

Invisibilità: dalla magia alla tecnologia

I metamateriali riescono a interagire con le radiazioni elettromagnetiche modificandone le traiettorie e occultandoli.

Philip Ball,

fisico, chimico,
science writer

«Gli elicotteri si avvicinano rapidi al bersaglio. Tra un attimo saranno a distanza di tiro. Capendo di essere stati sorpresi, i tank attivano i metamateriali del dispositivo mimetico... e svaniscono». Fantascienza? No, è la voce fuori campo di un video promozionale dell'Optoelectronics Research Centre dell'Università di Southampton, nel Regno Unito. Mentre gli elicotteri si avvicinano ai carri armati, su un cruscotto si accende un indicatore rosso con la scritta «Cloaking On»: il sistema mimetico è entrato in funzione e i carri armati svaniscono. La voce afferma che «sembra un episodio di *Star Trek*, ma la scienza del XXI secolo c'è quasi riuscita». In al-

Carri armati che svaniscono: sembra un episodio di *Star Trek*, ma la scienza del XXI secolo c'è quasi riuscita.

tre parole, presto avranno la madre delle tute mimetiche: l'invisibilità. L'invisibilità è il tema dominante del tentativo, da parte dell'ottica trasformazionale e dell'ingegneria

dei metamateriali, di manipolare la luce in modi un tempo impensabili. È dal 2006 che scienziati e ingegneri realizzano versioni diverse del cosiddetto mantello dell'invisibilità. Nessuna è mai riuscita a far svanire nel nulla un oggetto di uso comune, ma ci si è andati vicino, ad esempio, con le "scatole" di vetro in cui gli oggetti sembrano scomparire mentre il contenitore continua ad apparire vuoto.

Altri "mantelli" rendono un oggetto trasparente alle microonde, un tipo di radiazione simile alla luce ma con una lunghezza d'onda maggiore. Stragemmi del genere potrebbero già essere applicati allo sviluppo di tecnologie *stealth* (letteralmente furtive) per sfuggire ai radar. L'ottica trasformazionale si è sviluppata in direzioni più esotiche, al limite dell'incredibile, come nei progetti per alterare le sembianze di un oggetto («ottica delle illusioni») o per mimetizzare un passaggio in un muro. Ecco perché i giornalisti citano così spesso Harry Potter. Ma quanto manca alla realizzazione del suo mantello dell'invisibilità?

La direzione sbagliata

L'ottica trasformazionale e la scienza dei metamateriali non mirano a nascondere gli oggetti rendendoli trasparenti o mimetizzandoli. Le due discipline nascono da un interrogativo di natura puramente teorica: «Cosa accadrebbe se...?». Intorno al 1960, il fisico teorico Victor Veselago, dell'Istituto Lebedev di Mosca, si chiese se esistessero materiali capaci di interagire con la luce in modo non convenzionale.

La luce è un'onda elettromagnetica: un campo elettrico e un campo magnetico che oscillano in fase con una frequenza che determina il colore della radiazione. Quando la luce attraversa un materiale, l'oscillazione si trasmette alle particelle cariche – elettroni e nuclei – che lo compongono. L'intensità della risposta alla componente elettrica della luce è detta permittività del materiale, l'in-



Un materiale con indice di rifrazione negativo deflette la luce nella direzione “sbagliata” (a sinistra), generando illusioni ottiche bizzarre (a destra). © Karlsruhe Institute of Technology/Optics Express

tensità della risposta alla componente magnetica è la permeabilità. In generale, le due risposte sono proprio quelle che ci aspetteremmo dall’attrazione di cariche o poli magnetici opposti: il campo elettrico e il campo magnetico del materiale si allineano con quelli del fascio luminoso.

E se non accadesse? Se la risposta fosse di segno opposto? Vorrebbe dire che la permittività elettrica o la permeabilità magnetica hanno un valore negativo. Il materiale si comporterebbe come una bussola che punta a sud anziché a nord. Sembra impossibile, ma in certe circostanze accade davvero, e Veselago lo sapeva. Ad esempio, alcuni metalli esibiscono una permittività negativa se illuminati con luce ultravioletta. In caso di permittività o permeabilità negativa, il materiale risulta opaco. Ma che cosa accadrebbe se *entrambe* le quantità fossero negative? Questo fenomeno non era mai stato osservato o immaginato, ma Veselago si rese conto che le conseguenze sarebbero state bizzarre. Il materiale diventerebbe trasparente, ma il suo effetto su un fascio di luce incidente sarebbe molto strano: lo defletterebbe dalla parte sbagliata.

