

## 9. РАССЕЯННЕ СВЯТЛА

Пры ўзаемадзеянні святла з рэчывам можа адбывацца змяненне якой-небудзь характарыстыкі патоку аптычнага выпраменьвання. Гэта азначае, што мае месца рассеянне выпраменьвання. Дакладнае апісанне рассеяння магчыма ў рамках квантавай тэорыі ўзаемадзеяння выпраменьвання з рэчывам і, у прыватнасці, асобнага кванта ( $h\nu$ ) з часціцай рэчыва. У некаторых выпадках аказваецца дастатковым тлумачэнне рассеяння на падставе хвалевай тэорыі выпраменьвання. З пункту гледжання гэтай тэорыі падаючая светлавая хваля выклікае ў часцінках асяроддзя вымушаныя ваганні электрычных зарадаў, якія становяцца крыніцамі другасных электрамагнітных хваль.

З шэрага разнастайных фактараў, якія вызначаюць рассеянне, цяжка выбраць адзіны дэтальны спосаб яго апісання. Таму часцей за ўсё разглядаюць ідэалізаваныя сітуацыі з рознай ступенню адэкватнасці з'яве рассеяння.

З'ява рассеяння святла знайшла шырокае прымяненне пры розных даследаваннях у фізіцы, хіміі, у розных галінах тэхнікі. Вывучэнне спектраў рассеяння дазваляе вызначыць малекулярныя і атамныя характарыстыкі рэчываў. На рассеянні святла заснаваны многія метады вызначэння памераў і формы часціц, што мае вялікае значэнне пры вымярэнні атмасфернай бачнасці, даследаванні палімерных раствораў.

### 9.1. Рассеянне святла аптычна неаднародным асяроддзем. Закон Рэлея

У празрыстым аднародным асяроддзі светлавая хваля распаўсюджваецца прамалінейна. Калі аптычная аднароднасць асяроддзя парушана, напрыклад, мноствам найдрабнейшых часціц іншага рэчыва, то назіраецца адхіленне ад закону прамалінейнага распаўсюджвання святла. Пад рассеяннем разумеюць працэс ператварэння святла рэчывам, які суправаджаецца змяненнем напрамку яго распаўсюджвання. Часта пад рассеяннем разумеюць змяненне

якіх-небудзь характарыстык пучка святла пры яго ўзаемадзеянні з рэчывам. Гэтымі характарыстыкамі могуць быць прасторавае размеркаванне інтэнсіўнасці, частотны спектр рассеянага святла, яго палярызацыя. Прыкладам рэчываў, якія здольны расейваць святло, з'яўляюцца так званыя мутныя асяроддзі: аэразолі (дым, туман), эмульсіі, калоідныя растворы, матавае шкло і т. п. Гэтыя асяроддзі ўтрымліваюць дробныя часціцы, паказчык праламлення якіх адрозніваецца ад паказчыка праламлення навакольнага асяроддзя. У аптычна мутных асяроддзях святло распаўсюджваецца не толькі ў вызначаным напрамку, але і расейваецца ў розныя бакі.

З пункту гледжання класічнай тэорыі працэс рассеяння заключаецца ў тым, што святло, якое праходзіць праз рэчыва, выклікае ваганні электронаў у атамах. Такія электроны выпраменьваюць другасныя хвалі, якія распаўсюджваюцца ва ўсе бакі. Такая з'ява павінна была б пры любых умовах суправаджацца рассеяннем святла. Але пры гэтым трэба ўлічваць, што другасныя хвалі з'яўляюцца кагерэнтнымі і пры накладанні даюць інтэрферэнцыйную карціну.

У выпадку аднароднага асяроддзя другасныя хвалі поўнасьцю гасяць адна адну па ўсіх напрамках, акрамя напрамку распаўсюджвання першаснай хвалі. Таму ў аднародным асяроддзі рассеяння не адбываецца. Пры распаўсюджванні ў неаднародным асяроддзі другасныя хвалі пры накладанні не гасяць адна другую па ўсіх напрамках, і таму назіраецца рассеянне святла.

Тлумачэнне рассеяння святла магчыма таксама і ў межах квантавай тэорыі ўзаемадзеяння выпраменьвання з рэчывам. Паводле гэтай тэорыі рассеянне святла разглядаецца як паглыннанне часціцай рэчыва фатона энергіяй  $h\nu$  і імпульсам  $P_\phi$ , а затым выпраменьванне фатона энергіяй  $h\nu'$  і імпульсам  $P_{\phi'}$  ( $h$  — пастаянная Планка,  $\nu$  — частата фатона, які падае на рэчыва,  $\nu'$  — частата рассеянага фатона).

