

La fisica dell'invisibilità: nuove frontiere

di Francesca Maria Manoni

Abstract

Dal geniale – e immaginario – Q che realizza per James Bond autovetture accessoriate che possono scomparire alla vista dei 'nemici', ai più reali microchip elettronici invisibili con applicazioni anche nel settore della medicina e ai test su veicoli mobili schermati, il tema dell'invisibilità ha sempre interessato settori scientifici e applicativi all'interno dei quali è stato possibile sperimentare particolari condizioni realizzative, tradizionalmente considerate appannaggio esclusivo di elaborazioni fantascientifiche.

A parere dell'autore, quindi, l'interesse rivolto al tema dell'invisibilità della radiazione visibile e, in generale, di bande dello spettro elettromagnetico può coinvolgere anche l'ambito della sicurezza nazionale, sia per quanto riguarda l'occultamento di oggetti di piccole dimensioni – utilizzabili per il camuffamento di materiali sensibili –, sia per i pericoli derivanti dall'utilizzo di dispositivi invisibili, difficilmente tracciabili a causa del mascheramento ottico, come strumento di minaccia. Sulla base di questa considerazione l'articolo propone una sintesi sullo stato dell'arte delle attuali conoscenze in materia di fisica dell'invisibilità, introducendo gli aspetti innovativi della ricerca tecnologica in materia. L'avvento delle nanotecnologie ha di fatto prodotto, nel settore dell'ottica, un profondo cambiamento modificandone la descrizione classica e facendo emergere nuovi e inaspettati comportamenti della materia. Negli anni più recenti si è dunque riproposto il tema di celare regioni dello spettro elettromagnetico, in particolare la radiazione visibile, grazie allo sviluppo di metamateriali realizzati artificialmente. Questi presentano proprietà ottiche peculiari grazie alla negatività dell'indice di rifrazione e consentono di controllare la radiazione elettromagnetica attraverso opportune trasformazioni di coordinate per lo spazio curvo, comportando paradigmi di invisibilità mediante l'ottica di trasformazione, che studia il mirato design di mascheramento su scala nanometrica. Queste note rielaborano i concetti alla base del fenomeno dell'invisibilità, incluse le tecniche di camuffamento ottico e occultamento stealth, offrendo una sintetica panoramica sui metamateriali e sui mantelli di invisibilità alla luce degli attuali sviluppi della ricerca tecnologica.

Profilo dell'autore

Francesca Maria Manoni è dirigente fisico sanitario operante nel settore controlli di qualità in radiodiagnostica e ricercatore associato presso il dipartimento di Fisica dell'università Sapienza e docente di Fisica Medica presso l'università Tor Vergata. Ha a lungo lavorato in ambito fisico terrestre, sismologico, nucleare e ottico quantistico. Ha di recente svolto studi, ricerche e pubblicazioni sulla tecnologia laser, Q-switching, e sull'effetto Casimir in connessione ai metamateriali.

Questo articolo è pubblicato nell'ambito delle iniziative della sezione Il mondo dell'intelligence nel sito del Sistema di informazione per la sicurezza della Repubblica all'indirizzo www.sicurezzanazionale.gov.it.

Le opinioni espresse in questo articolo non riflettono necessariamente posizioni ufficiali o analisi, passate o presenti, del Sistema di informazione per la sicurezza della Repubblica.

Keyword invisibilità, radiazione elettromagnetica

Sommario Invisibilità – Metamateriali – Sviluppi recenti – Riferimenti bibliografici

