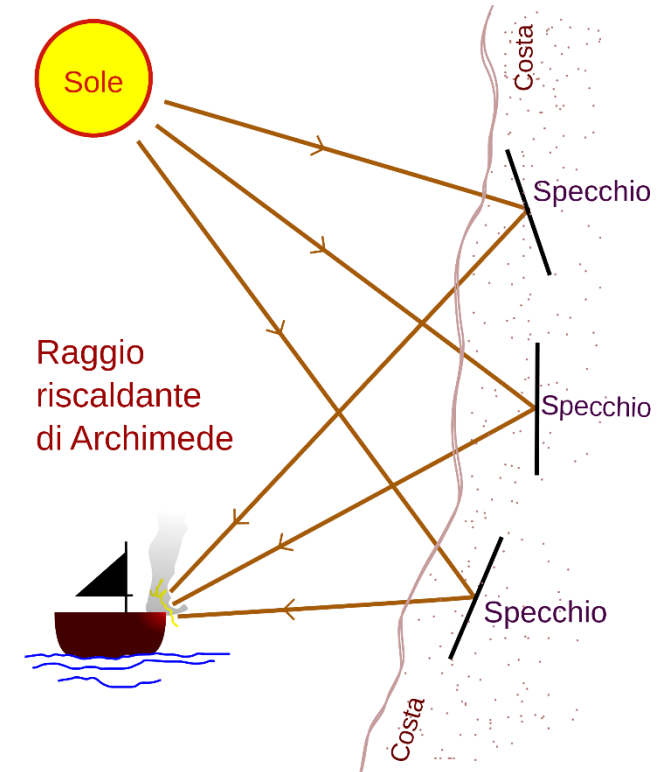


lente d'ingrandimento o  
specchio ustorio

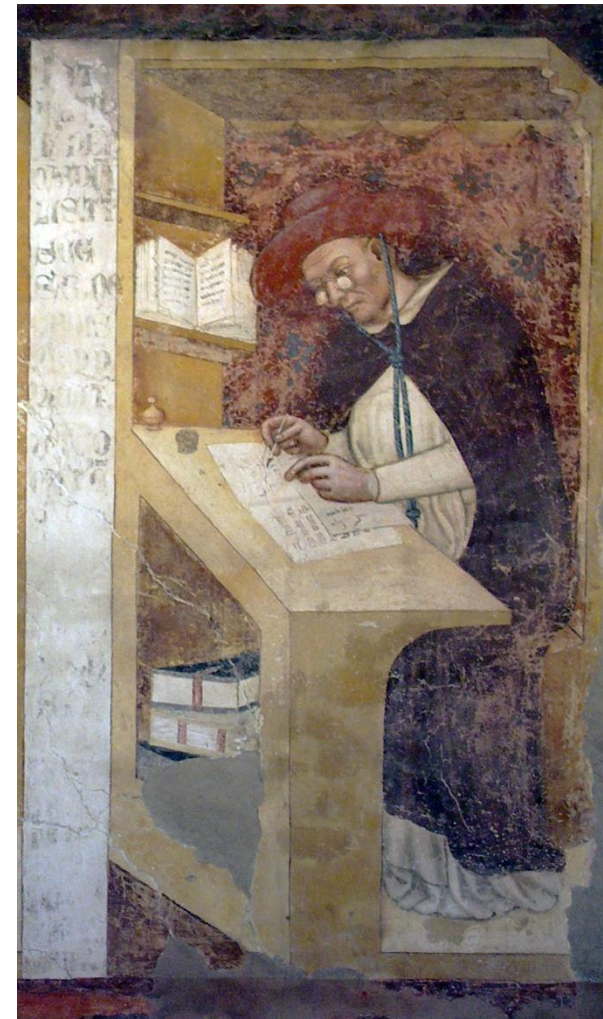
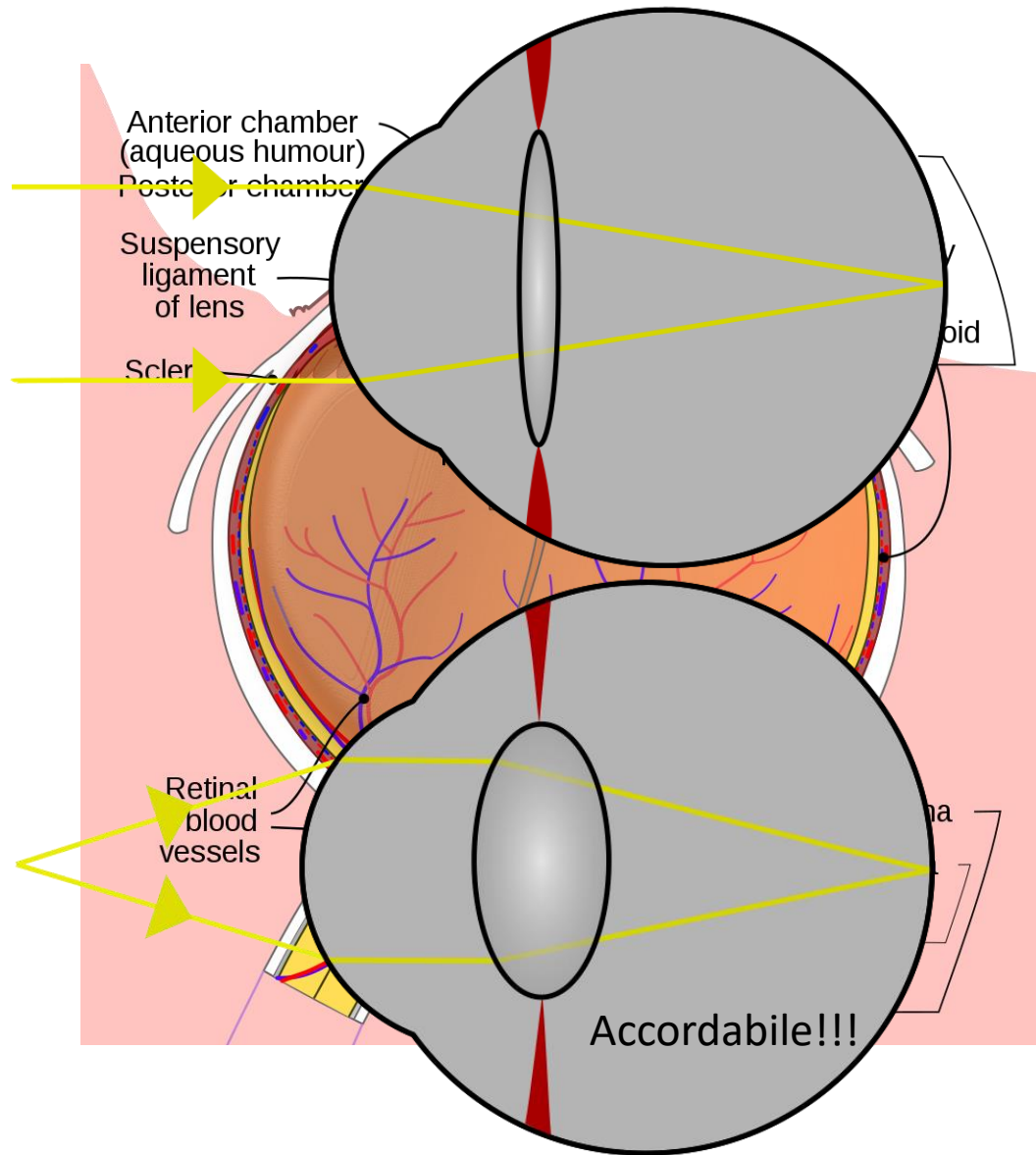
Ritrovata nel 1850