Калі энергія фатона, што паглынаецца, роўная энергіі фатона, які выпраменьваецца ( $\nu = \nu'$ ), то рассеянне святла называюць рэлееўскім або пругкім. Калі  $\nu \neq \nu'$ , мае месца перамеркаванне энергіі паміж выпраменьваннем і рэчывам. Такое рассеянне называюць няпругкім.

Заканамернасці рассеяння святла залежаць ад памераў неаднароднасцей ( $d$ ). Рассеянне святла ў мутных асяроддзях з памерамі неаднароднасцей  $0,1 - 0,2\lambda$  было даследавана англійскім фізікам Дж. Цындалем (1820 — 1893) і атрымала назву з'явы *Цындаля*. Гэтую з'яву можна назіраць пры праходжанні пучка святла праз слой паветра, у якім ёсць дробныя часціцы дыму, або праз пасудзіну з малочнай вадой. Калі такое асяроддзе асвятляць пучком белага святла, то пры назіранні збоку яно будзе здавацца блакітным.

У святле, якое прайшло праз тоўсты слой мутнага асяроддзя, апошнія здаецца чырвоным.

Рэлей устанавіў, што інтэнсіўнасць святла, што рассяйваецца часціцай, адваротна прапарцыйная чацвёртай ступені даўжыні хвалі  $\lambda$ :

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}.$$

Гэтая залежнасць атрымала назву закону Рэляя.

У выпадку рассяення натуральнага святла інтэнсіўнасць святла, рассяянага пад вуглом  $\theta$  да напрамку першаснага пучка, залежыць ад яго велічыні наступным чынам:

$$I_{\theta} = I_{\pi/2} (1 + \cos^2 \theta),$$

дзе  $I_{\pi/2}$  — інтэнсіўнасць святла, якое рассяйваецца пад вуглом  $\theta = \pi/2$ , г. зн. перпендыкулярна напрамку першаснага пучка.

Дж. Цындаль выявіў, што святло, якое рассяйваецца пад вуглом  $\theta = \pi/2$ , з'яўляецца цалкам або амаль цалкам лінейна-палярызаваным.

Рассяенне часта выкарыстоўваецца ва ультрамікраскопе для выяўлення дробных калоідных часціц памерамі да тысячных долей мікраметра і назірання за іх рухам.

Закон Рэляя парушаецца, калі памеры часцінак, на якіх адбываецца рассяенне святла, перавышаюць  $0,05\lambda$ . У гэтым выпадку інтэнсіўнасць рассяянага святла  $I \sim 1/\lambda^2$  і яно з'яўляецца часткова палярызаваным.

Пры памерах часціц  $d > \lambda$  залежнасць  $I_{\theta}$  ад вугла  $\theta$  мае больш складаны характар. Інтэнсіўнасць святла, якое рассяйваецца ўперад, г. зн. у напрамках  $\theta < \pi/2$ , большая за інтэнсіўнасць святла, рассяянага назад ( $\theta > \pi/2$ ). Такая з'ява атрымала назву *эфекту Мі* (Г. Мі — нямецкі фізік, 1868 — 1957).

Калі памеры часціц значна перавышаюць даўжыню хвалі падаючага святла ( $d \gg \lambda$ ), то спектральны састаў рассяянага святла супадае са спектральным саставам падаючага святла. Гэтым тлумачыцца белы колер воблакаў.

Трэба адзначыць, што рассяенне святла асяроддзем, якое складаецца з вялікай колькасці часціц, істотна адрозніваецца ад рассяення святла асобнымі часціцамі. Гэта абумоўлена перш за ўсё інтэрферэнцыйнай хваль, рассяяных асобнымі часціцамі. Магчыма таксама мнагакратнае рассяенне, калі святло, рассяянае адной часціцай, зноў рассяйваецца іншымі часціцамі.

## 9.2. Маллекулярнае рассяенне святла

Рассяенне святла назіраецца і ў чыстым асяродзі. Рэлей у выніку эксперыментальных і тэарэтычных даследаванняў прыйшоў да высновы, што рассяенне святла выклікаецца не пабочнымі часцінкамі, а маллекуламі самога асяроддзя. Такое рассяенне атрымала назву маллекулярнага.