In un mezzo denso e trasparente come il vetro o l’acqua, la luce è più lenta che nel vuoto o in aria. Il rallentamento è la causa della rifrazione, il fenomeno per cui quando vi immergete in una piscina il vostro corpo appare distorto. La deflessione all’ingresso nell’acqua fa sì che la luce segua una traiettoria diversa da quella non deflessa. L’entità del rallentamento e della deflessione è quantificata dall’indice di rifrazione: maggiore è l’indice di rifrazione di una sostanza, più marcata è la deflessione.

Nel 1967 Veselago pubblicò un articolo (in russo) sulle proprietà di un materiale dotato di

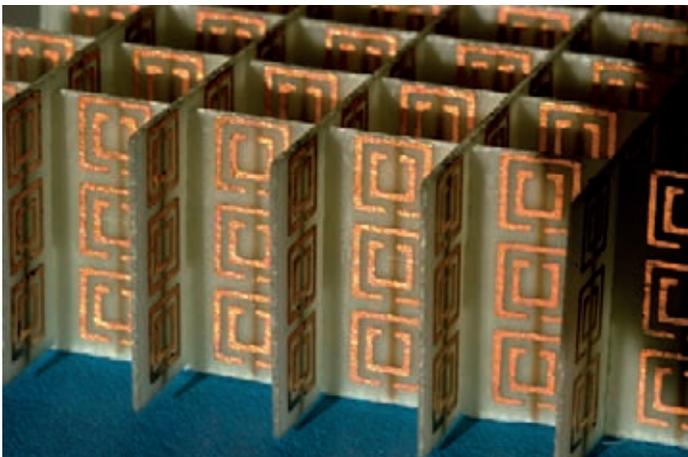
permittività e permeabilità negative, tra cui l’indice di rifrazione *negativo*. Un oggetto immerso in un materiale del genere apparirebbe bizzarro: una matita, ad esempio, non risulterebbe solo piegata ma spezzata nettamente in due. L’effetto sarebbe ancora più strano se osservassimo la matita dall’alto, perché avremmo l’impressione di vederla fluttuare al di sopra della superficie liquida. L’articolo di Veselago, tradotto in inglese l’anno seguente, fu considerato una semplice curiosità per decine di anni.

I metamateriali diventano realtà

Alla fine degli anni ’90, David Smith, ricercatore all’Università di San Diego, stava studiando l’interazione della luce con piccole particelle metalliche dotate di permittività negativa, quando scoprì l’articolo di Veselago. Smith intuì che sarebbe stato più facile studiare il problema servendosi di una versione macroscopica delle particelle e misurandone la risposta alla luce; decise di ricorrere a una matrice di “atomi giganti”, formata da piccole antenne capaci di ricevere e di trasmettere e dotata di proprietà analoghe a quelle degli atomi di metallo, compresa la permittività negativa. Dopo aver “ingrandito” gli atomi, Smith dovette “ingrandire” anche la luce, passando a lunghezze d’onda dell’ordine del centimetro, le microonde.

Smith scoprì che da poco il fisico John Pendry dell’Imperial College di Londra aveva pubblicato la ricetta di cui aveva bisogno. L’articolo spiegava come realizzare un materiale artificiale del genere a partire da una matrice di piccole spire. Il nome era già pronto: *metamateriale*.

A una conferenza, Smith conobbe Pendry e quando gli espose il problema a cui stava lavorando



Un metamateriale per guidare le microonde, formato da una matrice di circuiti stampati interconnessi, sui quali sono state ricavate delle strisce di rame. © David Smith.

do capì che si potevano realizzare metamateriali ancora più strani sostituendo le spire con strisce conduttrici a forma di C (*split rings*). Willie Padilla, un collega di Smith, notò che avrebbe potuto creare molti *split rings* in un colpo solo incidendo opportunamente la lamina di rame di un circuito stampato e intuì che per realizzare la matrice sarebbe stato sufficiente assemblare più schede. Nel 2000, Smith, Padilla e i loro collaboratori realizzarono un metamateriale con un indice di rifrazione negativo e dimostrarono che era in grado di deviare le microonde nella direzione “sbagliata”. Avevano guidato la luce come mai nessuno era riuscito prima di loro.

Illusione ottica

Per descrivere i metamateriali si può immaginare che introducano una distorsione spaziale capace di reindirizzare la luce su traiettorie nuove e inattese. In altre parole, si può pensare che alterino la trama dello spazio-tempo. Da qui nasce il nome di ottica trasformazionale.

