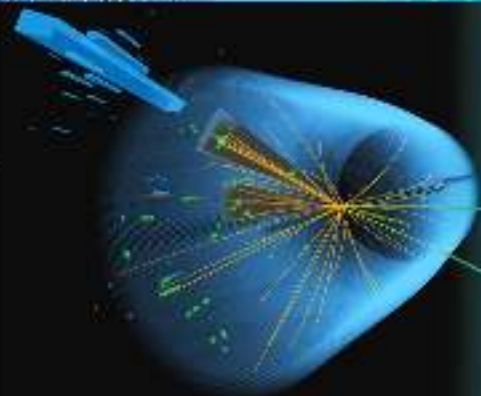


В. У. Жылко
Л. Р. Маркович
А. А. Сакольскі



ФІЗИКА

11



ПРЫСТАЎКІ ДЛЯ ўТВАРЭННЯ ДЗЕСЯТКОВЫХ КРАТНЫХ І ДОЛЕВЫХ АДЗІНАК

ПРЫСТАЎКА	АБАЗНАЧЭННЕ	МНОЖАК	ПРЫСТАЎКА	АБАЗНАЧЭННЕ	МНОЖАК
ЗЕТА	з	10^{21}	ДЭЦЫ	д	10^{-1}
ЭКСа	э	10^{18}	САНТЫ	с	10^{-2}
ГІГА	г	10^{15}	МІЛІ	м	10^{-3}
ТЭРА	т	10^{12}	МІКРА	мк	10^{-6}
ПІКА	п	10^9	НАНА	н	10^{-9}
МЕГА	м	10^6	ГІКА	г	10^{-12}
КІЛА	к	10^3	ФЕМА	ф	10^{-15}
ГЕКТА	г	10^2	АТА	а	10^{-18}
ДЭКА	да	10^1	ЗЕПТА	з	10^{-21}

ПРЫСТАЎКІ АЛФАВІТ

АБЭВІС	НАЗВА	АБЭВІС	НАЗВА
А α	АЛЬФА	Ν ν	НЮ
В β	БЭТА	Ξ ξ	КСІ
Г γ	ГАМА	Ο ο	АМІКРОН
Δ δ	ДЭЛЬТА	Π π	ПІ
Ε ε	ЭПСІЛОН	Ρ ρ	РО
Ζ ζ	ДЗЭТА	Σ σ	СІГМА
Η η	ЭТА	Τ τ	ТАЎ
Θ θ	ТЭТА	Υ υ	ІГОПОН
Ι ι	ЁТА	Φ φ	ФІ
Κ κ	КАПА	Χ χ	ХІ
Λ λ	ЛЯМБДА	Ψ ψ	ПСІ
Μ μ	МУ	Ω ω	АМЕГА

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЯ ФІЗЫЧНЫЯ ПАСТАЯННЫЯ

ВЕЛІЧЫНЯ	АБАЗНАЧЭННЕ	ПРЫБЛІЖНАЕ ЗНАЧЭННЕ
ПАСКАРЭННЕ СВАБОДНАГА ПАДЗЕННЯ	g	$9,81 \frac{м}{с^2}$
СКОРАСЦЬ СВАТЛА У ВАКУУМЕ	c	$3,00 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$
ГРАВІТАЦЫЙНАЯ ПАСТАЯННАЯ	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$
ЭЛЕМЕНТАРНЫ ЗАРАД	e	$1,60 \cdot 10^{-19} Кл$
ЭЛЕКТРЫЧНАЯ ПАСТАЯННАЯ	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Н \cdot м^2}$
МАГНІТНАЯ ПАСТАЯННАЯ	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$
МАСА ЭЛЕКТРОНА	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31} кг$
МАСА ПРАТОНА	m_p	$1,673 \cdot 10^{-27} кг$
МАСА НЕЙТРОНА	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} кг$

В. У. Жылко Л. Р. Марковіч А. А. Сакольскі

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання
(з электронным дадаткам для павышанага ўзроўню)

*Дарушчана
Міністэрствам адукацыі
Рэспублікі Беларусь*

Мінск «Народная асвета» 2021

Правообладатель Народная асвета

УДК 53(075.3=161.3)

ББК 22.3я721

Ж72

Рэцэнзенты:

кафедра фізікі і методыкі выкладання фізікі ўстановы адукацыі
«Беларускі дзяржаўны педагагічны ўніверсітэт імя Максіма Танка»
(кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт *В. М. Белая*);
настаўнік вышэйшай кваліфікацыйнай катэгорыі дзяржаўнай установы адукацыі
«Ордэна Працоўнага Чырвонага Сцяга гімназія № 50 г. Мінска»
Т. А. Шыманская

Пераклад з рускай мовы *Н. М. Алганавай*

Электронны дадатак для павышанага ўзроўню
размешчаны на рэсурсе profil.adu.by

ISBN 978-985-03-3624-8

© Жылко В. У., Марковіч Л. Р.,
Сакольскі А. А., 2021
© Алганавы Н. М., пераклад на
беларускую мову, 2021
© Афармленне. УП «Народная
асвета», 2021

Правообладатель Народная асвета

АД АЎТАРАЎ

Дарагія старшакласнікі! Надышоў апошні, выпускны год навучання ў школе, які падвядзе вынік шматгадовай працы. Няма неабходнасці тлумачыць, як важна ў гэтым класе напружана працаваць, каб зрабіць усё магчымае для паспяховага завяршэння навучання ў сярэдняй школе.

Як пісаў М. П. Трэцьякоў у падручніку «Курс фізікі»: «У старэйшых класах школы вучням пара не толькі назіраць і канстатаваць назіраемае, але і вучыцца прымяняць агульныя палажэнні да рашэння прыватных пытанняў, карыстаючыся даступнымі ім сродкамі матэматыкі. Толькі так можна даць уяўленне аб эксперыментальным метадзе даследавання і ліквідаваць той разрыў, які існуе паміж школай і ВНУ.

Наўрад ці ў падручніку патрэбны апісанні шматлікіх доследаў чыста ілюстрацыйнага характару, якія часта дубліруюць адзін аднаго. Падбор і афармленне доследаў — справа густу і магчымасцей настаўніка. Што ж датычыцца асноўных, якія маюць прынцыповае значэнне, то ... без іх апісання немагчыма даць уяўленне аб эксперыментальным метадзе ў фізіцы».

У 11-м класе вы будзеце вывучаць фізіку ваганняў і хвалевых працэсаў, а таксама опытку. Вас чакае знаёмства з цікавымі з'явамі і законамі квантавай фізікі, фізікі мікрасвету (атама, ядра, элементарных часціц), асновамі спецыяльнай тэорыі адноснасці, якая ў свой час карэнным чынам змяніла ўяўленне аб навакольным свеце.

Азнаямленне з сучаснай фізічнай карцінай свету дазволіць вам сабраць разам увесь вывучаны матэрыял і зірнуць па-новаму на навакольны свет і яго далейшую эвалюцыю ў агляднай будучыні.

Матэрыял дадзенага дапаможніка прадстаўлены васемю раздзеламі, падзеленымі на параграфы.

У вучэбным дапаможніку пад знакам  дадзена актуалізацыя матэрыялу, вывучаемага ніжэй, а таксама ёсць рубрыка «Паўтарэнне», адзначаная знакам , якая дазваляе перад пачаткам знаёмства з новай тэмай коратка паўтарыць матэрыял, вывучаны вамі раней.

У кожным з параграфу для канцэнтрацы вашай увагі азначэнні і фармулёўкі законаў вылучаны тлустым шрыфтам, а формулы для запамінання змешчаны ў рамкі. Кантрольныя пытанні да параграфу вылучаны знакам , далей ідуць прыклады рашэння задач і зада-

чы для самастойнага рашэння. Для засваення матэрыялу вам трэба не толькі вывучыць тэорыю, але і самастойна выканаць заданні, дадзеныя ў практыкаваннях.

Пераход да матэрыялу профільнага ўзроўню вылучаны знакам .

У канцы кожнага раздзела размешчаны найбольш важны матэрыял для засваення тэарэтычных ведаў і фарміравання практычных уменняў, а таксама дадзены заданні для самастойных даследаванняў.

У Дадатку да вучэбнага дапаможніка дадзены інструкцыі да лабараторных работ. У канцы кнігі размешчаны адказы да практыкаванняў.

У рубрыцы «Гэта цікава», якая размешчана на жоўтай плашчы, падбраны незвычайныя фізічныя факты і з'явы, звязаныя з вивучаемым матэрыялам, якія могуць быць карыснымі пры падрыхтоўцы дакладаў на школьную канферэнцыю, напісанні рэфератаў і г. д.

Знакам  вылучаны вучоныя, якія атрымалі Нобелеўскую прэмію за свае даследаванні.

Старанна выконвайце заданні і рэкамендацыі настаўніка, настойліва займайцеся самастойна. Цудаў не бывае — толькі настойлівая праца ў класе і дома прывядзе вас да поспеху пры вивучэнні фізікі.

Жадаем поспехаў!

Аўтары



Раздзел 1

Механічныя ваганні і хвалі

Гадзіннік не здзейсніў урока,
А маятнік быццам заснуў,
Тады расчыніў я шырока
Футляр іх — і ліру хіснуў!

І. Аненскі. Ліра гадзіннікаў

§ 1. Вагальны рух. Гарманічныя ваганні

- У свеце разнастайных механічных рухаў даволі часта сустракаюцца перыядычныя рухі (рухі, якія паўтараюцца): ваганні маятніка гадзінніка, рух поршня ў рухавіку аўтамабіля, біццё сэрца чалавека. У чым асаблівасці такіх рухаў? Якімі параметрамі яны апісваюцца?

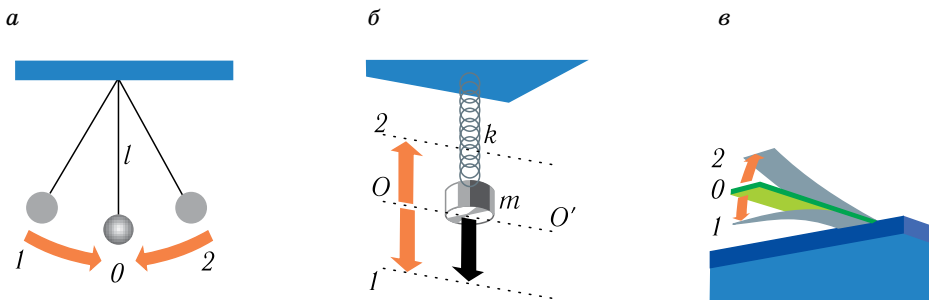


Рух абсалютна цвёрдага цела, пры якім прамая, што праходзіць праз любыя два яго пункты, застаецца паралельнай самой сабе, называецца паступальным рухам.

Вярчальным называецца рух цела, пры якім кожны пункт цела рухаецца па сваёй акружнасці, і цэнтры гэтых акружнасцей ляжаць на адной нерухомай прамой. Гэта прамая называецца воссю вярчэння. Раўнамернае вярчэнне характарызуецца перыядам T ці частатой ν . Перыяд вярчэння T роўны часу, за які цела выконвае адзін абарот па акружнасці. Частата ν роўна ліку абаротаў за адзінку часу.

Цела знаходзіцца ў раўнавазе, калі вектарная сума ўсіх сіл, прыкладзеных да яго, і алгебраічная сума момантаў гэтых сіл адносна любой восі роўны нулю. Раўнавага называецца ўстойлівай, калі пры малым адхіленні цела ад становішча раўнавагі яно вяртаецца ў зыходнае становішча.

Розныя віды механічнага руху характарызуюцца рознай ступенню паўтаральнасці. Так пры паступальным руху цела можа наогул не вяр-



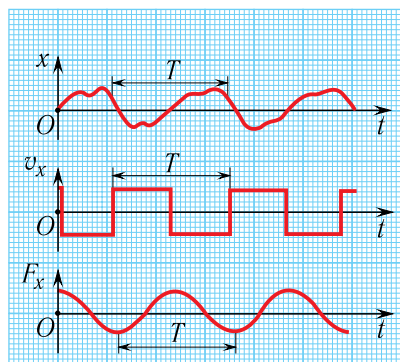
Мал. 1. Вагальныя рухі:

a — цела, падвешанае на нітцы; b — груз на пружыне;
 c — металічная пласцінка, замацаваная на канцы

нуцца ў зыходнае становішча, у той час як пры вярчальным руху гэта адбудзецца праз прамежак часу, роўны перыяду абарачэння T .

У навакольным свеце вельмі шырока распаўсюджаны і такія від руху цела, пры якім яно спачатку рухаецца ў адным напрамку, а затым — у зваротным, і такі рух паўтараецца неаднаразова па адной і той жа траекторыі. Падобныя прыклады прыведзены на малюнку 1. Пры гэтым праз любы пункт траекторыі, за выключэннем крайніх пунктаў 1 і 2 (гл. мал. 1), цела праходзіць як у прамым, так і ў зваротным напрамках.

Такі від руху называецца **вагальным**. Вагальны рух здзяйсняюць такія механічныя сістэмы, як маятнік, арэлі, лісце дрэў пад уздзеяннем ветру, струны пры гульні на гітары ці піяніна. Рух атамаў у крышталічнай рашотцы таксама мае вагальны характар.



Мал. 2. Перыядычныя рухі

Такім чынам, для вагальнага руху характэрна ўласцівасць вяртальнасці (гл. мал. 1). Калі фізічныя велічыні, якія характарызуюць рух (напрыклад, каардыната x праекцыі скорасці v_x і дзеючай сілы F_x), прымаюць адны і тыя ж значэнні праз роўныя прамежкі часу (мал. 2), то такія ваганні (рухі) называюцца **перыядычнымі**.

Мінімальны прамежак часу, па заканчэнні якога паўтараюцца значэнні ўсіх

фізічных велічынь, што характарызуюць ваганне, называецца **пэрыядам ваганняў** і абазначаецца літарай T :

$$T = \frac{\Delta t}{N}, \quad (1)$$

дзе Δt — прамежак часу, за які адбылося N ваганняў.

Ваганні па сваёй прыродзе могуць быць не толькі механічнымі, але і электрамагнітнымі (пэрыядычныя змяненні напружання і сілы току ў электрычным ланцугу), тэрмадынамічнымі (ваганні тэмпературы з цягам часу) і г. д. Такім чынам, ваганні — гэта асобая форма руху ў тым сэнсе, што розныя па сваёй прыродзе фізічныя працэсы (механічныя, электрамагнітныя і г. д.) апісваюцца аднолькавымі матэматычнымі залежнасцямі фізічных велічынь ад часу.

Для апісання ваганняў, як і для вярчальнага руху, разам з **пэрыядам ваганняў** T выкарыстоўваюць велічыню, якая называецца **частатой ваганняў**. Яна абазначаецца літарай ν . Частата ν роўна адносіне ліку ваганняў N да прамежку часу Δt , за які яны адбыліся:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}. \quad (2)$$

Такім чынам, частата ваганняў паказвае, які лік ваганняў цела выконвае за адзінку часу (за секунду):

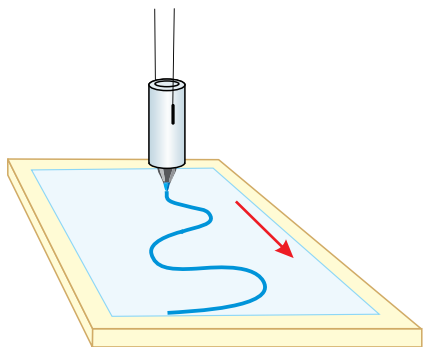
$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Акрамя частаты ν , часта выкарыстоўваюць **цыклічную частату** ω , якая паказвае лік ваганняў, выконваемых за прамежак часу Δt , роўны 2π секунд:

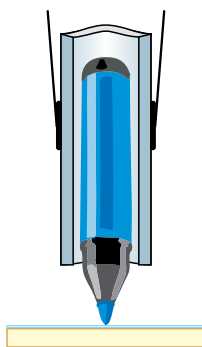
$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Для нагляднага апісання вагальнага руху зручна прадставіць залежнасць каардынаты x цела, якое вагаецца, ад часу t у выглядзе графіка, г. зн. пабудаваць графік функцыі $x(t)$.

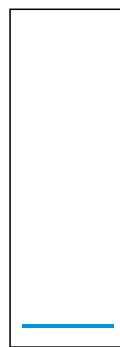
Для механічнага «запісу» ваганняў можна выкарыстоўваць устаноўку, паказаную на малюнку 3. У гэтай устаноўцы да грузу, падвешанага на дзвюх нітках, прымацаваны фламастар (мал. 4). Ён можа вольна перасоўвацца ў трубацы для таго, каб увесь час дакранацца да аркуша паперы пры ваганнях грузу. Калі адхіліць груз папярком аркуша паперы



Мал. 3. Запіс ваганняў
(асцылаграма)



Мал. 4. Мацаванне
фламастара да
аркуша паперы

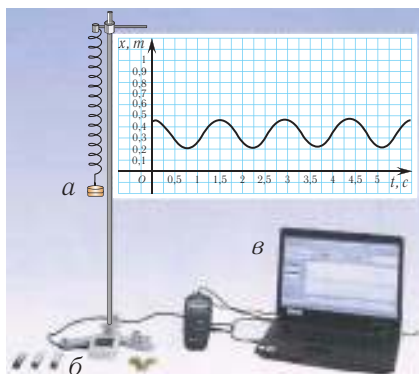


Мал. 5. Траекторыя
руху маятніка

і адпусціць, то кончык фламастара будзе апісваць на аркушы прамую лінію, якая з'яўляецца траекторыяй руху грузу (мал. 5).

Калі ж пры гэтым аркуш паперы будзе рухацца з пастаяннай скорасцю, то адбудзецца складанне двух рухаў ва ўзаемна перпендыкулярных напрамках. У выніку на паперы з'явіцца крывая (гл. мал. 3), кожны пункт якой адпавядае становішчу фламастара, які вагаецца, у розныя моманты часу. Атрымалася разгортка вагальнага руху, г. зн. графік руху цела, якое вагаецца.

Такая крывая называецца *асцылаграмай* (ад лац. *oscillum* — ваганне і грэч. *γραμα* (грама) — запіс).

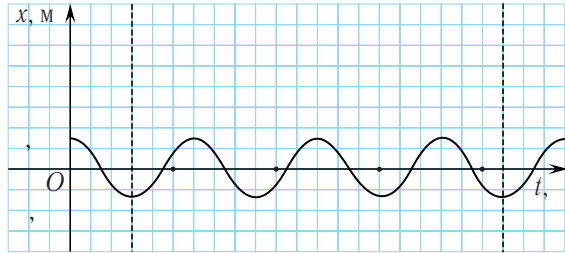


Мал. 6. Устаноўка для запісу асцылаграмы ваганняў маятніка: *а* — груз на sprужыне; *б* — ультрагукавы датчык руху; *в* — ноутбук

Для разгорткі ваганняў можна выкарыстоўваць і сучасную ўстаноўку з камп'ютарам, паказаную на малюнку 6. Падвесім на цыліндрычнай sprужыне груз. Адвядзём яго ўніз, адпусцім і будзем рэгістраваць ваганні з дапамогай ультрагукавага датчыка руху. Ён будзе вызначаць адлегласць да падвешанага грузу. Пры адпаведным праграмным забеспячэнні залежнасць адлегласці паміж грузам і датчыкам ад часу будзе паказвацца на экране камп'ютара (гл. мал. 6).

Якія высновы можна зрабіць зыходзячы з прадстаўленых асцылаграм?

Па-першае, каардыната цела змяняецца перыядычна (гл. мал. 6). Звычайна сістэму каардынат выбіраюць так, што вось часу праходзіць праз пункт, значэнне каардынаты $x = 0$ якога адпавядае становішчу ўстойлівай раўнавагі (мал. 7). У такім разе каардыната грузу будзе змяняцца ад максімальнага значэння $x = x_{\max} = A$ да мінімальнага значэння $x = x_{\min} = -A$. Максімальнае адхіленне маятніка ад значэння $x = 0$ (становішча раўнавагі) называецца **амплітудай ваганняў** і абазначаецца літарай A . У дадзеным выпадку яе велічыня роўна $A = 0,12$ м.



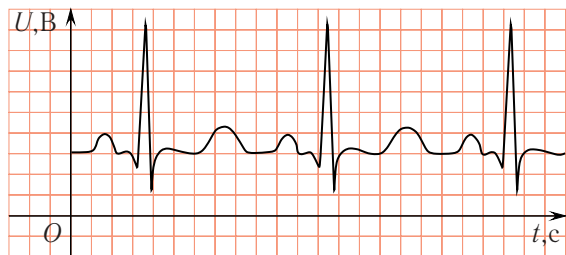
Мал. 7. Асцылаграма ваганняў грузу на sprужыне

Такім чынам, ваганні, акрамя перыяду (частаты), характарызуюцца **амплітудай ваганняў**.

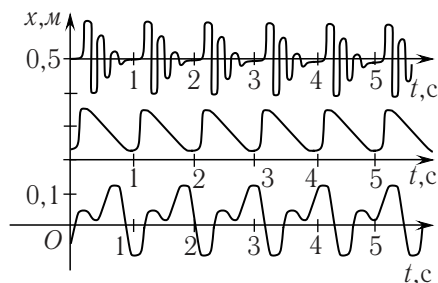
Па-другое, скорасць і паскарэнне пры руху цела, якое вагаецца, *непастаянныя ў часе*. Яны таксама перыядычна змяняюцца з цягам часу. Так, скорасць маятніка максімальная ($v = v_{\max}$) пры праходжанні становішча раўнавагі ($x = 0$) і роўна нулю ($v = 0$) пры $x = A$ або $x = -A$.

Форму крывой, якая выражае залежнасць змянення велічыні, што вагаецца (напрыклад, каардынаты, праекцыі скорасці, праекцыі паскарэння), ад часу, называюць **формай ваганняў** (гл. мал. 7).

Асцылаграмы розных ваганняў шырока выкарыстоўваюцца ў медыцыне, навуцы і тэхніцы. Ваганні, якія выконваюць грузы, падвешаныя на sprужыне або нітцы, з'яўляюцца найбольш простымі па форме (сіносаідальнымі або косіносаідальнымі) (гл. мал. 2). На малюнку 8 паказана электракардыяграма (ад грэч. кардіа (кардыё) — сэрца) — запіс біцця сэрца чалавека, які дазваляе вызначыць стан сэрца і, калі неабходна, прызначыць своечасовае лячэнне. У адрозненне ад асцылаграмы грузу, які вагаецца (гл. мал. 7), форма электракардыяграмы (гл. мал. 8) значна больш складаная.



Мал. 8. Электракардыяграма



Мал. 9. Ваганні аднолькавай амплітуды і перыяду, але рознай формы

Заўважым, што амплітуда і перыяд ваганняў не даюць поўнага ўяўлення аб характары перыядычнага працэсу, бо працэсы могуць мець аднолькавую амплітуду і перыяд, але зусім розную форму (мал. 9).

Як жа матэматычна апісваюцца гарманічныя ваганні?

Яны апісваюцца ўраўненнямі, у якіх каардыната (зрух) цэла змяняецца з цягам часу па **заcone косінуса**.

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

або **сінуса**:

$$x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (6)$$

Велічыня $\varphi = \omega t + \varphi_0$ называецца **фазай** ваганняў. Яна вызначае стан вагальнай сістэмы (каардынаты, скорасці, паскарэння) у любы момант часу пры зададзенай частаце і амплітудзе. Значэнне ў пачатковы момант часу $\varphi(t = 0) = \varphi_0$ называецца **пачатковай фазай** φ_0 .

Залежнасць каардынаты ад часу $x(t)$ (суадносіны (5) і (6)) называецца **кінематычным законам руху**, паколькі дазваляе вызначыць становішча цэла, якое вагаецца. Выходзячы з яго можна знайсці яго скорасць, паскарэнне ў любы момант часу.

Каардыната цэла (зрух цэла са становішча раўнавагі) $x(t)$ у момант часу t пры перыядычным руху падпарадкоўваецца роўнасці:

$$x = f(t), \quad f(t) = f(t + T),$$

дзе $f(t)$ — зададзеная перыядычная функцыя ад часу t , T — перыяд гэтай функцыі.

Рух, пры якім каардыната цэла змяняецца з цягам часу па **заcone сінуса** (або **косінуса**), называецца **гарманічным ваганнем**.

Такім чынам, асноўнымі кінематычнымі велічынямі, якія характарызуюць перыядычныя ваганні, з'яўляюцца: **перыяд** (T), **частата** (ν), **цыклічная частата** (ω) і **амплітуда** (A).

У СІ асноўнымі адзінкамі гэтых велічынь з’яўляюцца: перыяду ваганняў — **секунда** (1 с), частаты ваганняў — **герц** (1 Гц), цыклічнай частаты — 1 с^{-1} . 1 Гц роўны частаце ваганняў цела, пры якой за 1 с цела выконвае адно поўнае ваганне ($1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$).

Назва адзінкі частаты **герц** дадзена ў гонар нямецкага фізіка Генрыха Герца, які эксперыментальна адкрыў электрамагнітныя хвалі.

Звернем увагу на тое, што велічыні T , ν , ω , A , якія характарызуюць гарманічныя ваганні цела, аналагічныя адпаведным велічыням, якія апісваюць рух цела па акружнасці (табл. 1).

Табліца 1. Супастаўленне фізічных велічынь, якія характарызуюць вярчальны і вагальны рухі

Фізічныя велічыні	Від руху	
	Рух па акружнасці	Гарманічныя ваганні
R, A	R — радыус акружнасці	A — амплітуда ваганняў
φ	Вугал павароту	Фаза ваганняў
T	Перыяд абарачэння	Перыяд ваганняў
N	Лік абаротаў	Лік ваганняў
$\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T}$	Частата абарачэння	Частата ваганняў
$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$	Вуглавая скорасць	Цыклічная частата

Частата ν (перыяд T) гарманічных ваганняў залежыць толькі ад уласцівасцей сістэмы, у якой адбываюцца ваганні. Амплітуда ваганняў A і пачатковая фаза φ_0 вызначаюцца не ўласцівасцямі самой сістэмы, а тым спосабам, якім у сістэме выкліканы ваганні. Так, ваганні можна ўзбудзіць адхіленнем ад становішча раўнавагі, а можна — штуршком са становішча раўнавагі.

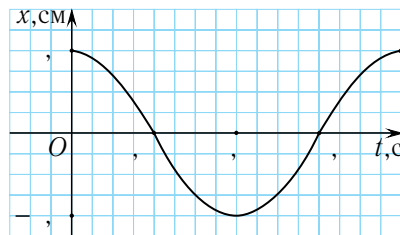
Усе велічыні, разгледжаныя вышэй, а іменна перыяд T (1), частата ν (3), цыклічная частата ω (4) і амплітуда A , вызначаюць вагальны працэс у цэлым, незалежна ад яго прыроды.



1. Які рух называюць перыядычным? Вагальным?
2. Што называюць амплітудай ваганняў? Перыядам? Частотой?
3. Якой суадносінай звязаны паміж сабой частата ваганняў ν і цыклічная частата ваганняў ω ?
4. Што такое кінематычны закон руху? Запішыце закон руху пры гарманічных ваганнях.
5. Які шлях праходзіць цела, якое гарманічна вагаецца, за два перыяды ваганняў, калі амплітуда ваганняў роўна A ?
6. Прывядзіце прыклады вагальных сістэм у прыродзе і тэхніцы.

Прыклады рашэння задач

1. Зыходзячы з асцыляграмы вагальнага працэсу, паказанага на малюнку 10, вызначыце амплітуду A , перыяд T і частату ν дадзеных ваганняў.



Мал. 10

Рашэнне

Максімальнае адхіленне пункта, што вагаецца (гл. мал. 10), складае

$$x_{\max} = A = 4,0 \text{ см.}$$

Перыяд ваганняў — гэта час, за які цела выконвае адно ваганне, г. зн. пункт зноў апынецца ў становішчы з каардынатай $x_{\max} = A = 4,0 \text{ см}$. Значыць, $T = 4,0 \text{ с}$.

Частата ваганняў

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad \nu = \frac{1}{4,0 \text{ с}} = 0,25 \text{ с}^{-1} = 0,25 \text{ Гц.}$$

Адказ: $A = 4,0 \text{ см}$, $T = 4,0 \text{ с}$, $\nu = 0,25 \text{ Гц}$.

2. Матэрыяльны пункт выконвае гарманічныя ваганні па законе: $x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi t - \frac{\pi}{3}\right) (\text{м})$. Вызначыце амплітуду A , частату ν , перыяд T ваганняў, каардынату x пункта ў момант часу $t_1 = 5,0 \text{ с}$.

Дадзена:

$$x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi t - \frac{\pi}{3}\right) (\text{м})$$

$$t_1 = 5,0 \text{ с}$$

$$A - ? \quad T - ? \quad \nu - ?$$

Рашэнне

Каардыната пункта, што выконвае гарманічныя ваганні, вызначаецца суадносінай:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) (\text{м}).$$

Тады з умовы задачы знаходзім, што амплітуда $A = 0,40$ м, частата

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \nu = \frac{8\pi \text{ рад}}{2\pi \text{ рад} \cdot \text{с}} = 4,0 \text{ Гц},$$

перыяд

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad T = \frac{1}{4,0 \text{ с}^{-1}} = 0,25 \text{ с}.$$

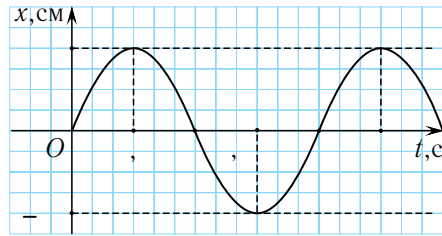
Каардыната пункта x пры $t_1 = 5,0$ с роўна

$$x(t) = 0,40 \cos\left(8\pi \cdot 5,0 - \frac{\pi}{3}\right) (\text{м}) = 0,20 \text{ м}.$$

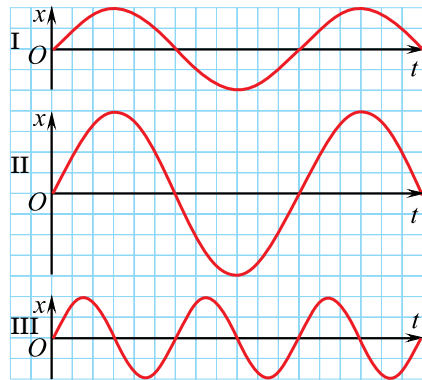
Адказ: $A = 0,40$ м, $\nu = 4,0$ Гц, $T = 0,25$ с, $x = 0,20$ м.

Практыкаванне 1

1. Зыходзячы з асцылаграмы вагальнага працэсу, паказанага на малюнку 11, вызначыце амплітуду A , перыяд T і частату ν дадзеных ваганняў.
2. У чым заключаюцца адрозненні паказаных на малюнку 12 трох вагальных працэсаў?
3. Вызначыце шлях, пройдзены матэрыяльным пунктам, які вагаецца з частатой $\nu = 500$ Гц, за прамежак часу $\Delta t = 1,5$ с, калі амплітуда ваганняў $A = 5,0$ мм.
4. Матэрыяльны пункт за прамежак часу $\Delta t = 1,0$ мін выканаў $N = 180$ ваганняў. Вызначыце перыяд T , частату ν і цыклічную частату ω ваганняў.
5. Цела вагаецца з амплітудай $A = 20$ см і перыядам $T = 1,0$ с. Запішыце кінематычны закон яго руху, калі ў пачатковы момант часу $t = 0$ с адхіленне маятніка максімальнае. Пабудуйце графік залежнасці $x(t)$.
6. Вымераўшы пульс, вызначыце частату ν ваганняў (біцця) сэрца ў сябе, а



Мал. 11



Мал. 12. Графікі вагальных працэсаў

таксама ў родных, напрыклад у бацькі, маці, брата, сястры, дзядулі, бабулі. Праверце, ці адпавядае яна норме (гл. табл. 2).

Табліца 2. **Нормы пульсу па ўзростах**

Узрост (гады)	Дапушчальныя значэнні колькасці ўдараў за мінуту
4—6	86—126
6—8	70—118
8—10	68—108
10—12	60—100
12—15	55—95
15—50	60—80
50—60	64—84
60—80	69—89



§1-1

§ 2. Спружынны і матэматычны маятнікі

- Груз, падвешаны на нітцы, які вагаецца ў полі цяжару Зямлі, а таксама груз, прымацаваны да пружыны, — прыклады найбольш простых механічных вагальных сістэм. Разгледзім фізічныя працэсы, якія адбываюцца ў такіх сістэмах.



Сукупнасць некалькіх цел утвараюць механічную сістэму. Целы, якія не ўваходзяць у сістэму, называюцца знешнімі.

Другі закон Ньютана (асноўны закон дынамікі): паскарэнне, якое набывае цела пад дзеяннем прыкладзеных да яго сіл, адваротна прапарцыянальна масе цела, накіравана па выніковай гэтых сіл і прама прапарцыянальна яе модулю:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N}{m}.$$

Закон Гука: пры пругкіх дэфармацыях сціскання і расцяжэння модуль сілы пругкасці прама прапарцыянальна модулю змянення даўжыні цела:

$$F_{\text{пр}} = k|l - l_0| = k|\Delta l|,$$

дзе k — жорсткасць цела, l_0 — даўжыня недэфармаванага цела, l — даўжыня дэфармаванага цела. Напрамак сілы пругкасці заўсёды процілеглы напрамку зруху пры дэфармацыі.

Якія ўмовы неабходны для ўзнікнення ваганняў?

Вынікі доследаў паказваюць, што для ўзнікнення і існавання механічных ваганняў цэла першапачаткова неабходна прывесці ў рух. Гэта можна зрабіць, адхіліўшы яго ад становішча раўнавагі ці надаўшы яму пачатковую скорасць пасродкам штуршка. Гэтым адхіленнем ці штуршком вызначаецца амплітуда ваганняў. Акрамя таго, пры вывядзенні цэла са становішча раўнавагі ў вагальнай сістэме павінна ўзнікаць выніковая сіла, якая імкнецца вярнуць цэла ў становішча раўнавагі.

Найпрасцейшая вагальная сістэма, якая складаецца з цэла з прымацаванай да яго спружынай, што злучае цэла і апору, называецца **спружынным маятнікам**. Спружына можа размяшчацца як гарызантальна (*гарызантальны спружынны маятнік*), так і вертыкальна (*вертыкальны спружынны маятнік*).

Разгледзім ваганні **гарызантальнага спружыннага маятніка**.

Няхай цэла масай m , што ляжыць на гладкай гарызантальнай паверхні, прымацавана да свабоднага канца бязважкай спружыны жорсткасцю k (мал. 13, а). Другі канец спружыны прымацаваны да нерухомай апоры.

Выведзем цэла са становішча раўнавагі, зрушыўшы яго, напрыклад, управа на адлегласць x (гл. мал. 13, б). Пры гэтым згодна з законам Гука ўзнікне сіла пругкасці $\vec{F}_{\text{пр}}$, прыкладзеная да цэла і накіраваная ўлева.

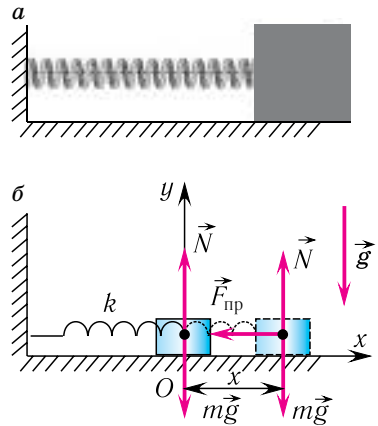
Згодна з другім законам Ньютана будзе выконвацца роўнасць:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} + \vec{N}. \quad (1)$$

З улікам закона Гука з (1) атрымліваем ураўненне для праекцый велічынь на вось Ox (гл. мал. 13, б):

$$ma_x = -kx. \quad (2)$$

Згодна з (2) паскарэнне цэла масай m прапарцыянальна дзеючай сіле і накіравана да становішча раўнавагі. Пры гэтым узнікаюць ваганні цэла. Кожныя паўперыяды напрамак руху змяняецца на процілеглы. Зрух



Мал. 13. а — гарызантальны спружынны маятнік; б — сілы, што дзейнічаюць на яго

грузу адбываецца то ўправа, то ўлева адносна становішча раўнавагі, г. зн. ён мяняе знак. Такім чынам, і праекцыя сілы згодна з (2) таксама мяняе знак.

Перапішам атрыманую суадносіну (2) у выглядзе:

$$a_x + \frac{k}{m}x = 0. \quad (3)$$

Ураўненне (3) называецца **ўраўненнем гарманічных ваганняў** спружыннага маятніка.

Такім чынам, **неабходнай умовай узнікнення гарманічных ваганняў** з'яўляецца дзеянне вяртальнай сілы, накіраванай да становішча раўнавагі і прама прапарцыянальнай зруху цела ад становішча раўнавагі. Гэта вяртальная сіла заўсёды накіравана да становішча раўнавагі, аб чым «гаворыць» мінус ва ўраўненні (2).

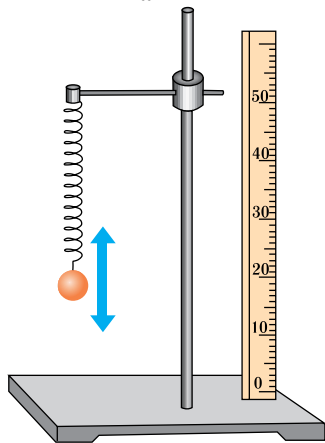
У становішчы раўнавагі вяртальная сіла роўна нулю ($F = 0$), паколькі $x = 0$. Таму калі ў гэтым становішчы цела, што вагаецца, спыніць, то ваганні знікнуць.

Разлікі паказваюць, а вынікі эксперыментаў пацвярджаюць, што пры апісаных умовах цела будзе выконваць ваганні з перыядам:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4)$$

З улікам таго, што перыяд звязаны з цыклічнай частатой суадносінай $T = \frac{2\pi}{\omega}$, знаходзім:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$



Мал. 14. Вертыкальны спружынны маятнік

З формул (4) і (5) вынікае, што перыяд і частата гарманічных ваганняў спружыннага маятніка вызначаюцца масай груза m і жорсткасцю спружыны k і не залежаць ад амплітуды яго ваганняў.

Адзначым, што перыяд і цыклічная частата ваганняў **вертыкальнага спружыннага маятніка** (мал. 14) таксама вызначаюцца па формулах (4) і (5).

Адной з найбольш распаўсюджаных вагальных сістэм з'яўляецца **матэматычны маятнік**. **Матэматычным маятнікам** называецца невялікае цела масай m , падвешанае на бязважкай

нерасцяжной нітцы даўжынёй l , якое знаходзіцца ў полі сілы цяжару (мал. 15).

Разгледзім ваганні матэматычнага маятніка.

Адхіленне маятніка ад становішча раўнавагі будзем характарызаваць вуглом α (мал. 16), які ўтварае нітка з вертыкаллю. Пасля адхілення маятніка ад становішча раўнавагі на яго дзейнічаюць дзве сілы: накіраваная вертыкальна ўніз сіла цяжару $m\vec{g}$ і накіраваная ўздоўж ніткі сіла пругкасці $\vec{F}_{\text{пр}}$. Пад дзеяннем гэтых сіл цела рухаецца паскорана да становішча раўнавагі (пункт B). Прайшоўшы пункт B , цела працягвае рухацца, але яго скорасць паступова памяншаецца, ператвараючыся ў нуль у пункце, сіметрычным пункту A адносна вертыкалі. Пасля гэтага яно пачынае рухацца назад да пункта B .

Згодна з другім законам Ньютана для руху маятніка можам запісаць:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{пр}} = m\vec{a}. \quad (6)$$

У праекцыях на выбраныя восі каардынат Ox і Oy (гл. мал. 16) атрымліваем:

$$-F_{\text{пр}} \sin \alpha = ma_x, \quad (7)$$

$$-mg + F_{\text{пр}} \cos \alpha = ma_y. \quad (8)$$

Паколькі пры малых вуглах адхілення даўжыня дугі $AB \approx x$, то з $\triangle AOD$ знаходзім:

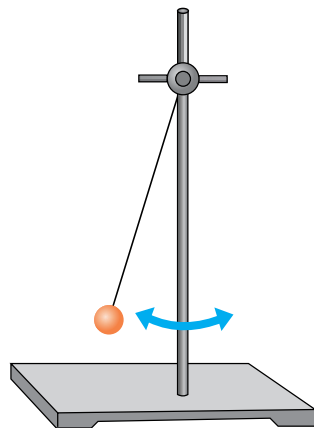
$$\sin \alpha = \frac{AC}{AD} = \frac{x}{l},$$

дзе x — адхіленне маятніка ад становішча раўнавагі, l — даўжыня маятніка.

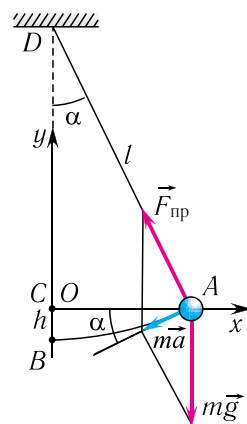
Падставіўшы выраз для сінуса ў (7), атрымваем:

$$-F_{\text{пр}} \sin \alpha \approx -F_{\text{пр}} \frac{x}{l} = ma_x. \quad (9)$$

Такім чынам, сілай, якая вяртае маятнік да ўстойлівага становішча раўнавагі пры ваганнях, з'яўляецца раўнадзейная сіла пругкасці яго ніткі і цяжару.



Мал. 15. Матэматычны маятнік



Мал. 16. Сілы, што дзейнічаюць на матэматычны маятнік

Пры малых вуглах адхілення маятніка праекцыя вектара паскарэння $a_y \ll g$ і яе можна не ўлічваць, а $\cos \alpha \approx 1$, тады з ураўнення (8) вынікае $F_{\text{пр}} \approx mg$. Значыць, ураўненне руху маятніка ўздоўж восі Ox запішацца ў выглядзе:

$$ma_x = -\frac{mg}{l}x,$$

дзе a_x — праекцыя паскарэння, якое надаецца грузу маятніка сілай пругкасці ниткі.

Такім чынам атрымліваем ураўненне ваганняў матэматычнага маятніка:

$$a_x + \frac{g}{l}x = 0. \quad (10)$$

Параўнаўшы суадносіны (10), (3) і (5), лёгка атрымаць формулу для цыклічнай частаты матэматычнага маятніка ў полі цяжару Зямлі:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (11)$$

Перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка $T = \frac{2\pi}{\omega}$ у полі цяжару Зямлі вызначаецца па **формуле Гюйгенса**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (12)$$

Выкарыстаўшы суадносіны (4) і (11), ураўненні ваганняў спружынага маятніка $a_x + \frac{k}{m}x = 0$ і матэматычнага маятніка $a_x + \frac{g}{l}x = 0$ можна запісаць у аднолькавым выглядзе:

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0. \quad (13)$$

Такім чынам, залежнасці каардынат ад часу $x(t)$, якія апісваюцца ўраўненнямі (5) і (6) з § 1, задавальняюць ураўненне (13), якое называецца ўраўненнем гарманічных ваганняў.

Як бачна з формул (11), (12), перыяд і цыклічная частата малых ваганняў матэматычнага маятніка не залежаць ад масы маятніка і амплітуды яго ваганняў, а вызначаюцца толькі яго даўжынёй і паскарэннем свабоднага падзення.



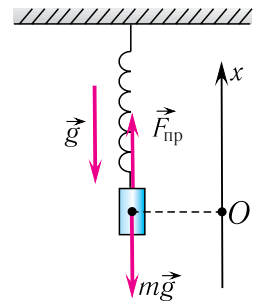
► Адным з найважнейшых дасягненняў Хрысціяна Гюйгенса было вынаходства гадзінніка з маятнікам. Ён запатэнтаваў сваё вынаходства 16 ліпеня 1657 г. У 1673 г. пабачыла свет яго праца «Маятнікавы гадзіннік», у якой былі выкладзены тэарэтычныя асновы яго вынаходства. Менавіта пастаянства перыяду (частаты) ваганняў маятніка дазволіла выкарыстаць яго для стварэння гадзінніка.



1. Які маятнік называюць спружынным? Запішыце кінематычны закон руху спружыннага маятніка.
2. Па якой формуле вызначаецца цыклічная частата ваганняў спружыннага маятніка? Перыяд яго ваганняў?
3. Ці зменіцца перыяд ваганняў спружыннага маятніка, калі яго «перанесці» з паверхні Зямлі на паверхню Месяца? Прывесці ў стан бязважкасці?
4. Які маятнік называюць матэматычным? Запішыце кінематычны закон руху матэматычнага маятніка.
5. Як накіравана раўнадзейная сіл, прыкладзеных да грузу маятніка, у моманты, калі ён знаходзіцца ў крайніх становішчах? Калі праходзіць праз становішча раўнавагі?
6. Маятнікавы гадзіннік спяшаецца. Як трэба змяніць даўжыню падвеса, каб ён ішоў дакладна?
7. Якім чынам, выкарыстаўшы матэматычны маятнік, можна вызначыць паскарэнне свабоднага падзення ў дадзеным месцы?
8. Ці ўплывае змяненне тэмпературы на дакладнасць ходу маятнікавага гадзінніка?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце цыклічную частату ω і перыяд ваганняў T цела масай $m = 500$ г, прымацаванага да вертыкальнай спружыны (мал. 17). Вядома, што ў стане спакою цела расцягвае спружыну на адлегласць $x_0 = 10$ мм і для ўзбуджэння ваганняў яго зрушваюць уніз на адлегласць $x = 30$ мм і адпускаюць.



Мал. 17

Дадзена:

$$\begin{aligned} m &= 500 \text{ г} = 0,500 \text{ кг} \\ x &= 30 \text{ мм} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ x_0 &= 10 \text{ мм} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} \end{aligned}$$

ω — ? T — ?

Рашэнне

Цыклічная частата ваганняў вертыкальнага спружыннага маятніка, таксама як і гарызантальнага, вызначаецца па формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Знайдемо жорсткість k пружини. З умови раціоналізації ціла виникає:

$$\vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} = \vec{0}.$$

За законом Гука $\vec{F}$ спрямований на вісь Ox маємо:

$$F_{\text{пр}x} = -k(-x_0).$$

Тоді $\vec{F}$ спрямований на вісь Ox умова раціоналізації записується:

$$mg = kx_0, \quad k = \frac{mg}{x_0}.$$

Адже для циклічної частоти ω атримуємо:

$$\omega = \sqrt{\frac{mg}{x_0 m}} = \sqrt{\frac{g}{x_0}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}} = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Період вагання T знаходимо з співвідношення:

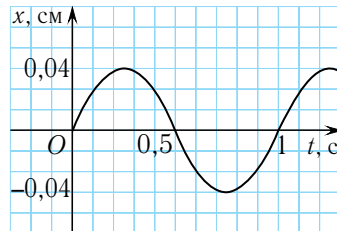
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{x_0}{g}}, \quad T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} = 0,20 \text{ с}.$$

Адже: $\omega = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad T = 0,20 \text{ с}.$



Практикування 2

1. Визначте період T і частоту ν вагання ν грузу масою $m = 200 \text{ г}$, підвешаного на пружині жорсткістю $k = 0,15 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.
2. Визначте довжину l математичного маятника каля поверхні Землі, калі частота його вагання $\nu = 1,0 \text{ Гц}$.
3. Визначте жорсткість k пружини маятника масою $m = 400 \text{ г}$, які виконують вагання, показані на малюнку 18.
4. Груз, підвешаний до пружини, викликає його падіння на величину Δl . Визначте Δl пружини, калі циклічна частота вертикальних вагання такої системи $\omega = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.



Мал. 18

5. Два ціли з аднолькавими масами підвешані до двох аднолькавих пружин. Ціли зрушують уніз: одно на відстань $x_1 = 10 \text{ см}$, дру-

гое — на $x_2 = 20$ см ад становішча раўнавагі, затым адначасова адпускаяць. Якое з іх першым пройдзе становішча раўнавагі?

6. Адзін матэматычны маятнік выканаў за некаторы час $N_1 = 20$ ваганняў, а другі за той жа час выканаў $N_2 = 16$ ваганняў. Вызначыце даўжыню l_2 другога маятніка, калі вядома, што рознасць даўжынь маятнікаў $\Delta l = 10$ см.
7. Перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка на паверхні Зямлі роўны $T = 0,80$ с. Якім будзе перыяд T_1 яго ваганняў каля паверхні Марса, калі паскарэнне свабоднага падзення $g_m = 0,37g_s$?
8. Вызначыце даўжыню l секунднага маятніка, усталяванага ў Мінску, дзе паскарэнне свабоднага падзення $g = 9,815 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Знайдзіце адносную хібнасць разліку, у якім паскарэнне свабоднага падзення было б прынята роўным $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.



§ 3. Ператварэнні энергіі пры гарманічных ваганнях

- Пры гарманічных ваганнях поўная механічная энергія сістэмы застаецца нязменнай, хоць скорасць грузу і яго зрух непарыўна змяняюцца з цягам часу. Якія ператварэнні энергіі назіраюцца ў сістэме пры гэтым? Як вылічыць кінетычную або патэнцыяльную энергію ў любы момант часу?

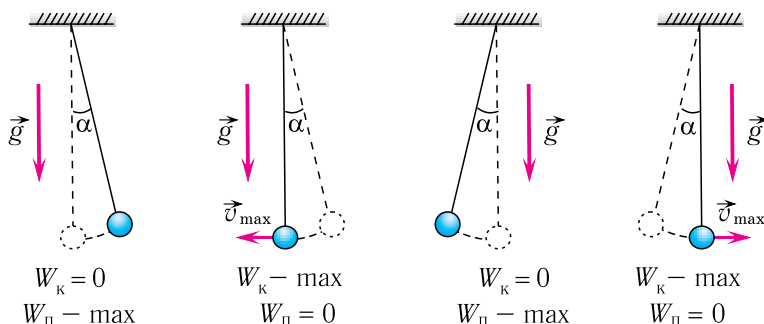


Механічная энергія сістэмы роўна суме яе кінетычнай і патэнцыяльнай энергій. Кінетычнай энергіяй цела валодае з прычыны свайго руху, а патэнцыяльная энергія вызначаецца ўзаемадзеяннем цела з іншымі цэламі ці сілавымі палямі. Механічная энергія замкнутаў сістэмы, у якой не дзейнічаюць сілы трэння (супраціўлення), захоўваецца.

Прывесці ў рух вагальную сістэму можна або шляхам адхілення яе ад становішча раўнавагі, або надаваннем цэлу пачатковай скорасці (г. зн. пасродкам штуршка). У першым выпадку мы надаём сістэме дадатковую *патэнцыяльную* энергію, а ў другім — дадатковую *кінетычную* энергію.

Калі сілу трэння можна не ўлічваць, то пры ваганнях механічная энергія сістэмы захоўваецца. Пры гэтых умовах для дадзенай сістэмы выконваецца закон захавання механічнай энергіі:

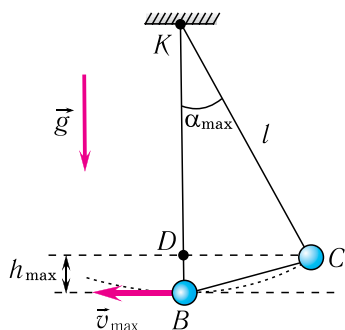
$$W = W_{\kappa} + W_{\Pi} = \text{const.}$$



Мал. 19. Пераўтварэнні энергіі пры ваганнях матэматычнага маятніка

Разгледзім пераўтварэнні энергіі пры ваганнях матэматычнага маятніка. Выберам пачатак адліку патэнцыяльнай энергіі такім чынам, каб у становішчы раўнавагі яна была роўна нулю. Пры адхіленні маятніка на вугал $\alpha_{\max}$ (мал. 19, 20), які адпавядае яго максімальнаму зруху ад становішча раўнавагі (цэла ў пункце C), патэнцыяльная энергія маятніка максімальная, а кінетычная энергія роўна нулю:

$$(W_{\text{П}})_{\max} = mgh_{\max}, \quad W_{\text{К}} = 0.$$



Мал. 20. Вызначэнне

 $v_{\max}$ і $h_{\max}$

Паколькі ў момант праходжання становішча раўнавагі (цэла ў пункце B) патэнцыяльная энергія маятніка роўна нулю $W_{\text{П}} = 0$, то з закону захавання механічнай энергіі вынікае (гл. мал. 20), што $(W_{\text{К}})_{\text{B}} = (W_{\text{П}})_{\text{C}}$, г. зн. што кінетычная энергія маятніка (а значыць, і скорасць) у гэты момант будзе максімальная:

$$(W_{\text{К}})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad W_{\text{П}} = 0.$$

Такім чынам, у становішчы раўнавагі патэнцыяльная энергія маятніка цалкам пераходзіць у кінетычную, а ў становішчах максімальнага адхілення — кінетычная энергія цалкам пераходзіць у патэнцыяльную.

Прыраўнаваўшы поўныя механічныя энергіі маятніка ў пунктах C і B, атрымаем:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh_{\max}. \quad (1)$$

Адсюль знойдзем модуль максімальнай скорасці маятніка:

$$v_{\max} = \sqrt{2gh_{\max}}. \quad (2)$$

У любым прамежкавым становішчы

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const} = (W_{\kappa})_{\max} = (W_{\Pi})_{\max} = W_{\text{мех}}.$$

Пакажам, што аналагічныя ператварэнні энергіі маюць месца і для спружыннага маятніка (мал. 21).

У крайніх пунктах, калі $x = \pm A$ і скорасць маятніка $v = 0$, кінетычная энергія грузу цалкам пераходзіць у патэнцыяльную энергію дэфармаванай спружыны (гл. мал. 21, а, г):

$$(W_{\Pi})_{\max} = \frac{kA^2}{2}.$$

Такім чынам, механічная энергія маятніка прапарцыянальна квадрату амплітуды яго ваганняў.

У становішчы раўнавагі, калі $x = 0$, уся энергія маятніка пераходзіць у кінетычную энергію грузу (гл. мал. 21, б):

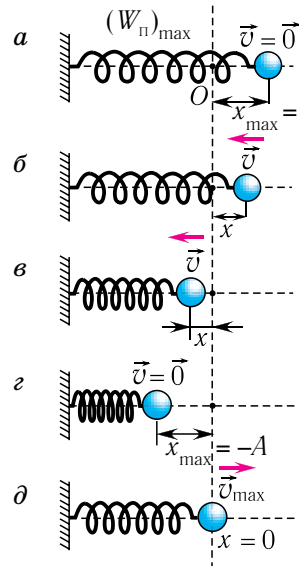
$$(W_{\kappa})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

дзе $v_{\max}$ — модуль максімальнай скорасці грузу пры ваганнях.

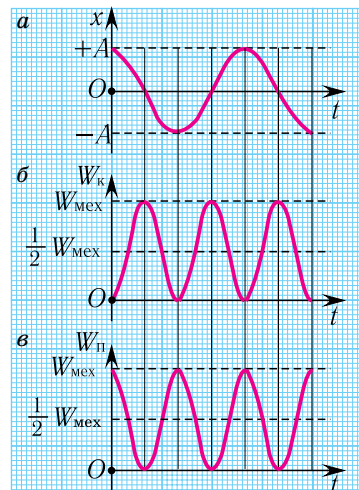
У прамежкавых пунктах поўная энергія:

$$W_{\text{мех}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = (W_{\Pi})_{\max} = (W_{\kappa})_{\max}.$$

Пры адсутнасці ў сістэме страт энергіі працэс ваганняў суправаджаецца толькі пераходам патэнцыяльнай энергіі ў кінетычную і назад. Такія ператварэнні энергіі адбываюцца з удвая большай частатой (мал. 22, а, б), чым самі ваганні. Сапраўды, двойчы за перыяд механічная энергія будзе цалкам ператварацца



Мал. 21. Ператварэнні энергіі пры ваганнях спружыннага маятніка



Мал. 22. Залежнасці ад часу: а — зрух маятніка; б — яго кінетычнай і патэнцыяльнай энергіі; в — яго патэнцыяльнай энергіі

ца ў патэнцыяльную (у двух крайніх становішчах) і двойчы за перыяд — у кінетычную (пры праходжанні праз становішча раўнавагі) (мал. 22, в).



1. Якой энергіяй валодае матэматычны маятнік пры праходжанні становішча раўнавагі?
2. Якой энергіяй валодае спружынны маятнік пры найбольшым зруху ад становішча раўнавагі?
3. Чым адрозніваюцца патэнцыяльныя энергіі матэматычнага і спружынага маятнікаў?
4. Як змяняецца энергія маятніка пры ваганнях?
5. Запішыце формулы для вызначэння механічнай энергіі цела, што вагаецца, пры праходжанні ім становішча раўнавагі і пры максімальным зруху з яго.

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце поўную механічную энергію W ваганняў груза масай $m = 100$ г на спружыне, калі ён выконвае гарманічныя ваганні з цыклічнай частотой $\omega = 12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ і амплітудай $A = 4,0$ см.

Дадзена:

$$m = 100 \text{ г} = 0,10 \text{ кг}$$

$$\omega = 12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$A = 4,0 \text{ см} = 0,040 \text{ м}$$

W — ?

Рашэнне

Энергія ваганняў груза:

$$W = \frac{kA^2}{2},$$

дзе k — жорсткасць спружыны.

Паколькі цыклічная частата ваганняў груза вызначаецца

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ то}$$

$$k = m\omega^2.$$

Канчаткова,

$$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}, \quad W = \frac{0,10 \text{ кг} \cdot \left(12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)^2 \cdot (0,040 \text{ м})^2}{2} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 12 \text{ мДж}.$$

Адказ: $W = 12 \text{ мДж}$.



Практыкаванне 3

1. У якіх пунктах траекторыі пры ваганнях матэматычнага маятніка максімальная энергія:
 - а) кінетычная W_k ;
 - б) патэнцыяльная W_p ? Чаму яна роўна?
2. Матэматычны маятнік масай $m = 100$ г пры праходжанні становішча раўнавагі мае скорасць, модуль якой $v = 4,0 \frac{м}{с}$. Вызначыце:
 - а) поўную энергію $W_{мех}$ маятніка;
 - б) максімальную вышыню h_{max} , на якую паднімаецца маятнік.
3. Матэматычны маятнік масай $m = 100$ г выводзяць са становішча раўнавагі, паднімаючы яго на вышыню $h = 10$ см над пачатковым узроўнем. Вызначыце:
 - а) змяненне патэнцыяльнай энергіі маятніка ΔW_p пры яго адхіленні ад становішча раўнавагі;
 - б) яго максімальную кінетычную энергію W_{kmax} .
4. Цела выконвае гарманічныя ваганні. Вызначыце адносіну кінетычнай энергіі да яе патэнцыяльнай энергіі для момантаў часу, калі зрух цела ад становішча раўнавагі роўны:
 - а) $x = \frac{A}{2}$;
 - б) $x = \frac{3A}{4}$;
 - в) $x = A$.
5. Груз масай $m = 250$ г выконвае гарманічныя ваганні на sprужыне жорсткасцю $k = 80 \frac{Н}{м}$ з амплітудай $A = 3,6$ см. Вызначыце поўную механічную энергію ваганняў W , патэнцыяльную W_p і кінетычную W_k энергіі ў момант часу, калі зрух груза ад становішча раўнавагі $x = 2,2$ см. Патэнцыяльную энергію ў становішчы раўнавагі лічыць роўнай нулю.
6. Груз масай $m = 100$ г, які знаходзіцца на гладкай гарызантальнай паверхні, замацаваны на sprужыне жорсткасцю $k = 100 \frac{Н}{м}$, прымацаванай да апоры. Яго зрушваюць са становішча раўнавагі на адлегласць $x_1 = 5,0$ см і надаюць яму ў напрамку ад становішча раўнавагі скорасць, модуль якой $v_1 = 1,0 \frac{м}{с}$. Чаму роўны патэнцыяльная W_p і кінетычная W_k энергіі груза ў гэты момант часу? Запішыце кінэматычны закон яго руху.

7. Спружынны маятнік, які знаходзіцца на гладкай гарызантальнай паверхні, вывелі са становішча раўнавагі і без штуршка адпусцілі. Праз якую частку n перыяду T кінетычная энергія прымацаванага да спружыны цела будзе роўна патэнцыяльнай энергіі $W_{\text{п}}$ дэфармаванай спружыны?
8. Вызначыце поўную механічную энергію $W_{\text{мех}}$ гарманічных ваганняў матэрыяльнага пункта, калі вядомы яго маса m , частата ν і амплітуда A ваганняў.



§ 4. Свабодныя і вымушаныя ваганні. Рэзананс

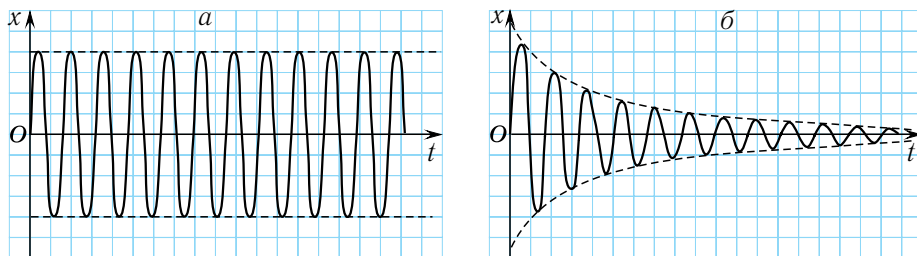
Ваганні грузу, падвешанага на нітцы, з цягам часу затухаюць, паколькі ў сістэме дзейнічаюць сілы трэння і супраціўлення паветра. Пры якіх умовах механічныя ваганні не затухаюць? Ці можна дабіцца павелічэння амплітуды ваганняў, выкарыстаўшы знешняе ўздзеянне?



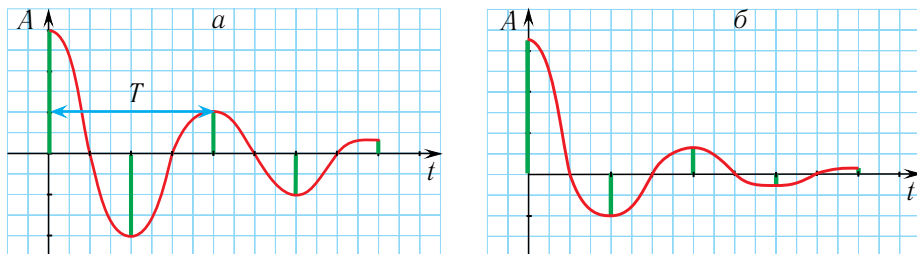
Сілы ўзаемадзеяння цёл сістэмы называюць унутранымі. Целы, якія не ўваходзяць у сістэму, называюцца знешнімі цэламі. Сілы, якія дзейнічаюць на целы сістэмы з боку знешніх цёл, называюць знешнімі.

Ваганні, што адбываюцца з пастаяннай у часе амплітудай, называюцца **незатухаючымі ваганнямі** (мал. 23, *а*). Незатухаючыя ваганні, якія выконвае сістэма каля становішча ўстойлівай раўнавагі пад дзеяннем унутраных сіл пасля таго, як яна была выведзена са стану раўнавагі і пакінута сам-насам, называюцца **свабоднымі (уласнымі) ваганнямі**.

Свабодныя ваганні (пры адсутнасці трэння) адбываюцца са строга вызначанай частатой ω_0 , якая называецца **частатой свабодных (уласных) ваганняў сістэмы**. Гэта частата залежыць толькі ад параметраў



Мал. 23. Механічныя ваганні: *а* — незатухаючыя; *б* — затухаючыя



Мал. 24. Затухаючыя механічныя ваганні (каэфіцыенты трэння (супраціўлення) $\mu_a < \mu_6$): *a* — малая сіла трэння; *б* — вялікая сіла трэння

сістэмы. Прыкладамі такіх ваганняў могуць служыць ваганні матэматычнага і sprужыннага маятнікаў, якія адбываюцца пры адсутнасці сіл трэння.

Амплітуда свабодных ваганняў вызначаецца пачатковымі ўмовамі, г. зн. тым пачатковым адхіленнем або штуршком, які прыводзіць у рух маятнік ці груз на sprужыне. Свабодныя ваганні з'яўляюцца самым простым відам ваганняў.

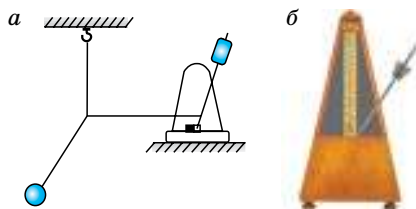
У любой рэальнай вагальнай сістэме заўсёды прысутнічаюць сілы трэння (супраціўлення), таму механічная энергія сістэмы з цягам часу памяншаецца, пераходзячы ва ўнутраную энергію. Страты механічнай энергіі прыводзяць да памяншэння амплітуды ваганняў.

Ваганні, амплітуда якіх памяншаецца з цягам часу з-за страт энергіі вагальнай сістэмай, называюцца **затухаючымі ваганнямі** (мал. 23, б).

Пры малых стратах энергіі ваганні можна лічыць перыядычнымі і карыстацца такімі паняццямі, як перыяд і частата ваганняў, лічачы перыядам прамежак часу паміж двума паслядоўнымі максімумамі зруху $x(t)$ (мал. 24, а).

Ваганні ў любой рэальнай сістэме рана ці позна затухаюць. Каб ваганні не затухалі, неабходна ўздзеянне знешняй сілы. Аднак не ўсякая знешняя сіла прымушае сістэму рухацца перыядычна. Напрыклад, немагчыма разгайдаць арэлі, калі ўздзейнічаць на іх пастаяннай сілай.

Правядзём наступны эксперымент. Злучым матэматычны маятнік з метраномам тонкім лёгкім стрыжнем (мал. 25, а). Змяняючы частату ваганняў метранома (мал. 25, б), дасягнем павелічэння



Мал. 25. *a* — назіранне з'явы рэзанансу ў сістэме матэматычны маятнік — метраном; *б* — знешні выгляд метранома

амплітуды ваганняў матэматычнага маятніка. Дослед паказвае, што яго амплітуда будзе максімальнай пры супадзенні ўласнай частаты ваганняў маятніка і метранома.

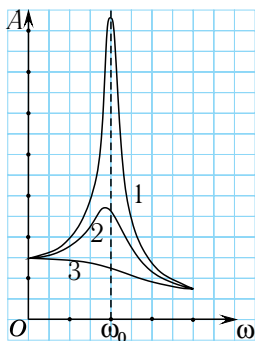
Ваганні цел пад дзеяннем знешняй перыядычнай сілы называюцца **вымушанымі**, а сіла — **вымушаючай**. У выпадку дзеяння гарманічнай вымушаючай сілы, напрыклад $F(t) = F_0 \sin \omega t$ або $F(t) = F_0 \cos \omega t$, спачатку назіраецца даволі складаны рух цела. Праз некаторы час пасля пачатку дзеяння вымушаючай сілы ваганні пры наяўнасці трэння набываюць стацыянарны характар і не залежаць ад пачатковых умоў. Частата атрыманых вымушаных ваганняў заўсёды роўна частаце вымушаючай сілы.

Амплітуда і энергія вымушаных ваганняў залежаць ад таго, наколькі адрозніваюцца частата вымушаючай сілы ω і частата ўласных ваганняў ω_0 , а таксама ад велічыні трэння (супраціўлення) у сістэме.

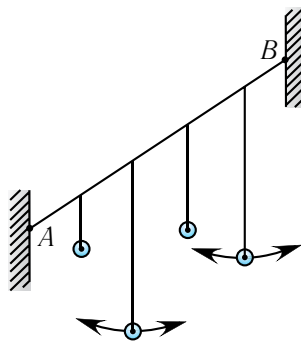
Пры вымушаных ваганнях магчыма з'ява, якую называюць *рэзанансам* (ад лац. *resono* — адгукацца, адклікацца).

Рэзананс — гэта з'ява рэзкага нарастання амплітуды вымушаных ваганняў пры набліжэнні частаты ω знешняй сілы, што дзейнічае на вагальную сістэму, да частаты ω_0 уласных ваганняў сістэмы ($\omega \rightarrow \omega_0$) (мал. 26).

Падвесім на пругкай нітцы (AB) чатыры матэматычныя маятнікі з аднолькавымі грузамі, тры з якіх маюць розныя даўжыні, а даўжыня чацвёртага роўна даўжыні другога (мал. 27). Спачатку паглядзім, што будзе з маятнікамі, калі разгайдаць першы ці трэці маятнік. Назіранні



Мал. 26. Рэзананс:
каэфіцыенты трэння
(супраціўлення) $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$



Мал. 27. Назіранне
з'явы рэзанансу
ў сістэме маятнікаў

паказваюць, што праз некаторы час пачнуць гайдацца і астатнія маятнікі. Але амплітуда іх ваганняў будзе малая. А вось калі разгайдаць другі маятнік, то амплітуда ваганняў чацвёртага будзе нарастаць і дасягне досыць вялікага значэння.

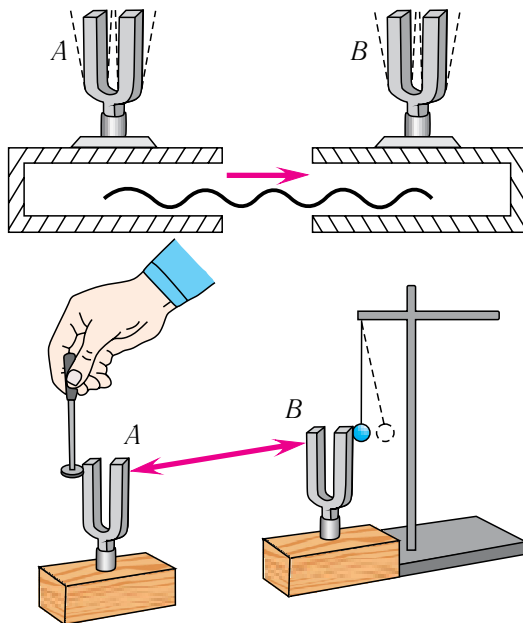
Гэта адбываецца таму, што частата знешняй сілы, якая дзейнічае на чацвёрты маятнік, супадае з частотой яго ўласных ваганняў (паколькі даўжыні другога і чацвёртага маятнікаў роўныя). Мы назіралі з'яву рэзанансу.

Падкрэслім, што пры рэзанансе ствараюцца аптымальныя ўмовы для перадачы энергіі ад знешняй крыніцы ваганняў да вагальнай сістэмы.

Так пры ўзбуджэнні камертона *A* (мал. 28) такі ж камертон *B* праз некаторы час таксама пачынае актыўна гучаць. Пры гэтым зыходнай знешняй сілай з'яўляецца ўдар малатком па першым камертоне, а знешняй сілай, якая дзейнічае на другі камертон, — сіла ціску паветра пры ваганнях.

Успомнім таксама працэс разгойдвання на арэлях. Калі іх разгойдаць з вельмі малой ці вельмі вялікай частотой, то эфект будзе вельмі малы. Разгойдванне будзе найбольш эфектыўным, калі падабраць частату штуршкоў, роўную частаце ўласных ваганняў арэляў.

Большасць будынкаў і механізмаў здольна выконваць свабодныя ваганні. Пры знешніх перыядычных уздзеяннях з частотой, блізкай да рэзананснай, у іх могуць узбуджацца ваганні вялікай амплітуды, што можа прывесці да разбуральных наступстваў. У сувязі з гэтым, напрыклад, пры праходжанні па мастах вайсковых частак салдатам даюць каманду ісці вольным крокам (не ў нагу). Па той жа прычыне цяжнікі рухаюцца па мастах або вельмі павольна, або на максімальнай скорасці.



Мал. 28. Назіранне з'явы рэзанансу ў двух аднолькавых камертонах *A* і *B*

► У 1850 г. ланцуговы мост праз раку Мэн паблізу ад г. Анжэр (Францыя) разбурыўся падчас праходжання па ім атрада салдат, паколькі частата іх кроку супала з частатой свабодных ваганняў моста.

7 лістапада 1940 г. моцны парывісты вецер выклікаў рэзанансныя ваганні вісячага Такомскага моста (ЗША), што прывяло да яго разбурэння (мал. 29).

Заўважым, што сучасныя вісячыя масты — гэта ўстойлівыя канструкцыі, якія вытрымліваюць моцныя парывістыя вятры і іншыя нагрузкі дзякуючы новым інжынерным рашэнням.



Мал. 29. Разбураны мост праз раку Такома (ЗША)



1. Якія ваганні называюцца незатухаючымі?
2. Якія ваганні называюцца свабоднымі (уласнымі)?
3. Чаму ваганні рэальнага маятніка затухаюць з цягам часу?
4. Ад чаго залежыць частата ўласных ваганняў?
5. Якія ваганні называюцца вымушанымі? Ад чаго залежыць частата вымушаных ваганняў?
6. Чаму для ўзнікнення ваганняў у сістэме знешняя сіла павінна быць непастаяннай?
7. Што такое рэзананс? Прывядзіце прыклады карыснага і шкоднага ўплыву рэзанансу.
8. Вада ў вядры, што нясе хлопчык, пачала моцна расплёскацца. Чаму расплёскванне можа спыніцца пры змяненні тэмпу хады?



Прыклад рашэння задачы

Вызначыце модуль скорасці v руху цягніка, пры якой матэматычны маятнік, падвешаны ў вагоне, вельмі моцна разгойдваецца. Даўжыня маятніка $l = 11$ см, адлегласць паміж стыкамі рэек $L = 12,5$ м.

Дадзена:

$$l = 11 \text{ см} = 0,11 \text{ м}$$

$$L = 12,5 \text{ м}$$

$$x_0 = 10 \text{ мм} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$v = ?$$

Рашэнне

Маятнік пачынае моцна разгойдвацца, калі частата яго ўласных ваганняў супадае з частатой вымушаючай сілы. Частата вымушаючай сілы супадае з частатой удараў колаў вагона аб стыкі рэек.

Прамежак часу паміж двума паслядоўнымі ўдарамі (перыяд):

$$T = \frac{L}{v}.$$

Частата вымушаючай сілы:

$$v = \frac{1}{T} = \frac{v}{L}. \quad (1)$$

Частата ўласных ваганняў матэматычнага маятніка:

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

З формул (1) і (2) атрымаем:

$$\frac{v}{L} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Адкуль

$$v = \frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}},$$

$$v = \frac{12,5 \text{ м}}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0,11 \text{ м}}} = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Адказ: $v = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Практыкаванне 4

1. Намалюйце графік затухаючых ваганняў грузу на sprужыне, калі амплітуда кожнага наступнага вагання памяншаецца ў $n = 1,5$ раза. Пачатковая амплітуда $A = 30$ мм, працягласць аднаго вагання $T = 0,50$ с.
2. Для чаго ўсе прылады, што вібрыруюць (электрарухавікі, дызельныя ўстаноўкі і г. д.), у вышынних будынках ставяць на спецыяльныя гумавыя або металічныя амартызатары?
3. Пры руху цягніка вагоны адчуваюць перыядычныя ўдары на стыках рэек. Вызначыце скорасць v цягніка, пры якой пасажыры будуць адчуваць найбольш моцнае вертыкальнае разгойдванне вагона, калі даўжыня рэйкі $L = 12,5$ м, а перыяд уласных вертыкальных ваганняў вагона $T = 1,5$ с.
4. Якой павінна быць даўжыня l матэматычнага маятніка, падвешанага ў вагоне, каб ён разгойдваўся найбольш моцна пры руху вагона са скорасцю, модуль якой $v = 67,5 \frac{\text{км}}{\text{г}}$? Адлегласць паміж стыкамі рэек $L = 12,5$ м.



§ 5. Распаўсюджванне ваганняў у пругкім асяроддзі. Падоўжныя і папярочныя хвалі

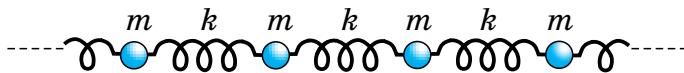


Мал. 30. Хвалі на вадзе

■ Калі кінуць камень у ваду, то ад месца падзення па паверхні вады пачнуць распаўсюджвацца кругавыя хвалі (мал. 30), радыус якіх будзе павялічвацца з цягам часу. Як адбываецца працэс распаўсюджвання ваганняў? Якія ўмовы неабходны для гэтага?

