

Ս.Ջ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ԲԱՑԱՍԱԿԱՆ ԲԵԿՄԱՆ ՑՈՒՑՉՈՎ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՈՐՈՇ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Քննարկվել է բացասական բեկման ցուցչով նյութերում օպտիկայի մի շարք հիմնական օրենքների՝ մասնավորապես Սնելիուսի բեկման օրենքի, Դուպլերի և Չերենկովի էֆեկտների անսովոր իրականացումը: Ճշգրտվել է Ֆերմայի սկզբունքի ձևակերպումը:

Առանցքային բառեր. բացասական բեկման ցուցիչ, ձախ և աջ նյութեր, սուպերուս-նյակներ:

Ներածություն: Դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը՝ ε – ը և մագնիսական թափանցելիությունը՝ μ – ն, նյութի էլեկտրադինամիկական և օպտիկական հատկությունների հիմնական բնութագրերն են, քանի որ այդ մեծությունները նյութի այն պարամետրերն են, որոնք մտնում են դիսպերսիոն հավասարման մեջ: Այդ հավասարումը կապ է հաստատում մեներանգ ալիքի ω հաճախականության և այդ ալիքի ալիքային $\vec{k}$ վեկտորի միջև և իզոտրոպ նյութերի համար ունի հետևյալ տեսքը՝

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2, \quad (1)$$

որտեղ n^2 – ին նյութի բեկման ցուցչի քառակուսին է և հավասար է

$$n^2 = \varepsilon\mu: \quad (2)$$

(1) և (2) հավասարումներից բխում է, որ ε –ի և μ –ի նշանները միաժամանակ փոխելիս $\varepsilon < 0$ և $\mu < 0$, ոչ մի կերպ չի անդրադառնում այդ հավասարումների հարաբերակցությունների վրա: Սա թույլ է տալիս ենթադրել, որ նյութի հատկությունները կախված չեն ε – ի և μ – ի միաժամանակ բացասական լինելուց: Կամ կարելի է ենթադրել, որ ε – ի և μ – ի միաժամանակ բացասական լինելը հակասում է բնության որևէ օրենքին, հետևաբար՝ միաժամանակ բացասական դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ $\varepsilon < 0$ և բացասական մագնիսական թափանցելիությամբ $\mu < 0$ նյութեր չեն կարող գոյություն ունենալ:

1967թ. Վիկտոր Վեսելագոն առաջ քաշեց մի գիտավարկած, համաձայն որի կարող են գոյություն ունենալ այնպիսի նյութեր, որոնց ε և μ մեծությունները միաժամանակ ունեն բացասական արժեքներ, և այդպիսի նյութերն իրենց ֆիզիկական հատկություններով կարող են էապես տարբերվել դրական $\varepsilon > 0$ և $\mu > 0$ մեծություններով օժտված նյութերից [1]: Վեսելագոյի վարկածը երկար ժամանակ ուշադրության չարժանացավ և մոռացության մատնվեց: Միայն նյութագիտության վեր-

ջին նվաճումների շնորհիվ 2000թ.-ին ԱՄՆ-ի Կալիֆորնիայի համալսարանի մի խումբ գիտնականներ իրենց էքսպերիմենտալ աշխատանքներում իրազեկեցին միաժամանակ բացասական դիէլեկտրիկական և մագնիսական թափանցելիություններ ունեցող արհեստական կոմպոզիցիոն նյութերի ստացման մասին [2,3]: Այդ նյութերի հիմքը դիէլեկտրիկն է, որի վրա ամրացված են ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքի երկարությունից փոքր չափեր ունեցող պղնձե ձողիկներ և օղակներ, որոնք տարածության մեջ դասավորված են խիստ կանոնավոր երկրաչափական ձևով՝ առաջացնելով ինքնատիպ ներքին բյուրեղային կառուցվածք: Ըստ էության դրանք փոքրիկ անտենաներ են, որոնք փոխազդում են ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքի հետ: Այդ փոխազդեցության արդյունքում էլեկտրոնները նյութում շարժվում են էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի կողմից առաջացրած ուժերի ուղղությանը հակառակ ուղղությամբ և սկսում են դիմադրել էլեկտրամագնիսական դաշտի «հարվածներին»: Ինչպես հաստատում է էքսպերիմենտը [2,3], վերոհիշյալ արհեստական կոմպոզիցիոն նյութերն օժտված են էլեկտրադինամիկական և օպտիկական անսովոր հատկություններով:

Արդյունքները: Գիտական փորձերից հայտնի այդ պնդումը հեշտությամբ կարելի է բացատրել, եթե ընդունենք, որ արհեստական կոմպոզիցիոն նյութերն ունեն բացասական n բեկման ցուցիչ: Սա նշանակում է բեկման ցուցչի արտահայտության մեջ

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (3)$$

արմատի դրական նշանը համապատասխանում է ε - ի և μ - ի դրական արժեքներին, իսկ արմատի բացասական նշանը՝ ε - ի և μ - ի բացասական արժեքներին: Ի տարբերություն դրական բեկման ցուցչով նյութերի, բացասական բեկման ցուցչով նյութերում տարածվող էլեկտրամագնիսական ալիքի փուլային և խմբային արագություններն ունեն հակառակ ուղղություններ, ինչը նույնն է, որ ալիքային $\vec{k}$ վեկտորը և Պոյտինգի $\vec{S}$ վեկտորը հակուղղված են:

Դրանում համոզվելու համար բավական է գրել Մաքսվելի հավասարումները և Պոյտինգի վեկտորի արտահայտությունները իզոտոպ միջավայրում տարածվող հարթ մեկերանգ ալիքի համար.

$$\begin{aligned} \text{rot}\vec{E} &= -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \\ \text{rot}\vec{H} &= \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} , \quad (5)$$

$$D = \varepsilon \vec{E} ,$$

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \vec{H}] \quad (6)$$

Իզոտրոպ միջավայրում մեներանգ ալիքի $\vec{E}$ և $\vec{B}$ մեծությունները համեմատական են $e^{i(kz - \omega t)}$ մեծությանը, ուստի (4) և (5) հավասարումներից կստանանք՝

$$[\vec{K} \vec{E}] = \frac{\omega}{c} \mu \vec{H} , \quad (7)$$

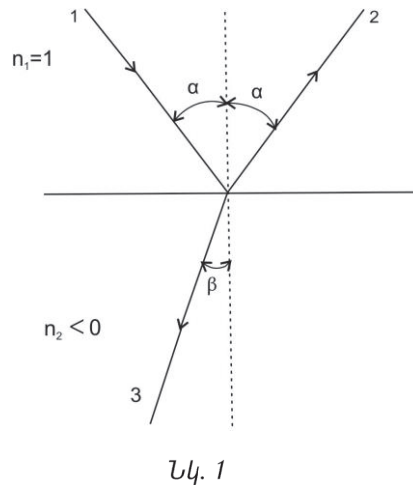
$$[\vec{K} \vec{H}] = - \frac{\omega}{c} \varepsilon \vec{E} :$$

Այս արտահայտություններից բխում է, որ եթե $\varepsilon > 0$ և $\mu > 0$ ապա $\vec{E}$, $\vec{H}$ և $\vec{K}$ վեկտորները կազմում են վեկտորների աջ եռյակ, իսկ եթե միաժամանակ $\varepsilon < 0$ և $\mu < 0$, ապա կազմում են վեկտորների ձախ եռյակ: Համաձայն (6) բանաձևի՝ Պոյտինգի $\vec{S}$ վեկտորը $\vec{E}$ և $\vec{H}$ վեկտորների հետ միշտ կազմում է աջ եռյակ: Այսպիսով, դրական բեկման ցուցչով նյութերի դեպքում $\vec{S}$ և $\vec{K}$ վեկտորներն ունեն միևնույն ուղղությունը, իսկ բացասական բեկման ցուցչով նյութերի դեպքում՝ հակառակ ուղղություններ: Այն նյութերը, որոնցում էլեկտրամագնիսական ալիքը տարածվելիս $\vec{E}$, $\vec{H}$ և $\vec{K}$ վեկտորները կազմում են աջ եռյակ, անվանվում են աջ նյութեր, իսկ վեկտորների ձախ եռյակի դեպքում՝ ձախ նյութեր: Ձախ նյութերում անսովոր ձևով են իրագործվում նաև Սնելիուսի բեկման օրենքը, Դոպլերի և Չերենկովի էֆեկտները, ինչպես նաև Ֆերմայի սկզբունքը:

Լուսային ճառագայթի՝ աջ և ձախ նյութերի բաժանման հարթ սահմանով անցնելիս ընկնող ճառագայթը, բեկված ճառագայթը գտնվում են անկման կետում բաժանման սահմանին տարված ուղղահայացի միևնույն կողմում (նկ.1):