Фізічная прырода маллекулярнага рассяення святла была выяўлена М. Смалухоўскім (польскі фізік, 1872 — 1917) і Л. Мандэльштамам (1879 — 1944). Маллекулярнае рассяенне святла абумоўлена цеплавымі флюктуацыямі паказчыка праламлення, якія і робяць асяроддзе аптычна мутным. Прычынай аптычных неаднароднасцей з'яўляюцца флюктуацыі шчыльнасці, г. зн. адхіленне шчыльнасці ад яе сярэдняга значэння ў межах малых аб'ёмаў. Гэтыя флюктуацыі ўзнікаюць у выніку хаатычнага цеплавога руху малекул асяроддзя. Дадатковымі прычынамі ўзнікнення аптычных неаднароднасцей у чыстых асяроддзях з'яўляюцца флюктуацыі арыентацый малекул.

Флюктуацыі шчыльнасці малекул і інтэнсіўнасць рассяенага святла ўзрастаюць з павелічэннем тэмпературы. Найбольш значныя флюктуацыі шчыльнасці ў газах узнікаюць у крытычным стане. Пры гэтым назіраецца вельмі інтэнсіўнае рассяенне святла, якое атрымала назву *крытычнай апалесцэнцыі*.

Рассяенне святла маллекуламі залежыць ад таго, якой з'яўляецца дадзеная маллекула: ізатропнай ці анізатропнай. Ізатропнай называецца маллекула, палярызаванасць якой аднолькавая па ўсіх напрамках. Палярызаванасць анізатропных малекул залежыць ад напрамку.

Эксперыментальныя даследаванні паказваюць, што пры рассяенні натуральнага святла ізатропнымі маллекуламі адбываецца лінейная палярызацыя ў напрамку, які складае  $90^\circ$  з першапачатковым напрамкам падаючага святла. Калі маллекулы асяроддзя анізатропныя, мае месца дэпалярызацыя рассяенага святла. Пры падзенні лінейна палярызаванага святла рассяенае святло будзе палярызаваным толькі часткова. Флюктуацыі арыентацыі анізатропных малекул выклікаюць не толькі дэпалярызацыю, але і ўплываюць на інтэнсіўнасць рассяенага святла.

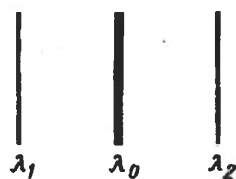
Маллекулярнае рассяенне святла мае месца не толькі ў газах, але і ў чыстых вадкасцях і крышталях. У выніку цеплавога руху малекул асяроддзя ўзнікаюць флюктуацыі шчыльнасці  $\Delta\rho$ , якія ў сваю чаргу выклікаюць флюктуацыі паказчыка праламлення  $\Delta n$ , а значыць, і аптычныя неаднароднасці.

Маллекулярнае рассяенне святла адбываецца не толькі ў аб'ёме рэчыва. Яно назіраецца і на паверхні вадкасці, або на мяжы падзелу дзвюх вадкасцей. Пад дзеяннем сіл паверхневага нацяжэння і энергіі цеплавога руху на паверхні вадкасці ўзнікаюць дробныя неадна-

роднасці, на якіх і адбываецца рассеянне святла. Калі памеры гэтых неаднароднасцей малыя ў параўнанні з даўжынёй хвалі, то інтэнсіўнасць рассеянага святла адваротна прапарцыйная другой ступені даўжыні хвалі:  $I \sim 1/\lambda^2$ .

### 9.3. Камбінацыйнае рассеянне святла

У 1928 г. Л. Мандэльштам і Г. Ландсберг пры спектральных даследаваннях рассеянага святла выявілі, што кожная спектральная лінія падаючага святла суправаджаецца лініямі, частата якіх ад-розніваецца ад частаты асноўнай лініі. Гэтыя лініі называюць *спадарожнікамі* або *сатэлітамі* (рыс. 9.1). Амаль адначасова такая ж з'ява была выяўлена ў Індыі Ч. Раманам (1888 — 1970) і К. Крышнанам (1898 — 1961) пры даследаванні рассеяння святла ў вадкасцях. Гэтая з'ява называецца *камбінацыйным* *рассеяннем* святла або *эфектам Рамана*.



Рыс. 9.1.