Разгледзім сістэму гарызантальных спружынных маятнікаў, злучаных адзін з адным (мал. 31). Што адбудзецца, калі падзейнічаць на адзін з шарыкаў ланцужка (напрыклад, першы) перыядычнай знешняй сілай, накіраванай уздоўж

ланцужка? Паколькі паміж шарыкамі дзейнічаюць сілы пругкасці, абумоўленыя спружынамі, то ў вагальны рух той жа частаты прыйдуць і ўсе наступныя шарыкі ланцужка. Пачнецца працэс распаўсюджвання ваганняў, прычым ваганні кожнага наступнага шарыка будуць спазненняцца ў параўнанні з ваганнямі папярэдняга. Гэта спазненне звязана з канчатковай скорасцю распаўсюджвання пругкіх дэфармацый уздоўж ланцужка спружын.



Мал. 31. Ланцужок злучаных спружынамі маятнікаў

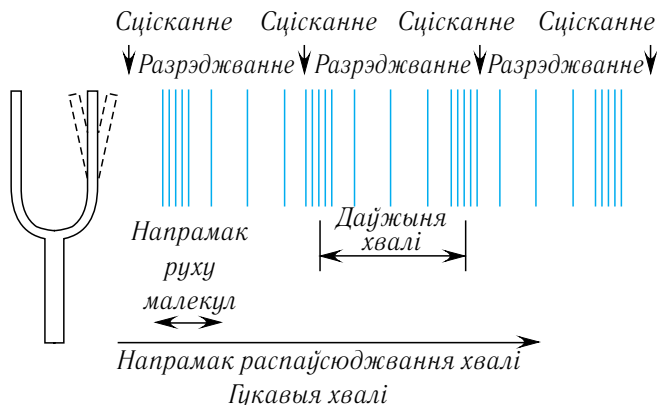
Разгледжаная сістэма (ланцужок шарыкаў, звязаных паміж сабой спружынамі) уяўляе сабой найпрасцейшую (аднамерную) мадэль *пругкага асяроддзя*. Пругкім называецца асяроддзе, часціцы якога звязаны паміж сабой сіламі пругкасці. Прыкладамі пругкіх асяроддзяў з'яўляюцца газ, вадкасць, цвёрдае цела, эластычны матэрыял (гума).

Вынікі эксперыментаў паказваюць, што ваганні, узбуджаныя ў якім-небудзь пункце пругкага асяроддзя, з цягам часу перадаюцца ў яго іншыя пункты. Так ад каменя, кінутага ў спакойную ваду возера, кругамі разыходзяцца хвалі. З-за перыядычных скарачэнняў сэрца ўзнікае біццё пульсу на запясці і да т. п. Пэралічаныя з'явы — прыклады працэсу распаўсюджвання *механічных ваганняў у пругкім асяроддзі*.

Механічнай хваляй называецца працэс распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі, які *суправаджаецца перадачай энергіі* ад аднаго пункта асяроддзя да другога.



Мал. 32. Камертон



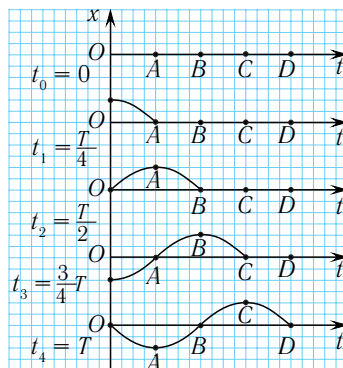
Мал. 33. Утварэнне механічных хваль пры ваганні камертона

► Механічныя хвалі могуць распаўсюджвацца ў газах, вадкасцях, цвёрдых целах, але не могуць распаўсюджвацца ў вакууме.

Крыніцай механічных хваль заўсёды з’яўляецца якое-небудзь цела, што вагаецца. Механізм утварэння хваль можна паказаць наступным чынам. Крыніца ваганняў, напрыклад камертон (мал. 32), уздзеічае на часціцы пругкага асяроддзя, якія датыкаюцца да яго, і прымушае іх выконваць вымушаныя ваганні (мал. 33). Участкі пругкага асяроддзя (паветра) паблізу ад крыніцы дэфармуюцца, і ў іх узнікаюць сілы пругкасці, якія перашкаджаюць дэфармацыі.

Калі часціцы асяроддзя наблізіліся, то пругкія сілы, што ўзнікаюць, іх расштурхваюць, а калі яны аддаліліся адна ад адной, то пругкія сілы іх збліжаюць. Сілы будуць дзейнічаць на ўсё больш аддаленыя ад крыніцы часціцы асяроддзя, паступова прыводзячы іх у вагальны рух. У выніку ваганняў будуць распаўсюджвацца ў асяроддзі ў выглядзе хваль (мал. 34).

Калі крыніца вагаецца гарманічна, то і хваля ў пругкім асяроддзі будзе гарманічнай. Заўважым, што ваганні, выкліканыя ў якімсьці месцы пругкага асяроддзя, распаўсюджваюцца ў ім не імгненна, а з пэўнай скорасцю, якая залежыць ад шчыльнасці і пругкіх уласцівасцей асяроддзя.



Мал. 34. Распаўсюджванне ваганняў у асяроддзі

Падкрэслім, што пры распаўсюджванні хвалі адсутнічае *перанос рэчыва*, паколькі часціцы асяроддзя вагаюцца паблізу ад сваіх фіксаваных становішчаў раўнавагі.

Разгледзім асноўныя характарыстыкі хваль (гл. мал. 34):

амплітуда (A) — модуль максімальнага зруху пунктаў асяроддзя ад становішчаў раўнавагі пры ваганнях;

перыяд (T) — час аднаго вагання (перыяд ваганняў пунктаў асяроддзя роўны перыяду ваганняў крыніцы хвалі):

$$T = \frac{\tau}{N},$$

дзе τ — прамежак часу, на працягу якога выконваецца N ваганняў.

Частата (ν) — лік ваганняў, выконваемых дадзенай сістэмай за адзінку часу:

$$\nu = \frac{N}{\tau},$$

частата хвалі роўна частаце ваганняў крыніцы.

Адзначым, што амплітуда, перыяд і частата для механічных хваль вызначаюцца таксама, як і для ваганняў.

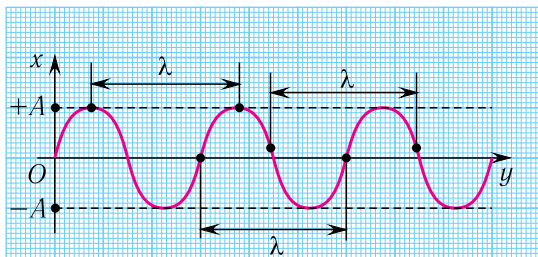
Новымі характарыстыкамі хваль з'яўляюцца (мал. 35):

даўжыня хвалі (λ) — гэта адлегласць, на якую ўзбурэнне распаўсюджваецца за прамежак часу, роўны перыяду ваганняў крыніцы:

$$\lambda = \nu T; \quad (1)$$

скорасць распаўсюджвання хвалі ($\bar{v}$) — скорасць распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі, модуль гэтай скорасці згодна з (1) роўны:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu. \quad (2)$$



Мал. 35. Асноўныя характарыстыкі хвалі

Падкрэслім, што скорасць распаўсюджвання хваль і скорасць вагання часціц — гэта розныя велічыні.

Хвалевае 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**.

Хваля называецца кругавой, калі яе хвалевы фронт з'яўляецца акружнасцю (гл. мал. 30).

Распаўсюджванне хвалі можна назіраць, правёўшы наступны эксперымент: калі адзін канец гумавага шнура, які ляжыць на гладкім гарызантальным сталё, замацаваць і, крыху нацягнуўшы шнур рукой, прывесці яго другі канец у вагальны рух у напрамку, перпендыкулярным да шнура, то па ім пабяжыць хваля.

У адрозненне ад ваганняў, дзе кінетычная і патэнцыяльная энергіі змяняюцца ў проціфазе (гл. мал. 22), у бягучай хвалі ваганні кінетычнай і патэнцыяльнай энергій адбываюцца ў аднолькавай фазе.

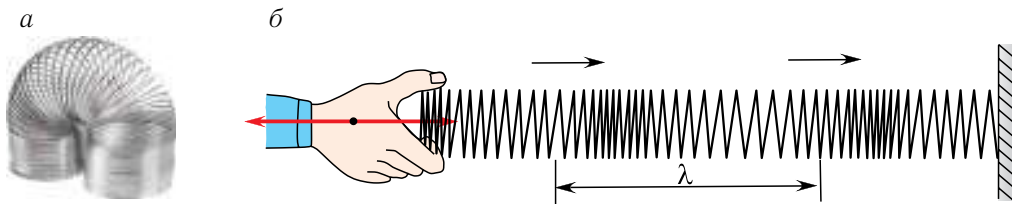
Хваля называецца **падоўжнай**, калі ваганні часціц асяроддзя адбываюцца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хваль. Распаўсюджванне хваль уздоўж ланцужка гарызантальных спружынных маятнікаў (гл. мал. 31) з'яўляецца прыкладам распаўсюджвання падоўжных пругкіх хваль.

Пры гэтым распаўсюджванне хвалі суправаджаецца ўтварэннем згушчэнняў і разрэджванняў уздоўж напрамку яе распаўсюджвання.

Падоўжную хвалю лёгка атрымаць пры дапамозе доўгай «мяккай» спружыны (мал. 36, *а*), што ляжыць на гладкай гарызантальнай паверхні, адзін канец якой замацаваны. Пругкія хвалі ў газах і вадкасцях узнікаюць толькі пры сцісканні або разрэджванні асяроддзя. Таму ў такіх асяроддзях магчыма распаўсюджванне толькі падоўжных хваль.

Лёгкім ударам па свабодным канцы B спружыны мы выклічам з'яўленне хвалі (мал. 36, *б*). Пры гэтым кожны віток спружыны будзе вагацца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі BC . Прыкладамі падоўжных хваль з'яўляюцца гукавыя хвалі ў паветры і вадкасці.

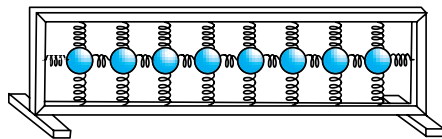
Хваля называецца **папярочнай**, калі часціцы асяроддзя вагаюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі.



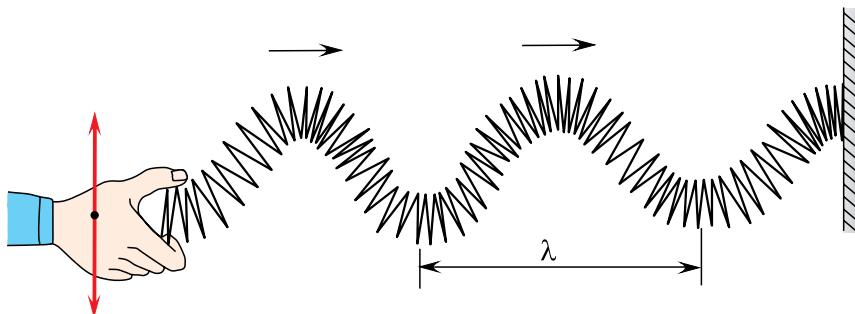
Мал. 36. *а* — «мяккая» спружына; *б* — падоўжная хваля

Папярочная хваля будзе распаўсюджвацца ўздоўж ланцужка спружынных маятнікаў, калі на адзін з іх падзейнічаць перамяшчальныя сілы, накіраваны перпендыкулярна да ланцужка (мал. 37).

Выкарыстаўшы доўгую спружыну, можна таксама прадэманстраваць распаўсюджванне папярочных хваль, калі выконваць ваганні непрымацаванага канца перпендыкулярна да падоўжнай вosi спружыны (мал. 38).



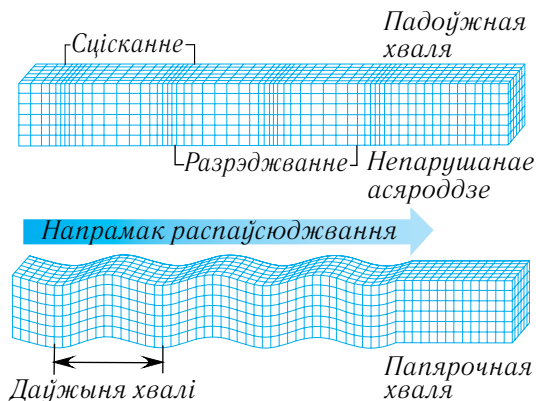
Мал. 37. Прылада для дэманстрацыі падоўжных і папярочных хваль



Мал. 38. Папярочная хваля

У цвёрдых цэлах пругкія хвалі могуць узнікаць таксама і пры зрушэнні або ссоўванні адных слаёў асяроддзя адносна іншых. Таму ў адрозненне ад вадкасцей і газаў у цвёрдых цэлах магчыма распаўсюджванне як падоўжных, так і папярочных хваль.

Азначым, што скорасці гэтых хваль розныя, паколькі для па-



Мал. 39. Падоўжныя і папярочныя хвалі

доўжных хваль іх распаўсюджванне звязана з дэфармацыяй сціскання, а для папярочных — з дэфармацыяй зруху (мал. 39). Пругкія ўласцівасці цел у адносінах да гэтых відаў дэфармацыі неаднолькавыя, і скорасці распаўсюджвання будуць адрознівацца. Напрыклад, папярочныя хвалі ў сталі распаўсюджаюцца са скорасцю, модуль якой $3300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а падоўжныя — $6100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

► Землетрасенні з'яўляюцца крыніцамі сейсмічных хваль, прычым яны могуць быць як падоўжнымі, так і папярочнымі. З прычыны таго што скорасці падоўжных хваль большыя, чым скорасці папярочных, па часе запазнення папярочнай хвалі можна вызначыць адлегласць да ачага землетрасення.

Хвалі могуць распаўсюджвацца не толькі ў асяроддзі, але і ўздоўж мяжы падзелу двух асяроддзяў. Такія хвалі атрымалі назву паверхневых хваль. Прыкладам дадзенага тыпу хваль служаць добра знаёмыя ўсім хвалі на паверхні вады.



1. Што называецца механічнай хваляй?
2. Якімі фізічнымі велічынямі характарызуюцца хвалі?
3. Якая хваля называецца падоўжнай? Папярочнай?
4. Што такое даўжыня хвалі? Як звязаны даўжыня хвалі і частата?
5. Якія хвалі могуць распаўсюджвацца ў газах? Вадкасцях? Цвёрдых целах?



Прыклад рашэння задачы

Вызначыце даўжыню λ хвалі, якая выпраменьваецца крыніцай ваганняў з частатой $\nu = 200$ Гц, калі модуль скорасці распаўсюджвання хвалі $v = 1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Дадзена:

$$\nu = 200 \text{ Гц}$$

$$v = 1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

λ — ?

Рашэнне

Модуль скорасці распаўсюджвання хвалі можна вылічыць па формуле:

$$v = \lambda \nu,$$

дзе λ — даўжыня хвалі, ν — частата ваганняў.

Адкуль знаходзім:

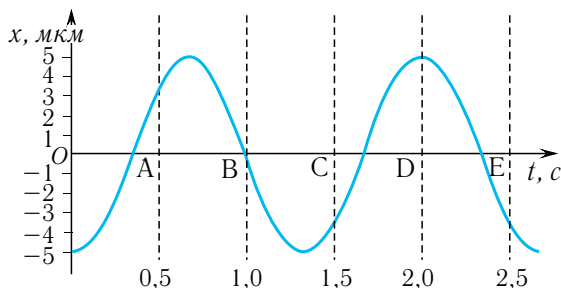
$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

$$\lambda = \frac{1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{200 \text{ с}^{-1}} = 7,25 \text{ м.}$$

Адказ: $\lambda = 7,25 \text{ м.}$

Практыкаванне 5

1. Вызначыце модуль скорасці v распаўсюджвання хвалі, калі яе даўжыня $\lambda = 15$ м, а перыяд ваганняў $T = 0,20$ с.
2. З графіка, дадзенага на малюнку 40, вызначыце:
 - а) перыяд ваганняў часціц;
 - б) амплітуду хвалі.



Мал. 40. Графік залежнасці зруху часціц ад часу ў падоўжнай хвалі

3. Нерухомы назіральнік за прамежак часу $\Delta t = 20$ с налічыў $n = 8$ грабянёў хвалі, якія прайшлі міма яго. Вызначыце перыяд T ваганняў часціц.
4. Рыбалоў заўважыў, што за прамежак часу $\Delta t = 20$ с паплавок выканаў $n_1 = 40$ ваганняў на хвалях. Пры гэтым адлегласць паміж берагам і рыбаловам $l = 12$ м і на гэтай адлегласці змяшчаецца $n_2 = 20$ грабянёў хвалі. Вызначыце модуль скорасці v распаўсюджвання хвалі.
5. Рыбалавецкі траўлер з дапамогай рэхалота выявіў касяк рыбы. На якой адлегласці l ён знаходзіцца, калі прамежак часу паміж момантамі адпраўлення і прыёму гукавога сігнала роўны $\Delta t = 0,90$ с. Скорасць гуку ў вадзе $v = 1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
6. Геалагі для вызначэння глыбіні залягання пароды робяць выбух. У выніку адбітая ад пароды сейсмічная хваля была зафіксавана праз прамежак часу $\tau = 20$ с пасля выбуху. Вызначыце глыбіню h залягання пароды, калі скорасць распаўсюджвання сейсмічнай хвалі $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



§ 6. Гукавыя хвалі

■ Гукавыя хвалі (гук) акружаюць чалавека з першых дзён яго жыцця. Гукі дазваляюць людзям мець зносіны паміж сабой, выказаць эмоцыі, атрымліваць асалоду ад музычных шэдэўраў. Як гэта адбываецца? Якія асноўныя ўласцівасці гукавых хваль?

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека гукавыя адчуванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**. Чалавечае вуха ўспрымае ў выглядзе гукавых адчуванняў ваганні ад 16 да 20 000 Гц.

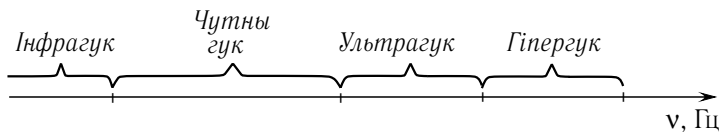
Раздзел фізікі, у якім вывучаюцца гукавыя з'явы, называецца **акустыкай**.

Гукавыя хвалі класіфікуюцца па частаце наступным чынам (мал. 41): інфрагук ($\nu < 16$ Гц);

чутны чалавекам гук ($16 \text{ Гц} < \nu < 2,0 \cdot 10^4$ Гц);

ультрагук ($2,0 \cdot 10^4 \text{ Гц} < \nu < 1,0 \cdot 10^9$ Гц);

гіпергук ($10^9 \text{ Гц} < \nu < 10^{12} \text{ Гц} \div 10^{13} \text{ Гц}$).

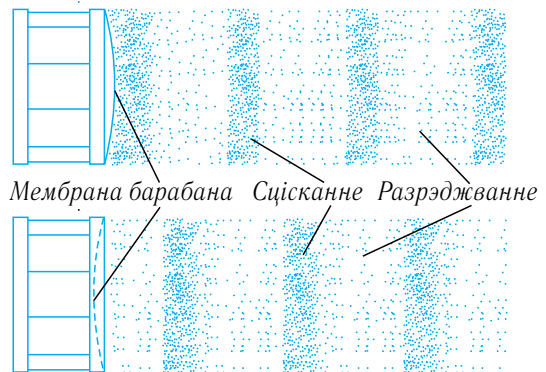


Мал. 41. Шкала гукавых хваль

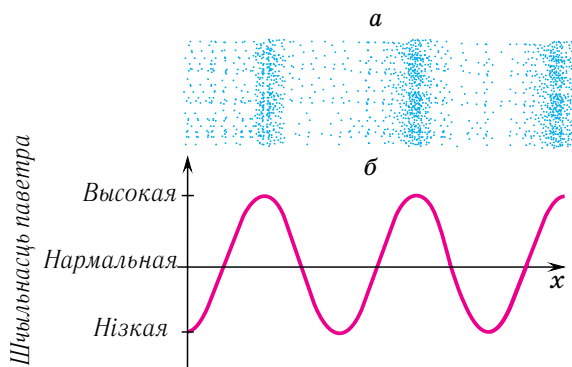
Гукі (гукавыя хвалі) прыносяць чалавеку жыццёва важную інфармацыю — з іх дапамогай мы маем зносіны, атрымліваем асалоду ад музыкі, пазнаём па голасе знаёмых людзей. Свет гукаў вакол нас разнастайны і складаны, аднак мы досыць лёгка арыентуемся ў ім і можам беспамылкова адрозніць спеў птушак ад шуму гарадской вуліцы.

Што ўяўляе сабой гук і якім чынам ён узнікае?

Разгледзім у якасці крыніцы гуку барабан (мал. 42). Дэфармаваная ў выніку ўдару мембрана барабана будзе выконваць ваганні з некаторай частатой. У выніку гэтага мембрана стварае папераменна сцісканне і разрэджванне ў прылеглай да яе вобласці паветра, і ўтвараецца *падоўжная хваля*, якая распаўсюджваецца ў паветры з цягам часу.



Мал. 42. Утварэнне гукавой хвалі, ствараемай мембранай барабана



Мал. 43. Залежнасць шчыльнасці паветра ад каардынаты ў падоўжнай хвалі

Наглядную інфармацыю аб гукавой хвалі ў некаторы момант часу дае графік залежнасці шчыльнасці паветра ад каардынаты (мал. 43). Гарбы на гэтым графіку адпавядаюць сцісканню, а ўпадзіны — разрэджванню паветра. У працэсе распаўсюджвання гукавой хвалі з цягам часу змяняюцца такія характарыстыкі асяроддзя, як шчыльнасць і ціск (гл. мал. 43).

Для распаўсюджвання гукавых хваль неабходна асяроддзе з пругкімі ўласцівасцямі. Яны добра распаўсюджваюцца ў пругкіх асяроддзях, такіх як газ, вадкасць, металы, шкло, крышталічныя матэрыялы. Аднак гукавыя хвалі хутка затухаюць у порыстых матэрыялах (паралон, лямец, вата). Такія матэрыялы выкарыстоўваюць для гукаізаляцыі. Найлепшым ізалятарам гуку з’яўляецца вакуум (пустата), паколькі вынікі эксперыменту паказваюць, што гукавыя хвалі ў пустаце (вакууме) не распаўсюджваюцца.

Асноўнымі *фізічнымі* характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *інтэнсіўнасць і спектральны састай (спектр)*.



Паняцце **інтэнсіўнасць гуку** характарызуе энергію, якую пераносіць гукавая хваля.

Інтэнсіўнасць гуку, які ўспрымаецца вухам чалавека, змяняецца ў шырокіх межах: ад $\sim 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог чутнасці*) да $\sim 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог болевага адчування*). Чалавек можа чуць і больш інтэнсіўныя гукі, але пры гэтым ён будзе адчуваць боль. Гукі яшчэ большай інтэнсіўнасці могуць прывесці да траўмы.

Мінімальная інтэнсіўнасць, пры якой вуха чалавека перастае ўспрымаць гук, называецца **парогам чутнасці**. Найбольш адчувальнае наша вуха да хваль частотой прыкладна 3 кГц, паколькі пры гэтай частаце інтэнсіўнасці каля $10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ужо дастаткова, каб вуха ўспрыняла гук.

А для таго каб пачуць гук на частаце 50 Гц, яго інтэнсіўнасць павінна быць прыкладна ў 100 000 разоў большай, г. зн. каля $10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.



Такім чынам, для ўзнікнення гукавых адчуванняў неабходна:

- наяўнасць крыніцы гуку;
- наяўнасць пругкага асяроддзя паміж крыніцай гуку і вухам. Пры гэтым частата ваганняў крыніцы гуку павінна знаходзіцца ў межах 16—20 000 Гц;
- магутнасць гукавых хваль павінна быць дастатковай для таго, каб выклікаць адчуванне гуку.

Яшчэ адной асноўнай характарыстыкай гуку з'яўляецца яго *спектр*. **Спектрам** называецца набор частот гукавых ваганняў, якія ўтвараюць дадзены гукавы сігнал. Спектр можа быць *суцэльным* або *дыскрэтным*.

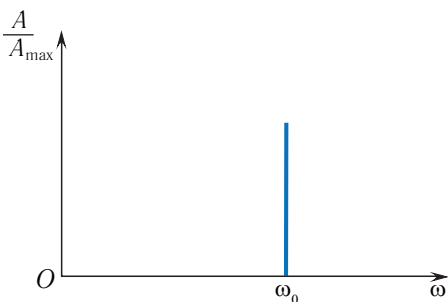
Суцэльны спектр азначае, што ў дадзеным наборы прысутнічаюць хвалі, частоты якіх запаўняюць увесь зададзены спектральны дыяпазон.

Дыскрэтны спектр азначае наяўнасць канчатковага ліку хваль з пэўнымі частотамі і амплітудамі, якія ўтвараюць разглядаемы сігнал.

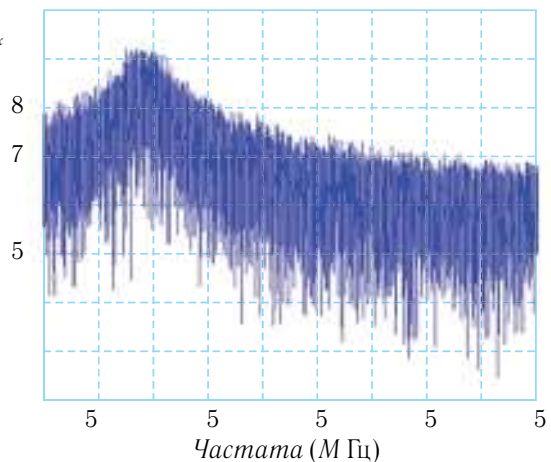
Па тыпу спектра гукі падзяляюцца на музычныя тоны і шумы.

Музычны тон ствараецца перыядычнымі ваганнямі цела, якое гучыць (камертон, струна), і ўяўляе сабой гарманічнае ваганне адной частаты. Спектр гарманічнага вагання ўяўляе сабой адну вертыкальную лінію (мал. 44).

Шум — сукупнасць мноства разнастайных кароткачасовых гукаў (хрускенне, шлах, шоргат, грук і да т. п.) — уяўляе сабой накладанне вялікага ліку ваганняў з блізкімі амплітудамі, але рознымі частотамі (мае суцэльны спектр) (мал. 45).



Мал. 44. Спектраграма гарманічнага вагання



Мал. 45. Спектр шуму



Нота	Частата Гц
До	261,62
До-дыез	277,18
Рэ	293,67
Мі-бемоль	311,13
Мі	329,63
Фа	349,23
Фа-дыез	369,99
Сі	392,00
Сі-дыез	415,30
Ля	440,00
Соль-бемоль	466,16
Соль	493,88
До	523,25

Мал. 46. Камертоны з частатамі ваганняў гукаў першай актавы

Фізічным характарыстыкам гуку адпавядаюць яго *суб'ектыўныя* характарыстыкі, звязаныя з яго ўспрыманнем вухам чалавека. Гэта абумоўлена тым, што ўспрыманне гуку — працэс не толькі фізічны, але і фізіялагічны. Вуха чалавека ўспрымае гукавыя ваганні пэўных частот і інтэнсіўнасцей па-рознаму, у залежнасці ад адчувальнасці органаў слыху.

Асноўнымі **фізіялагічнымі** характарыстыкамі гуку з'яўляюцца *гучнасць, вышыня і тэмбр*.

Гучнасць (ступень чутнасці гуку) вызначаецца як інтэнсіўнасцю гуку (амплітудай ваганняў у гукавой хвалі), так і рознай адчувальнасцю вуха чалавека на розных частотах. Найбольшую адчувальнасць чалавечэе вуха мае ў дыяпазоне частот ад 1000 да 5000 Гц.

Вышыня гуку вызначаецца частатой гукавых ваганняў, якія маюць найбольшую інтэнсіўнасць у спектры.

Для музычнага гуку (сугучнасці) асноўны тон адпавядае найменшай частаце (мал. 46). Усе астатнія тоны называюць **абертонамі**. **Тэмбр** (адценне гуку) залежыць ад таго, колькі абертонаў далучаецца да *асноўнага тону* і якая іх інтэнсіўнасць і частата.

Па тэмбры мы лёгка адрозніваем гукі скрыпкі і раяля, аргана і флейты, галасы людзей (табл. 3) і г. д.

Табліца 3. Частата ν ваганняў розных крыніц гуку

Крыніца гуку	ν , Гц	Крыніца гуку	ν , Гц
<i>Мужчынскі голас:</i>	80—500	Арган	22—16 000
бас	80—350	Флейта	260—15 000
барытон	100—400	Скрыпка	260—15 000
тэнар	130—500	Арфа	30—15 000
<i>Жаночы голас:</i>	170—1400	Барабан	90—14 000
кантральта	170—780	Кантрабас	60—8000
меца-сапрана	200—1000	Віяланчэль	70—8000
сапрана	250—1300	Труба	60—6000
каларатурнае	260—1400	Саксафон	80—8000
сапрана		Раяль	90—9000

Скорасць гуку залежыць ад пругкіх уласцівасцей, шчыльнасці і тэмпературы асяроддзя. Чым больш пругкія сілы, тым хутчэй перадаюцца ваганні часціц суседнім часціцам і тым хутчэй распаўсюджваецца хваля. Таму скорасць гуку ў газах меншая, чым у вадкасцях, а ў вадкасцях, як правіла, меншая, чым у цвёрдых целах (табл. 4).

Табліца 4. Скорасць гуку ў розных асяроддзях

Асяроддзе	t , °C	v , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Паветра	0	331
Паветра	20	343
Вада	20	1490
Гліцэрына	20	1920
Ртуць	20	1450
Лёд	0	3280
Сталь	20	5050
Шкло	20	5300
Чыгун	20	3850

Скорасць гуку ў ідэальных газах з ростам тэмпературы расце прапарцыянальна $\sqrt{T}$, дзе T — абсалютная тэмпература. У паветры скорасць гуку $v = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ пры тэмпературы $t = 0^\circ \text{C}$ і $v = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ пры тэмпературы $t = 20^\circ \text{C}$. У вадкасцях і металах скорасць гуку, як правіла, памяншаецца з ростам тэмпературы (выключэнне — вада).

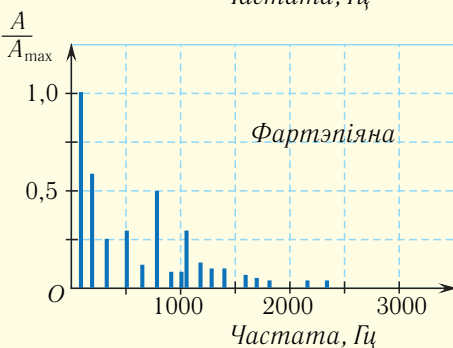
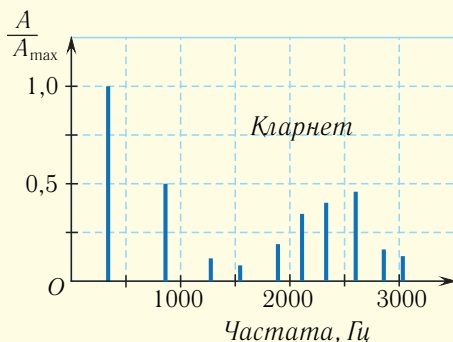
► На аснове музычных тонаў створа-на музычная азбука — ноты (до, рэ, мі, фа, соль, ля, сі), якія дазваляюць прайграваць адну і тую ж мелодыю на розных музычных інструментах.

Інтэрвал частот музычных гукаў, на межах якога гукі па частаце адрозніваюцца ў 2 разы, называюць актавай (гл. мал. 46).

Музычны гук (сугучча) — вынік накладання некалькіх музычных тонаў, якія гучаць адначасова. Асноўны тон называецца таксама першай гармонікай. Абертоны называюцца гарманічнымі, калі частоты абертонаў кратны частаце асноўнага тону. Такім чынам, музычны гук мае дыскрэтны спектр (мал. 47).

Многія жывёлы могуць успрымаць гукі ультрагукавых частот. Напрыклад, сабакі могуць чуць гукі да $50\,000$ Гц, а кажаны — да $100\,000$ Гц.

Інфрагук, які распаўсюджваецца ў вадзе на сотні кіламетраў, дапамагае кітам і многім іншым марскім жывёлам арыентавацца ў тоўшчы вады.



Мал. 47. Спектраграмы двух музычных інструментаў для аднолькавых мелодый

1. Якая прырода гуку і якія яго крыніцы?
2. Як класіфікуюцца гукі?
3. Які дыяпазон гукавых частот успрымае вуха чалавека?
4. Чаму роўна скорасць распаўсюджвання гуку ў паветры?
5. Як залежыць вышыня гуку ад частаты?
6. У якіх межах знаходзяцца частоты інфрагукавых і ультрагукавых хваль?

7. Палёт якіх птушак і насякомых мы чуем, а якіх — не? Выкарыстаўшы даныя табліцы 5, вызначыце, у якога насякомага самы высокі гук палёту.

8. Як па гуках, выдаваемых мухай і камаром, вызначыць, хто з іх у палёце часцей махае крыламі?

9. Чаму матылькі лётаюць бяшумна?

10. Назавіце асноўныя фізічныя і фізіялагічныя характарыстыкі гучу.

11. Што такое парог чутнасці? Бolestы парог?

12. На якой частаце вуха чалавека мае найлепшую адчувальнасць?

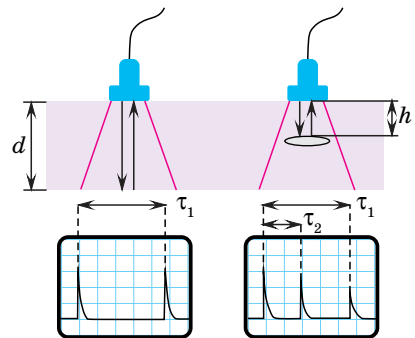
Табліца 5. Частата ваганняў крылаў насякомых і птушак у палёце, Гц

Бусел	2
Варона	3—4
Матылёк	да 9
Верабей	да 13
Страказа	38—100
Аса	100—110
Чмель	180—240
Муха (пакаёвая)	190—330
Пчала (з ношай)	200—250
Камар	300—600



Прыклад рашэння задачы

Стальныя дэталі правяраюць ультрагукавым дэфектаскопам (мал. 48). Вызначыце таўшчыню d дэталі і глыбіню h размяшчэння дэфекту, калі пасля вылучэння ультрагукавога сігнала атрыманы два адбітыя сігналы праз прамежкі часу $\tau_1 = 0,15$ мс і $\tau_2 = 0,10$ мс. Модуль скорасці распаўсюджвання ультрагуку ў дэталі $v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Мал. 48

Дадзена:

$$\tau_1 = 0,15 \text{ мс} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$\tau_2 = 0,10 \text{ мс} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$d = ?$ $h = ?$

Рашэнне

Першы адбіты сігнал прайшоў шлях ад крыніцы ультрагуку да сценкі дэталі і назад, роўны $2d$.

Такім чынам, таўшчыня дэталі:

$$d = \frac{v\tau_1}{2}, \quad d = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,39 \text{ м.}$$

Глыбіню знаходжання дэфекту знаходзім аналагічна:

$$h = \frac{v\tau_2}{2}, \quad h = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,26 \text{ м.}$$

Адказ: $d = 0,39 \text{ м}$, $h = 0,26 \text{ м}$.

Практыкаванне 6

1. Адлегласць паміж двума чыгуначнымі станцыямі $l = 10 \text{ км}$. Колькі часу распаўсюджваецца гук ад адной станцыі да другой па паветры (Δt_1) і па стальных рэйках (Δt_2)? Тэмпература паветра $t = 0,0 \text{ }^\circ\text{С}$.
2. Дэльфіны выпускаюць ультрагукавыя імпульсы частотой $\nu = 250 \text{ кГц}$. Вызначыце даўжыню хвалі такога ультрагуку ў вадзе (λ_1) і ў паветры (λ_2) пры тэмпературы $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$.
3. Вызначыце адлегласць l да перашкоды, калі хлопчык чуе рэха праз прамежак часу $\tau = 2,0 \text{ с}$. Скорасць гуку ў паветры $v = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
4. Вызначыце глыбіню мора H у дадзеным месцы, калі ультрагукавы імпульс вярнуўся на судна праз прамежак часу $\Delta t = 0,20 \text{ с}$ пасля адпраўкі. Модуль скорасці ультрагуку ў марской вадзе $v = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
5. Турыст падышоў да горнага возера. Ён крыкнуў і пачуў гук рэха, адбітага ад скалы на процілеглым беразе. Вызначыце адлегласць l да процілеглага берага возера, калі турыст пачуў рэха праз прамежак часу $\tau = 1,5 \text{ с}$.
6. Хлопчык бачыць, як цяжкі камень упаў на бетонны тратуар. Праз некаторы час ён чуе два гукі ад удару каменя: адзін прыйшоў па бетоне, а другі распаўсюджваўся па паветры. Прамежак часу паміж імі $\Delta t = 1,2 \text{ с}$. На якой адлегласці l ад хлопчыка ўпаў камень, калі модуль скорасці гуку ў бетоне $v_6 = 4500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?
7. Стальную дэталі правяраюць ультрагукавым дэфектаскопам. Вызначыце глыбіню h знаходжання дэфекту ў дэталі і яе таўшчыню d , калі першы адбіты сігнал атрыманы праз прамежак часу $\tau_1 = 8,0 \text{ мкс}$, а другі — праз $\tau_1 = 20 \text{ мкс}$. Вызначыце таўшчыню дэталі, калі скорасць гуку ў сталі складае $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 1

Перыядычным называецца рух, пры якім фізічныя велічыні, што яго характарызуюць, праз роўныя прамежкі часу прымаюць аднолькавыя значэнні.

Вагальным называецца рух (працэс), пры якім любая фізічная велічыня, што характарызуе гэты рух (працэс), па чарзе змяняецца то ў адзін, то ў другі бок ад яе значэння ў становішчы ўстойлівай раўнавагі.

Ваганні, пры якіх залежнасць каардынаты (зруху) цела ад часу вызначаецца суадносінамі

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ або } x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

называюцца **гарманічнымі**, а сістэма, якая выконвае такія ваганні, — **гарманічнай вагальнай сістэмай**. Залежнасць каардынаты цела ад часу $x(t)$ называецца **кінематычным законам руху**.

Ваганні цела з'яўляюцца **гарманічнымі**, калі яны адбываюцца пад уздзеяннем вяртальнай сілы, праекцыя якой прама прапарцыянальна зруху цела са становішча раўнавагі і накіравана да становішча раўнавагі цела, якое вагаецца, г. зн. $F_x = -kx$.

Ураўненне гарманічных ваганняў:

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0.$$

Амплітуда ваганняў A ($A > 0$) — максімальны зрух $x_{\max}$ цела ад становішча раўнавагі.

Перыяд вагання T — час аднаго вагання:

$$T = \frac{\Delta t}{N}.$$

Частата ваганняў ν — лік ваганняў, выконваемых за адзінку часу:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T}.$$

Цыклічная частата ω — лік ваганняў за прамежак часу $\Delta t = 2\pi$ секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$



Вагальная сістэма, што складаецца з цела масай m і бязважкай спружыны жорсткасцю k , якая злучае цела і апору, называецца **спружынным маятнікам**. Яго перыяд ваганняў:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Матэматычным маятнікам называецца цела масай m , падвешанае на бязважкай нерасцяжнай нітцы даўжынёй l , якое знаходзіцца ў полі сілы цяжару. Перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка вызначаецца па **формуле Гюйгенса**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Уласныя (свабодныя) ваганні — гэта ваганні, якія адбываюцца пры адсутнасці знешніх уздзеянняў на сістэму. Пры адсутнасці трэння яны адбываюцца са строга вызначанай частатой, якая называецца **частатой уласных ваганняў** сістэмы.

Затухаючымі называюцца ваганні, энергія якіх памяншаецца з цягам часу.

Вымушанымі называюцца ваганні сістэмы, якія выклікаюцца ўздзеяннем на яе перыядычных знешніх сіл.

Рэзананс — гэта з’ява рэзкага нарастання амплітуды вымушаных ваганняў пры набліжэнні частаты ω знешняй сілы, што дзейнічае на вагальную сістэму, да частаты ω_0 уласных ваганняў сістэмы ($\omega \rightarrow \omega_0$).

Механічнай хваляй называецца працэс распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі, які суправаджаецца перадачай энергіі ад аднаго пункта асяроддзя да другога.

Даўжыня хвалі — адлегласць, пройдзеная хваляй у асяроддзі за прамежак часу, роўны перыяду ваганняў часціц:

$$\lambda = vT.$$

Скорасць распаўсюджвання хвалі — гэта скорасць распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі. Модуль скорасці распаўсюджвання хвалі:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$



Хваля называецца **падоўжнай**, калі ваганні часціц асяроддзя адбываюцца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хваль.

Хваля называецца **папярочнай**, калі часціцы асяроддзя вагаюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі.

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека гукавыя адчужванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**.

Асноўнымі **фізічнымі** характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *інтэнсіўнасць і спектральны састаў (спектр)*. Асноўнымі **фізіялагічнымі** характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *гучнасць, вышыня і тэмбр*.

Адзінкі асноўных велічынь механічных ваганняў і хваль

Найменне	Абазначэнне	Адзінка	Выражэнне праз асноўныя адзінкі ў СІ
Частата	ν	Герц (Гц)	с^{-1}
Перыяд	T	Секунда (с)	с
Цыклічная (кругавая) частата	ω	Радыйн за секунду $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$	с^{-1}
Амплітуда	A	Метр (м)	м
Даўжыня хвалі	λ	Метр (м)	м
Модуль скорасці хвалі	v	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$

Заданні для самастойных даследаванняў

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (Г. Галілей, Х. Гюйгенс).

2. Падрыхтуйце інтэрактыўныя прэзентацыі на тэмы: «Выкарыстанне ультрагукавых хваль у медыцыне, тэхніцы, побытавых прыборах», «Шум і яго ўздзеянне на чалавека», «Інфрагук — прымяненне і барацьба з ім».

3. Калі назіраць за качкай, якая плыве ў сажалцы (мал. 49, а), ці з вышыні за катарам, які рухаецца па паверхні возера (мал. 49, б), то



Мал. 49



Мал. 50



Мал. 51

можна заўважыць, што ствараемыя імі хвалі разыходзяцца пад некаторым вуглом да напрамку руху качкі (катара). Растлумачце гэту з’яву і вызначыце, як залежыць вугал разыходжання хваль на вадзе ад скорасці качкі (катара).

4. Часткова напоўніце вадой бакал, намачыце вадой палец і акуратна вадзіце ім па краі бакала (мал. 50). Праз некаторы час бакал пачне звінець. Змяняючы ўзровень вады ў бакале, можна дабіцца змянення вышыні гуку. Растлумачце гэту з’яву і падбярыце ўзроўні вады так, каб гучанне бакала адпавядала музычным нотам. Ці можна сыграць на такіх бакалах простую мелодыю?

5. Калі злучыць донцы дзвюх пластыкавых шклянак (або бляшанак) ніткай (мал. 51) і нацягнуць яе, то ўтворыцца так званы «струнны тэлефон». Вывучыце залежнасць інтэнсіўнасці гуку ў «струнным тэлефоне» ад даўжыні ніткі і сілы яе нацяжэння.





Раздзел 2

Электрамагнітныя ваганні і хвалі

Правільна... разглядаць падатбенства ў рэчах, якія знаходзяцца далёка адна ад адной.

Арыстоцель

§ 7. Вагальны контур. Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры. Формула Томсана. Ператварэнні энергіі ў вагальным контуры

Вагальныя працэсы магчымыя не толькі ў механічных сістэмах. Пры пэўных умовах і ў электрычных ланцугах узнікаюць ваганні сілы току і напружання і іншых электрамагнітных велічынь. Якія гэта ўмовы? Як вылічыць перыяд электрамагнітных ваганняў? Якія аналогіі існуюць паміж ваганнямі рознай прыроды?



Электрычнай ёмістасцю C кандэнсатара называюць фізічную велічыню, якая характарызуе яго здольнасць назапашваць электрычныя зарады і роўна адносіне зарада q кандэнсатара да напружання U паміж яго абкладкамі: $C = \frac{q}{U}$. Адзінкай электрычнай ёмістасці ў СІ з'яўляецца 1 фарад (1 Ф).

Энергія электростатычнага поля кандэнсатара: $W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$.

Энергія магнітнага поля шпулі з токам: $W_L = \frac{LI^2}{2}$, L — індуктыўнасць шпулі, I — сіла току ў ланцугу. Адзінкай індуктыўнасці ў СІ з'яўляецца 1 генры (1 Гн).

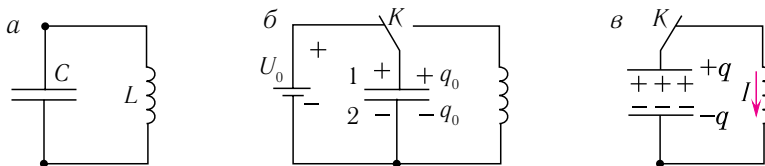
Узнікненне электрарухаючай сілы (ЭРС) у замкнутым праводзячым контуры пры змяненні магнітнага патоку, што праходзіць праз яго, называецца з'явай электрамагнітнай індукцыі.

Пад з'явай самаіндукцыі разумеюць узнікненне ў замкнутым праводзячым контуры ЭРС індукцыі, ствараемай у выніку змянення сілы току ў самім контуры.

Правіла Ленца: індукцыйны ток, што ўзнікае ў замкнутым праводзячым контуры, мае такі напрамак, пры якім створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, імкнецца кампенсаваць змяненне магнітнага патоку, што выклікала дадзены ток.

Разгледзім электрычны ланцуг, які складаецца з паслядоўна злучаных кандэнсатара электраёмкасцю C і шпулі індуктыўнасцю L (мал. 52, а), які называецца **вагальным контурам** або **LC-контурам**. Калі электрычнае супраціўленне контуру можна лічыць роўным нулю ($R = 0$), то яго называюць **ідэальным**. Ідэальны вагальны контур з'яўляецца спрошчанай мадэллю рэальнага вагальнага контуру.

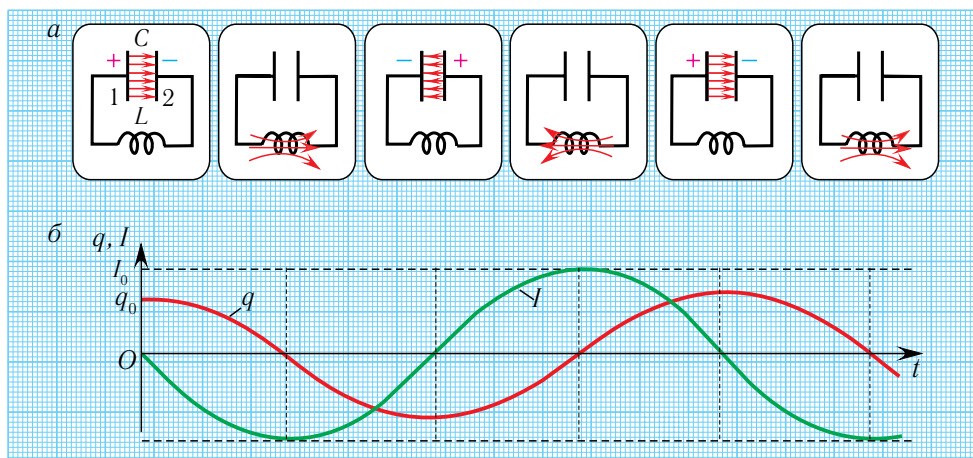
Падключыўшы (пры дапамозе ключа K) крыніцу току, зарадзім кандэнсатар да напружання U_0 , надаўшы яму зарад q_0 (мал. 52, б). Значыць, у пачатковы момант часу ($t = 0$) кандэнсатар зараджаны так, што на яго абкладцы 1 знаходзіцца зарад $+q_0$, а на абкладцы 2 — зарад $-q_0$, пры гэтым $q_0 = CU_0$. Электрычнае поле, створанае зарадамі абкладак кандэнсатара, мае энергію $W_c = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}$.



Мал. 52. а — вагальны контур; б — зарадка кандэнсатара ад крыніцы; в — праходжанне току па контуры

Разгледзім працэс разрадкі кандэнсатара ў вагальным контуры. Пасля злучэння зараджанага кандэнсатара са шпуляй (пры дапамозе ключа K) (мал. 52, в) ён пачне разраджацца, паколькі пад дзеяннем электрычнага поля, ствараемага зарадамі на абкладках кандэнсатара, свабодныя электроны будуць перасоўвацца па ланцугу ад адмоўна зараджанай абкладкі да дадатна зараджанай. На малюнку 52, в стрэлкай паказаны пачатковы напрамак току ў электрычным ланцугу.

Такім чынам, у контуры з'явіцца нарастаючы па модулі электрычны ток, сіла $I(t)$ якога будзе змяняцца з цягам часу (мал. 53, а). Але імгненная разрядка кандэнсатара немагчымая з прычыны з'явы самаіндукцыі. Сапраўды, у шпулі індуктыўнасці ўзнікне магнітны паток, што змяняецца з цягам часу, які выкліча з'яўленне ЭРС самаіндукцыі. Згодна з правілам Ленца, ЭРС самаіндукцыі імкнецца процідзейнічаць прычыне, якая яе выклікала, г. зн. павелічэнню па модулі сілы току.



Мал. 53. *a* — электрамагнітныя ваганні ў ідэальным LC -контуры;
б — залежнасці зараду кандэнсатара q , сілы току I ў шпулі ад часу

У выніку гэтага модуль сілы току ў вагальным контуры будзе на працягу некаторага прамежку часу плаўна нарастаць ад нуля да максімальнага значэння I_0 , якое вызначаецца індуктыўнасцю шпулі і электраёмкасцю кандэнсатара (мал. 53, б).

Пры разрадцы кандэнсатара энергія яго электрычнага поля ператвараецца ў энергію магнітнага поля шпулі з токам. Згодна з законам захавання энергіі сумарная энергія ідэальнага вагальнага контуру застаецца пастаяннай з цягам часу. Такім чынам, памяншэнне энергіі электрычнага поля кандэнсатара роўна павелічэнню энергіі магнітнага поля шпулі:

$$\frac{q_0^2}{2C} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2},$$

дзе $q(t)$ — імгненнае значэнне зараду кандэнсатара і $I(t)$ — сіла току ў шпулі ў некаторы момант часу t пасля пачатку разрадкі кандэнсатара.

У момант поўнай разрадкі кандэнсатара ($q = 0$) сіла току ў шпулі $I(t)$ дасягне свайго максімальнага па модулі значэння I_0 (гл. мал. 53, б). У адпаведнасці з законам захавання энергіі назапашаная ў кандэнсатары энергія электрычнага поля прыойдзе ў энергію магнітнага поля, назапашаную ў гэты момант у шпулі:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Пасля разрадкі кандэнсатара сіла току ў шпулі пачынае спадаць па модулі. Гэта таксама адбываецца не імгненна, паколькі ЭРС самаіндукцыі, якая ўзнікае зноў, згодна з правілам Ленца стварае індукцыйны ток. Ён мае такі ж напрамак, як і ток у ланцугу, які памяншаецца па модулі, і таму «падтрымлівае» яго.

У выніку да моманту знікнення току зарад кандэнсатара дасягне максімальнага значэння q_0 . Пры гэтым яго абкладка, першапачаткова зараджаная дадатна, будзе зараджана адмоўна. Далей працэс паўторыцца, розніца будзе толькі ў тым, што электрычны ток у контуры будзе праходзіць у процілеглым напрамку (гл. мал. 53, а.)

Такім чынам, у ідэальным LC -контур будучы адбывацца перыядычныя змяненні значэнняў сілы току і напружання, прычым поўная энергія контуру будзе заставацца пастаяннай. У гэтым выпадку кажуць, што ў контуры ўзніклі *свабодныя электрамагнітныя ваганні*.

Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў LC -контур — гэта перыядычныя змяненні зараду на абкладках кандэнсатара, сілы току і напружання ў контуры, якія адбываюцца без спажывання энергіі ад знешніх крыніц і без страт энергіі на цеплавылучэнне і выпраменьванне.

Такім чынам, існаванне свабодных электрамагнітных ваганняў у контуры абумоўлена перазарадкай кандэнсатара, выкліканай узнікненнем ЭРС самаіндукцыі ў шпулі. Заўважым, што зарад $q(t)$ кандэнсатара і сіла току $I(t)$ у шпулі дасягаюць сваіх максімальных значэнняў q_0 і I_0 у розныя моманты часу (гл. мал. 53, а, б) (са зрухам на $\frac{T}{4}$).

Найменшы прамежак часу, на працягу якога LC -контур вяртаецца ў зыходны стан (да пачатковых значэнняў зараду на кожнай з абкладак), называецца **перыядам** свабодных (уласных) электрамагнітных ваганняў у контуры.

Атрымаем формулу для перыяду свабодных электрамагнітных ваганняў у контуры, выкарыстаўшы закон захавання энергіі па аналогіі з механічнымі ваганнямі. Паколькі поўная энергія ідэальнага LC -контуру, роўная суме энергій электрычнага поля кандэнсатара і магнітнага поля шпулі, захоўваецца, то ў любы момант часу справядлівае роўнасць:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.} \quad (1)$$

Працэсы, якія адбываюцца ў вагальным контуры, аналагічныя ваганням спружыннага маятніка. Для поўнай механічнай энергіі спружыннага маятніка ў любы момант часу:

$$W_{\text{мех}} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2}, \quad (2)$$

дзе k — жорсткасць спружыны, m — маса груза, x — праекцыя зруху цела ад становішча раўнавагі, v_x — праекцыя яго скорасці на вось Ox .

Прааналізуем суадносіны (1) і (2). Бачна, што энергія электрычнага поля кандэнсатара $W_C = \frac{q^2(t)}{2C}$ з'яўляецца аналагам патэнцыяльнай энергіі пругкай дэфармацыі спружыны $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$. Значыць, энергія магнітнага поля шпулі $W_L = \frac{LI^2(t)}{2}$, абумоўленая ўпарадкаваным рухам зарадаў, з'яўляецца аналагам кінетычнай энергіі груза $W_{\text{к}} = \frac{mv_x^2}{2}$.

Такім чынам, аналагам каардынаты $x(t)$ спружыннага маятніка пры ваганнях у электрычным контуры з'яўляецца зарад кандэнсатара $q(t)$. Тады, адпаведна, аналагам праекцыі скорасці груза $v_x(t)$ будзе сіла току $I(t)$ у вагальным контуры, паколькі сіла току характарызуе скорасць змянення зараду кандэнсатара з цягам часу.

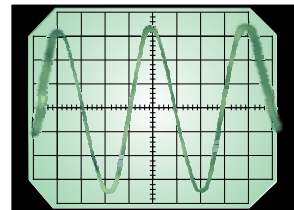
Працягваючы праведзеную аналогію, заменім у формуле для перыяду ваганняў спружыннага маятніка $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ жорсткасць k на $\frac{1}{C}$ і масу m на індуктыўнасць L . Тады для перыяду свабодных ваганняў у LC -контуры атрымаем формулу:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3)$$

якая называецца **формулай Томсана**.

Зыходзячы са сказанага, звяздём разгледжаныя аналогіі паміж фізічнымі велічынямі пры электрамагнітных і механічных ваганнях у табліцу 6.

Для назірання і даследавання электрамагнітных ваганняў выкарыстоўваюць электронны асцыляграф, на экране якога назіраюць асцыляграму ваганняў $U(t)$ (мал. 54).



Мал. 54. Асцыляграма гарманічных электрамагнітных ваганняў

Табліца 6. Супастаўленне фізічных велічынь, якія характарызуюць механічныя і электрамагнітныя ваганні

Механічныя ваганні спружыннага маятніка	Электрамагнітныя ваганні ў ідэальным вагальным контуры
m (маса цела)	L (індуктыўнасць шпулі)
k (жорсткасць спружыны)	$\frac{1}{C}$ (велічыня, адваротная ёмістасці)
$x(t)$ (каардыната цела)	$q(t)$ (заряд кандэнсатара)
$v_x(t)$ (праекцыя скорасці цела)	$I(t)$ (сіла току)
$W_{\pi} = \frac{kx^2}{2}$ (патэнцыяльная энергія пругкай дэфармацыі спружыны)	$W_C = \frac{q^2}{2C}$ (энергія электрычнага поля кандэнсатара)
$W_k = \frac{mv^2}{2}$ (кінетычная энергія грузу)	$W_L = \frac{LI^2}{2}$ (энергія магнітнага поля шпулі)
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (перыяд ваганняў) $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (цыклічная частата ваганняў)	$T = 2\pi\sqrt{LC}$ (перыяд ваганняў) $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (цыклічная частата ваганняў)

Залежнасць зараду кандэнсатара ад часу мае такі ж выгляд, як і залежнасць каардынаты цела, якое выконвае гарманічныя ваганні, ад часу:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Таксама па гарманічным законе змяняюцца сіла току (але з іншай пачатковай фазай) у ланцугу і напружанне на кандэнсатары.



Для вызначэння пачатковай фазы φ_0 і максімальнага зараду q_0 неабходна ведаць зарад кандэнсатара і сілу току ў шпулі ў пачатковы момант часу ($t = 0$).

Адзначым, што вагальны контур, у якім адбываецца *толькі* абмен энергіяй паміж кандэнсатарам і шпуляй, называецца *закрытым*.

Поўная энергія ідэальнага вагальнага контуру ($R = 0$) з цягам часу захоўваецца, паколькі ў ім пры праходжанні току цеплата не вылучаецца. Рэальны вагальны контур заўсёды мае некаторае электрычнае супраціўленне R , якое абумоўлена супраціўленнем шпулі і злучальных правадоў. Гэта прыводзіць да таго, што электрамагнітныя ваганні ў рэальным контуры з цягам часу затухаюць, тады як у ідэальным контуры яны будуць адбывацца як заўгодна доўга.

Такім чынам, механічным аналагам ідэальнага вагальнага контуру з'яўляецца спружынны маятнік без уліку трэння, а механічным аналагам рэальнага вагальнага контуру — спружынны маятнік з улікам трэння.

Вагальны LC -контур шырока выкарыстоўваецца ў сучасных мікрасхемах для сродкаў электронікі і электратэхнічнага абсталявання.



1. З якіх элементаў складаецца ідэальны вагальны контур?
2. Якія электрамагнітныя ваганні ў контуры называюцца свабоднымі?
3. Ад якіх фізічных велічынь залежыць перыяд свабодных ваганняў у ідэальным вагальным контуры?
4. Па якім законе змяняюцца залежнасці зараду кандэнсатара і сілы току ў шпулі ідэальнага вагальнага контуру з цягам часу?
5. Чаму ў контуры, які складаецца з кандэнсатара і рэзістара, не могуць узнікнуць электрамагнітныя ваганні?
6. У вагальным контуры змянілі пачатковае значэнне зараду кандэнсатара. Якія велічыні, што характарызуюць электрамагнітныя ваганні ў контуры, змяняцца, а якія застаюцца ранейшымі?
7. Як размеркавана назапашаная ў ідэальным вагальным контуры энергія паміж электрычным полем кандэнсатара і магнітным полем шпулі ў ідэальным вагальным контуры ў моманты часу $\frac{T}{4}$; $\frac{T}{2}$; $\frac{3T}{4}$; T пасля пачатку разрадкі кандэнсатара?
8. Ці залежыць перыяд свабодных электрамагнітных ваганняў у ідэальным вагальным контуры ад назапашанай у ім энергіі?



Прыклад рашэння задачы

Ідэальны вагальны контур складаецца з кандэнсатара ёмістасцю $C = 400$ пФ і шпулі індуктыўнасцю $L = 10$ мГн. Вызначыце максімальнае значэнне сілы току I_0 у контуры, калі максімальнае значэнне напружання на кандэнсатары $U_0 = 500$ В.

Дадзена:

$$C = 400 \text{ пФ} = 4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$L = 10 \text{ мГн} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$U_0 = 500 \text{ В.}$$

$$I_0 = ?$$

Рашэнне

Максімальная энергія электрычнага поля кандэнсатара:

$$W_C = \frac{CU_0^2}{2},$$

а максімальная энергія магнітнага поля шпулі:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Паколькі контур ідэальны ($R = 0$), то яго поўная энергія захоўваецца з цягам часу. Па законе захавання энергіі: $W_C = W_L$, г. зн.

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

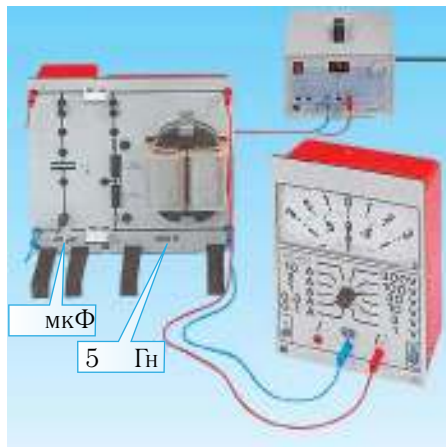
Адкуль

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}; \quad I_0 = 500 \text{ В} \sqrt{\frac{4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}}} = 0,10 \text{ А.}$$

Адказ: $I_0 = 0,10 \text{ А.}$ 

Практыкаванне 7

1. Вызначыце перыяд T свабодных электромагнітных ваганняў у ідэальным вагальным контуры, які складаецца з кандэнсатара ёмістасцю $C = 15 \text{ мкФ}$ і шпулі індуктыўнасцю $L = 2,5 \text{ мГн}$.
2. Вызначыце перыяд ваганняў вагальнага контуру, паказанага на малюнку 55.
3. Кандэнсатар ёмістасцю $C = 1,2 \text{ мкФ}$ злучаны са шпуляй індуктыўнасцю $L = 16 \text{ мкГн}$. Вызначыце частату ν свабодных электромагнітных ваганняў у контуры.
4. Як зменіцца перыяд свабодных электромагнітных ваганняў у контуры, калі індуктыўнасць L шпулі контуру павялічыць (паменшыць) у $n = 16$ разоў пры нязменнай ёмістасці кандэнсатара?
5. Вызначыце напружанне U на кандэнсатары ёмістасцю C у момант часу: а) $t_1 = \frac{T}{8}$; б) $t_2 = \frac{5T}{8}$,



Мал. 55. Устаноўка для вызначэння перыяду ваганняў ідэальнага вагальнага контуру

калі ў пачатковы момант часу $t_0 = 0$ напружанне на кандэнсатары роўна $U_0 = 48$ В, а сіла току ў шпулі $I_0 = 0$, T — перыяд ваганняў у контуры.

6. Уваходны контур радыёпрыёмніка змяшчае шпулю індуктыўнасцю $L = 0,32$ мГн. У якіх межах павінна змяняцца ёмістасць C кандэнсатара контуру, каб радыёпрыёмнік мог прымаць сігналы радыёстанцыі, што працуе ў дыяпазоне частот ад $\nu_1 = 8,0$ МГц да $\nu_2 = 24$ МГц?
7. Ёсць два вагальныя контуры. Адзін змяшчае кандэнсатар ёмістасцю $C_1 = 240$ мФ і катушку індуктыўнасцю $L_1 = 10,0$ мГн, другі — $C_2 = 260$ мФ і $L_2 = 6,00$ мГн. Ці настроены гэтыя контуры ў рэзананс? У колькі разоў k неабходна змяніць ёмістасць C_2 ці індуктыўнасць L_2 , каб настроіць гэтыя контуры ў рэзананс?



§ 8. Вимушаныя электрамагнітныя ваганні. Пераменны электрычны ток

Калі ў электрычны ланцуг уключыць крыніцу пераменнай ЭРС (аналог пераменнай сілы ў механічнай вагальнай сістэме), то ў ланцугу могуць узнікнуць вимушаныя электрамагнітныя ваганні, якія не затухаюць з цягам часу. Як атрымаць такія ваганні? Дзе і якім чынам яны выкарыстоўваюцца?



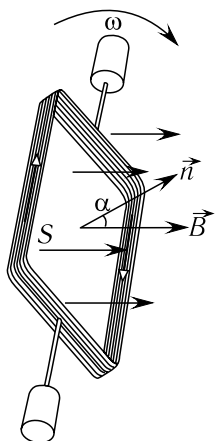
Магнітны паток Φ аднароднага поля праз плоскую паверхню роўны здабытку модуля індукцыі B магнітнага поля на плошчу паверхні S і косінус вугла α паміж індукцыяй $\vec{B}$ і нармаллю $\vec{n}$ да паверхні $\Phi = BS \cos \alpha$.

Закон электрамагнітнай індукцыі: ЭРС індукцыі ў контуры роўна скорасці змянення пранізваючага яго магнітнага патоку, узятай з процілеглым знакам

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Незатухаючыя электрамагнітныя ваганні знаходзяць шырокае прымяненне ў навуцы і тэхніцы. Для атрымання незатухаючых ваганняў неабходна кампенсаваць страты энергіі ў контуры. Для механічных ваганняў гэта дасягаецца дзеяннем перыядычнай знешняй сілы, у выніку чаго ў сістэме ўзнікаюць вимушаныя ваганні. Аналагічна гэтаму **вимушаныя электрамагнітныя ваганні** ў вагальным контуры адбываюцца пад дзеяннем знешняй ЭРС, якая перыядычна змяняецца, ці знешняга напружання, якое змяняецца.

Вимушаныя электрамагнітныя ваганні ў электрычным ланцугу называюцца *пераменным электрычным токам*.



Мал. 56.

Вярчэнне праводзячай рамкі ў магнітным полі

Ток, сіла і напрамак якога перыядычна змяняюцца, называецца пераменным.

Асноўная частка электраэнергіі ў свеце ў наш час вырацоўваецца *генератарамі пераменнага току*, якія ствараюць напружанне, што змяняецца па сінусаідальным законе. Такая ж функцыянальная залежнасць сілы току ад часу дазваляе, у параўнанні з іншымі залежнасцямі, найбольш проста і эканамічна ажыццяўляць перадачу, размеркаванне і выкарыстанне электрычнай энергіі.

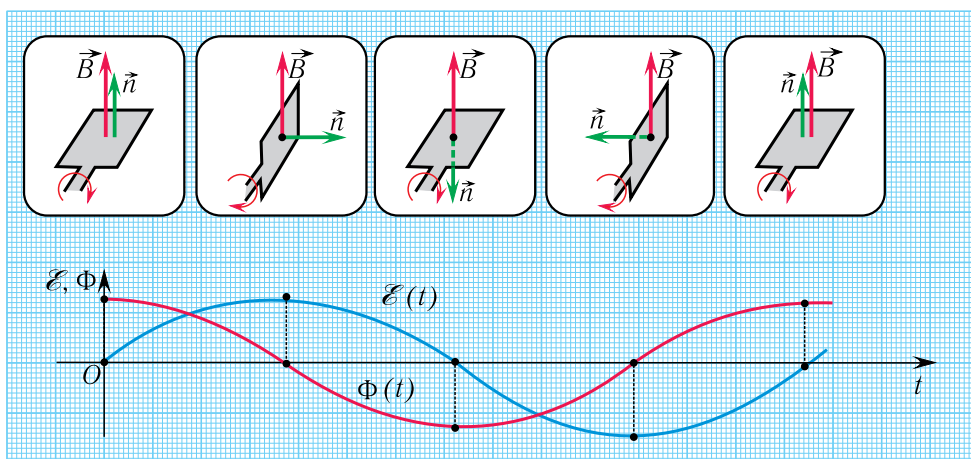
Электратэхнічная прылада, прызначаная для пераўтварэння механічнай энергіі ў энергію пераменнага электрычнага току, называецца *генератарам пераменнага току*.

Прынцып дзеяння індукцыйнага генератара пераменнага току заснаваны на з'яве **электрамагнітнай індукцыі**.

Няхай праводзячая рамка плошчай S верціцца з вуглавой скорасцю ω вакол восі, размешчанай у яе плоскасці перпендыкулярна да ліній індукцыі аднароднага магнітнага поля індукцыяй $\vec{B}$ (мал. 56).

Пры раўнамерным вярчэнні рамкі вугал α паміж напрамкамі індукцыі магнітнага поля і нармалі да плоскасці рамкі змяняецца з цягам часу па лінейным законе: $\alpha = \omega t$.

У гэтым выпадку ЭРС індукцыі змяняецца па сінусаідальным законе (мал. 57):



Мал. 57. Узнікненне ЭРС індукцыі пры вярчэнні праводзячай рамкі ў магнітным полі

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

дзе $\mathcal{E}_0 = BS\omega$ — амплітуднае (максімальнае) значэнне ЭРС.

Пры падключэнні да вывадаў рамкі прылады, якая спажывае энергію (напрыклад, нагрукі з даволі вялікім супраціўленнем $R \gg r$ (r — супраціўленне рамкі)), па ёй будзе праходзіць пераменны электрычны ток (мал. 58).

Па законе Ома для поўнага ланцуга імгненная сіла току прама прапарцыянальна ЭРС (гл. § 26 Фізіка, 10):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BS\omega}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

дзе $I_0 = \frac{BS\omega}{R}$ — максімальнае значэнне сілы току.

Аналізуючы выразы (1) і (2), можам зрабіць выснову, што ў ланцугу, які змяшчае, акрамя рамкі, толькі супраціўленне R , ваганні напружання і сілы току супадаюць па фазе, адначасова дасягаючы максімуму і мінімуму.

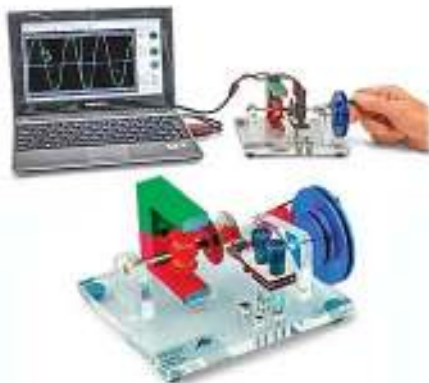
У агульным выпадку (напрыклад, пры наяўнасці ў ланцугу кандэнсатара і (ці) шпулі індуктыўнасці) ваганні сілы току ў ланцугу і напружання на кандэнсатары ці шпулі індуктыўнасці будуць адбывацца з аднолькавай частатой ν , але не будуць супадаць па фазе:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi) = U_0 \sin(2\pi t + \Delta\varphi),$$

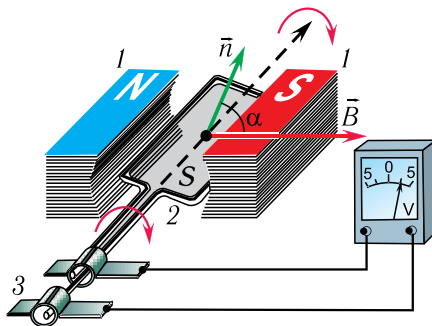
дзе U_0 — амплітуднае значэнне напружання на кандэнсатары ці шпулі, $\Delta\varphi$ — рознасць (зрух) фаз ваганняў сілы току і напружання.

Падкрэслім, што ток у ланцугу праходзіць у адным напрамку на працягу паўабарота рамкі, а затым змяняе напрамак на процілеглы, які таксама застаецца нязменным на працягу наступнага паўабарота.

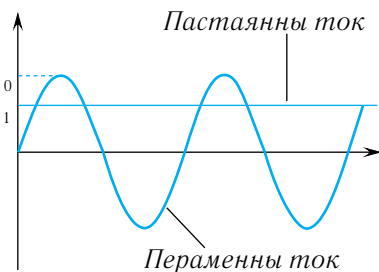
Асноўнымі часткамі індукцыйнага генератара пераменнага току з'яўляюцца (мал. 59):



Мал. 58. Вярчэнне праводзячай рамкі ў магнітным полі. Генерацыя пераменнага току



Мал. 59. Часткі індукцыйнага генератара пераменнага току: 1 — індуктар, 2 — якар, 3 — калектар са шчоткамі



Мал. 60. Графік залежнасці сілы току I ад часу t вагальным контуры і дзеючае значэнне пераменнага току



Магутныя генератары выпрацоўваюць напружанне 15—20 кВ і маюць ККДз 97—98 %.

Разгледзім новыя заканамернасці, якія ўзнікаюць пры падключэнні электрычных ланцугоў да крыніцы пераменнага току.

Няхай крыніца току стварае пераменнае напружанне, якое гарманічна змяняецца:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t. \quad (3)$$

Згодна з законам Ома сіла току на ўчастку ланцугу, які змяшчае рэзістар супраціўленнем R (мал. 60), падключаны да гэтай крыніцы, змяняецца з цягам часу таксама па сінусаідальным законе:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

дзе $I_0 = \frac{U_0}{R}$.

Максімальныя велічыні напружання U_0 і сілы току I_0 называюцца, адпаведна, **амплітуднымі значэннямі напружання і сілы току**. Значэнні напружання $U(t)$ і сілы току $I(t)$ у момант часу t называюцца **імгненнымі**.

Ведаючы імгненныя значэнні $U(t)$ і $I(t)$, можна вылічыць імгненную магутнасць пераменнага току $P(t) = U(t) \cdot I(t)$, якая, у адрозненне ад ланцугоў пастаяннага току, змяняецца з цягам часу.

З улікам (3) і (4) перапішам выраз для імгненнай магутнасці на рэзістары супраціўленнем R у ланцугу пераменнага току ў выглядзе:

$$P(t) = U(t)I(t) = I^2(t)R = I_0^2 R \sin^2(\omega t).$$

індуктар — пастаянны магніт або электрамагніт, які стварае магнітнае поле;

якар — частка ланцуга, якая верціцца (абмотка), у якой індукіруецца пераменная ЭРС;

калектар — кантактныя кольца і кантактныя пласцінкі (шчоткі), якія слізгаюць па іх — прылада, пры дапамозе якой ток здымаецца ці падводзіцца да частак, што верцяцца.

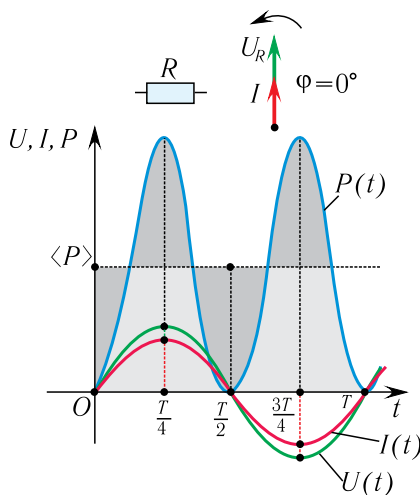
Нерухомая частка генератара называецца *статарам*, а рухомая — *ротарам*.

Мал. 61. Залежнасць U , I і P ад часу ў электрычным ланцугу з супраціўленнем R

Паколькі імгненная магутнасць змяняецца з цягам часу, то карыстацца гэтай велічынёй на практыцы ў якасці характарыстыкі працэсаў, якія праходзяць доўгі час, немагчыма.

Таму сярэдняе значэнне магутнасці пераменнага электрычнага току за працяглы (у параўнанні з перыядам ваганняў) прамежак часу можна знайсці па формуле (мал. 61):

$$\langle P \rangle = \frac{U_0 I_0}{2} = \frac{I_0^2 R}{2}.$$



► У ланцугах пераменнага току большасць электравымяральных прыбораў вымяраюць дзеючыя значэнні току і напружання, паколькі менавіта яны маюць практычнае значэнне. Дзеючым значэннем напружання ў Беларусі ў побытавых сетках пераменнага току з'яўляецца $U_d = 220$ В, пры гэтым амплітуднае значэнне напружання, якое выкарыстоўваецца, $U_0 = \sqrt{2}U_d = 311$ В.

