

## REFRACTIA NEGATIVĂ

Sergiu LANGA și Ion TIGHINEANU  
UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Știința este fascinantă nu numai datorită faptului că descoperă noi și noi domenii de cercetare, dar și datorită capacității sale de a descoperi lucruri absolut noi în domeniile “vechi de când lumea”, unde nimeni nu s-ar aștepta să se mai facă vreo descoperire uluitoare. Puțini își pot închipui că și bine cunoscuta optică geometrică poate fi reconsiderată sau redescoperită de știință.

Orice persoană, inițiată într-o măsură oarecare în fizică, cunoaște că toate materialele pot fi caracterizate, din punct de vedere al interacțiunii lor cu câmpurile electromagnetice, prin doi parametri, numiți permeabilitatea magnetică ( $\mu$ ) și permitivitatea electrică ( $\varepsilon$ ). Acești parametri determină complet modul de interacțiune a radiației electromagnetice cu materialul respectiv. Cei mai puțin inițiați în fizică nu sunt familiarizați cu  $\mu$  și  $\varepsilon$ , ci cu indicele de refracție  $n$ , care nu este altceva decât o generalizare a celor doi parametri ( $\mu$  și  $\varepsilon$ ) în unul singur ( $n$ ). Până nu demult se considera că indicele de refracție al materialelor obișnuite, cum ar fi, de exemplu, arhicunoscutul Si, poate lua numai valori pozitive mai mari decât 1. Însă nimeni nu ne împiedică să considerăm, cel puțin imaginar, că există materiale la care indicele de refracție ia valori mai mici ca 1, sau chiar negative.

Primul care și-a imaginat un astfel de material a fost fizicianul rus Victor Veselago, în anii '60 ai secolului trecut. El a demonstrat în una din lucrările sale [1] că dacă permitivitatea și permeabilitatea unui material sunt simultan negative, indicele de refracție al acestui material va fi de asemenea negativ. În această afirmație este ascuns un element de noutate științifică care poate duce la reconsiderarea opticii geometrice cunoscute până acum.

Interesul față de materialele cu indicele de refracție negativ a fost însă reînviat cu câțiva ani în urma (1999), când fizicianul englez John Pendry de la Imperial College din Londra a propus [2] să se construiască cu ajutorul acestor materiale lentile perfecte, care ar putea trece peste limita maximă de formare a contrastului imaginii, impusă de efectul de difracție în lentilele obișnuite.

Pentru a înțelege cum se poate realiza această idee, trebuie mai întâi să vedem ce înseamnă faptul că un material are indicele de refracție negativ. În cazul cel mai general, se poate spune că indicele de refracție (pozitiv sau negativ) determină modul de propagare a luminii la trecerea ei din vid în materialul respectiv. Cu alte cuvinte, acesta arată viteza de propagare a luminii prin acest material și cum se va schimba direcția luminii, intrând în el. Pentru materialele cu indicele de refracție pozitiv se știe că cu cât e mai mare valoarea lui, cu atât mai lent se propagă lumina prin acest material și cu atât mai mult lumina este deviată față de direcția inițială.

Conform legii fundamentale a opticii geometrice, numită și legea lui Snell, unghiul de refracție al unei raze de lumină care intră din vid ( $n_{\text{vid}} = 1$ ) într-un mediu cu un anumit indice de refracție  $n$  este determinat de indicele de refracție al mediului și de unghiul de incidență față de normala pe suprafața mediului (vezi Fig. 1a):

$$\sin r = \frac{1}{n} \sin i,$$

unde  $i$  este unghiul de incidență,  $r$  este unghiul de refracție, iar  $n$  este indicele de refracție al mediului respectiv.

Deoarece unghiul de incidență  $i$  ia valori între  $0$  și  $\frac{\pi}{2}$ , respectiv  $\sin i$  va fi mai mare ca zero. De aici rezultă că semnul lui  $\sin r$  va coincide cu semnul indicelui de refracție al materialului  $n$ . Astfel, dacă  $n > 1$ , unghiul de refracție va fi unul pozitiv ( $r^+$  în Fig. 1a) și mai mic ca unghiul de incidență. Adică raza se va propaga într-o direcție situată între perpendiculara pe suprafața materialului și direcția razei inițiale (vezi Fig. 1a). Pe de altă parte, în cazul indicelui de refracție negativ,  $n < 0$ , unghiul de refracție va fi de asemenea negativ ( $r^-$  în Fig. 1b). Deci raza refractată se va situa de partea stângă a normalei la suprafața materialului. O astfel de refracție “negativă” este total neobișnuită pentru materialele întâlnite în natură.