Invisibilità

L'idea dell'invisibilità ha catturato l'immaginazione umana sin dai tempi antichi, in cui poteri magici e artifici particolari concessi dagli dei rendevano possibile questa trasformazione. Soltanto intorno alla metà del XIX secolo autori di fantascienza escogitarono speciali dispositivi che nascondessero alla luce fantasiosi oggetti e persone. Parallelamente, grazie allo sviluppo della fisica atomica furono gettate le prime basi teoriche sul tema dell'invisibilità, quale fenomeno dovuto alla diffusione o *scattering* di tipo inverso della radiazione elettromagnetica descritta dalle equazioni di Maxwell. Il fisico atomico Ehrenfest ipotizzò nel 1910 che una distribuzione di cariche elettriche in movimento potesse non emettere radiazione, implicando in tal senso il problema del risalire alla sorgente per inversione, consistente nella determinazione della sorgente a partire dalla radiazione emessa. Se sussistono sorgenti non radiative non è possibile dedurre informazioni sulla natura della sorgente e il problema di inversione presenta una soluzione non unica. La non unicità in un problema inverso di questo tipo implica l'esistenza di oggetti invisibili nel problema diretto e viceversa. In un problema diretto si determina l'effetto prodotto da una determinata causa, mentre in una ricostruzione inversa si risale alla causa da un effetto specifico. Devaney e Wolf, già nel 1973, dimostrarono l'esistenza di correnti monocromatiche non radiative. Una tale condizione è rappresentata da un fenomeno ondulatorio peculiare che si verifica a causa dell'interferenza distruttiva delle componenti all'esterno della sorgente tridimensionale. Per quanto sia stata dimostrata teoricamente la non esistenza di diffusori non diffondenti-*non scattering* strettamente correlati alle sorgenti non radiative, si sono scoperti particolari scatters, quali i reticoli fotonici con simmetria parità-tempo PT che esibiscono proprietà unidirezionali di invisibilità.

Per poter meglio comprendere il confine visibilità/invisibilità è opportuno considerare il fenomeno della trasparenza ottica. Un oggetto può definirsi trasparente quando la luce che lo attraversa non interagisce con le particelle di cui l'oggetto è costituito, oppure l'eventuale interazione risultante è tale che essa possa attraversarlo e tornare indietro, senza trovare alcun ostacolo nel proprio percorso. Dal momento che gli oggetti possono essere visti grazie a quella parte di radiazione elettromagnetica appartenente allo spettro del visibile, che provenendo da qualsivoglia sorgente viene in seguito (in parte o completamente) riflessa sino a giungere all'osservatore, se ne deduce che la forma più naturale di invisibilità (reale o fittizia) è rappresentata da un oggetto che contemporaneamente non assorbe né riflette la luce visibile. In natura questo fenomeno prende il nome di trasparenza. Nessun materiale o sostanza naturale risulta essere trasparente al 100%, ad esempio nell'acqua la luce viene rifratta, ossia penetrandovi muta la direzione di propagazione del raggio incidente.

Per poter rendere invisibile un oggetto bisogna mascherarlo, ovvero riuscire a manipolare la luce in modo tale che quest'ultima invece di passare attraverso l'oggetto o di rimbalzare sull'oggetto, ci passi attorno. L'oggetto deve, dunque, apparire come un ostacolo lungo il quale la luce possa

scivolare (cambiando solo momentaneamente la propria direzione originaria) ed infine apparire davanti allo stesso per poi giungere agli occhi di un potenziale osservatore. Se riuscissimo, quindi, a titolo di esempio, a far sì che la luce proveniente dalla parte posteriore (nascosta) di un oggetto passi intorno all'oggetto stesso per poi ricomporsi sulla parte anteriore (visibile) sino a raggiungere l'osservatore avremmo mascherato l'oggetto che risulterebbe del tutto invisibile. Così facendo avremmo realizzato un vero e proprio 'camuffamento ottico'.

Il camuffamento ottico attivo (o adattativo) è quel tipo di mascheramento ottico che si adatta ai dintorni dell'oggetto che si vuole rendere invisibile (ad esempio un aereo militare). In teoria, un camuffamento ottico eseguito ad hoc potrebbe occultare perfettamente un oggetto da qualsiasi rilevamento visivo.

La contro-illuminazione è un metodo di camuffamento in cui un oggetto (ad esempio un aereo) produce luce per uguagliare lo sfondo illuminato in modo naturale (ad esempio la superficie di un oceano o il cielo). Questo tipo di camuffamento è stato studiato durante la seconda guerra mondiale per uso marino.