Для павелічэння амплітуднага значэння ЭРС (гл. формулу (1)) электрамагнітнай індукцыі індукцыйнага генератара пераменнага току трэба (пры фіксаванай частаце вярчэння якара) або павялічваць індукцыю магнітнага поля, якое пранізвае абмоткі якара, або павялічваць колькасць віткоў яго абмотак. Для павелічэння індукцыі магнітнага поля $\vec{B}$ абмотку індуктара размяшчаюць у стальным сардэчніку, а зазор паміж сардэчнікамі якара і індуктара робяць як мага меншым.



1. На якой з'яве заснавана работа індукцыйнага генератара пераменнага току?
2. Чаму ў рамцы, якая раўнамерна верціцца ў аднародным магнітным полі, узбуджаецца ЭРС і ад якіх велічынь яна залежыць?
3. Які ток называюць пераменным? Што такое перыяд, частата, фаза пераменнага току?
4. З якіх асноўных частак складаецца індукцыйны генератар пераменнага току? Растлумачце прызначэнне кожнай часткі генератара.
5. Для чаго выкарыстоўваецца генератар пераменнага току?
6. Якое значэнне пераменнага току называюць імгненным? Амплітудным?

Прыклад рашэння задачы

У пачатковы момант часу напружанне на клеммах генератара прамысловага пераменнага току роўна амплітуднаму $U_0 = 310$ В. Частата прамысловага пераменнага току $\nu = 50,0$ Гц. Знайдзіце напружанне U_1 на клеммах генератара праз прамежак часу $\Delta t = 10$ мс.

Дадзена:

$$U_0 = 310 \text{ В}$$

$$\nu = 50,0 \text{ Гц}$$

$$\Delta t = 10 \text{ мс}$$

$$U_1 = ?$$

Рашэнне

Напружанне на клеммах генератара змяняецца па законе:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t.$$

Цыклічная частата ваганняў звязана з частотой ваганняў

$$\text{як } \omega = 2\pi\nu \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Такім чынам, для напружання U_1 атрымліваем:

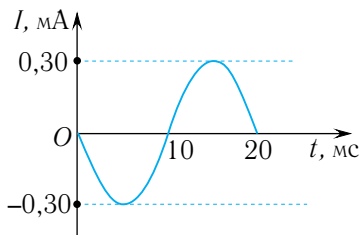
$$U_1 = U_0 \sin 2\pi\nu t, \quad U_1 = 310 \text{В} \sin(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{с}^{-1} \cdot 0,01 \text{с}) (\text{В}) = 0 \text{ В}.$$

Адказ: $U_1 = 0$ В.

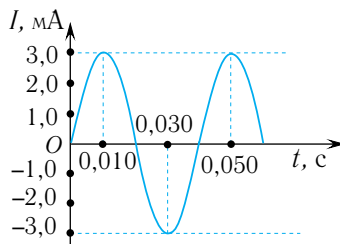


Практыкаванне 8

1. У рамцы, якая раўнамерна верціцца ў аднародным магнітным полі, індукцуюецца электрычны ток. Закон змянення сілы току задаецца суадносінай $I = 10 \sin(2\pi t)$ (А). Вызначыце: а) амплітуднае I_0 значэнне сілы току; б) перыяд T і частату ν яго ваганняў; в) значэнне I_1 сілы току ў момант часу $t = 20$ мс.
2. Запішыце закон змянення сілы току $I(t)$ ад часу, зыходзячы з графіка на малюнку 62. Вызначыце сілу току ў момант часу: а) $t_1 = 5,0$ мс; б) $t_2 = 15,0$ мс.
3. Запішыце закон змянення сілы току $I(t)$ ад часу, зыходзячы з графіка на малюнку 63. Вызначыце сілу току ў момант часу: а) $t_1 = 0,010$ с; б) $t_1 = 0,025$ с.

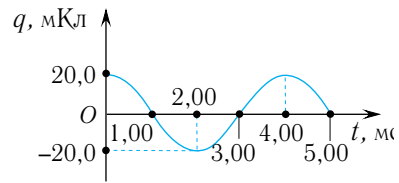


Мал. 62. Графік залежнасці сілы току I ад часу ў вадзільным контуры



Мал. 63. Графік залежнасці сілы току I ад часу ў вадзільным контуры

4. Запішыце закон змянення зараду на абкладках кандэнсатара ад часу, зыходзячы з графіка на малюнку 64. Вызначыце зарад у момант часу: а) $t_1 = 1,50$ мс; б) $t_2 = 3,80$ мс. Вызначыце амплітуднае I_0 значэнне сілы току.



Мал. 64. Графік залежнасці зараду q ад часу t у вагальным контуры

5. У ланцугу пераменнага току напружанне змяняецца па законе $U = U_0 \sin \omega t$, дзе $U_0 = 200$ В, $\omega = 50\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Вызначыце частату ν пераменнага току. На якое напружанне U павінна быць разлічана ізаляцыя праводу?
6. Сіла току ў ланцугу пераменнага току змяняецца па законе $I = I_0 \sin \omega t$, дзе $I_0 = 3,0$ А, $\omega = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Вызначыце частату ν ваганняў току ў ланцугу.
7. Напружанне на ўчастку электрычнага ланцуга, па якім праходзіць пераменны ток, змяняецца з цягам часу па законе $U(t) = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$ (В). Вызначыце амплітуднае значэнне напружання U_0 , калі ў момант часу $t = \frac{T}{6}$ імгненнае значэнне напружання $U = 6,0$ В.

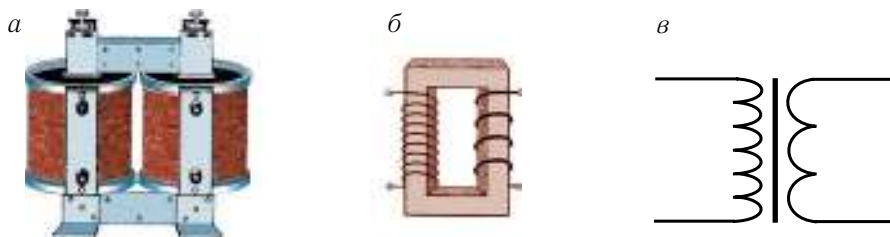


§ 9. Пераўтварэнне пераменнага току. Трансфарматар

Для выкарыстання пераменнага току на вытворчасці і ў побыце неабходна ўмець змяняць яго параметры ў адпаведнасці з запытамі таго ці іншага спажыўца. Для гэтага створаны адмысловыя прылады, якія дазваляюць павялічваць ці паніжаць напружанне ў электрычным ланцугу. Якую будову яны маюць? Чаму катэгарычна забараняецца знаходзіцца ў памяшканні, прызначаным для працы толькі такой прылады?

Генератары пераменнага току ствараюць з разлікам на пэўныя значэнні напружання. Для практычнага выкарыстання электрычнай энергіі ў разнастайных прыладах і прыборах неабходны розныя значэнні напружанняў. Для гэтага выкарыстоўваюцца *трансфарматары* (ад лац. *transformo* — пераўтвараю).

Першую мадэль (прататып) трансфарматара стварыў у 1831 г. Майкл Фарадэй, намотаўшы на жалезнае кольца дзве ізаляваныя абмоткі,



Мал. 65. Трансфарматар:

а — агульны выгляд; *б* — схематычны відарыс; *в* — умоўнае абазначэнне

якія выкарыстоўваў у сваіх эксперыментах. У 1878 г. рускі вучоны Павел Мікалаевіч Яблчкаў упершыню выкарыстаў трансфарматар для змянення напружання сілкавання вынайздзеных ім крыніц святла — «электрычных свечак».

Трансфарматар (мал. 65, *а*) — гэта электрамагнітная прылада, якая пераўтварае пераменны ток аднаго напружання ў пераменны ток іншага напружання з захаваннем яго частаты.

Трансфарматар, які павялічвае напружанне, называюць *павышаючым*, а які памяншае — *паніжаючым*. Схематычны відарыс і ўмоўнае абазначэнне трансфарматара на электрычных схемах паказаны, адпаведна, на малюнках 65, *б*, *в*.

Самы просты трансфарматар складаецца з дзвюх абмотак (шпуль), надзетых на агульны замкнуты стрыжань (гл. мал 65, *а*). Абмотка трансфарматара, на якую падаецца пераменнае напружанне, называецца *першаснай*, а абмотка, з якой здымаецца ператворанае пераменнае напружанне, — *другаснай*. Лік віткоў у першаснай абмотцы трансфарматара абазначым N_1 , а ў другаснай — N_2 .

Абмоткі трансфарматара могуць быць размешчаны на стрыжані розным чынам (мал. 66).



Мал. 66. Розныя размяшчэнні абмотак трансфарматараў

Прынцып дзеяння трансфарматара заснаваны на з'яве электрамагнітнай індукцыі. Магнітнае поле, якое ствараецца пераменным токам у першаснай абмотцы (гл. мал. 65, *а*), дзякуючы наяўнасці замкнутага стрыжня практычна без страт (без рассявання) пранізвае віткі другаснай абмоткі. Для гэтага стрыжань вырабляецца

са спецыяльнага (ферамагнітнага) матэрыялу, што дазваляе ствараемае токам у абмотках поле практычна цалкам лакалізаваць унутры стрыжня. У выніку магнітны паток практычна існуе толькі ўсярэдзіне стрыжня і аднолькавы ва ўсіх сячэннях. Гэта дазваляе лічыць імгненныя значэнні магнітных патокаў ва ўсіх сячэннях стрыжня аднолькавымі.

Няхай першасная абмотка трансфарматара падключана да крыніцы току з пераменнай ЭРС і на яе падаецца напружанне U_1 . Калі не ўлічваць страты магнітнага патоку ў стрыжні, то згодна з законам Фарадэя ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў кожным вітку другаснай абмоткі, будзе такой жа, як ЭРС індукцыі ў кожным вітку першаснай абмоткі. Такім чынам, адносіна ЭРС у першаснай $\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ і другаснай $\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ абмотках роўна адносіне ліку віткоў у іх:

$$\mathcal{E}_1 : \mathcal{E}_2 = \frac{N_1 e}{N_2 e} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

дзе e — значэнне ЭРС індукцыі ў адным вітку.

З прычыны маласці электрычных супраціўленняў абмотак напружанні на іх можна лічыць:

$$U_1 \approx \mathcal{E}_1, U_2 \approx \mathcal{E}_2. \quad (2)$$

З суадносіны (2) вынікае:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1, \quad (3)$$

г. зн. значэнне напружання U_2 на другаснай абмотцы прапарцыянальна значэнню напружання U_1 на першаснай абмотцы.

Як вынікае з выразу (3), у залежнасці ад адносіны ліку віткоў у абмотках напружанне U_2 можа быць як большым за напружанне U_1 (трансфарматар павышаючы), так і меншым за яго (трансфарматар паніжаючы).

Тып трансфарматара вызначаецца каэфіцыентам трансфармацыі, роўным адносіне ліку віткоў першаснай шпулі да ліку віткоў другаснай:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (4)$$



Мал. 67. Трансфарматар з масленым ахаладжэннем

Як вынікае з суадносіны (4), пры $k > 1$ напружанне на другаснай абмотцы будзе меншым за напружанне на першаснай ($U_2 < U_1$). Значыць, у гэтым выпадку трансфарматар будзе *паніжаючым*. Аднак, пры $k < 1$ трансфарматар будзе *павышаючым*.

Для прадухілення перагрэву магутных трансфарматараў выкарыстоўваецца масленае ахаладжэнне (мал. 67).

Сучасныя трансфарматыры з'яўляюцца ўнікальнымі прыладамі, паколькі маюць вельмі высокія ККДз (да 98—99 %), г. зн. працуюць практычна без страт.



1. Што называецца трансфарматарам? Апішыце будову найпрасцейшага трансфарматара.
2. На якой фізічнай з'яве заснаваны прыцып дзеяння трансфарматара?
3. Што называюць каэфіцыентам трансфармацыі?
4. Які трансфарматар называецца павышаючым? Паніжаючым?



§ 10. Вытворчасць, перадача і выкарыстанне электрычнай энергіі

■ Жыццё сучаснага грамадства немагчыма ўявіць без выкарыстання электраэнергіі. Дзе і як яна вырацоўваецца? Як трапляе ў нашы дамы?

Дзякуючы адкрыццю з'явы электрамагнітнай індукцыі і вынаходству генератараў электрычнага току ўзнікла магчымасць ператварэння механічнай энергіі ў электрычную. Электрычная энергія вырацоўваецца на электрастанцыях. У залежнасці ад віду крыніцы энергіі ўсе сучасныя электрастанцыі дзеляцца на цеплавыя, атамныя і гідраэлектрастанцыі. Прывядзём характарыстыкі асноўных тыпаў электрастанцый.

Цеплавые электрастанцыі (ЦЭС) выкарыстоўваюць цеплату, што атрымліваецца пры спальванні вугалю, нафты, мазуты, прыроднага газу і іншых гаручых выкапняў (ККДз $\eta = 40\%$).

Гідраэлектрастанцыі (ГЭС) выкарыстоўваюць энергію руху вады рэк, вадасховішчаў і іншых водных патокаў (ККДз $\eta = 90—93\%$).

Атамныя электрастанцыі (АЭС) працуюць на энергіі, якая вылучаецца пры расшчапленні ядраў урану і плутонію (ККДз $\eta = 20\text{—}25\%$).

Электраэнергію, выпрацаваную на электрастанцыі, неабходна даставіць спажыўцу. Пры перадачы электраэнергіі ад электрастанцыі да буйных прамысловых цэнтраў і гарадоў найбольш часта выкарыстоўваюць правадныя лініі перадач, якія з'яўляюцца надзейным і параўнальна недарогім спосабам перадачы энергіі. У адпаведнасці з законам Джоўля — Ленца страты на награванне правадоў (за адзінку часу) складаюць:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{I_0^2 R}{2}, \quad (1)$$

дзе I_0 — амплітуднае значэнне сілы току ў лініі электраперадачы, R — супраціўленне правадоў.

Гэтых страт нельга пазбегнуць, але іх можна паменшыць. З формулы (1) вынікае, што для гэтага трэба, па магчымасці, паменшыць як супраціўленне лініі электраперадачы, так і значэнне сілы току ў ёй.

Аднак памяншэнне электрычнага супраціўлення ($R = \rho \frac{l}{S}$) правадоў магчыма толькі за кошт павелічэння іх папярочнага сячэння, што прыводзіць да значнага павелічэння масы правадоў, г. зн. матэрыяльных выдаткаў. Паколькі памяншэнне сілы току ў n разоў у адпаведнасці з (1) зніжае цеплавую страту ў правадах у n^2 разоў, то найбольш эфектыўна перадаваць электраэнергію пры мінімальным значэнні сілы току.

Адно і тую ж магутнасць электрычнага току ў адпаведнасці з суадносінай $P = IU$ можна атрымліваць рознымі спалучэннямі напружання і сілы току, г. зн., павялічваючы напружанне і памяншаючы сілу току, можна пакідаць перадаваемую магутнасць нязменнай. Пры гэтым страты на награванне правадоў будуць памяншацца. Трэба адзначыць, што спалучэнне высокага напружання і малой сілы току непрыдатна для прымянення ў бытавых электрычных прыборах — у іх напружанне павінна быць нізкім як для бяспекі, так і для спрашчэння іх канструкцыі. Такім чынам, для перадачы электрычнай энергіі да спажыўца неабходна выкарыстоўваць высокае напружанне, а пры выкарыстанні ў быце — нізкае.

Для захавання велічыні магутнасці, якая перадаецца па лініі перадач, значэнне напружання павышаюць у столькі разоў, у колькі памяншаюць значэнне сілы току ($I_1 U_1 \approx I_2 U_2$). Таму на практыцы



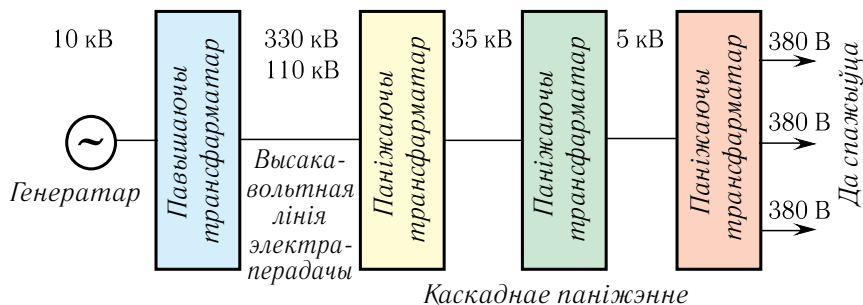
Мал. 68. Высакавольтная лінія электраперадачы

выкарыстоўваюць высакавольтныя (сотні тысяч вольт) лініі перадач (мал. 68). Велічыня напружання ў лініі перадачы абмяжоўваецца магчымасцю надзейнай ізаляцыі і сцякання зараду з правадоў у атмасферу пры каронным разрадзе. Гэта велічыня складае ~ 100 кВ. З аднаго боку, генератары пераменнага току на электрастанцыях даюць напружанні, не большыя за 16—20 кВ, з другога боку, такія напружанні не могуць прапаноўвацца спажыўцу.

Для бяспечнага абслугоўвання спажыўцоў энергіі (станкоў, бытавых прыбораў і іншых спажыўцоў) напружанне на іх павінна быць нізкім, што лёгка дасягаецца пры выкарыстанні паніжаючых трансфарматараў. Паніжэнне напружання звычайна адбываецца ў некалькі этапаў.

Разгледзім блок-схему перадачы і размеркавання электраэнергіі (мал. 69): генератар пераменнага току (10—20 кВ) $\Rightarrow$ павышаючы трансфарматар (да 110 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ) $\Rightarrow$ высакавольтныя лініі электраперадачы $\Rightarrow$ каскаднае паніжэнне напружання (да 35 кВ, 5 кВ) $\Rightarrow$ паніжаючы трансфарматары (да 220 В, 127 В, 380 В, 660 В) $\Rightarrow$ спажывец.

У сучасным грамадстве выкарыстанне электраэнергіі размяркоўваецца прыкладна наступным чынам: прамысловасць — 70 %; транспарт — 15 %; сельская гаспадарка — 10 %; бытавое выкарыстанне — 5 %.



Мал. 69. Блок-схема перадачы электраэнергіі

► У цяперашні час усё большае распаўсюджанне атрымліваюць лініі перадач, якія працуюць на пастаянным току. Хоць пераўтварэнне пастаяннага напружання больш складанае і дарагое, але пастаянны ток у параўнанні з пераменным мае шэраг пераваг.

Па-першае, пастаянны ток у адрозненне ад пераменнага не стварае пераменных магнітных палі, якія індукуюць токі ў бліжэйшых правадніках, што прыводзіць да страт магутнасці.

Па-другое, пастаянны ток можна перадаваць пры больш высокім напружанні, паколькі дзеючае напружанне ў ланцугу роўна амплітуднаму, і можна не баяцца электрычнага прабою ізалятара ці паветра пры тым жа дзеючым напружанні.



1. Дзякуючы якой з'яве атрымалася магчымасць выпрацоўкі электраэнергіі?
2. Якія тыпы электрастанцый вы ведаеце?
3. Як ажыццяўляецца перадача электраэнергіі на вялікую адлегласць?
4. Чаму, чым даўжэйшая лінія перадачы, тым больш выгадна карыстацца высокім напружаннем?

§ 11. Экалагічныя праблемы вытворчасці і перадачы электрычнай энергіі

■ Як уплывае вытворчасць і выкарыстанне электраэнергіі на навакольнае асяроддзе?

Развіццё цывілізацыі суправаджаецца бесперапынным ростам энергаспажывання на нашай планеце. Аднак запасы прыроднага паліва (нафты, прыроднага газу, вугалю, торфу) і іншых карысных выкапняў на Зямлі абмежаваныя, паколькі з-за змянення геалагічных умоў іх фарміраванне ў цяперашні час практычна спынілася.

Відавочным лідарам сярод энерганосьбітаў на сённяшні дзень з'яўляецца нафта, паколькі яе параўнальна лёгка здабываць, транспартаваць, ачышчаць і выкарыстоўваць. Акрамя гэтага, нафта таксама з'яўляецца сыравінай пры вырабе фарбаў, лекаў, пластмас, валокнаў і многіх іншых сінтэтычных матэрыялаў.

Па розных ацэнках, у цяперашні час выпрацавана каля 60 % разведаных асноўных радовішчаў вугалю і нафты.

На тэрыторыі Беларусі да асноўных відаў паліўных рэсурсаў, якія здабываюцца, адносяцца дровы і торф.

Праца электрастанцый з прычыны іх значнай магутнасці істотным чынам уплывае на стан навакольнага асяроддзя і прыводзіць да з'яўлення наступных экалагічных праблем:

ЦЭС — забруджванне атмасферы прадуктамі згарання, змяненне прыроднага цеплавога балансу з-за расейвання цеплавой энергіі;

ГЭС — змяненне клімату, парушэнне экалагічнай раўнавагі, памяншэнне ворных плошчаў;

АЭС — небяспека радыеактыўнага забруджвання асяроддзя пры аварыях, праблемы пахавання радыеактыўных адходаў.

Адной з галоўных экалагічных праблем сучаснасці з’яўляецца рост выкідаў у атмасферу прадуктаў згарання паліва (у першую чаргу вуглякіслага газу). Вуглякіслы газ «ахутвае» Зямлю падобна плёнцы, перашкаджаючы яе ахаладжэнню. Гэта прыводзіць да парніковага эфекту, пры якім сярэдняя тэмпература на Зямлі павольна павышаецца. Аднак, за апошнія дзесяцігоддзі на планеце адбываецца *глобальнае пацяпленне*, якое, паводле прагнозаў вучоных, можа прывесці да незваротных змяненняў у клімаце Зямлі.

Рост энергаспажывання прымусівае вучоных і інжынераў шукаць **альтэрнатыўныя крыніцы энергіі**, якія мелі б **аднаўляльны** характар, г. зн. у адрозненне ад нафты і газу, маглі б самастойна аднаўляцца з цягам часу.

Да аднаўляльных крыніц энергіі адносяць вецер, нетры Зямлі (геатэрмальную энергію), марскія прылівы, а таксама сонечнае выпраменьванне, якое выкарыстоўваецца напрамую. Таму асноўнымі відамі альтэрнатыўнай энергетыкі з’яўляюцца ветраэнергетыка, геатэрмальная энергетыка, прыліўная энергетыка, геліяэнергетыка.

Ветраэнергетыка — выкарыстанне кінетычнай энергіі ветру для атрымання электраэнергіі. Энергія ветру ўжо досыць паспяхова пераўтвараецца ў электраэнергію ў шматлікіх невялікіх ветраных генераторах у зонах устойлівых вятроў (мал. 70).

Геатэрмальная энергетыка — выкарыстанне натуральнага цяпла Зямлі для выпрацоўкі электрычнай энергіі. Геатэрмальная энергія ў месцах натуральных разломаў зямной кары выкарыстоўваецца для патрэб ча-



Мал. 70. Ветраны генератар

лавека. Напрыклад, сталіца Ісландыі — Рэйк’явік цалкам ацяпляецца за кошт геатэрмальных крыніц. Запасы геатэрмальной энергіі дастаткова вялікія, аб чым можна меркаваць па велічэзнай разбуральнай сіле землетрасенняў і вывяржэнняў вулканаў і гейзераў.

Прыліўная энергетыка выкарыстоўвае энергію марскіх прыліваў. У цяперашні час робяцца першыя крокі для

выкарыстання энергіі акіянічных прыліваў і адліваў. Інжынерная ідэя падобных праектаў простая: выкарыстаць перапад узроўняў вады падчас прыліву і адліву для вярчэння вадой гідратурбін, каб на злучаных з імі гідрагенератарых вырабляць электрычнасць.

Геліяэнергетыка — атрымання электрычнай энергіі з энергіі сонечнага выпраменьвання. Развіццё сучасных тэхналогій дазваляе эфектыўна выкарыстоўваць энергію, выпрацоўваемую сонечнымі батарэямі. Так у паўднёвых шыротах энергіі падобных батарэй, усталяваных на даху, хапае для энергазабеспячэння невялікага дома.

Сучасныя тэхналогіі дазваляюць, выкарыстоўваючы сонечныя батарэі, атрымліваць электрычную энергію ад сонечнага выпраменьвання не толькі на Зямлі, але і ў космасе (мал. 71).

Ёсць вельмі смелыя праекты, у якіх прапануецца размясціць сонечныя батарэі ў бліжэйшым космасе на адлегласці 36 000 км ад паверхні Зямлі. Гэта так званая «сінхронная» арбіта, на якой батарэі будуць «нерухомымі» адносна зямнога назіральніка, паколькі перыяд іх звароту будзе роўны 24 г. У гэтым выпадку батарэі будуць знаходзіцца ў цені Зямлі толькі 2 % часу, што дазволіць вырабляць у дзясяткі разоў больш энергіі, чым на Зямлі. Энергія Сонца, ператвораная ў электрамагнітны пучок звышвысокай частаты, будзе перадавацца на вялікія антэны на Зямлі.

Перавага аднаўляльных крыніц энергіі заключаецца ў тым, што іх выкарыстанне не прыводзіць да небяспечнага забруджвання навакольнага асяроддзя.



Мал. 71. Сонечныя батарэі ў космасе

► Праекты будучага прапануюць выкарыстоўваць у якасці аднаўляльных крыніц энергіі каласальную энергію акіянічных і паветраных цячэнняў, трапічных ураганаў і тарнада. Асноўная прычына іх фарміравання — нераўнамернае награванне Сонцам розных участкаў паверхні Зямлі.



1. Назавіце альтэрнатыўныя спосабы атрымання электраэнергіі, якія не забруджваюць навакольнае асяроддзе.
2. Ці абмежаваны запасы прыроднага паліва на нашай планеце?
3. Пералічыце найбольш распаўсюджаныя віды прыроднага паліва.

4. Якая частка прыродных радовішчаў паліва асвоена на сённяшні дзень?
5. Якія віды прыроднага паліва здабываюцца ў Беларусі?
6. У чым заключаецца сутнасць парніковага эфекту? Чым небяспечна глабальнае пацяпленне?
7. Якія крыніцы энергіі называюцца аднаўляльнымі?
8. Пералічыце асноўныя праекты выкарыстання аднаўляльных крыніц энергіі. Якія з іх з'яўляюцца найбольш перспектыўнымі для Беларусі?
9. Што з'яўляецца самай распаўсюджанай крыніцай энергіі ў Сусвеце?

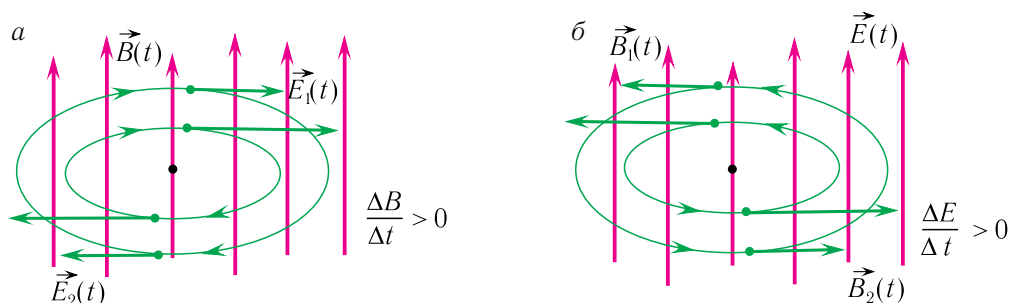
§ 12. Электрамагнітныя хвалі і іх уласцівасці. Шкала электрамагнітных хваль

Практычна да пачатку XX ст. чалавечая цывілізацыя не ведала аб існаванні электрамагнітных хваль, выкарыстанне ўласцівасцей якіх кардынальна змяніла быт сучасных людзей. Як цеплавое выпраменьванне Сонца дасягае Зямлі праз халодныя прасторы космасу? Ці канечная скорасць святла? Як ажыццяўляецца сувязь з касманаўтамі на калязямной арбіце?

Упершыню гіпотэзу аб існаванні электрамагнітных хваль выказаў у 1864 г. англійскі фізік Джэймс Максвел. У сваіх працах ён паказаў, што крыніцамі электрычнага поля могуць быць як электрычныя зарады, так і магнітныя палі, якія змяняюцца ў часе.

У сваю чаргу магнітныя палі могуць узбуджацца або рухаючымі электрычнымі зарадамі (электрычным токам), або пераменнымі электрычнымі палямі.

Змяненне індукцыі магнітнага поля з цягам часу выклікае з'яўленне ў навакольнай прасторы вихравага электрычнага поля. Сілавыя лініі гэтага поля замкнутыя і ахопліваюць лініі індукцыі магнітнага поля, і напружанасць $\vec{E}(t)$ у любым пункце прасторы перпендыкулярна да індукцыі $\vec{B}(t)$ магнітнага поля (мал. 72, а).



Мал. 72. Пераменныя электрычныя (а) і магнітныя (б) палі, якія параджаюць адно аднаго

Максвел выказаў здагадку, што любое змяненне напружанасці віхравого электрычнага поля суправаджаецца ўзнікненнем пераменнага магнітнага поля (мал. 72, б). Далей гэты працэс можа паўтарацца «да бясконцасці», паколькі палі змогуць папераменна аднаўляць адно аднаго нават у вакууме.

Такім чынам, у вакууме ўзнікае сістэма зменных электрычных і магнітных палёў, якія ўзаемяна падтрымліваюць адно аднаго і захопліваюць усё большыя і большыя абсягі прасторы (мал. 73).

Сукупнасць узаемазвязаных электрычнага і магнітнага палёў, якія перыядычна змяняюць адно аднаго, называюць пераменным **электрамагнітным полем**. Паводле тэорыі Максвела електрамагнітнае поле распаўсюджваецца ў прасторы з канчатковай скорасцю.

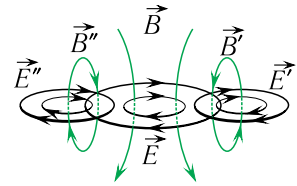
Разгледзім больш падрабязна працэс утварэння електрамагнітнага поля ў прасторы вакол правадніка.

Няхай у правадніку ўзбуджаны електрамагнітныя ваганні, у выніку чаго сіла электрычнага току ў ім бесперапынна змяняецца. Паколькі сіла току звязана са скорасцю руху свабодных зарадаў у правадніку, то скорасць руху апошніх таксама будзе бесперапынна змяняцца з цягам часу. Гэта гаворыць аб тым, што свабодныя зарады ўнутры правадніка будуць рухацца з паскарэннем.

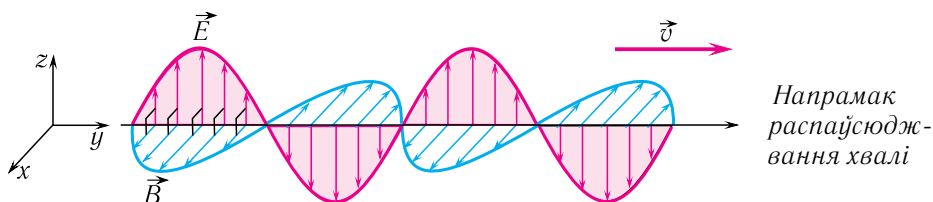
Паводле тэорыі Максвела пры паскораным руху свабодных зарадаў у правадніку ў прасторы вакол яго ствараецца пераменнае магнітнае поле, якое параджае пераменнае віхравое электрычнае поле. Апошнія, у сваю чаргу, зноў выклікае з'яўленне пераменнага магнітнага поля ўжо на большай адлегласці ад зараду і г. д. Такім чынам, у прасторы вакол правадніка ўтвараюцца ўзаемазвязаныя электрычныя і магнітныя палі, якія распаўсюджваюцца з цягам часу ў выглядзе хвалі.

Электрамагнітнае поле, якое распаўсюджваецца ў вакууме або ў якім-небудзь асяроддзі з канечнай скорасцю, называецца **электрамагнітнай хваляй** (мал. 74).

Электрамагнітныя хвалі з'яўляюцца папярочнымі. У іх напрамкі ваганняў вектараў напружанасці $\vec{E}$ электрычнага поля і індукцыі $\vec{B}$ магнітнага поля хвалі адбываюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі (гл. мал. 74).



Мал. 73. Утварэнне електрамагнітнай хвалі



Мал. 74. Схематычны відарыс электрамагнітнай хвалі

Падобна да пругкіх механічных хваль электрамагнітныя хвалі адбіваюцца ад перашкод, маюць праламленне на межах падзелу асяроддзяў. Але ў адрозненне ад пругкіх хваль электрамагнітныя хвалі могуць распаўсюджвацца і ў вакууме.



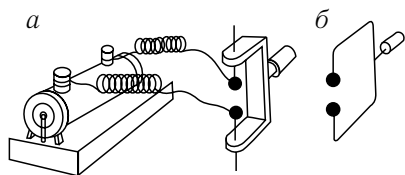
Адным з найважнейшых вынікаў тэорыі Максвела было тэарэтычнае вызначэнне модуля скорасці распаўсюджвання электрамагнітных хваль (святла). Згодна з гэтай тэорыяй, модуль скорасці распаўсюджвання c электрамагнітнай хвалі ў вакууме звязаны з электрычнай пастаяннай ϵ_0 і магнітнай пастаяннай μ_0 наступнай суадносінай:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Скорасць распаўсюджвання электрамагнітных хваль у вакууме з'яўляецца максімальнай (гранічна) дасягальнай велічынёй. У любым рэчыве скорасць іх распаўсюджвання меншая за c і залежыць ад яго электрычных і магнітных уласцівасцей.

Супадзенне скорасці электрамагнітных хваль са скорасцю святла дало магчымасць Максвелу выказаць здагадку, што святло мае электрамагнітную прыроду. Дзякуючы гэтаму адбылося аб'яднанне ў адно вучэнне оптыкі і электрамагнетызму.

Электрамагнітныя хвалі былі эксперыментальна адкрыты нямецкім фізікам Генрыхам Герцам ў 1887 г. Для іх генерацыі ён выкарыстаў спецыяльную прыладу (мал. 75, а), якая пасля атрымала назву *вібратар Герца*.



Мал. 75. Схематычны відарыс эксперыментальнай устаноўкі Герца: а — вібратар Герца; б — прыёмны контур

Герц даследаваў электрамагнітнае поле, якое выпраменьвае вібратар. У паветраным зазоры паміж шарамі пры пераменным напружанні, якое дасягае значэння прабою паветра, адбываўся іскрывы разрад. Пры гэтым у вібратары ўзнікалі электрамагнітныя ваганні высокай часта-

ты. Індыкатарам электрамагнітных хваль, якія ўзнікалі ў доследах Герца, служыла іскра, якая ўтваралася ў прыёмным контуры (мал. 75, б). Памеры прыёмнага контуру (у форме прамавугольнага контуру або кольца) выбіраліся такім чынам, каб уласная частата ваганняў, што ўзнікаюць у ім, была роўна частаце хваль, што выпраменьваюцца.

Змяняючы становішча прыёмнага контуру адносна вібратора і назіраючы з'яўленне ў ім іскры, Герц вызначаў наяўнасць поля ў розных пунктах прасторы. Такім чынам, Герц эксперыментальна даказаў існаванне электрамагнітных хваль.

У сваіх эксперыментах, праведзеных у 1887—1891 гг., Герц здолеў не толькі пераканаўча даказаць існаванне электрамагнітных хваль, але і выявіць іх асноўныя ўласцівасці. Пeralічым асноўныя ўласцівасці электрамагнітных хваль:

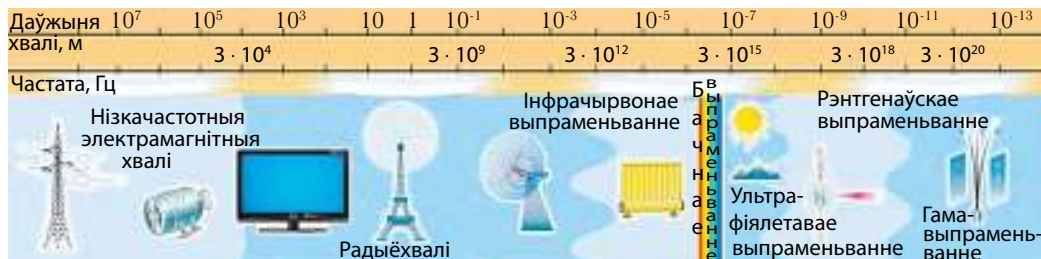
- распаўсюджваюцца не толькі ў розных асяроддзях, але і ў вакууме;
- у вакууме распаўсюджваюцца са скорасцю $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
- адбіваюцца і праламляюцца на межах падзелу асяроддзяў;
- з'яўляюцца папярочнымі.

Спектр электрамагнітнага выпраменьвання зручна паказваць у выглядзе шкалы электрамагнітных хваль, прыведзенай на малюнку 76.

Уласцівасці электрамагнітных хваль вельмі моцна залежаць ад іх частаты. Выпраменьванне электронаў, абумоўленае іх рухам у правадніках, дазваляе генерыраваць электрамагнітныя хвалі з частатой да 10^{12} Гц. Для генерацыі выпраменьванняў з частатой вышэй за 10^{12} Гц выкарыстоўваюць выпраменьванне атамаў. Верхняя мяжа частот, якія могуць генерыраваць атамныя сістэмы, роўна 10^{30} Гц.

Выпраменьванні больш высокіх частот (гама-выпраменьванне) выпраменьваюцца атамнымі ядрамі.

Класіфікацыя электрамагнітных хваль у залежнасці ад частот (даўжынь хваль) дадзена ў табліцы 7.



Мал. 76. Шкала электрамагнітных хваль

Табліца 7. Класіфікацыя электрамагнітных хваль

Віды выпраменьвання	Інтэрвал частот, Гц; (даўжынь хваль (вакуум), м)	Крыніцы выпраменьвання	Прыёмнікі выпраменьвання (выкарыстанне)
Нізкачастотныя хвалі	$< 3 \cdot 10^3$ ($> 1 \cdot 10^5$)	Генератары пераменнага току, электрычныя машыны	Перадача электрычнай энергіі, апрацоўка металаў
Радыёхвалі	$3 \cdot 10^3—3 \cdot 10^9$ ($1 \cdot 10^5—1 \cdot 10^{-1}$)	Вагальныя контуры, вібратары Герца	Вагальныя контуры электрычных ланцугоў, сувязь і навігацыя
Мікрахвалі	$3 \cdot 10^9—1 \cdot 10^{12}$ ($1 \cdot 10^{-1}—1 \cdot 10^{-4}$)	Мазеры, паўправадніковыя прылады	Ваганні малекул, гатаванне ежы, награванне
Інфрачырвоное выпраменьванне	$1 \cdot 10^{12}—4 \cdot 10^{14}$ ($1 \cdot 10^{-4}—7 \cdot 10^{-7}$)	Сонца, электралампы, лазеры, касмічнае выпраменьванне	Скура чалавека, сушка, цеплавое фотакапіраванне
Бачнае выпраменьванне	$4 \cdot 10^{14}—8 \cdot 10^{14}$ ($7 \cdot 10^{-7}—4 \cdot 10^{-7}$)	Сонца, электралампы, лазеры, святлодыёды	Вока чалавека
Ультрафіялетавае выпраменьванне	$8 \cdot 10^{14}—1 \cdot 10^{16}$ ($4 \cdot 10^{-7}—3 \cdot 10^{-8}$)	Сонца, касмічнае выпраменьванне, лазеры, электралампы	Скура чалавека (загар, лячэнне захворванняў скуры), знішчэнне бактэрый, сігналізацыя
Рэнтгенаўскае выпраменьванне	$1 \cdot 10^{16}—3 \cdot 10^{20}$ ($3 \cdot 10^{-8}—1 \cdot 10^{-10}$)	Бэтатроны, сонечная карона, нябесныя целы, рэнтгенаўскія трубки	Іянізацыя, лічылнік Гейгера — Мюлера, рэнтгенаграфія, радыялогія, выяўленне падробак твораў мастацтва

Працяг

Віды выпраменьвання	Інтэрвал частот, Гц; (даўжынь хваль (вакуум), м)	Крыніцы выпраменьвання	Прыёмнікі выпраменьвання (выкарыстанне)
Гама-выпраменьванне	$3 \cdot 10^{18} — 3 \cdot 10^{29}$ ($1 \cdot 10^{-10} — 1 \cdot 10^{-21}$)	Касмічнае выпраменьванне, радыеактыўныя распады, бэтатрон, цыклатрон	Стэрылізацыя, медыцына, лячэнне раку

У цяперашні час электрамагнітныя хвалі знаходзяць шырокае прымяненне ў навуцы і тэхніцы, у такіх працэсах і з’явах як:

- плаўленне і загартоўка металаў у электратэхнічнай прамысловасці, выраб пастаянных магнітаў (*нізкачастотныя хвалі*);
- тэлебачанне, радыёсувязь, радыёлакацыя (*радыёхвалі*);
- мабільная сувязь, радыёлакацыя (*мікрахвалі*);
- зварка, рэзка, плаўленне металаў лазерамі, прыборы начнога бачання (*інфрачырвоае выпраменьванне*);
- асвятленне, галаграфія, лазеры (*бачнае выпраменьванне*);
- люмінесценцыя ў газаразрядных лямпах, лазеры (*ультрафіялетавае выпраменьванне*);
- рэнтгенатэрапія, рэнтгенаструктурны аналіз, лазеры (*рэнтгенаўскае выпраменьванне*);
- дэфектаскапія, дыягностыка і тэрапія ў медыцыне, даследаванне ўнутранай структуры атамаў, ваенная справа (*гама-выпраменьванне*).

► 7 мая 1895 г. рускі вучоны Аляксандр Сцяпанавіч Папоў на паседжанні Рускага фізіка-хімічнага грамадства ў Санкт-Пецярбургу паведаміў аб магчымасці прыёму электрамагнітных сігналаў на адлегласці. А ўжо 18 снежня 1897 г. ён перадаў на адлегласць 250 м першую ў свеце радыёграму з двух слоў «Heinrich Hertz» (Генрых Герц) у гонар першага ў свеце чалавека, які выявіў электрамагнітныя хвалі.



У 1901 г. італьянскі інжынер Г. Марконі ўпершыню ажыццявіў радыёсувязь праз Атлантычны акіян. У 1909 г. ён атрымаў Нобелеўскую прэмію па фізіцы за развіццё радыётэхнікі і распаўсюджванне радыё як сродку сувязі.



1. Што з’яўляецца крыніцай вярховага электрычнага поля?
2. Чым адрозніваецца вярховае электрычнае поле ад: а) магнітнага; б) электростатычнага?

3. Што называецца электрамагнітнай хваляй?
4. Пералічыце асноўныя інтэрвалы частот (даўжынь хваль), якія адпавядаюць розным тыпам электрамагнітных хваль.
5. Чым электрамагнітныя хвалі адрозніваюцца ад механічных?
6. Прывядзіце прыклады прымянення электрамагнітных хваль розных частот.

Прыклад рашэння задачы

Радыёпрыёмнік настроены на радыёстанцыю, якая працуе на даўжыні хвалі $\lambda_1 = 25$ м. У колькі разоў n неабходна змяніць ёмістасць прыёмнага вагальнага контуру радыёпрыёмніка, каб настроіць яго на даўжыню хвалі $\lambda_2 = 31$ м?

Дадзена:	Рашэнне
$\lambda_1 = 25$ м	Даўжыня хвалі вызначаецца па формуле:
$\lambda_2 = 31$ м	$\lambda = cT,$
$n = ?$	дзе $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$

Па формуле Томсана:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Тады для двох даўжынь хваль можам запісаць:

$$\lambda_1 = c2\pi\sqrt{LC_1},$$

$$\lambda_2 = c2\pi\sqrt{LC_2}.$$

Падзяліўшы другое ўраўненне на першае, атрымаем:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}.$$

Адкуль

$$n = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2; \quad n = \left(\frac{31}{25}\right)^2 = 1,5.$$

Адказ: $n = 1,5$.

Практыкаванне 9

1. Радыёпрыёмнік прымае передачу на хвалі даўжынёй $\lambda = 15$ м. Вызначыце перыяд T і частату ν ваганняў току ў вагальным контуры прыёмніка.

2. Разлічыце адлегласць l да аб'екта, калі адбіты ад яго радыёсігнал вярнуўся праз прамежак часу $\tau = 3,0$ мкс.
3. Адпраўлены на Венеру радыёсігнал быў прыняты на Зямлі праз прамежак часу $\tau_1 = 4,5$ мін, а на Марс — праз прамежак часу $\tau_2 = 3,5$ мін. Вызначыце па гэтых даных адлегласці ад Зямлі да Венеры і ад Зямлі да Марса.
4. Вызначыце колькасць N даўжын хваль монахраматычнага выпраменьвання частотой $\nu = 150$ ГГц, якое змяшчаецца на адрэзку даўжынёй $l = 15$ м.
5. Вызначыце даўжыню хвалі λ_1 , на якую настроены радыёпрыёмнік, калі напружанне ў прыёмным контуры змяняецца па законе: $U(t) = 200 \cos(2 \cdot 10^4 \pi t)$ (В). Вызначыце таксама даўжыню хвалі λ_2 , якая выпраменьваецца перадачыкам, калі сіла току ў яго вагальным контуры змяняецца па законе $I = 0,400 \cos(6\pi \cdot 10^6 t)$ (А).
6. Вызначыце даўжыню хвалі λ , на якую настроены радыёпрыёмнік, калі яго вагальны контур змяшчае кандэнсатар ёмістасцю $C = 4,0$ нФ і шпулю індуктыўнасцю $L = 4,0$ мГн.
7. Ёмістасць пераменнага кандэнсатара вагальнага контуру змяняецца ад велічыні C да $64C$. Калі ёмістасць кандэнсатара роўна $8C$, то контур настроены на даўжыню хвалі $\lambda = 36$ м. Вызначыце дыяпазон $\Delta\lambda$ даўжын хваль, якія прымае радыёпрыёмнік з даздыным контурам.
8. Вызначыце адлегласць d_2 паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара, каб вагальны контур прыёмніка быў настроены на даўжыню хвалі $\lambda_2 = 120$ м, калі пры адлегласці паміж імі $d_1 = 3,6$ мм прыёмнік настроены на даўжыню хвалі $\lambda_1 = 150$ м.

§ 13. Дзеянне электрамагнітнага выпраменьвання на жывыя арганізмы

■ Нягледзячы на тое, што ўсе электрамагнітныя хвалі маюць аднолькавую прыроду, іх уласцівасці ў залежнасці ад даўжыні хвалі істотна змяняюцца. Дастаткова заўважыць, што дзякуючы бачнаму выпраменьванню мы можам атрымліваць асалоду ад усіх фарбаў навакольнага свету. Іншымі словамі, працэс гледжання становіцца магчымым дзякуючы існаванню электрамагнітных хваль пэўнага дыяпазону. Гэтыя ж хвалі з іншага дыяпазону могуць сагрэць, а могуць і таіць смяротную небяспеку. Ад чаго залежаць уласцівасці электрамагнітных хваль? Як чалавек выкарыстоўвае іх асаблівасці? Ці трэба асцерагацца электрамагнітнага выпраменьвання?

Уся навакольная прастора прасякнута рознымі электрамагнітнымі выпраменьваннямі і палямі.



Мал. 77. Асноўныя крыніцы
электрамагнітнага поля

Існуюць натуральныя і тэхнагенныя крыніцы электрамагнітных палёў. Натуральнымі крыніцамі электрамагнітных палёў з'яўляюцца: радыёвыпраменьванне Сонца і галактык, электрычнае і магнітнае палі Зямлі, атмасферная электрычнасць.

Бурнае развіццё навукі і тэхнікі ў XX ст. прывяло да стварэння крыніц тэхнагенных электрамагнітных палёў. Былі распрацаваны генератары электрамагнітных палёў, якія шыро-

ка выкарыстоўваюцца ў прамысловасці, сувязі, ваеннай тэхніцы, радыёнавігацыі, ахове здароўя, быце. Асноўнымі крыніцамі электрамагнітнага выпраменьвання з'яўляюцца лініі электраперадач, сетка электразабеспячэння, тэле- і радыёстанцыі, спадарожнікаявая і сатэлавая сувязь, радары, персанальныя камп'ютары (мал. 77).

Электрамагнітныя выпраменьванні могуць аказваць як дадатны, так і адмоўны ўплыў на жывыя арганізмы.

Разгледзім спачатку дадатнае ўздзеянне розных дыяпазонаў электрамагнітнага выпраменьвання.

Інфрачырвонае (цеплавое) выпраменьванне адыгрывае галоўную ролю ў падтрыманні жыцця на Зямлі, паколькі людзі, жывёлы і расліны могуць існаваць і нармальна функцыянаваць толькі пры пэўных тэмпературах. Гэта выпраменьванне шырока выкарыстоўваецца супрацоўнікамі МНС для знаходжання людзей у задымленых памяшканнях з дапамогай адмысловых інфрачырвоных прыбораў. Яно таксама дапамагае вучоным вывучаць паходжанне і эвалюцыю нашага Сусвету.

Бачнае святло дае людзям інфармацыю аб навакольным свеце і магчымасць арыентавацца ў прастору. Яно неабходна таксама для ажыццяўлення працэсу фотасінтэзу ў раслінах, у выніку чаго паглынаецца вуглякіслы газ і вылучаецца кісларод, патрэбны для дыхання жывых арганізмаў.

Прымяненне **ультрафіялетавага выпраменьвання** абумоўлена яго галоўнымі ўласцівасцямі: высокай хімічнай актыўнасцю, бактэрыцыдным дзеяннем. Так, напрыклад, ультрафіялетавыя лампы здольны

забіваць бактэрыі і мікраарганізмы, таму «кварцавыя» лампы шырока выкарыстоўваюцца для дэзінфекцыі паветра ў месцах масавага збору людзей: бальніцах, навучальных установах, вакзалах, метро.

Умераныя дозы ультрафіялетавага выпраменьвання (Сонца ці адмысловых лампаў, напрыклад, у салярыях) спрыяюць утварэнню ў нашай скуры вітаміна D, а таксама іншых рэчываў, якія ўплываюць на тонус і жыццядзейнасць арганізма.

Рэнтгенаўскае выпраменьванне знаходзіць шырокае прымяненне ў медыцыне — флюараграфічнае абследаванне ці рэнтгенаўскі здымак, напэўна, рабілі кожнаму з вас. Пры праходжанні рэнтгенаўскага выпраменьвання праз тканкі і органы чалавека ці жывёл на фотастужцы або экране фіксуюцца розныя (па ступені зацямнення) цені ў залежнасці ад шчыльнасці тканак. Выкарыстанне рэнтгенаўскага выпраменьвання пры лячэнні рака заснавана на тым, што яно забівае ракавыя клеткі.

Гама-выпраменьванне ўяўляе сабой самы шырокі дыяпазон электрамагнітнага спектру, паколькі ён не абмежаваны з боку высокіх энергій. Гэта выпраменьванне лёгка разбурае малекулы, у тым ліку і біялагічныя, але, на шчасце, не праходзіць праз атмасферу.

Шырокае выкарыстанне электрамагнітных прыбораў суправаджаецца нарастальным электрамагнітным забруджваннем навакольнага асяроддзя, што стварае пагрозу здароўю насельніцтва.

Асноўны ўплыў на здароўе чалавека аказваюць такія фактары электрамагнітнага выпраменьвання, як:

- інтэнсіўнасць;
- частата;
- рэжым апраменьвання (бесперапынны, перарывісты, імпульсны);
- працягласць уздзеяння;
- плошча ўздзеяння (мясцовае ці агульнае).

Праяўляцца гэта ўздзеянне можа ў рознай форме — ад малаважных змен у некаторых сістэмах арганізма да сур'ёзных парушэнняў.

Раней за іншых на электрамагнітныя хвалі рэагуе нервовая сістэма. Абследаванне вялікай колькасці пацыентаў дазволіла выявіць залежнасць функцыянальнага расстройтва цэнтральнай нервовай сістэмы (магнітнай, або радыёхвалевай хваробы) ад дозы электрамагнітнага выпраменьвання.

У бытавых прыборах, прамысловасці, радыёлакацыі шырока выкарыстоўваецца **мікрахвалевае выпраменьванне** (даўжыні хваль ад 1 мм да 1 м) (табл. 8).

Табліца 8. Перавышэнне дапушчальных норм электрамагнітнага выпраменьвання ў розных бытавых прыборах

Крыніца ЭМВ	Паказчыкі выпраменьвання, мкТл	Перавышэнне, разоў
Камп'ютар	1—100	5—500
Халадзільнік	1	5
Кававарка	10	50
Печка ЗВЧ	8—100	40—500
Фен і электрабрытва	15—17	75—85
Провад ад лампы	0,7	3,5
Трамвай, тралейбус	150	750
Метро	300	1500
Сотавы тэлефон	40	200

Адрозніваюць яго цеплавое і біялагічнае ўздзеянне.

Цеплавое ўздзеянне з'яўляецца вынікам паглынання энергіі выпраменьвання. Чым вышэйшая напружанасць поля і большы час яго ўздзеяння, тым мацней праяўляецца цеплавое ўздзеянне. Пры інтэнсіўнасці энергіі, большай за *цеплавы парог* ($I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$), у арганізме пачынаюцца неабарачальныя працэсы, паколькі ён не спраўляецца з адводам цеплаты і тэмпература цела павялічваецца.



Мал. 78. Біялагічнае дзеянне электрамагнітных палёў

Біялагічнае дзеянне праяўляецца ў аслабленні біялагічнай актыўнасці бялковых структур, парушэнні сардэчна-судзістай сістэмы і абмену рэчываў (мал. 78). Гэта ўздзеянне праяўляецца пры інтэнсіўнасці электрамагнітнага поля, меншай за *цеплавы парог*.

Уздзеянне мікрахвалевага выпраменьвання асабліва шкоднае для вачэй, мозга, нырак, страўніка, жоўцевага і мачаво-

га пузыроў — органаў, у якіх тканкі маюць слабаразвітую сасудзістую сістэму ці недастатковы кровазварот. Напрыклад, апраменьванне вачэй можа прывесці да памутнення хрусталіка (катаракты) і апёку рагавіцы.

Інфрачырвоае (цёплае) выпраменьванне, паглынаючыся тканкамі, выклікае цёплавы эффект. Гэта выпраменьванне найбольш пашкоджвае скурныя пакровы і вочы. Пры вострым пашкоджанні скуры магчымы апёкі, рэзкае расшырэнне капіляраў, узмацненне пігментацыі скуры. Пры хранічным апраменьванні з'яўляецца ўстойлівае змяненне пігментацыі, чырвоны колер твару, напрыклад у шкловыдзімальнікаў, сталявараў. Павышэнне тэмпературы цела пагаршае самаадчуванне чалавека, памяншае яго працаздольнасць.

Светлае выпраменьванне пры высокіх энергіях таксама небяспечна для скуры і вачэй. Пульсавы яркага святла пагаршаюць зрок, памяншаюць працаздольнасць, уздзеянне на нервовую сістэму.

Ультрафіялетавае выпраменьванне ў вялікай колькасці можа прывесці да апёкаў вачэй, нават да часовай ці поўнай страты зроку, вострага запалення скуры з пачырваненнем, часам з ацёкам і ўтварэннем пухіроў. Пры гэтым можа назірацца таксама павышэнне тэмпературы, дрыжкі, галаўны боль.

Уздзеянне **лазернага выпраменьвання** на чалавека залежыць ад інтэнсіўнасці выпраменьвання, даўжыні хвалі (інфрачырвонага, бачнага ці ультрафіялетавага дыяпазону), характару выпраменьвання (бесперапыннае ці імпульснае), часу ўздзеяння.

Занадта вялікія дозы ці частыя абследаванні з дапамогай *рэнтгенаўскіх прамянёў* могуць выклікаць сур'ёзныя захворванні.

► Знак, які папярэджвае аб дзеянні небяспечнага электрамагнітнага выпраменьвання паказаны на малюнку 79. Для вызначэння інтэнсіўнасці электрамагнітнага выпраменьвання выкарыстоўваецца спецыяльны прыбор — флюксметр. Бяспечным электрамагнітным выпраменьваннем лічыцца выпраменьванне з паказчыкам 0,2—0,3 мкТл.



Мал. 79. Знак «Небяспечнае электрамагнітнае выпраменьванне»



1. Назавіце асноўныя крыніцы электрамагнітнага выпраменьвання.
2. Якія асноўныя дзеянні на жывыя арганізмы аказвае ЗВЧ выпраменьванне?
3. Якое электрамагнітнае выпраменьванне здольна знішчаць бактэрыі і мікраарганізмы?

4. Ад якіх характарыстык электрамагнітнага выпраменьвання залежыць яго ўплыў на здароўе чалавека?
5. Які прыбор выкарыстоўваецца для вызначэння ўзроўню ЭМВ?
6. Чаму флюараграфію варта праводзіць не часцей за адзін раз у год?
7. Які тып ЭМВ найбольш небяспечны для здароўя чалавека?

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 2

Ідэальным вагальным контурам або **LC -контурам** называецца электрычны ланцуг, які складаецца з кандэнсатара і шпулі індуктыўнасці.

Перыяд электрамагнітных ваганняў у ідэальным вагальным контуры вызначаецца **формулай Томсана**:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Поўная энергія ідэальнага LC -контуру, роўная суме энергій электрычнага поля кандэнсатара і магнітнага поля шпулі, захоўваецца:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.}$$



Трансфарматар — прылада, якая пераўтварае пераменны ток аднаго напружання ў пераменны ток той жа частаты, але іншага напружання. Прынцып дзеяння трансфарматара заснаваны на з'яве электрамагнітнай індукцыі.

Тып трансфарматара вызначаецца **каэфіцыентам трансфармацыі**, роўным адносіне ліку віткоў першаснай абмоткі да ліку віткоў другаснай абмоткі трансфарматара:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Калі $k > 1$, то трансфарматар паніжаючы, калі $k < 1$ — павышаючы.

Сукупнасць звязаных аднаго з адным электрычнага і магнітнага палёў, якія змяняюцца, называюць **электрамагнітным полем**.

Электрамагнітнымі хвалямі называецца пераменнае электрамагнітнае поле, якое распаўсюджваецца ў прасторы.

Электрамагнітныя хвалі з'яўляюцца папярочнымі, паколькі ваганні напружанасці $\vec{E}$ і індукцыі $\vec{B}$ адбываюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі.

Скорасць распаўсюджвання электрамагнітных хваль у вакууме роўна скорасці распаўсюджвання святла:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Заданні для самастойных даследаванняў

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (У. Томсан (Кельвін), М. Фарадэй, Д. Максвел, Г. Герц).

2. Падрыхтуйце даклад на тэму «Дзеянне электрамагнітнага выпраменьвання ад розных бытавых прыбораў на чалавека».

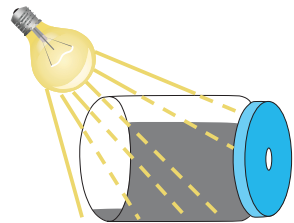
3. Падрыхтуйце рэфераты на тэмы: «Пераменны ток вакол нас», «Супрацьстаянне Тэслы і Эдысана: AC/DC», «Як мы адчуваем электрамагнітныя хвалі?».

4. Пры падключэнні да сеткі пераменнага току трансфарматар пачынае характэрна «гудзець». Выкарыстаўшы школьную мадэль трансфарматара (мал. 80), даследуйце характарыстыкі гэтага гуку. Вызначыце частату гэтага гудзення, а таксама ацаніце гучнасць гуку ў розных рэжымах працы трансфарматара.



Мал. 80

5. Пакрыйце чорнай фарбай палову ўнутранай паверхні слоіка і зрабіце адтуліну ў яго накрыўцы (мал. 81). Калі асвятліць чорную сценку слоіка лямпай напальвання, якая працуе на пераменным току, то можна пачуць выразны гук. Растлумачце назіраемую з'яву. Вылічыце частату гуку і эксперыментальна вызначыце, як уплываюць на яго гучнасць такія параметры, як магутнасць лямпы, адлегласць да слоіка, памеры слоіка.



Мал. 81





Раздзел 3

Оптыка

«Сонца, мора, іскры, цені,
блакіт неба за акном,
Усю прыроду і стварэнні
ў святле мы спазнаём».

Паводле М. І. Чайкоўскага

§ 14. Электрамагнітная прырода святла

- З антычных часоў лічылася, што святло практычна імгненна пераадоляе любы адлегласці. Пытанне аб прыродзе святла доўгі час заставалася адкрытым. Якімі ўласцівасцямі валодае святло? Як была вымерана скорасць яго распаўсюджвання?



Чым меншая скорасць распаўсюджвання святла ў асяроддзі, тым асяроддзе з'яўляецца аптычна больш шчыльным.

Оптыка — раздзел фізікі, у якім вывучаецца фізічная прырода і ўласцівасці святла, а таксама яго ўзаемадзеянне з рэчывам. Адпаведна, светлавая з'ява часта называюць аптычнымі з'явамі. Слова «оптыка» пайшло ад грэч. *οπτικός* (оптыкас) — бачны, глядзельны, паколькі асноўную частку інфармацыі аб прыродзе і з'явах, што ў ёй адбываюцца, чалавек атрымлівае пасродкам зрокавых адчуванняў, якія ўзнікаюць пад дзеяннем святла.



Пад **святлом** у оптыцы разумеюць электрамагнітныя хвалі, даўжыні якіх знаходзяцца ў дыяпазоне ад 2,0 мм да 10 нм. Гэты дыяпазон падзяляецца на інфрачырвоны (2,0 мм—0,75 мкм), бачны (ад 750 нм да 380 нм) і ультрафіялетава (380 нм—10 нм) дыяпазоны.

Сучасная оптыка заснавана на электрамагнітнай тэорыі святла. Як вам вядома (гл. § 12), у другой палове XIX ст. Дж. Максвел даказаў магчымасць распаўсюджвання электрамагнітных хваль у вакууме. Згодна з вывадам з яго тэорыі святло мае электрамагнітную прыроду, паколькі

скорасць яго распаўсюджвання роўна скорасці электрамагнітных хваль у вакууме.

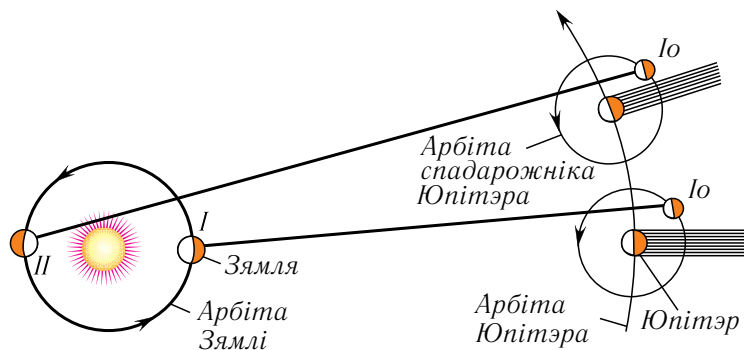
Першыя спробы вымярэння скорасці святла, зробленыя напачатку XVII ст. Г. Галілеем і іншымі вучонымі, не мелі поспеху з прычыны недастатковай дакладнасці вымярэння часу (хронаметравання). У выніку гэтых эксперыментаў Галілей прыйшоў да высновы, што вымераць модуль скорасці святла на малых адлегласцях практычна немагчыма, паколькі святло пераадолюе іх імгненна дзякуючы вялікаму значэнню скорасці распаўсюджвання.

Дэкарт адным з першых прапанаваў выкарыстоўваць для вымярэння модуля скорасці святла велізарныя (астранамічныя) адлегласці, на пераадоленне якіх святлу патрабавецца значны час, які можна вымераць з дастатковай дакладнасцю.

Гістарычна першае эксперыментальнае вызначэнне модуля скорасці святла ў вакууме ў 1672 г. зрабіў дацкі астраном Олаф Ромер, які праводзіў сістэматычныя назіранні ў тэлескоп зацямненняў спадарожніка Юпітэра — Іо. Прыкладна праз паўгода пасля пачатку назіранняў ён заўважыў, што момант зацямнення спадарожніка Іо прыпазіняецца амаль на 16 мін у параўнанні з вылічаным значэннем. Ромер растлумачыў гэта запазненне канечнасцю скорасці распаўсюджвання святла. Сапраўды, паколькі за паўгода Зямля перамясцілася са становішча I (мал. 82) у становішча II, то святлу неабходна прайсці дадатковую адлегласць, прыкладна роўную дыяметру зямной арбіты. А пры канечнасці скорасці святла для гэтага неабходна больш часу.

На падставе тагачасных даных аб дыяметрах арбіт Зямлі і Юпітэра ён атрымаў для скорасці святла значэнне:

$$c = 2,12 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



Мал. 82. Схема назіранняў Ромера

Амерыканскі фізік Альберт Майкельсан у 1926 г. для вымярэння скорасці святла выкарыстаў устаноўку, у якой святло праходзіла паміж дзвюма горнымі вяршынямі. Ён атрымаў значэнне скорасці святла, блізкае да сучасных даных:

$$c = (299796 \pm 4) \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

У 1972 г. скорасць святла была вызначана на аснове незалежных вымярэнняў даўжыні хвалі і частаты святла. Гэта дазволіла значна павялічыць дакладнасць вымярэнняў. У якасці крыніцы быў абраны гелій-неонавы лазер. Такім чынам, было атрымана значэнне скорасці святла, якое пераўзышло па дакладнасці ўсе раней вядомыя значэнні больш чым на два парадкі. З прычыны гэтага ў 1983 г. на 17-й Генеральнай канферэнцыі па мерах і вагах значэнне скорасці святла ў вакууме прынята роўным

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ (дакладна).}$$

Заўважым, што пры рашэнні задач, як правіла, карыстаюцца прыбліжаным значэннем модуля скорасці святла:

$$c \approx 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Менавіта гэта значэнне скорасці распаўсюджвання святла c звязвае даўжыню хвалі λ у вакууме з перыядам яе ваганняў T :

$$\lambda = cT$$

і з частатой ν :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Вынікі вымярэнняў паказалі, што скорасць святла v у розных рэчывах заўсёды меншая за скорасць святла c у вакууме. У 1862 г. французскі фізік Жан Фуко вымераў скорасць распаўсюджвання святла ў вадзе і атрымаў значэнне $2,23 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Праз некалькі гадоў Майкельсан вызначыў скорасць распаўсюджвання святла ў серавугляродзе — $1,71 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Значыць, у вадзе скорасць распаўсюджвання святла памяншаецца ў 1,33 раза ў параўненні з вакуумам, а ў серавугляродзе — у 1,64 раза.

З курса фізікі 8-га класа вам вядома, што чым меншая скорасць распаўсюджвання святла ў асяроддзі, тым асяроддзе лічыцца аптычна больш шчыльным. Мерай аптычнай шчыльнасці рэчыва з'яўляецца яго *абсалютны паказчык праламлення*, які абазначаецца лацінскай літарай n .

Абсалютны паказчык праламлення n рэчыва характарызуе яго аптычныя ўласцівасці і паказвае, у колькі разоў скорасць распаўсюджвання святла ў дадзеным рэчыве меншая за скорасць распаўсюджвання святла ў вакууме:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Паколькі скорасць распаўсюджвання святла ў любым рэчыве заўсёды меншая, чым у вакууме, то абсалютны паказчык праламлення рэчыва заўсёды большы за адзінку ($n \geq 1$). Абсалютны паказчык праламлення залежыць як ад уласцівасцей рэчыва, г. зн. яго хімічнага складу, аграгатнага стану, тэмпературы, ціску, так і ад частаты святла.

Выходзячы з суадносіны (1), можна запісаць формулу для знаходжання модуля скорасці распаўсюджвання святла ў рэчыве:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (n > 1). \quad (2)$$

Акрамя таго, з суадносіны (1) вынікае, што для любых асяроддзяў:

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = \dots = c, \quad (3)$$

дзе n_1, n_2 — абсалютныя паказчыкі праламлення асяроддзяў, v_1, v_2 — скорасці распаўсюджвання святла ў асяроддзях.

Падставім у суадносіну (3) выраз $v = \lambda \nu$, які звязвае модуль скорасці распаўсюджвання святла v у рэчыве з даўжынёй хвалі λ і частатой ν . Паколькі пры пераходзе электрамагнітнай хвалі з вакуума ў рэчыва або з аднаго рэчыва ў іншае **частата ваганняў** $\vec{E}$ электрычнага поля і індукцыі $\vec{B}$ магнітнага поля **не змяняецца** ($\nu = \text{const}$), то:

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 = \dots = \lambda,$$

дзе λ_1, λ_2 — даўжыні светлавых хваль у асяроддзях, λ — даўжыня хвалі ў вакууме.

Адсюль вынікае, што **даўжыня светлавой хвалі λ_n** пры пераходзе з аднаго рэчыва ў іншае **змяняецца**.

Даўжыня светлавой хвалі λ_n у рэчыве, абсалютны паказчык праламлення якога n , вызначаецца па формуле:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}. \quad (4)$$

Такім чынам, пры пераходзе святла з аднаго рэчыва ў іншае частата застаецца нязменнай, а змяняецца скорасць распаўсюджвання светлавой хвалі і яе даўжыня.

Белае святло ўяўляе сабой сукупнасць электрамагнітных хваль разнастайных частот бачнага дыяпазону. Хваля адной пэўнай частаты называецца **монахраматычнай** (ад грэч. *μονοσ* (монас) — адзін і *χρoμα* (хрома) — колер, г. зн. аднаколерны).

Як паказалі вынікі шматлікіх эксперыментаў, светлавое адчуванне ў чалавека выклікаюць толькі электрамагнітныя хвалі пэўнага дыяпазону ($4,0 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$) Гц, якому адпавядаюць даўжыні хваль ад $\lambda_1 = 0,76$ мкм да $\lambda_2 = 0,40$ мкм, што ўспрымаюцца вокам чалавека.

Кожнай частаце адпавядае сваё колеравае адчуванне. Так, напрыклад, святло частотой $\nu_1 = 4,0 \cdot 10^{14}$ Гц выклікае адчуванне чырвонага колеру, а $\nu_2 = 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц — фіялетавага. Паколькі пры пераходзе святла з аднаго асяроддзя ў іншае частата не змяняецца, то пры гэтым не змяняецца і яго колеравае ўспрыманне.

► Скорасць распаўсюджвання святла ў вакууме абазначаецца лацінскай літарай *c* (ад лац. *celeritas* — скорасць).

У адпаведнасці з рэзалюцыяй на 17-й Генеральнай канферэнцыі па мерах і вагах у 1983 г. прынята новае значэнне метра як адлегласці, якую праходзіць святло ў вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды.

Вынікі вымярэнняў паказваюць, што 47 % сваёй энергіі Сонца дасылае ў выглядзе інфрачырвоных прамянёў, 44 % энергіі даводзіцца на бачную частку спектра, а астатнія 9 % энергіі сонечнага выпраменьвання — на ультрафіялетавы дыяпазон.



1. Што вывучае оптыка?
2. Што такое святло? Чаму роўна скорасць распаўсюджвання святла ў вакууме?
3. Што характарызуе абсалютны паказчык праламлення рэчыва?
4. Як змяняюцца частата, скорасць распаўсюджвання і даўжыня хвалі святла пры пераходзе святла з аднаго асяроддзя ў іншае?
5. Электрамагнітныя хвалі якога частотнага дыяпазону выклікаюць зрокавае колеравае адчуванне ў чалавека?
6. Якое выпраменьванне называецца монахраматычным?

Прыклад рашэння задачы

Монахраматычнае святло з даўжынёй хвалі $\lambda_0 = 550$ нм пераходзіць са шкла ў паветра. Вызначыце, на колькі $\Delta\lambda$ пры гэтым павялічваецца даўжыня хвалі святла, калі абсалютны паказчык праламлення шкла

роўны $n = 1,40$. Знайдзіце скорасць v распаўсюджвання святла ў шкле, калі скорасць распаўсюджвання святла ў паветры $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Дадзена:

$$\lambda_0 = 550 \text{ нм} = 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = 1,40$$

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\Delta\lambda - ? \quad v - ?$$

Рашэнне

Улічыўшы, што частата святла не змяняецца пры пераходзе з аднаго асяроддзя ў іншае, запішам:

$$\lambda_0 = \frac{v}{\nu}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (2)$$

дзе v — скорасць святла ў шкле, λ — даўжыня хвалі святла ў паветры. З суадносін (1) і (2) вынікае:

$$\lambda = \frac{c}{v} \lambda_0.$$

Улічыўшы, што $n = \frac{c}{v}$, знойдзем:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{c - v}{v} \lambda_0 = \lambda_0 (n - 1), \quad \Delta\lambda = (1,40 - 1) \cdot 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 2,20 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$$v = \frac{c}{n}, \quad v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,40} = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Адказ: } \Delta\lambda = 0,220 \text{ мкм}, \quad v = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Практыкаванне 10

1. Які прамежак часу τ неабходны святлу, каб дайсці ад Сонца да Зямлі, адлегласць паміж якімі $l = 1,48 \cdot 10^8 \text{ км}$?
2. Вызначыце скорасць распаўсюджвання святла v у кварцы, абсалютны паказчык праламлення якога $n = 1,54$.
3. Скорасць распаўсюджвання святла ў вадзе $v_1 = 2,250 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, а ў шкле — $v_2 = 1,982 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Вызначыце адносіну k паказчыкаў праламлення шкла і вады.
4. Вызначыце прамежак часу τ , за які святло праходзіць адлегласць $l = 450 \text{ км}$ у вадзе, паказчык праламлення якой $n = 1,33$.
5. Назіральнік пачуў гром праз прамежак часу $\tau = 5,0 \text{ с}$ пасля выбліску маланкі. Знайдзіце, на якой адлегласці l ад назіральніка адбыўся навальнічны разрад. Скорасць распаўсюджвання гуку ў паветры $v_{\text{г}} = 3,4 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

6. Пры пераходзе святла з вакуума ў некаторае рэчыва даўжыня хвалі паменшылася на 20 %. Вызначыце паказчык праламлення n дадзенага рэчыва.

§ 15. Інтэрферэнцыя святла

- Імпульс цела можна скампенсаваць імпульсам, які мае процілеглы напрамак. А ці можна загасіць святло святлом? Пры якіх умовах два светлавя пучкі пры накладанні адзін на аднаго ўтвораць цёмныя і светлыя палосы? Як ажыццявіць такі эксперымент?



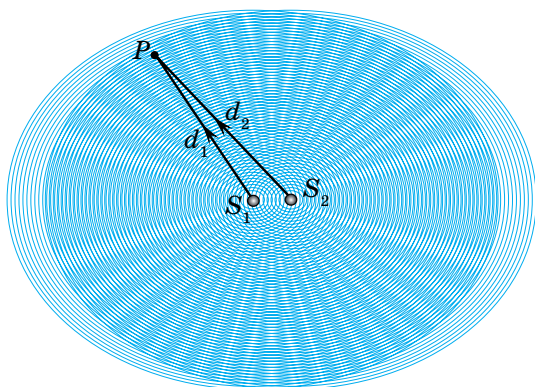
Прынцып суперпазіцыі электрычных палёў: напружанасць $\vec{E}$ электрычнага поля сістэмы кропкавых зарадаў $q_1, q_2, \dots, q_n$ у некаторым пункце прасторы роўна вектарнай суме напружанасцей палёў, якія ствараюцца ў гэтым пункце кожным з гэтых зарадаў паасобку, прычым поле кожнага не залежыць ад палёў іншых:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Разгледзім працэс накладання светлавых хваль даўжынёй λ , якія ўзбуджаюцца кропкавымі крыніцамі святла S_1 і S_2 (мал. 83). У тым абсягу, дзе гэтыя хвалі сустракаюцца, адбываецца іх накладанне.

