

§ 16. Прынцып Гюйгенса — Фрэнеля. Дыфракцыя святла. Дыфракцыйная рашотка

- Хвалевыя працэсы маюць свае спецыфічныя заканамернасці, якія адрозніваюць іх ад іншых фізічных працэсаў. Што гэта за заканамернасці? Пры якіх умовах яны праяўляюцца? Як іх можна выкарыстоўваць?



Асяроддзе называецца аднародным, калі яго фізічныя ўласцівасці па ўсім аб'ёме аднолькавыя ва ўсіх пунктах прасторы. Асяроддзе называецца ізатропным, калі яго фізічныя ўласцівасці аднолькавыя ва ўсіх напрамках у прасторы.

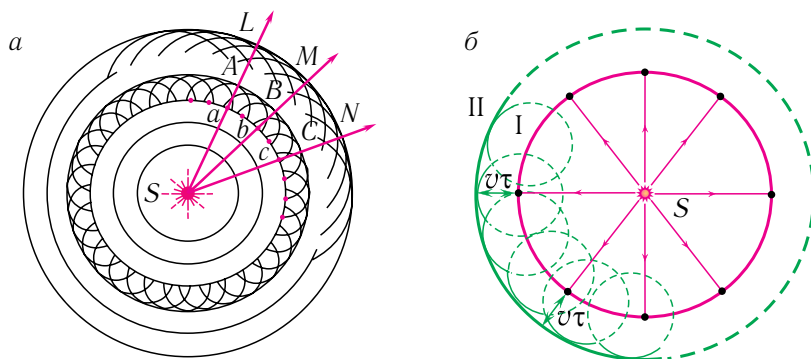
Хвалевая паверхня — гэта паверхня, усе пункты якой вагаюцца ў аднолькавых фазах, г. зн. гэта паверхня роўных фаз. Геаметрычнае месца пунктаў, да якіх даходзяць ваганні да моманту часу t , называецца хвалевым фронтам (гл. § 5).

Хваля называецца кругавой, калі яе хвалевы фронт з'яўляецца акружнасцю.

Заканамернасці распаўсюджвання хваль любой прыроды ў розных асяроддзях маюць многа агульнага.

Для нагляднасці разгледзім працэс распаўсюджвання хваль на паверхні вады. Хвалі, якія ўзбуджаюцца кропкавай крыніцай S , распаўсюджваюцца ва ўсіх напрамках з аднолькавай па модулі скорасцю v . Такім чынам, фронт хвалі будзе мець выгляд акружнасці (мал. 93, *a*) некаторага радыуса. Калі гэта хваля ад кропкавай крыніцы будзе распаўсюджвацца ў аднародным ізатропным асяроддзі, то яе хвалевы фронт будзе мець выгляд сферычнай паверхні.

Як бачна з малюнка 93, *a*, калі ў некаторы момант часу t фронт хвалі ад крыніцы S займаў становішча abc , то праз прамежак часу t



Мал. 93. *a* — тлумачэнне перамяшчэння фронту хвалі па прынцыпе Гюйгенса;
b — фарміраванне фронту сферычнай хвалі

фронт зойме ўжо становішча ABC , пункты якога будуць аддалены ад пачатковага фронту хвалі на адлегласць $l = vt$. У кожным наступным становішчы хвалева фронт будзе па-ранейшаму заставацца сферычнай паверхняй.

Агульныя заканамернасці працэсу распаўсюджвання хваль растлумачыў Х. Гюйгенс, сфармуляваўшы ў 1690 г. *прынцып*, які дазваляе вызначаць становішча хвалевага фронту праз малы прамежак часу па яго становішчы ў дадзены момант часу. Згодна з **прынцыпам Гюйгенса**:

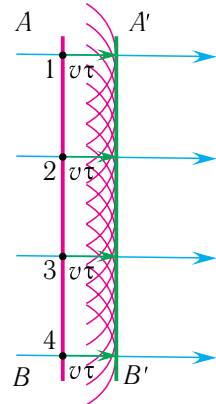
кожны пункт асяроддзя, якога хвалевы фронт дасягнуў у момант часу t , становіцца крыніцай другасных сферычных хваль. Новае становішча хвалевага фронту праз прамежак часу τ вызначаецца агібаючай хвалевага фронтоў другасных хваль у момант часу $t + \tau$.