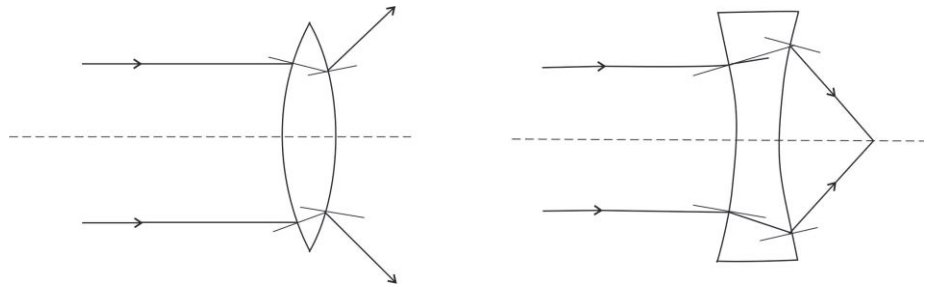
Ճառագայթի նման անսովոր բեկումը լիովին նկարագրվում է Սնելիուսի օրենքով՝

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} , \quad (8)$$



երթն ընդունենք, որ երկրորդ միջավայրի բեկման ցուցչի արժեքը բացասական է՝ $n_2 < 0$:

Նկ.2-ում պատկերված են ճառագայթների ընթացքը վակուումում գտնվող ձախ նյութերից պատրաստված ոսպնյակներում: Ինչպես երևում է նկարից, ձախ նյութերից պատրաստված երկուտուցիկ ոսպնյակը հանդիսանում է ցրող ոսպնյակ, իսկ երկգոգավոր ոսպնյակը՝ հավաքող:



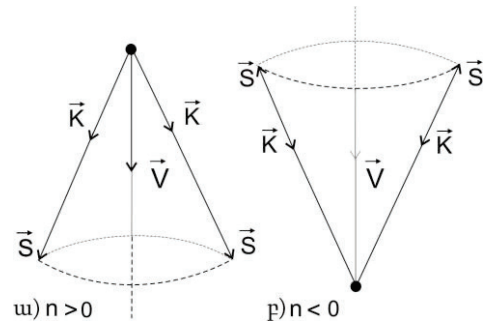
Նկ. 2

Ձախ նյութերում Դուպլերի էֆեկտի շնորհիվ հեռացող օբյեկտը թվում է ավելի կապույտ, իսկ աջ նյութերում հեռացող օբյեկտը՝ ավելի կարմիր: Իրոք, համաձայն Դուպլերի բանաձևի՝

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}, \quad (9)$$

որտեղ v —ն ընդունիչի նկատմամբ լույսի աղբյուրի արագությունն է, որը հանրահաշվական մեծություն է, ω_0 -ն՝ լույսի հաճախությունը՝ լույսի աղբյուրի հետ կապված հաշվարկման համակարգում, ω -ն՝ ընդունիչում գրանցված հաճախությունը:

Աղբյուրի հեռանալիս $v > 0$, աջ նյութերում $\omega < \omega_0$, և հեռացող օբյեկտը թվում է ավելի կարմիր, իսկ ձախ նյութերում՝ $\omega > \omega_0$, և հեռացող օբյեկտը՝ ավելի կապույտ: Աղբյուրն ընդունիչին մոտենալիս $v < 0$, աջ նյութերում՝ $\omega > \omega_0$, և մոտեցող օբյեկտը թվում է ավելի կապույտ, իսկ ձախ նյութերում՝ $\omega < \omega_0$, մոտեցող օբյեկտը՝ ավելի կարմիր: Ձախ նյութերում Չերենկովյան ճառագայթման կոնը շրջվում է դեպի ետ (նկ.3):



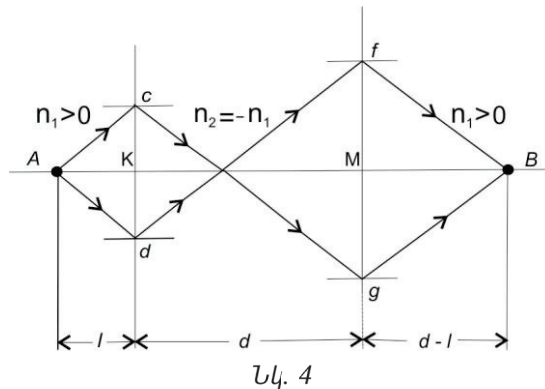
Նկ. 3

Շճգրտում պետք է մտցնել նաև այնպիսի հիմնարար սկզբունքի ձևակերպման մեջ, ինչպիսին Ֆերմայի սկզբունքն է: Ֆերմայի սկզբունքի ձևակեր-