Паколькі светлавя хвалі маюць электрамагнітную прыроду, для іх таксама, як і для электрычных і магнітных палёў, выконваецца прынцып суперпазіцыі (ад лац. *superposition* — дадаванне). Паводле гэтага прынцыпу ваганні, выкліканыя хвалямі, складаюцца такім чынам,

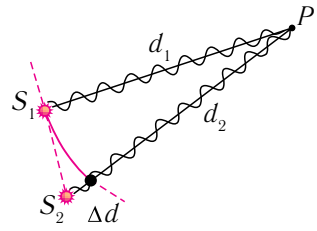
што выніковае электрамагнітнае поле роўна вектарнай суме палёў, створаных кожнай з іх: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Пры гэтым кожная з хваль распаўсюджваецца незалежна ад іншых. У абсягу, дзе хвалі перакрываюцца, узнікае даволі складаная карціна (гл. мал. 84). Аднак, выйшаўшы з гэтага абсягу, хвалі распаўсюджваюцца так, як быццам яны вольна «праходзяць адна скрозь адну» і пры гэтым ніяк не ўзаемадзейнічаюць паміж сабой.



Мал. 83. Працэс накладання кагерэнтных хваль. Светлыя сектары — максімуы, цёмныя — мінімуы

Калі ў пункт P ад манахраматычных крыніц частатой ω прыйшлі дзве хвалі, што прайшлі розныя адлегласці d_1 і d_2 (мал. 84), то рознасць адлегласцей $\Delta d = d_2 - d_1$ называюць *рознасцю ходу*. Паколькі пры рознасці ходу $\Delta d = \lambda$ рознасць фаз $\Delta\varphi = 2\pi$, то можна скласці прапорцыю $\frac{\Delta\varphi}{\Delta d} = \frac{2\pi}{\lambda}$. З гэтай суадносіны знаходзім:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda}. \quad (1)$$



Мал. 84. Працэс накладання дзвюх кагерэнтных хваль

Такім чынам, рознасць фаз $\Delta\varphi$ вызначаецца рознасцю ходу Δd .

Хвалі аднолькавых частот, рознасць фаз ваганняў якіх у кожным пункце прасторы не змяняецца з цягам часу, называюцца **кагерэнтнымі** (ад лац. *cohaerens* — злучаны, счэплены). Адпаведна, уласцівасць, якая характарызуе ўзгодненасць праходжання ў прасторы і часе некалькіх вагальных ці хвалевак працэсаў, называецца **кагерэнтнасцю**.

Будзем меркаваць, што хвалі, якія прыходзяць, будуць мець у пункце P напружанасці электрычнага поля:

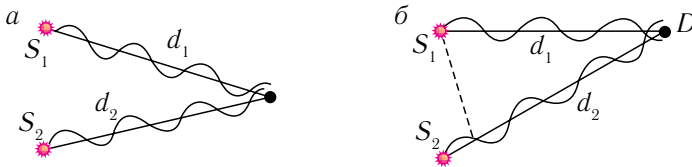
$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(\omega t + \alpha_1), \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(\omega t + \alpha_2), \quad (2)$$

дзе E_{01} , E_{02} — амплітуды, α_1 , α_2 — пачатковыя фазы ваганняў кожнай з хваль у пункце P .

Напружанасць выніковага электрычнага поля згодна з прынцыпам суперпазіцыі ў дадзеным пункце ў любы момант часу роўна вектарнай суме напружанасцей $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ кожнай хвалі паасобку:

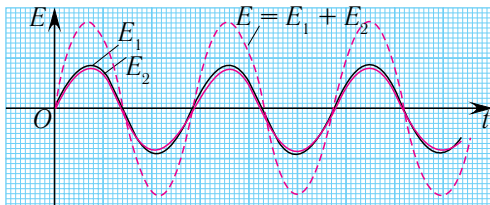
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (3)$$

Калі рознасць ходу хваль ад крыніц S_1 і S_2 кратна даўжыні хвалі $\Delta d = m\lambda$, ($m = 0, 1, 2, \dots$), то $\Delta\varphi = 2\pi m$, і ваганні, што ўзбуджаюцца хвалямі ў пункце C (мал. 85, *a*), адбываюцца ў аднолькавай фазе. Пры гэтым грэбень адной хвалі накладваецца на грэбень другой. Адпавед-



Мал. 85. Складанне манахраматычных ваганняў дзвюх хваль:

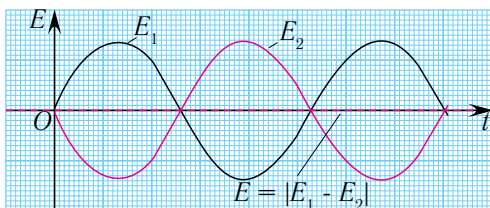
a — максімальная амплітуда ў пункце C ; b — мінімальная амплітуда ў пункце D



Мал. 86. Накладанне хваль, аднолькавых па фазе

наму ліку паўхваль $\Delta d = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$, ($m = 0, 1, 2, \dots$), то $\Delta\varphi = \pi(2m + 1)$, і ваганні адбываюцца ў проціфазе. Пры гэтым грэбень адной хвалі накладваецца на ўпадзіну другой.

Такім чынам, у гэтым выпадку амплітуда выніковага вагання роўна модулю рознасці амплітуд хваль, якія накладваюцца, і аказваецца мінімальнай (мал. 87):



Мал. 87. Накладанне хваль, процілеглых па фазе

дадзены абсяг прасторы. Параметрам, які характарызуе гэту энергію, з'яўляецца інтэнсіўнасць светлавой хвалі, якая абазначаецца лацінскай літарай I .

на, амплітуда выніковага вагання ў пункце C роўна суме амплітуд хваль, якія накладваюцца, і аказваецца максімальнай (мал. 86):

$$E_{\max} = E_1 + E_2. \quad (4)$$

Калі ж рознасць ходу хваль у пункце D (мал. 85, б) роўна няцотнаму ліку паўхваль

$$E_{\min} = |E_1 - E_2|. \quad (5)$$

Заўважым, што ва ўсіх іншых пунктах амплітуда A выніковага вагання мае прамежкавае значэнне

$$E_{\min} \leq E \leq E_{\max}.$$

Прыёмнікі выпраменьвання фіксуюць не саму светлавую хвалю, а энергію, прынесеную хваляй у

► Паводле тэорыі электрамагнетызму інтэнсіўнасць электрамагнітнай хвалі прама прапарцыянальна квадрату амплітуды вектара напружанасці яе электрычнага поля $I \sim \langle E^2 \rangle$. Сімвал $\langle \rangle$ абазначае ўсярэдненне па часе. Аналагічнае ўсярэдненне можна зрабіць і для вектара індукцыі магнітнага поля $\vec{B}$.

Зыходзячы з суадносін (4) і (5), бачна, што $I_{\max} \sim (E_1 + E_2)^2$, $I_{\min} \sim (E_1 - E_2)^2$, г. зн. інтэнсіўнасць выніковай хвалі не роўна суме інтэнсіўнасцей зыходных хваль. Гэта азначае, што хвалі інтэрфэруюць адна з адной.

З прычыны залежнасці рознасці фаз (1) ад пункта назірання ў прасторы атрымліваецца складаная карціна размеркавання інтэнсіўнасці выніковай хвалі. Устойлівае ў часе размеркаванне амплітуд ваганняў у прасторы пры інтэрферэнцыі называецца **інтэрферэнцыйнай карцінай**.

Такім чынам, **інтэрферэнцыя** (ад лац. *inter* — узаемна, паміж сабой і *ferio* — удараю, паражаю) — з’ява ўзнікнення ўстойлівай у часе карціны максімумаў і мінімумаў, што чаргуюцца, амплітуд выніковай хвалі пры складанні дзвюх (або некалькіх) кагерэнтных хваль.

Падкрэслім, што заканамернасці інтэрферэнцыі справядлівыя для хваль любой прыроды (мал. 88) (электрамагнітных, гукавых, хваль на паверхні вады і г. д.), г. зн. носяць універсальны характар.

Пры разгляданні інтэрферэнцыі святла (электрамагнітных хваль) трэба ўлічыць, што даўжыня хвалі святла ў рэчыве змяняецца ў залежнасці ад паказчыку праламлення рэчыва. Калі адна хваля распаўсюджваецца ў рэчыве з паказчыкам праламлення n_1 , а другая — з паказчыкам праламлення n_2 , то рознасць фаз ваганняў:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda},$$

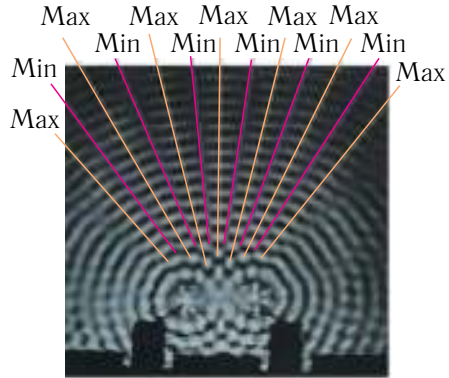
дзе

$$\delta = n_2 d_2 - n_1 d_1 = c \left(\frac{d_2}{v_2} - \frac{d_1}{v_1} \right). \quad (7)$$

Тут δ — **аптычная рознасць ходу** хваль ад крыніц да пункту назірання, а велічыня nd — **аптычная даўжыня шляху**. Гэта велічыня вызначаецца адлегласцямі d_1 і d_2 , пройдзенымі светлавымі хвалямі з улікам іх розных модулей скарасцей v_2 і v_1 распаўсюджвання ў гэтых асяроддзях з паказчыкамі праламлення n_1 і n_2 .

Такім чынам, калі аптычная рознасць ходу (7) роўна цэламу ліку даўжынь хваль у вакууме, то ўмова **максімуму інтэрферэнцыі**:

$$\delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$



Мал. 88. Інтэрферэнцыйная карціна папяровых хваль на паверхні вады

Хвалі прыходзяць у пункт P (гл. мал. 85) сінфазна, паколькі рознасць фаз у гэтым выпадку кратна 2π :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} m\lambda = 2\pi m.$$

Калі аптычная рознасць ходу (7) роўна няцотнаму ліку паўхваль, то ўмова мінімуму інтэрферэнцыі:

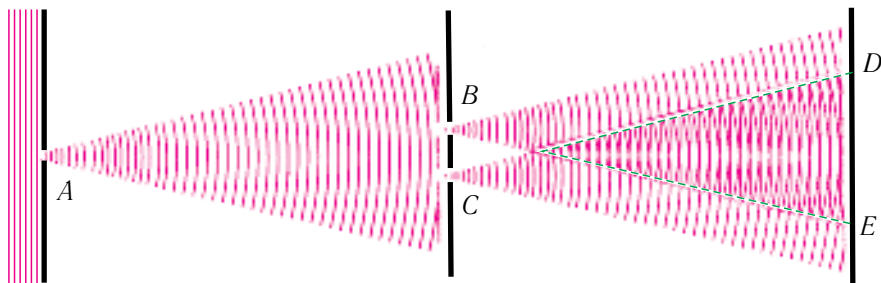
$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

Хвалі прыходзяць у пункт P у проціфазе, і рознасць фаз ваганняў у гэтым выпадку роўна:

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi.$$

Для назірання інтэрферэнцыі святла неабходны кагерэнтныя крыніцы, якія выпраменьваюць хвалі з пастаяннай у часе рознасцю фаз. Распаўсюджаныя звычайныя крыніцы святла (лямпы напальвання, лампы дзённага святла, свечкі і г. д.) не з'яўляюцца кагерэнтнымі. Для таго каб можна было назіраць ад іх інтэрферэнцыю святла, святло ад адной і той жа крыніцы неабходна падзяліць на два пучкі і затым звесці іх разам.

Для атрымання інтэрферэнцыйнай карціны карыстаюцца класічнай **інтэрферэнцыйнай схемай (схемай Юнга)**, дзе пучок святла ад невялікай адтуліны A ў экране падзяляецца на два кагерэнтныя пучкі з дапамогай невялікіх адтулін B і C у наступным экране (мал. 89). Паколькі гэтыя пучкі створаны адной і той жа крыніцай A , яны з'яўляюцца кагерэнтнымі. Таму на трэцім экране ў абсягу DE перакрывацца пучкоў назіраецца інтэрферэнцыйная карціна.



Мал. 89. Схема эксперымента Юнга па інтэрферэнцыі святла

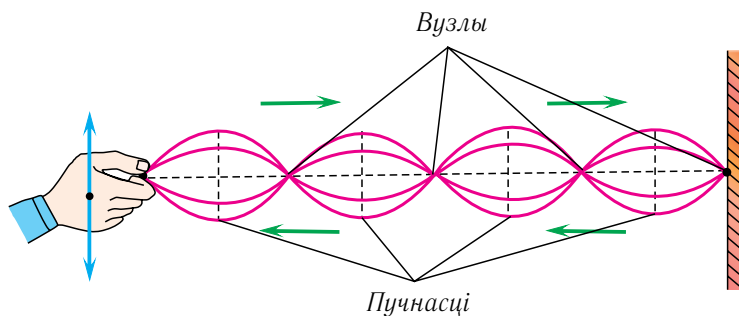
Вынаходства і распаўсюджанне кагерэнтных крыніц выпраменьвання — *лазераў* — зрабіла дэманстрацыю з’явы інтэрферэнцыі досыць прастай.

Найбольш вядомая праява інтэрферэнцыі, з якой мы часта сустракаемся ў паўсядзённым жыцці, — вясёлкавая афарбоўка мыльных бурбалак (мал. 90) ці тонкіх плёнак бензіну (нафты) на вадзе ці асфальце. Вясёлкавыя колеры ўзнікаюць на гэтых плёнках з прычыны інтэрферэнцыі святла, адбітага двюма паверхнямі плёнкі.



Мал. 90. Інтэрферэнцыя святла ў мыльнай бурбалцы

► Англіійскі вучоны Томас Юнг у 1801 г. правёў класічны эксперымент па інтэрферэнцыі святла (гл. мал. 89). Гэта дазволіла яму пераканаўча пацвердзіць хвалеваю прыроду святла і вымераць даўжыню светлавой хвалі. Адзначым яшчэ адзін распаўсюджаны выпадак інтэрферэнцыі — складанне хваль аднолькавай частаты, якія распаўсюджваюцца ў процілеглых напрамках (напрыклад, падаючай і адбітай хваль), што прыводзіць да ўтварэння ў прасторы ўстойлівай карціны чаргавання максімуў амплітуды ваганняў — «пучнасцей» і мінімуў — «вузлоў» (мал. 91). Хваля, якая ўзнікае ў выніку складання двох хваль аднолькавай частаты, што распаўсюджваюцца ў процілеглых напрамках, называецца стаячай хваляй.



Мал. 91. Стаячая хваля



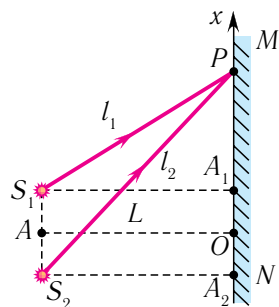
1. Што такое кагерэнтнасць? Якія хвалі называюцца кагерэнтнымі?
2. Што называюць інтэрферэнцыйнай хваляй? Пры якіх умовах адбываецца гэта з’ява?

3. Што называюць рознасцю ходу хваль? Аптычнай рознасцю ходу хваль?
4. Запішыце ўмовы ўтварэння інтэрферэнцыйных максімаў і мінімаў. Якой павінна быць аптычная рознасць ходу дзвюх хваль, каб іх інтэрферэнцыя прыводзіла да паслаблення (узмацнення) выніковага сігнала?
5. Чаму не ўзнікае інтэрферэнцыйная карціна ад святла дзвюх фар аўтамабіля?
6. Калі дзве хвалі інтэрферыруюць адна з адной, то ці ўплывае адна хваля на распаўсюджванне другой?
7. Чаму мыльная бурбалка на сонцы пераліваецца ўсімі колерамі вясёлкі?
8. Чаму ў тонкім слоі бензіну, які плавае на паверхні вады, узнікаюць вясёлкавыя палосы?



Прыклад рашэння задачы

Вызначыце становішчы максімаў і мінімаў інтэрферэнцыйнай карціны на экране, які знаходзіцца на адлегласці $L = AO = 2,0$ м ад дзвюх аднолькавых кагерэнтных крыніц святла S_1 і S_2 , размешчаных у вакууме на адлегласці $d = 5,0$ мм адна ад адной (мал. 92). Даўжыня хвалі выпраменьвання крыніц $\lambda = 600$ нм. Знайдзіце адлегласць Δx паміж суседнімі максімамі.



Мал. 92

Дадзена:

$$d = 5,0 \text{ мм} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$L = 2,0 \text{ м}$$

$$\lambda = 600 \text{ нм} = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Δx — ?

Рашэнне

Да некаторага пункта P на экране кожная з хваль праходзіць розны шлях l_1 і l_2 . Максімум і мінімум будуць назірацца пры выкананні ўмоў, адпаведна:

$$\delta = l_2 - l_1 = m\lambda,$$

$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \text{ дзе } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

З трохвугольнікаў S_1PA_1 і S_2PA_2 па тэарэме Піфагора знаходзім:

$$l_1^2 = L^2 + \left(x_m - \frac{d}{2}\right)^2, \quad (1)$$

$$l_2^2 = L^2 + \left(x_m + \frac{d}{2}\right)^2, \quad (2)$$

дзе x_m — каардыната пункта P .

Адкуль, адняўшы ад суадносіны (2) суадносіну (1), атрымаем:

$$l_2^2 - l_1^2 = 2x_m d.$$

З улікам таго, што $d \ll L$ і $l_1 + l_2 \approx 2L$, знаходзім:

$$(l_1 + l_2)(l_1 - l_2) \approx 2L(l_1 - l_2) = 2x_m d \Rightarrow l_1 - l_2 = \delta = \frac{x_m d}{L}.$$

З умовы максімуму вынікае:

$$m\lambda = x_{m\max} \frac{d}{L}.$$

Тады адлегласць ад цэнтра экрана да m -й светлай паласы знаходзіцца з суадносінамі:

$$x_{m\max} = m\lambda \frac{L}{d}.$$

З умовы для мінімуму знаходзім становішча цёмных палос:

$$(2m + 1) \frac{\lambda}{2} = x_{m\min} \frac{d}{L}.$$

Адкуль

$$x_{m\min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}.$$

Адлегласць паміж суседнімі максімумамі:

$$\Delta x = x_{(m+1)\max} - x_{m\max} = \lambda \frac{L}{d},$$

$$\Delta x = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \frac{2,0 \text{ м}}{5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

З атрыманай формулы бачна, што адлегласць Δx павялічваецца пры памяншэнні адлегласці d паміж кагерэнтнымі крыніцамі.

Адказ: $x_{m\max} = m\lambda \frac{L}{d}$, $x_{m\min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}$, $\Delta x = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$

Практыкаванне 11

- Што будзе назірацца ў некаторым пункце прасторы ў выніку інтэрферэнцыі дзвюх кагерэнтных хваль даўжынёй хвалі $\lambda = 400 \text{ нм}$, аптычная рознасць ходу якіх $\delta = 2,25 \text{ мкм}$?
- Колькі даўжын хваль N монахраматычнага выпраменьвання частотой $\nu = 800 \text{ МГц}$ змяшчаецца на адрэзку даўжынёй $l = 2,0 \text{ м}$?
- Экран MN асветлены кагерэнтнымі монахраматычнымі крыніцамі S_1 і S_2 (гл. мал. 92), перыяд ваганняў якіх T . Узмацненне ці паслабленне святла будзе назірацца ў пункце P , калі ад крыніцы S_2 святло ў яго прыходзіць пазней на прамежак часу $\tau = 2,5T$, чым ад крыніцы S_1 ? §15-1



§ 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.

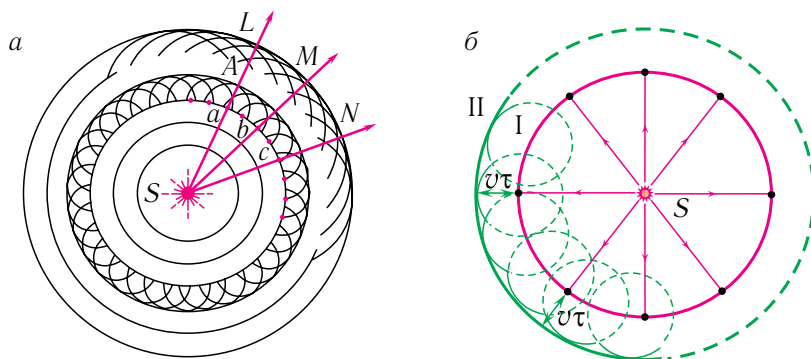
Хвалевая паверхня — гэта паверхня, усе пункты якой вагаюцца ў аднолькавых фазах, г. зн. гэта паверхня роўных фаз. Геаметрычнае месца пунктаў, да якіх даходзяць ваганні да моманту часу t , называецца хвалевым фронтам (гл. § 5).

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 радыусу. 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 τ



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**:

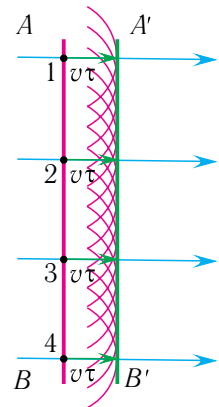
кожны пункт асяроддзя, якога хвалевы фронт дасягнуў у момант часу t , становіцца крыніцай другасных сферычных хваль. Новае становішча хвалевага фронту праз прамежак часу τ вызначаецца агібаючай хвалевых франтоў другасных хваль у момант часу $t + \tau$.

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). Аднак, агібаючы хвалевых франтоў 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).

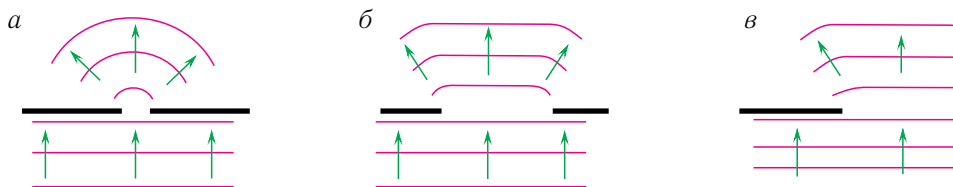
Лінія (L, M, N), перпендыкулярная хвалеваму фронту (гл. мал. 93, а) у дадзеным пункце, з'яўляецца **праменем**. Прамень вызначае напрамак распаўсюджвання хвалі, а таксама напрамак пераносу энергіі хваляй. Напрыклад, будуць практычна паралельнымі сонечныя прамені, што падаюць на футбольнае поле.

Прынцып Гюйгенса тлумачыць *прамалінейнасць распаўсюджвання* хваль у аднародным асяроддзі. Паколькі ў такім асяроддзі радыусы франтоў 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 становішчу 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 $\left(\nu \approx 3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad \nu = 1 \cdot 10^2 \text{ Гц}, \right.$
 $\left. \lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}} = 3 \text{ м} \right)$ ад працуючага матара аўтамабіля змог «павярнуць за вугал», а святло $\left(c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad \lambda = 500 \text{ нм} = 5,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \right)$, 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 колькасна:

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).

Такім чынам, паводле Фрэнеля дыфракцыя святла тлумачыцца інтэрфэрэнцыяй другасных хваль ад розных участкаў хвалевага фронту ў пачатковы момант часу.

Для назірання дыфракцыі святла выкарыстоўваецца *дыфракцыйная рашотка*.

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

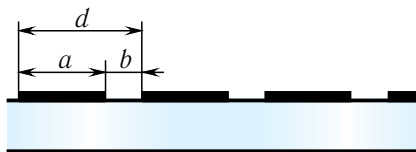
Дыфракцыйная рашотка складаецца з вялікай колькасці роўнааддаленых паралельных рысак (шчылін), нанесеных на шкляную ці металічную паверхню. Даўжыні рашотак складаюць 10—15 см. Яны змяшчаюць 10 000—20 000 рысак на 1 см. Назіранні праводзяцца як у адбітым святле (на металічных рашотках), так і ў праходзячым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

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

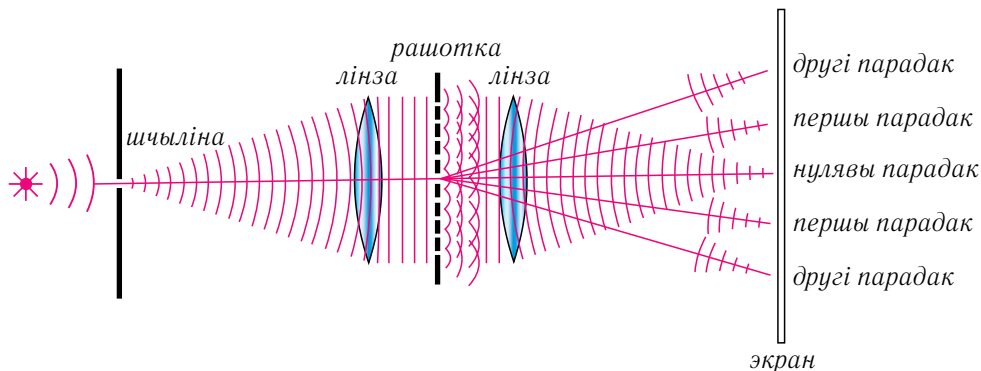
Калі шырыня кожнай шчыліны b , шырыня непразрыстай часткі паміж шчылінамі a , то велічыня $d = a + b$ называецца *пастаяннай рашоткі* або яе *пэрыядам*.

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 дыфракцыйнай карціны на экране паміж ім і рашоткай размяшчаюць збіральную лінзу такім чынам, каб экран



Мал. 96. Дыфракцыйная 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).

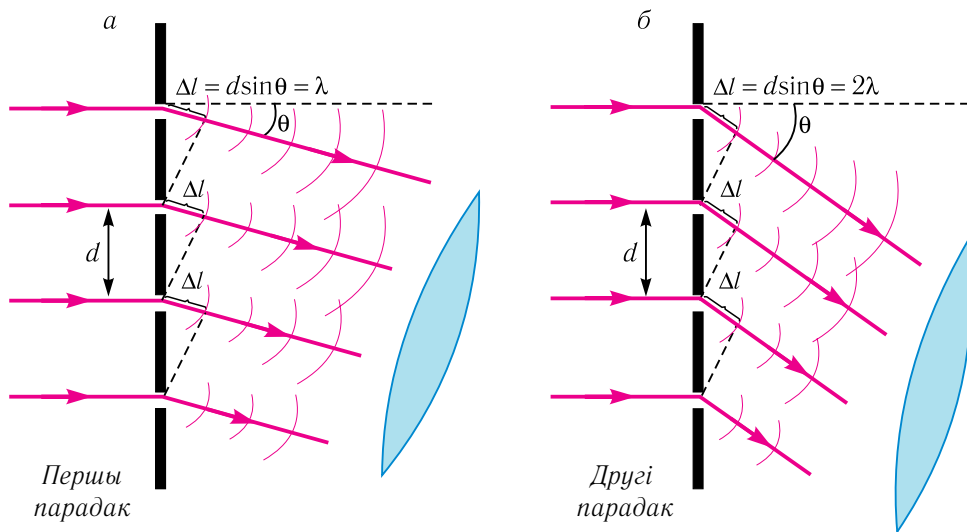
У залежнасці ад рознасці ходу паміж другаснымі хвалямі, выпушчанымі рознымі шчылінамі, яны інтэрфэруюць адна з адной, узмацняючы ці паслабляючы адна адну. На экране атрымліваецца *дыфракцыйная карціна* ў выглядзе сістэмы светлых і цёмных палос (гл. мал. 97). Найбольш яркія дыфракцыйныя максімуы атрымалі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

Пры нармальным падзенні святла на дыфракцыйную рашотку ўмова ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімуаў, 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 прастору, 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 фазами, які адрозніваюцца на лік, кратны 2π) і ўзмацняюць адна адну.

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

З умовы ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімуі (1) вынікае, што пры $m = 0$ для любых даўжын хвалі $\theta = 0$. Такім чынам, прама ў цэнтры рашоткі ўтворацца нулявы максімум, які называецца таксама *цэнтральным* максімумам. Дыфракцыйныя максімуі, якія адпавядаюць $m = 1$, утвораць спектр *першага парадку*, $m = 2$ — спектр *другога парадку* і г. д. (гл. мал. 97). Колькасць максімуі 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 суадносіны (1) трэба ўзяць цэлую частку адносіны:

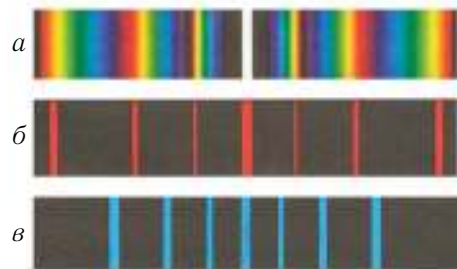
$$m_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right], \quad (2)$$

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

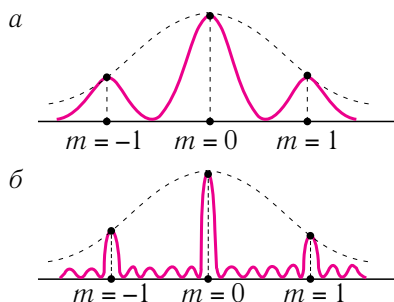
Адзначым, што пры вызначэнні максімальнага парадку спектра неабходна браць цэлую частку ліку $m_{\max}$.

Як вынікае з суадносіны (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 даўжын хвалі. Для ўсіх максімуі ненулявога парадку ($m \neq 0$) у дыфракцыйнай рашотцы сінус вугла адхілення прама прапарцыянальны даўжынні 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 максімуі чырвонага святла; в — дыфракцыйныя максімуі сіняга святла



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

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

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 распылістых ператвараюцца ў рэзкія і вузкія, падзеленыя практычна цёмнымі прамежкамі, паколькі другасныя максімумы вельмі слабыя і складаюць не больш за 5 % ад

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.

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

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



1. Што называюць дыфракцыяй святла? Пры якіх умовах яе назіраюць?
2. У чым сутнасць прынцыпу 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 прынцыпу 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 $\lambda = 550 \text{ нм}$. Вызначыце найбольшы парадок 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 парадок m_{max} дыфракцыйнага максімуму назіраецца пры вугле θ , бліжэй 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 парадок 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 $\lambda = 840 \text{ нм}$ на дыфракцыйную рашотку з перыядам $d = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}$?
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 $\lambda = 644 \text{ нм}$. 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. Визначьте найбільшй парадок $m_{\max}$ спектра, назіраемаго 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 перакрыццё 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

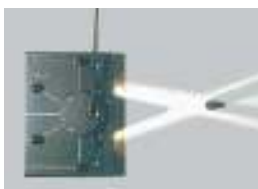
Для вывучэння ўласцівасцей электрамагнітных хваль неабходна ведаць заканамернасці як іх распаўсюджвання ў аднародным асяроддзі, так і адбіцця і праламлення на мяжы падзелу двух асяроддзяў.

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. Дамоўімся паказваць светлавыя прамені

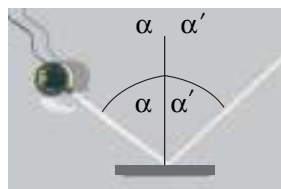




Мал. 102. Светлавы пучок



Мал. 103. Прамалінейнае распаўсюджванне святла



Мал. 104. Адбіццё святла

графічна з дапамогай геаметрычных праменяў. Геаметрычнаму праменю на практыцы адпавядае тонкі *светлавы пучок*, які атрымліваецца пры прапусканні светлагага выпраменьвання, што ідзе ад аддаленай крыніцы, праз адтуліну (дыяфрагму) у экране (мал. 102).

Такім чынам, трэба адрозніваць геаметрычны прамень (матэматычнае паняцце) і светлавы пучок (матэрыяльны аб'ект), атрыманы ад крыніцы святла.

Ужо ў пачатковыя перыяды аптычных даследаванняў былі эксперыментальна вызначаны чатыры асноўныя законы геаметрычнай аптыкі:

закон прамалінейнага распаўсюджвання святла (мал. 102, 103);

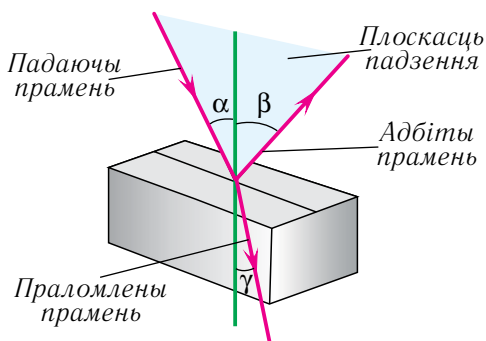
закон незалежнасці светлавых праменяў;

закон адбіцця светлавых праменяў (мал. 104);

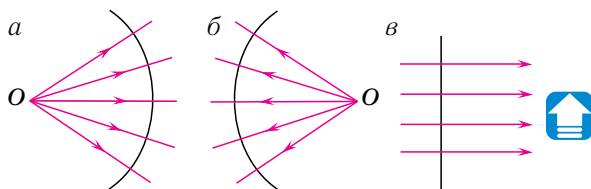
закон праламлення светлавых праменяў (мал. 105).

У законе прамалінейнага распаўсюджвання святла, законах адбіцця і праламлення святла выкарыстоўваліся паняцці «светлавы пучок» і «светлавы прамень», прычым апошні разглядаўся як бясконца тонкі пучок. Светлавы паток можна падзяліць на асобныя светлавыя пучкі пры дапамозе дыяфрагм (гл. мал. 103).

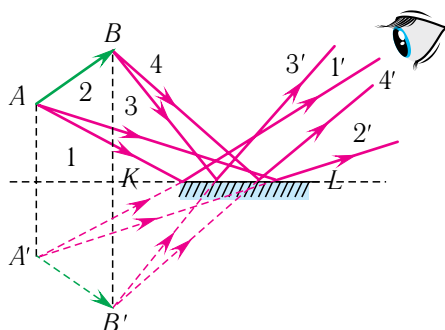
Прамені, якія выходзяць з аднаго пункта, называюць **разыходнымі**, а прамені, якія збіраюцца ў адным пункце, — **сыходнымі** (мал. 106).



Мал. 105. Прапамленне і адбіццё святла на мяжы падзелу асяроддзяў



Мал. 106. Пучкі святла: а) разыходны; б) сыходны; в) паралельны



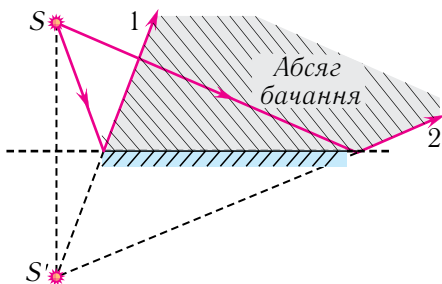
Мал. 107. Пабудова відарыса прадмета ў плоскім люстры

зробім для пункта B . Воку назіральніка будзе здавацца, што прамені выйшлі з пунктаў A' і B' , г. зн. з крайніх пунктаў відарыса $A'B'$ прадмета AB .

У оптыцы відарыс называецца **сапраўдным**, калі ён утвораны самімі прамянямі (г. зн. у дадзены пункт паступае светлавая энергія). Калі ж відарыс утвораны не самімі прамянямі, а іх прадаўжэннямі, то кажуць, што відарыс **уяўны** (светлавая энергія не паступае ў дадзены пункт).

Відарыс называецца **прамым**, калі ён арыентаваны таксама, як прадмет. Калі ж відарыс перавернуты, то яго называюць **адваротным** або **перавернутым**.

Такім чынам, відарыс прадмета ў плоскім люстры — уяўны прамы, у натуральную велічыню. Ён сіметрычны прадмету адносна плоскасці люстра і знаходзіцца на такой жа адлегласці за плоскасцю люстра, як і сам прадмет (гл. мал. 107).



Мал. 108. Пабудова відарыса крыніцы і абсягу бачання ў плоскім люстры

Як бачна з малюнка 106, сферычнай хвалі адпавядае разыходны пучок светлавых праменяў, а плоскай — паралельны пучок.

Выкарыстаўшы закон адбіцця, можна пабудаваць відарыс прадмета AB у **плоскім люстры** (мал. 107), што ўяўляе сабой плоскую адбіваючую паверхню. Пабудаваўшы ход праменяў 1 і 2 ад пункта A пасля адбіцця ад люстра KL , прадоўжым іх да скрыжавання ў пункце A' . Аналагічныя пабудовы

На малюнку 108 паказаны прыклад пабудовы абсягу бачання крыніцы S у плоскім люстры. Для яго атрымання неабходна пабудаваць ход праменяў 1 і 2, накіраваных на краі люстра. Абсяг (заштрыхаваны) паміж адбітымі прамянямі і дае абсяг, знаходзячыся ў якім можна ўбачыць крыніцу.

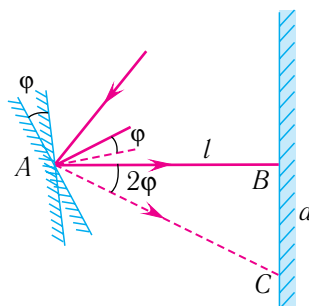


1. Што называюць праменем? Ці можна лічыць праменем вельмі вузкі пучок святла?
2. Якому закону падпарадкоўваецца распаўсюджванне святла ў аднародным празрыстым асяроддзі?
3. Як трэба размясціць кропкавую крыніцу святла, плоскі прадмет і экран, каб контур ценю на экране быў геаметрычна падобны контуру прадмета?
4. Якімі стануць паралельны, сыходны і разыходны пучкі святла пасля адбіцця ад плоскага люстра?
5. Які відарыс называецца: а) сапраўдным; б) уяўным; в) прамым; г) адваротным? Назавіце характарыстыкі відарысаў у плоскім люстры.
6. Як размешчаны відарыс у плоскім люстры?



Прыклад рашэння задачы

Прамень святла, адбіты ад плоскага люстра, падае перпендыкулярна на плоскі экран, усталяваны на адлегласці $l = 5,0$ м ад люстра (мал. 109). На якую адлегласць d змесціцца светлавая зайчык на экране, калі люстра павярнуць на вугал $\varphi = 15^\circ$ вакол восі, якая ляжыць у плоскасці люстра і перпендыкулярна да плоскасці, у якой знаходзяцца падаючы і адбітыя прамені?



Мал. 109

Дадзена:

$$l = 5,0 \text{ м}$$

$$\varphi = 15^\circ$$

$$d = ?$$

Рашэнне

Пры павароце люстра на вугал φ перпендыкуляр да люстра таксама павернецца на вугал φ . Значыць, вугал падзення праменяў павялічыцца таксама на вугал φ (гл. мал. 109). У адпаведнасці з законам адбіцця на такую ж велічыню павялічыцца і вугал адбіцця.

Такім чынам, сумарны паварот адбітага праменя складзе 2φ .

Значыць, зрух светлагага зайчыка на экране роўны даўжыні катэта BC прававугольнага трохвугольніка ABC :

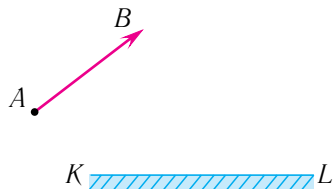
$$d = l \cdot \operatorname{tg}(2\varphi),$$

$$d = 5,0 \text{ м} \cdot \operatorname{tg}(2 \cdot 15^\circ) = 2,9 \text{ м}.$$

Адказ: $d = 1,9$ м.

Практыкаванне 13

1. Вызначыце вугал падзення α сонечных праменяў, калі слуп вышынёй $H = 5,0$ м адкідвае цень даўжынёй $l = 2,5$ м.
2. Вызначыце вышыню H дрэва, калі цень ад яго мае даўжыню $l_1 = 3,5$ м, а пастаўленая вертыкальна лінейка даўжынёй $l = 30$ см адкідвае цень даўжынёй $l_2 = 20$ см.
3. Вы жадаеце сфатаграфавать сябе ў люстры з адлегласці $l = 2,2$ м. Ці можна гэта зрабіць? Калі можна, то на якую адлегласць x павінен быць сфакусіраваны аб'ектыў фотаапарата?
4. Чалавек, вочы якога знаходзяцца на вышыні $h = 1,48$ м ад падлогі, стаіць перад плоскім вертыкальным люстрам на адлегласці $l = 2,70$ м ад яго. Ніжні край люстра размешчаны на вышыні $a = 40$ см над падлогай. На якой адлегласці b ад люстра знаходзіцца бліжэйшы пункт, бачны ў ім?
5. Пабудуйце відарыс прадмета AB у плоскім люстры KL (мал. 110). Вызначыце графічна абсяг яго бачання.
6. Калі хлопчык набліжаецца да плоскага люстра са скорасцю $v = 0,60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, то з якой скорасцю неабходна аддаляць люстра ад яго, каб адлегласць паміж хлопчыкам і яго відарысам не змянялася?



Мал. 110



§ 18. Увагнутыя і выпуклыя сферычныя люстры. Пабудова відарысаў

- Штораніцы, мыючыся, вы глядзіце ў плоскае люстра і бачыце свой выразны адбітак у ім. Але паверхня люстра можа быць не толькі плоскай, але і скрыўленай. Паралельныя прамені святла, адбіваючыся ад скрыўленай паверхні, не застаюцца паралельнымі. Але адбіваюцца яны ўпарадкавана і могуць як сыходзіцца, так і разыходзіцца (мал. 111).



Мал. 111. Адбіцці ад скрыўленай люстраной паверхні

Самы просты прыклад скрыўленай адбіваючай паверхні — сферычная паверхня. Люстра з такой паверхняй называюць **сферычным**.



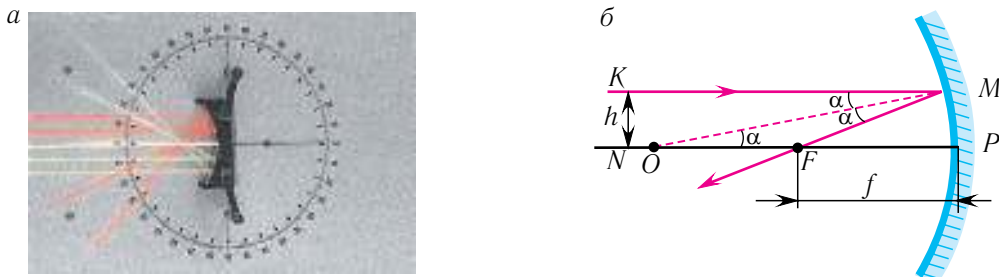
Мал. 112. Сферычныя люстры: *а* — увагнутае; *б* — выпуклае

Адрозніваюць два тыпы сферычных люстр: *увагнутыя*, калі люстраной з’яўляецца ўнутраная паверхня сферы (мал. 112, *а*), і *выпуклыя*, калі — знешняя (мал. 112, *б*).

Асноўныя характарыстыкі сферычных люстр

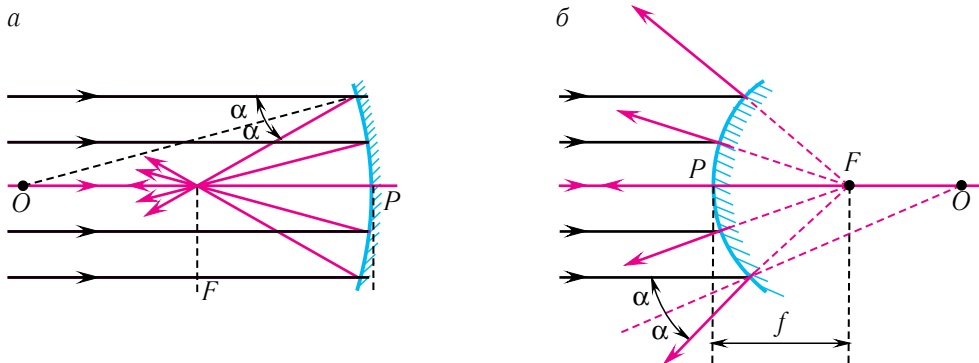
Разгледзім асноўныя характарыстыкі сферычных люстр на прыкладзе ўвагнутага люстра (мал. 113). Цэнтр сферы O называецца **аптычным цэнтрам** люстра, яго радыус R — **радыусам** люстра. Вяршыня шаравога сегмента P называецца **полюсам** люстра. Прамая лінія OP , якая праходзіць праз аптычны цэнтр і полюс люстра, называецца **галоўнай аптычнай воссю**. Любая прамая, напрыклад прамая OM , якая праходзіць праз аптычны цэнтр O і паверхню люстра (за выключэннем яго галоўнай аптычнай восі), называецца **пабочнай аптычнай воссю**.

Паколькі паверхня люстра сферычная, то з яе геаметрычных уласцівасцей вынікае, што любая аптычная вось перпендыкулярна да паверхні люстра. Таму прамень, што ідзе ў напрамку да люстра па якой-небудзь з аптычных восей, адбіўшыся ад люстра, пойдзе па той жа аптычнай восі, але ўжо ў адваротным напрамку.



Мал. 113. Увагнутае сферычнае люстра:

а — ход праменяў, паралельных галоўнай аптычнай восі; *б* — асноўныя элементы



Мал. 114. Побудова ходу променяў, паралельных галоўнай аптычнай восі, у люстрах: *а* — увагнутым; *б* — выпуклым

У плоскіх люстрах відарыс кропкавай крыніцы заўсёды з’яўляецца кропковым. Сферычныя люстры даюць нескажоныя відарысы толькі ў тым выпадку, калі прадмет досыць малы і прамені распаўсюджваюцца паблізу ад галоўнай аптычнай восі.



Калі накіраваць пучок променяў паралельна галоўнай аптычнай восі ўвагнутага сферычнага люстра, то ўсе яны перасякуць галоўную аптычную вось у адным і тым жа пункце на адлегласці $F = \frac{R}{2}$ (мал. 113, 114, *а*). Аналагічныя пабудовы можна выканаць і для выпуклага люстра (мал. 114, *б*). Толькі ў адрозненні ад увагнутага люстра перасякацца ў фокусе будуць не прамені, а іх прадаўжэнні. Гэты пункт знаходзіцца на галоўнай аптычнай восі на адлегласці $F = \frac{R}{2}$ ад полюса люстра — ва ўяўным фокусе.

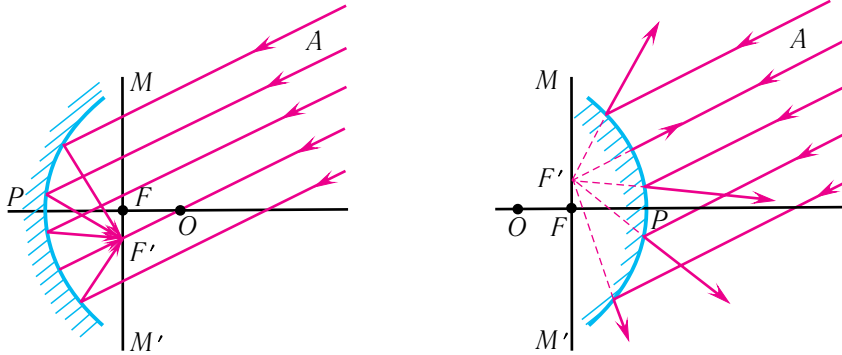
Пункт F (гл. мал. 113, 114) называецца **галоўным фокусам люстра**. Адлегласць $PF = F$ ад вяршыні люстра да фокуса называецца **фокуснай адлегласцю**. Фокусная адлегласць люстра роўна палове радыуса яго крывізны. Плоскасць, якая праходзіць праз галоўны фокус F лінзы перпендыкулярна да галоўнай аптычнай восі, называецца **факальным**.

З уласцівасці абарачальнасці аптычных променяў вынікае, што прамень, які ідзе ад крыніцы і праходзіць праз фокус F , пасля адбіцця пойдзе паралельна галоўнай аптычнай восі.

Пры падзенні пучка паралельных променяў пад вуглом да галоўнай аптычнай восі прамені пасля адбіцця перасякуць пабочную аптычную вось у пункце, які называецца **пабочным фокусам F'** (мал. 115).

Пабудова відарысаў у сферычных люстрах

Для пабудовы відарыса любога пункта ў сферычным люстры дастаткова пабудаваць ход двух любых променяў у люстры і знайсці пункт іх



Мал. 115. Адбіццё пучка промяняў, паралельных пабочнай аптычнай восі

перасячэння. Вядома, для гэтага трэба выбраць промяні, пабудавачь ход якіх у люстры прасцей за ўсё.

Як правіла, для пабудовы выбіраюць адзін з **чатырох стандартных (характэрных) промяняў** (мал. 116):

прамень (1) — **праз цэнтр люстра** — адбіты промень пойдзе па тым жа напрамку ў адваротны бок;

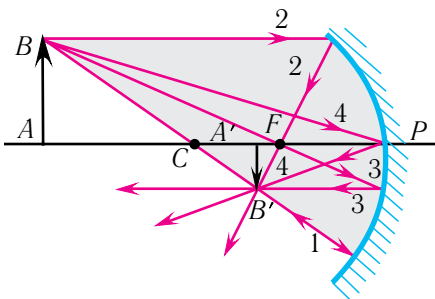
прамень (2) — **паралельны галоўнай аптычнай восі** — адбіты промень праходзіць праз галоўны фокус;

прамень (3) — **праз галоўны фокус** — адбіты промень праходзіць паралельна галоўнай аптычнай восі;

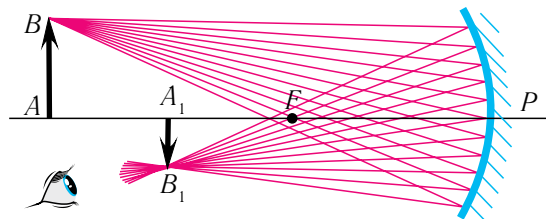
прамень (4) — **падаючы на люстру ў яго полюсе** — адбіты промень ідзе сіметрычна галоўнай аптычнай восі.

Характарыстыкі відарысаў

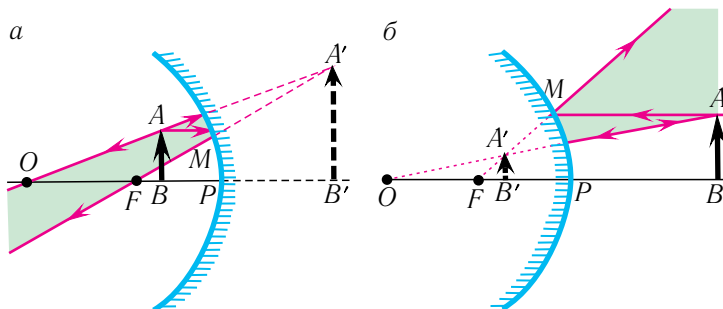
Калі прадмет AB (гл. мал. 116, 117) перпендыкулярны да галоўнай аптычнай восі ва ўвагнутым сфэрычным люстры, то яго відарыс будзе



Мал. 116. Стандартныя промяні ў сфэрычным люстры



Мал. 117. Фарміраванне сапраўднага відарыса ва ўвагнутым сфэрычным люстры



Мал. 118. Пабудова відарыса ў люстрах: *а* — увагнутым; *б* — выпуклым

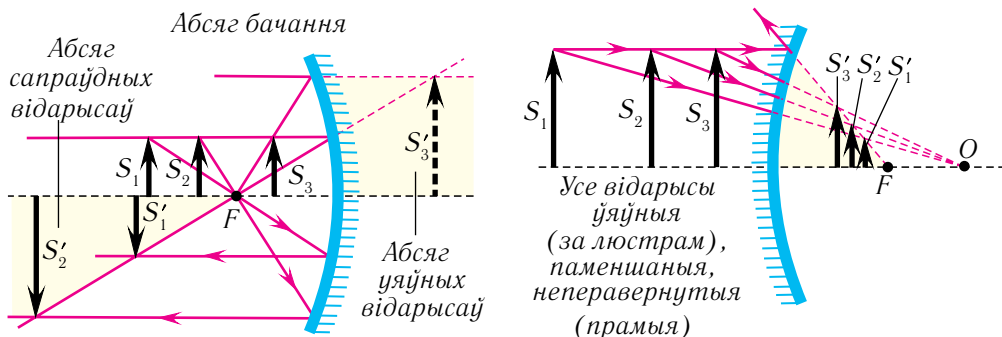
таксама перпендыкулярны да гэтай восі. Таму дастаткова пабудаваць відарыс толькі пункта *В*. З уласцівасцей зваротнасці светлагага праменя вынікае, што прадмет *AB* і яго відарыс A_1B_1 можна памяняць месцамі. Калі прадмет знаходзіцца за аптычным цэнтрам люстра, то відарыс A_1B_1 прадмета — **сапраўдны, адваротны і паменшаны** — знаходзіцца паміж галоўным фокусам і цэнтрам люстра (мал. 117).

Калі прадмет знаходзіцца паміж фокусам і аптычным цэнтрам люстра (гл. мал. 117), то відарыс A_1B_1 прадмета — **сапраўдны, адваротны і павялічаны** — знаходзіцца за цэнтрам люстра.

Калі прадмет знаходзіцца паміж полюсам люстра і яго фокусам, то відарыс A_1B_1 прадмета — **уяўны, прамы і павялічаны** — знаходзіцца за люстрам (мал. 118, *а*).

Пабудуем відарыс прадмета *AB* у выпуклым люстры (мал. 118, *б*). Відарыс у такім люстры **заўсёды атрымліваецца прамым, уяўным, паменшаным**.

Усе магчымыя відарысы прадметаў у сферычных люстрах пабудаваны на малюнку 119.



Мал. 119. Відарысы прадметаў ва ўвагнутым і выпуклым люстрах

Паколькі ўвагнутыя люстры факусіруюць любое электрамагнітнае выпраменьванне, то яны знаходзяць шырокае выкарыстанне ў радыёлакацыі, радыёсувязі, радыёастраноміі, тэлебачанні. У прыватнасці, увагнутыя люстры прымяняюць у тэлескопах — прыборах для назірання зорак, галактык.

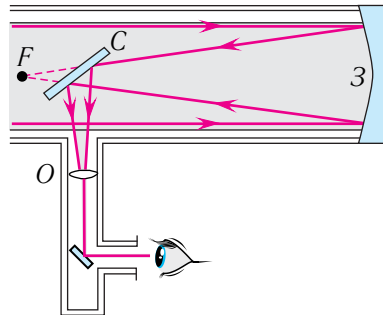
► Чарцёж першага пражэктара быў зроблены Леанарда да Вінчы ў Атлантычным кодэксе. Першы пражэктар быў пабудаваны ў 1779 г. рускім механікам І. П. Кулібіным. У наш час шырока выкарыстоўваюцца святлодыёдныя пражэктары (мал. 120). Яны маюць рэкордна нізкае спажыванне электраэнергіі, вялікі рэсурс працы, невялікую масу, высокую кампактнасць і могуць працаваць у шырокім тэмпературным дыяпазоне.



Мал. 120. Святлодыёдныя пражэктары

Першыя люстры тэлескоп-рэфлектары былі пабудаваны ў 1668 г. І. Ньютанам (мал. 121).

Сучасныя тэлескопы-рэфлектары маюць люстры вялікага дыяметра. Так, дыяметр галоўнага люстра тэлескопа Маунт-Паламарскай абсерваторыі ў ЗША — 5 м, а дыяметр тэлескопа спецыяльнай абсерваторыі на Паўночным Каўказе ў Расіі — 6 м.



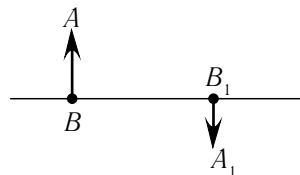
Мал. 121. Тэлескоп-рэфлектар Ньютана і ход прамяняў у ім



1. Дайце азначэнне сферычных люстр і іх класіфікацыю.
2. Дайце азначэнні асноўных элементаў сферычных люстраў.
3. Што называецца галоўным фокусам люстра? Факальнай плоскасцю?
4. Якія прамені выкарыстоўваюцца для пабудовы ў сферычных люстрах?
5. Што такое пабочная аптычная вось і пабочны фокус?
6. Якія відарысы атрымліваюцца ў сферычных люстрах: а) увагнутых; б) выпуклых?

Приклад рашэння задачы

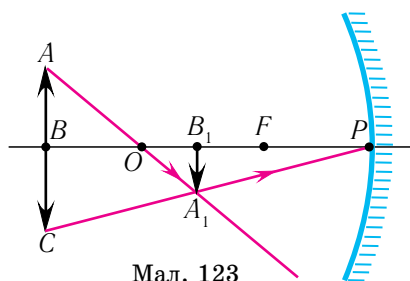
Пры дапамозе сферычнага люстра атрыма-
ны відарыс A_1B_1 прадмета AB (мал. 122). Вы-
значыце пабудовай становішча і фокус люстра.
Устанавіце таксама тып люстра (увагнутае ці выпу-
клае). Вядома, што BB_1 — аптычная вось люстра.



Мал. 122

Рашэнне

Як бачна з малюнка 123, відарыс A_1B_1 прадмета AB з'яўляецца адваротным і сапраўдным. Значыць, люстра з'яўляецца ўвагнутым, паколькі толькі ўвагнутае люстра дае сапраўдны відарыс. Злучым прамой лініяй пункты A і A_1 . Пункт O перасячэння прамых AA_1 і BB_1 з'яўляецца цэнтрам крывізны сферычнага люстра. Адаб'ем пункт A сіметрычна адносна восі AB_1 у пункт C . Правядзём прамую CA_1 да перасячэння з прамой BB_1 . Пункт P перасячэння будзе полюсам увагнутага сферычнага люстра. Падзяліўшы адрэзак OP напалам, знойдзем становішча фокуса F увагнутага люстра.

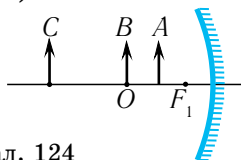


Мал. 123

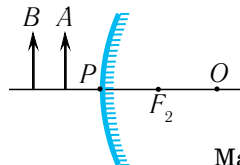
Адказ: люстра з'яўляецца ўвагнутым.

Практыкаванне 14

1. Пабудуйце відарысы прадметаў ва ўвагнутых сферычных люстрах (мал. 124).

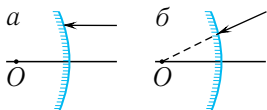


Мал. 124

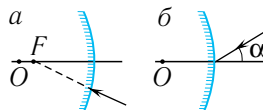


Мал. 125

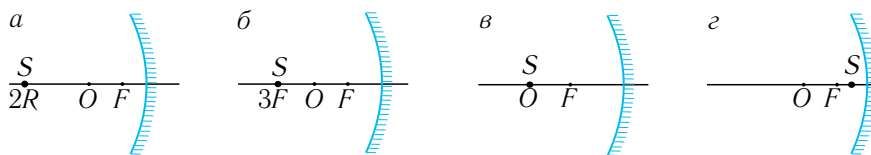
2. Пабудуйце відарысы прадметаў у выпуклых сферычных люстрах (мал. 125).
3. Пабудуйце ход праменяў ва ўвагнутых сферычных люстрах (мал. 126).
4. Пабудуйце ход праменяў у выпуклых сферычных люстрах (мал. 127).



Мал. 126



Мал. 127



Мал. 128



§18-1

5. Пабудуйце відарыс кропкавай крыніцы святла, якая знаходзіцца ў пункце S (мал. 128)

§ 19. Закон праламлення святла. Паказчык праламлення. Поўнае адбіццё

- Што адбываецца са светлавым праменем, які прайшоў у іншае асяроддзе? Як можна кіраваць светлавым праменем?



Змяненне напрамку распаўсюджвання праменя святла пры праходжанні праз мяжу падзелу двух асяроддзяў называецца праламненнем святла (мал. 129).

Вугал паміж перпендыкулярам, узведзеным у пункце падзення да мяжы падзелу двух асяроддзяў, і праломленым праменем называецца вуглом праламлення.

Для вывучэння ўласцівасцей светлавых хваль неабходна ведаць заканамернасці іх распаўсюджвання ў аднародным асяроддзі, а таксама заканамернасці адбіцця і праламлення на мяжы падзелу двух асяроддзяў.

Разгледзім падзенне плоскай светлавой хвалі на плоскую паверхню падзелу аднародных ізатропных і празрыстых асяроддзяў пры ўмове, што памеры паверхні падзелу нашмат большыя за даўжыню хвалі падаючага выпраменьвання.

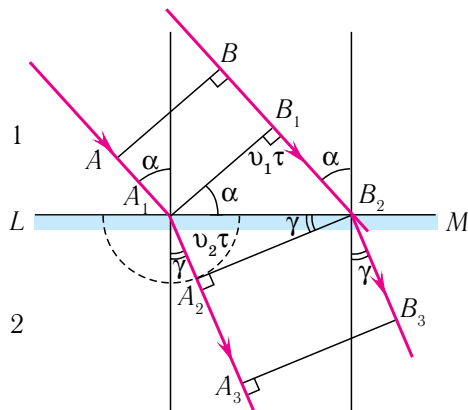
Няхай на плоскую паверхню падзелу LM двух асяроддзяў падае плоская светлавая хваля, фронт якой AB (мал. 130). Калі вугал падзення α адрозны ад нуля, то розныя пункты фронту AB хвалі дасягнуць мяжы падзелу LM не адначасова.

Разгледзім, што адбудзецца ў другім асяроддзі, лічачы, што модуль скорасці v_2 распаўсюджвання святла ў ім меншы, чым у пер-



Мал. 129.

Праламненне святла на мяжы падзелу двух асяроддзяў



Мал. 130. Тлумачэнне праламлення святла ў адпаведнасці з прынцыпам Гюйгенса: AB — фронт падаючай плоскай хвалі; A_2B_2 — фронт хвалі пасля праламлення

З $\triangle A_1B_1B_2$ знаходзім $A_1B_2 = \frac{v_1\tau}{\sin\alpha}$ і з $\triangle A_1A_2B_2$ — $A_1B_2 = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}$.

Адкуль

$$\frac{v_1\tau}{\sin\alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}.$$

З яго вынікае закон праламлення:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Нагадаем, што абсалютным паказчыкам праламлення называецца адносіна модуля скорасці распаўсюджвання светлавой хвалі ў вакууме c да модуля скорасці распаўсюджвання ў дадзеным асяроддзі:

$$n = \frac{c}{v}.$$

З улікам гэтай суадносіны закон праламлення прымае выгляд:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Велічыня

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

шым ($v_2 < v_1$) (гл. мал. 130). Фронт падаючай хвалі AB будзе перамяшчацца са скорасцю, модуль якой v_1 , у напрамку AA_1 . Да моманту часу (за прамежак часу $\tau = \frac{B_2B_1}{v_1}$),

калі пункт B_1 фронту дасягне мяжы падзелу двух асяроддзяў (пункт B_2), другасная хваля з пункта A_1 (згодна з прынцыпам Гюйгенса) пройдзе адлегласць $l_2 = v_2\tau$. Фронт хвалі, якая распаўсюджваецца ў другім асяроддзі, можна атрымаць, правёўшы прамую лінію, якая датыкаецца да паўакружнасці з цэнтрам у пункце A_1 .

З пабудовы бачна, што $\angle B_1A_1B_2 = \alpha$, $\angle A_1B_2A_2 = \gamma$, як вуглы з узаємна перпендыкулярнымі старанамі.

роўная адносіне абсалютных паказчыкаў праламлення n_2 другога і n_1 першага асяроддзяў, называецца **адносным паказчыкам праламлення** другога асяроддзя адносна першага. У адрозненні ад абсалютнага паказчыка праламлення адносны паказчык праламлення можа быць і меншы за адзінку, калі $n_2 < n_1$.

Такім чынам, зыходзячы з хвалевай тэорыі святла, атрыманы **закон праламлення светлавых хваль** (святла):

адносіна сінуса вугла падзення да сінуса вугла праламлення ёсць велічыня пастаянная для двух дадзеных асяроддзяў і роўная адноснаму паказчыку праламлення другога асяроддзя адносна першага;

прамені, падаючы і праломлены, ляжаць у адной плоскасці з перпендыкулярам, праведзеным у пункце падзення праменя да плоскасці мяжы падзелу двух асяроддзяў.

Для назірання з'явы праламлення святла дастаткова змясціць аловак у шклянку з вадой і паглядзець на яго збоку — будзе здавацца, што аловак «надламаны» (праломлены) (гл. мал. 129), хоць ён застаўся пры гэтым цэлым.

► Перапішам закон праламлення ў наступным выглядзе:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

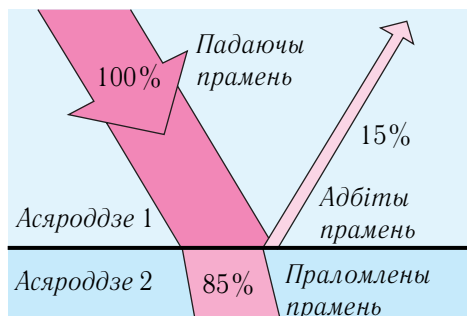
Пры такім запісе закона праламлення (без дробу) неабходна заўсёды памнажаць абсалютны паказчык праламлення на сінус вугла, які адносіцца да аднаго і таго ж асяроддзя.

На мяжы падзелу двух празрыстых асяроддзяў звычайна адначасова з праламленнем назіраецца адбіццё хваль. Згодна з законам захавання энергіі сума энергій адбітай $W_{\text{адб}}$ і праломленай $W_{\text{прал}}$ хваль роўна энергіі падаючай хвалі $W_{\text{пад}}$ (мал. 131):

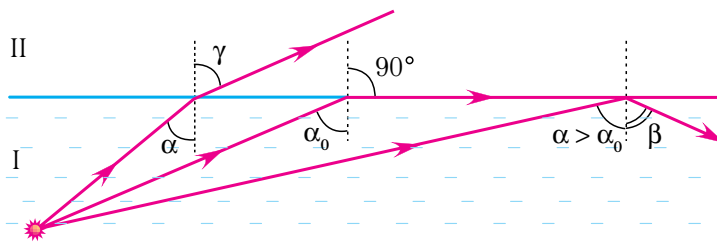
$$W_{\text{пад}} = W_{\text{прал}} + W_{\text{адб}}.$$

Прыкладны баланс энергій паміж адбітай і праломленай хвалямі паказаны на малюнку 131.

Прычынай праламлення хваль, г. зн. змянення напрамку распаўсюджвання хваль на мяжы падзелу двух асяроддзяў, з'яўляецца змяненне мо-



Мал. 131. Баланс энергій пры адбіцці і праламненні святла на мяжы падзелу празрыстых асяроддзяў



Мал. 132. Прамаленне і адбіццё святла на мяжы падзелу асяроддзяў

дуля скорасці распаўсюджвання электрамагнітных хваль пры пераходзе выпраменьвання з аднаго асяроддзя ў іншае.

Як вынікае з закону прамалення, пры пераходзе святла з *аптычна больш шчыльнага* асяроддзя I (з большым абсалютным паказчыкам прамалення n_1) у *аптычна менш шчыльнае* асяроддзе II (з меншым паказчыкам прамалення n_2), вугал прамалення γ становіцца большым за вугал падзення α (мал. 132, 133).

Па меры павелічэння вугла падзення, пры некаторым яго значэнні α_0 , вугал прамалення стане $\gamma = 90^\circ$, г. зн. святло не будзе пападаць у другое асяроддзе.



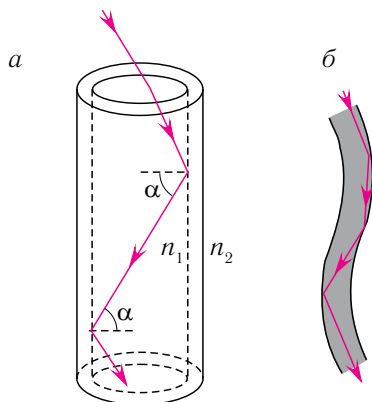
Гэта з'ява называецца **поўным адбіццём святла** (мал. 133). Вугал α_0 , пры якім узнікае поўнае адбіццё, называецца **гранічным вуглом поўнага адбіцця**. Ён вызначаецца з закона прамалення пры ўмове, што вугал прамалення $\gamma = 90^\circ$:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}; \quad (n_2 < n_1).$$

Такім чынам, праломленая хваля адсутнічае пры вуглах падзення, большых за гранічны вугал $\alpha \geq \alpha_0$. Напрыклад, для мяжы вада ($n = 1,33$) — паветра гранічны вугал поўнага адбіцця $\alpha = 49^\circ$, для мяжы алмаз ($n = 2,42$) — паветра — $\alpha_0 = 24^\circ$.



Мал. 133. Поўнае адбіццё святла на мяжы падзелу асяроддзяў



Мал. 134. Ход праменяў у святлаводзе:
а — прамым; б — гнуткім



Мал. 135. Святлаводы

З'яву поўнага адбіцця выкарыстоўваюць у валаконнай аптыцы для перадачы святла і відарысаў па пучках празрыстых гнуткіх святлаводаў (мал. 134, 135), а таксама ў разнастайных адбівальных прызмах розных аптычных прыбораў. У валаконна-аптычных прыладах, у якіх святло распаўсюджваецца па тонкіх святлаводах, шкляная святловядучая жыла пакрыта слоем рэчыва з меншым паказчыкам праламлення.

► У 1954 г. беларускім фізікам, акадэмікам Фёдарам Іванавічам Фёдаравым была тэарэтычна прадказана новая фізічная з'ява — папярочны зрух (перпендыкулярна да плоскасці падзення) светлага пучка пры яго поўным адбіцці. Гэты зрух пучка нашмат меншы за даўжыню хвалі і для яго назірання светлавы пучок павінен быць абмежаваным у папярочным напрамку. У 1969 г. французскім фізікам К. Эмберам яна была пацверджана эксперыментальна і атрымала назву «зрух Фёдарова».



У 2009 г. кітайскі вучоны Чарльз Као ўзнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы за выдатны ўклад у даследаванне святлаводаў для аптычнай сувязі.



1. Якая з'ява называецца праламненнем святла?
2. Што з'яўляецца прычынай праламлення святла на мяжы падзелу асяроддзяў?
3. Растлумачце, чаму аловак, апушчаны ў ваду, здаецца паламаным (гл. мал. 129).
4. Сфармулюйце закон праламлення святла.
5. Што называецца поўным адбіццём святла? Пры якой умове яно назіраецца?

6. Па якой формуле разлічваецца гранічны вугал поўнага адбіцця святла?
7. Чаму роўны вугал праламлення пры нармальным падзенні святла на мяжу падзелу двух асяроддзяў?
8. Чаму ўяўная глыбіня вадаёма меншая за сапраўдную?
9. Чаму аквалангісты апранаюць маскі на вочы для апускання ў ваду?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце вугал падзення α праменя з паветра на шкляную пласцінку з паказчыкам праламлення $n = 1,5$, калі вугал паміж адбітым і праломленым прамянямі роўны $\varphi = 90^\circ$.

Дадзена:

$$n = 1,5$$

$$n_{\text{в}} = 1,0$$

$$\varphi = 90^\circ$$

$\alpha = ?$

Рашэнне

З закону праламлення святла знаходзім:

$$\sin \alpha = n \sin \gamma.$$

З геаметрычнай пабудовы (мал. 136) вынікае, што вугал адбіцця і праламлення звязаны суадносінай:

$$\beta + \gamma = 90^\circ.$$

$$\gamma = 90^\circ - \beta.$$

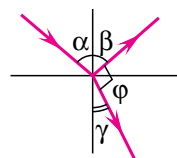
Падстаўляем знойдзены вугал γ у закон праламлення і з улікам закона адбіцця ($\beta = \alpha$) вызначаем шуканы вугал падзення:

$$\sin \alpha = n \sin(90^\circ - \beta) = n \sin(90^\circ - \alpha) = n \cos \alpha.$$

Адкуль

$$\operatorname{tg} \alpha = n, \quad \operatorname{tg} \alpha = 1,5, \quad \alpha = 56^\circ.$$

Адказ: $\alpha = 56^\circ$.



Мал. 136

Практыкаванне 15

1. Вызначыце глыбіню ракі H , калі чалавеку, які глядзіць нармальна да яе паверхні, яна здаецца роўнай $h = 4,0$ м. Паказчык праламлення вады адносна паветра лічыць $n = \frac{4}{3}$.
2. Знайдзіце адносны паказчык праламлення n_{21} другога асяроддзя адносна першага, калі вугал адбіцця праменя на мяжы падзелу двух асяроддзяў $\alpha = 4,0^\circ$, а вугал яго праламлення — $\gamma = 46^\circ$.
3. Вызначыце вугал падзення α праменя святла на паверхню шкла з паветра, калі вугал праламлення ў $k = 2,0$ раза меншы за вугал падзення. Паказчык праламлення шкла $n = 1,5$.

4. Вызначыце гранічны вугал поўнага адбіцця α_2 на мяжы рэчыва са шклом (паказчык праламлення шкла $n = 1,42$), калі на мяжы гэтага рэчыва з паветрам ($n_{\text{п}} = 1,0$) гранічны вугал поўнага адбіцця $\alpha_1 = 45^\circ$.
5. Вызначыце вугал падзення α праменя святла з паветра на паверхню шкла з паказчыкам праламлення $n = 1,6$, калі вугал праламлення гэтага праменя $\gamma = 29^\circ$.
6. Вызначыце вугал падзення α на плоскую мяжу падзелу двух асяроддзяў з паказчыкамі праламлення $n_1 = 1,5$ і $n_2 = 1,7$, калі прамень адбіты перпендыкулярны да праменя праломленага.
7. Святло распаўсюджваецца ўздоўж аптычнага валакна з паказчыкам праламлення $n_1 = 1,60$. Вызначыце паказчык праламлення n_2 абалонкі, калі гранічны вугал поўнага адбіцця роўны $\alpha_{\text{гп}} = 85,0^\circ$.



§ 20. Праходжанне святла праз аптычныя элементы

- Законы адбіцця і праламлення святла шырока выкарыстоўваюцца для кіравання ходам светлавых пучкоў. Для адбіцця святла ў прыборах прымяняюцца люстры і прызмы, для праламлення — прызмы, плоскапаралельныя пласцінкі (мал. 137), лінзы. Люстры, прызмы, пласцінкі і лінзы з'яўляюцца элементамі, камбінуючы якія ствараюць розныя аптычныя прыборы. Як яны працуюць?

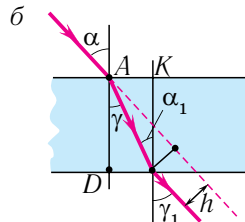
Разгледзім асобныя элементы аптычных прыбораў.

Плоскапаралельная пласцінка

Разгледзім ход светлага праменя ад крыніцы ў плоскапаралельнай пласцінцы таўшчынёй d , якая знаходзіцца ў паветры (мал. 138, а). Згодна з законам праламлення, на першай і другой межах



Мал. 137. Плоскапаралельныя пласцінкі



Мал. 138. а — светлавы прамень, які праходзіць праз плоскапаралельную пласцінку; б — ход праменя ў пласцінцы

падзелу для променя, які падае пад вуглом α на першую мяжу, маем (мал. 138, б):

$$\sin \alpha = n \sin \gamma, \quad n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1.$$

Тут γ — вугал праламлення на першай мяжы, α_1 — вугал падзення на другую мяжу, γ_1 — вугал праламлення на другой мяжы, n — абсалютны паказчык праламлення рэчыва пласцінкі.

Накрыж ляжачыя вуглы γ і α_1 пры паралельных прамых AD і BK (перпендыкулярах да першай і другой паралельных меж) роўныя, г. зн. $\alpha_1 = \gamma$. Значыць, $\sin \alpha = n \sin \gamma = n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1$. Адкуль вынікае, што:

$$\alpha = \gamma_1. \quad (1)$$

Такім чынам, *прамень святла, праходзячы праз плоскапаралельную пласцінку, з абодвух бакоў якой знаходзіцца адно і тое ж асяроддзе, зрушваецца на некаторую адлегласць $h = BC$ перпендыкулярна да свайго пачатковага напрамку* (гл. мал. 138, б).

Адпаведна, усе прадметы, калі глядзець на іх скрозь празрыстую плоскапаралельную пласцінку пад вуглом, не роўным нулю, будуць таксама здавацца зрушанымі.

Як бачна на малюнку 138, а, промені, адбітыя ад верхняй і ніжняй граней пласцінкі, паралельны адзін аднаму на выхадзе з яе.