Primi scritti:

- **Le nuvole di Aristofane (424 a.C.):** lente come strumento per concentrare i raggi solari e accendere il fuoco.
- **Archimede (212 a.C.):** l'assedio di Siracusa.
- **Plinio il vecchio:** lenti per accendere il fuoco e primo uso come strumento di correzione ottica.
- **Seneca** descrive l'effetto ingrandente di un recipiente sferico di vetro pieno d'acqua.
- **Il matematico arabo Alhazen (~1000 dc):** grande trattato di ottica, in cui descrive come nell'occhio umano il cristallino formi un'immagine sulla retina.



# Lenti: correzione di difetti visivi



Tommaso da Modena nel 1352

Occhiali: Dal 1352

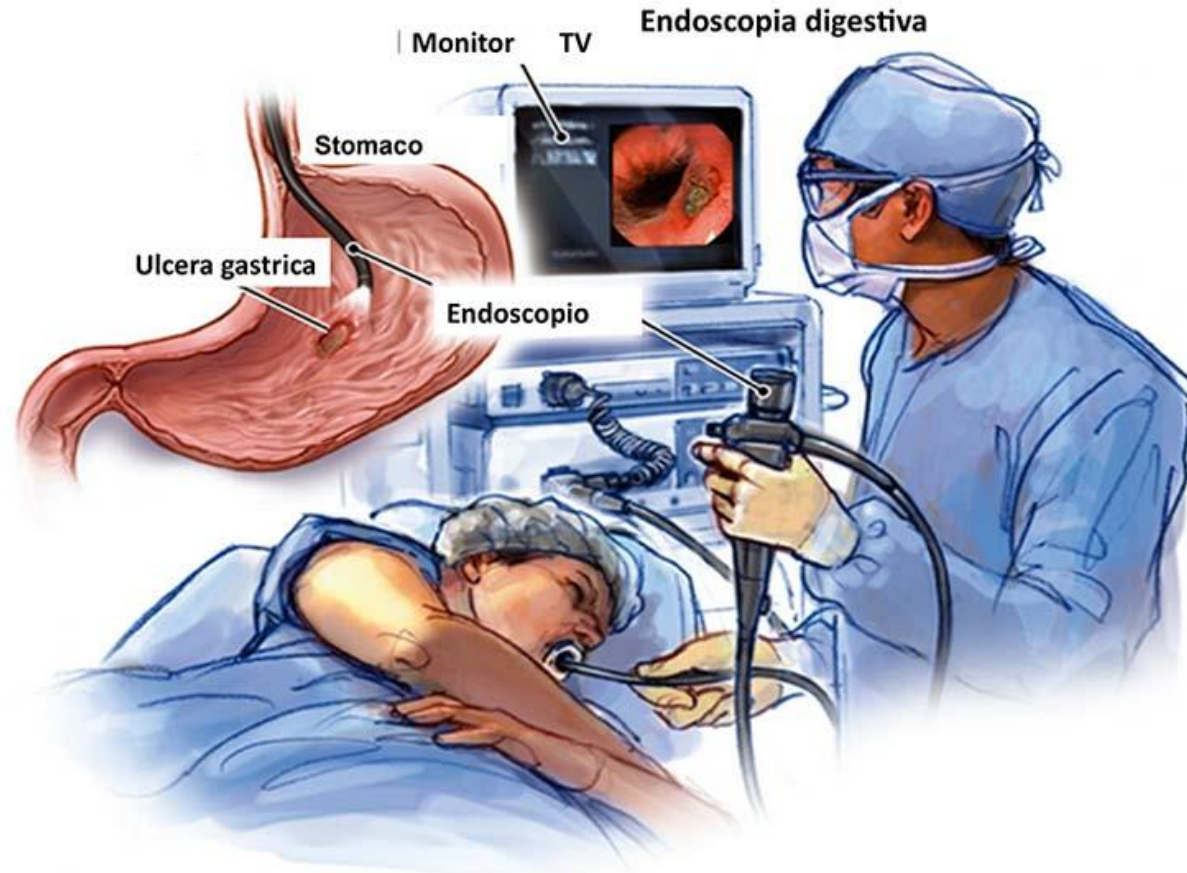


# Lenti: altre applicazioni tecnologiche

Macchine fotografiche e telecamere



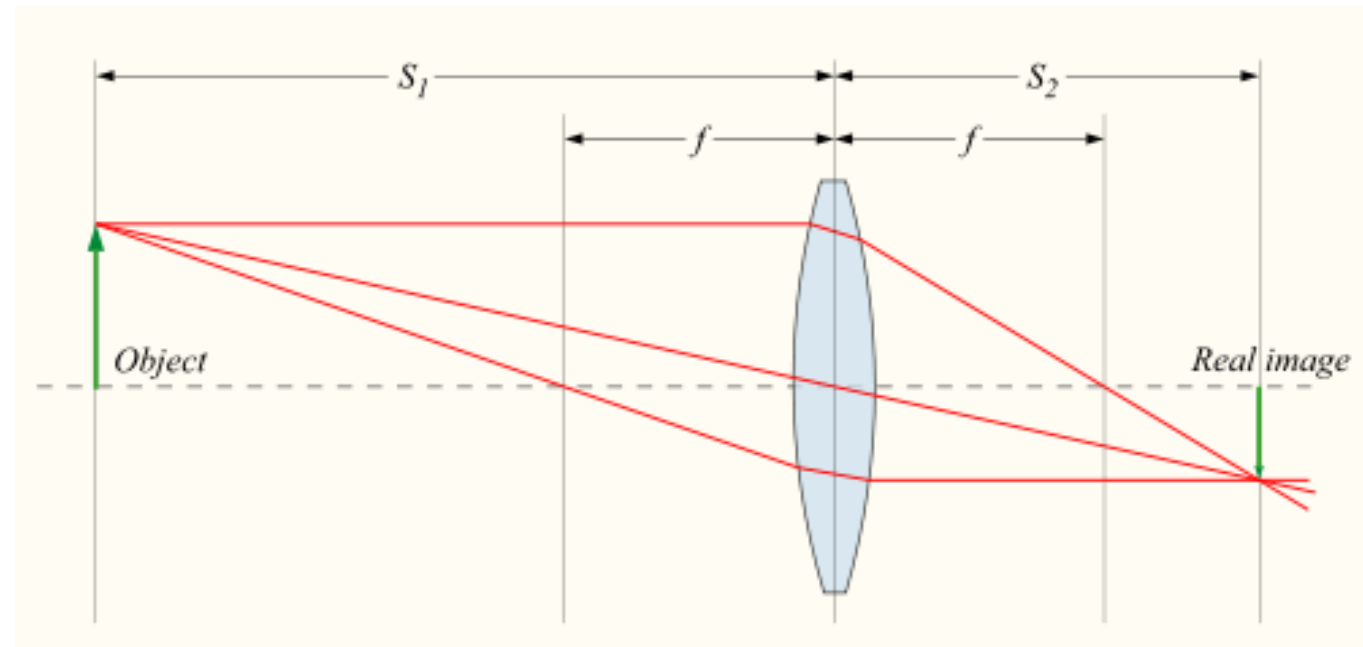
Cannocchiali, telescopi, periscopi, microscopi, endoscopi





Le lenti deviano la traiettoria del fascio di luce sfruttando

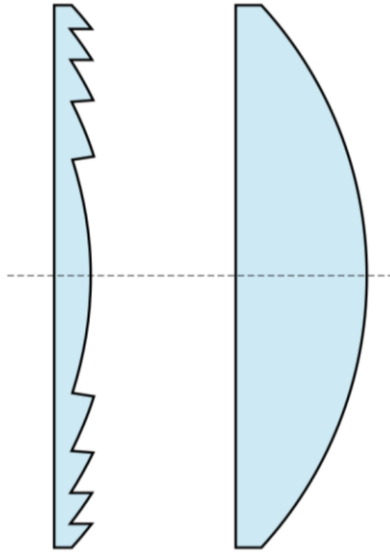
- il contrasto di indice di rifrazione fra i mezzi coinvolti
- la forma