Такім чынам, згодна з прынцыпам Гюйгенса для знаходжання становішча хвалевага фронту праз прамежак часу τ , трэба правесці акружнасці радыусам $l = vt$, якія ўяўляюць сабой франты другасных хваль, з цэнтрамі на фронце ў становішчы I (гл. мал. 93, б). Адпаведна, агібаючая хвалевага фронтоў другасных хваль (1, 2, 3 і г. д.) вызначае новае становішча хвалевага фронту — становішча II. Напомнім, што агібаючай называецца паверхня, якая датыкаецца да ўсіх другасных хваль. На вельмі вялікіх адлегласцях ад кропкавай крыніцы хвалі, якія яна выпраменьвае, можна лічыць плоскімі (мал. 94).

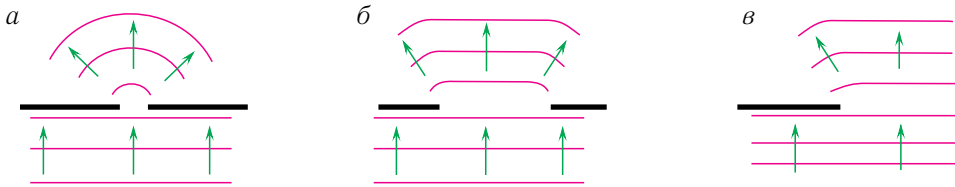
Лінія (L, M, N), перпендыкулярная хвалеваму фронту (гл. мал. 93, а) у дадзеным пункце, з'яўляецца **праменем**. Прамень вызначае напрамак распаўсюджвання хвалі, а таксама напрамак пераносу энергіі хваляй. Напрыклад, будуць практычна паралельнымі сонечныя прамені, што падаюць на футбольнае поле.

Прынцып Гюйгенса тлумачыць *прамалінейнасць распаўсюджвання* хваль у аднародным асяроддзі. Паколькі ў такім асяроддзі радыусы фронтоў другасных хваль (vt) аднолькавыя на ўсіх участках (мал. 94), то хвалевы фронт ($A'B'$) плоскай хвалі з цягам часу перамяшчаецца ў адным і тым жа напрамку, застаючыся паралельным свайму пачатковаму становішчы AB .

Аднак пры распаўсюджванні святла паблізу ад меж непразрыстых цел ці пры праходжанні праз адтуліны ў непразрыстых экранах назіраюцца адхіленні ад закона яго прамалінейнага распаўсюджвання. Прычым адхіленне істотна залежыць ад суадносін паміж



Мал. 94. Прамалінейнае распаўсюджванне хваль (фарміраванне фронту плоскай хвалі)



Мал. 95. Дыфракцыя хваль на розных перашкодах

даўжынёй хвалі і памерам перашкоды. Сапраўды, стоячы за вуглом дома, мы добра чуем, што едзе аўтамабіль, хоць не бачым яго, паколькі знаходзімся ў абсягу «ценю». Такім чынам, гукавыя хвалі нібыта «паварочваюць за вугал», у той час як светлавая хвалі гэтага зрабіць не могуць.

З’ява агібання хвалямі непразрыстых перашкод, якая праяўляецца ў адхіленні напрамку распаўсюджвання хваль ад прамалінейнага, называецца **дыфракцыяй** (мал. 95).

З’ява дыфракцыі з’яўляецца адным з пацверджанняў хвалевай прыроды святла. Для праяўлення дыфракцыі памеры перашкод (адтулін) павінны быць меншымі або параўнальнымі з даўжынёй хвалі, вось чаму ў разгледжаным прыкладзе гук ($v \approx 3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\nu = 1 \cdot 10^2$ Гц, $\lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}} = 3 \text{ м}$) ад працуючага матора аўтамабіля змог «павярнуць за вугал», а святло ($c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\lambda = 500 \text{ нм} = 5,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$), адбітае ад аўтамабіля, — не.

Прынцып Гюйгенса дазваляе знаходзіць толькі напрамак распаўсюджвання хвалевага фронту і не закранае пытанне аб амплітудзе хвалі, а значыць, і аб інтэнсіўнасці хваль, якія распаўсюджваюцца ў розных напрамках.

Вывучаючы дыфракцыю святла, французскі фізік Агюстэн Жан Фрэнель дапоўніў прынцып Гюйгенса ўяўленнем аб інтэрферэнцыі другасных хваль, якія з’яўляюцца кагерэнтнымі. **Прынцып Гюйгенса — Фрэнеля** дазволіў ахарактарызаваць з’яву дыфракцыі колькасца:

усе крыніцы другасных хваль, размешчаныя на хвалевым фронце, кагерэнтныя паміж сабой. Для разліку амплітуды агібаючай хвалі ў дадзеным пункце прасторы трэба ўлічыць інтэрферэнцыю другасных хваль ад усіх участкаў хвалевага фронту ў пачатковы момант часу (гл. мал. 93, а).