► На малюнку 139 паказана трохгранная прызма. Прамень святла, праходзячы праз трохгранную прызму, адхіляецца ад свайго пачатковага напрамку распаўсюджвання да асновы (патоўшчанай часткі) прызмы. Падкрэслім, што гэта справядліва ў тым выпадку, калі абсалютны паказчык праламлення рэчыва прызмы большы за абсалютны паказчык праламлення навакольнага асяроддзя ($n_2 > n_1$).

Звярніце ўвагу, што калі на прызму падае прамень белага святла, то пасля праходжання прызмы на экране назіраецца рознакаляровая палоска, якая змяшчае набор колераў — ад чырвонага да фіялетавага. Ісак Ньютан, які ўпершыню правёў дадзены эксперымент, назваў гэту палоску спектрам. Парадак следавання колераў у спектры лёгка запомніць з дапамогай вядомай фразы:

чырвоны — 770—630 нм	чыж
аранжавы — 630—590 нм	аддаў
жоўты — 590—570 нм	жуку
зялёны — 570—495 нм	загад:
блакітны, сіні — 495—435 нм	брат, схавай
фіялетава — 435—390 нм	фотаапарат



Мал. 139. Праламленне праменяў у прызме

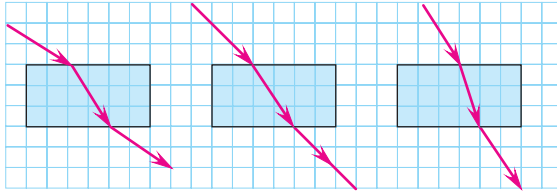


1. Намалюйце ход светлагага праменя ў плоскапаралельнай пласцінцы.
2. Пры якім вугле падзення прамень святла, праходзячы праз плоскапаралельную пласцінку, не зрушваецца?

Практыкаванне 16

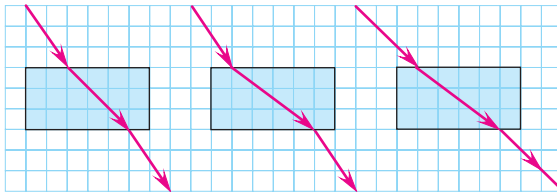


1. Вызначыце паказчык праламлення пласцінкі, зыходзячы з ходу праменяў на малюнку 140. Навакольнае асяроддзе — паветра ($n = 1,0$).



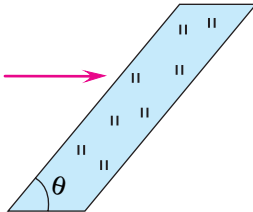
Мал. 140

2. Вызначыце паказчык праламлення пласцінкі, зыходзячы з ходу праменяў на малюнку 141, калі паказчык праламлення навакольнага асяроддзя $n = 2,0$.

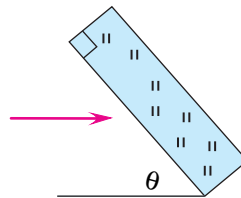


Мал. 141

3. Пабудуйце ход праменя ў пласцінках са шкла з паказчыкам праламлення $n = 1,5$ (мал. 142, 143), калі вугал $\theta = 45^\circ$.



Мал. 142



Мал. 143

4. Вугал падзення двух паралельных праменяў святла з паветра на плоскапаралельную шкляную пласцінку ($n = 1,6$) роўны $\alpha = 30^\circ$, а адлегласць паміж імі $l_0 = 20$ мм. Вызначыце адлегласць l паміж праменьнямі ў пласцінцы.



§ 21. Формула тонкай лінзы

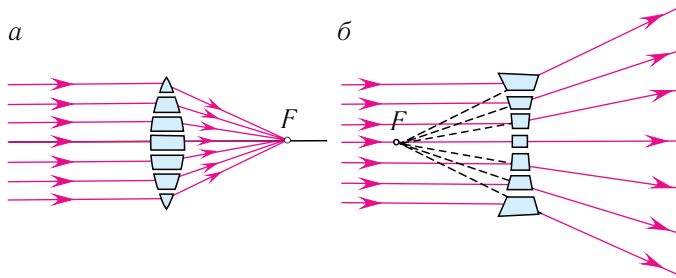
- Одним з найбільш простих аптычных прыбораў з'яўляецца тонкая лінза (мал. 144), якая шырока выкарыстоўваецца як для выпраўлення дэфектаў зроку, так і для атрымання аптычных відарысаў. Якія відарысы дае тонкая лінза? Як злучаны паміж сабой адлегласць ад прадмета да тонкай лінзы і адлегласць ад лінзы да відарыса?



Мал. 144. Лінзы



Лінза называецца збіральнай, калі пасля праламлення ў ёй паралельны пучок становіцца сыходным (мал. 145, а). Калі ж пасля праламлення ў лінзе паралельны пучок становіцца разыходным, то лінза называецца рассявальнай (мал. 145, б).

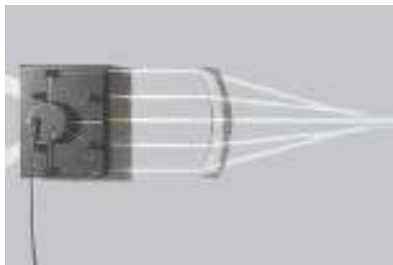


Мал. 145. Мадэль лінзы: а — дваякавыпуклай; б — дваякаўвагнутай

Велічыня, адваротная фокуснай адлегласці лінзы, выражанай у метрах, называецца яе аптычнай сілай: $D = \frac{1}{F}$.

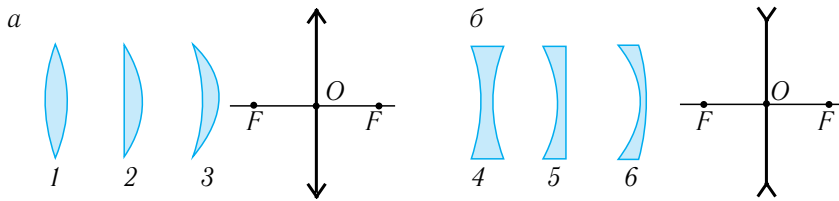
Адзінка аптычнай сілы — дыяптрыя (1 дптр). 1 дптр адпавядае аптычнай сіле лінзы з фокуснай адлегласцю $F = 1$ м; $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Лінзы можна прадставіць у выглядзе сукупнасці трохгранных прызм. На малюнку 145 паказана мадэль дваякавыпуклай лінзы, сабранай з



Мал. 146. Ход праменяў у збіральнай лінзе

прызм, павернутых асновамі да цэнтра лінзы (гл. мал. 145, а). Адпаведна, мадэль дваякаўвагнутай лінзы будзе прадстаўлена прызмамі, павернутымі асновамі ад цэнтра лінзы (гл. мал. 145, б). Праламляючыя вуглы гэтых прызм можна падабраць такім чынам, каб падаючыя на яе паралельныя прамені пасля праламлення ў прызмах сабраліся ў адным пункце F (гл. мал. 145, 146).



Мал. 147. Типы линз і їх умовні абазначэнні: а — збіральныя:

1 — дваякавыпуклая; 2 — плоскавыпуклая; 3 — увагнута-выпуклая; б — расейвальныя: 4 — дваякаўвагнутая; 5 — плоскаўвагнутая; 6 — выпукла-ўвагнутая

Лінза лічыцца **тонкай**, калі яе таўшчыня ў цэнтры нашмат меншая за радыусы паверхняў, якія абмяжоўваюць яе. Тонкая лінза дае відарыс без скажэнняў толькі ў тым выпадку, калі святло монахраматычнае і прадмет дастаткова малы, а значыць, прамені распаўсюджваюцца паблізу ад галоўнай аптычнай восі.

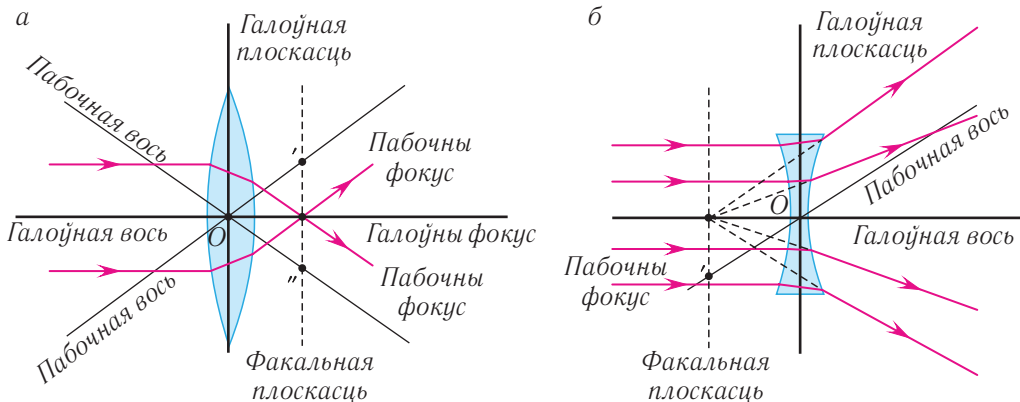
Пералічым умовы, пры *адначасовым* выкананні якіх лінза з'яўляецца **збіральнай** (мал. 147, а):

- таўшчыня ў цэнтры большая за таўшчыню каля краёў;
- яе паказчык праламлення большы за паказчык праламлення навакольнага асяроддзя.

Пры невыкананні (або выкананні) *толькі адной* з гэтых умоў лінза з'яўляецца **расейвальнай** (мал. 147, б).

Разгледзім **асноўныя характарыстыкі лінзы** (мал. 148, а, б).

Прамая лінія, на якой ляжаць цэнтры абедзвюх сферычных паверхняў лінзы, называецца **галоўнай аптычнай воссю**.



Мал. 148. Асноўныя характарыстыкі лінзы:

а — збіральная лінза; б — расейвальная лінза

Пункт лінзи, праходзячы праз які прамень не праламляецца, называецца **аптычным цэнтрам**.

Прамая лінія, якая праходзіць праз аптычны цэнтр лінзы і не супадае з галоўнай аптычнай воссю, называецца **пабочнай аптычнай воссю**. Кожная лінза мае толькі адну галоўную аптычную вось і бясконца многа пабочных восей.

Плоскасць, якая праходзіць праз аптычны цэнтр тонкай лінзы перпендыкулярна да галоўнай аптычнай восі, называецца **галоўнай плоскасцю** лінзы.

Пункт, у які збіраецца вузкі пучок святла пасля праламлення ў лінзе, што распаўсюджваецца паралельна галоўнай аптычнай восі, называецца **галоўным фокусам F** лінзы. Адлегласць OF ад аптычнага цэнтра лінзы да яе галоўнага фокуса, называецца **фокуснай адлегласцю** лінзы.

Плоскасць, якая праходзіць праз галоўны фокус перпендыкулярна да галоўнай аптычнай восі, называецца **факальнай плоскасцю**. Факальная плоскасць збіральной лінзы з'яўляецца геаметрычным месцам пунктаў, у якіх перасякаюцца паралельныя прамені, што падаюць на лінзу пад любым вуглом да галоўнай аптычнай восі. Таму пучок святла, накіраваны на збіральную лінзу паралельна пабочнай аптычнай восі, збіраецца ў **пабочным фокусе**.

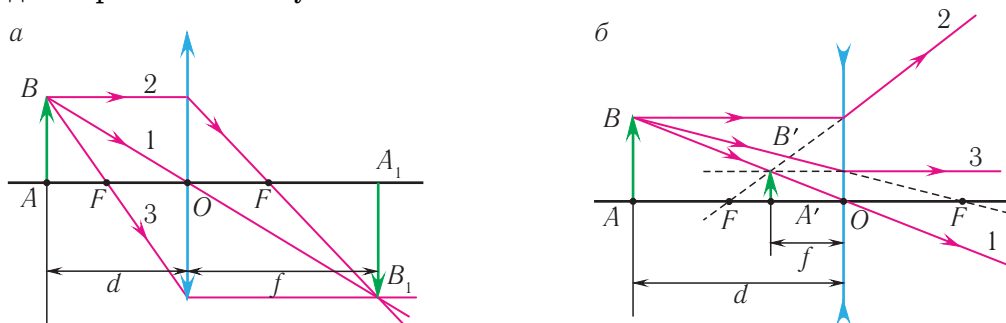
Пабудова відарысаў

Звычайна для пабудовы ў лінзах выкарыстоўваюць тры **характэрныя (стандартныя) прамені** (мал. 149, а, б):

прамень (1), які ідзе праз аптычны цэнтр лінзы, не зведвае праламлення;

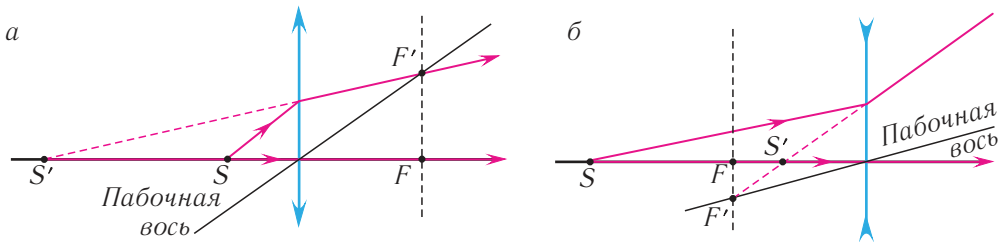
прамень (2), паралельны галоўнай аптычнай восі, пасля праламлення праходзіць праз галоўны фокус;

прамень (3), які праходзіць праз галоўны фокус, пасля праламлення ідзе паралельна галоўнай аптычнай восі.



Мал. 149. Стандартныя прамені для пабудовы ў лінзах:

а — збіральная лінза; б — рассейвальная лінза

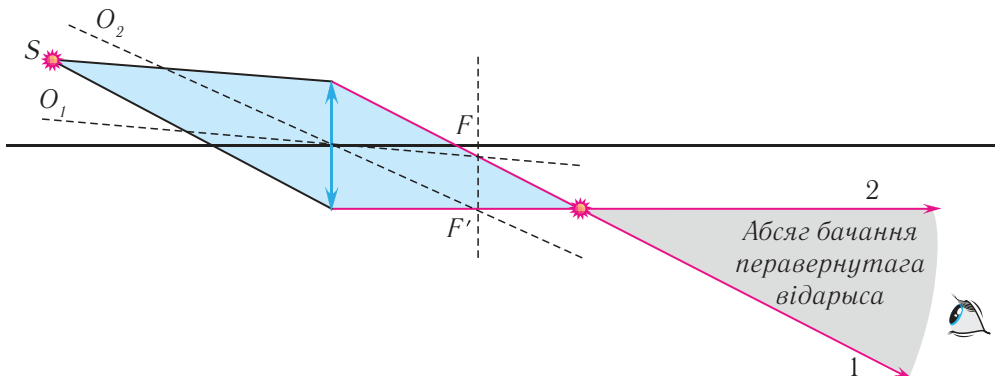


Мал. 150. Пабудова відарыса з дапамогай пабочнай аптычнай восі:
 a — збіральная лінза; b — расейвальная лінза

Для пабудовы відарыса ў лінзе дастаткова пабудаваць ход двух праменяў ад кожнага пункта прадмета (гл. мал. 149). Відарыс знаходзіцца ў месцы перасячэння праменяў пасля праламлення на паверхнях лінзы (сапраўдны відарыс) або ў месцы перасячэння прадаўжэнняў праменяў (уяўны відарыс).

Адзначым, што калі прадмет AB размешчаны перпендыкулярна да галоўнай аптычнай восі, то і яго відарыс A_1B_1 будзе перпендыкулярны да гэтай восі. Таму дастаткова пабудаваць толькі відарыс A_1 пункта A прадмета, а відарыс B_1 пункта B знойдзем, апусціўшы перпендыкуляр з пункта B_1 на галоўную аптычную вось (гл. мал. 149).

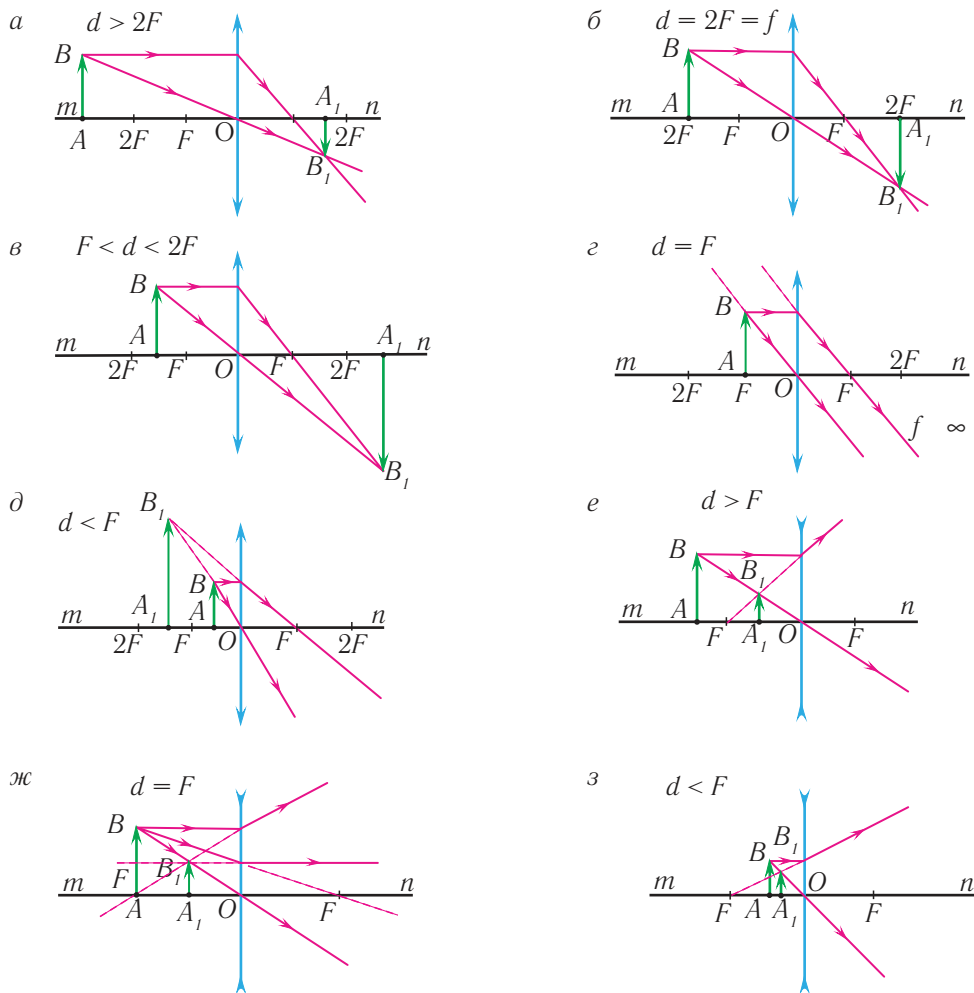
Для пабудовы відарыса пункта, які знаходзіцца на галоўнай аптычнай восі, акрамя праменя, што праходзіць праз цэнтр лінзы, выкарыстоўваюць прамень, які падае на яе паралельна якой-небудзь пабочнай аптычнай восі (мал. 150). Гэты прамень пасля праламлення ў лінзе пройдзе праз пабочны фокус F' , які ляжыць на пабочнай восі. Такія пабудовы дадзены для збіральнай і расейвальнай лінз на малюнку 150. На малюнку 151 дадзены прыклад пабудовы абсягу бачання прадмета S у тонкай лінзе.



Мал. 151. Пабудова відарыса ў збіральнай лінзе і абсяг бачання

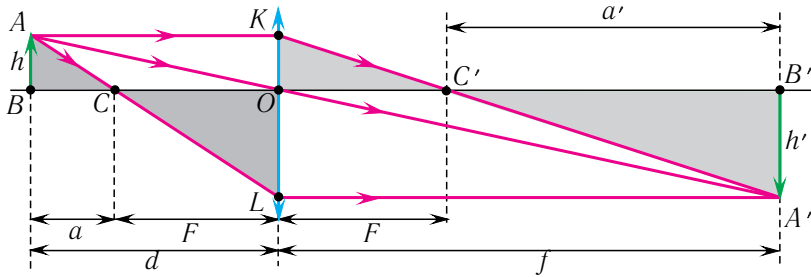
Характерыстыкі відарысаў

У залежнасці ад тыпу лінзы і адлегласці да яе можна атрымліваць відарысы: *павялічаныя і паменшаныя, прамыя і адваротныя (перавернутыя), сапраўдныя і ўяўныя* (мал. 152).



Мал. 152. Пабудовы ў тонкіх лінзах:

a — відарыс сапраўдны, адваротны, паменшаны; *б* — відарыс сапраўдны, адваротны, у натуральную велічыню; *в* — відарыс сапраўдны, адваротны, павялічаны; *г* — відарыс адсутнічае (на бясконцасці); *д* — відарыс уяўны, прамы, павялічаны; *е* — відарыс уяўны, прамы, паменшаны; *ж* — відарыс уяўны, прамы, паменшаны ў 2 разы; *з* — відарыс уяўны, прамы, паменшаны



Мал. 153. Да виваду формулы лінзы

Паміж фокуснай адлегласцю тонкай лінзы, адлегласцю ад прадмета да лінзы і ад лінзы да відарыса існуе пэўная колькасная залежнасць, называемая **формулай тонкай лінзы**.

Выведзем формулу тонкай лінзы з геаметрычных меркаванняў, разглядаючы ход характэрных праменяў: праменя, які ідзе праз аптычны цэнтр O лінзы, праменя, паралельнага галоўнай аптычнай восі лінзы, і праменя, што праходзіць праз галоўны фокус лінзы.

Пабудуем відарыс прадмета AB у тонкай збіральнай лінзе (мал. 153). Няхай адлегласць ад прадмета да лінзы d , адлегласць ад лінзы да відарыса f , фокусная адлегласць лінзы F , адлегласць ад прадмета да перадняга галоўнага фокуса a , адлегласць ад задняга галоўнага фокуса да відарыса a' , вышыня прадмета h , вышыня яго відарыса h' .

З малюнка 153 відаць, што $\triangle ABC \sim \triangle CLO$, $\triangle A'B'C' \sim \triangle KOC'$, $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$. З падобнасці трохвугольнікаў вынікае:

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{F}; \quad (1)$$

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F}; \quad (2)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h'}{f}. \quad (3)$$

Выкарыстаўшы суадносіны (1) і (2), атрымаем:

$$aa' = F^2. \quad (4)$$

З улікам таго што $d = a + F$, $f = a' + F$ (гл. мал. 153), знаходзім $a = d - F$ і $a' = f - F$ і падстаўляем у формулу (4):

$$(d - F)(f - F) = df - Ff - dF + F^2 = F^2.$$

Адкуль атрымліваем $df = Ff + dF$.

Падзяліўшы абедзве часткі апошняга выразу на dfF , атрымаем **формулу тонкай лінзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (5)$$

Для практычнага выкарыстання формулы лінзы трэба цвёрда запамінаць **правіла знакаў**:

для збіральнай лінзы, сапраўднай крыніцы і сапраўднага відарыса велічыні F , d , f лічаць *дадатнымі*. Для рассеивальной лінзы, уяўнай крыніцы і ўяўнага відарыса F , d , f лічаць *адмоўнымі*.

Заўважым, што прадмет або крыніца з'яўляецца *ўяўнай* толькі ў тым выпадку, калі на лінзу падае пучок сыходных праменяў.

Такім чынам, лінза з $F > 0$ з'яўляецца **збіральнай** (дадатнай), а з $F < 0$ — **рассеивальной** (адмоўнай).

Лінейным (папярочным) павелічэннем Γ называецца адносіна лінейнага памеру відарыса h' да лінейнага памеру прадмета h . З суадносін (3) знаходзім лінейнае павелічэнне тонкай лінзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}. \quad (6)$$

Паколькі аптычная сіла лінзы залежыць ад уласцівасцей навакольнага асяроддзя, то пад вадой без плавальных акулераў мы бачым дрэнна.

У сучасных аптычных прыборах для паляпшэння якасці відарысаў выкарыстоўваюць **сістэмы лінз**. Аптычная сіла D сістэмы тонкіх лінз, складзеных разам, роўна суме іх аптычных сіл D_i :

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n. \quad (7)$$



1. Што называюць аптычнай сілай лінзы? У якіх адзінках яна вымяраецца?
2. Што называюць галоўнай аптычнай воссю лінзы? Пабочнай воссю?
3. Што называюць галоўным фокусам лінзы? Фокуснай адлегласцю?
4. Па якой формуле вызначаецца папярочнае павелічэнне лінзы?
5. Як вядома, светлавая прамені абарачальныя. Як гэта сцверджанне можна выкарыстаць пры прымяненні формулы тонкай лінзы?
6. Якія відарысы можа даць збіральная лінза? Рассеивальная?
7. Па якой формуле вызначаецца аптычная сіла сістэмы тонкіх лінз?

8. Визначыце, як змяняецца становішча відарыса і яго лінейнае павелічэнне пры перамяшчэнні прадмета ўздоўж галоўнай аптычнай восі збіральнай (рассейвальнай) лінзы ад аптычнага цэнтра да бясконцасці.

9. Ці можа расейвальная лінза даць сапраўдны відарыс?

Прыклад рашэння задачы

На якой адлегласці d ад расейвальнай лінзы з аптычнай сілай $D = -4$ дптр трэба змясціць прадмет, каб яго ўяўны відарыс атрымаўся ў $k = 5$ разоў меншы ($\Gamma = \frac{1}{5}$) за сам прадмет? Пабудуйце відарыс прадмета.

Дадзена:
 $D = -4$ дптр
 $\Gamma = \frac{1}{5}$
 $d = ?$

Рашэнне
 3 формулы для лінейнага павелічэння:

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \Gamma$$

знаходзім:

$$f = \Gamma d.$$

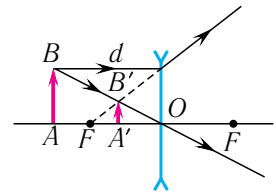
Па формуле тонкай лінзы (мал. 154) у адпаведнасці з правіламі знакаў:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

з улікам выразу для f атрымаем:

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\Gamma}}{D}, \quad d = \frac{1 - \frac{1}{\frac{1}{5}}}{-4 \text{ м}^{-1}} = \frac{1 - 5}{-4} \text{ м} = 1 \text{ м}.$$

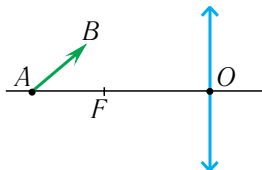
Адказ: $d = 1$ м.



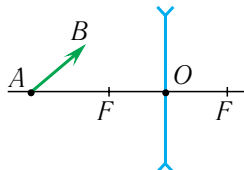
Мал. 154

Практыкаванне 17

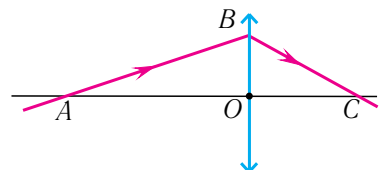
1. Пабудуйце відарыс прадмета AB у тонкіх збіральнай і расейвальнай лінзах (мал. 155, 156). Які гэта відарыс?
2. Визначыце пабудовай становішча фокусаў тонкай лінзы, калі зададзена галоўная аптычная вось і ход адвольнага прамяня ABC (мал. 157).



Мал. 155



Мал. 156



Мал. 157

3. Запоўніце ў сшытку табліцу класіфікацыі відарысаў, даваемых тонкай лінзай у розных выпадках.

d	f	Γ	Від відарыса	Формула лінзы
Збіральная лінза				
$d > 2F$				
$d = 2F$				
$F < d < 2F$				
$d = F$				
$d < F$				
Рассейвальная лінза				

4. Відарыс прадмета, які знаходзіцца на адлегласці $d = 32,0$ см перад тонкай лінзай, размешчаны на адлегласці $f = 43,0$ см за лінзай. Якая гэта лінза і чаму роўна яе фокусная адлегласць F ?
5. Фокусная адлегласць тонкай збіральнай лінзы $F = 15$ см. Дзе размешчана кропкавая крыніца святла, калі яе сапраўдны відарыс атрымліваецца на экране на адлегласці $f = 40$ см ад лінзы і аддалены на $H = 3,0$ см ад яе галоўнай аптычнай восі?
6. Тонкая лінза з фокуснай адлегласцю $F = 12$ см дае сапраўдны відарыс на адлегласці $f = 20$ см ад лінзы. Вызначыце адлегласць d , на якой размешчаны прадмет, і знайдзіце павелічэнне Γ лінзы.
7. Аптычная сіла тонкай лінзы $D = 13\frac{1}{3}$ дптр. Дзе трэба змясціць прадмет, каб атрымаць уяўны відарыс на адлегласці $f = 25$ см ад лінзы?



§ 22. Аптычныя прыборы для атрымання сапраўдных відарысаў

Пасродкам вока, а не вокам
Глядзець на свет умее розум.

Вільям Блэйк

■ Цяжка ўявіць жыццё сучаснага чалавека без выкарыстання разнастайных аптычных прыбораў. Яны прымяняюцца не толькі ў быццё і на вытворчасці, але і ў марскіх глыбінях, у космасе і дазваляюць убачыць тое, што раней было ўтоена ад вачэй чалавека. Якую яны маюць будову? Якія іх асноўныя характарыстыкі? Чым яны адрозніваюцца ад аднаго?

Пазнаёмімся з аптычнымі прыборамі, якія шырока выкарыстоўваюцца чалавекам.

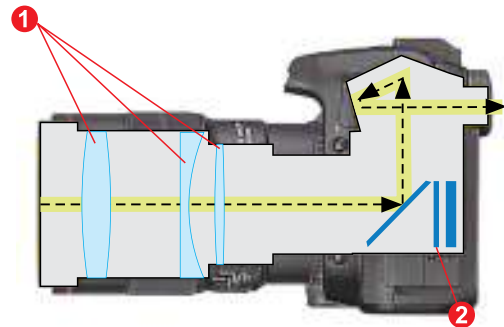
Па сваім прызначэнні аптычныя прыборы падзяляюцца на дзве вялікія групы:

1) для атрымання сапраўдных відарысаў прадметаў (праектары, фотаапараты);

2) для павелічэння вугла зроку (лупа, мікраскоп, падзорная труба).

Фотаапарат — аптычны прыбор, прызначаны для атрымання лічбавых сапраўдных паменшаных адваротных відарысаў прадметаў на святлоадчувальнай матрыцы (сэнсарнай матрыцы) (мал. 158). Пры гэтым прадметы могуць быць размешчаны на розным аддаленні ад пункта здымкі. Фотаапарат складаецца з зачыненай святлонепранікальнай камеры і сістэмы лінз, якія называюцца **аб'ектывам** (гл. мал. 158).

Перасоўваючы аб'ектыў фотаапарата, дамагаюцца наведзення на рэзкасць, пры якой відарыс прадмета фарміруецца дакладна на спецыяльнай святлоадчувальнай матрыцы. У адваротным выпадку відарыс атрымліваецца нярэзкім (размытым). Яна пакрыта сэнсарамі асветленасці, кожны з якіх мае фільтр аднаго з асноўных колераў: сіні, чырвоны або зялёны.



Мал. 158. Лічбавы фотаапарат і яго аптычная схема: 1 — сістэма лінз (аб'ектыў); 2 — святлоадчувальная матрыца

Колькасць светлавой энергіі, якая трапляе на матрыцу, вызначаецца памерамі *дыяфрагмы* і часам адкрыцця затвора (*вытрымкай*).

► Фатаграфічны метад рэгістрацыі відарыса вынайшлі ў 1839 г. Л. Дагер і Ж. Ньепс.

На святлоадчувальным элеменце фарміруецца кропка відарыса — **піксель** (ад англ. *pixel* — *picture element* — элемент відарыса). Чым больш пікселяў, тым больш якасны відарыс атрымліваецца. Таму найважнейшай характарыстыкай лічбавых фотаапаратаў з’яўляецца іх распазнаванне, г. зн. колькасць пікселяў. У самых простых фотаапаратаў яно складае некалькі мегапікселяў, а ў найлепшых — да некалькіх дзясяткаў мегапікселяў. Колькасць сэнсараў уплывае таксама на велічыню відарыса, які можна атрымаць з дапамогай дадзенага апарата.

Пры націсканні кнопкі затвора на кожным пікселі адчувальнага элемента фотаапарата фіксуецца інтэнсіўнасць кожнага з трох колераў. Працэсар апарата, як у камп’ютары, збірае інфармацыю аб колерах у файл і запісвае яе на запамінальную прыладу — картку памяці. Пасля гэтага фота можна прагледзець на камп’ютары ці адмысловай прыстаўцы. Пры гэтым і на самім фотаапарате можна адразу паглядзець зроблены здымак, што з’яўляецца велізарнай перавагай лічбавага фотаапарата.

Якія яшчэ добрыя якасці мае лічбавы фотаапарат?

Па-першае, магчымасць атрымання неабмежавана вялікай колькасці копій без страты якасці «арыгінала» фатаграфіі.

Па-другое, магчымасць выкарыстання фотаапарата пры розных светлавых умовах і на розных адлегласцях без дадатковых прылад.

Па-трэцяе, магчымасць выкарыстання лічбавых відарысаў для пераносу на розныя паверхні і размяшчэння на Web-сайце, а таксама магчымасць рэдагавання з дапамогай розных камп’ютарных праграм.

Па-чацвёртае, магчымасць зрабіць вялікую колькасць здымкаў з мінімальным інтэрвалам часу (10 і больш кадраў за секунду).



Па-пятаяе, габарытныя памеры і маса. Напрыклад, некаторыя апараты маюць памеры $10 \times 6 \times 5$ см і масу 200 г.



1. Для чаго выкарыстоўваецца фотаапарат? Назавіце яго асноўныя часткі і растлумачце іх прызначэнне.



2. Ці можна сфатаграфавать сябе ў люстры? Што пры гэтым атрымаецца на фотаздымку? Адказ абгрунтуйце.

§ 23. Аптычныя прыборы для павелічэння вугла зроку

Паколькі вастрэня зроку чалавека абмежавана, то асобае значэнне як у навуцы, так і на вытворчасці набываюць аптычныя прыборы, якія дазваляюць убачыць і кантраляваць драбнюткія дэталі аб'ектаў. Што для гэтага неабходна? Як называюцца гэтыя прыборы і якую яны маюць будову? Якія іх асноўныя характарыстыкі?



Працэс факусіроўкі відарыса на сятчатку вока называецца акамадацыяй вока (ад лац. *commodus* — зручны).

Блізарукасць — дэфект зроку, пры якім вока бачыць аддалены прадмет не рэзка, а расплывіста.

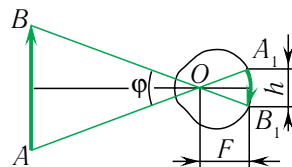
Дальназоркасць — дэфект зроку, пры якім вока не можа бачыць рэзка блізкія прадметы.

Асноўную частку інфармацыі (прыкладна 90 %) аб навакольным свеце мы атрымліваем з дапамогай органаў зроку.

Адлегласць найлепшага зроку — гэта адлегласць ад прадмета да вока, пры якой вочныя мышцы не стамляюцца, і вугал зроку максімальны.

Памер відарыса A_1B_1 прадмета AB на сятчатцы (мал. 159) вызначаецца *вуглом зроку* $\varphi = \frac{h}{F}$, вяршыня якога знаходзіцца ў аптычным цэнтры вока — пункце O .

Вугал зроку ўтвараецца прамянямі, накіраванымі на крайнія пункты прадмета, г. зн. гэта *вугал, пад якім бачны прадмет з аптычнага цэнтра вока*. Адзначым, што відарыс на сятчатцы заўсёды сапраўдны, паменшаны і перавернуты.



Мал. 159. Ход праменяў у воку

Ад бясконца аддаленага прадмета ў вока трапляе пучок паралельных праменяў. У гэтым выпадку ($d = \infty$) акамадацыя не патрабуецца. Калі прадмет набліжаецца, то прамені становяцца разыходнымі. У гэтым выпадку аптычная сістэма вока збірае прамені на сятчатцы. У адрозненне ад фотаапарата навядзенне на рэзкасць дасягаецца не перамяшчэннем «аб'ектыва» хрусталіка, а змяненнем яго аптычнай сілы.

Паняцце «*нармальнае вока*» чалавека характарызуецца адлегласцю найлепшага зроку каля 25 см і мяжой зроку (далёкі пункт), які знаходзіцца на бясконцасці.

З узростам магчымасць акамадацыі хутка памяншаецца, галоўным чынам з-за ўшчыльнення хрусталіка, які траціць здольнасць дастаткова спіскацца. Пажылы чалавек не можа выразна бачыць блізкія прадметы,

а таксама адрозніваць літары ў газетах і кнігах. Да пяцідзесяці гадоў адлегласць найлепшага зроку павялічваецца ў сярэднім да 50 см.

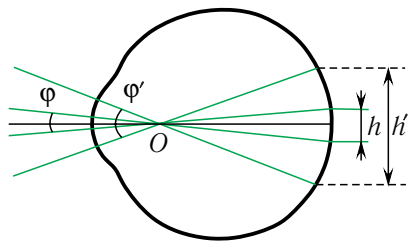
З узростам, з прычыны хваробы ці пры невыкананні гігіены могуць з'явіцца дэфекты зроку. Два найбольш распаўсюджаныя дэфекты зроку — *блізарукасць* і *дальназоркасць*.

Акуляры — першы аптычны прыбор, выкарыстаны чалавекам. З'явіліся яны даволі даўно, у XIII—XIV стст. Для выпраўлення блізарукасці выкарыстоўваюць акуляры з рассеивальнымі лінзамі, а дальназоркасці — акуляры са збіральнымі лінзамі. Цяпер акуляры сталі звычайным прадметам ужытку і многім даюць магчымасць нармальна жыць і працаваць. Іншай разнавіднасцю прылад, якія карэктуюць зрок, з'яўляюцца кантактныя лінзы. Акрамя практычнасці, іх асаблівасцю з'яўляецца шчыльны кантакт з рагавіцай, які дазваляе значна паменшыць скажэнні і павялічыць поле зроку сістэмы вока — лінза.

Наша вока не дае магчымасці ўбачыць вельмі дробныя аб'екты без спецыяльных дапаможных прылад, паколькі мы ясна бачым аб'ект толькі ў тым выпадку, калі ўспрымаем зрокавыя адчужэнні ад розных пунктаў аб'екта.

Аднаводна, два пункты можна паасобна ўбачыць толькі тады, калі іх відарысы атрымліваюцца на розных адчувальных элементах сетчаткі — палачках ці колбачках. Паколькі мінімальная адлегласць паміж суседнімі колбачкамі ці палачкамі ў цэнтральнай ямцы прыблізна роўна 5 мкм, а адлегласць ад сетчаткі да хрусталіка — 17 мм, то мінімальны вугал зроку, пры якім два пункты яшчэ бачныя паасобна для нармальнага вока, складае каля $1'$. Акрамя таго, мінімальны вугал зроку павінен адпавядаць дыфракцыйнаму пашырэнню пучка, выкліканаму яго праходжаннем праз зрэнку.

Чым большы вугал φ паміж прамымі, якія злучаюць аптычны цэнтр вока O (мал. 160) з крайнімі пунктамі прадмета (вугал зроку), тым больш выразна бачны прадмет і тым большую колькасць розных дэталяў можна адрозніць. Вугал зроку можна павялічыць ($\varphi' > \varphi$), набліжаючы прадмет да вока ці вока да прадмета. Пры гэтым памер відарыса на сетчатцы таксама павялічваецца ($h' > h$).



Мал. 160. Павелічэнне вугла зроку

Такім чынам, павелічэнне аб'ёму зрокавай інфармацыі можа быць дасягнута толькі за кошт павелічэння вугла зроку.

Найбольш прасты спосаб павялічыць вугал зроку — наблізіць прадмет да вока. Аднак гэта не заўсёды магчыма. Найменшая адлегласць да вока, пры якой мы яшчэ бачым прадмет, вызначаецца бліжняй мяжой акамадацыі. Досвед паказвае, што аб'ект не факсіруецца на сятчатцы, калі ён знаходзіцца ад вока на адлегласці, бліжэйшай за 14 см. З прычыны гэтага ўзнікае неабходнасць стварэння прыбораў, якія дазваляюць павялічыць вугал зроку.



Мал. 161. Лупа

Аптычныя прыборы, якія ўзбройваюць вока, падзяляюцца на 2 групы:

1) прыборы для разгледжвання *вельмі дробных аб'ектаў* (лупа, мікраскоп), якія гэтыя аб'екты нібы «павялічваюць»;

2) прыборы, прызначаныя для разгледжвання *аддаленых аб'ектаў* (глядзельныя трубы, біноклі, тэлескопы), якія гэтыя аб'екты нібы «набліжаюць».

Лупа — аптычны прыбор (збіральная лінза), які дазваляе павялічыць вугал зроку (г. зн. павялічыць дробныя дэталі прадметаў) (мал. 161).

Лупа ўяўляе сабой караткафокусную лінзу (F ад 10 мм да 100 мм), якая размяшчаецца паміж вокам і прадметам.

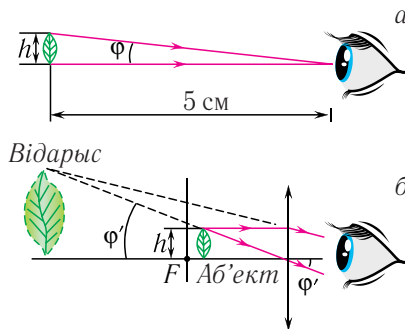
Пры выкарыстанні лупы прадмет трэба змясціць паблізу ад факальнай плоскасці лінзы (відарыс знаходзіцца на бясконцасці), каб мышцы вачэй былі цалкам расслаблены. Прадмет можа таксама змяшчацца на адлегласці найлепшага зроку, г. зн. паміж фокусам і аптычным цэнтрам лінзы.

Павелічэннем лупы Γ называецца адносіна вуглоў, пад якімі бачны прадмет пры выкарыстанні лупы (вугал φ') і пры разгляданні яго няўзброеным вокам (вугал φ) з адлегласці найлепшага зроку d_0 (мал. 162):

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi}.$$

Тады павелічэнне лупы роўна:

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{F + d_0}{F} = 1 + \frac{d_0}{F}. \quad (1)$$



Мал. 162. Дробны прадмет, разглядаемы: *a* — няўзброеным вокам на адлегласці найлепшага зроку; *б* — праз лупу

Гэта формула адпавядае *акамадацыі вока на адлегласць найлепшага зроку*.

Тады вугал $\varphi' = \frac{h}{F}$ і павелічэнне лупы ў гэтым выпадку мае выгляд:

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{d_0}{F}. \quad (2)$$

Гэта формула адпавядае *акамадацыі вока на бясконцасць*.

Але ў гэтым выпадку трэба напружваць мышцы вачэй.

У выніку таго, што $d_0 = 0,25$ м, звычайна лупы маюць павелічэнне ад 2,5 да 25 разоў. Лупы з павелічэннем $\Gamma > 40$ не выкарыстоўваюцца з-за моцных скажэнняў відарыса або невялікага агледу.

► У XVII ст. галандскі майстар Антоній Ван Левенгук з дапамогай лінз змог убачыць капіляры крывяноснай сістэмы, чырвоныя крывяныя целы, вывучыць падрабязнасці будовы найпрасцейшых аднаклетачных.

Мікраскоп (ад грэч. *μικρος* (мікрас) — маленькі і *σκοπεω* (скапэа) — гляджу) — аптычны прыбор для атрымання моцна павялічаных відарысаў аб'ектаў ці дэталей іх структуры, нябачных няўзброеным вокам.

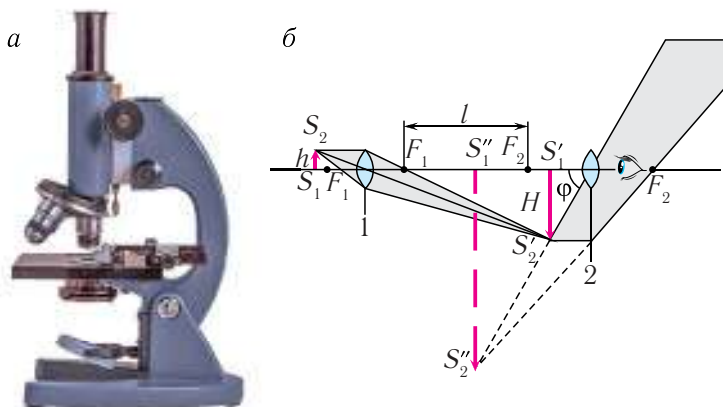
Такім чынам, прызначэнне *мікраскопа* заключаецца ў тым, каб атрымліваць з яго дапамогай такія відарысы неадрознага для вока прадмета, які, не знаходзячыся бліжэй за 14 см ад вока, разглядаўся б пад вуглом зроку, большым за гранічны вугал у $1'$.

Мікраскоп складаецца з дзвюх збіральных лінзавых сістэм: аб'ектыва 1 з фокуснай адлегласцю F_1 , роўнай некалькім міліметрам, і акуляр 2 з фокуснай адлегласцю F_2 , роўнай некалькім сантыметрам (мал. 163). Прадмет S_1S_2 змяшчаецца перад фокусам аб'ектыва.

У мікраскоп аб'ект бачны больш дэталёва, паколькі разгляданне ўяўнага відарыса $S_1''S_2''$ аб'екта ў акуляр ажыццяўляецца пад большым вуглом зроку.

З-за з'явы дыфракцыі ў мікраскоп немагчыма разглядаць аб'екты, памеры якіх параўнальныя з даўжынёй хвалі святла. Такім чынам, максімальнае павелічэнне мікраскопа абмежавана ($\Gamma \leq 2000$) з прычыны хвалевай прыроды святла.

Пры разгледжванні буйных, але вельмі аддаленых аб'ектаў вугал зроку малы і можа быць меншым за гранічны. У гэтым выпадку для павелічэння вугла зроку выкарыстоўваюцца *біноклі* і *тэлескопы*.

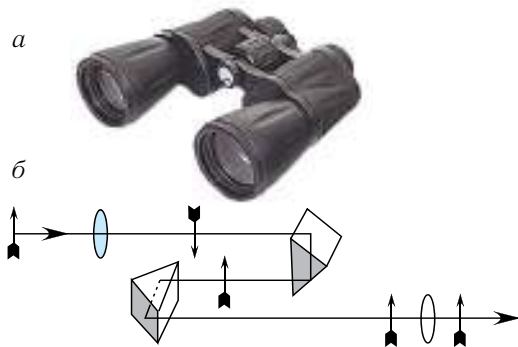


Мал. 163. Мікраскоп: *а* — агульны выгляд; *б* — аптычная схема і ход праменяў

Тэлескопы (ад грэч. $\tau\eta\lambda\epsilon$ (тэле) — далёка і $\sigma\kappa\omicron\lambda\epsilon\omega$ (скапэа) — гляджу) — астранамічныя аптычныя прыборы, прызначаныя для назірання нябесных цел. Аб іх вы даведаецеся падрабязна ў курсе астраноміі.

Дзве маленькія падзорныя трубы, складзеныя разам для двух вачэй, утвараюць **бінокль** (мал. 164, *а*). Паколькі труба Кеплера дае перавернуты відарыс, то ў бінокліх, пабудаваных на яе аснове, выкарыстоўваецца абарачальная сістэма з дзвюх прызм з поўным адбіццём (мал. 164, *б*).

Наяўнасць дзвюх прызм дазваляе стварыць прамы відарыс, паколькі адна прызма паварочвае відарыс у вертыкальнай плоскасці, другая — у гарызантальнай. Акрамя таго, дзякуючы прызмам аб'ектывы ў палявым біноклі можна рассунуць больш, чым акуляры, якія прыстаўляюцца да вачэй (гл. мал. 164). Адпаведна, відарыс у такім біноклі не толькі набліжаны, але і аб'ёмны.



Мал. 164. Бінокль: *а* — агульны выгляд; *б* — абарачальная сістэма прызм

1. Што такое вугал зроку? Чым вызначаецца мінімальны вугал зроку?
2. Для чаго прызначана лупа? Мікраскоп? Падзорная труба? Бінокль?
3. Чым мікраскоп адрозніваецца ад падзорнай трубы?
4. Які колер забяспечвае найлепшую адрознівальную здольнасць аптычнага мікраскопа?

5. Чаму аптычны мікраскоп не дазваляе назіраць малекулы і клеткі?
6. Чаму відарыс, які дае бінокль, аб'ёмны?
7. Атамы маюць памеры парадку $\sim 10^{-10}$ м. Растлумачце, ці можна, выкарыстоўваючы бачнае святло, візуальна назіраць атам.



САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 3

Оптыка — раздзел фізікі, у якім вывучаюцца ўласцівасці святла, яго фізічная прырода і ўзаемадзеянне з рэчывам.

Пад **святлом** разумеюць электрамагнітныя хвалі з частотамі ад $1,5 \cdot 10^{11}$ Гц да $3 \cdot 10^{16}$ Гц (даўжыні хваль змяняюцца ў дыяпазоне, які адпавядае інфрачырвонаму, бачнаму і ультрафіялетаваму выпраменьванню).

Электрамагнітныя хвалі распаўсюджваюцца ў вакууме з максімальна магчымай у прыродзе скорасцю пераносу энергіі — $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Скорасць распаўсюджвання святла ў рэчыве вызначаецца суадносінай:

$$v = \frac{c}{n}.$$

Абсалютны паказчык праламлення рэчыва роўны адносіне модуля скорасці святла ў вакууме да модуля скорасці святла ў рэчыве:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Даўжыня хвалі λ_n у рэчыве вызначаецца суадносінай:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n},$$

дзе λ — даўжыня хвалі ў вакууме, n — абсалютны паказчык праламлення рэчыва.

Пры пераходзе светлавой хвалі з вакууму ў рэчыва або з аднаго рэчыва ў іншае **частата святла застаецца нязменнай**.

Інтэрферэнцыя святла — з'ява ўзнікнення ўстойлівай у часе карціны максімумаў і мінімумаў амплітуд выніковай хвалі, якія чаргуюцца, пры складанні дзвюх (або некалькіх) кагерэнтных хваль.

Аптычная рознасць ходу хваль $\delta = n_2 d_2 - n_1 d_1 = c \left(\frac{d_2}{v_2} - \frac{d_1}{v_1} \right)$ — рознасць адлегласцей, пройдзеных хвалямі з улікам іх розных модуляў скорасцей v_1 і v_2 распаўсюджвання ў гэтых асяроддзях з паказчыкамі праламлення n_1 і n_2 .

Умова максімумаў інтэрферэнцыі:

$$\delta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Умова мінімумаў інтэрферэнцыі:

$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Устойлівае ў часе размеркаванне амплітуд ваганняў у прасторы пры інтэрферэнцыі называецца **інтэрферэнцыйнай карцінай**.

Прынцып Гюйгенса — Фрэнеля:

усе другасныя крыніцы, размешчаныя на хвалевым фронце, кагерэнтныя паміж сабой. Агібаючая хваля, якая атрымліваецца ў выніку інтэрферэнцыі другасных хваль, супадае з хваляй, выпускаемай крыніцай.

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

Дыфракцыйная рашотка — аптычны прыбор, прызначаны для раскладання святла ў спектр і дакладнага вымярэння даўжынь хваль. Ён складаецца з вялікай колькасці роўнааддаленых паралельных рысак, нанесеных на шкляную або металічную паверхню.

Умова ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімумаў, якія назіраюцца пад вугламі θ пры нармальным падзенні святла на дыфракцыйную рашотку:

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

Пад **праменем** разумеюць лінію, уздоўж якой пераносіцца энергія электрамагнітнай хвалі.

Геаметрычнай оптыкай называюць раздзел оптыкі, у якім вывучаюцца законы распаўсюджвання святла ў празрыстых асяроддзях на падставе ўяўлення аб ім як аб сукупнасці светлавых праменяў.

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.

Цэнтр сферы O называецца **аптычным цэнтрам** люстра, яго радыус R — **радыусам** люстра. Вяршыня шаравага сегмента P называецца **полюсам** люстра. Прамая лінія OP , якая праходзіць праз аптычны цэнтр і полюс люстра, называецца **галоўнай аптычнай воссю**. Любая прамая, напрыклад прамая OM , якая праходзіць праз аптычны цэнтр O і паверх-



ню люстра (за виключенням його галоїної аптичної восі), називається **пабочнай аптичної воссю**. Пункт F , які знаходяться на галоїной аптичній восі на адлегласці $F = \frac{R}{2}$ ад полюса люстра, називається **галоїным фокусам люстра**.



Змяненне напрамку распаўсюджвання святла пры праходжанні праз мяжу падзелу двух асяроддзяў называється **праламленнем святла**.

Закон праламлення святла:

прамені, падаючы і праломлены, ляжаць у адной плоскасці з перпендыкулярам, праведзеным у пункце падзення праменя да плоскасці мяжы падзелу двух асяроддзяў;

адносіна сінуса вугла падзення да сінуса вугла праламлення ёсць велічыня пастаянная для двух дадзеных асяроддзяў і роўная адноснаму паказчыку праламлення другога асяроддзя адносна першага:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

З'ява адсутнасці праломленага праменя пры адбіцці падаючага ад мяжы падзелу асяроддзяў называється **поўным адбіццём святла**. Найменшы вугал, з якога пачынаецца поўнае адбіццё, называється **гранічным вуглом поўнага адбіцця**:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}; \quad (n_2 < n_1).$$

Формула тонкай лінзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Правіла знакаў:

у выпадку збіральной лінзы, сапраўднай крыніцы і сапраўднага відарыса знакі перад велічынямі F , d , f выбіраюць *дадатнымі*;

у выпадку рассеивальной лінзы, уяўнай крыніцы і ўяўнага відарыса знакі перад велічынямі F , d , f выбіраюць *адмоўнымі*.

Лінейным (папярочным) павелічэннем Γ называецца адносіна лінейнага памеру відарыса h да лінейнага памеру прадмета H :

$$\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}.$$

Лічбавы фотаапарат — аптычны прыбор, прызначаны для атрымання і запісу аптычнага відарыса на электронныя носыбіты (флэш-карты, дыскі і г. д.).



Лупа — аптычны прыбор (збіральная лінза), які дазваляе павялічыць вугал зроку.

Мікраскоп — аптычны прыбор для атрымання моцна павялічаных відарысаў аб'ектаў ці дэталей іх структуры, нябачных няўзброеным вокам.

Тэлескоп — астранамічны аптычны прыбор, прызначаны для назірання нябесных цел.



Заданні для самастойных даследаванняў

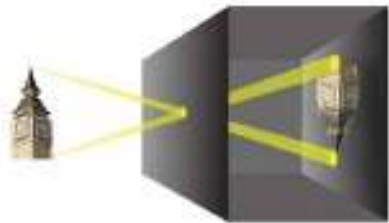
1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (О. Ромер, А. Фізо, А. Майкельсан, Т. Юнг, А. Фрэнель).

2. Калі паглядзець праз металічную ці пластмасавую трубку на святло, то можна ўбачыць светлыя і цёмныя кольцы. Вывучыце гэту з'яву і растлумачце яе. Даследуйце, як радыусы назіраемых кольцаў залежаць ад дыяметра трубка.

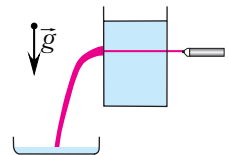
3. Калі зрабіць невялікую адтуліну ў сценцы цёмнай скрыні (камеры-абскуры), то на яе далёкай сценцы з'явіцца адваротны відарыс прадмета (мал. 165). Даследуйце, як яркасць і рэзкасць відарыса залежаць ад дыяметра адтуліны.

4. Калі вы паглядзіце на чытаемы вамі тэкст, то правым, то левым вокам, то ўбачыце некалькі зрушання адносна адзін аднаго і адрозныя відарысы. Да якога зрокавага эфекту прыводзяць гэтыя адрозненні, калі вы глядзіце на тэкст двума вачамі?

5. З празрыстай пасудзіны, напоўненай вадкасцю (напрыклад, вадой), б'е бруя. Крыніца святла (лазер) размешчана такім чынам, каб гарызантальны прамень уваходзіў у брую вадкасці (мал. 166). Пры некаторых умовах бруя вадкасці будзе «працаваць» як святлавод. Даследуйце, як уласцівасці такога святлавода залежаць ад скорасці выцякання вады, ад дыяметра адтуліны.



Мал. 165. Схема камеры-абскуры



Мал. 166. Вадкі святлавод



Раздзел 4

Асновы спецыяльнай тэорыі адноснасці



Роля скорасці распаўсюджвання святла ў вакууме настолькі важная ў фізіцы і тэхніцы, а сучасныя метады яе вымярэння настолькі надзейныя, што ў 1983 г. было прынята рашэнне лічыць значэнне гэтай скорасці дакладным. Яно роўна $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Вынікі эксперыментаў паказваюць, што з такой скорасцю распаўсюджаецца ў вакууме не толькі бачнае святло, але і любое электрамагнітнае выпраменьванне — ад радыёхваль да γ -выпраменьвання.

Развіццё навукі і тэхнікі дазволіла фізікам ужо на мяжы XIX—XX стст. правесці досыць дакладныя вымярэнні скорасці святла. Як аказалася, скорасць святла ў вакууме не залежыць ні ад скорасці руху прыёмніка святла, ні ад скорасці крыніцы, якая выпраменьвае святло.

Гэтыя здзіўныя эксперыментальныя вынікі прывялі фізікаў да перагляду ўяўленняў аб уласцівасцях прасторы і часу. Была створана **спецыяльная тэорыя адноснасці (СТА)** — раздзел фізікі, у якім вывучаюцца ўласцівасці прасторы і часу, а таксама законы руху цел пры скарасцях, параўнальных са скорасцю святла.

Спецыяльная тэорыя адноснасці называецца таксама *рэлятывісцкай тэорыяй* (ад лац. *relativus* — адносны). З’явы, што адбываюцца пры скарасцях, параўнальных са скорасцю святла, велічыні, якія іх характарызуюць (скорасць, энергія, імпульс і г. д.), і законы гэтых з’яў таксама называюцца *рэлятывісцкімі*.

У паўсядзённым жыцці і практычна ва ўсіх тэхналогіях мы не сустракаемся з рэлятывісцкімі скарасцямі. Навошта ж вывучаць тэорыю адноснасці? Для гэтага ёсць шэраг прычын.

Па-першае, асноўную інфармацыю аб навакольным свеце мы атрымліваем з дапамогай зроку, непасрэдна ўспрымаючы светлавае выпрамень-

ванне. Такім чынам, «самы рэлятывісцкі» аб’ект прыроды — святло адыгрывае найважнейшую ролю ў жыцці кожнага чалавека.

Па-другое, як паказвае ўвесь назапашаны вопыт, скорасць святла ў вакууме мае фундаментальнае, вылучанае значэнне: ні адзін сігнал не можа распаўсюджацца, ні адна часціца не можа рухацца хутчэй за святло.

Па-трэцяе, рэлятывісцкая тэорыя неабходна для тлумачэння з’яў у атамнай і ядзернай фізіцы, у фізіцы элементарных часціц. Без выкарыстання законаў СТА немагчыма стварэнне паскаральнікаў элементарных часціц, забеспячэнне сучаснай тэхналогіі GPS.

Па-чацвёртае, рэлятывісцкая тэорыя адыгрывае важную ролю ў вывучэнні Сусвету. Выяўлены галактыкі, якія рухаюцца з велізарнымі скарасцямі. Без рэлятывісцкай тэорыі нельга растлумачыць уласцівасці такіх астранамічных аб’ектаў, як «чорныя дзіркі», нейтронныя зоркі, пульсары.

§ 24. Прынцып адноснасці Галілея і электрамагнітныя з’явы.

Эксперыментальныя перадумовы спецыяльнай тэорыі адноснасці

- Пасля распрацоўкі высокадакладных метадаў вымярэння скорасці святла з’явілася магчымасць праверыць на эксперыменце: ці павялічваецца скорасць святла, калі яго крыніца рухаецца насустрач прыёмніку святла? Ці паменшыцца скорасць святла, калі яны будуць аддаляцца адзін ад аднаго? Іншымі словамі, ці можна, рухаючыся насустрач святлу, павялічыць яго адносную скорасць, а аддаляючыся — паменшыць? І што ж паказалі падобныя эксперыменты?



Інерцыяльнай сістэмай адліку (ІСА) называецца сістэма, у якой пры адсутнасці ўздзеянняў на цела яго скорасць застаецца пастаяннай.

Прынцып адноснасці Галілея: ва ўсіх ІСА ўсе механічныя з’явы пры аднолькавых пачатковых умовах адбываюцца аднолькавым чынам.

Класічны закон складання скарасцей: $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{V}$, дзе $\vec{v}_1$ — скорасць руху цела адносна ІСА-1, $\vec{v}_2$ — адносна ІСА-2, $\vec{V}$ — скорасць ІСА-2 адносна ІСА-1.

Стварэнне спецыяльнай тэорыі адноснасці гістарычна звязана з развіццём электрадынамікі — навукі аб электрычных і магнітных з’явах. За два стагоддзі, якія аддзялялі фізіку Галілея і Ньютана ад



фізікі Максвела і Герца, у ёй назапасілася велізарная колькасць новых навуковых фактаў. У той жа час уяўленне аб светабудове грунтавалася на **механічнай** карціне свету, заснаванай на механіцы Галілея — Ньютана (*класічнай* механіцы).

Як вядома, у класічнай механіцы такія паняцці, як каардыната, скорасць, траекторыя цела, з'яўляюцца *адноснымі* — яны змяняюцца пры пераходзе ад адной ІСА да іншай. У той жа час некаторыя паняцці і велічыні ў класічнай фізіцы лічыліся *абсалютнымі*. Напрыклад, як само сабой зразумелае прымалася палажэнне аб *абсалютнасці часу* (ход часу аднолькавы ва ўсіх ІСА) і *абсалютнасці адначасовасці* (падзеі, адначасовыя ў некаторай ІСА, адначасовыя і ў любой іншай ІСА). Відавочным вынікам гэтых уяўленняў з'яўляецца класічны закон складання скорасцей. Паводле гэтага закону пры пераходзе да ІСА, якая рухаецца са скорасцю $\vec{V}$ насустрач цела, модуль скорасці цела становіцца большым на велічыню, роўную V . Гэта азначае, што ў механіцы Галілея — Ньютана не існуе максімальна магчымай (*гранічнай*) скорасці.

Такія ўяўленні ўзгадняліся як з паўсядзённым вопытам, так і з вынікамі эксперыментаў у механіцы, акустыцы, гідрадынаміцы і г. д.

Аднак электрамагнітныя працэсы адбываюцца са скарасцямі, параўнальнымі са скорасцю святла, г. зн. значна большымі, чым скорасці руху цел, з якімі мела справу механіка. У сувязі з гэтым узнікаюць пытанні: ці будзе справядлівы прынцып адноснасці Галілея (найважнейшы прынцып класічнай механікі) для электрамагнітных з'яў? Ці залежыць скорасць святла ў вакууме ад руху крыніцы і (ці) прыёмніка выпраменьвання, як гэта павінна быць па класічнай тэорыі? Ці існуе ў прыродзе гранічная скорасць? Для адказу на гэтыя пытанні былі неабходны новыя эксперыменты.

Разглядаючы праблему распаўсюджвання электрамагнітных хваль (святла), карысна звярнуцца да добра вывучаных заканамернасцей паводзін гукавых хваль. Яны могуць распаўсюджвацца толькі ў пругкім асяроддзі — газападобным, вадкім ці цвёрдым. Натуральна прыняць у якасці гіпотэзы, што і для распаўсюджвання святла неабходна некаторае асяроддзе. Яго назвалі *сусветным эфірам*. Пры такім падыходзе вырашальным становіцца пытанне аб скорасці святла, вымеранай назіральнікам, які рухаецца адносна эфіру.



Вернемся да аналогіі з гукам. Няхай скорасць гуку ў асяроддзі, якое знаходзіцца ў спакоі, роўна v_r . Дослед паказвае, што, як і меркавалася,

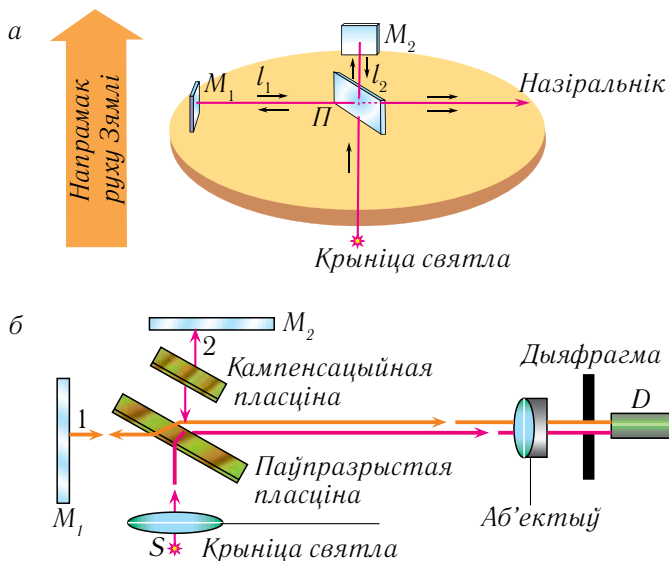
пры вымярэнні скорасці гуку прыборам, які рухаецца адносна гэтага асяроддзя са скорасцю $\vec{V}$ насустрач гуку, атрымліваецца велічыня, роўная $v_r + V$.

А што атрымаецца ў выпадку распаўсюджвання электрамагнітных хваль? Ці залежыць скорасць святла ад руху лабараторыі, у якой праводзяцца вымярэнні гэтай скорасці?

У якасці лабараторыі, якая хутка рухаецца ($V \approx 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$), было прапанавана выкарыстоўваць Зямлю. Калі лічыць, што Зямля пры сваім абарачэнні вакол Сонца рухаецца скрозь нерухомы эфір, то ў лабараторыі, змешчанай на Зямлі, трэба чакаць з’яўлення так званага «эфірнага ветру» (падобна таму як узнікае сустрэчны паток паветра пры яздзе на матацыкле ў зацішнае надвор’е). Як паўплывае «эфірны вецер» на скорасць святла ў сістэме адліку «Зямля»?

У 1887 г. амерыканскія фізікі А. Майкельсан і Р. Морлі правялі эксперымент, дакладнасць вымярэнняў у якім была дастатковай для выяўлення ўплыву «эфірнага ветру».

Разбяром схему іх эксперыментальнай устаноўкі, якая атрымала назву *інтэрферометр Майкельсана* (мал. 167). Ён складаўся з аптычнай прылады, размешчанай на масіўнай каменнай платформе, якая плавала ў басейне з ртутццю. Такая канструкцыя практычна выключала ўплыў механічных ваганняў платформы на аптычныя працэсы.



Мал. 167. Дослед Майкельсана — Морлі: а — выгляд устаноўкі; б — схема доследу

Святло ад крыніцы S з дапамогай паўпразрыстай пласціны P дзялілася на два ўзаемна перпендыкулярныя прамені 1 і 2 (гл. мал. 167). Прамені адбіваліся ад люстраў M_1 і M_2 , а затым зводзіліся разам і траплялі на дэтэктар D . У выніку складання гэтых праменяў атрымлівалася інтэрферэнцыйная карціна (з дапамогай дэтэктара назіраліся цёмныя і светлыя паласы, што чаргуюцца).

Чакалася, што гэта карціна будзе істотна залежаць ад арыентацыі інтэрферометра ў адносінах да напрамку руху Зямлі ($\vec{V}_{\text{інт}}$) адносна «нерухомага» эфіру (гл. мал. 167). Сапраўды, калі першы з пучкоў накіраваны ўздоўж скорасці $\vec{V}_{\text{інт}}$, а другі — перпендыкулярна да яе, то «эфірны вецер» будзе неаднолькавым для гэтых праменяў. Адпаведна, будуць рознымі і часы праходжання святла для праменяў 1 і 2 ад крыніцы S да прыёмніка D , г. зн. з'явіцца дадатковая «рознасць ходу» светлавых хваль, якія інтэрферыруюць.

Пры павароце платформы на 90° прамені «мяняліся месцамі» і, адпаведна, павінна была змяніцца рознасць ходу. Як паказвалі разлікі, гэта прывяло б да зрушэння інтэрферэнцыйнай карціны на 0,4 шырыні інтэрферэнцыйнай паласы. Аднак чаканае зрушэнне не было выяўлена, хоць інтэрферометр Майкельсана дазваляў назіраць зрух інтэрферэнцыйнай карціны нават на 0,01 паласы.

Эксперыменты паўтараліся ў розны час сутак і ў розныя поры года (г. зн. пры розных напрамках скорасці інтэрферометра адносна эфіру). Аднак зрушэнне інтэрферэнцыйнай карціны так і не было выяўлена. Гэта было настолькі ж неверагодна і падобна да таго, калі вы пры яздзе на матацыкле не адчулі б сустрэчнага паветранага патоку.

Вынікі эксперымента Майкельсана — Морлі і шматлікіх іншых эксперыментаў па вымярэнні скорасці святла прывялі да вываду аб незалежнасці скорасці святла ў вакууме як ад руху прыёмніка, так і ад руху крыніцы выпраменьвання. Уяўленні аб існаванні сусветнага эфіру аказаліся беспадстаўнымі.

Дадзены факт быў адной з найвялікшых загадак фізікі канца XIX — пачатку XX ст. Выявілася відавочная супярэчнасць паміж вынікамі эксперыментаў і класічнымі ўяўленнямі. Так, пры пераходзе ад адной ІСА да іншай, паводле класічнага закону складання скорасцей, да скорасці святла павінна вектарна дадавацца скорасць руху гэтых ІСА адна адносна адной. Аднак вынікі эксперыментаў упарта сцвярджалі, што скорасць святла ў вакууме пастаянная і ва ўсіх ІСА аднолькавая.



Гэта быў выклік механічнай карціне свету, якая складалася стагоддзямі.

Выдатныя вучоныя таго часу (А. Пуанкарэ, Г. А. Лорэнц і інш.) прапанавалі шэраг карысных ідэй для тлумачэння гэтай супярэчнасці. Аднак вырашальны крок быў зроблены ў 1905 г. 25-летнім фізікам Альбертам Эйнштэйнам, які працаваў тады тэхнічным экспертам Федэральнага патэнтнага бюро ў Берне (Швейцарыя). Ім была прапанавана новая тэорыя прасторы і часу, якая атрымала назву **спецыяльная тэорыя адноснасці**. Гэта рэвалюцыйная тэорыя дазволіла не толькі растлумачыць вынік эксперымента Майкельсана — Морлі, але і паклала пачатак новаму этапу развіцця фізікі.



1. Сфармулюйце прынцып адноснасці Галілея.
2. Якія велічыні ў механіцы Ньютана лічыліся адноснымі, а якія — абсалютнымі?
3. Сфармулюйце закон складання скорасцей у класічнай механіцы.
4. Апішыце эксперымент Майкельсана — Морлі.
5. У чым заключаецца супярэчнасць паміж класічным законам складання скорасцей і данымі эксперыментаў па вымярэнні скорасці святла?
6. Якую ролю адыграў эксперымент Майкельсана — Морлі ў развіцці фізікі?



§ 25. Пастулаты спецыяльнай тэорыі адноснасці

- Адмоўны вынік доследу Майкельсана — Морлі паставіў вучоных у цяжкае становішча, паколькі зусім не ўкладваўся ў класічныя (ньютанаўскія) уяўленні аб уласцівасцях прасторы і часу, якія склаліся за стагоддзі. Гэта быў «выклік стагоддзя», рашэнне якога прывяло да нараджэння новых, рэлятывісцкіх уяўленняў аб сувязі прасторы і часу.



Фундаментальнае сцверджанне, якое ляжыць у аснове тэорыі і прымаецца без доказу, называецца пастулатам (аксіёмай). У фізіцы пастулат, як правіла, з'яўляецца абагульненнем эксперыментальных фактаў.

Як адзначалася ў папярэднім параграфі, фізіка сутыкнулася з супярэчнасцю паміж пастаянствам скорасці святла ў вакууме і класічным законам складання скорасцей. Праілюструем гэту праблему на простым прыкладзе: аўтамабіль рухаецца са скорасцю $\vec{V}$ насустрач праменю

пражэктара. Паводле класічнага закону складання скорасцей у сістэме адліку «аўтамабіль» скорасць святла павінна быць роўнай $c + V$. Аднак вынікі эксперыmentaў рашуча сцвярджаюць: ва ўсіх ІСА скорасць святла ў вакууме роўна c .

Для пераадолення дадзенай супярэчнасці прыйшлося глыбока прааналізаваць і перагледзець класічныя ўяўленні аб прасторы і часе, у выніку чаго была створана спецыяльная тэорыя адноснасці.



У аснову дадзенай тэорыі Эйнштэйн паклаў два *пастулаты*, якія з'яўляюцца абагульненнем эксперыментальных фактаў.

Першы пастулат СТА (пастулат адноснасці): *ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку ўсе фізічныя з'явы пры аднолькавых пачатковых умовах адбываюцца аднолькавым чынам.*

Дадзены пастулат уяўляе сабой абагульненне класічнага прынцыпу адноснасці на ўсе фізічныя з'явы. З яго вынікае, што ніякімі эксперыментамі, праведзенымі ўнутры ІСА, немагчыма вызначыць, знаходзіцца яна ў спакоі ці рухаецца.

Уявім сабе вагон, які рухаецца раўнамерна і прамалінейна без штуршкоў і калыханняў. Ці можна ўстанавіць факт руху вагона з дапамогай эксперыmentaў (механічных, электрамагнітных і любых іншых), якія праводзяцца ўнутры яго (г. зн. без назіранняў падзей, якія адбываюцца па-за ім)? Увесь назапашаны ў фізіцы досвед паказвае, што гэта немагчыма ў поўнай адпаведнасці з першым пастулатам СТА.



Другі пастулат СТА (пастулат пастаянства скорасці святла): *ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку скорасць святла ў вакууме аднолькавая і не залежыць ні ад скорасці крыніцы, ні ад скорасці прыёмніка выпраменьвання.*



Як ужо гаварылася, гэты пастулат цалкам адпавядае вынікам шматлікіх эксперыmentaў, але супярэчыць класічнаму закону складання скорасцей.

Эйнштэйн рашыў гэту супярэчнасць, правёўшы глыбокі аналіз уяўленняў аб часе і прасторы.

У аснове гэтага аналізу ляжыць паняцце *падзея*. Пад падзеяй разумеюць некаторую з'яву, якая адбываецца ў пэўным пункце прасторы ў пэўны момант часу. Паняцце «падзея» з'яўляецца ідэалізацыяй рэальнай з'явы, якая адбываецца вельмі хутка ў вельмі малым абсягу прасторы. Прыкладам падзеі можа служыць успышка святла, стрэл гарматы, сутыкненне дзвюх часціц, перасячэнне спартсменам лініі фінішу і г. д. Для характарыстыкі часу і месца падзеі ў пэўнай ІСА дастаткова пазначыць тры яе каардынаты і момант часу.

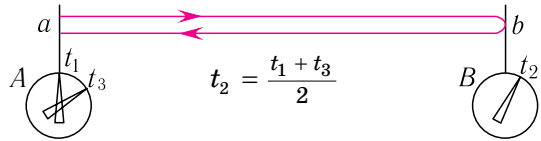
Падзеі, што адбыліся ў адзін і той жа момант часу, называюцца *адначасовымі*. Як ужо гаварылася, у класічнай фізіцы прымалася палажэнне аб *абсалютнасці адначасовасці*: «калі дзве падзеі адбыліся адначасова ў некаторай ІСА, то яны адначасовыя і ў любой іншай ІСА».

Для праверкі гэтага патрэбна мець сінхронізаваныя гадзіннікі (мал. 168).

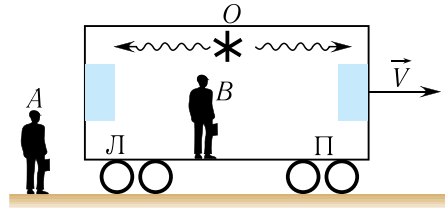
Эйнштэйн звярнуў увагу на тое, што *абсалютнасць адначасовасці* зусім не відавочная.