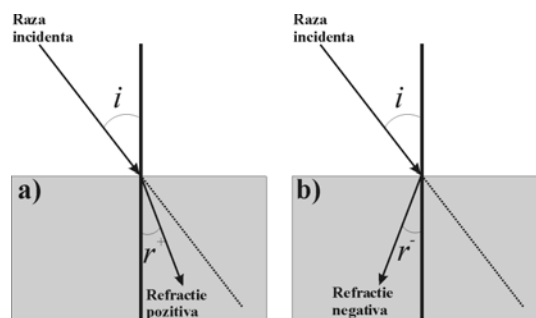


Fig. 1. a) refracția într-un material obișnuit ( $n > 1$ ); b) refracția neobișnuită în material cu indicele de refracție negativ ( $n < 0$ ).

Printre consecințele imediate ale refracției negative putem enumera următoarele:

1. Din punctul de vedere al opticii ondulatorii, un material cu indicele de refracție negativ va modifica unda de lumină într-un așa mod, încât unda va produce vibrații într-o direcție, iar energia undei se va propaga în sens opus;
2. Efectul Doppler va fi inversat, adică frecvența unei surse de lumină care se apropie de observator nu se va mări (deplasarea spre violet) cum este firesc, ci se va micșora (deplasarea spre roșu).
3. Efectul Cerenkov va fi, de asemenea, inversat. Deci, lumina generată datorită faptului că mediul respectiv este traversat de o particulă încărcată va fi emisă în spatele particulei și nu în fața ei.
4. După cum a arătat Veselago în lucrările sale, o simplă pană plan-paralelă va funcționa ca o lentilă, creând o imagine a obiectului în interiorul penei și alta de partea cealaltă a ei (vezi Fig. 2). Această proprietate ar simplifica considerabil fabricarea lentilelor, deoarece nu ar mai fi necesar de a se prelucra lentila pentru a fi convexă sau concavă, după caz. O astfel de lentilă ar fi mai puțin capricioasă decât lentilele obișnuite, din simplul motiv că obiectul ar putea fi situat în orice poziție față de lentilă și nu numai pe axa ei, cum e cazul lentilelor obișnuite.
5. O altă consecință a indicelui de refracție negativ, pe care se bazează ideea lui J. Pendry cu privire la lentilele perfecte, este că undele evanescente ale unui corp ar putea fi amplificate de o lentilă cu indicele de refracție negativ. Undele evanescente ale unui corp au o lungime de undă foarte mică și de obicei nu părăsesc suprafața corpurilor. Datorită lungimii de undă mici ele conțin informația cea mai detaliată despre corp.
6. Se știe că atunci când privim într-un vas cu apă, adâncimea acestui vas pare a fi mult mai mică decât este în realitate. Acest efect se datorează faptului că indicele de refracție al apei este pozitiv. Admițând însă că apa ar avea un indice de refracție negativ, adâncimea vasului cu apă nu ni s-ar mai părea a fi prea mică, ci din contra, vasul ar părea mult mai adânc decât este în realitate.

Materialele cu indicele de refracție negativ se mai numesc și “materiale de stânga” (în engleză, “left-handed materials” (LHM)). În materialele obișnuite, adică în cele cu  $n > 1$ , poziția relativă a vectorilor câmpului magnetic și electric al unei unde se poate afla foarte ușor folosind așa-numita “regulă a mâinii drepte”. Pentru materialele cu indicele de refracție negativ această regulă nu mai este valabilă, fiind necesar să se folosească “regula mâinii

stângi”. De aici și provine denumirea de materiale “de stânga”. Ele mai sînt numite și materiale cu undă inversată (“backward wave materials” (BWM), aceasta fiind o aluzie la faptul că energia undei se propagă în sens opus față de sensul de propagare al undei. Însă de cele mai multe ori ele sunt numite materiale cu indice negativ (“negative index materials” (NIM)) sau materiale cu indice de refracție negativ (“negative refractive index” (NRI)).

Este interesant faptul că materiale cu valori negative ale unuia din cei doi parametri ( $\epsilon$  sau  $\mu$ ) se întîlnesc și în natură. De exemplu, în unele metale, cum ar fi argintul, sau semiconductori, la anumite frecvențe și condiții exterioare,  $\epsilon$  ia valori negative. Un alt exemplu îl constituie așa-numita plasmă neutră fără coliziuni (puternic rarefiată) care nu este prea comună în viața de toate zilele. O astfel de plasmă are permitivitatea negativă la frecvențe mai mici decât așa-numita “frecvență de plasmă”. De asemenea, există o serie de materiale feromagnetice și antiferomagnetice, ale căror permeabilități magnetice  $\mu$  au valori negative.