Allo stato attuale della tecnologia il camuffamento attivo artificiale può essere sviluppato utilizzando dei diodi organici ad emissione di luce (OLEDS) e altre tecnologie che consentono la proiezione di immagini su superfici di forma irregolare. Questo metodo funziona in modo ottimale relativamente ad una singola direzione e per oggetti stazionari.

Nel 2003, alcuni ricercatori dell'università di Tokio coordinati da S. Tachi hanno creato un sistema di camuffamento attivo proiettando le immagini dell'ambiente circostante su un tessuto ricoprente l'oggetto da occultare, creando così l'illusione dell'invisibilità. Il tessuto era costituito da perline di vetro aventi un diametro di soli 50µm, in grado di riflettere la luce direttamente alla sorgente luminosa (Fig. 1).



Fig 1: Il mantello dell'invisibilità indossato da S. Tachi nel 2003 (fonte: <http://www.i4u.com>)

Da un punto di vista teorico un dispositivo di occultamento ottico si basa su una tecnologia di tipo *stealth*, in grado di rendere parzialmente o totalmente invisibili degli oggetti di piccole o grandi dimensioni, ad alcuni range di frequenze dello spettro elettromagnetico (ad esempio la luce visibile o l'infrarosso). Mediante la tecnologia *stealth* si sono costruiti velivoli invisibili ai radar utilizzando essenzialmente due sistemi in contemporanea: la realizzazione di oggetti con superfici di forma tale da deviare i raggi radar per non rifletterli, e il rivestimento con vernice che assorbe le emissioni radar. Entrambe le soluzioni sono state studiate fin dalla seconda guerra mondiale. Le superfici degli aerei *stealth* sono angolate di 30° rispetto ai segnali radar in arrivo che sono sviati, mentre tutta la superficie esterna è ricoperta di una vernice radar-assorbente, compreso l'abitacolo del pilota. La sagoma di un velivolo convenzionale è affusolata e rotondeggiante, per cui le onde radar tornano indietro in qualsiasi direzione, e, quindi, anche nella direzione del radar nemico che lo individua come bersaglio. L'aereo *stealth*, invece, ha superfici esterne sfaccettate come le facce di un diamante, perciò le onde radar non assorbite dallo strato radar-assorbente vengono riflesse soltanto in alcune direzioni privilegiate definite dal progettista (Fig. 2).



Fig. 2: L'aereo *stealth* F-117 Nighthawk.

Lo studio dell'invisibilità è stato riproposto e rinvigorito dalla pubblicazione degli articoli di Leonhardt (2006) e Pendry, Schurig e Smith (2006) i quali dimostrarono teoricamente che pur non essendo possibile la costruzione di un oggetto invisibile a priori, tuttavia è possibile creare un mantello di invisibilità che nasconda l'oggetto arbitrario nella zona di mascheramento. Il design di questi mantelli si basa sulla considerazione che la luce che si propaga in una regione di vuoto dello spazio curvo è matematicamente equivalente alla propagazione luminosa in un mezzo cartesiano. Attraverso la geometria differenziale, è possibile tracciare regioni di spazio con il desiderato effetto sulla luce (ad esempio il mascheramento o *cloaking*) cui corrispondono dal punto di vista ingegneristico strutture di materiali con determinate proprietà ottiche di *cloaking*. La costruzione del design ottico è studiato dalla cosiddetta ottica di trasformazione per lo sviluppo dei vari schemi di mascheramento.