Таким чином, паводле Фрэнеля дифракция света тлумачыцца інтэрфэрэнцыяй другасных хваль ад розных участкаў хвалевага фронту ў пачатковы момант часу.

Для назірання дифракцыі света выкарыстоўваецца *дифракцыйная рашотка*.

Дифракцыйная рашотка — аптычны прыбор, прызначаны для дакладнага вымярэння даўжынь хваль і раскладання света ў спектр.

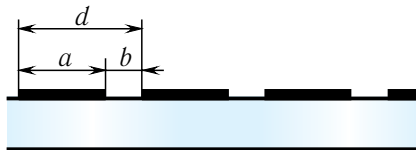
Дифракцыйная рашотка складаецца з вялікай колькасці роўнааддаленых паралельных рысак (шчылін), нанесеных на шкляную ці металічную паверхню. Даўжыні рашотак складаюць 10—15 см. Яны змяшчаюць 10 000—20 000 рысак на 1 см. Назіранні праводзяцца як у адбітым святле (на металічных рашотках), так і ў праходзячым святле (на шкляных).

Разгледзім дифракцыйную рашотку, якая ўяўляе сабой сістэму з N аднолькавых роўнааддаленых паралельных шчылін (празрыстыя ўчасткі) у плоскім непразрыстым экране (мал. 96).

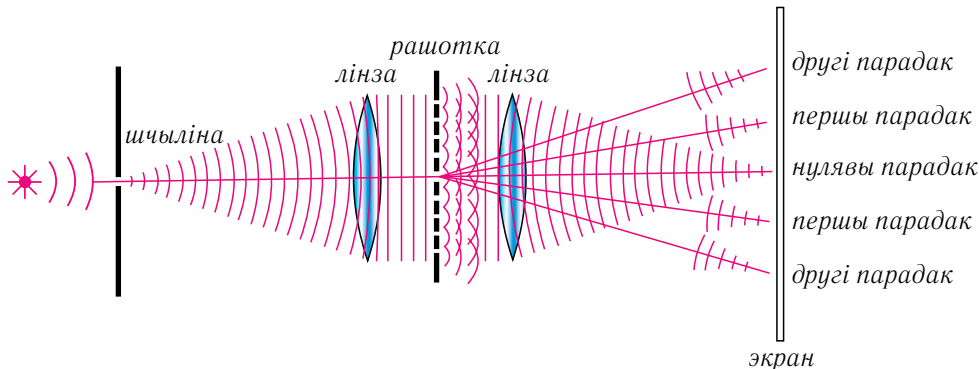
Калі шырыня кожнай шчыліны b , шырыня непразрыстай часткі паміж шчылінамі a , то велічыня $d = a + b$ называецца *пастаяннай рашоткі* або яе *пэрыядам*.

Няхай на рашотку, пастаянная якой роўна d , нармальна падае плоская хваля, даўжыня якой λ . З прынцыпа Гюйгенса вынікае, што хвалі, якія дыфрагіравалі на шчылінах, распаўсюджваюцца за рашоткай ва ўсіх напрамках у прастору (мал. 97).

Для назірання дифракцыйнай карціны на экране паміж ім і рашоткай размяшчаюць збіральную лінзу такім чынам, каб экран



Мал. 96. Дифракцыйная рашотка



Мал. 97. Схема назірання дыфракцыйных максімумаў на дыфракцыйнай рашотцы

знаходзіўся ў фокальнай плоскасці лінзы (гл. мал. 97). Збіральная лінза факусіруе на экране падаючыя на яе паралельныя прамяні (другасныя хвалі).