Падзеі, *адначасовыя* ў адной ІСА, могуць аказацца *не адначасовымі* ў іншай ІСА, калі яна рухаецца адносна першай.

Такім чынам, *адначасовасць падзей* — *паняцце адноснае* (мал. 169). Адзначым, аднак, што адначасовыя падзеі, якія адбыліся ў адным і тым жа месцы, адначасовыя ў любой ІСА. Іх адначасовасць абсалютная.



Мал. 168. Сінхронізацыя гадзіннікаў



Мал. 169. Адноснасць адначасовасці

► Разам з адноснасцю адначасовасці з пастулатаў СТА вынікае існаванне і іншых рэлятывісцкіх эфектаў.

Эфект запазнення часу. Гадзіннік, які рухаецца са скорасцю v адносна дадзенай ІСА, ідзе павольней нерухомага гадзінніка. Пры гэтым прамежак часу τ , вымераны гадзіннікам, які рухаецца, меншы за прамежак часу Δt , вымераны гадзіннікам, нерухомым адносна гэтай ІСА, у адпаведнасці з суадносінай $\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Прамежак τ называюць уласным часам, Δt — лабараторным часам, а дадзены эфект — рэлятывісцкім запазненнем часу.

Эфект скарачэння даўжыні. Лінейны памер цела, якое рухаецца са скорасцю, скарачаецца ў напрамку яго руху $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, дзе l — даўжыня цела ў ІСА, адносна якой яно рухаецца, а l_0 — даўжыня цела ў ІСА, у якой яно знаходзіцца ў спакоі. Папярочныя памеры цела пры руху не змяняюцца.



1. Якія сістэмы адліку называюцца інерцыяльнымі?
2. Як фармулюецца першы пастулат СТА?

3. Якія эксперыменты пацвярджаюць справядлівасць першага пастулата СТА?
4. Чым адрозніваецца прынцып адноснасці Галілея ад першага пастулата СТА?
5. Як фармулюецца другі пастулат СТА? Якія эксперыменты яго пацвярджаюць?



§25-1

§ 26. Элементы рэлятывісцкай дынамікі. Узаемасувязь масы і энергіі

- Змяненне ўяўленняў аб уласцівасцях прасторы і часу выклікала з'яўленне новых поглядаў на сувязь энергіі цела з яго масай. У чым сутнасць знакамітай формулы Эйнштэйна $E_0 = mc^2$? Дзе яна знаходзіць сваё прымяненне?



У класічнай механіцы імпульс цела вызначаецца як здабытак яго масы на скорасць: $\vec{p} = m\vec{v}$. Змяненне імпульсу цела роўна імпульсу выніковай усіх сіл, прыкладзеных да яго: $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$.



Неабходнасць змянення дынамікі відавочная хаця б таму, што паводле законаў Ньютана любое цела можна ў прынцыпе разгнаць да любой скорасці. Прыкладзём да цела масай m , якое знаходзіцца ў стане спакою, пастаянную сілу $\vec{F}$. Выкарыстаўшы другі закон Ньютана, знойдзем, што да моманту часу t цела набудзе скорасць $v = \frac{F}{m}t$. Такім чынам, у рамках класічнай механікі пры $t > \frac{mc}{F}$ скорасць цела v перавысіла б скорасць святла c , што супярэчыць вынікам эксперыментаў і асноўным палажэнням СТА. Залежнасць скорасці v цела ад часу t у рэлятывісцкім выпадку паказана на малюнку 170.

Якія ж суадносіны дынамікі неабходна было змяніць пры пераходзе ад механікі Ньютана да СТА, а якія засталіся нязменнымі?

Захавалі свой выгляд законы змянення імпульсу і энергіі цела:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t; \quad \Delta E = A, \quad (1)$$

дзе A — работа, якую выконвае сіла $\vec{F}$.

Змяніліся суадносіны, якія выражаюць залежнасць імпульсу і энергіі цела ад яго скорасці:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



Найважнейшым адрозненнем СТА ад класічнай механікі з'яўляецца тое, што энергія цела не ператвараецца ў нуль, нават калі яно знаходзіцца ў спакоі ($\vec{v} = 0$). У гэтым выпадку **энергія спакою** E_0 цела прапарцыянальна яго масе:

$$E_0 = mc^2. \quad (2)$$

Такім чынам, у цэле, якое знаходзіцца ў стане спакою, хаваецца велізарны запас энергіі. Цяжка пераацаніць практычнае значэнне гэтай нескладанай формулы, паколькі менавіта яна паказала на ўзаемасувязь энергіі і масы рэчыва. Чалавецтва даведалася аб магчымасці атрымання энергіі з рэчыва. На гэтай формуле заснавана ўся энергетыка, у якой энергія спакою паліва пераходзіць у іншыя віды энергіі.

З роўнасці (2) вынікае, што змяненне энергіі спакою цела на ΔE_0 звязана са змяненнем яго масы на Δm , дзе:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}. \quad (3)$$

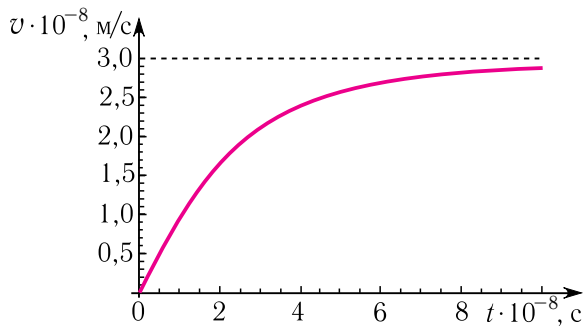
Сцверджанне аб тым, што *энергія спакою прапарцыянальна масе, а змяненне энергіі спакою звязана са змяненнем масы*, называюць **законам узаемасувязі масы і энергіі**.

Цяжка пераацаніць практычнае значэнне гэтага закону для сучаснай энергетыкі. З яго вынікае, што цела масай $m = 1,0$ г валодае энергіяй спакою:

$$E_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \left(3,0 \cdot 10^8\right)^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{г}.$$

Гэта энергія эквівалентна энергіі, якая вылучаецца пры згаранні 2000 тон нафты. Так, дзякуючы прагрэсу фізікі ў 1905 г. чалавецтва даведалася аб практычна «невывяральных» запасах энергіі, якая ўтрымліваецца ў любым рэчыве.

Формула (3) прымяняльная да ўсіх з'яў, у якіх змяняецца ўнутраная энергія рэчыва. Пры працэсах, што адбываюцца на атамна-малекулярным



Мал. 170. Залежнасць скорасці рэлятывісцкай часціцы ад часу

узроўні, змяненні масы зусім малыя. Так, пры поўным ператварэнні лёду ў ваду адноснае змяненне масы $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$, пры награванні на $\Delta t = 200^\circ\text{C}$ жалезнага бруска $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-12}$. Пры хімічных рэакцыях адноснае змяненне масы крыху вышэйшае. Напрыклад, пры згаранні метану ў кіслародзе $\frac{\Delta m}{m} = 0,9 \cdot 10^{-10}$. Для ядзерных рэакцый сітуацыя зусім іншая. Для іх характэрны велічыні $\frac{\Delta m}{m} = 10^{-3}$, у дзясяткі мільёнаў разоў большыя, чым для хімічных рэакцый.



► Паводле прынцыпу адпаведнасці любая новая фізічная тэорыя, якая прэтэндуе на больш глыбокае апісанне фізічных з'яў, павінна ўключаць у сябе класічную (ньютанаўскую) тэорыю як гранічны выпадак. Спецыяльная тэорыя адноснасці цалкам задавальняе прынцып адпаведнасці. Пры скарасцях $v \ll c$ законы рэлятывісцкай механікі пераходзяць у законы механікі Ньютана.



1. Якой суадносінай звязаны паміж сабой маса цела і энергія спакою?
2. Сфармулюйце закон узаемазвязі масы і энергіі спакою.



Практыкаванне 18

1. Якая энергія E вылучыцца пры поўным ператварэнні рэчыва масай $m = 1,0$ мг у выпраменьванне?
2. Вызначыце масу m часціцы, калі яе энергія спакою $E_0 = 8,2 \cdot 10^{-14}$ Дж.
3. Якой масе Δm рэчыва адпавядае рэлятывісцкая энергія спакою, роўная энергіі, якая спажываецца электралямпай магутнасцю $P = 100$ Вт на працягу прамежку часу $\tau = 1,0$ год?
4. Вызначыце масу Δm , якую губляе Сонца за год, калі на паверхню Зямлі плошчай $S = 1,0 \text{ см}^2$ штосекундна трапляе $E = 0,14$ Дж энергіі выпраменьвання. Адлегласць ад Зямлі да Сонца $R = 1,5 \cdot 10^8$ км.



САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 4

Спецыяльная тэорыя адноснасці (СТА) грунтуецца на двух пастулатах (прынцыпах).

Першы пастулат (пастулат адноснасці): усе законы фізікі, якія апісваюць любыя фізічныя з’явы, павінны мець аднолькавы выгляд ва ўсіх ІСА.

Другі пастулат (пастулат пастаянства скорасці святла): ва ўсіх ІСА скорасць святла ў вакууме аднолькавая і не залежыць ні ад скорасці руху крыніцы, ні ад скорасці прыёмніка выпраменьвання.

Скорасць святла ў вакууме з’яўляецца гранічнай скорасцю руху матэрыяльных аб’ектаў і распаўсюджвання сігналаў.

Энергія спакою E_0 цела прапарцыянальна яго масе:

$$E_0 = mc^2.$$

Закон узаемасувязі змяненняў масы і энергіі спакою:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

Заданне для самастойных даследаванняў

Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (А. Эйнштэйн, Г. А. Лорэнц, А. Пуанкарэ, А. Майкельсан).





Раздзел 5

Фатоны. Дзеянні святла

Кожнае стагоддзе, набываючы новыя ідэі, набывае і новыя вочы.

Г. Гейнэ

У канцы XIX ст. многія вучоныя лічылі, што развіццё фізікі завяршылася. Законы механікі і тэорыя сусветнага прыцягнення былі вядомы больш за 200 гадоў. Да гэтага часу была развіта і стала агульнапрызнанай тэорыя электрамагнітнага поля, асновы якой былі закладзены Дж. Максвелам.

Аднак да пачатку XX ст. паўсталі праблемы, якія мелі дачыненне да фізічнай прыроды выпраменьвання і рэчыва, а таксама іх узаемадзеяння. У рамках класічнай фізікі ўзніклі непераадольныя супярэчнасці пры тлумачэнні эксперыментальных даных для працэсаў паглынання і выпраменьвання святла атамамі, заканамернасцей выпускавання электрамагнітнага выпраменьвання нагрэтымі цэламі, фотаэфекту і да т. п.

Аналіз гэтых супярэчнасцей і пабудова на іх аснове новых тэорый прывялі фізікаў на пачатку XX ст. да навуковай рэвалюцыі, якая карэнным чынам змяніла погляды вучоных на аб'екты мікрасвету — атам, яго ядро і элементарныя часціцы.

На працягу наступных 30 гадоў былі закладзены асновы **квантавай фізікі**, якая прыйшла на змену класічнай фізіцы пры разглядзе з'яў на атамным і ўнутрыатамным (субатамным) узроўнях.

§ 27. Фотаэфект. Эксперыментальныя законы знешняга фотаэфекту. Квантавая гіпотэза Планка

Вывучэнне ўзаемадзеяння святла з рэчывам прывяло да адкрыцця эфектаў, якія дазволілі зрабіць важны крок да разумення прыроды святла. У далейшым выкарыстанне гэтых эфектаў дазволіла стварыць новае пакаленне электронных прыбораў і прылад. Якія ж асноўныя заканамернасці ўзаемадзеяння святла з рэчывам?

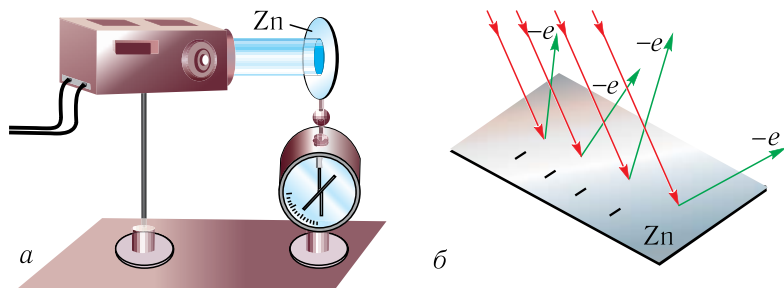


Сіла току I — скалярная фізічная велічыня, роўная адносіне зараду Δq , які прайшоў за прамежак часу Δt праз папярочнае сячэнне правадніка, да гэтага прамежку: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$.

У 1887 г. Генрых Герц выявіў, што прабой паветранага прамежку паміж электродамі іскравага разрадніка адбываецца пры меншым напружанні, калі адмоўна зараджаны электрод асвятляць ультрафіялетавым выпраменьваннем. Далейшыя эксперыменты паказалі, што адмоўна зараджаная цынкавая пласцінка пры апраменьванні ультрафіялетавым выпраменьваннем (мал. 171, а) разраджаецца. Абедзве гэтыя з'явы можна растлумачыць, мяркуючы, што пад дзеяннем падаючага выпраменьвання з металу вылятаюць адмоўна зараджаныя часціцы — электроны (мал. 171, б). Гэта з'ява атрымала назву *фотаэфекту*.

Фотаэфектам (фотаэлектрычным эфектам) называецца з'ява ўзаемадзеяння электрамагнітнага выпраменьвання з рэчывам, у выніку якога энергія выпраменьвання перадаецца электронам рэчыва.

Калі фотаэфект суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **знешнім фотаэфектам**, а электроны, што выля-



Мал. 171. Фотаэлектрычны эфект:

а — дзеянне ультрафіялетавага выпраменьвання на пласцінку; б — вылет электронаў з паверхні цынку пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання

таюць, — **фотаэлектронамі**. Калі фотаэфект не суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **унутраным фотаэфектам**. Пры ўнутраным фотаэфекце частка электронаў, што знаходзяцца ў рэчыве ў звязаным стане, пераходзіць у свабодны стан, павялічваючы канцэнтрацыю свабодных носьбітаў току. Гэта прыводзіць да змянення электрычных уласцівасцей рэчыва пад дзеяннем падаючага на яго святла. Унутраны фотаэфект уласцівы толькі паўправаднікам і дыэлектрыкам. Выпусканне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй (фотаэмісіяй)**.

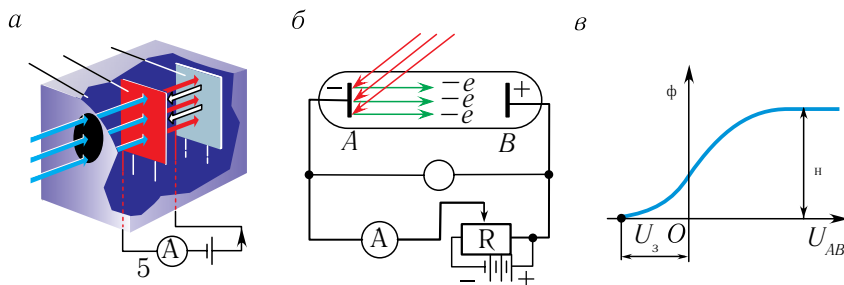
► «Фотоξ» (фотас) па-грэчаску азначае «святло».

Сістэматычнае вывучэнне фотаэфекту было праведзена ў 1888—1889 гг. рускім фізікам Аляксандрам Рыгоравічам Сталетавым.

Схема ўстаноўкі для эксперыментальнага вывучэння знешняга фотаэфекту прадстаўлена на малюнку 172, *а*.

У эксперыментах Сталетава ў электрычны ланцуг былі ўключаны два электроды (2) і (3), адзін з якіх (2) быў выраблены з меднай сеткі, а (3) уяўляў сабой цынкавую пласцінку. Медная сетка была зараджана дадатна, а цынкавая пласцінка — адмоўна. Назіранні паказалі, што пад дзеяннем падаючага ультрафіялетавага выпраменьвання ў ланцугу ўзнікае электрычны ток. Гэты ток называецца **фотатокам**.

Змяняючы напружанне U паміж пласцінамі A і B пры дапамозе рэастата (мал. 172, *б*), Сталетаў даследаваў залежнасць сілы фотатоку I_{ϕ} ад напружання U (вольт-амперную характарыстыку). Як бачна з пака-



Мал. 172. Вывучэнне знешняга фотаэфекту: *а* — выгляд устаноўкі: 1 — герметычны корпус; 2 — медная сетка; 3 — цынкавая пласцінка; 4 — крыніца току; 5 — амперметр; *б* — электрычная схема зняцця вольт-ампернай характарыстыкі $I(U)$; *в* — вольт-амперная характарыстыка

знай на малюнку 172, *в* залежнасці, нават пры адсутнасці рознасці патэнцыялаў паміж пласцінамі ў ланцугу адбываецца фотаток. Паколькі скорасці электронаў, выпускаемых катодам, адрозніваюцца як па модулі, так і па напрамку, то не ўсе яны пры малых значэннях напружання могуць дасягнуць анода.

Пры павелічэнні напружання паміж электродамі сіла фотатоку нарастае да некаторага максімальнага значэння I_n (гл. мал. 172, *в*), якое называецца **фотатокам насычэння**. Пры фотатоку насычэння ўсе электроны, выпускаемыя катодам за адзінку часу, дасягаюць анода. Вось чаму далейшае павелічэнне напружання не прыводзіць да росту сілы фотатоку. Змяненне палярнасці напружання прыводзіць да знікнення фотатоку пры напружанні U_3 , якое называецца **затрымліваючым напружаннем** (гл. мал. 172, *в*).

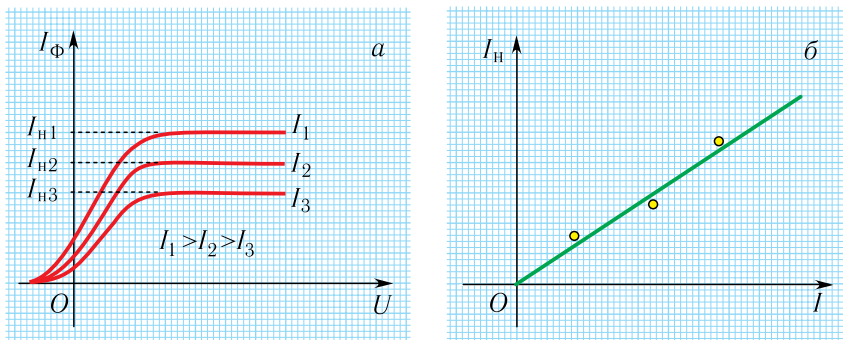
Для большасці рэчываў фотаэфект узнікае толькі пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання. Аднак некаторыя металы, напрыклад літый, натрый і калій, выпускаюць электроны і пры іх апраменьванні бачным святлом.

Эксперыментальна ўстаноўлены наступныя законы знешняга фотаэфекту:

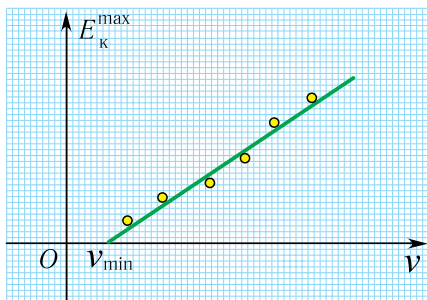
1. *Сіла фотатоку насычэння I_n прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання (першы закон фотаэфекту).*

Вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту паказана на малюнках 172, *в* і 173, *а*.

Залежнасць фотатоку насычэння I_n ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання I паказана на малюнку 173, *б*. Паколькі графік выходзіць з пачатку каардынат, то сіла фотатоку насычэння роўна нулю ($I = 0$) толькі



Мал. 173. *а* — вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры розных інтэнсіўнасцях падаючага выпраменьвання; *б* — залежнасць сілы фотатоку насычэння ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання



Мал. 174. Графік залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі $E_k^{\max}$ фотаэлектронаў ад частаты ν падаючага выпраменьвання

фотаэлектронны частку сваёй энергіі, атрыманай ад падаючага выпраменьвання, перадаюць частціцам рэчыва да вылету з яго паверхні.

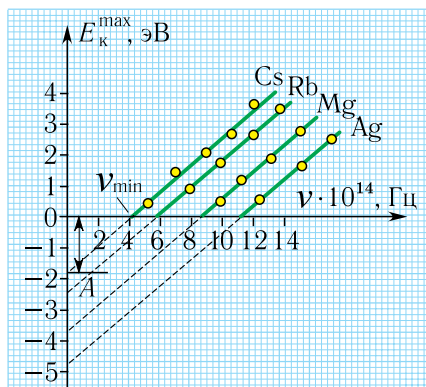
На малюнку 174 паказана залежнасць $E_k^{\max}$ ад частаты падаючага выпраменьвання.

3. Для кожнага рэчыва існуе гранічная частата $\nu_{\min}$ такая, што выпраменьванне меншай частаты не можа вырываць электроны з яго паверхні (трэці закон фотаэфекту).

Гэта мінімальная частата $\nu_{\min}$ называецца **чырвонай мяжой** фотаэфекту. Такая назва звязана з тым, што мінімальную частату выпраменьвання ў бачным дыяпазоне мае выпраменьванне, якое адпавядае чырвонаму колеру.

Заўважым, што чырвоная мяжа фотаэфекту для розных рэчываў зусім не абавязкова адпавядае чырвонаму колеру. Напрыклад, для рубідыю яна адпавядае жоўтаму колеру, для кальцыю — сіняму, а для некаторых рэчываў можа наогул знаходзіцца як у інфрачырвонай, так і ў ультрафіялетавай абласцях спектра.

На малюнку 175 паказаны эксперыментальныя залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў $E_k^{\max}$ ад частаты падаючага выпраменьвання для цэзію (Cs), рубідыю (Rb), маг-



Мал. 175. Графікі залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў $E_k^{\max}$ ад частаты ν падаючага выпраменьвання для Cs, Rb, Mg і Ag

нію (Mg) і серабра (Ag). Як бачна з малюнка 175, эксперыментальныя прамыя паралельны адна адной, прычым пункты перасячэння графікаў з воссю абсцыс (частот) вызначаюць чырвоныя межы фотаэфекту для кожнага з іх.

Пры частотах, большых за $\nu_{\min}$, выпраменьванне нават вельмі малой інтэнсіўнасці выклікае фотаэфект. Акрамя таго, паміж момантам уключэння крыніцы выпраменьвання і момантам вылету электронаў з узору фактычна няма затрымкі ў часе: электроны вылятаюць з рэчыва праз прамежак часу парадку 10^{-9} — 10^{-10} с пасля пачатку абпраменьвання, г. зн. практычна імгненна.

Трэба адзначыць, што падчас даследавання фотаэфекту Сталетавым яшчэ нічога не было вядома аб электроне, які будзе адкрыты Джозефам Джоном Томсанам толькі ў 1897 г.

Падкрэслім, што ўстаноўленыя эксперыментальныя законы фотаэфекту немагчыма растлумачыць на падставе ўяўленняў аб тым, што святло — гэта электрамагнітная хваля. На аснове гэтых уяўленняў можна растлумачыць толькі першы з прыведзеных эксперыментальных законаў фотаэфекту: чым большая энергія падаючага святла, тым больш электронаў вылятае з рэчыва. Растлумачыць жа 2-і і 3-і законы фотаэфекту ў рамках класічнай тэорыі выпраменьвання не ўяўляецца магчымым.

Так, напрыклад, незразумела, чаму максімальная кінетычная энергія фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання. Немагчыма таксама растлумачыць існаванне чырвонай мяжы фотаэфекту. Сапраўды, нават пры малой частаце падаючага выпраменьвання, але пры працяглым уздзеянні электрамагнітнай хвалі на электрон яму можна перадаць энергію, неабходную для вылету з рэчыва. Такім чынам, зыходзячы з хвалевага ўяўленняў, чырвоная мяжа фотаэфекту не павінна існаваць. Усе гэтыя супярэчнасці былі зняты квантавай тэорыяй.

Квантавыя ўяўленні былі ўпершыню ўведзены нямецкім фізікам Максам Планкам. Ён зрабіў фундаментальную здагадку, што выпраменьванне і паглыннанне электрамагнітных хваль атамамі і малекуламі адбываецца не бесперапынна, а асобнымі порцыямі энергіі — квантамі. Адпаведна, пад квантам трэба разумець мінімальную порцыю энергіі, якая выпраменьваецца ці паглынаецца. Энергія кванта прама прапарцыянальна частаце выпраменьвання:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

дзе h — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які называюць **пастаяннай Планка**. Гэта — фундаментальная пастаянная.

16 лістапада 2018 г. на пасяджэнні Генеральнай асамблеі мер і вагаў значэнне пастаяннай Планка было прынята роўным:

$$h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка, якое выкарыстоўваецца пры рашэнні задач:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Энергія любой вагальнай сістэмы (атама, малекулы), якая выконвае ваганні з частатой ν , можа прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, якія адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**:

$$E_n = nE = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

дзе n — цэлы дадатны лік.

Значыць, атам (малекула) можа мець не любую энергію, а толькі энергію, кратную $\Delta E = h\nu$. Такім чынам, упершыню ў фізіцы з'явілася ідэя аб квантаванні энергіі.

14 снежня 1900 г. Планк далажыў свае вынікі на пасяджэнні Нямецкага фізічнага грамадства. Гэты дзень лічаць днём нараджэння квантавых уяўленняў. З'явіўся квант энергіі як дыскрэтная порцыя энергіі. Планк адносіў дыскрэтнасць энергіі да ўласцівасцей рэчыва, а выпраменьванне разглядалася як электрамагнітныя хвалі.

Пасля з'яўлення гіпотэзы Планка (1900 г.) пачалося інтэнсіўнае развіццё квантавых уяўленняў у фізіцы, якія да 1925—1928 гг. ператварыліся ў стройную і лагічную квантавую тэорыю, што адкрыла «новую эру» ў развіцці фізікі.

► У 1898 г. нямецкі фізік Філіп Ленард і англійскі фізік Джозеф Джон Томсан вызначылі адносіну зараду q часціцы, якая вылятае з паверхні металу пры фотаэфекце, да яе масы m (так званы ўдзельны зарад — $\frac{q}{m}$) па яе адхіленні ў электрычным і магнітным палях. Гэтыя вымярэнні далі тое ж значэнне, што і адносіна зараду электрона да яго масы $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$. Такім чынам, было даказана, што выбіваемыя святлом зараджаныя часціцы — электроны.

Слова «квант» паходзіць ад лац. *quantum* — колькі або як многа. Наогул, гэта слова азначае частку, долю ці непадзельную порцыю. Планк паэтычна назваў новую фундаментальную пастаянную h — «таямнічым амбасадарам з рэальнага свету».

▶ За працы па вызначэнні ўдзельнага зараду электрона $\frac{e}{m}$, якія прывялі да адкрыцця першай элементарнай часціцы — электрона, Дж. Томсан у 1906 г. быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы.



У 1918 г. Макс Планк быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы «...у знак прызнання паслуг, якія ён аказаў фізіцы сваім адкрыццём квантаў энергіі».



1. У чым заключаецца сутнасць з'явы знешняга фотаэфекту? Унутранага фотаэфекту?
2. Калі і кім была адкрыта з'ява знешняга фотаэфекту?
3. Намалуйце схему эксперыментальнай устаноўкі Сталетава і растлумачце сутнасць зробленых ім эксперыментаў.
4. Растлумачце асаблівасці вольт-ампернай характарыстыкі фотаэфекту.
5. Сфармулюйце эксперыментальныя законы фотаэфекту. Якія з іх немагчыма растлумачыць з пункту гледжання хвалевай тэорыі святла?
6. У чым заключаецца гіпотэза Планка?
7. Запішыце прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка.



§ 28. Фатон. Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту

- Вывучэнне законаў фотаэфекту прывяло вучоных да нечаканай высновы: пры ўзаемадзеянні з рэчывам (паглыннанні ці выпраменьванні) святло паводзіць сябе падобна часціцам, якія рухаюцца (квантам). Што гэта за часціцы? Якія іх уласцівасці і як яны звязаны з хвалевымі характарыстыкамі святла?



Электрон-вольт — энергія, якую набывае часціца з зарадам, роўным элементарнаму, пры перамяшчэнні паміж двума пунктамі з паскараючай рознасцю патэнцыялаў 1 В ($1,0 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Развіваючы ідэі М. Планка, А. Эйнштэйн у 1905 г. для тлумачэння эксперыментальных законаў знешняга фотаэфекту прапанаваў гіпотэзу аб дыскрэтнасці самога электрамагнітнага выпраменьвання — святло выпраменьваецца, паглынаецца і распаўсюджваецца ў выглядзе асобных порцый (квантаў). Ён разгледзеў элементарныя працэсы паглынання і выпускання гэтых квантаў.

Паводле гіпотэзы Эйнштэйна монахраматычнае электрамагнітнае выпраменьванне частатой ν мае не толькі хвалевыя ўласцівасці, але і ўласцівасці, характэрныя для патоку часціц. Кожная такая часціца рухаецца са скорасцю святла c і нясе квант энергіі $E = h\nu$. Назваць гэтыя часціцы **фатонамі** прапанаваў у 1928 г. амерыканскі фізік Артур Комптан.

Энергія фатона можа быць выражана праз даўжыню хвалі λ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$



Маса фатона, які рухаецца са скорасцю святла ў вакууме, роўна нулю. Такім чынам, фатон — дзіўная часціца, якая мае энергію $E = h\nu$, імпульс $\vec{p}$. З прычыны таго што скорасць фатона роўна скорасці святла ў вакууме, яго маса роўна нулю ($m = 0$). Такія часціцы называюць *бязмасавымі*.

Фатон з'яўляецца элементарнай часціцай, толькі ў адрозненне ад іншых элементарных часціц ён не мае масы, а таму «вымушаны» заўсёды рухацца са скорасцю распаўсюджвання святла.

Такім чынам, фатон мае наступныя ўласцівасці:

- існуе толькі ў руху;
- з'яўляецца бязмасавай часціцай ($m = 0$);
- электрычна нейтральны ($q = 0$);
- скорасць яго руху роўна скорасці распаўсюджвання святла ў вакууме ($v = c$) ва ўсіх ІСА;
- энергія фатона прапарцыянальна частаце адпаведнага электрамагнітнага выпраменьвання ($E = h\nu$).



Разгледзім тлумачэнне эксперыментальных законаў фотаэфекту, прапанаванае Эйнштэйнам на падставе квантавых уяўленняў. Пры асвятленні электрода электрамагнітным выпраменьваннем (гл. мал. 171) адбываецца ўзаемадзеянне фатонаў з электронамі рэчыва. Калі энергія фатона $E = h\nu$ досыць вялікая, то які-небудзь з электронаў пасля паглынання фатона можа атрымаць энергію, дастатковую для таго, каб пакінуць апраменьваемы ўзор. Электроны, якія пакінулі ўзор, маюць некаторую скорасць, таму нават пры адсутнасці напружання паміж электродамі сіла фотатоку не роўна нулю. Менавіта таму вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры напружанні, роўным нулю, не праходзіць праз нуль (гл. мал. 172, в).

Для таго каб пакінуць рэчыва, электрон павінен выканаць работу супраць сіл узаемадзеяння электрона з атамамі рэчыва. Такім чынам,

мінімальная энергія, необходимая для выбывання электрона з паверхні рэчыва, называецца **работай выхаду** і абазначаецца $A_{\text{вых}}$ ($A_{\text{вых}} > 0$). Для металаў гэта работа звязана з пераадоленнем сіл узаемадзеяння электронаў з дадатна зараджанымі іонамі крышталічнай рашоткі, якія ўтрымліваюць электрон у рэчыве. Работа выхаду для металаў звычайна складае некалькі электрон-вольт (табл. 9).

Табліца 9. Фотаэлектрычныя характарыстыкі некаторых рэчываў

Рэчыва	$A_{\text{вых}}$, эВ	$\nu_{\text{min}} \cdot 10^{-14}$ Гц	$\lambda_{\text{к}}$, нм
Цэзій	1,9	4,6	650
Калій	2,2	5,3	560
Натрый	2,3	5,6	540
Кальцый	2,7	6,5	460
Цынк	3,7	8,9	340
Серабро	4,3	10	260
Вальфрам	4,5	11	280
Нікель	5,0	12	250
Плаціна	5,3	13	230

Астатняя частка энергіі паглынутага кванта складае кінетычную энергію электрона, які вызваліўся. Найбольшую кінетычную энергію $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ будуць мець тыя электроны, якія паглынуць кванты святла паблізу ад паверхні металу і выляцяць з яго, не паспеўшы згубіць энергію пры сутыкненнях з іншымі часціцамі ў метале.

На падставе закону захавання энергіі можна запісаць наступнае ўраўненне для фотаэлектрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

Гэту суадносіну называюць **ураўненнем Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту**.

Адзначым, што $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{\kappa}^{\max}$ — гэта максімальная кінетычная энергія электрона ($v_{\max} \ll c$), якую ён можа мець, вылецеўшы з рэчыва. З-за розных страт кінетычная энергія электрона будзе меншай за разліковае значэнне.

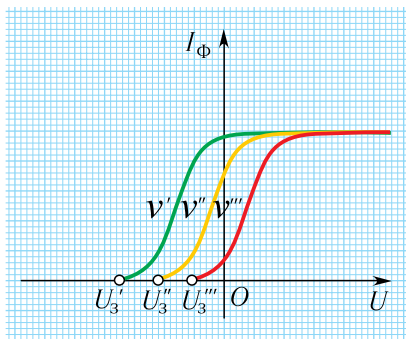


Выкарыстаўшы ўраўненне Эйнштэйна, можна растлумачыць эксперыментальныя законы фотаэфекту.

Тлумачэнне першага закону фотаэфекту. Сіла фотатоку насычэння прапарцыянальна агульнаму ліку фотаэлектронаў, якія пакідаюць паверхню металу за адзінку часу. Лік такіх фотаэлектронаў, у сваю чаргу, прапарцыянальны ліку фатонаў, якія падаюць на паверхню за гэты ж час. Менавіта прапарцыянальна, а не роўна, паколькі частка квантаў святла паглынаецца крышталічнай рашоткай, і іх энергія пераходзіць ва ўнутраную энергію металу. Такім чынам, павелічэнне інтэнсіўнасці падаючага святла прыводзіць да росту ліку фотаэлектронаў, якія пакідаюць паверхню металу.

Тлумачэнне другога закону фотаэфекту. Фотаэлектрон вырываецца з катода за кошт дзеяння аднаго кванта падаючага выпраменьвання. Таму кінетычная энергія фотаэлектрона залежыць не ад поўнай энергіі хвалі, а ад энергіі аднаго кванта, г. зн. частаты ν . Пры павелічэнні частаты ν падаючага святла максімальная кінетычная энергія $E_{\kappa}^{\max}$ фотаэлектронаў нарастае лінейна, як вынікае з ураўнення Эйнштэйна для фотаэфекту (2), згодна з суадносінай:

$$E_{\kappa}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (3)$$



Мал. 176. Вольт-амперныя характарыстыкі знешняга фотаэфекту пры розных частотах падаючага выпраменьвання ($\nu' > \nu'' > \nu'''$)

Вядома, што фотатокам можна кіраваць, падаючы на металічныя пласціны розныя напружанні. Калі на сістэму падаць невялікае напружанне адваротнай палярнасці, якое «абцяжарвае» вылет электронаў, то сіла току паменшыцца, паколькі цяпер фотаэлектронам, акрамя работы выхаду, прыйдзецца выконваць дадатковую работу супраць сіл электрычнага поля.

Пры некаторым адмоўным значэнні напружання U_3 электроны затарможваюцца і, не дасягнуўшы паверхні анода, вяртаюцца на катод. Сіла току ў ланцугу

пры гэтым будзе роўна нулю (мал. 176). Велічыню U_3 , пры якой сіла току ў ланцугу роўна нулю, называюць *затрымліваючым напружаннем*. Такім чынам, уся кінетычная энергія электронаў затрачваецца на работу супраць сіл электрычнага поля. Пры гэтым максімальная кінетычная энергія электронаў выражаецца праз затрымліваючае напружанне наступным чынам:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = eU_3. \quad (4)$$

Тлумачэнне трэцяга закону фотаэфекту. Калі частата ν падаючага выпраменьвання меншая за гранічную частату ν_{min} ($\nu < \nu_{\text{min}}$), пры якой $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$, то выпусканне электронаў не адбываецца ($\nu_{\text{max}} = 0$). Такім чынам, фотаэфект адсутнічае, калі частата выпраменьвання аказваецца меншай за некаторую характэрную для дадзенага рэчыва велічыню ν_{min} .

Значыць, **чырвоную мяжу фотаэфекту** можна знайсці з умовы:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (5)$$

Яна залежыць толькі ад работы выхаду электронаў, г. зн. вызначаецца будовай металу і станам яго паверхні.

Даўжыня хвалі $\lambda_{\text{ч}}$ выпраменьвання, якая адпавядае чырвонай мяжы фотаэфекту, можа быць вызначана з суадносіны:

$$\lambda_{\text{ч}} = \frac{c}{\nu_{\text{min}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}. \quad (6)$$



► Са з'яўленнем магутных монахраматычных крыніц святла (лазераў) стала магчымым назіраць працэсы шматфатоннага паглынання. У такіх працэсах, перш чым пакінуць рэчыва, электрон можа паглынуць не адзін, а некалькі фатонаў. Таму ўраўненне Эйнштэйна для шматфатоннага фотаэфекту запішацца ў выглядзе:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = Nh\nu - A_{\text{вых}},$$

дзе N — лік фатонаў, за кошт паглынання якіх вылецеў электрон.

Значыць, для шматфатоннага фотаэфекту частата чырвонай мяжы памяншаецца ў N разоў, а адпаведная ёй даўжыня хвалі ў N разоў павялічваецца:

$$(\nu_{\text{min}})_N = \frac{A}{Nh}.$$

У наш час цяжка ўявіць сабе сучасную навуку і тэхніку без выкарыстання прылад (прыёмнікаў выпраменьвання), якія пераўтвараюць



а

б

Мал. 177. Фотаэлемент: а — вакуумны (газанапоўнены); б — паўправадніковы

светлавых сігналаў у электрычных. Такія прылады называюцца *фотаэлементамі* (мал. 177).

Фотаэлементы выкарыстоўваюцца для кантролю пасажырапатоку ў метро, для ўключэння і выключэння асвятлення на вуліцах, для кіравання вытворчымі працэсамі, у ваеннай тэхніцы: у саманаводных снарадах, для сігналізацыі і лакацыі.

Інфрахырвоныя фотаэлементы шырока выкарыстоўваюцца ў пультах дыстанцыйнага кіравання рознымі бытавымі электроннымі прыборамі (тэлевізар, кандыцыянер і г. д.).

► У 1921 г. пры прысуджэнні Альберту Эйнштэйну Нобелеўскай прэміі па фізіцы ў рашэнні Нобелеўскага камітэта падкрэслівалася, што «прэміяй асабліва адзначаецца тлумачэнне законаў фотаэлектрычнага эфекту». Першы фотаэлемент на знешнім фотаэфекце быў створаны Сталетавым у 1888 г.



1. У чым сутнасць гіпотэзы Эйнштэйна?
2. Што называецца фатоном? Перапішыце асноўныя ўласцівасці фатона.
3. Па якой формуле можна вызначыць энергію фатона?
4. Запішыце ўраўненне Эйнштэйна для фотаэфекту і назаўважце ўсе фізічныя велічыні, якія ўваходзяць у яго.
5. Пакажыце, што ўраўненне Эйнштэйна для фотаэфекту з'яўляецца вынікам закону захавання і ператварэння энергіі.
6. Перапішыце ўмовы, неабходныя для ўзнікнення фотаэфекту.
7. Што такое затрымліваючае напружанне?
8. Што называецца чырвонай мяжой фотаэфекту? Ад чаго яна залежыць?
9. Як квантавая тэорыя тлумачыць існаванне гранічнай частаты фотаэфекту? Запішыце формулу для чырвонай мяжы фотаэфекту.
10. Растлумачце законы фотаэфекту зыходзячы з квантавай тэорыі святла.
11. Чаму энергія фотаэлектронаў для дадзенага рэчыва вызначаецца толькі частатой падаючага святла?

Прыклады рашэння задач

1. Монахраматычнае святло даўжынёй хвалі $\lambda = 450$ нм падае на паверхню натрыю. Вызначыце: а) энергію E фатона гэтага святла; б) мо-

дуль імпульсу p фатона падаючага святла; в) чырвоную мяжу $\nu_{\min}$ фотаэфекту для натрыю; г) максімальную кінетычную энергію $E_{\text{к}}^{\max}$ фотаэлектронаў.

Дадзена:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$E \text{ — ? } p \text{ — ? } \nu_{\min} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{к}}^{\max} \text{ — ?}$$

Рашэнне

а) Энергія фатона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} =$$

$$= 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,8 \text{ эВ.}$$

б) Модуль імпульсу фатона:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Чырвоная мяжа звязана з работай выхаду суадноснай:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad \nu_{\min} = \frac{3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

г) З ураўнення Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту знаходзім, што максімальная кінетычная энергія электрона, што вылецеў:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}, \quad E_{\text{к}}^{\max} = 2,8 \text{ эВ} - 2,3 \text{ эВ} = 0,50 \text{ эВ.}$$

Адказ: а) $E = 2,8 \text{ эВ}$; б) $p = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; в) $\nu_{\min} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$; г) $E_{\text{к}}^{\max} = 0,50 \text{ эВ}$.

2. Пад дзеяннем святла даўжынёй хвалі $\lambda = 400 \text{ нм}$ з паверхні металу вылятаюць электроны, пры гэтым іх энергія роўна палове энергіі фатонаў, што выклікаюць фотаэфект. Вызначыце даўжыню хвалі $\lambda_{\text{ч}}$, якая адпавядае чырвонай мяжы фотаэфекту.

Дадзена:

$$\lambda = 400 \text{ нм} = 4,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\lambda_{\text{ч}} \text{ — ?}$$

Рашэнне

Запішам ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Чырвоную мяжу фотаэфекту вызначым з суадносіны:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\min}.$$

Па ўмове задачы:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{h\nu}{2}.$$

Тады $h\nu = h\nu_{\min} + \frac{h\nu}{2}$, адкуль вынікае, што $\nu_{\min} = \frac{\nu}{2}$.

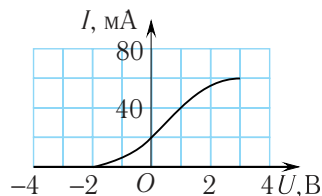
Паколькі даўжыня хвалі $\lambda = \frac{c}{\nu}$, то

$$\lambda_{\text{ч}} = 2\lambda, \quad \lambda_{\text{к}} = 2 \cdot 400 \text{ нм} = 800 \text{ нм}.$$

Адказ: $\lambda_{\text{ч}} = 800 \text{ нм}$.

Практыкаванне 19

1. Вызначыце энергію E фатона для выпраменьвання частотой $\nu = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.
2. Вылічыце энергію E_1 фатона бачнага святла даўжынёй хвалі $\lambda_1 = 0,60 \text{ мкм}$ і параўнайце яе з энергіямі фатонаў ультрафіялетавага выпраменьвання даўжынёй хвалі $\lambda_2 = 0,252 \text{ мкм}$, рэнтгенаўскага выпраменьвання $\lambda_3 = 0,10 \text{ нкм}$ і λ -выпраменьвання $\lambda_4 = 0,10 \text{ пм}$.
3. Вызначыце чырвоную мяжу $\nu_{\min}$ фотаэфекту для некаторага металу, калі работа выхаду электрона з яго $A_{\text{вых}} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
4. Вызначыце даўжыню хвалі λ ультрафіялетавага выпраменьвання, падаючага на паверхню цынку, пры якой модуль максімальнай скорасці вылятаючых фотаэлектронаў складае $v_{\max} = 800 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
5. Вызначыце работу выхаду $A_{\text{вых}}$ электрона з катода, выкарыстаўшы вольт-амперную характарыстыку вакуумнага фотаэлемента (мал. 178). Катод асвятляецца святлом з даўжынёй хвалі $\lambda = 200 \text{ нм}$. Знайдзіце лік N электронаў, выбіваемых з фотакатода за адзінку часу.
6. Вызначыце колькасць N фатонаў з частотой $\nu = 9,5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, якая змяшчаецца ў імпульсе выпраменьвання з энергіяй $E = 8,8 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$.
7. Вызначыце максімальную кінетычную энергію $E_{\text{к}}^{\max}$ і модуль максімальнай скорасці $v_{\max}$ фотаэлектрона, што вылецеў з натрыю пры



Мал. 178

апраменьванні яго ультрафіялетавым выпраменьваннем даўжынёй хвалі $\lambda = 200$ нм.

8. На металічную пласціну падае монахраматычнае святло даўжынёй хвалі $\lambda = 413$ нм. Вызначыце работу выхаду $A_{\text{вых}}$ (эВ), калі затрымліваючае напружанне $U_3 = 1,0$ В.



§28-1

§ 29. Ціск святла.

Карпускулярна-хвалева дуалізм

Слоўца гучнае заўсёды
З цяжкасці вас выводзіць!

І. Гётэ. Фауст

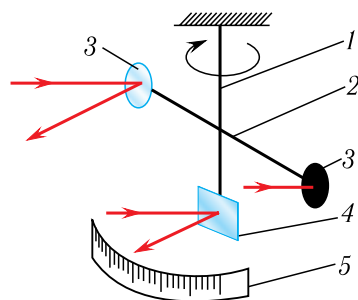
- Пасля адкрыцця фатона ў навуковым свеце з новай сілай «успыхнула» старая дыскусія: так што ж такое святло — хваля ці паток часціц? Як «пагадніць» адно з адным гэтыя супярэчлівыя ўяўленні? Якія з гэтага вынікаюць высновы?



Ціскам называецца скалярная фізічная велічыня, лікава роўная адносіне модуля сілы, якая дзейнічае па нармалі да плошчы, да яе плошчы $p = \frac{F}{S}$. У СІ адзінкай ціску з'яўляецца паскаль (Па): $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$.

З законаў механікі вынікае, што цела пры ўдары аб некаторую паверхню аказвае на яе механічны ціск, абумоўлены змяненнем імпульсу цела. Прычым ціск цела на паверхню аказваецца ў выпадку як пругкага, так і няпругкага ўдару. А ці будзе ўзнікаць падобны эфект пры адбіцці і паглыннанні святла некаторай паверхняй? Інакш кажучы, ці аказвае святло ціск на паверхню, з якой узаемадзейнічае? Пасля завяршэння пабудовы Максвелам хвалевай тэорыі святла адказы на гэтыя пытанні сталі відавочнымі. Святло як электрамагнітная хваля мае энергію і імпульс, таму аказвае ціск на паверхню, на якую яно падае.

Рускі фізік Пётр Мікалаевіч Лебедзеў у 1899 г. упершыню вымераў светлавую ціск. Ён падвесіў на тонкай нітцы каромысел з парай крыльцаў на канцах (мал. 179): паверхня ў аднаго з іх была зачэрненай, забяспечваючы амаль поўнае паглыннанне, а ў другога — лю-



Мал. 179. Схема доследу Лебедзева: 1 — падвес; 2 — каромысел; 3 — крыльцы; 4 — люстра; 5 — шкала



страной, забяспечваючы поўнае адбіццё. Падвес з крыльцамі ўтварыў адчувальныя круцільныя вагі, змешчаныя ў пасудзіну, паветра ў якой было адпампавана.

Святло практычна цалкам адбівалася ад люстраной паверхні, і яго ціск на люстраное крыльца быў удвая большы, чым на зачэрненае. З прычыны гэтага ствараўся момант сіл, які паварочваў каромысел (гл. мал. 179). Вымяраючы вугал павароту каромысла, можна было меркаваць аб сіле, якая дзейнічала на крылцы, а такім чынам, вызначыць светлавую ціск.



Факт існавання светлавага ціску мае вялікае значэнне, паколькі даказвае наяўнасць у святла не толькі энергіі, але і імпульсу. Гэта сведчыць аб матэрыяльнасці электрамагнітнага выпраменьвання, якое ўяўляе сабой яшчэ адну форму існавання матэрыі — у выглядзе электрамагнітнага поля.

Да таго ж з часоў І. Ньютана і Х. Гюйгенса (XVII ст.) уяўленні аб прыродзе святла былі супярэчлівыя. Адны вучоныя на чале з Ньютанам лічылі святло патокам часціц — карпускул (ад лац. *corpusculum* — маленькая часціца), іншыя следам за Гюйгенсам меркавалі, што святло ўяўляе сабой не што іншае, як хвалі.

Да пачатку XIX ст. абодва пункты гледжання адстойваліся са зменным поспехам. Так, зыходзячы з гіпотэзы аб карпускулах, можна было растлумачыць законы прамалінейнага распаўсюджвання і адбіцця святла, а такія з'явы, як інтэрферэнцыя, дыфракцыя святла, тлумачыліся толькі яго хвалевымі ўласцівасцямі.

Аднак у XX ст. было вызначана, што ў цэлым шэрагу з'яў, такіх, напрыклад, як фотаэфект, святло паводзіць сябе як сукупнасць часціц з пэўнай энергіяй і імпульсам. Адначасовая наяўнасць у аб'екта хвалевых і карпускулярных уласцівасцей атрымала назву **карпускулярна-хвалевага дуалізму**.

У адных працэсах у большай меры праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла, у іншых — карпускулярныя. Доўгі час прырода гэтага дуалізму была зусім незразумелай, і ён здаваўся штучным аб'яднаннем супярэчлівых уласцівасцей матэрыі.

Толькі пасля стварэння квантавай механікі высветлілася, што «раздвойванне асобы» святла заканамерна і ўяўляе сабой праяву спецыфічных уласцівасцей, характэрных мікрасвету ў цэлым.

Французскі фізік Луі дэ Бройль у 1923 г. выказаў адважную здагадку, што карпускулярна-хвалевы дуалізм павінен мець месца для ўсіх мікрааб'ектаў.

У 1927 г. гіпотэза дэ Бройля аб наяўнасці хвалевых уласцівасцей у электрона і іншых мікрачасціц была праверана эксперыментальна, калі амерыканскія фізікі Клінтан Дэвісан і Люстэр Джэрмер упершыню назіралі дыфракцыю электронаў на крышталі нікелю. На малюнку 180 прадстаўлена сучасная фатаграфія дыфракцыі электронаў на слюдзе.



Мал. 180. Карціна дыфракцыі электронаў на слюдзе

Сучасныя эксперыменты дазваляюць паслядоўна назіраць працэс утварэння дыфракцыйнай карціны пры павелічэнні ліку электронаў, якія праходзяць праз шчыліну. Камп'ютарнае мадэляванне гэтага працэсу прадстаўлена на малюнку 181. З яго відаць, што пры павелічэнні ліку электронаў усё больш выразна фарміруюцца дыфракцыйныя максімумы (гл. мал. 181, в).



Мал. 181. Вынікі камп'ютарнага мадэлявання з'явы дыфракцыі N электронаў на дзвюх шчылінах: а — $N = 27$; б — $N = 70$; в — $N = 735$

Здольнасць да інтэрферэнцыі і дыфракцыі была выяўлена не толькі ў электронаў, але і ў іншых часціц — пратонаў, нейтронаў і альфа-часціц.

Хвалевыя ўласцівасці часціц знайшлі сваё прымяненне ў электроннай оптыцы, якая займаецца даследаваннем, пабудовай і выкарыстаннем электронных пучкоў для атрымання віда-рысаў.

Так выкарыстанне хвалевых уласцівасцей пучка электронаў дазволіла стварыць новае пакаленне мікраскопаў — электронныя мікраскопы (мал. 182), якія значна перавышаюць па ступені павелічэння аптычныя мікраскопы.

Такім чынам, карпускулярна-хвалевы дуалізм уласцівы не толькі святлу, але і любым часціцам. У адпаведнасці з ім выкарыстоўваюцца як хвалевыя, так і карпускулярныя ўяўленні, у залежнасці ад пэўнай сітуацыі.



Мал. 182. Электронны мікраскоп

► Нягледзячы на параўнальна малое значэнне светлагага ціску пры звычайных умовах, ён адыгрывае істотную ролю ў прыродзе. У 1604 г. нямецкі астраном Іаган Кеплер растлумачыў выгнутую форму хваста каметы (мал. 183) дзеяннем сіл светлагага ціску з боку Сонца (мал. 184). Акрамя таго, менавіта ціск святла «знутры» перашкоджае гравітацыйнаму сцісканню зорак, ён скарачае тэрмін службы штучных спадарожнікаў Зямлі з прычыны паступовага памяншэння радыуса іх арбіты.



Мал. 183. Камета Галей



Мал. 184. Рух каметы вакол Сонца (хвост каметы заўсёды накіраваны ад Сонца)

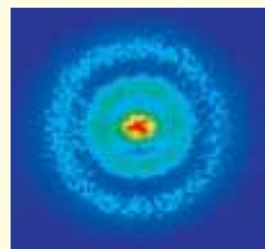
У наш час актыўна абмяркоўваюцца і рэалізуюцца праекты касмічных караблёў — «паруснікаў», якія рухаюцца дзякуючы «сонечнаму ветру». Ужо першы электронны прасвечваючы мікраскоп (Э. Руска, 1933 г.) дазваляў вывучаць дэталі, у дзесяць разоў драбнейшыя, чым тыя, якія можна было адрозніваць праз самыя «магутныя» аптычныя мікраскопы. Далейшыя даследаванні дазволілі супрацоўнікам лабараторыі фірмы IBM у Цурыху (Швейцарыя) Г. Бінінгу і Г. Рорэру ў 1981 г. стварыць электронны сканіруючы тунельны мікраскоп, які дазваляе разгледзець нават «асобны» атам.

Група спецыялістаў Такійскага ўніверсітэта 4 лістапада 2010 г. упершыню ў гісторыі пры дапамозе электроннага мікраскопа здолела «сфатаграфавать» самы лёгкі і самы маленькі атам — атам вадароду (мал. 185).



У 1929 г. Луі дэ Бройль за адкрыццё хвалевай прыроды электрона быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы.

У 1986 г. Герду Бінінгу і Генрыху Рорэру разам з Эрнстам Руска была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за стварэнне электроннага мікраскопа.



Мал. 185. «Фатаграфія» атама вадароду



1. Як электрамагнітная тэорыя тлумачыць ціск святла?
2. Апішыце сутнасць эксперыменту Лебедзева па вымярэнні светлагага ціску.
3. У чым заключаецца карпускулярна-хвалевы дуалізм святла? Пералічыце з'явы, у якіх праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла; карпускулярныя (квантавыя) уласцівасці святла.



САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 5

Энергія вагальнай сістэмы, якая выконвае гарманічныя ваганні з частотой ν , можа, згодна з гіпотэзай Планка, прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, якія адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**.

Эйнштэйн развіў гіпотэзу Планка, мяркуючы, што святло выпраменьваецца, паглынаецца і распаўсюджваецца ў выглядзе асобных порцый (квантаў).

Найменшая порцыя (**квант**) энергіі, якую нясе выпраменьванне частотой ν , вызначаецца па формуле:

$$E = h\nu,$$

дзе пастаянная h — фундаментальная пастаянная — **пастаянная Планка**. Яе прыбліжанае значэнне:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

З'ява выпускання электронаў рэчывам пад дзеяннем падаючага на яго святла атрымала назву **знешняга фотаэфекту**. Выпусканне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй (фотаэмісіяй)**, а вылятаючыя электроны — **фотаэлектронамі**.

Эксперыментальна ўстаноўлены наступныя законы знешняга фотаэфекту:

1. Сіла фотатоку насычэння I_n прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання.

2. Максімальная кінетычная энергія $E_k^{\max}$ фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання і лінейна нарастае з павелічэннем частаты ν падаючага выпраменьвання.

3. Для кожнага рэчыва існуе гранічная частата $\nu_{\min}$ такая, што выпраменьванне меншай частаты не можа вырываць электроны з яго паверхні.



Формула Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Чырвоная мяжа фотаэфекту — найменшая частата выпраменьвання, пры якой назіраецца фотаэфект:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h},$$

залежыць толькі ад работы выхаду электронаў для дадзенага рэчыва ($A_{\text{вых}} > 0$), г. зн. вызначаецца хімічнай прыродай рэчыва і станам яго паверхні.



Пад карпускулярна-хвалевым дуалізмам разумеюць той факт, што ўсе аб'екты ў прыродзе маюць як хвалевыя, так і карпускулярныя ўласцівасці. У адных умовах у большай меры праяўляюцца хвалевыя, у іншых — карпускулярныя ўласцівасці аб'ектаў.

Заданні для самастойных даследаванняў

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (Г. Герц, А. Г. Сталетаў, М. Планк, П. М. Лебедзеў, Луі дэ Бройль).

2. Падрыхтуйце рэфераты на тэмы: «Выкарыстанне фотаэлементаў у сонечных батарэях, для сігналацыі і лакацыі, для кіравання вытворчымі працэсамі».



Раздзел 6

Фізіка атама

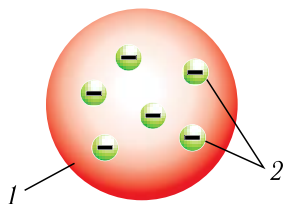
§ 30. З’явы, якія пацвярджаюць складаную будову атама. Ядзерная мадэль атама

■ Спробы растлумачыць структуру матэрыі прывялі антычных даследчыкаў да фармулёўкі ідэй атамізму. Атам у перакладзе з грэч. α томо (атам) азначае «непадзельны». Таму ў рамках гэтых уяўленняў атам не меў ніякай унутранай структуры. Аднак па меры назапашвання эксперыментальных даных стала зразумела, што атам зусім «не просты», паколькі мае свае састаўныя часткі. Якую будову мае атам? Якія мадэлі атама былі прапанаваны фізікамі? У чым іх адрозненні?



Атам гелію мае дадатна зараджанае ядро і два электроны, якія верцяцца вакол яго. Ядро атама гелію (${}^4_2\text{He}$) з’яўляецца α -часціцай.

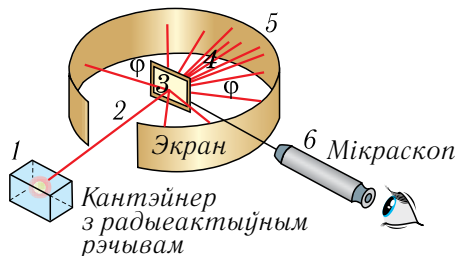
Старажытнагрэчаскі вучоны Дэмакрыт у V ст. да н. э. прыйшоў да ідэі аб існаванні драбнюткіх і непадзельных часціц, якія ён назваў **атамамі**. Праз больш чым 2,4 тыс. гадоў было даказана, што атам мае складаную структуру. Апошнія дзесяцігоддзе XIX ст. адзначылася найбуйнейшымі адкрыццямі ў фізіцы. Практычна адначасова былі адкрыты з’ява натуральнай радыеактыўнасці (А. Бекерэль, 1896 г.) і першая элементарная часціца — электрон (Дж. Дж. Томсан, Э. Віхерт, 1897 г.). Паколькі радыеактыўнае выпраменьванне ўтрымлівала дадатна і адмоўна зараджаныя часціцы, то натуральна было выказаць здагадку, што такія часціцы



Мал. 186. Мадэль атама Томсана:

1 — дадатна зараджаны шар;

2 — электроны

Мал. 187. Схема эксперыментальнай устаноўкі Рэзерфарда па рассеянні α -часціц:1 — крыніца α -часціц; 2 — α -часціцы;

3 — залатая фольга; 4 — рассеяныя

 α -часціцы; 5 — сцынтыляцыйны экран;

6 — мікраскоп

ўваходзяць у састаў атамаў. А з адкрыццём электрона стала ясна, што менавіта электроны ўваходзяць у састаў атама.

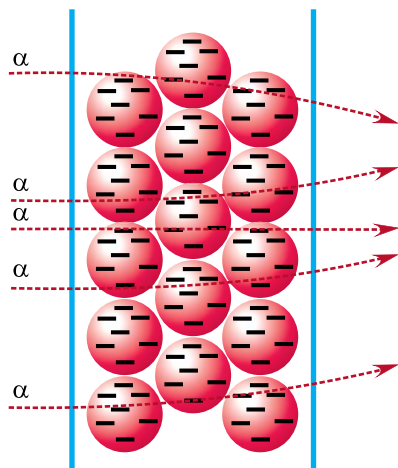
На пачатку XX ст. шырокае распаўсюджанне атрымала «пудынгавая» мадэль атама англійскага фізіка Джозефа Джона Томсана. Паводле гэтай мадэлі дадатны зарад раўнамерна размеркаваны па ўсім аб'ёме атама ў выглядзе нейкай аднароднай масы, якую Томсан назваў «сферай аднароднай дадатнай электрызацыі». Паколькі атам электрычна нейтральны, то электроны «плаваюць» у гэтым дадатна зараджаным асяроддзі (як разыначкі ў пудынгу) і цалкам кампенсуюць яго дадатны электрычны зарад (мал. 186).

Для праверкі справядлівасці гэтай мадэлі атама англійскі фізік Эрнэст Рэзерфард з супрацоўнікамі ў 1911 г. правёў эксперыменты, вынікі якіх супярэчылі мадэлі атама Томсана.

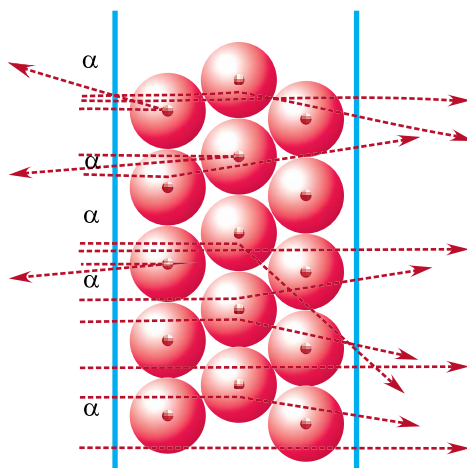
Пучок α -часціц накіроўваўся на тонкую залатую фольгу таўшчынёй каля 400 нм (мал. 187), што адпавядала прыкладна 1600 слаям атамаў.

Светлавая ўспышкі ад часціц, якія прайшлі праз фольгу, рэгістраваліся на экране, пакрытым спецыяльным рэчывам, з дапамогай мікраскопа.

Зыходзячы з мадэлі атама Томсана з прычыны раўнамернага размеркавання зараду па ўсім аб'ёме атама чакалася, што пры сутыкненні α -часціц з атамамі яны лёгка пройдуць праз фольгу і будуць мала адхіляцца ад прамалінейнай траекторыі (рассейвацца). Пры гэтым



Мал. 188. Меркаванае рассяйванне α -часціц атамамі золата паводле мадэлі Томсана



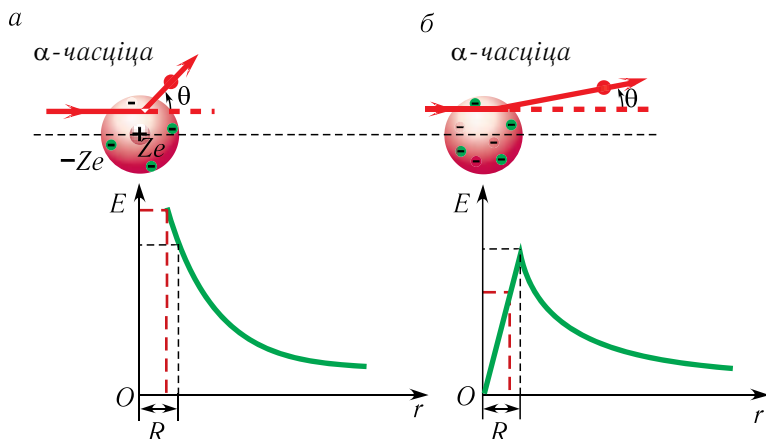
Мал. 189. Назіраемае рассяйванне α -часціц у доследах Рэзерфарда

карціна іх рассяйвання павінна была быць прыкладна такой, як на малюнку 188.

Аднак атрыманыя вынікі эксперыментаў зусім не адпавядалі вынікам разлікаў Рэзерфарда. У эксперыментах значная частка α -часціц сапраўды адхілялася ад напрамку свайго пачатковага руху на малыя вуглы θ (ад нуля да 4° — 6°). Але былі і такія часціцы, якія рассяйваліся на вуглы, большыя за 90° (мал. 189), або нават вярталіся назад. Як пісаў Рэзерфард: «Гэта было амаль гэтак жа непраўдападобна, як калі б вы зрабілі стрэл па кавалачку папярснай паперы 15-цалевым снарадам, а ён вярнуўся б назад і патрапіў у вас».

Прыкладна адна з 20 000 α -часціц мела адхіленне на вугал, большы за 90° , адна з 40 000 — на вугал, большы за 120° , а адна з 70 000 — на вугал, большы за 150° .

Вынікі эксперыментаў сведчылі, што ўнутры атама ёсць вельмі моцнае электрычнае поле, якое ствараецца дадатным зарадам, канцэнтраваным у вельмі малым аб'ёме. Рэзерфард прапанаваў для гэтага зараду тэрмін «ядро». Памер ядра малы, але ў ім засяроджана практычна ўся маса атама. Пры набліжэнні дадатна зараджанай α -часціцы да ядра, у адпаведнасці з законам Кулона, узнікае вялікая сіла адштурхвання, якая істотна змяняе траекторыю α -часціц (мал. 190, а).



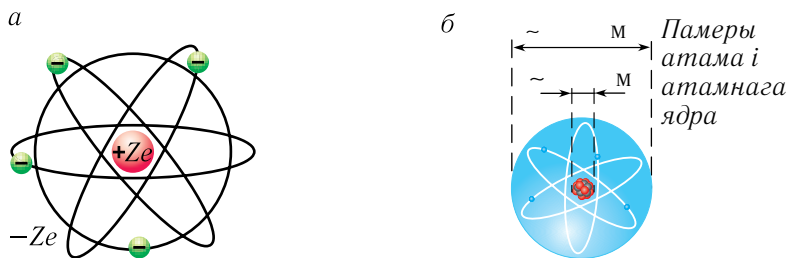
Мал. 190. Мадэлі атама і залежнасці модуля напружанасці электрычнага поля ад адлегласці: *а* — ядзерная мадэль; *б* — мадэль атама Томсана

У мадэлі атама Томсана электрычнае поле адпавядае электрычнаму полю раўнамерна зараджанага па аб'ёме шара (мал. 190, *б*), і пры набліжэнні да цэнтра атама модуль яго напружанасці імкнецца да нуля. Такім чынам, у гэтым выпадку не было б α -часціц, рассеяных на вялікія вуглы.

На падставе аналізу вынікаў праведзеных эксперыментаў Рэзерфард у 1911 г. прапанаваў **ядзерную мадэль** атама (мал. 191, *а, б*), асноўныя палажэнні якой наступныя:

1) у цэнтры атама размешчана ядро памерам $d \leq 10^{-14}$ м, яго зарад $q = +Ze$, дзе Z — парадкавы нумар элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева (мал. 191, *а*);

2) амаль уся маса атама (99,96 %) засяроджана ў дадатна зараджаным ядры (мал. 191, *б*);



Мал. 191. Мадэль атама Рэзерфарда (ядзерная мадэль атама)

3) ядро абкружаюць Z рухомах электронаў, якія ўтвараюць электронную абалонку атама. Сумарны зарад электронаў $q = Z(-e)$, таму атам у цэлым электрычна нейтральны.

Падкрэслім, што электроны не могуць знаходзіцца ў спакоі ўнутры атама, паколькі ў гэтым выпадку пад дзеяннем сіл прыцягнення Кулона да ядра яны зваліліся б на яго. Адгэтуль вынікае, што электроны верцяцца вакол ядра па пэўных арбітах.

Мадэль атама Рэзерфарда называюць таксама планетарнай, паколькі яна нагадвае нашу Сонечную сістэму, у якой планеты верцяцца па вызначаных арбітах вакол масіўнага цэнтра — Сонца.

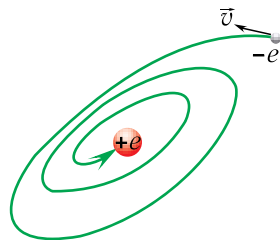
Прагрэсіўнасць ядзернай мадэлі атама заключалася ў тым, што на яе падставе былі растлумачаны эксперыментальныя даныя, атрыманыя пры вывучэнні рассеявання α -часціц. Аднак далейшы аналіз паказаў, што яна супярэчыла законам класічнай механікі і электрадынамікі, паколькі не дазваляла растлумачыць факт стабільнасці існавання атама.

Сапраўды, па-першае, у адпаведнасці з законам класічнай электрадынамікі Максвела пры паскораным руху электронаў па арбітах яны павінны бесперапынна выпраменьваць электрамагнітныя хвалі, частата якіх павінна быць роўна частаце абарачэння электронаў вакол ядра.

Па-другое, пры выпраменьванні электроны павінны былі губляць энергію і «зваліцца» на ядро за прамежак часу парадку 10^{-13} с (мал. 192). У такім разе атамы павінны былі быць няўстойлівымі і мець вельмі кароткі час жыцця.

Па-трэцяе, частата абарачэння электрона вакол ядра (па меры набліжэння да ядра) павінна была змяняцца плаўна, бесперапынна, паколькі частата выпраменьвання заўсёды роўна частаце ваганняў крыніцы. Аднак у праведзеных эксперыментах назіралася скачкападобнае змяненне частаты выпраменьвання, г. зн. набор асобных спектральных ліній, падзеленых цёмнымі прамежкамі.

Такім чынам, тлумачэнне будовы і ўласцівасцей атама на падставе механікі Ньютана і электрадынамікі Максвела не з'яўлялася поўным, паколькі часткова прыводзіла да супярэчнасцей з эксперыментам.



Мал. 192. Траекторыя «падзення» электрона на ядро атама вадароду

► Назваць найменшы адмоўны зарад электронам прапанаваў у 1891 г. брытанскі фізік Джордж Джонстан Стоні, а ў 1897 г. ірландскі фізік Джордж Фрэнсіс Фіцджэральд прапанаваў выкарыстоўваць гэты тэрмін у якасці назвы самой часціцы.

Мадэль атама Рэзерфарда з выявай электронных арбіт стала папулярнай эмблемай XX ст. Так, на малюнку 193 паказана эмблема фізічнага факультэта Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта.



Мал. 193. Эмблема фізічнага факультэта БДУ



1. Растлумачце сутнасць мадэлі атама Томсана.
2. Растлумачце схему эксперыменту Рэзерфарда па рассеянні α -часціц.
3. Чаму фольга ў эксперыментах Рэзерфарда павінна быць найтанчэйшай?
4. Растлумачце прычыну рассеявання α -часціц атамамі рэчыва.
5. Сфармулюйце асноўныя палажэнні ядзернай мадэлі атама.
6. Пакажыце схематычна відарыс ядзернай мадэлі атама.
7. Чаму ядзерную мадэль атама называюць таксама планетарнай? Якія элементы мадэлі з'яўляюцца аналагамі планет?
8. Якія супярэчнасці ўзнікаюць пры тлумачэнні працэсаў выпраменьвання энергіі атамамі на падставе класічнай механікі і электрадынамікі пры выкарыстанні ядзернай мадэлі атама?
9. Вызначыце поўны зарад усіх электронаў у атаме:
а) вугляроду; б) кіслароду; в) жалеза.
10. Вызначыце хімічны элемент, поўны зарад ядра атама якога роўны:
а) $q = 4,80 \cdot 10^{-19}$ Кл; б) $q = 9,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; в) $q = 15,2 \cdot 10^{-19}$ Кл.

§ 31. Квантавыя пастулаты Бора

Доўгі час атам лічыўся драбнюткай непадзельнай часціцай рэчыва, якая з'яўляецца носьбітам яго фізічных уласцівасцей. Аднак адкрыццё радыеактывнасці і першай элементарнай часціцы (электрона) паставіла пад сумненне факт яго непадзельнасці. Чаму атам устойлівы? Якія фізічныя працэсы адбываюцца ў атамах? Як атам выпраменьвае святло?

Для пераадолення супярэчнасцей, якія ўзнікаюць пры апісанні будовы атама на падставе законаў класічнай механікі і электрадынамікі з эксперыментальнымі данымі, дацкі фізік Нільс Бор у 1913 г. у працы

«Аб будове атамаў і малекул» прапанаваў квантавую мадэль атама, заснаваную на двух пастулатах. У сучасным выглядзе яны фармулююцца наступным чынам:

I пастулат Бора (пастулат стацыянарных станаў):

атам можа знаходзіцца ў асобных стацыянарных (квантавых) станах, кожнаму з якіх адпавядае пэўная энергія. У стацыянарным стане атам не выпраменьвае.

Стацыянарныя станы можна пранумараваць, прысвоіўшы ім парадкавыя нумары $n = 1, 2, 3, \dots$, прычым кожнаму стану адпавядае пэўнае дыскрэтнае значэнне энергіі E_n .

Паводле мадэлі Бора стацыянарным станам атама адпавядаюць пэўныя (дазволеныя) арбіты, па якіх электроны рухаюцца вакол ядра. Бор для прастаты меркаваў, што гэтыя арбіты ўяўляюць сабой акружнасці, хоць у агульным выпадку арбіты могуць мець форму эліпса, прычым ядро размяшчаецца ў адным з яго фокусаў (мал. 194).

Першы пастулат супярэчыць як законам класічнай механікі (энергія электронаў, якія рухаюцца, можа быць любой), так і законам класічнай электрадынамікі (электроны, якія рухаюцца паскорана, заўсёды выпраменьваюць электрамагнітныя хвалі).

II пастулат Бора (правіла частот):

атам можа пераходзіць з аднаго стацыянарнага стану ў іншы. Пры гэтым пераходзе можа выпускацца ці паглынацца квант электрамагнітнай энергіі, частата якога вызначаецца рознасцю энергій атама ў дадзеных станах:

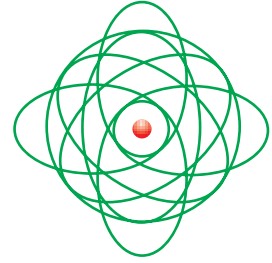
$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},$$

(1)

дзе ν_{kn} — частата паглынутага ці выпушчанага кванта выпраменьвання, E_k, E_n — энергія атама ў k -м і n -м стацыянарным стане, h — пастаянная Планка.

Калі $E_k > E_n$, то пры пераходзе адбываецца выпраменьванне энергіі, калі $E_k < E_n$, то — яе паглынне.

Стан атама, якому адпавядае найменшая энергія, называецца **асноўным**, а станы, якім адпавядаюць вялікія значэнні энергіі, — **узбуджанымі**.



Мал. 194. Электронныя арбіты ў атаме па тэорыі Бора — Зомерфельда

У асноўным энергетычным стане атам можа знаходзіцца неабмежавана доўга, а ў астатніх стацыянарных станах $\sim 10^{-8}$ с. Гэта так званы *час жыцця атама* ва ўзбуджаным стане.

Як вынікае з II пастулата Бора, частата выпраменьвання атама не звязана з частатой абарачэння электрона па арбіце, яна вызначаецца рознасцю значэнняў энергіі атама E_k і E_n у пачатковым і канечным станах. Пераход атама з аднаго стацыянарнага стану ў іншы суправаджаецца электрамагнітным выпраменьваннем з даўжынёй хвалі

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \quad (2)$$

Такім чынам, першы пастулат Бора дазволіў растлумачыць дыскрэтнасць значэнняў энергіі атама, а першы і другі пастулаты — лінейчастую структуру атамных спектраў.

Бор прапанаваў таксама колькасную ўмову *квантавання* для знаходжання радыусаў стацыянарных (дазволеных) кругавых арбіт электронаў:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (3)$$

дзе $n = 1, 2, 3, \dots$, — нумар арбіты, m_e — маса электрона, v_n — модуль скорасці электрона на n -й арбіце, r — радыус n -й арбіты, h — пастаянная Планка.