Metamateriali

Uno dei metodi più efficaci per ottenere un certo grado o livello di invisibilità è quello relativo all'impiego dei cosiddetti metamateriali aventi proprietà ottiche molto particolari. Questi materiali non esistono in natura e sono realizzati in laboratorio. La loro creazione è assai recente e risale al 2005-2006. Essi sono ottenuti utilizzando degli strati in successione molto sottili di argento, fluoruro di magnesio e vetro che vengono in seguito 'bucherellati', formando così una sorta di griglia in grado di modificare il processo di rifrazione della luce, e indirizzarla, dunque, lungo un particolare percorso. Questi materiali acquisiscono le loro proprietà fisiche principalmente grazie alla loro struttura piuttosto che alla loro composizione. I metamateriali sono di fatto composti macroscopici costruiti artificialmente, costituiti di celle elementari che possono avere disposizione periodica o anche non periodica, ma che devono soddisfare la condizione di avere dimensioni molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione con cui interagiscono. Le celle, costituite da inclusioni poste nel volume o sulla superficie di un materiale ospite, sono progettate per produrre nuove caratteristiche che non si trovano in natura. Tali proprietà nascono da funzioni di risposta della cella base, qualitativamente nuove, che non sono osservate nei singoli materiali costituenti. La condizione che la cella unitaria sia di dimensioni molto minori della lunghezza d'onda di operazione dipende dal fatto che la radiazione valuta la risposta del materiale operando una media su un volume che ha dimensioni dell'ordine del cubo della sua lunghezza d'onda. Mentre questo è abbastanza facile nelle microonde, dove la lunghezza d'onda è dell'ordine del centimetro, e quindi i blocchi unitari di costruzione possono avere dimensioni dell'ordine del millimetro o di una sua frazione, nel campo dell'infrarosso o del visibile le strutture devono avere dimensioni nanometriche e questo costituisce una sfida alle tecnologie moderne di costruzione di materiali innovativi.

I metamateriali hanno mostrato una flessibilità senza precedenti nel manipolare le onde elettromagnetiche e produrre nuove funzionalità includendo, per esempio, la capacità di costruire sistemi ottici con potere risolutivo molto inferiore alla lunghezza d'onda (superrisoluzione) e di rendere oggetti macroscopici invisibili. Essi offrono possibilità interessanti per nuove applicazioni elettromagnetiche in diverse aree, come le immagini mediche, nuove lenti e antenne per radar, applicazioni ai sistemi di difesa e telecomunicazioni e così via.

I metamateriali così definiti sono materiali costruiti per avere un comportamento elettromagnetico che si estrinsechi in costante dielettrica o permittività elettrica (ϵ) e permeabilità magnetica (μ) con valori prestabiliti all'inizio della loro progettazione. Le proprietà ottiche di un materiale sono ascrivibili in larga misura al suo indice di rifrazione n , che caratterizza le proprietà rifrattive attraverso le leggi di Cartesio-Snell. La conseguenza più spettacolare dell'aver un indice di rifrazione negativo può aversi considerando la legge di Cartesio-Snell della rifrazione:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Essa stabilisce che un raggio di luce che incida sulla superficie di separazione di due mezzi di indice di rifrazione rispettivamente n_1 e n_2 con un angolo θ_1 rispetto alla normale alla superficie nel primo mezzo, viene rifratto nel secondo mezzo con un angolo θ_2 dato. Se il secondo mezzo ha un indice di rifrazione negativo, secondo la (1) deve essere negativo il valore del seno di θ_2 e quindi anche il valore di θ_2 : il raggio dev'essere inclinato rispetto alla normale alla superficie dalla parte

opposta di quello che avverrebbe se il mezzo avesse indice di rifrazione positivo. La soluzione delle equazioni di Maxwell, che descrivono il comportamento ondulatorio della luce, mostra che vale la relazione:

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2)$$

Nei NIM-*Negative Index Materials*, ovvero metamateriali a indice di rifrazione negativo, anche denominati LHM-*Left Handed Materials*, sinistrorsi, in cui la terna dei vettori campo elettrico-campo magnetico-vettore di propagazione seguono la regola della mano sinistra, poiché ε e μ sono contemporaneamente negative, si potrebbe pensare che il valore dell'indice di rifrazione resti comunque positivo. Non è così, perché la radice quadrata può essere presa con il segno positivo o negativo; in questo caso (ε e μ contemporaneamente negative) si deve prendere la radice con il segno meno. Il fisico russo Victor Veselago provò che tali sostanze potessero trasmettere luce. I metamateriali con indice di rifrazione negativo dispongono di numerose ed interessanti proprietà, tra le quali l'inversione dell'effetto Doppler, dell'effetto Čerenkov e del vettore di Poynting. L'effetto Doppler consiste nel fatto che se un osservatore si muove avvicinandosi a una sorgente, egli rileva un'onda di frequenza più alta, mentre se si allontana da essa, l'onda ha una frequenza più bassa rispetto a quella naturale emessa. Per un NIM, questo effetto è invertito: se una sorgente si muove verso un rivelatore, si osserva che la radiazione rilevata ha una frequenza più bassa di quella generata quando la sorgente è immobile. Un altro effetto invertito è l'effetto Čerenkov, cioè l'emissione di luce da parte di una particella carica che si muove in un mezzo a una velocità maggiore di quella che avrebbe la luce nel mezzo stesso. In un materiale ordinario la luce viene emessa in un cono che punta in avanti nella direzione del moto della particella; in un NIM il cono è diretto all'indietro. Il vettore di Poynting descrive il flusso di energia associato alla propagazione del campo elettromagnetico. Questi andamenti invertiti garantiscono la deviazione necessaria ai fini dell'invisibilità ottica.

Fra le prime realizzazioni di metamateriali a indice di rifrazione negativo si può menzionare una struttura, messa a punto nel 2005, costituita da una schiera di sbarrette d'oro di dimensioni nanometriche disposte in modo da realizzare una doppia periodicità spaziale e dare una risonanza, operanti a 1,5 μm . Per questa struttura la descrizione della parte reale dell'indice di rifrazione e della sua parte immaginaria evidenzia chiaramente che in una ristretta regione fra circa 1300 nm e 1600 nm di lunghezza d'onda la parte reale di n ha valori negativi. Si deve tuttavia rilevare che in questa stessa regione la parte immaginaria di n è elevata, il che implica un forte assorbimento. Altre disposizioni hanno usato insiemi di piramidi tronche opportunamente disposte su un substrato di base o nanotubi metallici o altro ancora. In tutti i casi si sono trovate regioni di frequenza in cui ε e μ sono contemporaneamente negative, anche se in un intervallo di frequenze piuttosto ristretto.

Un' interessante applicazione dei metamateriali è la possibilità di nascondere un oggetto a un'onda elettromagnetica incidente. In un nuovo approccio per progettare strutture elettromagnetiche con questa capacità, proposto nel 2006, i cammini delle onde elettromagnetiche sono controllati dentro un materiale introducendo una variazione spaziale specifica nei parametri costitutivi, cioè progettando materiali in cui la costante dielettrica ε e la permeabilità magnetica μ sono funzioni del

punto scelte in modo da influenzare il cammino della radiazione elettromagnetica in modo opportuno. La ricetta per determinare questa variazione si basa su trasformazioni di coordinate e permette di arrivare a strutture che altrimenti sarebbero difficili da concepire, creando un nuovo settore dell'ottica detta ottica di trasformazione, già menzionata. Si possono per questo applicare diversi metodi. Quello più semplice consiste nell'utilizzare l'ottica geometrica, richiedere che ogni raggio uscente da un punto faccia un dato percorso e, applicando l'equazione dell'iconale, trovare quale deve essere il valore dell'indice di rifrazione in ogni punto per obbligare il raggio luminoso a seguire quel determinato percorso. Tale metodo ovviamente soffre di numerose limitazioni in gran parte legate all'uso dell'ottica geometrica e soprattutto non è in grado di nascondere l'oggetto a onde che provengono da tutte le direzioni.

Un secondo metodo più sofisticato consiste nell'uso delle trasformazioni conformi applicate all'ottica geometrica per cambiare il percorso rettilineo di un raggio in uno modificato a piacere dalla trasformazione che permette poi di calcolare i valori della costante dielettrica e della permeabilità magnetica necessari per realizzare il nuovo percorso. Un terzo metodo, più generale, parte dall'osservazione che se la metrica dello spazio cambia, le equazioni di Maxwell restano invariate nella forma e cambiano solo ε e μ . Un raggio che viaggia rettilineo in una metrica cartesiana, può percorrere una traiettoria qualunque cambiando la metrica dello spazio. Si può quindi far percorrere una traiettoria qualunque al raggio semplicemente assegnando a ogni punto dello spazio opportuni valori di ε e μ . In generale, questo modo di procedere porta alla costruzione di un mezzo anisotropo in cui ε e μ possono anche assumere valori negativi e quindi richiedere un metamateriale.