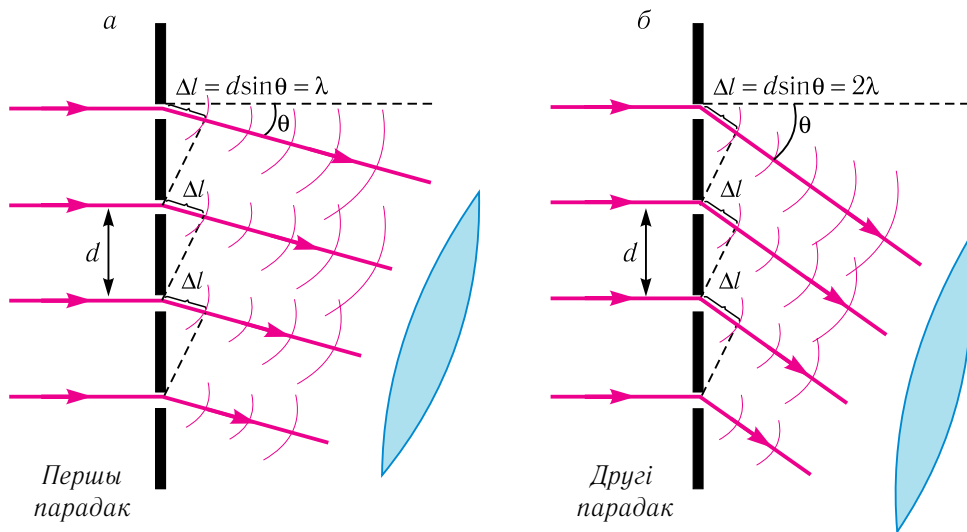
У залежнасці ад рознасці ходу паміж другаснымі хвалямі, выпушчанымі рознымі шчылінамі, яны інтэрферыруюць адна з адной, умацняючы ці паслабляючы адна адну. На экране атрымліваецца *дыфракцыйная карціна* ў выглядзе сістэмы светлых і цёмных палос (гл. мал. 97). Найбольш яркія дыфракцыйныя максімумы атрымалі назву *галоўных дыфракцыйных максімумаў*.

Пры нармальным падзенні святла на дыфракцыйную рашотку ўмова ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімумаў, назіраемых пад вугламі θ , мае выгляд (мал. 98):

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Тут m — *парадак максімуму* або *парадак спектра*, λ — даўжыня хвалі падаючага выпраменьвання.

Атрыманая ўмова вызначае напрамак распаўсюджвання святла ў прасторы, па якім на адрэзку $\Delta l = d \sin \theta$ змяшчаецца цэлы лік даўжынь хваль $m\lambda$ (гл. мал. 98). Такім чынам, пры выкананні ўмовы (1) другасныя хвалі ад усіх шчылін рашоткі прыходзяць у пункт назірання



Мал. 98. Геаметрыя хвалевай тэорыі дыфракцыйнай рашоткі: d — перыяд рашоткі; λ — даўжыня хвалі падаючага выпраменьвання; θ — вугал дыфракцыі

сінфазна (з фазамаі, якія адрозніваюцца на лік, кратны 2π) і ўзмацняюць адна адну.

Паміж максімумамі інтэнсіўнасці размешчаны мінімумы, паколькі пры змяненні вугла θ на адрэзку Δl ужо не будзе змяшчацца цэлы лік даўжынь хваль. Значыць, другасныя хвалі прыходзяць у пункт назірання, паслабляючы адна адну.

З умовы ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімумаў (1) вынікае, што пры $m = 0$ для любых даўжынь хваль $\theta = 0$. Такім чынам, прама ў цэнтры рашоткі ўтворацца нулявы максімум, які называецца таксама *цэнтральным* максімумам. Дыфракцыйныя максімумы, якія адпавядаюць $m = 1$, утвораць спектр *першага парадку*, $m = 2$ — спектр *другога парадку* і г. д. (гл. мал. 97). Колькасць максімумаў m у дыфракцыйнай карціне абмежавана, паколькі $|\sin \theta| \leq 1$. Максімальны парадак спектра m_{\max} , які дае дыфракцыйная рашотка пры нармальным падзенні святла на яе, вызначаецца з умовы $|\sin \theta| \leq 1$. Тады з суадносін (1) трэба ўзяць цэлую частку адносін:

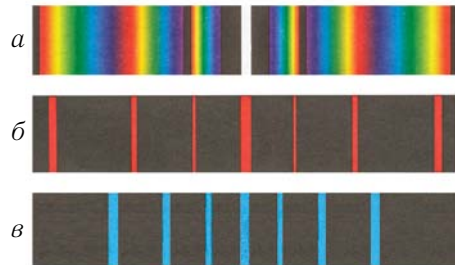
$$m_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right], \quad (2)$$

г. зн. залежыць ад перыяду рашоткі і даўжыні светлавой хвалі.