Variando forma e dimensioni degli *split rings* e delle spire si può ottenere un indice di rifrazione che varia da un punto all’altro e deviare quindi la luce in ogni direzione. Deflettendo i raggi luminosi intorno a un punto per poi riallinearli una volta superato l’ostacolo, come l’acqua di un ruscello che scorre attorno a una roccia affiorante, si può praticare un “buco” nello spazio, una regione inaccessibile alla luce. «In effetti», ha detto Smith, «lo spazio all’interno del buco diventa invisibile, così come ogni oggetto che vi è contenuto». Pen-

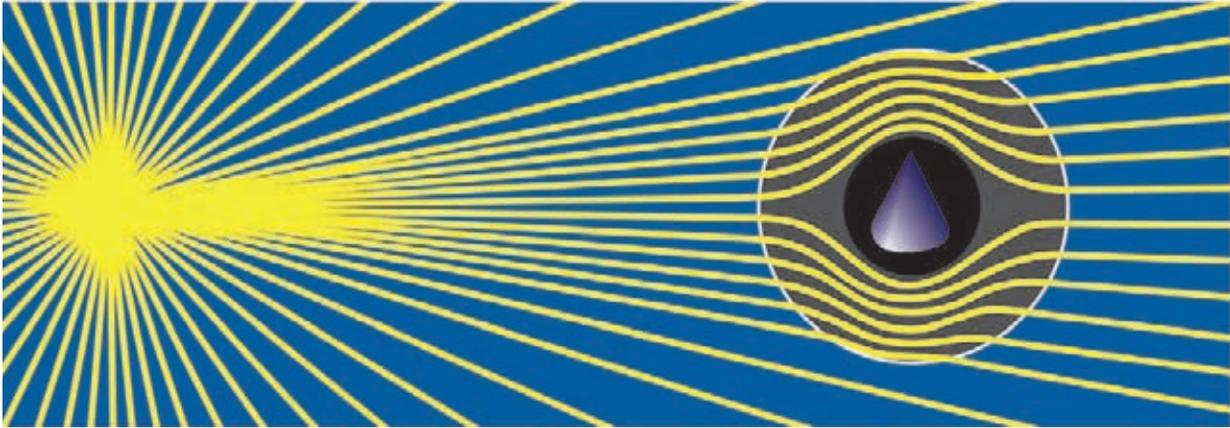
dry e Smith cominciarono a collaborare alla progettazione di un dispositivo. Ulf Leonhardt, dell’Università di St. Andrews in Scozia, era arrivato alla stessa idea in maniera indipendente, e nel 2006 la rivista *Science* pubblicò sullo stesso numero due articoli – uno di Leonhardt, l’altro di Pendry e Smith – in cui si spiegava come realizzare un mantello dell’invisibilità con l’ottica trasformazionale.

Il passo successivo di Smith e dei suoi collaboratori fu il calcolo delle componenti meta-atomiche necessarie per trasformare lo schema teorico in un dispositivo funzionante: la conclusione fu che una serie di anelli concentrici di meta-atomi poteva deviare le microonde intorno alla cavità centrale.

Passarono solo pochi mesi, e i ricercatori annunciarono di aver realizzato un dispositivo che funzionava più o meno come avevano previsto, a parte una leggera riflessione e un po’ di ombra (se fosse stato uno scudo per la luce visibile lo si sarebbe visto brillare leggermente).

Erano gli anni di Harry Potter e l’annuncio fece scalpore. Ma che relazione c’era tra il mantello del giovane stregone e l’oggetto ingombrante e innegabilmente visibile? La creazione di un dispositivo degno del titolo di scudo dell’invisibilità – le strutture di cui parliamo sono gusci rigidi e il termine “mantello” è poco appropriato – richiede due modifiche sostanziali. Anzitutto, lo scudo deve essere tridimensionale: in pratica, un guscio sferico, per deflettere la luce diretta sull’oggetto a prescindere dalla direzione di provenienza. Pur non presentando particolari difficoltà concettuali, la fabbricazione e l’assemblaggio di tutte le componenti non è banale. Il vero problema è il passaggio dalle microonde alla luce visibile, di lunghezza d’onda molto minore delle microonde: i meta-atomi dovrebbero rimpicciolirsi in proporzione. La realizzazione di matrici macroscopiche di componenti micro-

**Nel 2000
è stato realizzato
un metamateriale
con un indice
di rifrazione
negativo
che devia
le microonde
nella direzione
«sbagliata».**