Tale metodo può essere applicato inoltre a un grandissimo numero di casi nella progettazione ottica. Applicato al problema dell'invisibilità, lo schermaggio può operare per onde che provengono da qualsiasi direzione e quindi l'oggetto è veramente nascosto.

L'applicazione dell'ottica delle trasformazioni all'invisibilità elettromagnetica richiede in sostanza la progettazione di un materiale opportunamente strutturato per rendere un volume invisibile alla radiazione incidente. Il procedimento per progettare l'invisibilità implica una trasformazione delle coordinate, già descritta, che costringe lo spazio in un guscio che circonda il volume che si vuole nascondere. Le equazioni di Maxwell sono invarianti nella forma rispetto a trasformazioni di coordinate, cosicché soltanto le componenti dei tensori ε e μ sono cambiate dalla trasformazione divenendo funzioni dello spazio e rendendo il materiale anisotropo. Realizzando un materiale con queste proprietà complesse, il volume da nascondere più il suo rivestimento, quando sono visti dall'esterno, presentano le proprietà dello spazio vuoto. Non si hanno quindi onde diffuse né ombre nel campo trasmesso. Per essere più specifici, un oggetto può risultare invisibile a un'onda elettromagnetica incidente se i raggi dell'onda vengono deviati dal volume che contiene l'oggetto circondandolo e vengono poi ricompattati nell'onda originale incidente al di là di questo. L'invisibilità è ottenuta, per esempio, creando una cavità in cui la radiazione elettromagnetica non può entrare (Fig. 3). La cavità viene circondata da un metamateriale progettato in modo da avere in ogni punto valori della costante dielettrica e della permeabilità magnetica tali che un fascio di radiazione viene compresso e deviato in modo da circumnavigarla e successivamente viene riportato allo stato originale. L'idea base è quindi progettare un mezzo dielettrico con un indice di rifrazione specifico che letteralmente pieghi e guidi la luce attorno a un oggetto desiderato. Poiché il

dispositivo stesso sarebbe invisibile, un osservatore esterno non vedrebbe l'oggetto. L'effetto ottico sarà equivalente a osservare i raggi di luce che si propagano nello spazio vuoto, perché gli oggetti dello sfondo sono visibili. I raggi che, per esempio, provengono da una sorgente puntiforme, vengono deviati per non passare nella regione proibita e al di là di questa riprendono il loro percorso rettilineo con origine nella sorgente, esattamente come se il volume da nascondere non esistesse.

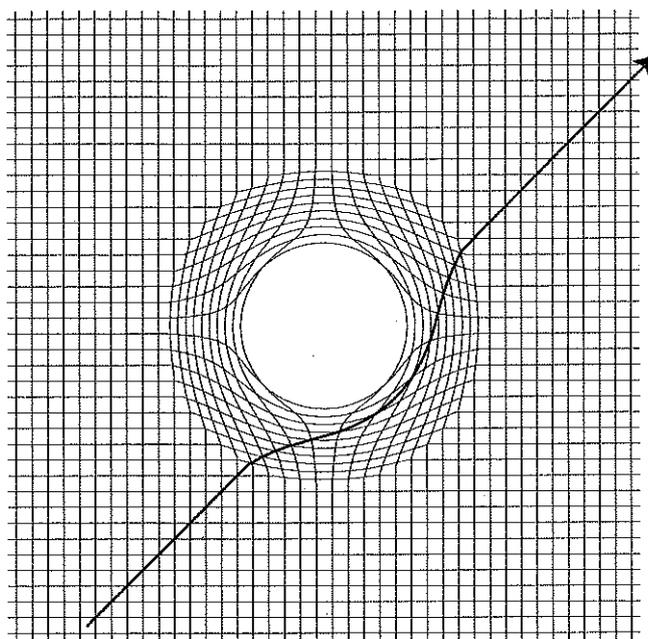


Fig. 3: La distorsione virtuale dello spazio rispetto alla propagazione di un raggio luminoso