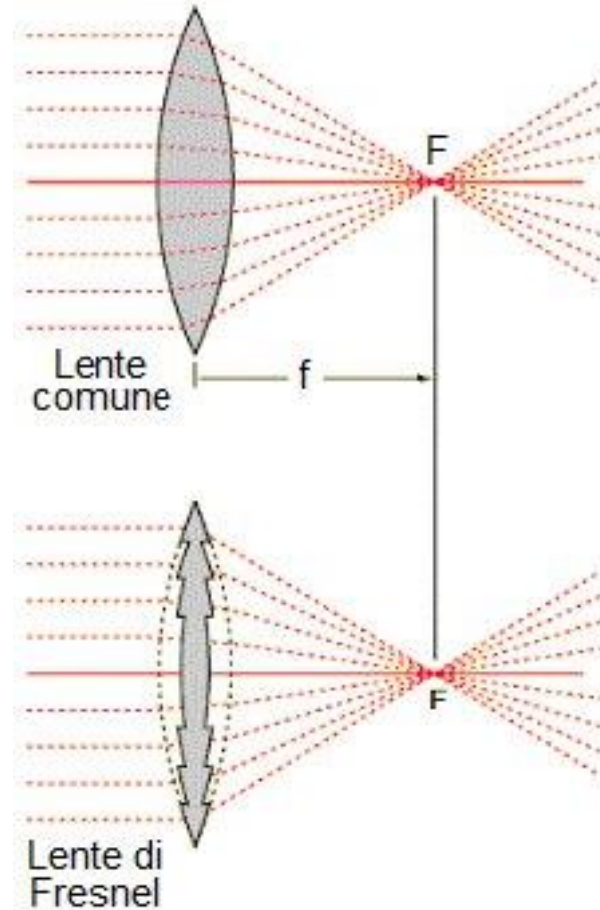
# Lenti: applicazioni tecnologiche



Lente di Fresnel

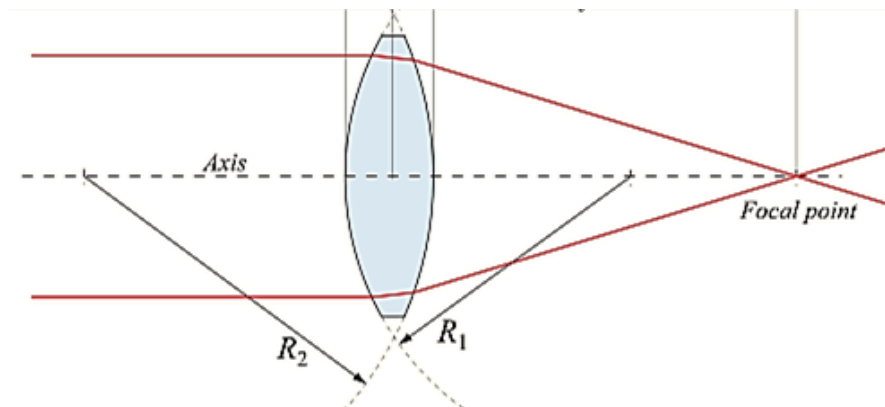
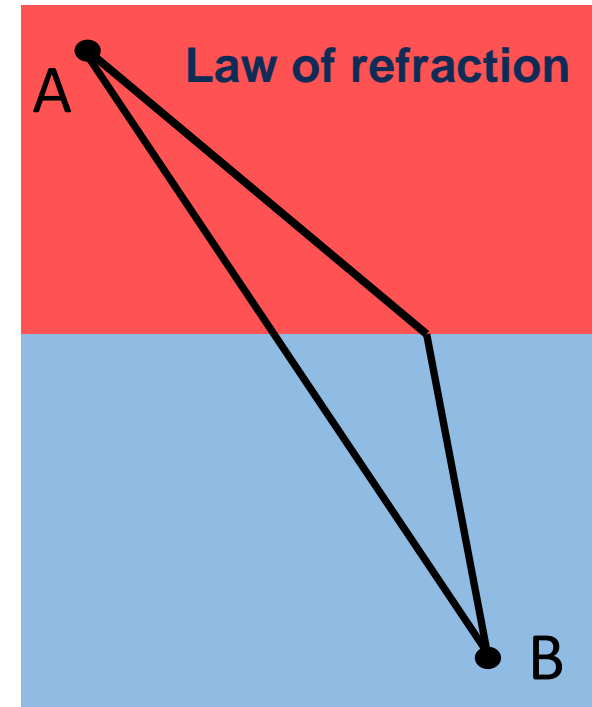
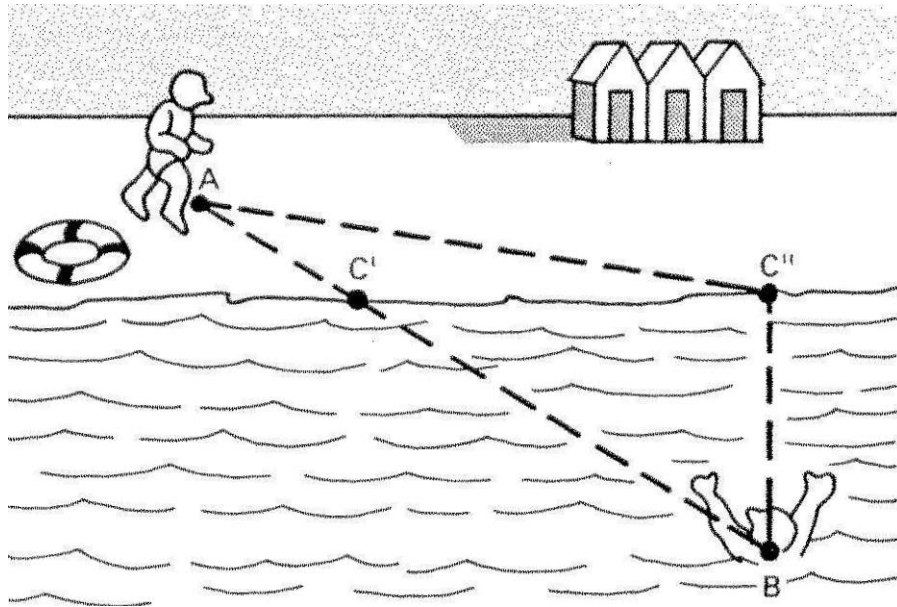


Lente Multipla di un faro



Stesso effetto  
con un materiale  
diversa (e con  
meno  
materiali)  
...  
la lente è quasi  
piatta  
...

# La lente: come funziona?





Estrema utilità a livello tecnologico.

Spessore: ~1 mm

Limitazioni:

- Forme e dimensioni macroscopiche
- Difficili da fabbricare e integrare con strumenti micro/nanoscopici
- Costose
- Versatilità limitata



Soluzione?

# Metalenti

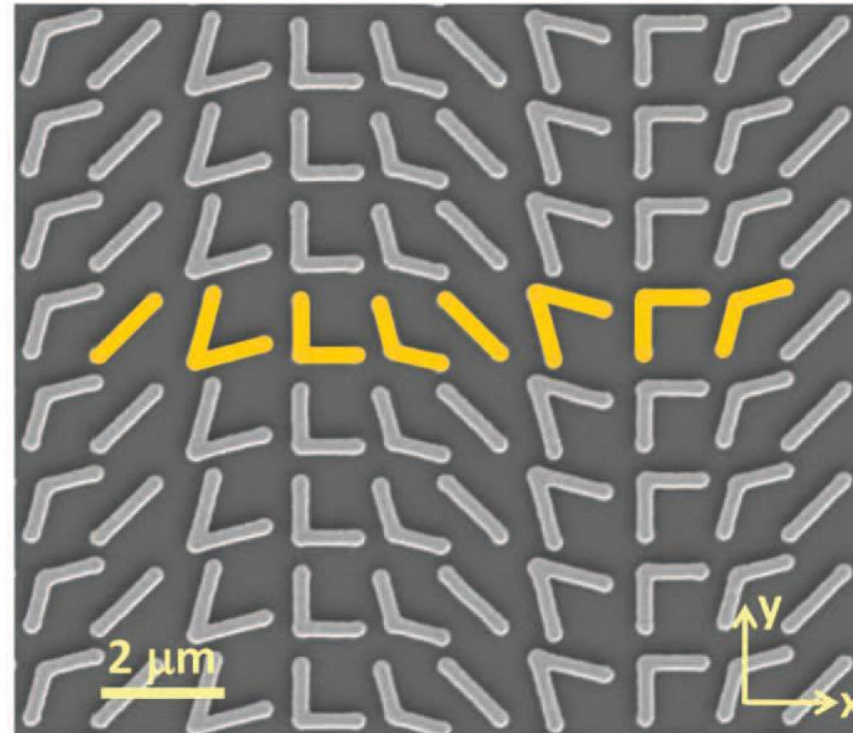
# Che cos'è una metalente?



Nanostruttura, fatta da molte componenti

Dimensione tipica: < lunghezza d'onda della luce

Obiettivo: controllare la velocità di fase della luce



Nanfang Yu et al, Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction, Science (2011)

Estratto da pag. 41 **GIORNALE DI BRESCIA** Giovedì 01/10/2015

SELPRESS Direttore Responsabile Giacomo Scanzi Diffusione Testata 34.672

## Capasso a Brescia È il «padre» del laser a cascata quantica

ca. Ne parliamo con Costantino De Angelis che al Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione insegna Campi elettromagnetici. «Il laser a cascata quantica consente di generare luce laser a lunghezze d'onda dove il laser tradizionale non arriva. Ed è applicabile a materiali dove invece non lo è il laser tradizionale», spiega De Angelis. E chiarisce che «si parla di fotonica ogni volta che si ha a che fare con la generazione, l'emissione, la trasmissione, la modulazione, la commutazione, l'amplificazione e la rivelazione della luce».