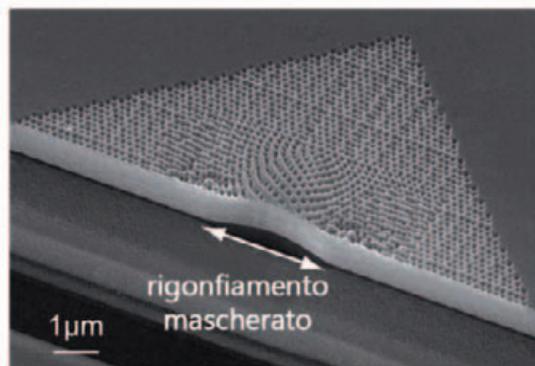
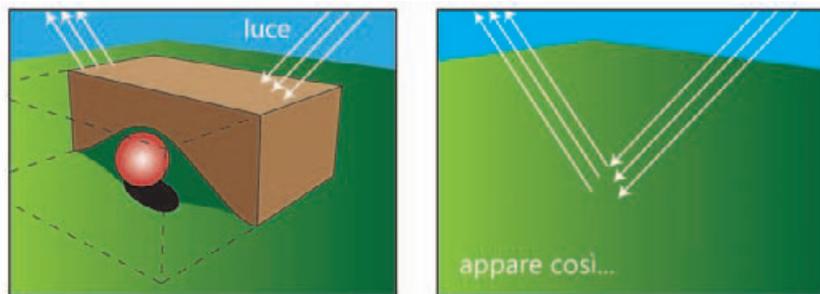
Un mantello dell'invisibilità deflette i raggi luminosi intorno all'oggetto riportandoli sulla traiettoria originale una volta superato l'ostacolo.

scopici così complicati è ben al di là delle attuali tecnologie.

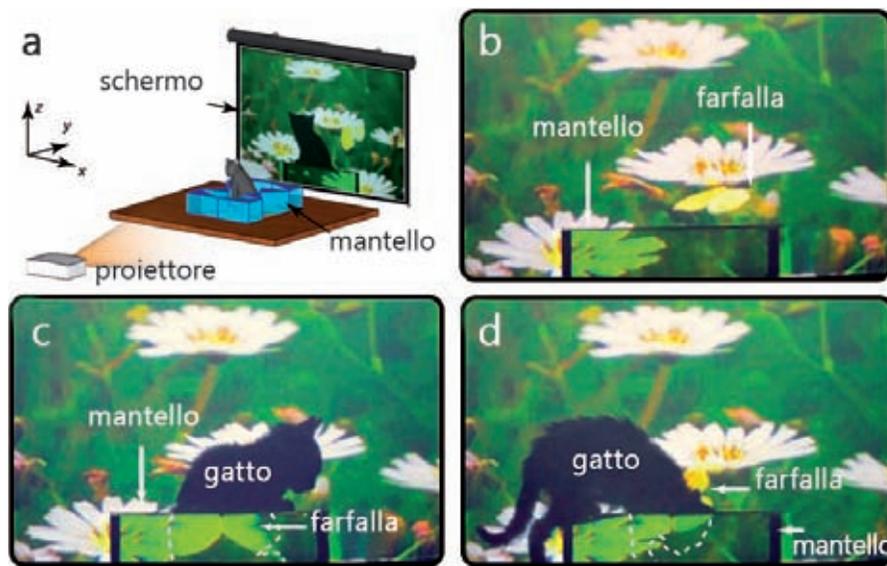
Una tecnologia capace di mascherare un oggetto alle onde radio e alle microonde potrebbe comunque rivelarsi utile per mezzi militari, come jet da caccia trasparenti ai radar. I metodi esistenti si basano sulla riduzione del segnale riflesso, per cui l'oggetto rilevato dal radar "sembra" più piccolo. A tale scopo si è soliti utilizzare un rivestimento – una vernice, una schiuma o un materiale composito – che assorbe le onde radio e ne converte l'energia in calore. Con un rivestimento di metamateriale, invece, il segnale radar non farebbe altro che superare l'oggetto come se questo non fosse sul suo cammino. Non c'è da stupirsi che i finanziatori militari (come la DARPA negli Stati Uniti) abbiano dimostrato un grande interesse per i metamateriali.

Dato che nessuno, finora, ha avuto l'idea giusta per produrre meta-atomi abbastanza piccoli da poter essere utilizzati nella costruzione di scudi per la luce visibile, nel 2008, Pendry e il suo studente Jensen Li hanno osservato che anziché nascondere un oggetto nello spazio, potrebbe essere più facile nascondere sotto un «drappo» disteso su una superficie piatta, in modo tale che

la luce riflessa dal mantello sembri provenire dalla superficie sottostante. Per un tale mantello non c'è bisogno di permittività e permeabilità negative, ma solo di un indice di rifrazione opportunamente modulato da un punto all'altro. Si potrebbero utilizzare le tecniche di fabbricazione delle componenti elettroniche a semiconduttori per modellare su scala microscopica un materiale come il silicio. Nel 2009 i ricercatori dell'Università della California a Berkeley hanno annunciato di aver prodotto un mantello bidimensionale del genere, attivo nella regione degli infrarossi.