պումը ժամանակի մինիմումի (կամ էքստրեմումի) միջոցով ընդհանուր դեպքում կիրառելի չէ: Ճիշտը Ֆերմայի սկզբունքի ձևակերպումն է գումար օպտիկական ճանապարհի երկարության էքստրեմումի միջոցով:

$$\delta L = \delta \int n d\ell = 0 : \quad (10)$$

Այս արտահայտության մեջ ինտեգրումը կատարվում է լույսի ճառագայթի տարածման իրական ճանապարհի երկայնքով: Այդպիսի մոտեցումը նախատեսում է, որ օպտիկական ճանապարհի երկարությունը, որն անցնում է էլեկտրամագնիսական ալիքի բացասական բեկման ցուցիչ ունեցող միջավայրում, նույնպես բացասական է: Սրանից մասնավորապես հետևում է, որ որոշ դեպքերում լրիվ օպտիկական ճանապարհը կարող է լինել բացասական և նույնիսկ զրո, չնայած երկրաչափական ճանապարհի երկարությունը և այդ երկարությունն անցնելու ժամանակը բնավ հավասար չեն զրոյի: Հենց այդպիսի իրավիճակ է տեղի ունենում ձախ նյութերից պատրաստված d հաստությամբ հարթ-գուգահեռ թիթեղի միջով լույսի տարածման ժամանակ: Այդպիսի թիթեղը, որը պատրաստված է $n_2 = -n_1$ ($n_1 > 0$) բացասական բեկման ցուցչով նյութերից, ունակ է թիթեղից $l < d$ հեռավորության վրա գտնվող լույսի կետային A աղբյուրից դուրս եկող ճառագայթները ֆոկուսացնել թիթեղից դուրս B կետում (նկ.4): Գծագրից երևում է, որ լույսի աղբյուրից մինչև թիթեղը լույսի անցած AK ճանապարհի և թիթեղից մինչև պատկերը անցած MB ճանապարհի գումարը հավասար է թիթեղի ներսում լույսի անցած KM ճանապարհին:



$$AK + MB = KM: \quad (11)$$

Նման հարաբերակցությունը ճիշտ է նաև լույսի տարածման ցանկացած հնարավոր մյուս ճանապարհների դեպքում: Օրինակ՝ $AcgB$ կամ $AdfB$: Բայց քանի որ թիթեղի ներսում բեկման ցուցիչը բացասական է՝ $n_2 = -n_1 < 0$, իսկ դրսում դրական՝ $n_1 > 0$, ապա A կետից B կետը գնացող լույսի օպտիկական ճանապարհը, համապատասխան (10) արտահայտության, լույսի տարածման ցանկացած հնարավոր ճանապարհի դեպքում հավասար է զրոյի, մինչդեռ A կետից B կետը լույսի տարածման ժամանակը էապես տարբերվում է զրոյից:

Եզրակացություն: Բացասական բեկման ցուցչի հնարավոր լինելը ստիպել է ֆիզիկոսներին գրեթե ամբողջությամբ վերանայել ֆիզիկայի էլեկտրադինամիկայի բաժինը: Արդյունքում, երբ ամբողջությամբ պարզ կլինեն ձախ նյութերի էլեկտրադինամիկայի բոլոր առանձնահատկությունները, կբացվեն այդ նյութերի գործնական նպատակների համար օգտագործման լայն հնարավորություններ: Այսօր ձախ նյութերից պատրաստվում են սուպերոսպնյակներ, որոնք հաղթահարում են դիֆրակցիայի սահմանը և անհամեմատ մեծացնում են մանրադիտակների լուծելիության ունակությունը: Այդ նյութերը թույլ են տալիս ստեղծել նանոմաշտաբների նախնականներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Веселаго В.Г.** Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук.- 1967.- Т. 92, вып. 3.- С. 517-526.
2. **Smith D.R., et al.** // Phys. Rev. Lett.- 2000.- 84.- P.4184.
3. **Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.** // Science.- 2001.- 292.- P.77.

С.Д. МАНУКЯН

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрена необычная реализация ряда основных законов оптики, в частности закон преломления Снелиуса, эффекты Доплера и Черенкова, в материалах с отрицательным показателем преломления. Уточнена формулировка принципа Ферма.

Ключевые слова: отрицательный показатель преломления, левые и правые материалы, суперлинзы.

S.D. MANUKYAN

SOME ELECTRODYNAMIC PECULIARITIES OF THE MATERIALS WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION

The extraordinary implementation of Snell's Law, Doppler Effect, Cherenkov Effect have been considered for negative index material (NIM). Fermat's principle in NIM is specified.

Keywords: negative index of refraction, left-handed materials, right-handed materials, superlenses.