În 1996 Pendry a anunțat că a obținut un material artificial care fiind expus acțiunii undelor electromagnetice are un răspuns asemănător cu cel al plasmei neutre fără coliziuni, deci are permitivitatea electrică  $\epsilon$  negativă. Materialul raportat de Pendry reprezintă un masiv de conductori plasați paralel la anumite distanțe unul de altul. Câțiva ani mai târziu, același Pendry a anunțat fabricarea unui alt tip de material artificial - așa-numitul rezonator cu inele deschise (split-ring rezonator (SRR)), a cărui permeabilitate magnetică  $\mu$ , într-un anumit domeniu de frecvențe, are valoare negativă. De aici și până la realizarea ideii lui Veselago nu mai rămăsese mult. Combinarea celor două materiale, propuse de Pendry, ar forma un material cu valori negative atât pentru permitivitatea electrică  $\epsilon$ , cât și pentru permeabilitatea magnetică  $\mu$ . Figura 3 ne dă o imagine cum ar putea arăta un astfel de material.

Măsurările electromagnetice ale materialelor propuse de Pendry *et al* au fost realizate de D. Smith și echipa sa de la Universitatea din California, SUA [3]. În cazul primului material (cu permitivitatea  $\epsilon$  negativă) s-a observat că există un anumit interval de frecvențe în care toate microundele sunt reflectate. Folosind o noțiune din domeniul cristalelor fotonice, putem spune că acest material are o bandă interzisă pentru un anumit interval de frecvențe. Este surprinzător faptul că dacă se combină acest material cu materialul al doilea, propus de Pendry, undele din același interval nu mai sunt reflectate, ci transmise de material. După un șir de alte experimente, Smith *et al* au ajuns la concluzia că metamaterialul compus din cele două materiale propuse de Pendry îndeplinesc condițiile formulate de Veselago pentru ca un material să aibă indicele de refracție negativ. Smith *et al* spun că refracția negativă, observată de ei, nu

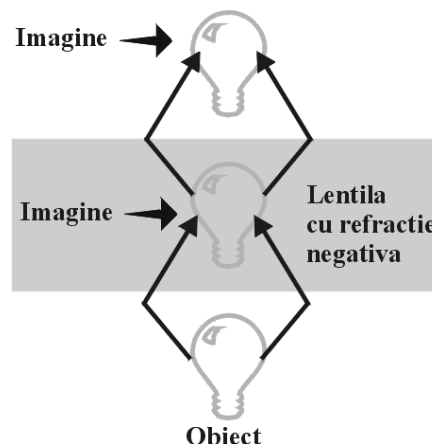


Fig. 2. O pană plan-paralelă formată dintr-un material cu indicele de refracție negativ poate funcționa ca o lentilă, formând o imagine a obiectului în interiorul penei, iar alta de cealaltă parte a ei.



Fig. 3. Aspectul metamaterialului compus din cele două materiale propuse de Pendry *et al*. Inelele deschise care se văd în figură fac ca materialul să aibă permeabilitatea magnetică negativă, iar firele metalice înfipte perpendicular pe suprafața unui suport fac ca structura obținută să aibă permitivitatea  $\epsilon$  negativă.

este mică, ci din contra, poate ajunge chiar până la  $80^\circ$  față de normala pe suprafața de incidență.

Imediat după publicarea rezultatelor obținute de Smith *et al*, un alt grup de cercetători, de această dată de la Toronto, Canada, a anunțat că a reușit fabricarea unui material cu proprietăți asemănătoare, dar care are o structură mult mai simplă decât cel investigat de echipa lui Smith. Mai mult ca atât, Shalaev *et al* de la Universitatea din Purdue, SUA, au propus o structură care ar permite fabricarea peliculelor subțiri cu indicii de refracție negativ, iar o echipă din Elveția a anunțat că este pe cale de a fabrica o structură tridimensională cu indicii de refracție negativ.

În pofida faptului că au fost publicate multe articole care pretind că a fost observată experimental refracția negativă în diferite materiale, în lume există cercetători care continuă să creadă că așa ceva este contrar legilor naturii și că toate măsurătorile efectuate până acum nu sunt decât niște „artefacte” experimentale.

Prashant Valanju de la Universitatea din Texas, SUA, susține că Veselago a comis o greșeală în diagramele sale și că toate concluziile formulate de Veselago și Pendry sunt în general greșite. Mai mult ca atât, comportamentul materialelor cu indicii de refracție negativ, afirmă Valanju, ar viola principiul fundamental de limitare a vitezei luminii [4]. Pentru a demonstra aceasta, Valanju analizează comportamentul unor raze paralele de lumină, care trec dintr-un material cu indicii de refracție pozitiv într-un material cu indicii de refracție negativ, intersectând sub un anumit unghi  $i$  față de normală suprafața de separație a materialelor (vezi Fig. 4). După cum se știe, în materialele obișnuite, cu indicii de refracție pozitiv frontul de undă trebuie să fie perpendicular pe direcția de propagare a undelor. De aceea, la trecerea dintr-un material în altul, diferite puncte de pe frontul de undă vor ajunge în momente diferite la interfața dintre cele două materiale. De exemplu, unda de pe raza 1 (Fig. 4) va ajunge mai devreme la interfață, decât unda de pe raza 5. Presupunând că razele vor fi refractate negativ, fiecare punct de pe frontul de undă, venind din materialul cu indicii de refracție pozitiv și ajungând la interfață, va trebui să-și mărească viteza la infinit, astfel ca să ajungă din urmă punctele care deja au trecut de interfață. Astfel și numai astfel ar fi posibil ca direcția undei refractate să rămână perpendiculară pe frontul de undă.