Для камбінацыйнага рассеяння святла характэрны наступныя асаблівасці:

- 1) спадарожнікі суправаджаюць кожную лінію першагнага святла;
- 2) рознасць частот  $\Delta\nu$  асноўнай лініі і лініі-спадарожніка характэрна для рэчыва, якое рассеівае святло;
- 3) спадарожнікі размяшчаюцца сіметрычна асноўнай лініі:  $\nu_{\text{ч}} = \nu_0 - \Delta\nu$ ,  $\nu_{\text{ф}} = \nu_0 + \Delta\nu$  або  $\lambda_{\text{ч}} = \lambda_0 + \Delta\lambda$ ,  $\lambda_{\text{ф}} = \lambda_0 - \Delta\lambda$  (спадарожнік з даўжынёй хвалі  $\lambda_{\text{ч}} > \lambda_0$  носіць назву «чырвонага», а з даўжынёй хвалі  $\lambda_{\text{ф}} < \lambda_0$  — «фіялетавага»);
- 4) з павелічэннем тэмпературы інтэнсіўнасць «фіялетавага» спадарожніка ўзрастае.

З пункту гледжання квантавай тэорыі святла камбінацыйнае рассеянне можна растлумачыць наступным чынам.

Святло частатой  $\nu_0$  распаўсюджваецца ў выглядзе пэўных порцый энергіі  $h\nu_0$  (фатонаў), дзе  $h$  — пастаянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с). Сутыкненні фатонаў з малекуламі рэчыва могуць быць пругкімі і няпругкімі. У першым выпадку энергія малекулы і фатона не змяняецца. Не змяняецца і частата фатона  $\nu_0$ , што адпавядае рэлеёўскаму рассеянню святла. Пры няпругкіх сутыкненнях энергія фатона павялічваецца або памяншаецца на велічыню  $\Delta\epsilon$ . Калі фатон узаемадзейнічае з малекулай, якая не знаходзіцца ў стане вагання, то ён аддае ёй адпаведную частку сваёй энергіі і ператвараецца ў фатон меншай частаты («чырвоны» спадарожнік):

$$h\nu_{\text{ч}} = h\nu_0 - \Delta\varepsilon \text{ або } \nu_{\text{ч}} = \nu_0 - \Delta\nu.$$

Калі фатон узаемадзейнічае з малекулай, якая знаходзіцца ў стане вагання і мае энергію  $\Delta\varepsilon$ , то яна можа перадаць гэтую энергію фатону. Пры гэтым узнікае фатон з большай частатой ("фіялетаваы" спадарожнік):

$$h\nu_{\text{ф}} = h\nu_0 + \Delta\varepsilon \text{ або } \nu_{\text{ф}} = \nu_0 + \Delta\nu.$$

З павелічэннем тэмпературы рэчыва колькасць малекул, якія знаходзяцца ў стане вагання, павялічваецца. У выніку ўзрастае інтэнсіўнасць «фіялетавага» спадарожніка.

Камбінацыйнае рассеянне святла можа адбывацца не толькі пры ўзаемадзеянні фатона з малекуламі, але і з атамамі.

Гэтае рассеянне святла з'яўляецца эфектыўным метадам даследавання будовы малекул і іх узаемадзеяння з навакольным асяроддзем. Пры дапамозе яго можна вызначыць уласныя частоты ваганняў малекул, характар іх сіметрыі, унутрымалекулярныя сілы і асаблівасці малекулярнай дынамікі. Спектр камбінацыйнага рассеяння святла і інфрачырвоны спектр паглынання не дубліруюць адзін аднаго. Супастаўленне такіх спектраў аднаго і таго ж рэчыва дазваляе меркаваць аб сіметрыі нармальных ваганняў і, значыць, аб сіметрыі малекулы ўвогуле і яе структуры. З дапамогай метадаў камбінацыйнага рассеяння святла вывучаюць квазічасціцы ў цвёрдых целах. Спецыфічнасць спектраў камбінацыйнага рассеяння святла злучэнняў дазваляе ідэнтыфікаваць іх і выяўляць у сумесях.

Выкарыстанне магутных імпульсаў лазернага выпраменьвання прывяло да адкрыцця нелінейнай з'явы, так званага вымушанага камбінацыйнага рассеяння святла. Гэта дазволіла (з дапамогай метадаў камбінацыйнага рассеяння святла) больш шырока даследаваць газы і парашкі афарбаваных рэчываў.