Un effetto di invisibilità perfetto basato su mezzi isotropi non è stato ancora ottenuto. Tuttavia, utilizzando mezzi anisotropi, le distorsioni introdotte dalla natura ondulatoria della luce, in via di principio, possono essere ridotte a zero. Il problema è stato affrontato applicando sia le trasformazioni conformi sia la trasformazione della metrica dello spazio, dimostrando come sia possibile creare una zona invisibile con entrambe le trattazioni. Uno dei problemi che si incontrano nel progetto dei NIM riguarda le perdite nel materiale che invariabilmente costituiscono una forte limitazione. Per ovviare all'inconveniente, taluni autori hanno suggerito che, nella costruzione della cella elementare costituente il metamateriale, sia inserito un elemento attivo che possa compensare le perdite. Questo può essere realizzato abbastanza facilmente nel dominio delle microonde mentre sembra ancora assai difficile per frequenze superiori.

Di particolare interesse per l'invisibilità della radiazione visibile è l'utilizzo di metamateriali fotonici, anche conosciuti come metamateriali ottici. Un metamateriale fotonico, in sostanza, è una struttura artificiale ingegnerizzata che presenta celle periodiche, o meta-atomi, progettate con specifici parametri e valori per poter interferire con il campo elettromagnetico a frequenze ottiche. Inoltre, è necessario utilizzare delle tecniche litografiche per la produzione di nano-risonatori che riproducano una sorta di circuito LC. Un esperimento atto a realizzare dei metamateriali fotonici è stato eseguito accoppiando ai risonatori una struttura periodica di fili molto sottili, garantendo la negatività di ϵ e μ in un ristretto intervallo di frequenze.

Operando una valutazione complessiva dell'attuale ricerca si può affermare che l'invisibilità è stata pienamente raggiunta nel visibile per quanto riguarda il colore rosso, mentre per le altre componenti cromatiche è in studio la possibilità di manipolare la struttura atomica su scala nanometrica attraverso la ridisposizione degli atomi stessi.

Si menzionano, infine, le promettenti e interessanti possibilità dei NIM anche nel campo dell'ottica non lineare, ancora da investigare, e le ulteriori applicazioni a settori quali l'acustica e la sismologia. I metamateriali acustici sono dei materiali artificiali progettati per controllare, direzionare e manipolare il suono, sottoforma di onde sonore, infrasoniche ed ultrasoniche in gas, liquidi o solidi. Nei metamateriali acustici, le onde sonore o soniche possono essere estese al dominio della rifrazione negativa attraverso la variazione del modulo di compressibilità e della densità di massa, analogamente ai parametri di permittività elettrica e permeabilità magnetica del caso ottico. Per quanto riguarda lo sviluppo di metamateriali sismici, questi sono progettati per contrastare gli effetti delle onde sismiche mediante lo schermaggio ad opera di strutture artificiali presenti sulla superficie terrestre o in prossimità di quest'ultima.

Sviluppi recenti

Nel 2012 è stato realizzato un nuovo metamateriale attivo mutuando concetti di meccanica quantistica. Esso permette di ottenere l'invisibilità in funzione della direzione di provenienza della luce, con interessanti applicazioni alla tecnologia laser. In altri studi si è tentato di modulare l'alterazione spaziale dell'indice di rifrazione con l'alterazione tempo associata, sfruttando la simmetria parità-tempo PT, una proprietà dei sistemi fisici che sono invarianti all'inversione di tempo e alla riflessione speculare, richiedendo che il profilo dell'indice di rifrazione sia simmetrico nella sua parte reale, correlata al rallentamento della luce nel materiale e all'angolo con cui essa viene piegata, e antisimmetrico in quella immaginaria, collegata all'amplificazione o all'assorbimento della luce nel materiale.