**Gli impieghi.** Dalle nanotecnologie, all'ambito biomedicale, dal settore dell'energia alle telecomunicazioni (cellulari, smartphone, computer e molto altro ancora) sono molte le nicchie debitorie alla fotonica, aggiunge ancora il **professore della Statale**.

Con Capasso, che arriverà nella nostra città già domani e sarà accolto al Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, ci saranno e diversi e Rocciano dopo (che quant'è un



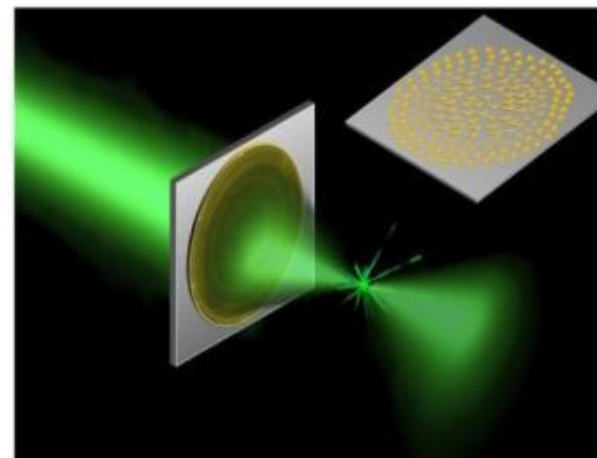
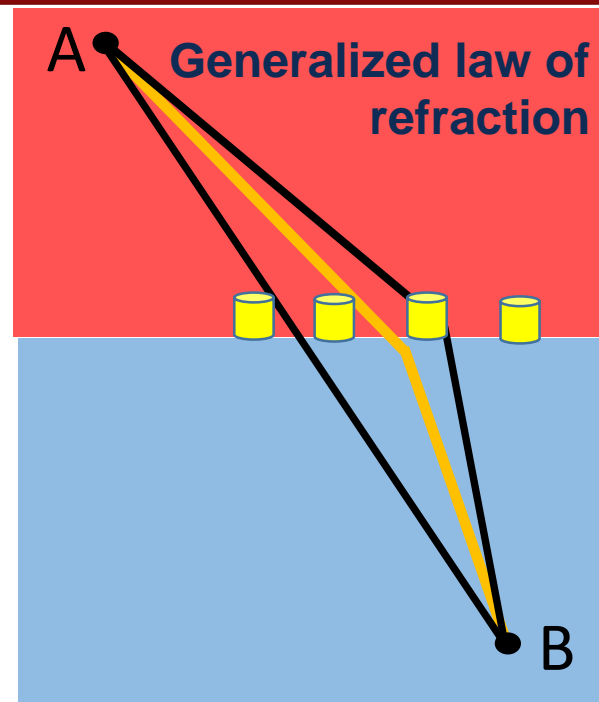
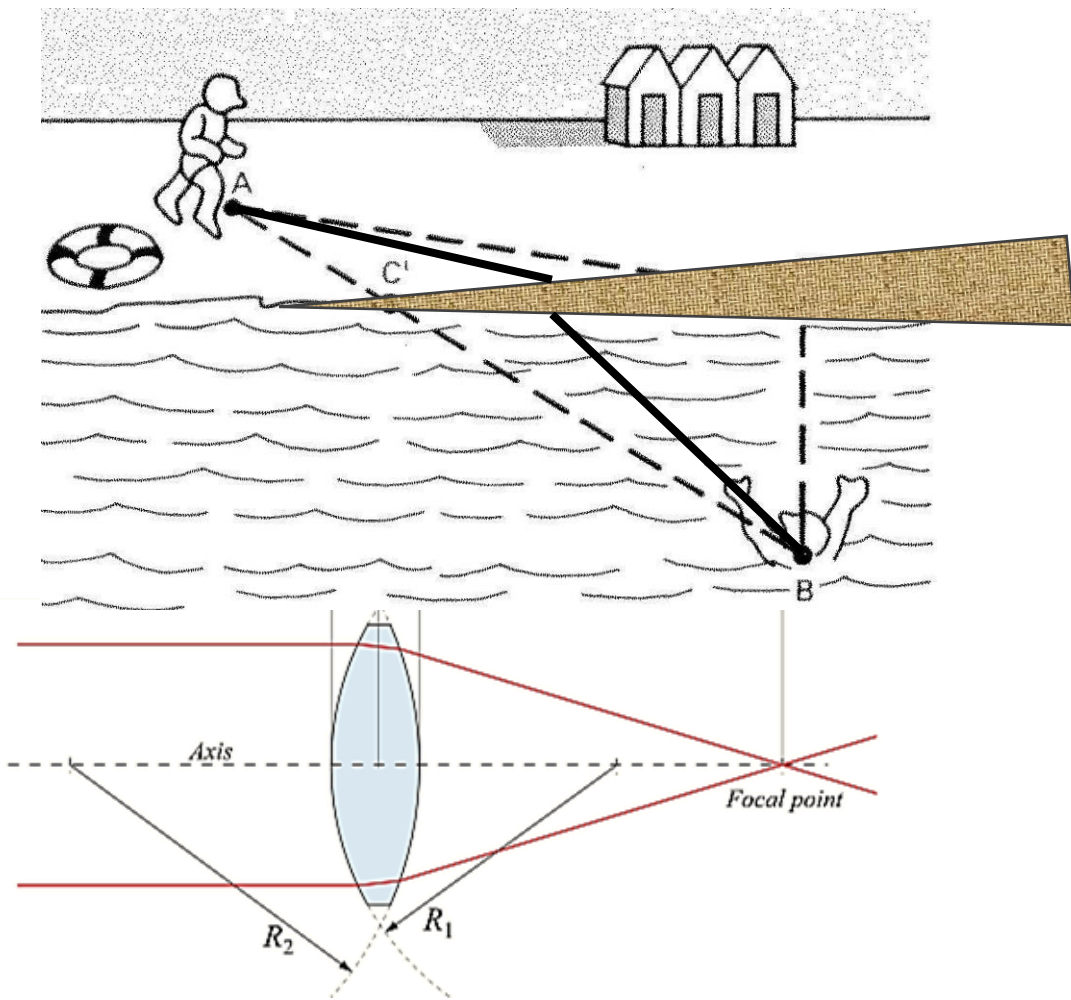
Ingegneria. Costantino De Angelis Fisico. Federico Capasso