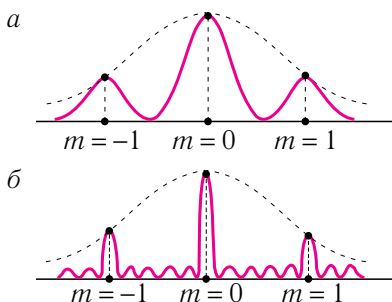
Адзначым, што пры вызначэнні максімальнага парадку спектра неабходна браць цэлую частку ліку m_{\max} .

Як вынікае з суадносін (2), для атрымання спектра першага парадку ($m_{\max} = 1$) неабходна, каб перыяд рашоткі быў большы за даўжыню светлавой хвалі ($d > \lambda$).

Пры падзенні на рашотку белага святла цэнтральны максімум ($m = 0$) уяўляе сабой відарыс крыніцы (мал. 99, а), паколькі ў гэтым напрамку збіраецца выпраменьванне ўсіх даўжынь хваль. Для ўсіх максімумаў ненулявога парадку ($m \neq 0$) у дыфракцыйнай рашотцы сінус вугла адхілення прама прапарцыянальны даўжыні хвалі падаючага выпраменьвання ($\sin \theta \sim \lambda$). Такім чынам, чырвоныя прамені, якія маюць большую даўжыню хвалі, чым сінія, адхіляюцца дыфракцыйнай рашоткай мацней (мал. 99, б, в). Такім чынам, пры асвятленні рашоткі белым святлом справа і злева ад цэнтральна-



Мал. 99. а — дыфракцыйны спектр белага святла; б — дыфракцыйныя максімумы чырвонага святла; в — дыфракцыйныя максімумы сіняга святла



Мал. 100. Змяненне дыфракцыйнай карціны пры павелічэнні колькасці шчылін: *a* — дзве шчыліны; *б* — шэсць шчылін

галоўнага (мал. 100). Таму пры падзенні монахраматычнага выпраменьвання на рашоткі, у якіх колькасць рысак на 1 см дасягае 10^5 , дыфракцыйны спектр складаецца з вельмі рэзкіх ліній.

га максімуму назіраюцца максімумы першага, другога і больш высокіх парадкаў, звернутых фіялетавым краем да цэнтра дыфракцыйнай карціны, а чырвоным — ад яе (мал. 99, *a*).

З павелічэннем колькасці шчылін у дыфракцыйнай рашотцы нарастае колькасць светлавой энергіі, прапускаемай рашоткай, значыць, інтэнсіўнасць галоўных максімумаў пры гэтым павялічваецца. Акрамя таго, галоўныя максімумы з расплывістых ператвараюцца ў рэзкія і вузкія, падзеленыя практычна цёмнымі прамежкамі, паколькі другасныя максімумы вельмі слабыя і складаюць не больш за 5 % ад

► Першая дыфракцыйная рашотка, сканструяваная ў 1786 г. амерыканскім вучоным Дэвідам Рытэнхаўзам, складалася з паралельнага шэрага валасінак дыяметрама каля 0,1 мм і даўжынёй 10 мм, нацягнутых на адлегласці парадку 0,2 мм адна ад другой.

Нямецкі фізік Ёзэф Фраўнгофер замест валасінак выкарыстаў паралельныя рыскі, нанесеныя на шкло алмазным вастрём. Фраўнгофер здолеў вырабіць 300 рысак на 1 мм рашоткі!



1. Што называюць дыфракцыяй святла? Пры якіх умовах яе назіраюць?
2. У чым сутнасць прыцыпу Гюйгенса?
3. Чаму пры аддаленні аркестра, калі ён апыняецца за вуглом дома, праз некаторы час чутны толькі гукі барабана і труб-басоў?
4. У чым сутнасць прыцыпу Гюйгенса — Фрэнеля?
5. У чым падабенства і адрозненне паміж інтэрферэнцыяй і дыфракцыяй?
6. Што называюць дыфракцыйнай рашоткай? Перыядам рашоткі?
7. Запішыце формулу для вызначэння максімумаў інтэнсіўнасці, ствараемай дыфракцыйнай рашоткай.
8. Чаму блізарукія людзі прыплюшчваюць вочы, каб лепш бачыць?



Прыклад рашэння задачы

На дыфракцыйную рашотку, якая мае $N = 500 \frac{\text{рыс}}{\text{мм}}$, падае нармальна монахраматычнае выпраменьванне даўжынёй хвалі $\lambda = 550$ нм. Вызначце найбольшы парадак m_{max} дыфракцыйнага максімуму, які можна назіраць.

Дадзена:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 500 \frac{\text{рыс}}{\text{мм}} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{рыс}}{\text{м}}$$

m_{max} — ?