Inizialmente l'occultamento della luce è stato progettato soltanto nel caso bidimensionale distorcendo virtualmente lo spazio piano per deviare il raggio luminoso. Recentemente, nell'ambito di un progetto europeo, è stato elaborato un mantello di invisibilità costituito da piccolissime aste di un metamateriale fotonico larghe poche centinaia di nanometri disposte accuratamente secondo una struttura simile ad una catasta di legno in modo da poter curvare le onde luminose. Modificando la velocità e la direzione nel mezzo, le onde luminose sono state guidate attorno ad una protuberanza di pochi micron in modo da renderla invisibile in tre dimensioni. In questo modo è stato possibile occultare oggetti di dimensione inferiore al millimetro in tre dimensioni, scavalcando le limitazioni imposte dal caso bidimensionale, in cui l'invisibilità era raggiunta per un angolo di vista frontale e dall'alto, ma non lateralmente.

Ricercatori dell'Università di Seoul-Corea del Sud e dell'Università di Duke-Stati Uniti hanno messo a punto un metamateriale elastico in grado di funzionare come mantello di invisibilità. Si tratta di un metamateriale 'intelligente' che si adatta all'oggetto da occultare per deformazione e, in virtù di questa, produce rispetto ai parametri critici (permittività, permeabilità magnetica e indice di rifrazione) proprio quei valori che consentono di guidare la luce nel modo desiderato, rendendo

invisibile l'oggetto. Si sono ottenuti mantelli per oggetti di dimensioni intorno ai 10 mm, per radiazioni incidenti comprese fra gli 8 Ghz e i 14 Ghz.

Un gruppo di ricercatori coordinato da Alù della Texas University di Austin ha messo a punto una nuova tecnica per realizzare mantelli di invisibilità grazie a 'metasuperfici' che consentono di cancellare, per interferenza, le onde che si diffondono nelle direzioni indesiderate, ottenendo dunque un effetto di trasparenza e di invisibilità da tutti gli angoli di osservazione. Questa tecnica permette di usare materiali standard con la sola richiesta di essere costituiti da microelementi di dimensioni più piccole della lunghezza d'onda a cui si vuole ottenere l'invisibilità. Il mantello è stato realizzato facendo aderire, secondo un preciso disegno a rete, un sottile nastro di rame di 66 μm di spessore a una pellicola di policarbonato di 100 μm di spessore. Questa struttura è facilmente conformabile anche a oggetti di forma irregolare e asimmetrica, contrariamente a quanto avviene per i metamateriali che sono estremamente sensibili alle imperfezioni nel rispetto delle proprietà di disomogeneità, anisotropia e risonanza.

Riferimenti bibliografici

- M. BERTOLOTTI, *Metamateriali*, Treccani, <http://www.treccani.it/enciclopedia/metamateriali>, 2010 (ultimo accesso: 22 giugno 2017)
- G. GBUR - S. PEREVERZEV, *Invisibility physics: past, present and future*, in «Progress in Physics Optics», Vol.58, 2013, pp. 65-114
- F. INTILLA, *Fisica dell'invisibilità. Metamateriali e tecnologie del futuro*, Aracne Editrice, 2013
- U. LEONHARDT - T. PHILBIN, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*, Dover Publications, New York, 2010
- J. PENDRY - D. SCHURIG, - D. SMITH, *Controlling electromagnetic fields*, in «Science», Vol. 312, 2006, pp. 1780–1782
- V.M. SHALAEV - W. CAI - U.K. CHETTIAR - ET AL., *Negative index of refraction in optical metamaterials*, in «Optics Letters», Vol. 30, 2005, pp. 3356-3358
- V. VESELAGO, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* , in «Soviet Physics Uspekhi», Vol. 10, 1968, pp. 509–514
- S. ZOUDHI - A. SIHVOLA - A.P. VINOGRADOV, *Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications*, Springer-Verlag, New York, 2008-12