### Supernova

Sabato 3 ottobre a l'incontro al Vanvitelliano di Piazza Loggia

Prof. Federico Capasso  
Harvard University

# La metalente: come funziona?



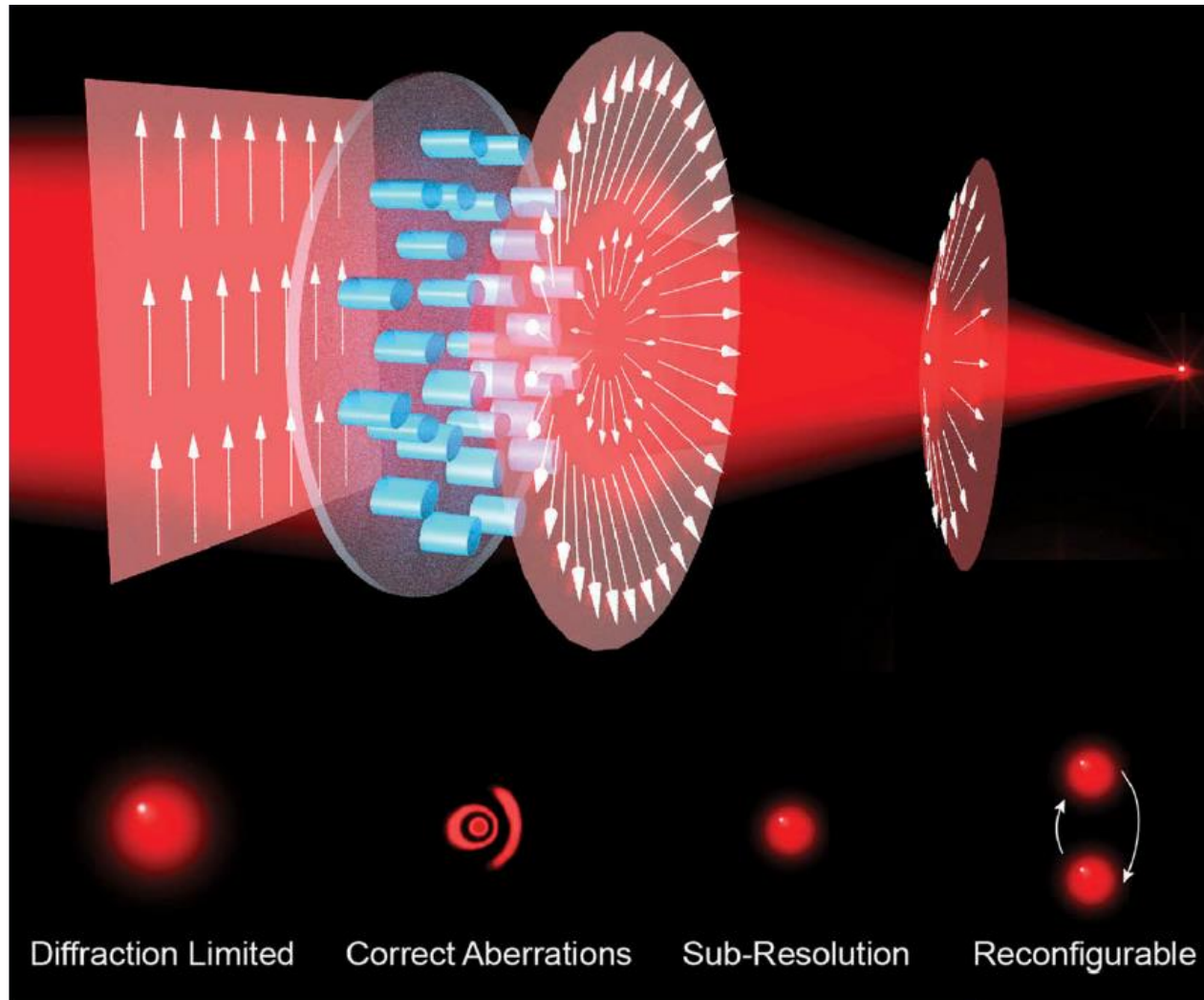
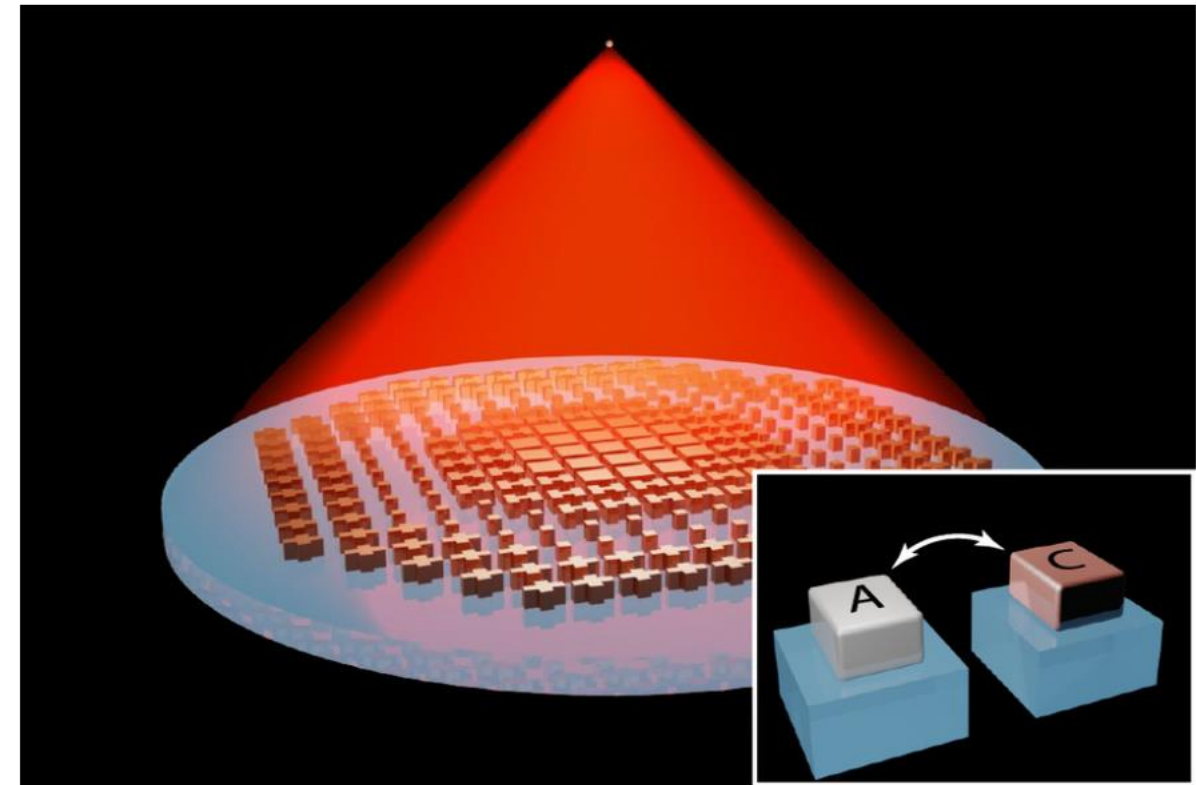
# Metallente: tante belle (e utili) applicazioni