Рашэнне

Умова дыфракцыйных максіумаў:

$$d \sin \theta = \frac{\sin \theta}{N} = m \lambda.$$

Такім чынам,

$$\sin \theta = N m \lambda.$$

Найбольшы парадак m_{max} дыфракцыйнага максімуму назіраецца пры вугле θ , блізкім да вугла 90° . У выніку гэтага будзем лічыць, што

$$\theta_{\text{max}} \approx \frac{\pi}{2}, \text{ г. зн. } \sin \theta_{\text{max}} \approx 1,$$

тады найбольшы парадак максімуму знаходзіцца па формуле:

$$m \approx \frac{1}{N \lambda}.$$

Для вызначэння m_{max} неабходна ўзяць цэлую частку атрыманага значэння:

$$m_{\text{max}} = \left[\frac{1}{N \lambda} \right] = \left[\frac{1 \text{ м}}{5 \cdot 10^5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \right] = [3,6] = 3.$$

Адказ: $m_{\text{max}} = 3$.

Практыкаванне 12

1. Пад якім вуглом θ назіраецца максімум трэцяга парадку пры нармальным падзенні святла даўжынёй хвалі $\lambda = 840$ нм на дыфракцыйную рашотку з перыядам $d = 2,35 \cdot 10^{-3}$ см?
2. Разлічыце колькасць рысак N на міліметр дыфракцыйнай рашоткі, калі вымераны вугал $\theta = 46^\circ 43'$ і чырвоная лінія спектра кадмію першага парадку мае даўжыню хвалі $\lambda = 644$ нм. Зрабіце аналагічныя вылічэнні, калі пад гэтым вуглом бачна лінія другога парадку.
3. Колькі рысак N на 1 см павінна мець дыфракцыйная рашотка, калі спектр другога парадку адсутнічае ў бачным абсягу?

4. Вызначыце найбольшы парадак m_{\max} спектра, назіраемага пры нармальным падзенні монахраматычнага святла на дыфракцыйную рашотку, якая мае $N = 500 \frac{\text{Рыс}}{\text{мм}}$, калі даўжыня хвалі святла $\lambda = 520 \text{ нм}$.
5. Монахраматычнае святло падае нармальна на дыфракцыйную рашотку. Дыфракцыйны максімум першага парадку назіраецца пад вуглом $\theta = 12^\circ$. Колькі іншых парадкаў m можа назірацца і пад якімі вугламі?
6. Святло з даўжынямі хваль ад $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$ да $\lambda_2 = 780 \text{ нм}$ падае нармальна на дыфракцыйную рашотку. У якіх парадках можа адбыцца перакрыцце максімумаў і мінімумаў? Ці залежыць адказ ад шырыні шчыліны?



§16-1

§ 17. Прамалінейнае распаўсюджванне і адбіццё святла. Люстры

- Якія з'явы назіраюцца пры адбіцці святла ад мяжы падзелу двух асяроддзяў? Як адбываецца адбіццё святла (мал. 101)? Як можна кіраваць светлавым праменем?



Закон прамалінейнага распаўсюджвання святла: у аднародным празрыстым асяроддзі святло распаўсюджваецца прамалінейна.

Закон незалежнасці светлавых праменяў: распаўсюджванне светлавых праменяў у рэчыве адбываецца незалежна адзін ад аднаго.

Вугал паміж падаючым праменем і перпендыкулярам, праведзеным у пункт падзення праменя, называецца вуглом падзення.

Вугал, утвораны адбітым праменем і перпендыкулярам, праведзеным у пункт падзення праменя, называецца вуглом адбіцця.

Закон адбіцця святла: прамені, падаючы і адбіты, а таксама перпендыкуляр да адбіваючай паверхні, праведзены ў пункт падзення, ляжаць у адной плоскасці; вугал адбіцця роўны вуглу падзення.



Мал. 101. Відарыс у плоскім люстры

Для вывучэння ўласцівасцей электрамагнітных хваль неабходна ведаць заканамернасці як іх распаўсюджвання ў аднародным асяроддзі, так і адбіцця і праламлення на мяжы падзелу двух асяроддзяў.

Геаметрычнай оптыкай называюць раздзел оптыкі, у якім вывучаюцца законы распаўсюджвання аптычнага выпраменьвання на падставе ўяўлення аб светлавых праменях. У геаметрычнай оптыцы хвалевае прырода святла не ўлічваецца. Дамоўміся паказваць светлавыя прамені