Такім чынам, пастулаты Бора грунтаваліся на трох эксперыментальных перадумовах — выніках даследавання атамных спектраў, квантавай тэорыі выпраменьвання, развітай Планкам і Эйнштэйнам, і ядзернай (планетарнай) мадэлі атама Рэзерфарда.

Зыходзячы з пастулатаў Бора і ўмовы квантавання арбіт, можна растлумачыць структуру энергетычных узроўняў найпрасцейшага атама — атама вадароду, які складаецца з ядра (пратона) і аднаго электрона, што верціцца вакол яго.



Бор атрымаў выраз для энергіі атама вадароду:

$$E_n = -R \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3). \quad (4)$$

Таму энергія атама вадароду (4) фактычна вызначаецца толькі нумарам арбіты n электрона, паколькі велічыня $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3}$ з'яўляецца пастаяннай, у выніку таго што выражаецца праз фундаментальныя

пастаянныя (зарад электрона e , масу электрона m_e , пастаянную Планка h , электрычную пастаянную ϵ_0).

Згодна з формулай (4) энергія атама вадароду ў *асноўным стане* ($n = 1$) атрымліваецца роўнай $E_1 = -13,6$ эВ, а яго энергія ў *іанізаваным стане*, калі электрон бясконца далёкі ад ядра ($n = \infty$), роўнай $E_\infty = 0$ эВ.

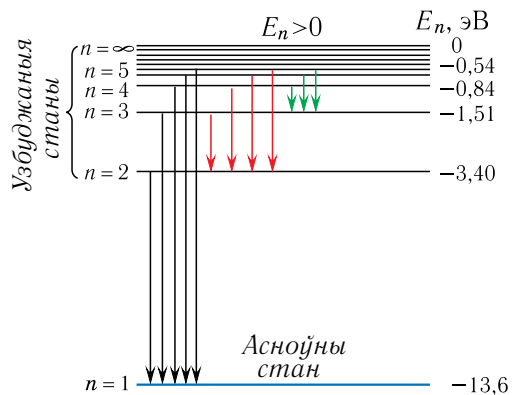
У другім стане ($n = 2$) энергія $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,40$ эВ, у трэцім ($n = 3$) — $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,51$ эВ і г. д. Энергію атама вадароду ў любым стане можна разлічыць па формуле:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (5)$$

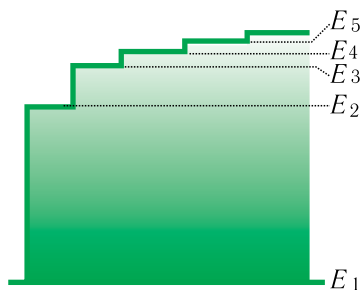
Паколькі энергія атама вадароду можа прымаць толькі дыскрэтны набор значэнняў, то гавораць, што яна **квантаваная**.

Для нагляднага паказу стацыянарных энергетычных станаў атама выкарыстоўваецца **энергетычная дыяграма** (мал. 195). Графічна магчымыя значэнні энергіі атама паказваюць у выглядзе схемы ўзроўняў энергіі (**энергетычных узроўняў**) — гарызантальных прамых, праведзеных на адлегласцях у пэўным маштабе, які адпавядае рознасцям дазволенага значэнняў энергіі. Пераходы атама з аднаго стану ў іншы паказваюцца на дыяграме вертыкальнымі лініямі паміж адпаведнымі ўзроўнямі. Напрамак пераходу абазначаецца стрэлкамі.

Энергетычную дыяграму можна лічыць своеасаблівай «лесвіцай» з «ніжняй пляцоўкай» (асноўным станам) і «прыступкамі», што ўзнімаюцца ўгару (узбуджанымі станамі). Формула для энергетычных узроўняў энергіі E_n атама паказвае важную заканамернасць: чым вышэй паднімаецца над асноўным (першым) узроўнем энергетычная «лесвіца», тым менш «стромкімі» становяцца яе прыступкі (на малюнку 196 гэта добра бачна пры $n > 4$).



Мал. 195. Энергетычная дыяграма стацыянарных станаў атама вадароду



Мал. 196. Энергетычная «лесвіца» станаў атама вадароду

Такім чынам, чым далей электрон ад ядра ($n \rightarrow \infty$), тым на меншую велічыню адрозніваюцца суседнія ўзроўні энергіі, г. зн. густата энергетычных узроўняў расце. Квантавыя скачкі пры гэтым памяншаюцца, з прычыны чаго пераходы паміж стацыянарнымі станамі атама ўсё больш і больш становяцца «падобнымі» на бесперапыннае змяненне энергіі. Энергетычная «лесвіца» паступова ператвараецца ў пакаты «плаўны ўздым» (гл. мал. 196), г. зн. энергія становіцца велічынёй, якая амаль бесперапынна змяняецца, як гэта і было ў класічнай тэорыі.

Працэс выдалення электрона з атама называецца **іанізацыяй**. Для выдалення электрона з атама вадароду, які знаходзіцца ў асноўным стане, атаму неабходна надаць энергію $E_i = E_\infty - E_1 = 13,6$ эВ. Таму гэту энергію E_i называюць *энергіяй іанізацыі* атама вадароду. Такім чынам, **энергія іанізацыі** роўна рабоце, якую неабходна выканаць знешнім сілам для выдалення электрона на «бяскончую» адлегласць з атама, які знаходзіцца ў асноўным стане. Тут пад «бяскончасцю» разумеецца такая адлегласць, пры якой узаемадзеянне электрона і ядра можна не ўлічваць.

Адзначым, што вышэй узроўню $n = \infty$ (пры $E > 0$) электрон з'яўляецца свабодным і можа мець любую энергію.

Энергія

$$E_{\text{св}} = E_1 - E_\infty = -13,6 \text{ эВ}$$

называецца **энергіяй сувязі** электрона ў атаме вадароду.

Энергія сувязі вызначаецца электрамагнітным узаемадзеяннем часціц і з'яўляецца *адмоўнай велічынёй*, з прычыны таго, што пры ўтварэнні атама энергія вылучаецца. Абсалютнае значэнне энергіі сувязі характарызуе *трываласць сувязі* і *ўстойлівасць* атама.

Энергія сувязі па абсалютнай велічыні роўна энергіі іанізацыі электрона ў атаме:

$$E_i = E_{\text{св}}.$$



► Іанізацыя складаных атамаў можа быць аднакратнай (атам губляе адзін электрон), двухкратнай (два электроны) і г. д.

Паколькі пры ўзбуджэнні атама радыус арбіты электрона нарастае, то выпусканне выпраменьвання атамам адбываецца пры пераходах электронаў у атаме са знешніх арбіт на ўнутраныя (мал. 197).

Мадэль атама Бора дазваляе апісаць не толькі атам вадароду, але і іанізаваныя атамы (іоны) іншых элементаў, вакол ядзер якіх, як і ў атаме вадароду, рухаецца толькі адзін электрон. Такія іоны называюцца *вадародападобнымі*. Прыкладамі такіх іонаў з'яўляюцца аднакратна іанізаваны атам гелію (He^+), двухкратна іанізаваны атам літыю (Li^{++}) і г. д.

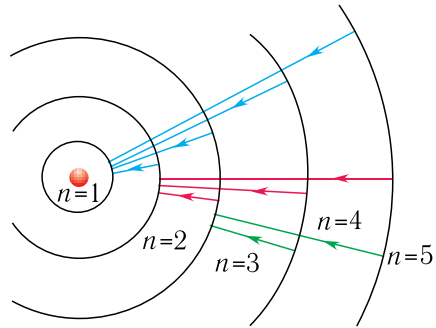
Неабходна адзначыць, што энергія атама можа змяняцца не толькі пры выпусканні ці паглыннанні энергіі, але і пры сутыкненні атамаў. Пры няпругкім сутыкненні змяняецца ўнутраная энергія атамаў, якія сутыкаюцца, і электроны ў іх пераходзяць на іншыя ўзроўні энергіі.

Такім чынам, з дапамогай мадэлі атама Бора атрымалася:

па-першае, вылічыць энергію іанізацыі атама вадароду, якая добра ўзгадняецца з эксперыментам. Як тэорыя, так і эксперымент далі значэнне $E_i = 13,6$ эВ;

па-другое, значна прасунуцца ў тлумачэнні заканамернасцей перыядычнай сістэмы хімічных элементаў Мендзялеева. Паводле мадэлі атама Бора электроны рухаюцца па пэўных арбітах, якія ўтвараюць розныя групы — электронныя абалонкі. Структура электронных абалонак абумоўлівае хімічныя ўласцівасці элементаў, якія перыядычна паўтараюцца па меры запаўнення абалонак электронамі. Гэта дазволіла «прадказваць» уласцівасці невядомых элементаў; так, напрыклад, быў адкрыты элемент з парадкавым нумарам $Z = 72$ — гафній, па сваіх уласцівасцях аналагічны цырконию ($Z = 40$).

Мадэль атама Бора растлумачыла асноўныя заканамернасці спектра атама вадароду, хоць часткова захавала класічны характар, паколькі ў ёй меркавалася, што электроны рухаюцца па арбітах вакол ядра. Аднак на аснове дадзенай мадэлі не атрымалася пабудаваць тэорыю больш складаных атамаў, напрыклад растлумачыць спектр выпраменьвання атама гелію, які ідзе за вадародам і змяшчае ўсяго два электроны. Аднак, не магло быць і гаворкі аб тлумачэнні на падставе дадзенай мадэлі бу-



Мал. 197. Пераходы электронаў у атаме пры выпусканні выпраменьвання

довы малекул, паколькі ў іх карціна руху і ўзаемадзеяння электронаў і атамных ядзер намнога больш складаная, чым у атамах.

Тэорыя атама Бора з'явілася вельмі важным этапам на шляху стварэння паслядоўнай тэорыі мікраскапічных з'яў — квантавай механікі.

▶ Планеты Сонечнай сістэмы таксама рухаюцца па эліпсах, у адным з фокусаў якіх знаходзіцца Сонца. Гэта акалічнасць робіць аналогію паміж ядзернай мадэллю атама (гл. мал. 194) і Сонечнай сістэмай яшчэ больш цеснай.

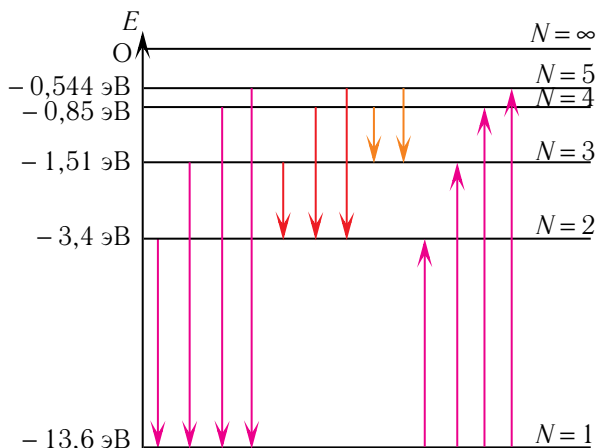
У 1922 г. Нільсу Бору была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы «за заслугі ў даследаванні будовы атамаў і выпускаемага імі выпраменьвання».



1. Што прапанаваў Бор для тлумачэння стабільнасці атама?
2. Сфармулюйце першы пастулат Бора — пастулат стацыянарных станаў.
3. Сфармулюйце і запішыце правіла частот — другі пастулат Бора.
4. Запішыце ўмову квантавання стацыянарных кругавых арбіт электронаў.
5. Чым адрозніваецца атам, які знаходзіцца ў асноўным стане, ад атама, які знаходзіцца ва ўзбуджаным стане?
6. Куды «знікае» энергія пры пераходзе электрона са стану з большай энергіяй у стан з меншай энергіяй?
7. Ці нерухомы электрон у асноўным стане атама вадароду ў мадэлі Бора?
8. Якая сіла ўтрымлівае электроны на арбітах у ядзернай мадэлі атама?
9. Чаму пры наяўнасці ў атаме вадароду ўсяго аднаго электрона ў спектры атама вадароду назіраецца шмат ліній?

Практыкаванне 20

1. Колькі розных квантаў святла N можа выпусціць узбуджаны атам вадароду, калі ён знаходзіцца на чацвёртым энергетычным узроўні?
2. Атам вадароду перайшоў з чацвёртага энергетычнага ўзроўню ($n = 4$) на другі ($k = 2$). Як пры гэтым змянілася энергія атама?
3. Вызначыце, зыходзячы з прадстаўленай энергетычнай дыяграмы (мал. 198), які з пераходаў адпавядае:
 - а) выпраменьванню фатона максімальнай энергіі;
 - б) паглыннанню фатона максімальнай энергіі.



Мал. 198. Энергетычная дыяграма

4. Вызначыце змяненне энергіі электрона ў атаме вадароду, калі атам выпраменьвае фатон, даўжыня хвалі якога $\lambda = 486$ нм.
5. Вызначыце мінімальную энергію, якую неабходна надаць электрону, што знаходзіцца ў асноўным стане ў атаме вадароду, каб яго спектр выпраменьвання змяшчаў толькі тры спектральныя лініі.
6. Вызначыце даўжыню хвалі выпраменьвання, якое можа выклікаць іанізацыю атама: а) літэю ($E_i = 5,4$ эВ); б) серабра ($E_i = 7,6$ эВ); в) калію ($E_i = 4,3$ эВ).



§ 32. Выпраменьванне і паглыннанне святла атамам. Спектры выпускавання і паглынання

Мадэль атама Бора дазваляе апісаць працэсы выпраменьвання і паглынання святла атамам. Як гэта адбываецца? Як фатон «з'яўляецца на свет»? Што змяняецца ў атаме пасля паглынання фатона?

З прычыны таго што энергія атама квантаваная, яна характарызуецца пэўным наборам энергетычных узроўняў E_n . Выпусканне выпраменьвання адбываецца пры самаадвольным пераходзе атама з вышэйшых энергетычных узроўняў E_k на адзін з ніжэйшых энергетычных узроўняў E_n ($E_k > E_n$). Атам выпраменьвае фатон (квант электрамагнітнай энергіі) з энергіяй $h\nu_{kn} = E_k - E_n$. Частата выпраменьвання пры гэтым:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (1)$$

Падкрэслім, што разам з прамым пераходам атам можа пераходзіць з узбуджанага стану ў асноўны паэтапна, праз прамежкавыя станы. Пры гэтым выпраменьваюцца адпаведныя прамежкавым пераходам кванты святла. Набор такіх частот утварае **лінейчасты спектр выпраменьвання** атама.

Паглыннанне святла — працэс, адваротны выпусканню. Атам, паглынаючы фатон $h\nu_{kn} = E_n - E_k$, пераходзіць з ніжэйшага k стану ў больш высокі n ($E_k < E_n$) стан. Частата паглынутага фатона:

$$\nu_{kn} = \frac{E_n - E_k}{h}. \quad (2)$$

Падобныя пераходы даюць **лінейчасты спектр паглынання** атама.

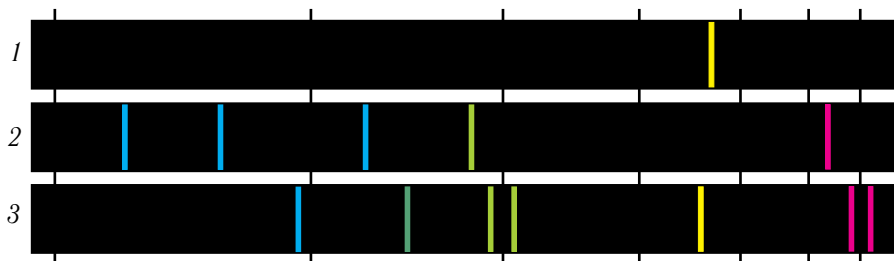
Падкрэслім, што частоты пераходаў з выпусканнем і паглыннаннем, якія адбываюцца паміж аднымі і тымі ж энергетычнымі ўзроўнямі, супадаюць.

Такім чынам, спектры атамаў дазваляюць вызначаць змяненні энергіі атама пры выпусканні ці паглыннанні выпраменьвання.

Спектры, атрыманыя ад цел, што самі свецяцца, называюцца **спектрамі выпускання**. Яны бываюць трох тыпаў: *лінейчастыя*, *паласатыя* і *суцэльныя*.

Лінейчастыя спектры маюць усе рэчывы ў газападобным атамарным стане. Звычайна (напрыклад, пры звычайных умовах) атамы газу знаходзяцца ў асноўным стане і не выпраменьваюць святло. Калі такі газ награвяецца, некаторыя атамы пераходзяць на больш высокія энергетычныя ўзроўні. Менавіта гэтыя атамы пры пераходзе ў ніжэйшыя энергетычныя станы і выпускаюць фатоны. У выніку атамарныя спектры складаюцца з асобных вузкіх ліній рознага колеру, падзеленых цёмнымі прамежкамі (мал. 199).

Вывучэнне лінейчастых спектраў паказала, што кожны хімічны элемент мае свой строга індывідуальны спектр. Такія спектры адрозніваюць



Мал. 199. Лінейчастыя спектры выпускання: 1 — натрыю; 2 — вадароду; 3 — гелію



Мал. 200. Паласатыя спектры выпускавання вугальнай дугі (1) і малекул ёду (2)

ца адзін ад аднаго колерам асобных ліній, што сведчаць, іх становішчам і колькасцю.

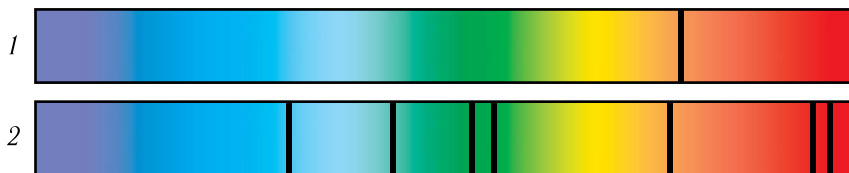
Паласатыя спектры маюць газы, якія складаюцца з малекул. Для тлумачэння малекулярных спектраў неабходна прымаць да ўвагі вялікую складанасць структуры малекул. У такіх спектрах, у адрозненне ад атамных спектраў, сукупнасці цесна размешчаных спектральных ліній утвараюць палосы, падзеленыя цёмнымі прамежкамі (мал. 200). Спектры малекул можна выкарыстоўваць для ідэнтыфікацыі малекул і іх структуры.

Неперарыўныя (суцэльныя) спектры маюць нагрэтыя целы, якія знаходзяцца ў цвёрдым і вадкім стане, а таксама газы пры высокім ціску і плазма. З прычыны інтэнсіўнага ўзаемадзеяння паміж малекуламі індывідуальныя рысы, уласцівыя асобным часціцам, у такіх спектрах нераспазнавальныя. У іх прадстаўлены ўсе даўжыні хваль, няма цёмных прамежкаў і на экране бачна суцэльная рознакаляровая паласа (мал. 201).

Празрыстыя рэчывы паглынаюць частку падаючага на іх выпраменьвання, і ў спектры, атрыманым пасля праходжання белага святла праз такія рэчывы, з'яўляюцца цёмныя лініі, ці палосы паглынання. Такі спектр называецца **спектрам паглынання** (мал. 202).



Мал. 201. Суцэльны спектр выпраменьвання Сонца



Мал. 202. Спектры паглынання розных рэчываў: 1 — натрыю; 2 — гелію

Так, рэчыва ў газападобным стане паглынае найбольш моцна святло тых даўжынь хваль, якія яно выпускае ў нагрэтым стане.

Гэта азначае, што цёмныя лініі ў спектры паглынання будуць знаходзіцца як раз у тых месцах, дзе знаходзяцца лініі, якія свецяцца, у спектры выпускавання дадзенага хімічнага элемента. Гэтыя строга вызначаныя заканамернасці ў лінейчастых спектрах даюць магчымасць выявіць тыя ці іншыя элементы ў дадзеным рэчыве.

Для вызначэння якаснага і колькаснага саставу рэчыва выкарыстоўваецца метада, заснаваны на атрыманні і даследаванні яго спектраў. Гэты метада называецца *спектральным аналізам*. Гэта самы хуткі і просты спосаб вызначэння саставу розных хімічных злучэнняў.

► Спектр паглынання атама вадароду пры нармальных умовах змяшчае толькі адну серыю ліній, частоты якіх знаходзяцца ў ультрафіялетавым абсягу.

Найбольш вывучаным спектрам паглынання з'яўляецца спектр Сонца. Яго суцэльны спектр змяшчае вялікую колькасць чорных ліній. Гэтыя лініі з'яўляюцца лініямі паглынання, якія ўзнікаюць пры праходжанні святла праз газавую абалонку Сонца і атмасферу Зямлі. Яны атрымалі назву *фраўнгоферавых ліній*, паколькі *Фраўнгофер* упершыню назіраў спектр Сонца і выявіў, што заканамернасць размяшчэння ліній невыпадковая і лініі паглынання (цёмныя лініі) з'яўляюцца заўсёды толькі на пэўных месцах.

Заснавальнікі спектральнага аналізу нямецкія фізікі *Роберт Бунзен* і *Густаў Кірхгоф*, даследуючы спектры пароў злучэнняў шчолачных металаў літыю, натрыю і калію, выявілі новыя элементы — рубідый і цэзій, названыя так па колеры найбольш яркіх ліній у іх спектрах. У рубідыю — чырвоная лінія, у цэзію — сіняя.

Спектральны аналіз грунтуецца на двух асноўных палажэннях:

- 1) кожны хімічны элемент ці хімічнае злучэнне характарызуецца пэўным спектрам;
- 2) інтэнсіўнасць ліній і палос у спектры залежыць ад канцэнтрацыі таго ці іншага элемента ў рэчыве.

Да добрых якасцей спектральнага аналізу даследавання можна аднесці: высокую адчувальнасць (выяўляе элементы з адноснай канцэнтрацыяй 10^{-7} — 10^{-8} , г. зн. адзін атам рэчыва на сто мільёнаў іншых атамаў); малы час вымярэння;

малыя колькасці даследуемага рэчыва (дастаткова 10^{-2} — 10^{-3} г і нават да 10^{-5} — 10^{-6} г) аж да магчымасці дэтэктавання асобных малекул; дыстанцыйнасць вымярэнняў (можна праводзіць даследаванні, напрыклад, саставу атмасферы далёкіх планет).

► Па спектрах вызначаюць, з якіх хімічных элементаў складаецца рэчыва і ў якіх колькасцях.

Беларускі фізік акадэмік Міхаіл Аляксандравіч Ельяшэвіч распрацаваў асновы тэорыі ваганняў шмататамных малекул і іх вагальных спектраў. Ён зрабіў значны ўклад у тэорыю спектраў рэдказемельных элементаў і нізкатэмпературнай плазмы.



1. Што называюць спектрам? Якія віды спектраў вы ведаеце?
2. Якія віды спектраў выпраменьвання вы ведаеце?
3. Што называюць спектрам паглынання?



§ 33. Спонтаннае і індукцыраванае выпраменьванне

■ Як аказалася, заканамернасці выпраменьвання святла атамамі вызначаюцца не толькі «самім» атамам, але і знешнімі ўмовамі, якія могуць паўплываць на дадзены працэс. Якія віды выпраменьвання існуюць? У чым іх падабенства і ў чым адрозненні? Дзе іх можна выкарыстоўваць практычна?



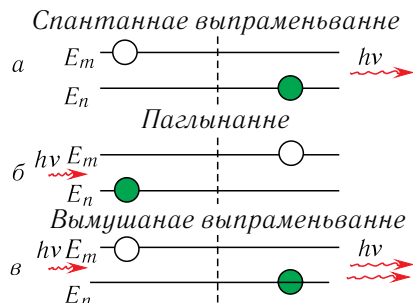
Выпраменьванне, якое адбываецца з нязменнай частатой, называецца **моначраматычным**.

Нагадаем, што атам можа знаходзіцца ў адным са стацыянарных станаў, энергія якіх квантаваная, г. зн. мае дыскрэтны шэраг значэнняў $E_1, E_2, \dots, E_n$. Адпаведна, пры пераходах паміж гэтымі станамі атам выпраменьвае ці паглынае кванты энергіі электрамагнітнага поля. Існуюць два віды пераходаў: **спонтанныя** і **вымушаныя**.

Калі атам, які знаходзіцца ва ўзбуджаным стане на верхнім энергетычным узроўні E_m , пераходзіць на больш нізкі ўзровень E_n самаадвольна без якіх-небудзь знешніх уздзеянняў, то адбываецца так званы **спонтанны пераход** (мал. 203, а). Пры такім пераходзе выпраменьваецца фатон, частата якога вызначаецца суадносінай:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (1)$$

Пераход такога роду з'яўляецца выпадковым (імавернасным) працэсам, які адбываецца ў прынцыпова непрадказаль-



Мал. 203. Пераходы ў атаме

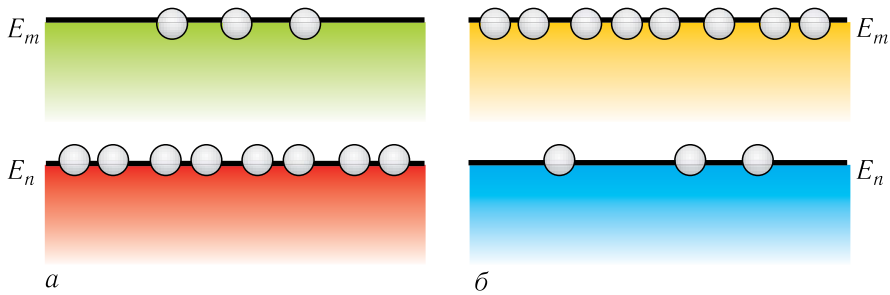
ны момант часу. Такім пераходам адпавядае спонтаннае выпраменьванне. Такія працэсы адбываюцца ў нагрэтых целах і газах, якія свецяцца. Пры награванні ці электрычным разрядзе частка атамаў пераходзіць ва ўзбуджаны стан. Затым яны выпраменьваюць святло, пераходзячы ў асноўны стан.

Выпадковасць спонтаннага пераходаў у атамах і малекулах розных рэчываў азначае тое, што яны адбываюцца не адначасова і незалежна адзін ад аднаго, таму фазы выпраменьваемых пры пераходах электрамагнітных хваль не ўзгоднены. Выпадковым з'яўляецца не толькі момант выпускавання фатонаў, але і напрамак іх распаўсюджвання, а таксама напрамак $\vec{E}$ электрычнага поля і $\vec{B}$ магнітнага поля ў электрамагнітнай хвалі, г. зн. іх палярызацыя. З прычыны гэтага спонтаннае выпраменьванне рэчыва не накіраванае, не кагерэнтнае, а напрамкі вектараў $\vec{E}$ і $\vec{B}$ хаатычна змяняюцца (не палярызаванае). Прыкладам такога выпраменьвання з'яўляецца святло ламп напальвання.

Пераход атама з аднаго стану ў іншы можа адбывацца таксама і *безвыпраменьвальным* шляхам. У гэтым выпадку лішак энергіі вылучаецца ў якой-небудзь іншай форме. Напрыклад, ён можа перайсці ў кінетычную энергію навакольных малекул.

Атам, які знаходзіцца ва ўзбуджаным стане, можа перайсці з верхняга ўзроўню E_m на ніжні E_n не толькі спонтанна, але і пад дзеяннем электрамагнітнага выпраменьвання, частата якога $\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$ супадае з частатой (1) (мал. 203, а). Пераходы, якія адбываюцца пад дзеяннем знешняга электрамагнітнага выпраменьвання, называюцца **індуцыраванымі** або **вымушанымі**. Пры такім пераходзе выпраменьваецца квант энергіі $h\nu_{mn}$, які дадаецца да выпраменьвання, якое выходзіць ад знешняй крыніцы. Адметнай асаблівасцю індукцыраванага выпраменьвання з'яўляецца тое, што выпрамененага фатона і фатона, які індукцыраваў дадзены пераход. Абодва фатоны пры гэтым маюць аднолькавыя частату, фазу, напрамак распаўсюджвання, г. зн. вобразна кажучы, «клануюць» адзін аднаго. Менавіта таму індукцыраванае выпраменьванне набывае ўласцівасць *монахраматычнасці, кагерэнтнасці, накіраванасці*.

Акрамя разгледжанага індукцыраванага пераходу «зверху ўніз», могуць адбывацца і вымушаныя пераходы «знізу ўверх» (мал. 203, б). Калі атам знаходзіцца на ніжнім узроўні E_n , то ён можа перайсці на верхні ўзровень E_m пад дзеяннем знешняга электрамагнітнага выпраменьвання частатой (1). Атам пры гэтым паглынае фатон, энергія якога $h\nu_{mn} = E_m - E_n$.



Мал. 204. Заселенасць энергетычных узроўняў:
а — пры цеплавой раўнавазе; б — інверсная заселенасць

Дыскрэтнасць энергетычнага спектру характэрна не толькі для атамаў, але і для любой сістэмы мікрасасціц, якія ўзаемадзейнічаюць, — малекул, іонаў, цвёрдых цел. Лік атамаў у адзінцы аб'ёму рэчыва, якія знаходзяцца на дадзеным энергетычным узроўні, называюць *заселенасцю* гэтага ўзроўню. У натуральных умовах (ва ўмовах цеплавой раўнавагі) у рэчыве лік атамаў N_m ва ўзбуджаным стане з большай энергіяй E_m меншы, чым лік атамаў N_n у стане з меншай энергіяй E_n , г. зн. пры $E_m > E_n$ заселенасць узроўню E_m меншая, чым узроўню з энергіяй E_n ($N_m < N_n$) (мал. 204, а).

Для ўзмацнення выпраменьвання неабходна штучна змяніць заселенасці ўзроўняў у рэчыве. Разгледзім два энергетычныя ўзроўні атама E_m і E_n . Калі пры падзенні на такое рэчыва электрамагнітнага выпраменьвання частотой ν_{mn} (1) дасягнуты нераўнаважны стан рэчыва, для якога на верхнім энергетычным узроўні знаходзіцца большая колькасць атамаў, чым на ніжнім ($N_m > N_n$), то выпраменьвацца будзе большы лік квантаў, чым паглынацца. У гэтым выпадку будзе адбывацца ўзмацненне падаючага выпраменьвання, і рэчыва будзе дзейнічаць як *узмяцняльнік*.

Стан рэчыва, пры якім для некаторай пары ўзроўняў заселенасць верхняга большая, чым ніжняга, атрымаў назву стану з **інверснай заселенасцю** (мал. 204, б). Працэс стварэння інверснай заселенасці атрымаў назву **напампоўкі**. Рэчыва, у якім ажыццёўлена інверсія заселенасцей, называецца **актыўным**.

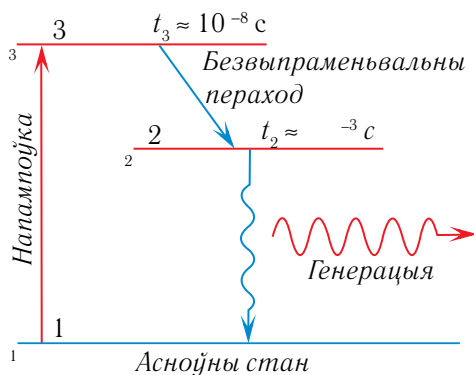
Для таго каб узмяцняльнік ператварыць у генератар, неабходна ўвесці прыдатную «зваротную сувязь». Сэнс зваротнай сувязі заключаецца ў тым, што частка ўзмоцненага выпраменьвання застаецца ў актыўным рэчыве і падвяргаецца паўторнаму кагерэнтнаму ўзмацненню.

З’ява індукцыраванага выпраменьвання дазваляе кіраваць выпраменьваннем атамаў, узмацняць і генерыраваць кагерэнтнае выпраменьванне.

Асноўная цяжкасць у практычным ажыццяўленні дадзенай ідэі — стварэнне інверснай заселенасці. Савецкімі фізікамі Мікалаем Генадзьевічам Басавым і Аляксандрам Міхайлавічам Прохаравым у сярэдзіне 50-х гг. XX ст. быў прапанаваны ўніверсальны метады стварэння інверснай заселенасці пасродкам уздзеяння на малекулы знешняга электрамагнітнага выпраменьвання на рэзананснай частаце. Пасля ён атрымаў назву метаду трох узроўняў.

Рэчыва, у якім ёсць метастабільныя ўзроўні, можна эфектыўна выкарыстоўваць для ўзмацнення святла. Разгледзім, як была рэшана гэта праблема на прыкладзе трохузроўневай сістэмы. Агульны лік узроўняў у рэчыве заўсёды вялікі, але ў ім існуюць тры «працуючыя» энергетычныя ўзроўні, якія дазваляюць стварыць інверсію заселенасцей. У некаторых атамаў ёсць даўгавечныя прамежкавыя ўзбуджаныя станы (іх называюць метастабільнымі), час жыцця ў якіх можа даходзіць да некалькіх секунд, у той час як у звычайных узбуджаных станах час жыцця $\sim 10^{-8}$ с.

У гэтым выпадку, калі напампоўка робіцца на частаце пераходу паміж ніжнім і верхнім узроўнямі, то можна перавесці частку атамаў з асноўнага 1 ва ўзбуджаны стан 3 (мал. 205). За кароткі час (час жыцця парадку 10^{-8} с) большая частка гэтых атамаў самаадвольна прыродзе ў метастабільны даўгавечны ўзбуджаны стан 2 без выпраменьвання. Залішняя энергія перадаецца рэчыву, з прычыны чаго яно награвецца.



Мал. 205. Трэхузроўневая схема генерацыі вымушанага выпраменьвання

Заселенасць прамежкавага (метастабільнага) узроўню, павялічваючыся за кошт спонтаннага пераходаў з верхняга ўзроўню на прамежкавы, можа перавысіць заселенасць ніжняга ўзроўню. Прапусціўшы выпраменьванне з частатой $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ праз гэту сістэму атамаў, якія знаходзяцца ў метастабільным стане, атрымліваем дадаткова да зыходных фатонаў яшчэ і індукцыраванае выпраменьванне фатонаў (гл. мал. 205). У выніку гэтага выніковы паток



фатонаў будзе перавышаць зыходны. Такім чынам, на частаце пераходу з метастабільнага ўзроўню 2 на асноўны ўзровень 1 будзе адбывацца ўзмацненне і генерацыя выпраменьвання.

► Пяняцце індукцыраванага выпраменьвання было ўведзена А. Эйнштэйнам у 1916 г.



1. Што такое спантаннае і індукцыраванае выпраменьванні?
2. Якія характарыстыкі мае спантаннае выпраменьванне?
3. Якія характарыстыкі мае індукцыраванае выпраменьванне?
4. Растлумачце працэс узбуджэння індукцыраванага выпраменьвання.
5. Што такое актыўнае асяроддзе?
6. Які працэс называецца напампоўкай?
7. Растлумачце прыныцы работы трохузроўневай сістэмы генерацыі выпраменьвання.

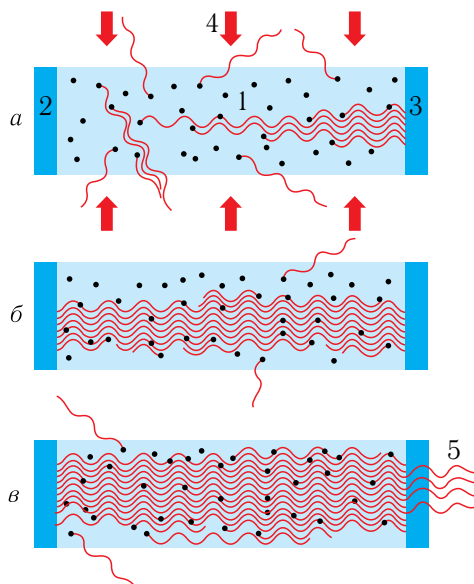
§ 34. Лазеры

■ Звычайныя крыніцы святла (свечка, лампа напальвання), якія атачаюць чалавека ў быце, выпускаюць некагерэнтнае выпраменьванне. А што адбудзецца, калі ўзгадніць (сінхранізаваць) выпраменьванні ўзбуджаных атамаў паміж сабой? Якія новыя ўласцівасці выпраменьвання пры гэтым з'явяцца?

Пры ўзаемадзеянні з актыўным рэчывам (асяроддзем) знешняе выпраменьванне ўзмоцніцца, паколькі да зыходных фатонаў дададуцца індукцыраваныя фатоны з тоеснымі характарыстыкамі. Тоеснасць фатонаў прыводзіць да таго, што пры іх узаемадзеянні з новым узбуджаным атамам атрымліваецца замест 2 ужо 4 фатоны, затым 8, 16 і г. д. Гэта дазваляе выкарыстоўваць вымушанае выпраменьванне для ўзмацнення электрамагнітных хваль і стварэння генератараў монахраматычнага кагерэнтнага выпраменьвання — *лазераў*.

Слова **лазер** з'яўляецца скарачаным запісам англійскай фразы — *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (laser)*, якая перакладаецца так: *ўзмацненне святла шляхам вымушанага выпускання выпраменьвання*.

Разгледзім прыныцыповую схему работы лазера (мал. 206). Для рэалізацыі зваротнай сувязі ў лазеры актыўнае рэчыва 1 размяшчаецца ў *аптычным рэзанатары* (мал. 206, а). Рэзанатар складаецца з двух паралельных плоскіх люстраў, адно з якіх — цалкам адбіваючае («глу-



Мал. 206. Прынцыповая схема лазера на рубіне: 1 — актыўнае асяроддзе; 2 — цалкам адбіваючае люстра; 3 — паўпразрачнае люстра; 4 — напампоўка; 5 — генерыруемае выпраменьванне

хое») 2, другое — паўпразрачнае 3, прызначанае для выхаду выпраменьвання 5 (гл. мал. 206, в) з рэзанатара.

Напампоўка 4 стварае інверсію заселенасцей узроўняў у актыўным асяроддзі. На пачатковай стадыі генерацыі фатоны, спонтанна выпушчаныя атамамі актыўнага асяроддзя, распаўсюджваюцца ў розных напрамках (гл. мал. 206, а, б). Але толькі фатоны, якія распаўсюджваюцца перпендыкулярна да люстраў, шматразова праходзяць праз актыўнае асяроддзе ў выніку адбіцця ад люстраў рэзанатара (гл. мал. 206, в).

Выпрамененая атамамі энергія назапашваецца ў рэзанатары і, уздзеінічаючы на актыўнае асяроддзе, выклікае новыя індукцыраваныя пераходы. Адбываецца лавінападобнае «размнажэнне» фатонаў у рэчыве. Далей пучок монахраматычнага лазернага выпраменьвання выходзіць вонкі праз паўпразрачнае люстра.

► Днём нараджэння лазера лічаць 16 мая 1960 г. Гэта дата стаіць у працоўным сшытку амерыканскага фізіка Т. Н. Мэймана. У створаным ім прыборы ўтрымліваліся ўсе тры неабходныя і дастатковыя кампаненты для атрымання эфекту генерацыі аптычнага кагерэнтнага выпраменьвання.

Асноўнымі характарыстыкамі лазернага выпраменьвання з'яўляюцца кагерэнтнасць, малая разыходнасць (вузкая скіраванасць), монахраматычнасць, магчымасць атрымліваць звышкароткія імпульсы, вялікая магутнасць.

Па тыпе актыўнага асяроддзя лазеры можна падзяліць на газавыя, цвёрдацельныя, паўправадніковыя, вадкасныя, хімічныя, газадынамічныя, а па спосабе напампоўкі — на аптычныя, электрычныя, хімічныя, ядзерныя, газадынамічныя.

Лазеры знаходзяць шырокае ўжыванне ў галаграфіі, перадачы аптычнай інфармацыі, апрацоўцы матэрыялаў (зварка, рэзанне, свідраванне і г. д.), медыцыне, лакацыі, рэкламе.

Пры рабоце з лазерамі неабходна быць уважлівымі і асцярожнымі. Найвялікшую небяспеку лазернае выпраменьванне ўяўляе для вачэй і скуры. Пры пападанні ў вока прамень лазера факусіруецца ў пляму вельмі малых памераў, што можа за доли секунды прывесці да апёкаў сятчаткі вока, частковай ці поўнай незваротнай страты зроку. Прамое, а ў некаторых выпадках і рассеянае выпраменьванне лазераў вялікай магутнасці здольна выклікаць апёкі скуры. Яно ўяўляе таксама пажарную небяспеку.

Знак небяспекі, які папярэджвае аб лазерным выпраменьванні, прыведзены на малюнку 207.



Мал. 207. Знак небяспекі лазернага выпраменьвання

► Беларускі фізік, акадэмік Мікалай Аляксандравіч Барысевіч у 1978 г. адкрыў з'яву «стабілізацыі» электронна-ўзбуджаных шмататамных малекул. Ён упершыню атрымаў генерацыю выпраменьвання шмататамных малекул у газавай фазе. Распрацаваў газавыя і адначастотныя гелій-неонавыя лазеры са значнай выходнай магутнасцю.

У 1957 г. беларускі фізік, акадэмік Барыс Іванавіч Сцяпанаў вывеў універсальную суадносіну паміж спектрамі паглынання і выпускання складаных малекул і паўправаднікоў, якая атрымала назву суадносіны Сцяпанава. Ён сумесна з А. М. Рубінавым і В. А. Мастоўнікавым адкрыў новы клас генеруючых злучэнняў — арганічныя фарбавальнікі.



У 1964 г. Нобелеўская прэмія па фізіцы была прысуджана М. Г. Басаву, А. М. Прохараву і Ч. Таўнсу «за фундаментальныя працы ў галіне квантавай электронікі, якія прывялі да стварэння лазера».



1. Растлумачце прыныцы дзеяння лазера.
2. У чым заключаецца роля метастабільных станаў у генерацыі лазернага выпраменьвання?
3. Для чаго ў лазеры неабходны аптычны рэзанатар?
4. Чым адрозніваецца лазернае выпраменьванне ад выпраменьванняў, ствараемых іншымі крыніцамі святла?
5. Дзе выкарыстоўваюцца лазеры?

САМАЕ ВАЖНАЕ Ё РАЗДЗЕЛЕ 6

Да ліку першых мадэляў атамаў адносяцца мадэль атама Томсана і ядзерная (планетарная) мадэль атама Рэзерфарда.

Пастулаты Бора

I пастулат Бора (пастулат стацыянарных станаў):

атам можа знаходзіцца ў асобых стацыянарных **квантавых** станах, кожнаму з якіх адпавядае пэўная энергія. У стацыянарным стане атам не выпраменьвае.

II пастулат Бора (правіла частот):

атам можа пераходзіць з аднаго стацыянарнага стану ў іншы. Пры гэтым пераходзе можа выпускацца ці паглынацца квант электрамагнітнай энергіі, частата якога вызначаецца рознасцю энергій атама ў дадзеных станах:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},$$

дзе ν_{kn} — частата паглынутага ці выпушчанага кванта выпраменьвання, E_k, E_n — энергія атама ў k -м і n -м стацыянарным стане, h — пастаянная Планка.

Умова квантавання арбіт у атаме:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

дзе $n = 1, 2, 3, \dots$, — нумар арбіты, m_e — маса электрона, v_n — модуль скорасці электрона на n -й арбіце, r — радыус n -й арбіты, h — пастаянная Планка.

Пераходы, якія адбываюцца пад дзеяннем знешняга электрамагнітнага выпраменьвання, называюцца **індуцыраванымі** або **вымушанымі**.



Стан рэчыва, пры якім для некаторай пары ўзроўняў заселенасць верхняга большая, чым ніжняга, атрымаў назву стану з **інверснай заселенасцю**.

Асяроддзе з інверснай заселенасцю ўзроўняў энергіі — **актыўнае асяроддзе**.

Працэс пераводу атамаў з асноўнага стану ва ўзбуджаны называюць **напампоўкай**.

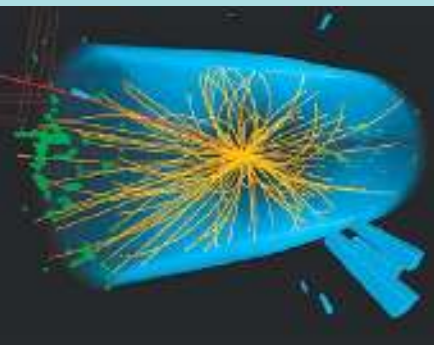
Прынцып работы лазераў заключаецца ў выкарыстанні вымушаных выпраменьваючых пераходаў у сістэмах з інверсіяй заселенасці для генерацыі кагерэнтных светлавых хваль.

Асноўныя характарыстыкі лазернага выпраменьвання: кагерэнтнасць, малая разыходнасць (вузкая накіраванасць), монахраматычнасць, магчымасць атрымліваць звышкароткія імпульсы, вялікая магутнасць выпраменьвання.

Заданні для самастойных даследаванняў

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (Томсан, Бор, Басаў, Прохараў, Таўнс).

2. Падрыхтуйце рэфераты на тэмы: «Прымяненне лазераў: у прамысловасці (зварка, рэзанне, свідраванне), у медыцыне (хірургія, афтальмалогія, тэрапія), галаграфіі, тэрмаядзерным сінтэзе, хіміі, біялогіі, сувязі (кабельнай, тэлевізійнай, тэлефоннай), тэхніцы, лакацыі».



Раздзел 7

Ядзерная фізіка і элементарныя часціцы

§ 35. Пратонна-нейтронная мадэль будовы ядра атама

Вы ўжо ведаеце, што рэчывы складаюцца з драбнюткіх часціц — атамаў, якія ўзаемадзейнічаюць паміж сабой. Вывучаючы будову і ўласцівасці атама, можна ствараць новыя крыніцы энергіі, рэчывы з загадзя зададзенымі ўласцівасцямі, выкарыстоўваць новыя магчымасці ў медыцыне, тэхналогіі вытворчасці. У гэтай сувязі неабходна адказаць на пытанні: якую будову мае атам? Якім заканамернасцям ён падпарадкоўваецца?



У фізіцы за атамную адзінку масы (1 а. а. м.) прымаецца велічыня, роўная $\frac{1}{12}$ масы ізатопа вугляроду $^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а. а. м.} = \frac{1}{12} m_{\text{оc}} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

У эксперыментах Рэзерфарда па вывучэнні рассеявання α -часціц рэчывам было вызначана, што ў цэнтральнай частцы атама, памеры якога $\sim 10^{-10}$ м, знаходзіцца дадатна зараджанае ядро, якое мае памер $\sim (10^{-14} - 10^{-15})$ м, у якім засяроджана 99,96 % ад масы атама (мал. 208).

Для завяршэння пабудовы мадэлі атама неабходна было адказаць на пытанне: ці мае атамнае ядро структуру, і калі мае, то якую?

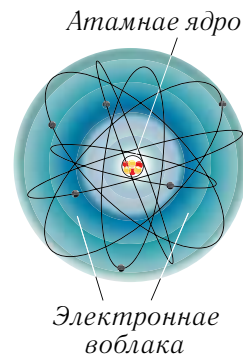
Наяўнасць у ядры дадатна зараджаных часціц — пратонаў — была эксперыментальна даказана Рэзерфардам з яго вучнямі ў 1919 г. Пратон, які

абазначаецца лацінскай літарай p , уяўляе сабой ядро атама вадароду. Ён мае масу $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг і зарад, роўны па абсалютнай велічыні зараду электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

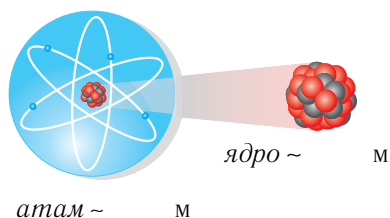
У 1930 г. нямецкія вучоныя Вальтэр Батэ і Ганс Бекер, вывучаючы рэакцыі, якія адбываюцца пры апраменьванні берылію α -часціцамі, выявілі новае выпраменьванне, што валодае вельмі вялікай пранікальнай здольнасцю, першапачаткова названае берыліевымі праменьнямі. У 1932 г. англійскі фізік Джэймс Чэдвік правёў эксперыменты па вывучэнні ўласцівасцей гэтага выпраменьвання і ўстанавіў, што берыліевыя прамені складаюцца з электрычна нейтральных часціц з масай, параўнальнай з масай пратона. Гэтыя часціцы ён назваў *нейтронамі* (ад англ. *neutral* — нейтральны).

Нейтрон — яшчэ адна часціца нароўні з электронам, пратонам і фатоном. Гэта часціца абазначаецца лацінскай літарай n . Яна мае масу $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$ кг, якая амаль супадае з масай пратона, і электрычна нейтральная. З-за адсутнасці электрычнага зараду ў нейтрона ўзаемадзеянне з рэчывам вельмі слабае. З прычыны гэтага нейтрон рухаецца ў рэчыве прамалінейна да таго часу, пакуль не сутыкнецца з якім-небудзь атамным ядром. Пры сутыкненнях з цяжкімі атамамі нейтрон амаль не губляе энергію, як пругкі мячык, які адскоквае ад сцяны. Пры сутыкненні ж з лёгкімі атамамі (вадарод, берылій, вуглярод) нейтрон перадае ім частку сваёй энергіі і пачынае рухацца павольней. Рэчывы, якія змяшчаюць лёгкія атамы, называюць *запавольнікамі нейтронаў*. Найбольш эфектыўнымі запавольнікамі нейтронаў з'яўляюцца рэчывы, якія змяшчаюць вадарод (напрыклад, вада), з прычыны таго, што маса атама вадароду блізкая да масы нейтрона. З часам кінетычная энергія нейтрона становіцца такой жа, як кінетычная энергія цеплавога руху часціц навакольнага асяроддзя. Такія нейтроны, што адносна павольна рухаюцца, называюцца **цеплавымі**.

Нейтроны ўстойлівыя толькі ў складзе стабільных ядзер. Нейтрон у свабодным стане, г. зн. змешчаны па-за ядром, з'яўляецца нестабільнай часціцай. Яго сярэдні час жыцця $t = 886$ с.



Мал. 208. Будова атама



Мал. 209. Будова
і памеры атама і ядра

Пасля адкрыцця нейтронаў у 1932 г. фізікі — савецкі Дзмітрый Дзмітрыевіч Іваненка і нямецкі Вернер Гейзенберг — прапанавалі **протонна-нейтронную мадэль** будовы ядра. Паводле гэтай мадэлі ядро складаецца з часціц двух тыпаў — пратонаў і нейтронаў (мал. 209).

У адпаведнасці з сучаснымі фізічнымі ўяўленнямі пратон і нейтрон з’яўляюцца двума рознымі зарадавымі станамі адной і той жа часціцы — **нуклона** (ад лац. *nucleus* — ядро). У стане без электрычнага зараду ($q = 0$) нуклон з’яўляецца нейтронам, а ў стане з дадатным электрычным зарадам ($q = e$) — пратоном.

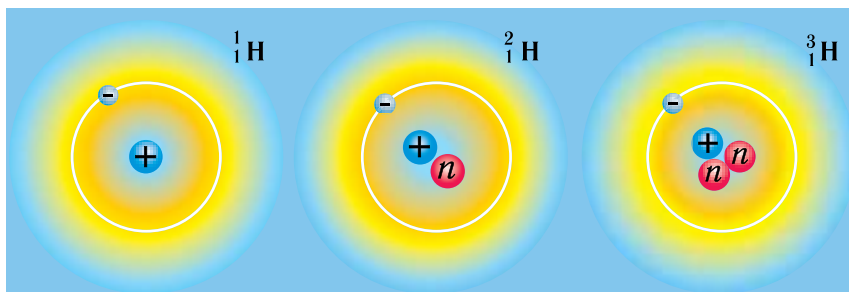
Лік пратонаў у ядры называецца **зарадавым лікам** (атамным нумарам) і абазначаецца літарай Z . (Лік пратонаў у ядры роўны колькасці электронаў у нейтральным атаме.) Зарадавы лік супадае з парадкавым нумарам хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева. Агульны лік нуклонаў называецца **масавым лікам** і абазначаецца літарай A . Масавы лік супадае з акругленай да цэлага ліку атамнай масай элемента. Пратон і нейтрон маюць масавы лік $A = 1$, а электрон $A = 0$. Лік нейтронаў у ядры роўны $N = A - Z$.

Для характарыстыкі ядра дастаткова ведаць зарадавы Z і масавы A лікі. Для абазначэння атамнага ядра ${}^A_ZX$ выкарыстоўваецца такі ж сімвал, як для адпаведнага хімічнага элемента. Злева ўнізе сімвала ставіцца зарадавы лік ядра Z , а ўверсе — масавы лік A . Напрыклад, сімвал ${}^{12}_6C$ абазначае ядро вугляроду, якое змяшчае 12 нуклонаў, 6 з якіх пратоны, а 6 іншых — нейтроны.

Атам з пэўнымі значэннямі зарадавага ліку Z і масавага ліку A называецца **нуклідам**.

У ядрах аднаго хімічнага элемента заўсёды ўтрымліваецца адна і тая ж колькасць пратонаў, а лік нейтронаў можа быць розным. Напрыклад, у ядрах вугляроду лік пратонаў заўсёды 6, а лік нейтронаў можа быць 5, 6, 7, 8, 9 ці 10.

Атамы, ядры якіх утрымліваюць аднолькавы лік пратонаў, але розны лік нейтронаў, называюцца **ізатопамі** (ад грэч. *ἰδιος* (ізіс) — аднолькавы і *τοπος* (топас) — месца) дадзенага хімічнага элемента. Напрыклад, добра



Мал. 210. Тры ізаотопы вадароду

вядомы ізаотопы вадароду — дэйтэрый ${}^2_1\text{H}$ і трытый ${}^3_1\text{H}$, якія змяшчаюць, адпаведна, адзін і два нейтроны ў ядры (мал. 210).

Масы некаторых атамаў прыведзены ў табліцы 10.



Табліца 10. Масы атамаў хімічных элементаў

Элемент	Ізаотп	Маса атама, а. а. м.	Элемент	Ізаотп	Маса атама, а. а. м.
Вадарод	${}^1_1\text{H}$	1,00783	Вуглярод	${}^{11}_6\text{C}$	11,01143
Вадарод	${}^2_1\text{H}$	2,01410	Вуглярод	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
Вадарод	${}^3_1\text{H}$	3,01605	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
Гелій	${}^4_2\text{He}$	4,00260	Кісларод	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491
Літый	${}^6_3\text{Li}$	6,01513	Фтор	${}^{19}_9\text{F}$	18,99840
Літый	${}^7_3\text{Li}$	7,01601	Алюміній	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98146
Берылій	${}^8_4\text{Be}$	8,00531	Крэмній	${}^{28}_{14}\text{Si}$	27,98154
Берылій	${}^9_4\text{Be}$	9,01218	Уран	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,04393
Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,01294	Уран	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,05079
Бор	${}^{11}_5\text{B}$	11,00931	Плутоній	${}^{238}_{94}\text{Pu}$	239,05216

Хімічныя ўласцівасці элементаў вызначаюцца не атамнай масай, а зарадавым лікам ядра, г. зн. лікам электронаў у электрычна нейтральным

атаме элемента і іх размеркаваннем па энергетычных узроўнях. Сапраўды, атамныя масы ізатопаў адрозніваюцца, а іх хімічныя ўласцівасці аднолькавыя. Напрыклад, атамы нуклідаў вадароду ${}^1_1\text{H}$ і гелію ${}^3_2\text{He}$ маюць блізкія па велічыні атамныя масы, але прынцыпова розныя хімічныя ўласцівасці.

У рамках пратонна-нейтроннай мадэлі ядра паўстае пытанне аб яго ўстойлівасці. Сапраўды, паміж змешчанымі ў ядры пратоінамі дзейнічаюць сілы электростатычнага адштурхвання велізарнай велічыні. Калі лічыць адлегласць паміж пратоінамі $r \sim 10^{-14}$ м, то модуль сілы адштурхвання $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 2,30$ Н, а гравітацыйная сіла іх прыцягнення складае ўсяго $F = G \frac{m_p^2}{r^2} \approx 1,9 \cdot 10^{-36}$ Н.

Чым жа тлумачыцца ўстойлівасць ядра, калі ўнутры яго дзейнічаюць такія велізарныя сілы кулонаўскага адштурхвання паміж пратоінамі?

Прычына ўстойлівасці ядра заключаецца ў існаванні, акрамя сіл электростатычнага адштурхвання паміж пратоінамі (нуклоінамі), *ядзерных сіл прыцягнення* паміж нуклоінамі. Ядзерныя сілы адрозніваюцца па сваёй прыродзе як ад сіл электрамагнітных, так і ад сіл гравітацыйных. Яны ўяўляюць сабой новы від узаемадзеяння паміж нуклоінамі, які называюць **моцным узаемадзеяннем**.

Ядзерныя сілы маюць шэраг адметных уласцівасцей:

- 1) з'яўляюцца сіламі прыцягнення і адштурхвання;
- 2) на адлегласцях парадку памеру ядра прыкладна ў 100 разоў пераўзыходзяць па велічыні кулонаўскія сілы адштурхвання ў ядры;
- 3) працягваюцца толькі на адлегласцях паміж часціцамі парадку памеру ядра ($10^{-14} - 10^{-15}$) м, г. зн. з'яўляюцца караткадзеючымі сіламі. На адлегласцях, большых за $(2 - 7) \cdot 10^{-15}$ м, яны не працягваюцца;
- 4) не залежаць ад электрычнага зараду нуклоінаў, якія ўзаемадзейнічаюць (ядзерныя сілы паміж двума пратоінамі, нейтронамі ці пратоінамі і нейтронамі аднолькавыя). Гэта ўласцівасць называецца *зарадавай незалежнасцю*;
- 5) маюць уласцівасць насычэння. Гэта азначае, што змешчаныя ўнутры ядра нуклоіны могуць узаемадзейнічаць толькі са сваімі бліжэйшымі суседзямі;
- 6) не з'яўляюцца цэнтральнымі, г. зн. яны не накіраваны па лініі, якая злучае цэнтры нуклоінаў, што ўзаемадзейнічаюць.

Усе ядры маюць шчыльнасць $\rho \sim 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а адзін кубічны сантыметр ядзернага рэчыва мае масу 180 млн тон.





Паколькі масы і энергіі ядзерных велічынь у адзінках СІ маюць вельмі малыя значэнні, для зручнасці вылічэнняў усе масы ў ядзернай фізіцы выражаюць у атамных адзінках масы (а. а. м.), а энергіі — у электрон-вольтах (эВ). Выкарыстаўшы формулу Эйнштэйна $E = mc^2$, масу таксама можна выразіць у адзінках энергіі — **электронвольтах**: $m = \frac{E}{c^2}$. Напры-

клад, у атамных адзінках масы маса электрона $m_e = 0,00054858$ а. а. м., маса пратона $m_p = 1,007276$ а. а. м., маса нейтрона $m_n = 1,008665$ а. а. м., маса атама вадароду $m_p = 1,007825$ а. а. м., а ў энергетычных адзінках $m_e = 0,511$ МэВ, $m_p = 938,281$ МэВ, $m_n = 939,567$ МэВ ($1 \text{ МэВ} = 1 \cdot 10^6 \text{ В}$).

Сувязь паміж рознымі адзінкамі масы вызначаецца наступнымі суадносінамі:

$$1 \text{ а. а. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,492 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Дж}}{c^2} = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{c^2},$$

$$1,000 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

▶ Ізатопа выкарыстоўваюцца ў біялогіі для вывучэння працэсу фотасінтэзу, для даследавання выкарыстання раслінамі фосфару, азоту, калію і мікра-элементаў, пры даследаванні працэсаў абмену рэчываў і біясінтэзу; у медыцыне — пры дыягностыцы захворванняў, для радыеімунага аналізу і тамаграфіі; у экалогіі — для даследавання пераносу, назапашвання і распаду розных забруджвальнікаў у паветры, вадзе і глебе.



Д. Чэдвак за адкрыццё нейтрона атрымаў Нобелеўскую прэмію па фізіцы ў 1935 г.



1. Калі і кім былі адкрыты пратон і нейтрон?
2. У чым сутнасць пратонна-нейтроннай мадэлі атамнага ядра?
3. Чаму роўны зарад і маса пратона?
4. Што вызначае атамны нумар хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева?
5. Што вызначае масавы лік атамнага ядра? Зарадавы лік?
6. Як у ядзернай фізіцы абазначаецца любы хімічны элемент?
7. Якія нукліды абазначаны сімваламі X:
а) ${}^{18}_7\text{X}$; б) ${}^{82}_{38}\text{X}$; в) ${}^{247}_{97}\text{X}$?
8. Што называюць ізатопамі хімічнага элемента? Што агульнага ў розных ізатопаў аднаго і таго ж хімічнага элемента? Чым яны адрозніваюцца?
9. Як называецца лік нуклонаў у ядры?
10. Якія сілы дзейнічаюць паміж нуклонамі ў атамных ядрах?
11. Якімі ўласцівасцямі валодаюць ядзерныя сілы?

Практыкаванне 21

- Вызначыце колькасць нуклонаў у ізатопах:
а) актынію ${}_{89}^{225}\text{Ac}$; б) ксенону ${}_{54}^{131}\text{Xe}$; в) цырконію ${}_{40}^{91}\text{Zr}$.
- Вызначыце склад ядзер атамаў бору, крэмнію, брому.
- Колькі нуклонаў, нейтронаў, пратонаў змяшчаюць нейтральныя атамы:
а) ${}_{6}^{11}\text{C}$; б) ${}_{9}^{19}\text{F}$; в) ${}_{18}^{40}\text{Ar}$; г) ${}_{29}^{64}\text{Cu}$; д) ${}_{25}^{55}\text{Mn}$?
- Вызначыце элемент, у ядры якога змяшчаецца: а) 20 пратонаў і 20 нейтронаў; б) 12 пратонаў і 14 нейтронаў; в) 10 пратонаў і 12 нейтронаў; г) 104 пратоны і 156 нейтронаў.
- Ядры якіх элементаў атрымаюцца, калі замяніць нейтроны пратонамі, а пратоны нейтронамі ў ядрах:
а) ${}_{8}^{15}\text{O}$; б) ${}_{12}^{25}\text{Mg}$; в) ${}_{11}^{23}\text{Na}$?



§ 36. Ядзерныя рэакцыі.

Законы захавання ў ядзерных рэакцыях

- Падобна таму, як у хімічных рэакцыях атрымліваюцца новыя рэчывы, так і пры ўзаемадзеяннях розных ядзер могуць утварацца новыя ядры. Такім чынам, можна сінтэзаваць новыя хімічныя элементы, атрымліваць энергію, даследаваць драбнюкія аб'екты мікрасвету. Якім заканамернасцям падпарадкоўваюцца ядзерныя рэакцыі? Пры ўсёй разнастайнасці падобных рэакцый ці ёсць у іх агульныя заканамернасці? Як іх можна выкарыстоўваць на карысць цывілізацыі?



З курсу хіміі: *Закон захавання масы — маса рэчываў, якія ўступаюць у хімічную рэакцыю, роўна масе рэчываў, што ўтвараюцца ў выніку рэакцыі.*

Ядзерная рэакцыя — гэта працэс узаемадзеяння атамнага ядра з іншым ядром ці элементарнай часціцай, які можа суправаджацца змяненнем саставу і будовы ядра. Для ажыццяўлення ядзерных рэакцый неабходна збліжэнне часціц на адлегласць дзеяння ядзерных сіл.

Сімвалічна (двухчасцічныя) ядзерныя рэакцыі запісваюцца ў наступным выглядзе:



Тут A — зыходнае ядро, a — часціца, што бамбардзіруе, B — канечнае ядро, b — выпускаемая часціца, Q — энергія рэакцыі.

Ядзерныя рэакцыі могуць адбывацца як пры сутыкненнях розных часціц з атамнымі ядрамі, так і пры сутыкненнях ядзер аднаго з адным. У якасці часціц, якія выклікаюць ядзерныя рэакцыі, звы-

чайна выкарыстоўваюць пратоны, нейтроны, фатоны, α -часціцы, дэйтроны. Незараджаныя часціцы (нейтроны) могуць пранікаць у атамныя ядры і выклікаць разнастайныя ядерныя ператварэнні, валодаючы колькі заўгодна малой кінетычнай энергіяй. Ядерныя рэакцыі з удзелам нейтронаў адбываюцца пры энергіях ~ 1 эВ. Паколькі зараджаным часціцам для пранікнення ў ядры неабходна пераадолюваць дзеянне сіл электрычнага адштурхвання, то ядерныя рэакцыі з удзелам пратонаў, дэйтронаў, α -часціц магчымы пры энергіях у некалькі МэВ. Больш цяжкія ядры выкарыстоўваюцца значна радзей, бо з павелічэннем зараду ядра нарастаюць сілы электрастатычнага адштурхвання. Для пранікнення зараджаных часціц у любое ядро створаны паскаральнікі зараджаных часціц, у якіх ядры атамаў і электроны разганяюцца да энергіяў ад 10 МэВ да 100 ГэВ.

У любых ядерных рэакцыях выконваюцца законы захавання энергіі, імпульсу, зараду. Менавіта дзеянне законаў захавання абмяжоўвае магчымыя варыянты ядерных рэакцый і дазваляе прадказаць магчымыя шляхі (механізмы) ядерных ператварэнняў.

Сума зарадавых і масавых лікаў ядзер і часціц, якія ўступаюць у ядзерную рэакцыю, роўна суме зарадавых і масавых лікаў ядзер і часціц, што атрымліваюцца ў выніку рэакцыі.

Разгледзім энергетычны баланс на прыкладзе двухчасцічнай ядзернай рэакцыі (1). Паколькі як у пачатковым, так і ў канчатковым стане часціцы лічацца неўзаемадзеючымі адна з адной, то іх поўная энергія складаецца з кінетычнай энергіі і энергіі спакою.

З улікам закону захавання энергіі можна запісаць:

$$E_a + E_A = E_b + E_B + Q, \quad (2)$$

дзе E_A, E_a, E_B, E_b , — поўныя энергіі часціц да і пасля рэакцыі.

Паколькі поўная энергія часціцы $E = E_{\text{к}} + mc^2$ роўна кінетычнай энергіі $E_{\text{к}}$ і энергіі спакою mc^2 , то суадносіну (2) можна запісаць у выглядзе:

$$m_a c^2 + E_{\text{ка}} + m_A c^2 + E_{\text{КА}} = m_b c^2 + E_{\text{кб}} + m_B c^2 + E_{\text{КБ}} + Q,$$

дзе m_a, m_A, m_b, m_B — масы часціц, а $E_{\text{ка}}, E_{\text{КА}}, E_{\text{кб}}, E_{\text{КБ}}$ — іх кінетычныя энергіі ў пачатковым і канечным станах.

Тады з суадносіны (1) атрымліваем выраз для энергіі рэакцыі:

$$Q = E_{\text{к}}^0 - E_{\text{к}} + (m_A + m_a - (m_B + m_b))c^2, \quad (3)$$

дзе $E_{\text{к}}^0 = E_{\text{ка}} + E_{\text{КА}}$, $E_{\text{к}} = E_{\text{кб}} + E_{\text{КБ}}$ — кінетычныя энергіі сістэмы ў пачатковым і канечным станах.

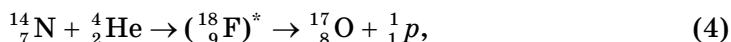
Такім чынам, **энергіяй рэакцыі** Q (пры невялікіх скарасцях часціц) называецца рознасць энергій спакою пачатковага і канчатковага станаў часціц, якія ўдзельнічаюць у рэакцыі.

Паколькі энергія рэакцыі можа быць як дадатнай, так і адмоўнай, то ядзерныя рэакцыі могуць адбывацца як з вылучэннем энергіі, так і з паглынанням энергіі. Ядзерныя рэакцыі, якія адбываюцца з вылучэннем энергіі ($Q > 0$), называюцца *экзаэнергетычнымі*, а з паглынанням энергіі ($Q < 0$), — *эндаэнергетычнымі*. Для таго каб адбылася эндаэнергетычная рэакцыя, часціцам, якія ўдзельнічаюць у ёй, неабходна папярэдне надаць дадатковую кінетычную энергію.

Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, называецца **энергетычным выхадам** ядзернай рэакцыі. Падкрэслім, што энергетычны выхад розных ядзерных рэакцый можа дасягаць сотняў мегаэлектрон-вольт, што ў мільёны разоў перавышае энергетычны выхад пры хімічных рэакцыях.

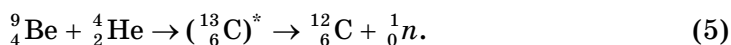


Гістарычна першай ядзернай рэакцыяй пад дзеяннем α -часціц лічыцца рэакцыя, у выніку якой у 1919 г. Рэзерфардам быў адкрыты пратон ${}^1_1p$:



дзе $*$ азначае састаўное ядро ва ўзбуджаным стане.

Нейтрон ${}^1_0n$ быў адкрыты Чэдвакам у 1932 г. у рэакцыі радыеактыўнага ператварэння ядзер берылію ў ізатоп вугляроду пры бамбардзіроўцы α -часціцамі:



Ядзерныя рэакцыі можна *класіфікаваць* па наступных прыметах:

- па родзе часціц, якія ўдзельнічаюць у іх (нейтронаў, зараджаных часціц);
- па прымеце вылучэння ці паглынання энергіі (экзаэнергетычныя ($Q > 0$), эндаэнергетычныя ($Q < 0$));
- па энергіі часціц, якія выклікаюць іх (малых энергіях (< 1 МэВ), сярэдніх энергіях (1 МэВ — 10 МэВ), высокіх энергіях (> 10 МэВ));
- па масе ядзер, якія бамбардзіруюцца (лёгкіх ($A < 50$), сярэдніх ($50 < A < 100$), цяжкіх ($A > 100$));
- па віду часціц, якія бамбардзіруюць (на зараджаных часціцах, на нейтронах);
- па характары ядзерных ператварэнняў (адбываюцца з выпусканнем нейтронаў, зараджаных часціц, γ -квантаў (выпраменьвання)).

Від запісу ядзерных рэакцый (гл. ураўненні (4)—(5)) аналагічны запісу формул хімічных рэакцый — злева запісваецца сума зыходных часціц, справа — атрыманых:

$${}_{Z_2}^{A_2}x_1 + {}_{Z_1}^{A_1}X_1 = {}_{Z_4}^{A_4}x_2 + {}_{Z_3}^{A_3}X_2.$$

Пры любых ядзерных рэакцыях выконваюцца законы захавання электрычнага зараду (зарадавага ліку), масы (ліку нуклонаў (масавага ліку)), энергіі і імпульсу.

Разгледзім законы захавання масавых і зарадавых лікаў на прыкладзе ядзернай рэакцыі (4). Сумы масавых лікаў часціц, якія ўступілі ў рэакцыю і якія ўтварыліся ў ёй, роўныя:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \Rightarrow 14 + 4 = 17 + 1.$$

Сумы зарадавых лікаў часціц, якія ўступілі ў рэакцыю і якія ўтварыліся ў ёй, таксама роўныя:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \Rightarrow 7 + 2 = 8 + 1.$$

Такім чынам, дзеянне законаў захавання з аднаго боку абмяжоўвае магчымыя варыянты ядзерных рэакцый, а з другога — дазваляе прадказваць магчымыя ядзерныя ператварэнні.

Велічыня, роўная рознасці мас часціц пасля і да рэакцыі:

$$\Delta m = m_b + m_B - (m_a + m_A),$$

называецца **дэфектам мас** ядзернай рэакцыі.

Калі $\Delta m < 0$, то $Q = -\Delta mc^2 = (m_a + m_A - (m_b + m_B))c^2 > 0$, то энергія ў ходзе рэакцыі вылучаецца, калі $\Delta m > 0$, то $Q = -\Delta mc^2 < 0$, то энергія паглынаецца.



1. Што называюць ядзернымі рэакцыямі?
2. У якім выглядзе запісваюцца ядзерныя рэакцыі?
3. У чым асноўнае адрозненне ядзерных рэакцый на зараджаных часціцах ад ядзерных рэакцыях на нейтронах?
4. Што называюць энергіяй ядзернай рэакцыі?
5. Пры якой умове рэакцыя ідзе з паглынанням энергіі, а пры якой — з вылучэннем?
6. Што называюць энергетычнымыходам ядзернай рэакцыі?
7. Па якіх прыметах робіцца класіфікацыя ядзерных рэакцый?
8. Што называецца дэфектам мас ядзернай рэакцыі?

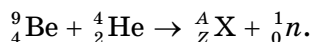


Прыклады рашэння задач

1. Запішыце ўраўненне ядзернай рэакцыі, якая адбываецца пры бамбардзіроўцы берылію α -часціцамі і суправаджаецца выпусканнем нейтронаў.

Рашэнне

Для запісу ядзерных рэакцый неабходна ведаць законы захавання масавага A і зарадавага Z лікаў:



Сума масавых лікаў часціц, што ўступілі ў рэакцыю, роўна суме масавых лікаў утвораных часціц:

$$9 + 4 = A + 1.$$

Адсюль $A = 12$.

Сума зарадавых лікаў часціц, што ўступілі ў рэакцыю, роўна суме зарадавых лікаў утвораных часціц:

$$4 + 2 = Z + 0.$$

Адкуль $Z = 6$.

З перыядычнай сістэмы хімічных элементаў Мендзялеева знаходзім, што шуканым элементам з'яўляецца вуглярод ${}^{12}_6\text{C}$.

Адказ: ${}^{12}_6\text{C}$.

2. Вылічыце энергію ядзернай рэакцыі: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$. Вылучаецца ці паглынаецца энергія ў гэтай рэакцыі?

Рашэнне

Масы часціц (у атамных адзінках масы (а. а. м.)), што ўступілі ў рэакцыю і пасля яе: ${}^7_3\text{Li} — 7,01601$ а. а. м., ${}^1_1\text{H} — 1,00783$ а. а. м., ${}^4_2\text{He} — 4,00260$ а. а. м.

Маса часціц, што ўступілі ў рэакцыю:

$$m_1 = 7,01601 \text{ а. а. м.} + 1,00783 \text{ а. а. м.} = 8,02384 \text{ а. а. м.}$$

Маса часціц пасля рэакцыі:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00260 \text{ а. а. м.} = 8,00520 \text{ а. а. м.}$$

Дэфект мас рэакцыі:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -0,01864 \text{ а. а. м.}$$

Паколькі $\Delta m < 0$, то энергія рэакцыі $Q = -\Delta mc^2 > 0$. Значыць, ядзерная рэакцыя адбываецца з вылучэннем энергіі, г. зн. энергетычны выхад рэакцыі:

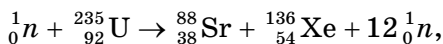
$$Q = -\Delta mc^2,$$

$$\Delta E = 0,01864 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Адказ: вылучаецца энергія $\Delta E = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$.

Практыкаванне 22

1. Вызначыце, якая часціца ўтвораецца ў выніку ядзернай рэакцыі ${}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{14}^{27}\text{Si} + \dots$.
2. Запішыце ўраўненні ядерных рэакцый, у выніку якіх пры апраменьванні пратоінамі ядра літыю ${}_3^7\text{Li}$ утвараюцца:
 - а) ядро і нейтрон; б) два аднолькавыя ядры; в) два ядры з лікамі нуклонаў, якія адрозніваюцца на дзве адзінкі і пратон; г) ядро і γ -квант.
3. Вылічыце энергію, якая вылучаецца ў рэакцыі дзялення



мяркуючы, што кінетычная энергія налятаючага нейтрона вельмі малая. Масы адпаведных часціц і ядер роўны:

$$m_n = 1,008665 \text{ а. а. м.}, \quad m_{\text{U}} = 235,04393 \text{ а. а. м.},$$

$$m_{\text{Xe}} = 135,9072 \text{ а. а. м.}, \quad m_{\text{Sr}} = 87,9056 \text{ а. а. м.}$$

4. Пры якіх умовах магчыма ядзерная рэакцыя ${}_{8}^{18}\text{O} + {}_1^1p \rightarrow {}_9^{18}\text{F} + {}_0^1n$?
5. Ядро ізатопа магнію ${}_{12}^{25}\text{Mg}$ падвяргаецца бамбардзіроўцы пратоінамі. Запішыце ўраўненне рэакцыі, калі яна суправаджаецца выпусканнем α -часціцы.
6. Вызначыце дэфект мас ядзернай рэакцыі, у якой два дэйтэрыя ${}_1^2\text{H}$ аб'яднаюцца ў адзін нуклід гелію ${}_2^4\text{He}$. Якая энергія вылучаецца ў гэтай рэакцыі?
7. Вызначыце дэфект мас ядзернай рэакцыі, у якой чатыры атамы гелію ${}_2^4\text{He}$ аб'яднаюцца ў адзін атам кіслароду ${}_8^{16}\text{O}$. Якая энергія вылучаецца (паглынаецца) ў гэтай рэакцыі? Якая энергія неабходна, каб падзяліць адзін атам кіслароду ${}_8^{16}\text{O}$ на чатыры атамы гелію ${}_2^4\text{He}$?