## New “metallens” shifts focus without tilting or moving

The design may enable miniature zoom lenses for drones, cellphones, or night-vision goggles.

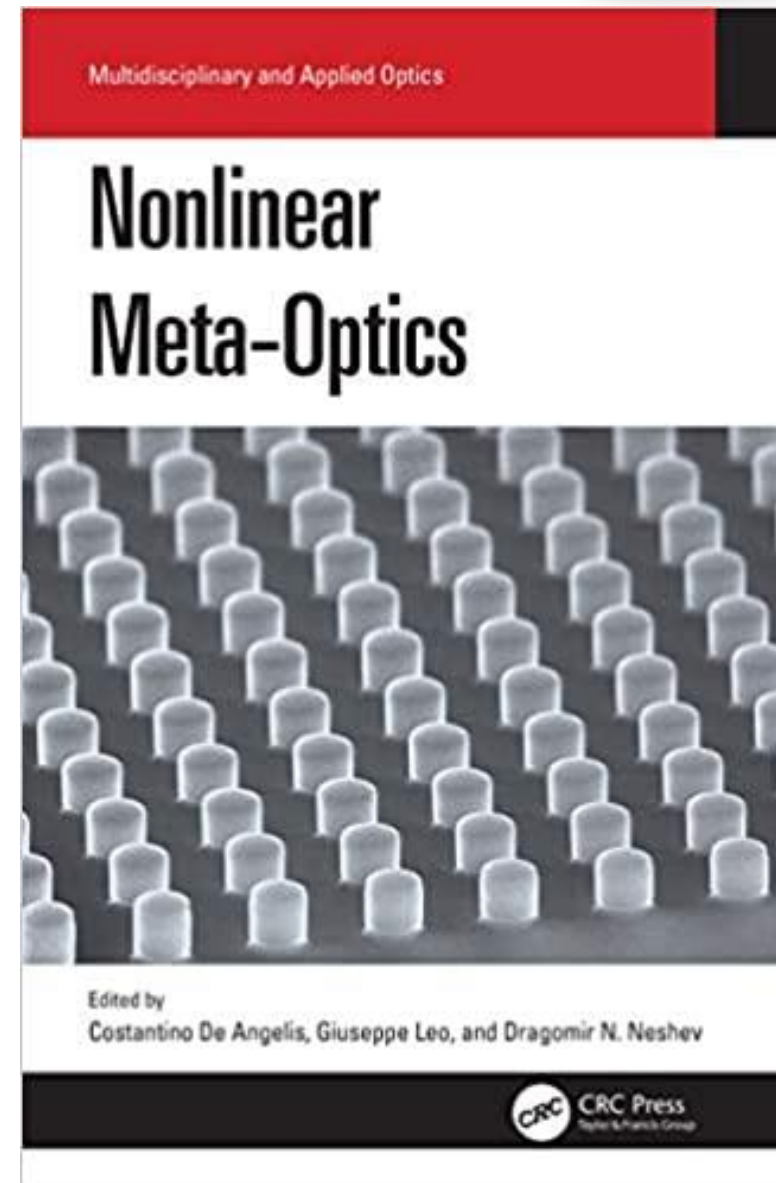
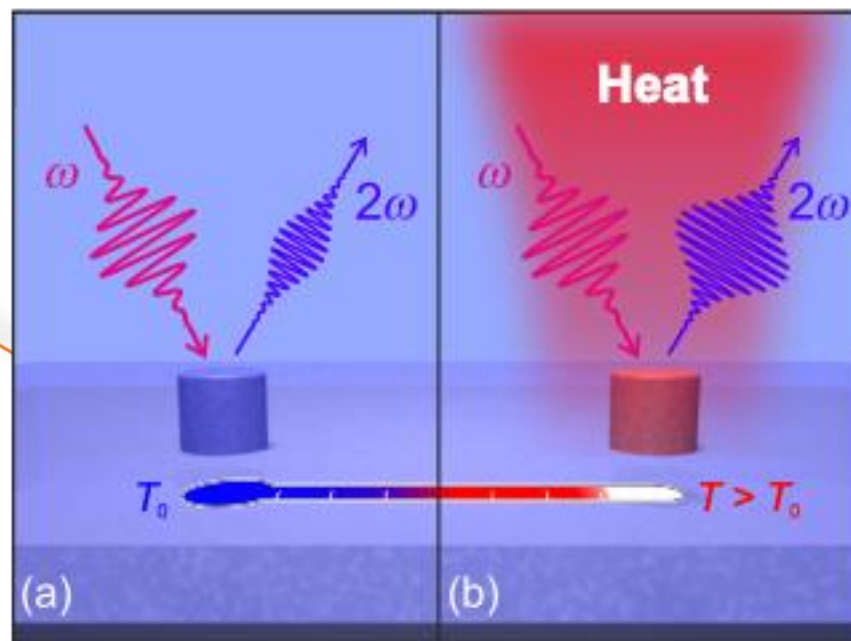
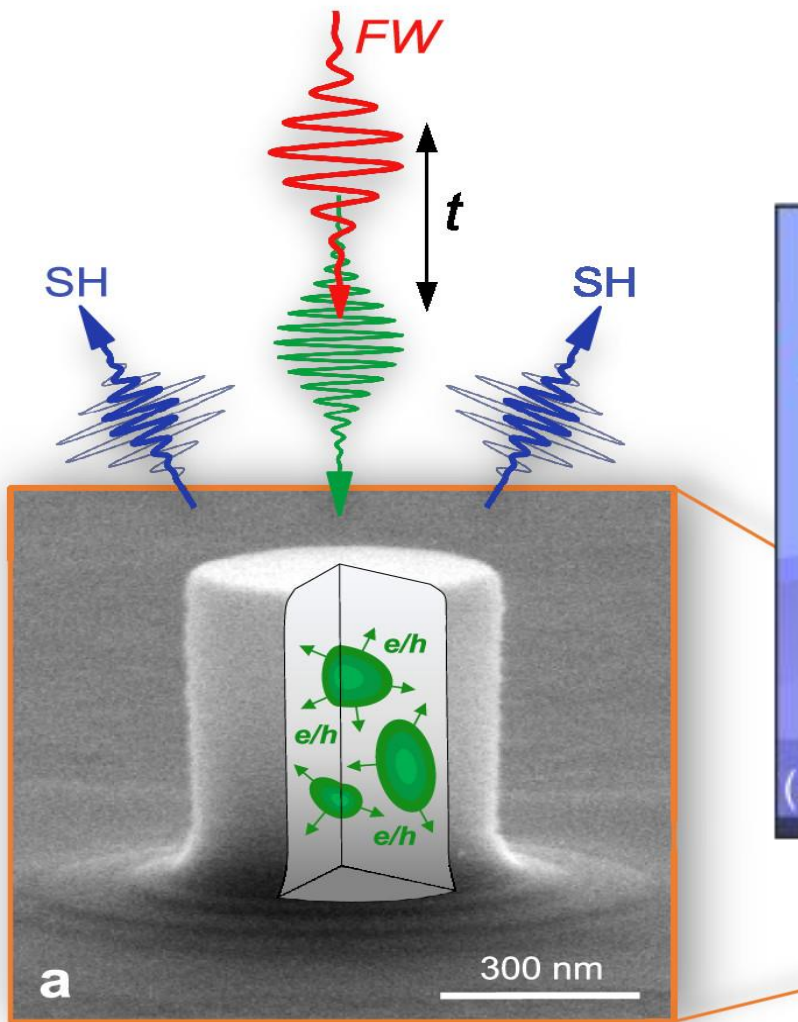
Jennifer Chu | MIT News Office  
February 22, 2021