Echipa din Texas admite însă că așa ceva ar fi totuși posibil, dar numai în cazul unei unde monocromatice, fără un front de undă bine determinat. Simulările realizate de ei arată că dacă vom îmbina două unde monocromatice, neluând în considerare faptul că în mod separat ele se pot refracta negativ, unda rezultantă se va refracta întotdeauna pozitiv. În realitate, însă, o undă monocromatică este imposibil de realizat, deoarece orice undă reală este alcătuită dintr-un număr de pachete de unde cu frecvențe și viteze de grup proprii. Iar unda rezultantă din aceste pachete monocromatice se refractă în modul obișnuit, cu toate că separat pachetele monocromatice ar putea să se refracteze negativ. În ceea ce privește rezultatele experimentale raportate de Smith *et al*, Valanju spune că acestea sunt un artefact experimental, ce se datorează probei de dimensiuni mici folosite de Smith *et al*. Valanju spune că dacă echipa lui Smith ar fi folosit o probă de dimensiuni mai mari, efectul refracției negative nu ar fi fost observat experimental.

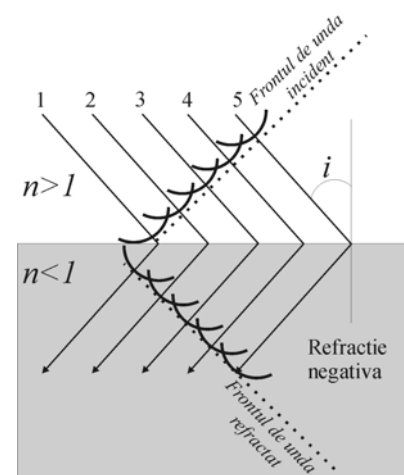


Fig. 4. Reprezentarea schematică a argumentului adus de Valanju împotriva existenței materialelor cu indice de refracție negativ

Pe de altă parte, N. Garcia și M. Nieto-Vesperinas din Spania [5] afirmă că nu Veselago, ci Pendry este cel care a greșit. Ei pun sub semnul îndoielii “perfecțiunea” lentilelor care se pot fabrica cu ajutorul materialelor cu indicele de refracție negativ, propuse de Pendry. Ei își argumentează poziția spunând că orice material va absorbi o parte din energia undei incidente. Astfel chiar și o mică absorbție din energia undelor evanescente amplificate (vezi mai sus) va duce la degradarea performanței lentilei, făcând-o imperfectă. Conform calculelor făcute de ei, o lentilă perfectă ar putea funcționa numai cu o cantitate de energie infinit de mare. Admițând faptul că absorbția poate fi o problemă și un impediment pentru fabricarea lentilelor perfecte care, posibil, sunt chiar ireale, Pendry contraatacă și afirmă că deja există materiale cu indice de refracție negativ, care focalizează cu mult mai bine decât orice lentilă cunoscută până în timpul de față.

În concluzie, se poate spune că, în pofida tuturor dezacordurilor pe această temă, pentru toți este clar că mai există multe aspecte fizice care abia așteaptă să fie clarificate. În ceea ce privește aplicațiile, ar fi incorect să rămânem la afirmația pesimistă a lui W. Kohn de la Universitatea din California, SUA, care spune: “Materialele cu indice de refracție negativ reprezintă o idee genială, însă nu aș fi surprins dacă nu s-ar găsi multe aplicații ale acestor materiale”. Este suficient să ne aducem aminte că, imediat după inventarea laserului, comunitatea științifică a fost surprinsă că s-a lucrat atât de mult pentru a-l obține, iar aplicațiile momentane ale laserului erau atât de limitate. Astăzi aplicațiile laserului sunt atât de diverse și multiple, încât este greu să ți le imaginezi. Să sperăm că istoria se va repeta și în cazul materialelor cu indicele de refracție negativ.

## REFERINȚE:

- [1] V. G. Veselago, *Phys. Usp.* **10**, 509 (1968).
- [2] J. B. Pendry et al, *IEEE Trans. Microwave Theory and Technology* **47**, 1 (1999).
- [3] D. R. Smith et al, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184 (2000).
- [4] P. M. Valanju et al, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 187401 (2002).
- [5] N. Garcia and M. Nieto-Vesperinas, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 207403 (2002).