Il mantello di Li e Pendry. Il materiale che forma il mantello sotto al quale si nasconde l'oggetto ha un indice di rifrazione tale da riflettere la luce come se provenisse da una superficie perfettamente piatta (figure in alto). Nel 2009 ne è stata prodotta una versione reale in silicio (in basso). © Xiang Zhang.



Un gatto “svanisce” in una cavità grazie alla deflessione della luce a opera di un sistema di prismi.
© Hongsheng Chen, Baile Zhang.

Lo stesso risultato può essere ottenuto ancora più semplicemente con dei prismi disposti in modo tale che un raggio riflesso sembri provenire dalla superficie sottostante l’oggetto da nascondere. Dando la forma opportuna a due prismi trapezoidali di calcite si può deviare la luce per ottenere l’effetto desiderato. Non è una vera e propria invisibilità, dal momento che il “mantello” riflettente è tutt’altro che invisibile, ma una volta capito il principio la tecnica è relativamente semplice e funziona a tutte le lunghezze d’onda visibili. L’idea è stata messa in pratica nel 2010 in maniera indipendente da due gruppi di ricercatori: da un lato Pendry e i suoi colleghi in Inghilterra e in Danimarca, dall’altro il gruppo diretto da Baile Zhang al Massachusetts Institute of Technology.

Nel linguaggio dell’ottica trasformazionale, la traslazione della traiettoria dei raggi luminosi genera un insieme di superfici occultanti. In parole povere, questa invisibilità si ottiene deviando la luce intorno all’oggetto da nascondere in modo che al suo posto sia visibile lo sfondo. Bastano dei semplici prismi o addirittura un sistema di specchi. Il risultato è un po’ rozzo (i prismi sono sempre perfettamente visibili), ma è pur sempre una forma di invisibilità, per quanto approssimativa; l’unico limite è la dimensione dei prismi. Nel 2013, collaborando con un gruppo di ricercatori dell’Università di Zhejiang a Hangzhou, in Cina, Baile Zhang è riuscito a deviare la luce intorno a una regione simile a una scatola disponendo in maniera opportuna una serie di grandi prismi di vetro di qualità

ottica. Quando un gatto si è infilato nella cavità si è avuta l’impressione che svanisse, mentre le immagini di una farfalla che svolazzava tra i fiori, proiettate sullo sfondo, hanno continuato a essere visibili attraverso il vetro.

L’ottica trasformazionale non si limita all’illusione dell’invisibilità. Se si può plasmare la luce con la versatilità offerta – almeno in teoria – dai metamateriali, si può pensare di riprodurre qualsiasi sembianza. Anziché ricostruire i raggi luminosi per renderli uguali a

come erano prima di incidere su un oggetto, si può pensare di manipolarli per far sì che l’oggetto appaia completamente diverso. Il fisico Che Ting Chan della Hong Kong University ha introdotto il concetto di «ottica delle illusioni». E dal momento che la manipolazione della luce dipende solo dalla sua natura ondulatoria, possiamo pensare di estendere gli stessi principi ad altri tipi di onda: con uno scudo acustico, ad esempio, potremmo isolare dalle onde sonore una regione di spazio (o nascondere un sottomarino dai sonar). Potremmo addirittura realizzare uno scudo sismico trivellando intorno a un edificio – o a un’intera città – una serie di pozzi da riempire con materiale meno compatto del terreno circostante.

**«Esprimendo
speranze
e desideri,
la magia fissa
gli obiettivi
della
tecnologia».**

Alfred Gell

Oggi la magia – la via di Harry Potter all’invisibilità – è vista per lo più agli antipodi della scienza. In realtà, come appena visto, può essere fonte di ispirazione scientifica. Pendry lo ha detto chiaramente: per lui, i racconti sull’invisibilità hanno rappresentato una «grande sfida» che lo ha motivato. Le sue parole confermano l’ipotesi dell’antropologo Alfred Gell: «Esprimendo speranze e desideri, la magia fissa gli obiettivi della tecnologia». Riusciremo a raggiungerli? È ancora tutto da vedere, anzi da non vedere.

[Traduzione di Andrea Migliori]