Wenwei Liu et al., Diffractive metallens: from fundamentals, practical applications to current trends, *Advances in Physics: X* (2020)

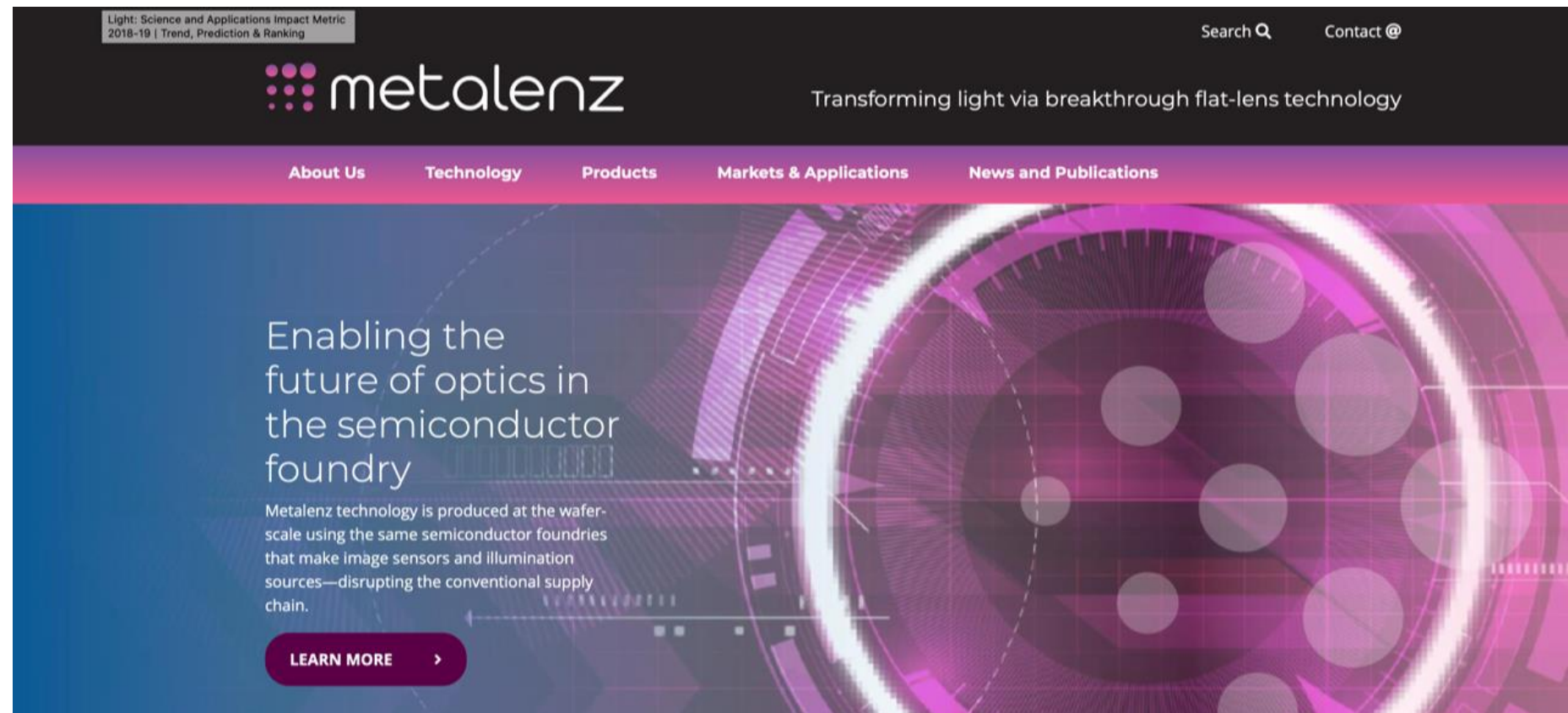


# Metallenti: il nostro lavoro





- DIMINUIRE LE PERDITE
- AUMENTARE LE DIMENSIONI
- RIDURRE I COSTI



# Top 10 Emerging Technologies 2019



COMMITTED TO  
IMPROVING THE STATE  
OF THE WORLD



## Tiny Lenses for Miniature Devices

Thin, flat metalenses could replace bulky glass for manipulating light



Domande?