§ 37. Энергія сувязі ядра атама

■ Дагэтуль мы разглядалі двухчасцічныя ядзерныя рэакцыі, калі часціца налятала на ядро. А ці магчыма рэакцыя распаду самаго ядра? Якія ўмовы для гэтага неабходны? Як гэту з'яву можна выкарыстоўваць на практыцы?

Разгледзім рэакцыю падзелу ядра на нуклоны. Паколькі ядры складаюцца з пратонаў і нейтронаў, то энергія разглядаемай рэакцыі:

$$Q = (m_{\text{я}} - (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n)) \cdot c^2.$$

Знойдзем сумарную (поўную) масу свабодных часціц, якія змяшчаюцца, напрыклад, унутры ядра вугляроду $^{12}_6\text{C}$, і параўнаем яе з масай ядра. Паколькі ядро змяшчае $Z = 6$ пратонаў і $N = A - Z = 6$ нейтронаў, то іх сумарная маса:

$$m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n = 6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а. а. м.}$$

Паколькі маса ядра $^{12}_6\text{C}$ — $m_C = 12,000000 \text{ а. а. м.}$, то іх рознасць роўна:

$$\Delta m = m - m_C = 0,095646 \text{ а. а. м.} > 0.$$

Такім чынам, сумарная маса асобных часціц большая, чым маса ўтворанага імі ядра.

Рознасць

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$$

назваюць **дэфектам масы ядра**.

Заўважым, што адноснае змяненне масы пры ўтварэнні ядра $^{12}_6\text{C}$ складае:

$$\frac{\Delta m}{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n} \cdot 100 \% = \frac{0,095646}{12,095646} \cdot 100 \% = 0,79 \%.$$

Маса цела змяняецца заўсёды, калі змяняецца яго ўнутраная энергія. Адзначым, што ў працэсах, якія адбываюцца на атамна-малекулярным узроўні, змяненні масы вельмі малыя. Так, пры поўным ператварэнні лёду масай m в даду адноснае змяненне масы $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$, пры хімічных рэакцыях, напрыклад згаранні метану ў кіслародзе $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-10}$, у ядзерных рэакцыях $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}$, г. зн. у $\sim 10^7$ разоў больш, чым у хімічных рэакцыях.



Дакладныя вымярэнні мас ядзер паказалі, што маса любога ядра (за выключэннем ядра вадароду, у ядры якога ўсяго адзін пратон і ніводнага нейтрона) меншая за суму мас складаючых яго пратонаў і нейтронаў. І чым больш нуклонаў у ядры элемента, тым большы дэфект масы для яго.

Куды ж знікла гэта маса Δm ?

Згодна з законам узаемасувязі масы і энергіі $\Delta E = \Delta mc^2$ лішкаявая маса ператвараецца ў энергію, якая вылучаецца пры злучэнні нуклонаў у ядро. Такім чынам, пры ўтварэнні ядра вугляроду $^{12}_6\text{C}$ менш за 1 % сумарнай масы нуклонаў пераходзіць у энергію. Значыць, для падзелу ядра вугляроду $^{12}_6\text{C}$ на асобныя нуклоны патрабуецца энергія. Менавіта таму ядро вугляроду не распадаецца.

Для выдалення нуклона (пратона ці нейтрона) з ядра неабходна выканаць работу супраць ядзерных сіл прыцягнення паміж нуклонамі. З прычыны гэтага энергія сістэмы «выдалены нуклон — пакінутае ядро» ўзрасце на велічыню, роўную рабоце знешніх сіл супраць дзеяння ядзерных сіл прыцягнення паміж нуклонамі.

Мінімальная энергія, неабходная для падзелу ядра на асобныя нуклоны, называецца **энергіяй сувязі ядра**:

$$E_{\text{сув}} = (Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2 = \Delta mc^2 > 0. \quad (1)$$

Калі масу выражаць у а. а. м., а энергію сувязі — у мегаэлектрон-вольтах (МэВ), то выраз (1) запісваюць у выглядзе:

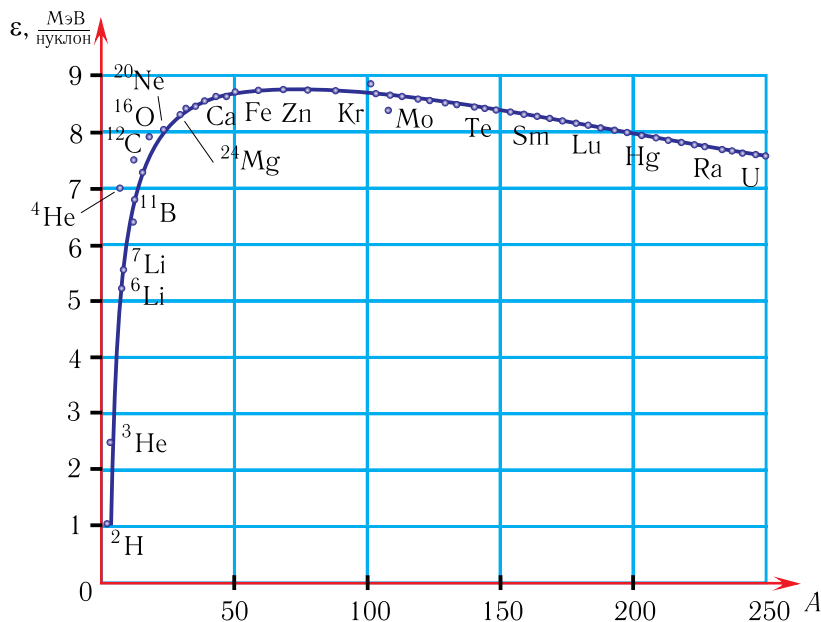
$$|E_{\text{сув}}| = 931,5(Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) (\text{МэВ}).$$

Стан атамнага ядра з мінімальнай энергіяй, роўнай (па модулі) энергіі сувязі, называецца *асноўным*, стан з лішкам энергіі (у параўнанні з асноўным) называецца *ўзбуджаным*.

Напрыклад, энергія сувязі нуклонаў у ядры атама вугляроду:

$$|E_{\text{сув}}| = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. а. м.}} \cdot 0,095646 \text{ а. а. м.} = 89,1 \text{ МэВ}.$$

Гэта энергія значна большая за энергію, «якая ўтрымлівае» электроны ўнутры атама. Так, энергія электрона ў атаме вадароду ў асноўным стане роўна $E_1 = -13,6$ эВ. Гэта азначае, што для іанізацыі атама вадароду трэба выканаць работу, роўную $A = 13,6$ эВ. Таму працэсы плаўлення цвёрдага рэчыва, раскладання хімічнага злучэння і іанізацыі атама патрабуюць значна меншых энергетычных выдаткаў у параўнанні з працэсам падзелу (расшчаплення) ядра.



Мал. 211. Залежнасць удзельнай энергіі сувязі ядзер ад масавага ліку A

Больш важнай характарыстыкай з’яўляецца не энергія сувязі, а **ўдзельная энергія сувязі ϵ ядра**, г. зн. *энергія сувязі, якая прыпадае на адзін нуклон*. Яна з’яўляецца характарыстыкай трываласці (звязанасці) ядзер і роўна адносіне энергіі сувязі да масавага ліку: $\epsilon = \frac{|E_{\text{суб}}|}{A}$.

Адпаведна, чым большае значэнне ϵ , тым мацней звязаны кожны нуклон у ядры са сваімі суседзямі, значыць, тым мацнейшае ядро. Графік залежнасці ўдзельнай энергіі сувязі ад масавых лікаў ядзер $\epsilon(A)$ паказаны на малюнку 211. З яго бачна, што крывая мае прыкметны максімум, размешчаны бліжэй да пачатку каардынат. Прычым гэты максімум з аднаго боку стромкі, а з другога — пакаты. Адпаведна, $\epsilon(A)$ хутка нарастае пры малых значэннях ад $\epsilon = 1$ МэВ пры $A = 1$ да $\epsilon = 8$ МэВ пры $A = 16$. Максімум удзельнай энергіі сувязі ядра $\epsilon_{\text{max}} = 8,8$ МэВ дасягаецца пры $A \approx 56$ ($^{56}_{26}\text{Fe}$). Затым удзельная энергія сувязі ядра паступова памяншаецца да значэння $\epsilon = 7,6$ МэВ для ўрану. Таму найбольш трывалыя ядры з сярэднімі значэннямі масавых лікаў A (12—60).

Такім чынам, пры зрушэнні ядзер да цэнтральнай часткі графіка ўдзельная энергія сувязі павялічваецца, значыць, любыя ядзерныя рэакцыі, якія прыводзяць да такога зрушэння, з’яўляюцца энергетыч-

на вигаднымі (суправаджаюцца вылучэннем энергіі). З залежнасці, прыведзенай на малюнку 211, вынікае, што падобнае зрушэнне магчыма пры рэакцыях сінтэзу (аб'яднанні) лёгкіх ядзер у абсягу змянення A прыкладна $0 \rightarrow 50$ і пры рэакцыях дзялення цяжкіх ядзер у абсягу змянення A прыкладна $250 \rightarrow 50$. Пры гэтым рэакцыі сінтэзу павінны праходзіць з большым вылучэннем энергіі, паколькі пад'ём графіка адбываецца страмчэй, чым наступнае памяншэнне ўдзельнай энергіі сувязі.

З графіка (гл. мал. 211) вынікае, што пры рэакцыі сінтэзу (аб'яднання) лёгкіх ядзер і рэакцыі дзялення цяжкіх ядзер удзельная энергія сувязі павялічваецца, г. зн. такія рэакцыі з'яўляюцца энергетычна вигаднымі, паколькі суправаджаюцца вылучэннем энергіі.



1. Чаму атамная маса хімічных элементаў не выражаецца цэлым лікам?
2. Што называецца дэфектам мас ядра? Растлумачце прычыну яго ўзнікнення.
3. Што такое энергія сувязі ядра? Як яна вызначаецца?
4. Што вызначае ўдзельная энергія сувязі ядра?
5. У якіх элементаў ядры маюць максімальную ўдзельную энергію сувязі?
6. Якія ядзерныя рэакцыі з'яўляюцца энергетычна вигаднымі? Чаму?
7. Чаму рэакцыі сінтэзу ядзер з'яўляюцца энергетычна больш вигаднымі ў параўнанні з рэакцыямі дзялення цяжкіх ядзер?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце энергію сувязі нуклонаў у ядры берылію ${}^8_4\text{Be}$.

Рашэнне

Ядро берылію складаецца з $Z = 4$ пратонаў і $N = A - Z = 8 - 4 = 4$ нейтронаў. Маса пратона $m_p = 938,281$ МэВ, маса нейтрона — $m_n = 939,567$ МэВ.

Сумарная маса ўсіх часціц, што ўваходзяць у склад ядра:

$$E_0 = 4 \cdot 938,281 \text{ МэВ} + 4 \cdot 939,567 \text{ МэВ} = 7511,4 \text{ МэВ}.$$

Маса ядра ${}^8_4\text{Be}$ — $m_{\text{Be}} = 7454,7$ МэВ.

Адкуль модуль энергіі сувязі ядра берылію:

$$E_{\text{сув}} = E_0 - E_{\text{я}} = 7511,4 \text{ МэВ} - 7454,7 \text{ МэВ} = 56,7 \text{ МэВ}.$$

Гэта энергія размеркавана паміж 8 нуклонамі ядра берылію.

Значыць, на кожны нуклон прыпадае ўдзельная энергія сувязі ядра берылію $\varepsilon = \frac{E_{\text{сув}}}{N} = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, што пацвярджаецца эксперыментальнымі данымі.

Адказ: $E_{\text{сув}} = 56,7 \text{ МэВ}$; $\varepsilon = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

Практыкаванне 23

1. Вызначыце дэфект масы ядра алюмінію ${}^{27}_{13}\text{Al}$. Маса ядра алюмінію роўна $m_{\text{Al}} = 26,97431 \text{ а. а. м.}$, маса нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а. а. м.}$ і маса пратона $m_p = 1,00728 \text{ а. а. м.}$
2. Вызначыце масу ядра атама літыю ${}^7_3\text{Li}$, калі дэфект масы ядра атама літыю $\Delta m = 7,030 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$, маса пратона $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, маса нейтрона $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.
3. Вызначыце ўдзельную энергію сувязі ε ядра атама ртуці ${}^{200}_{80}\text{Hg}$, калі масы нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а. а. м.}$, пратона $m_p = 1,00728 \text{ а. а. м.}$, ядра ртуці $m_{\text{Hg}} = 200,028 \text{ а. а. м.}$
4. Вылічыце ўдзельную энергію сувязі ε для ядра гелію ${}^4_2\text{He}$.
5. Вызначыце дэфект масы Δm ізатопа азоту ${}^{14}_7\text{N}$, маса ядра якога $m_{\text{N}} = 14,00307 \text{ а. а. м.}$. Знайдзіце ўдзельную энергію сувязі ε ядра дадзенага ізатопа, калі маса нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а. а. м.}$ і маса пратона $m_p = 1,00728 \text{ а. а. м.}$
6. Дадзена ядзерная рэакцыя ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$. Вызначыце энергію сувязі $E_{\text{сув}}$ дадзеных ядзер, калі ўдзельныя энергіі сувязі $\varepsilon_{\text{N}} = 7,48 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, $\varepsilon_{\text{He}} = 7,075 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, $\varepsilon_{\text{O}} = 7,751 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.



§ 38. Радыеактыўнасць

- Некаторыя ядры маюць здольнасць да самаадвольнага распаду, які суправаджаецца змяненнем фізічнай структуры ядра, а значыць, і хімічных уласцівасцей атама. Розныя атамы маюць розныя часовыя характарыстыкі дадзенага працэсу, што дало чалавеку новыя магчымасці, з аднаго боку, у даследаванні «мінулага» Зямлі, а з другога — у рэалізацыі штучных ператварэнняў адных элементаў у іншыя. Якія ж асноўныя заканамернасці самаадвольнага распаду атамаў? Чаму ён адбываецца? Ці небяспечны ён для здароўя чалавека?

Гісторыю ядзернай фізікі прынята адлічваць з 1896 г. Менавіта ў гэтым годзе французскі фізік Антуан Анры Бекерэль выявіў, што солі ўрану маюць здольнасць засвечваць фотапласцінку, выпускаючы самаадвольна нейкае невядомае выпраменьванне. Гэта новая з'ява атрымала назву *радыеактыўнасці* (ад лац. *radio* — выпускаю прамені, *action* — дзейсны).

Радыеактыўнасць — з’ява самаадвольнага ператварэння ядзер, якая суправаджаецца выпусканнем часціц ці ядзер і кароткахвалевага электрамагнітнага выпраменьвання.

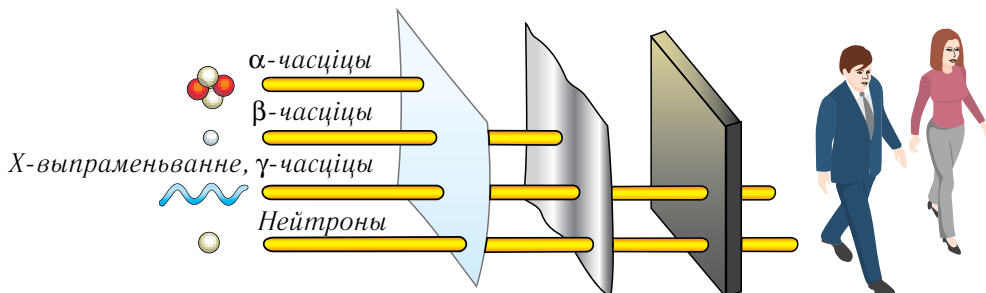
У 1898 г. П’ер Кюры і Марыя Складоўская-Кюры, даследуючы гэту новую з’яву, адкрылі новыя радыеактыўныя хімічныя элементы — радый ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ і палоній ${}^{210}_{84}\text{Po}$. У хуткім часе былі адкрыты і іншыя радыеактыўныя элементы. У 1899 г. Э. Рэзерфард вылучыў два складаныя радыеактыўнага выпраменьвання — α - і β -прамені. Ён даказаў, што α -прамені ўяўляюць сабой ядры гелію, а Бекерэль даказаў, што β -прамені з’яўляюцца патокам электронаў. У 1900 г. французскі фізік П. Вілард адкрыў γ -прамені, трэцюю кампаненту радыеактыўнага выпраменьвання, пры даследаванні выпраменьвання радую. Упершыню такую тэрміналогію выкарыстаў Рэзерфард у 1903 г.

► Радый па латыні азначае «выпускаючы прамені», а палоній назвалі ў гонар радзімы Марыі Складоўскай-Кюры — Польшчы.

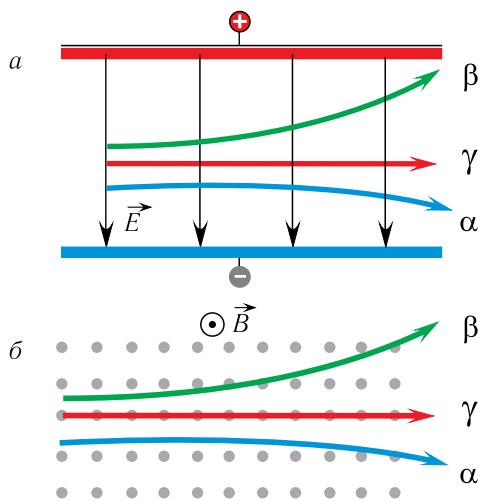
У 1903 г. Э. Рэзерфард і Ф. Содзі выявілі, што з’ява радыеактыўнасці суправаджаецца ператварэннем аднаго хімічнага элемента ў іншы з вылучэннем энергіі, якая адносіцца да выпраменьвання. Яны прапанавалі тэорыю, паводле якой радыеактыўныя выпраменьванні ўзнікаюць пры распадзе ядзер.

У 1898 г. Рэзерфард выявіў, што па пранікальнай здольнасці выпраменьванні можна падзяліць на тры розныя віды. Выпраменьванне першага віду (α -часціцы) не праходзіла нават скрозь аркуш паперы (мал. 212), другога (β -часціцы) — не пранікала ўжо праз алюмініевую пласцінку таўшчынёй некалькі міліметраў, а трэцяга (γ -часціцы) — праходзіла нават скрозь слой свінцу таўшчынёй у некалькі сантыметраў.

Гэтыя тры віды выпраменьвання былі названы паводле першых трох літар грэчаскага алфавіту: адпаведна α -, β - і γ -выпраменьваннем. Пасля



Мал. 212. Пранікальная здольнасць розных відаў радыеактыўных выпраменьванняў



Мал. 213. Паводзіны радыеактыўных выпраменьванняў у электрычным (а) і магнітным (б) палях

было выяўлена, што ўсе гэтыя віды выпраменьвання ўяўляюць сабой вядомыя часціцы: α -выпраменьванне — гэта ядры атамаў гелію ${}^4_2\text{He}$ (таксама абазначаецца ${}^4_2\alpha$), β -выпраменьванне — электроны, γ -выпраменьванне — электрамагнітнае выпраменьванне вельмі вялікай энергіі.

Тры складаючыя радыеактыўнага выпраменьвання радыю па-рознаму паводзяць сябе ў электрычных і магнітных палях, адхіляючыся ў розных напрамках і на розныя вуглы (мал. 213).

Пры α -распадзе пачатковага (так званага мацярынскага) ядра ${}^A_Z\text{X}$ прадуктам распаду аказваецца ізатоп Y з лікам пратонаў $Z - 2$ і масавым лікам $A - 4$:



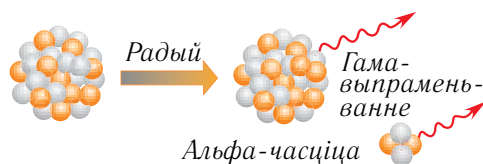
Пералічым асноўныя асаблівасці α -распаду:

1) ён назіраецца як у натуральных (сустрэкаемых у прыродзе) ядзер (пры $Z > 83$), так і ў штучных ізатопаў (пры $Z < 83$), паколькі пры гэтым энергетычна выгадна выпускаць α -часціцы;

2) энергія α -часціц, што вылятаюць з розных ядзер, знаходзіцца ў асноўным у межах (1,1—11,8) МэВ;

3) α -часціцы, што вылятаюць, маюць дыскрэтны спектр значэнняў энергіі (пры распадзе дадзенага ядра выпускаецца α -часціца з пэўнай энергіяй).

Прыкладам α -распаду з’яўляецца рэакцыя ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, у выніку якой атрымліваецца радон (мал. 214).



Мал. 214. Схема α -распаду радыю

Пры β^- -распадзе ядра ${}^A_Z\text{X}$ утвараецца нуклід з атамным нумарам $Z + 1$ і такім жа масавым лікам, як мацярынскае ядро, і выпускаецца электрон. Для электронаў у ядзернай фізіцы прынята абазначэнне ${}^0_{-1}e$. З улікам гэтага рэакцыю β^- -распаду можна запісаць наступным чынам:



дзе $\tilde{\nu}$ — невядомая ў той час часціца, зарадавы і масавы лікі якой роўны нулю (${}_0^0\tilde{\nu}$).

Пералічым асноўныя асаблівасці β^- -распаду:

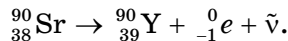
1) назіраецца пры радыеактыўным распадзе ядзер з лішкам нейтронаў;

2) электроны, што вылятаюць, маюць непарарыўны спектр значэнняў кінетычнай энергіі ад 0 да $E_{\max}$, значэнне якой залежыць ад віду распадаючагася ядра.

Агульнай прыкметай ядзернай рэакцыі з'яўляецца ператварэнне аднаго атамнага ядра ў іншае. Але радыеактыўны распад адбываецца *самаадвольна*, без знешняга ўздзеяння, а ядзерная рэакцыя выклікаецца ўздзеяннем бамбардзіруючай часціцы.

Заканамернасці ядзерных ператварэнняў (1) і (2) пры α - і β^- -распадах, выяўленыя ў 1913 г. англійскім вучоным Фрэдэрыкам Содзі і польскім вучоным Казімежам Фаянсам, называюцца *правіламі зрушэння (зруху)*.

Яшчэ адзін прыклад β^- -распаду — выпраменьванне электрона нуклідам стронцыю:



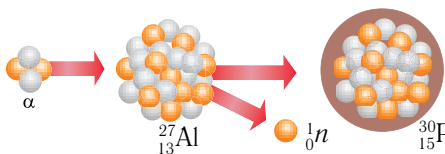
Пры β^- -распадзе ядра, якое складаецца з нейтронаў і пратонаў, выпускаюцца электроны. Тут паўстае заканамернае пытанне: «Адкуль жа яны бяруцца?» І што гэта за часціца $\tilde{\nu}$?

Згодна з квантавай тэорыяй β^- -распаду, распрацаванай у 1934 г. італьянскім фізікам Энрыка Фермі, у момант распаду ядра ўнутры яго адбываецца ператварэнне аднаго з нейтронаў у пратон, якое суправаджаецца ў адпаведнасці з законамі захавання электрычнага зараду і энергіі ўзнікненнем яшчэ дзвюх часціц — электрона і часціцы, зарадавы і масавы лікі якой роўны нулю. Гэту часціцу па прапанове Фермі назвалі *нейтрына*, што ў перакладзе з італьянскай азначае «нейтрончык». Нейтрына абазначаецца грэчаскай літарай ν . Менавіта выпусканне антынейтрына разам з электронам прыводзіць да таго, што электрон пры β^- -распадзе можа мець любую энергію ад 0 да $E_{\max}$.

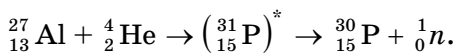
► Існаванне нейтрына было прадказана В. Паўлі на падставе закону захавання энергіі ў 1931 г. Эксперыментальна нейтрына было зарэгістравана ў 1956 г. у лабараторыі Лос-Аламас (ЗША) амерыканскімі фізікамі Ф. Райнесам і К. Коўнам.

► Аб фантастычнай пранікальнай здольнасці нейтрына можна судзіць па такім прыкладзе. Калі б жалезная пліта мела таўшчыню, роўную адлегласці ад Зямлі да Сонца, то яна затрымала б толькі адно са ста мільёнаў нейтрына, якія ўтвараюцца ў ядзерных рэактарах.

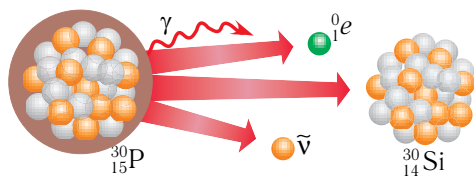
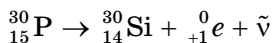
Як адну з самых вядомых ядзерных рэакцый адзначым першае штучнае атрыманне Фрэдэрыкам і Ірэн Жолія-Кюры ў 1934 г. радыеактыўнага ізатопа фосфару падчас ядзернай рэакцыі (мал. 215):



Мал. 215. Ператварэнне алюмінію ў радыеактыўны ізотоп фосфару



Далей ізотоп ${}_{15}^{30}\text{P}$ ператвараецца ў ізотоп ${}_{14}^{30}\text{Si}$:



Мал. 216. Распад радыеактыўнага ізатопа фосфару з утварэннем крэмнію і выпусканнем пазітрона

з выпусканнем пазітрона ${}_{+1}^0e$ (мал. 216). Гэта часціца мае ўсе ўласцівасці (масу, спін, зарад) электрона, але адрозніваецца знакам зараду.

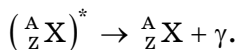
Уласцівасці нейтрына аказаліся дзіўнымі. З-за адсутнасці электрычнага зараду і вельмі малой масы нейтрына вельмі слаба ўзаемадзейнічае з рэчывам, і таму яно было эксперыментальна выяўлена толькі ў 1952—1956 гг. Фактычна ў любым рэчыве нейтрына паводзіць сябе так, як быццам рэчыва няма. Напрыклад, у свінцы сярэдняя даўжыня прабегу паміж узаемадзеяннямі (пранікальная здольнасць) складае велічыню парадку 10^{18} м. Таму нейтрына вольна пранізваюць касмічную прастору, пралятаючы скрозь Зямлю, Сонца і іншыя нябесныя целы.

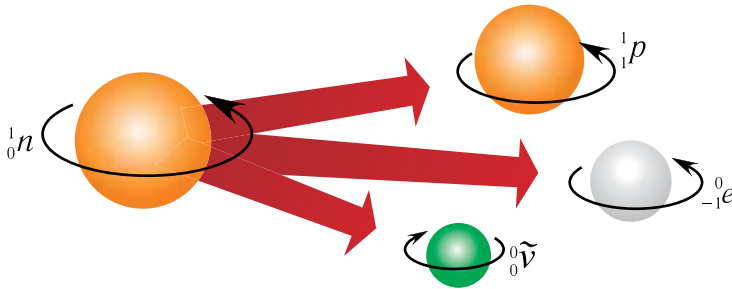
Рэакцыя β^- -распаду нейтрона мае выгляд:



дзе $\tilde{\nu}$ абазначана антынейтрына. Гэта β^- -рэакцыя схематычна паказана на малюнку 217.

Выпусканне γ -выпраменьвання ў адрозненне ад α - і β -распадаў ядзер не прыводзіць да ператварэнняў элементаў:





Мал. 217. Рэакцыя распаду нейтрона на пратон, электрон і антынейтрына

Уласцівасці γ -выпраменьвання:

- 1) караткахвалевае электрамагнітнае выпраменьванне з даўжынёй хвалі $\lambda \sim 10^{-10} - 10^{-13}$ м;
- 2) не мае электрычнага зараду;
- 3) спектр γ -выпраменьвання перарывісты. Энергія выпраменьвання знаходзіцца ў межах ад ~ 10 МэВ да ~ 1 МэВ.

Звычайна γ -выпраменьванне суправаджае радыеактыўныя ператварэнні ядзер пры α - і β -распадах. Атрыманыя пры ядзерных рэакцыях канечныя ядры (іх называюць даччынымі) аказваюцца ва ўзбуджаных станах з наступным пераходам у асноўны стан шляхам выпраменьвання γ -кванта.

Усе радыеактыўныя распады адбываюцца з вылучэннем энергіі, г. зн. з'яўляюцца экзаэнергетычнымі, паколькі маса радыеактыўнага ядра перавышае сумарную масу ядзер прадуктаў распаду.

Як растлумачыць стабільнасць адных ядзер і нестабільнасць іншых? Для стабільнасці ядзер неабходзен баланс паміж пратонамі і нейтронамі. Сярод элементаў з маленькімі нумарамі стабільныя ядры складаюцца з роўнай ці амаль роўнай колькасці пратонаў і нейтронаў. Так, напрыклад, ядро вадароду ${}^1_1\text{H}$ змяшчае 1 пратон, ядро гелію ${}^4_2\text{He}$ — 2 пратоны і 2 нейтроны, ядро кіслароду ${}^{16}_8\text{O}$ — 8 нейтронаў і 8 пратонаў, ядро кальцыю ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ — 20 пратонаў і 20 нейтронаў. Лік нейтронаў у іх роўны ліку пратонаў і іх суадносіна $N/Z = 1$. У іх ядзерныя сілы прыцягнення кампенсуюць кулонаўскія сілы адштурхвання.

Стабільныя ядры ўсіх элементаў, цяжэйшых за кальцый, утрымліваюць ужо больш нейтронаў, чым пратонаў. З павелічэннем атамнага нумара Z рост колькасці пратонаў памяншае энергію сувязі з прычыны павелічэння сілы іх кулонаўскага адштурхвання. Таму для

стабільнасці ядзер з прычыны кароткадзеяння ядзерных сіл ($\sim 10^{-14}$ м) патрабуецца больш нейтронаў, чым пратонаў. Так, напрыклад, ядро самага распаўсюджанага ізатопа жалеза $^{56}_{30}\text{Fe}$ складаецца з 26 пратонаў і 30 нейтронаў, г. зн. $N/Z = 1,15$. Ядро ізатопа вісмуту $^{209}_{83}\text{Bi}$ складаецца са 126 нейтронаў і 83 пратонаў, г. зн. $N/Z = 1,52$. У ядра ўрану $^{238}_{92}\text{U}$ — $N/Z = 1,59$. Такім чынам, чым больш пратонаў змяшчаецца ў ядры, тым больш лішковых нейтронаў неабходна для падтрымкі стабільнасці ядра. У той жа час лішак нейтронаў прыводзіць да павелічэння памераў ядра і ў выніку да памяншэння энергіі сувязі. Таму для элементаў з нумарам, большым за 83 ($Z > 83$), колькі б нейтронаў не было, стабільнасці дамагчыся немагчыма, паколькі павелічэнне колькасці нейтронаў не можа кампенсаваць узросшую сілу адштурхвання.

Да ўрану $^{238}_{92}\text{U}$ радыеактыўныя ядры існуюць у прыродзе, а з нумарамі $Z > 92$ атрыманы штучна.

Наўстойлівымі з'яўляюцца як ядры, у якіх пратонаў нашмат больш, чым нейтронаў, так і ядры, у якіх лік нейтронаў нашмат большы за лік пратонаў. Ядры з лішковым утрыманнем нейтронаў часта аказваюцца β^- -радыеактыўнымі.

Стабільнасць пэўнага нукліда залежыць таксама ад энергіі гэтага нукліда ў адносінах да іншых нуклідаў з такой жа колькасцю нуклонаў. Напрыклад, нукліды $^{24}_{11}\text{Na}$ і $^{24}_{12}\text{Mg}$ змяшчаюць аднолькавую колькасць нуклонаў, але суадносіна нейтронаў і пратонаў розныя $N/Z = 1$ і $N/Z = 1,18$. Таму атам $^{24}_{11}\text{Na}$ самаадвольна зведае β^- -распад і ператвараецца ў атам $^{24}_{12}\text{Mg}$.

Такім чынам, стабільнымі з'яўляюцца ядры, што валодаюць мінімальнай энергіяй у параўнанні з ядрамі, у якія дадзенае ядро магло б самаадвольна ператварыцца.

Многія нестабільныя ізатопы сустракаюцца ў прыродзе. Іх радыеактыўнасць называецца **натуральнай радыеактыўнасцю**. Стабільных ізатопаў вядома каля 270, штучных ізатопаў, якія атрымліваюцца на паскаральніках і рэактарах, вядома каля 3000. Іх радыеактыўнасць называецца **штучнай радыеактыўнасцю**.

Асноўны спосаб атрымання радыеактыўных ізатопаў — бамбардзіроўка стабільных ізатопаў часціцамі высокай энергіі. Для гэтай мэты выкарыстоўваюць пучкі пратонаў ці электронаў, разганяемых у паскаральніках, або нейтроны, якія атрымліваюцца ў ядзерных рэактарах.

► У прамысловасці радыеактыўныя ізатопы ўжываюць для даследавання карозіі і зносу, для вызначэння расхода розных матэрыялаў, скорасці і працягласці праходжання тэхналагічных працэсаў.

Гама-выпраменьванне знаходзіць шырокае прымяненне ў медыцыне, як у дыягнастычных мэтах, так і для лячэння захворванняў.

Беларускі фізік Уладзімір Рыгоравіч Барышэўскі (Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт) зрабіў шэраг адкрыццяў у ядзернай фізіцы, злучаных з праявай спінавых эфектаў нейтронаў, гама-квантаў, і з'яўляецца адным з заснавальнікаў ядзернай оптыкі палярызаваных асяроддзяў.



У 1903 г. Анры Бекерэль, П'ер Кюры і Марыя Складоўская-Кюры атрымалі Нобелеўскую прэмію па фізіцы. Бекерэль — у «знак прызнання выдатных заслуг, якія выразіліся ў адкрыцці самаадвольнай радыяцыі». П'ер Кюры і Марыя Складоўская-Кюры — «у знак прызнання... іх сумесных даследаванняў з'яў радыяцыі, адкрытых прафесарам Анры Бекерэлем».

У 1908 г. Э. Рэзерфарду была прысуджана Нобелеўская прэмія па хіміі «за праведзеныя ім даследаванні ў вобласці распаду элементаў у хіміі радыеактыўных рэчываў».

У 1911 г. Нобелеўскую прэмію па хіміі ўручылі Марыі Складоўскай-Кюры «за выдатныя заслугі ў развіцці хіміі: адкрыццё элементаў радыю і полонію, вылучэнне радыю і вывучэнне прыроды і злучэнняў гэтага выдатнага элемента».

У 1921 г. Фрэдэрыку Содзі была прысуджана Нобелеўская прэмія па хіміі «за ўклад у хімію радыеактыўных рэчываў». У 1938 г. Энрыка Фермі быў ганараваны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы «за выдатныя тэарэтычныя і эксперыментальныя адкрыцці ў вобласці ядзернай фізікі».

У 1945 г. В. Паўлі быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы «за адкрыццё прынцыпу забароны».

У 1995 г. Ф. Райнес быў ганараваны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы за адкрыццё электроннага антынейтрына.



1. Што называюць радыеактыўнасцю? Якія эксперыментальныя даныя сведчаць аб тым, што радыеактыўнасць — ядзерны працэс?
2. Якія нукліды называюць стабільнымі, а якія — радыеактыўнымі?
3. Пералічыце ўласцівасці і растлумачце прыроду α -, β - і γ -выпраменьвання.
4. Якое з трох тыпаў выпраменьванняў (α , β або γ) мае найбольшую пранікальную здольнасць?
5. Сфармулюйце і запішыце правілы зрушэння для α - і β -распаду. Ахарактарызуйце іх асаблівасці.
6. Ахарактарызуйце асаблівасці γ -выпраменьвання.



Практыкаванне 24

1. Ядро торыю ${}_{90}^{230}\text{Th}$ ператварылася ў ядро радыю ${}_{88}^{226}\text{Ra}$. Якую часціцу выпусціла ядро торыю?
2. Пакажыце, што самаадвольны распад ${}_{6}^{11}\text{C} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + {}_{1}^{1}\text{p}$ немагчымы, паколькі ў гэтым выпадку парушаўся б закон захавання энергіі.
3. Пакажыце, што ядро нукліда берылію ${}_{4}^{8}\text{Be}$ ($m_{\text{Be}} = 8,005308$ а. а. м.) нестабільнае і можа распасціся на дзве α -часціцы.
4. Пры бамбардзіроўцы нукліда алюмінію ${}_{13}^{27}\text{Al}$ α -часціцамі атрымліваецца радыеактыўны нуклід фосфару ${}_{15}^{30}\text{P}$, ядро якога затым распадаецца з вылучэннем пазітрона (${}_{+1}^{0}\text{e}$). Запішыце ўраўненні абедзвюх рэакцый.
5. Ядро кіслароду ${}_{8}^{19}\text{O}$ зведае β^{-} -распад. Запішыце ўраўненне рэакцыі.
6. Ядро палонію ${}_{84}^{210}\text{Po}$ зведае α -распад. Запішыце ўраўненне рэакцыі.



§ 39. Закон радыеактыўнага распаду

■ Пры ўсёй разнастайнасці рэакцый самаадвольнага (спантаннага) распаду ядзер у гэтым працэсе назіраецца агульная заканамернасць, якую можна апісаць матэматычна. Цікава, што залежнасць колькасці ядзер, што распаліся ад часу, задаецца адной і той жа функцыяй для розных ядзер, якія ўдзельнічаюць у распадзе. Пяройдзем да колькаснага апісання працэсаў радыеактыўнага распаду.

Большасць ізатопаў любога хімічнага элемента ператвараецца ў больш устойлівыя ізатопы шляхам радыеактыўнага распаду. Кожны радыеактыўны элемент распадаецца са сваёй, уласцівай толькі яму «скорасцю». Пры гэтым для кожнага радыеактыўнага ядра існуе характэрны час, які называецца *перыядам паўраспаду* $T_{1/2}$, пасля якога ў зыходным стане застаецца палова ядзер, што былі. Такім чынам, *перыядам паўраспаду* $T_{1/2}$ называецца *прамежак часу, за які распадаецца палова пачатковай колькасці N_0 радыеактыўных ядзер*. Другая палова ядзер ператвараецца ў больш устойлівыя ізатопы шляхам распаду.

Адзначым, што перыяд паўраспаду не залежыць ад таго, у якім стане знаходзіцца рэчыва: цвёрдым, вадкім ці газападобным. Акрамя таго, перыяд паўраспаду радыеактыўнага рэчыва не залежыць ад яго колькасці, часу, месца і ўмоў, у якіх яно знаходзіцца. Таму колькасць радыеактыўных ядзер «тады» N_1 і «цяпер» N_2 непасрэдна вызначае прамежак часу $\tau = t_2 - t_1$, які прайшоў з моманту памяншэння ліку ядзер ад N_1 да N_2 .

Немагчыма сапраўды прадказаць, калі адбудзецца распад дадзенага ядра. Аднак можна ацаніць сярэдні лік ядзер, якія распадуцца за дадзены прамежак часу. Такім чынам, закон радыеактыўнага распаду з'яўляецца статыстычным і ён справядлівы толькі пры досыць вялікай колькасці радыеактыўных ядзер.

Для запісу закону радыеактыўнага распаду будзем лічыць, што ў пачатковы момант часу ($t = 0$) лік радыеактыўных ядзер N_0 . Праз прамежак часу, роўны перыяду паўраспаду, гэты лік будзе $\frac{N_0}{2}$, яшчэ праз такі ж прамежак часу — $\frac{N_0}{4}$ (мал. 218). Праз прамежак часу, роўны n перыядам паўраспаду ($t = nT_{1/2}$), радыеактыўных ядзер застанеца:

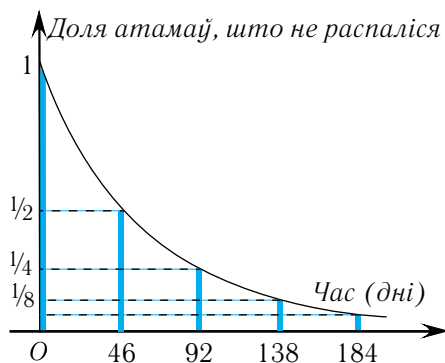
$$N(t) = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (1)$$

Гэта суадносіна выражае **закон радыеактыўнага распаду**, які можна сфармуляваць наступным чынам:

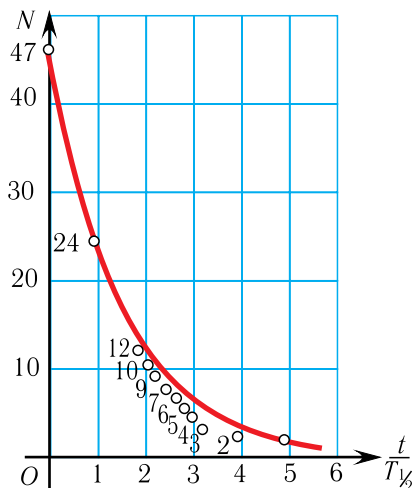
лік радыеактыўных ядзер, што не распаліся, памяншаецца з цягам часу па законе, зададзеным суадносінай (1).

Закон радыеактыўнага распаду дазваляе знайсці лік ядзер, што не распаліся, у любы момант часу. Атрыманы выраз добра апісвае распад радыеактыўных ядзер, калі іх колькасць дастаткова вялікая.

Прывядзём эксперыментальныя вынікі, якія паказваюць, што пры малой колькасці радыеактыўных ядзер гэты выраз непрымянімы. На малюнку 219 паказаны графік распаду 47 ядзер ізатопа фермію $^{256}_{100}\text{Fm}$, перыяд паўраспаду



Мал. 218. Радыеактыўны распад нукліда жалеза $^{59}_{28}\text{Fe}$



Мал. 219. Лік ядзер $^{256}_{100}\text{Fm}$, што не распаліся, у залежнасці ад часу

якога $T_{1/2} = 3,5$ г. З малюнка 219 бачна, што пакуль ядзер было дастаткова многа — ад 47 да 12, то паказальная функцыя добра апісвала закон распаду. Аднак пры меншым ліку ядзер сапраўдная залежнасць істотна адрозніваецца ад паказальнай функцыі.

Перыяды паўраспаду некаторых радыеактыўных ізатопаў рэчываў прыведзены ў табліцы 11.

Табліца 11. Перыяды паўраспаду радыеактыўных ізатопаў рэчываў

Рэчыва	Перыяд паўраспаду	Рэчыва	Перыяд паўраспаду
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30,17 года	$^{226}_{86}\text{Ra}$	1600 гадоў
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 года	$^{222}_{84}\text{Rn}$	3,8 сутак
$^{131}_{53}\text{I}$	8,04 сутак	$^{235}_{92}\text{U}$	700 млн гадоў
$^{239}_{94}\text{Pu}$	24 390 гадоў	$^{238}_{92}\text{U}$	4,5 млрд гадоў



► У 1943 г. венгерскаму вучонаму Д'ердзь фон Хевешы была прысуджана Нобелеўская прэмія па хіміі «за работу па выкарыстанні ізатопаў у якасці мечаных атамаў пры вывучэнні хімічных працэсаў».



1. У чым заключаецца закон радыеактыўнага распаду? Які характар гэтага распаду?
2. Што называюць перыядам паўраспаду радыеактыўнага рэчыва? Што ён характарызуе?
3. Колькі часу неабходна, каб распалася палова атамаў радыеактыўнага рэчыва?
4. Чаму на Зямлі дагэтуль не распаліся ўсе радыеактыўныя ядры?

Практыкаванне 25

1. За прамежак часу t пачатковая колькасць некаторага радыеактыўнага ізатопа паменшылася ў $k_1 = 2,0$ разы. У колькі k_2 разоў яна паменшыцца за прамежак часу $t_1 = 2t$?

2. Якая доля ядзер ізатопа германію $^{68}_{32}\text{Ge}$ з перыядам паўраспаду $T_{1/2} = 270$ сут захаваецца праз прамежак часу $t = 4,5$ года?
3. Перыяд паўраспаду стронцыю $^{90}_{38}\text{Sr}$ $T_{1/2} = 29$ гадоў. Колькі часу спатрэбіцца для таго, каб ад узору масай $m = 1,0$ г засталася $(1/32)$ г.
4. Вызначыце лік атамаў, якія змяшчаюцца ў свінцы $^{210}_{82}\text{Pb}$ масай $m = 0,632$ г. Колькі атамаў застанецца праз $\Delta t = 95$ гадоў, калі перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 19$ гадоў?
5. Вызначыце масу m_1 радыеактыўнага рэчыва, што не распалася праз суткі, калі спачатку яго маса была $m = 1,0$ кг. Перыяд паўраспаду рэчыва $T_{1/2} = 12$ гадзін.



§ 40. Дзяленне цяжкіх ядзер. Ланцуговя ядзерныя рэакцыі

Адкрыццё дзялення ўрану азначала з'яўленне новага віду паліва — самой масы матэрыі.

Д. Юз

Асобае месца сярод ядзерных рэакцый займаюць ланцуговя ядзерныя рэакцыі дзялення, якія прывялі да стварэння, з аднаго боку, новых крыніц энергіі, а з другога — да з'яўлення новага тыпу зброі, якая мае каласальную магутнасць. Высветлім асноўныя заканамернасці дадзенага тыпу рэакцый і ўмовы іх узнікнення.



Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, называецца энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі.

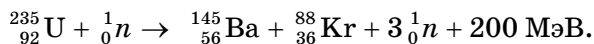
Асобы тып ядзерных рэакцый складаюць ядзерныя рэакцыі дзялення элементаў, размешчаных у канцы перыядычнай сістэмы хімічных элементаў. У выніку такіх рэакцый вылучаецца велізарная колькасць энергіі. Чаму гэта адбываецца?

Звернемся да графіка, паказанага на малюнку 211 (§ 37). Для цяжкіх ядзер, напрыклад такіх як $^{235}_{92}\text{U}$, энергія сувязі, што прыпадае на нуклон, складае велічыню 7,6 МэВ. Калі рухацца ўздоўж крывой на графіку залежнасці энергіі сувязі ад $^{235}_{92}\text{U}$ да месца, дзе знаходзяцца ядры хімічных элементаў з сярэдзіны перыядычнай сістэмы элементаў Мендзялеева, то бачна, што энергія сувязі нарастае ад ~7,5 МэВ да ~8,8 МэВ на нуклон.

Такім чынам, пры дзяленні цяжкага ядра на 2—3 больш легкія асколкі энергія сувязі, якая прыпадае на кожны нуклон, павялічваецца на велічыню парадку 1 МэВ. Паводле закону захавання энергіі такая ж колькасць энергіі вылучаецца пры дзяленні ядра. Такім чынам, падчас ядзернай рэакцыі, якая прыводзіць да з'яўлення ядзер з большай удзельнай энергіяй сувязі, павінна вылучацца энергія. Лік нуклонаў у кожным ядры ўрану роўны $N = 235$. Такім чынам, рэакцыя дзялення аднаго ядра прыводзіць да вылучэння каля 200 МэВ энергіі. Нават улічваючы разнастайныя страты, гэты лік непараўнальны з энергіяй $\sim 1\text{—}5$ эВ, вылучаемай у хімічных рэакцыях акіслення (гарэння паліва).

Такія вывады знайшлі сваё пацверджанне падчас шматлікіх эксперыментаў у першай палове XX ст. Асноўнае пытанне было ў тым, як прымусіць ядро дзяліцца. Бамбардзіроўка α -часціцамі ці пратонамі неэфектыўная з прычыны іх моцнага адштурхвання ядром. Электроны — занадта лёгкія «снарады». Выбар упаў на нейтроны. Яны дастаткова цяжкія (у параўнанні з электронамі) і ў той жа час электрычна нейтральныя. З прычыны гэтага нейтроны могуць бесперашкодна падлятаць да ядра-мішэні, рухаючыся з найменшай скорасцю. Патрапіўшы ў сферу дзеяння ядзерных сіл прыцягнення, нейтрон пранікае ў ядро.

У 1938 г. нямецкія радыехімікі Ота Ган, Фрыц Штрасман, Лізе Мэйтнер, Ота Фрыш упершыню ажыццявілі рэакцыю дзялення $^{235}_{92}\text{U}$ нейтронамі:



Адзначым, што сама ідэя дзялення ядра была такой незвычайнай, што навуковы свет спачатку не ўспрыняў вынікі іх эксперыментаў. І толькі праз некаторы час было ўсвядомлена, што ядро ўрану распадаецца галоўным чынам на два асколкі. У выніку дзялення могуць утварыцца розныя радыеізатопы. У большасці выпадкаў ядро дзеліцца на няроўныя асколкі (ядры): масавы лік большага ядра вагаецца ў межах ад 135—145, а меншага — ад 90—100. У кожным акце дзялення ядра ўрану вызваляюцца 2—3 нейтроны. Кінетычная энергія асколкаў, якія разлятаюцца, складае велічыню ~ 165 МэВ, а астатняя частка энергіі прыпадае на нейтроны і гама-кванты. Дадзеная рэакцыя паказана на малюнку 220.

У 1940 г. савецкія фізікі Георгій Флёраў і Канстанцін Пятржак выявілі новы від радыеактыўных ператварэнняў — спонтаннае дзялен-

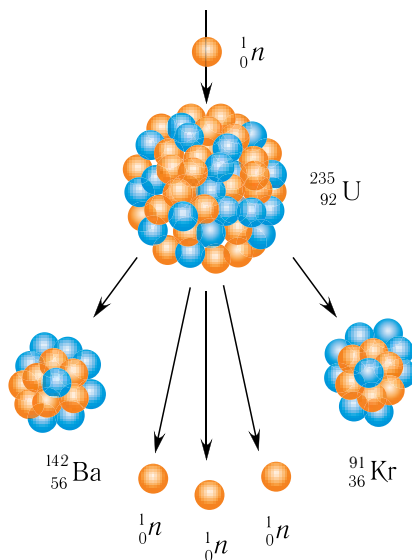
не ядзер урану $^{238}_{92}\text{U}$. У працэсе дзялення ўтвараюцца асколкі — ізаотпы элементаў сярэдзіны перыядычнай сістэмы са значэннямі Z ад 34 (ізаотп селену $^{74}_{34}\text{Se}$) да 67 (ізаотп гольмію $^{162}_{67}\text{Ho}$).

Новая з’ява была названа *дзяленнем ядра* з-за падабенства з дзяленнем клеткі ў біялогіі. Найбольш верагодным з’яўляецца дзяленне ядра на два асколкі. Адносіна іх мас складае прыкладна 3 : 2. Верагоднасць дзялення на тры асколкі складае велічыню 10^{-2} — 10^{-8} ад верагоднасці дзялення на два. Рэакцыі дзялення ядзер звычайна з’яўляюцца экзэнергетычнымі з вылучэннем энергіі ~ 200 МэВ у кожным акце рэакцыі.

Пры дзяленні ядра ўрану адзін нейтрон выклікае дзяленне аднаго ядра. Два асколкі дзялення, ужо не злучаныя магнутымі, але караткадзеючымі ядзернымі сіламі, з вялікімі скарасцямі разлятаюцца за кошт сіл электростатычнага адштурхвання. Сумарная кінетычная энергія асколкаў ($E \approx 170$ МэВ) складае асноўную долю ўсёй энергіі, вызваляемай пры дзяленні ядра ($E \approx 200$ МэВ).

З’яўленне асколкаў — не адзіны вынік дзялення ядра. Пачатковая адносіна ліку нейтронаў да ліку пратонаў у ядры-асколку прыкметна большая за значэнне гэтай велічыні для стабільных ядзер параўнальнай масы.

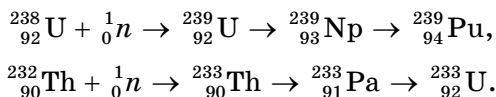
За кожны акт дзялення ядра ўтвараюцца ў сярэднім 2—3 новыя нейтроны, кожны з энергіяй у сярэднім $E \sim 2$ МэВ ($v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$). Яны выпускаюцца ядром урану адразу пасля дзялення і называюцца *імгненнымі*. Асколкі, што ўтварыліся, з’яўляюцца β^- -радыеактыўнымі. Таму пасля шэрага іх β^- -распадаў яны ператвараюцца ў стабільныя ізаотпы. Часцей за ўсё даччынае ядро, якое ўтварылася пасля β^- -распаду, аказваецца ўзбуджаным і пераходзіць у асноўны энергетычны стан з выпусканнем γ -кванта або нейтрона, што выпускаюцца праз некалькі мінут пасля дзялення ядра і называюцца *запазняльнымі*. Такія нейтроны складаюць каля 0,75 % утвораных нейтронаў.



Мал. 220. Рэакцыя дзялення ядра $^{235}_{92}\text{U}$ пад дзеяннем нейтрона



Уран $^{238}_{92}\text{U}$ і торый $^{232}_{90}\text{Th}$, якія выкарыстоўваюцца ў якасці сыравіны для атрымання штучнага паліва, пачынаюць дзяліцца пры энергіі нейтронаў, вышэйшай за 1 МэВ:



Асаблівасць ізатопаў $^{233}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{239}_{94}\text{Pu}$ заключаецца ў тым, што яны дзяляцца цеплавымі нейтронамі. У гэтым і заключаецца сэнс тэрміна «які дзеліцца».

Паколькі дзяленне ядзер выклікаюць нейтроны, а ў выніку дзялення зноў нараджаюцца нейтроны, то пры пэўных умовах працэс, пачаўшыся аднойчы з аднаго нейтрона, можа прыняць характар *ланцуговай рэакцыі*: за адным дзяленнем пойдучь следам іншыя і г. д.

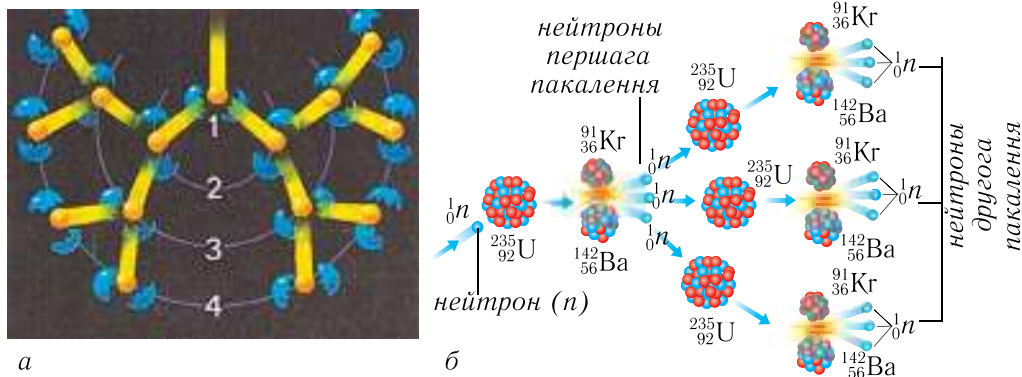
Ядзерная рэакцыя дзялення, у якой часціцы (нейтроны), што выклікаюць рэакцыю, утвараюцца і як прадукты гэтай жа рэакцыі, называецца **ланцуговай**.

Якія ж умовы неабходны для ланцуговых ядзерных рэакцый?

З прычыны вялікай пранікальнай здольнасці нейтронаў і з-за канчатковых памераў зоны (актыўнай зоны), у якой знаходзіцца рэчыва, што дзеліцца, многія з нейтронаў пакідаюць яе, і ланцуговая рэакцыя не адбываецца. Таму для ажыццяўлення ланцуговай рэакцыі вызначальнае значэнне маюць памеры зоны, якую называюць *актыўнай*, у якой адбываецца рэакцыя. Мінімальныя памеры актыўнай зоны, пры якіх магчыма ажыццяўленне ланцуговай ядзернай рэакцыі, называюцца *крытычнымі* памерамі. Ад чаго ж залежаць гэтыя памеры?

Крытычныя памеры залежаць ад прыроды рэчыва, якое дзеліцца, яго формы. Чым большыя памеры актыўнай зоны, тым вышэй верагоднасць паглынання ўнутры яе нейтронаў. Для ўрану $^{235}_{92}\text{U}$ меншая верагоднасць вылету нейтронаў за межы зоны да іх паглынання, г. зн. яе памеры будуць меншымі, чым для зоны з $^{238}_{92}\text{U}$. Акрамя таго, памер зоны будзе меншы з прычыны таго, што для расшчаплення $^{235}_{92}\text{U}$ можна выкарыстоўваць павольныя нейтроны.

Крытычныя памеры паменшацца, калі вакол актыўнай зоны змясціць запавольнік (графіт, вадзю), паколькі нейтроны, якія вылятаюць з яе, будуць адбівацца ад яго і вяртацца назад у яе. Эфектыўнасць іх адбіцця значна павялічваецца пры таўшчыні адбівальніка, якая перавышае сярэднюю даўжыню прабега нейтронаў у ім.



Мал. 221. *a* — ланцуговая рэакцыя дзялення (1 — першасны нейтрон (першае пакаленне), 2 — другое пакаленне, 3 — трэцяе пакаленне); *б* — схема рэакцыі

Ацэнім крытычную масу рэчыва, што дзеліцца, у такой зоне. Найменшыя памеры і масу мае рэчыва шарападобнай формы, паколькі для яго адносіна плошчы паверхні да аб'ёму мінімальныя. радыус шара павінен быць большы за даўжыню прабегу нейтрона да сутыкнення з ядром. Тады крытычную масу ўрану $^{235}_{92}\text{U}$ можна ацаніць, і яна складае прыкладна 48 кг. Пры шчыльнасці ўрану $1,895 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ радыус шара такой масы роўны прыкладна 8,5 см. Для ізатопа плутонію $^{239}_{94}\text{Pu}$ крытычная маса складае ўжо 17 кг, што адпавядае шару радыусам 6,0 см.

Нанава ўтвораныя пры ядзернай рэакцыі дзялення два ці тры нейтроны выклічуць дадатковыя акты дзялення, таму працэс будзе лавінападобна нарастаць (мал. 221).

Так запускаецца ланцуговая рэакцыя дзялення, пры якой нанава ўтвораныя нейтроны выклікаюць працэс дзялення новых ядзер, падобна таму, як пастаўленыя ў шэраг косці даміно «завальваюцца адна на адну».

Падобнае некантралюемае (некіруемае) развіццё ланцуговай рэакцыі прыводзіць да вызвалення каласальнай колькасці энергіі за вельмі кароткі прамежак часу. Менавіта такія працэсы адбываюцца пры ядзерным выбуху (мал. 222).

Колькасць нейтронаў, якія ўзнікаюць у адным акце дзялення, называецца *пакаленнем* нейтронаў.



Мал. 222. Ядзерны выбух

Колькаснай характарыстыкай ланцуговай рэакцыі дзялення з'яўляецца каэфіцыент размнажэння нейтронаў:

$$k = \frac{n_2}{n_1},$$

дзе n_2 — лік нейтронаў у дадзеным пакаленні, n_1 — лік нейтронаў у папярэднім пакаленні. Калі каэфіцыент размнажэння $k = 1$, то лік нейтронаў у ім увесь час застаецца нязменным. Пры $k > 1$ агульны лік нейтронаў у рэактары павялічваецца з цягам часу і магчыма іх некантралюемае размнажэнне, што прыводзіць да выбуху. Пры $k < 1$ лік нейтронаў памяншаецца, і рэакцыя з цягам часу спыняецца.

Нейтроны могуць паглынацца рознымі прымесямі, пакідаць абсяг, у якім адбываецца рэакцыя, губляць сваю энергію ў выніку вялікага ліку актаў рассеявання. З улікам усіх магчымых страт каэфіцыент размнажэння k павінен быць большы за адзінку для ланцуговай ядзернай рэакцыі.

Ланцуговая ядзерная рэакцыя будзе *самападтрымліваемай*, калі колькасць нейтронаў у кожным наступным пакаленні не памяншаецца.

Такім чынам, для ланцуговых самападтрымліваемых ядзерных рэакцый неабходны наступныя ўмовы:

- 1) неабходна мець мінімальную колькасць рэчыва, каб нейтроны паспелі ўзбудзіць ядро да выхаду з абсягу, які займае рэчыва, што дзеліцца;
- 2) энергія нейтронаў, што ўзнікаюць пры дзяленні, павінна быць дастатковай, каб выклікаць дзяленне ядзер;
- 3) каэфіцыент размнажэння нейтронаў $k > 1$;
- 4) адсутнасць прымесей, паглынаючых утвораныя нейтроны.

► Ядзернае «паліва» ў атамнай бомбе ўтрымліваецца ў выглядзе аддзеленых адна ад адной порцый дакрытычнай масы. Звычайны (трацілавы) выбух злучае гаручае ў адзіны ўзор, маса якога перавышае крытычную. Пасля гэтага праз нікчэмна малы час адбываецца ядзерны выбух.

Ланцуговая ядзерная рэакцыя ўпершыню была ажыццёўлена ў ЗША Энрыка Фермі ў 1942 г., у СССР — Ігарам Курчатавым у 1946 г.

Назваваючы энергію, якая вылучаецца пры дзяленні ядра, атамнай, мы робім двайную памылку. Па-першае, дзеліцца не атам, а ядро, а па-другое, выраз «атамная энергія» ў літаральным сэнсе азначае «энергія непадзельнага». Правільна яе называць ядзернай энергіяй.



1. Што называюць дзяленнем ядра? У чым заключаюцца асаблівасці гэтага працэсу?
2. Як растлумачыць здольнасць цяжкіх ядзер да дзялення? Чаму пры дзяленні ядзер адбываецца вылучэнне энергіі?
3. Апішыце механізм дзялення ядра ўрану і запішыце ўраўненне дадзенай ядзернай рэакцыі.
4. Што называюць ланцуговай ядзернай рэакцыяй? Дзякуючы чаму аказалася магчымым існаванне ланцуговай ядзернай рэакцыі дзялення?
5. Пакажыце графічна і растлумачце працэсы, якія адбываюцца пры ланцуговай рэакцыі ва ўране ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Практыкаванне 26

Вызначыце энергетычны выхад рэакцый:

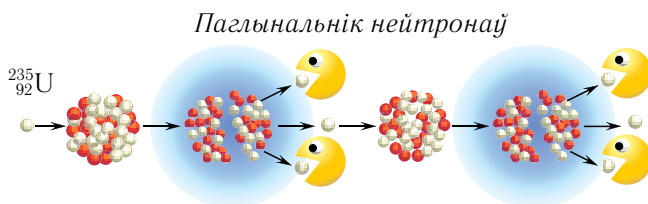
- а) ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{56}^{145}\text{Ba} + {}_{36}^{88}\text{Kr} + 3{}_0^1n$; б) ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{54}^{140}\text{Xe} + {}_{38}^{94}\text{Sr} + 2{}_0^1n$;
 в) ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{37}^{96}\text{Rb} + {}_{55}^{137}\text{Cs} + 3{}_0^1n$; г) ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{35}^{87}\text{Br} + {}_{57}^{146}\text{La} + 3{}_0^1n$.

Масы ізатопаў (а. а. м.): ${}_{56}^{145}\text{Ba} - 144,92763$; ${}_{36}^{88}\text{Kr} - 87,91445$;
 ${}_{54}^{140}\text{Xe} - 139,92164$; ${}_{38}^{94}\text{Sr} - 93,91536$; ${}_{37}^{96}\text{Rb} - 95,93427$; ${}_{55}^{137}\text{Cs} - 136,90709$;
 ${}_{35}^{87}\text{Br} - 86,92071$; ${}_{57}^{146}\text{La} - 145,92579$.

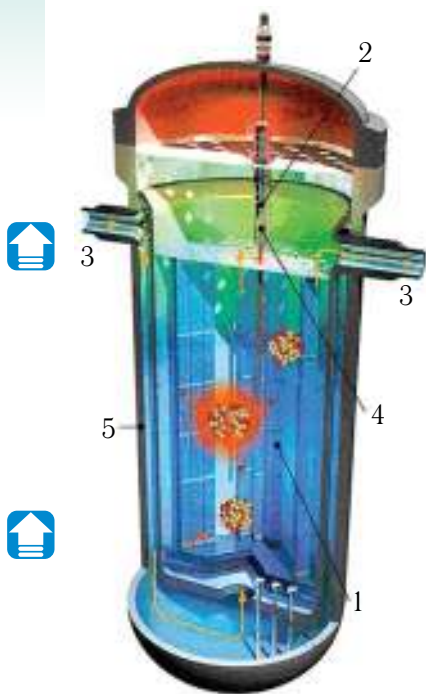
§ 41. Ядзерны рэактар

Для рэалізацыі кіруемай ланцуговай рэакцыі створаны асобыя прылады — ядзерныя рэактары, якія дазваляюць атрымліваць электраэнергію ў прамысловых маштабах. Як гэта адбываецца? Якую будову мае ядзерны рэактар? Якія праблемы ён стварае для навакольнага асяроддзя?

Ланцуговая рэакцыя можа быць кіруемай і некіруемай (ядзерны выбух). Для кіравання ланцуговай рэакцыяй неабходна вельмі дакладна кантраляваць працэс размнажэння нейтронаў з дапамогай паглынальнікаў нейтронаў (мал. 223), робячы яго такім, каб лік нейтронаў у працэсе рэакцыі заставаўся практычна нязменным.



Мал. 223. Кантралюемая ядзерная рэакцыя ў ядзерным рэактары



Мал. 224. Схема ядерного реактора: 1 — активна зона з паливом; 2 — затвор (звичайна, важка вага); 3 — система відводу теплоти; 4 — стержні керування реакцією; 5 — корпус

Визначальну роль у керуванні ланцюговими ядерними реакціями у реакторах адыгрываюць *запавольныя нейтронаы*. Іх сярэдні час жыцця для $^{235}_{92}\text{U}$ складае некалькі секунд. Гэта дае магчымасць для маніпулявання кіруючымі стержнямі з мэтай падтрымкі каэфіцыента размнажэння нейтронаў $k = 1$.

Ядзерны рэактар — гэта прылада, у якой адбываецца кіруемая ланцюговая ядзерная рэакцыя дзялення ядер цяжкіх элементаў пад дзеяннем нейтронаў (мал. 224). Падчас рэакцыі вызваляецца энергія, якую можна выкарыстоўваць для вытворчасці электрычнай энергіі.

Ядзерны рэактар мае пяць асноўных складаных частак, паказаных на малюнку 224. Спрошчаная (функцыянальная) схема ядзернага рэактара прыведзена на малюнку 225.

1. *Актыўная зона*, якая ўтрымлівае ядзернае гаручае, змешчанае ў асобых цеплавылучаючых элементах, ці *цвэлах* (па першых літарах словазлучэння). Цвэлы ўяўляюць сабой вельмі доўгія трубка, якія праходзяць праз усю актыўную зону рэактара. Менавіта ў іх адбываецца ланцюговая рэакцыя. Актыўная зона акружана адбівальнікам нейтронаў, які вяртае іх унутр актыўнай зоны для працягу рэакцыі. Добрым адбівальнікам нейтронаў з'яўляецца берылій.

У якасці ядзернага гаручага выкарыстоўваюцца тры віды радыеактыўных ізатопаў: урану $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ і плутонію $^{239}_{94}\text{Pu}$.

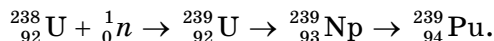
2. *Запавольнік хуткіх нейтронаў* (графіт, звычайная і цяжкая вада, берылій, аксід берылію, гідрыды металаў, арганічныя вадкасці). Сярэдняя энергія нейтронаў, якія з'яўляюцца ў рэактары, каля $E \sim 2$ МэВ. Калі энергія нейтронаў меншая за $E \sim 0,1$ эВ, то іх называюць *цеплавымі*, паколькі іх скорасці блізкія да скорасці цеплага руху, модуль якой $2,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Калі энергія нейтронаў большая за 0,1 МэВ,

а модуль іх скорасці $\sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, то нейтроны называюць *хуткімі*. Прамежжавы абсяг энергій належыць прамежжавым (рэзанансным) нейтронам. Запавольнік эфектыўна адбірае энергію ад хуткіх нейтронаў, якія нараджаюцца ў рэакцыі дзялення. (Успомніце сутыкненне двух цел аднолькавай масы.) Нейтроны запавольваюцца (адсюль і назва рэчыва — запавольнік) да энергій парадку доляў электронвольта.

Пад дзеяннем павольных (цеплавых) нейтронаў дзеліцца толькі даволі рэдкі ў прыродзе ізатоп урану $^{235}_{92}\text{U}$, у той час як значна больш распаўсюджаны ізатоп $^{238}_{92}\text{U}$ паглынае цеплавые нейтроны без дзялення на асколкі. Пры кожным акце дзялення $^{235}_{92}\text{U}$ вылучаецца ў сярэднім $W = 170$ МэВ у выглядзе кінетычнай энергіі асколкаў, што разлятаюцца. Ізатопы $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{233}_{92}\text{U}$, што дзеляцца пад дзеяннем цеплавых нейтронаў, у прыродзе не сустракаюцца і атрымліваюцца штучна.

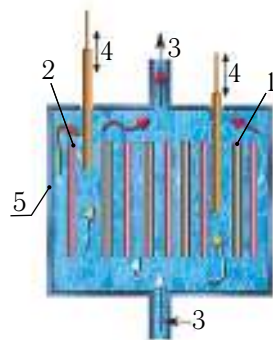
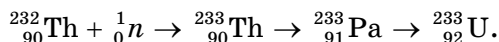
У рэактарах на хуткіх нейтронах выкарыстоўваюцца *ўрана-плутоніевы* цыкл, у якім ядро $^{238}_{92}\text{U}$ ператвараецца ў ядро $^{239}_{94}\text{Pu}$, і *торыевы* цыкл, у якім ядро $^{230}_{90}\text{Th}$ ператвараецца ў ядро $^{233}_{92}\text{U}$.

Ядры ізатопа $^{238}_{92}\text{U}$ могуць дзеляцца толькі пад дзеяннем хуткіх нейтронаў. Аднак асноўнай рэакцыяй пры ўзаемадзеянні з нейтронамі з'яўляецца захоп нейтрона, пасля якога яны самаадвольна ператвараюцца ў ядры ізатопа плутонію $^{239}_{94}\text{Pu}$:



Атрыманы ізатоп $^{239}_{94}\text{Pu}$ з'яўляецца практычна стабільным, паколькі яго перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 24\,400$ гадоў. Плутоній $^{239}_{94}\text{Pu}$ па здольнасці да ўзаемадзеяння з нейтронамі падобны да ізатопа ўрану $^{235}_{92}\text{U}$. Пры захопе нейтрона ядро плутонію дзеліцца і выпускае ў сярэднім 2—3 нейтроны, здольныя падтрымліваць развіццё ланцуговай рэакцыі.

Пад дзеяннем хуткіх нейтронаў ядро ізатопа торыю $^{232}_{90}\text{Th}$ таксама самаадвольна зведае ланцужок распадаў, ператвараючыся ў ядро ізатопа $^{233}_{92}\text{U}$:



Мал. 225. Схема актыўнай зоны рэактара: 1 — актыўная зона з цвяламі; 2 — запавольнік (вада); 3 — сістэма адводу цепланосьбіта; 4 — стрыжні кіравання рэакцыяй; 5 — ахоўны корпус

Ізатоп урану $^{233}_{92}\text{U}$ таксама з'яўляецца практычна стабільным, паколькі яго перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 162\,000$ гадоў, але ён дзеліцца цеплавымі нейтронамі.

Такім чынам, захоп хуткіх нейтронаў ізатопамі $^{238}_{92}\text{U}$ і $^{232}_{90}\text{Th}$ дазваляе ажыццяўляць узнаўленне ядзернага гаручага $^{239}_{94}\text{Pu}$ і $^{233}_{92}\text{U}$.

Ядзерны рэактар на хуткіх нейтронах выконвае адначасова дзве функцыі — вытворчасць энергіі і ўзнаўленне ядзернага гаручага. Менавіта таму ён называецца яшчэ рэактарам-размнажальнікам (брыдарам). Акрамя таго, у ім можна выкарыстоўваць у якасці гаручага не толькі рэдкі ў прыродзе ізатоп урану $^{235}_{92}\text{U}$, але і значна больш распаўсюджаны ізатоп урану $^{238}_{92}\text{U}$.

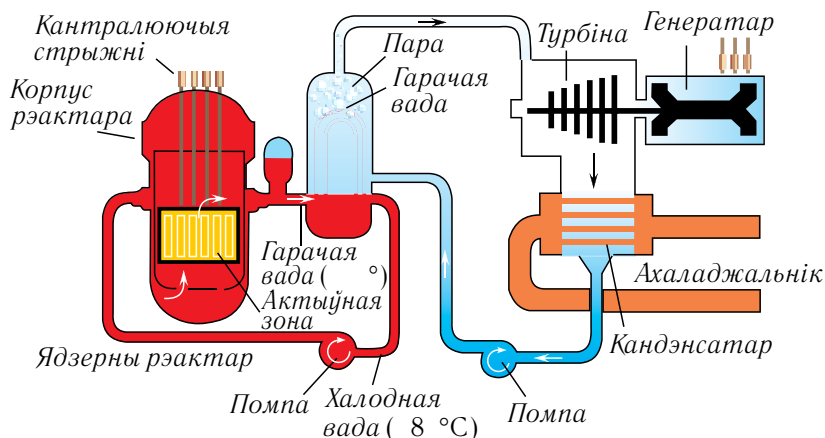
У сувязі з тым, што запасы радыеактыўных ізатопаў, якія натуральна дзеляцца, абмежаваны, магчымасць ажыццяўлення працэсаў вытворчасці ядзернага гаручага $^{239}_{94}\text{Pu}$ і $^{233}_{92}\text{U}$ у рэактарах на хуткіх нейтронах мае прынцыповы характар для будучыні ядзернай энергетыкі. Акрамя таго, ядзерныя рэактары на цеплавых нейтронах здольны «спаліць» толькі (0,5—1) % урану $^{235}_{92}\text{U}$. Прымяненне рэактара-размнажальніка дазваляе павялічыць эфектыўнасць выкарыстання гаручага ў дзясяткі разоў.

3. *Сістэма ахалоджвання* — цепланосьбіт (для адводу з актыўнай зоны рэактара вылучанай у ёй энергіі) — вада, газы, вадкі натрый. Вада награваецца сценкамі цэлаў да тэмпературы $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ і пад ціскам парадку $p \sim 10^7$ Па (100 атм) выводзіцца з актыўнай зоны. Далей вада ператвараецца ў пару і накіроўваецца да паравых турбін для генерацыі электрычнай энергіі.

4. *Сістэма рэгулявання* — прылада для забеспячэння магчымасці кіравання ланцуговай рэакцыяй. У сістэме рэгулявання выкарыстоўваюцца паглынальнікі (стрыжні) з бору, г. зн. рэчыва, якое актыўна паглынае нейтроны.

Калі стрыжні з паглынальнікам увесці ў актыўную зону, то каэфіцыент размнажэння нейтронаў памяншаецца. І, наадварот, вывадзенне стрыжняў з актыўнай зоны павялічвае каэфіцыент размнажэння. Гэтым і дасягаецца кіраванне рэакцыяй. Звычайна гэта робіцца аўтаматычна. У няштатных сітуацыях прадугледжана экстранае спыненне ланцуговай рэакцыі, якое ажыццяўляецца скіданнем у актыўную зону спецыяльных аварыйных стрыжняў (стрыжняў бяспекі).

5. *Сістэма бяспекі* — абалонка з бетону з жалезным напаўняльнікам (для абароны навакольнай прасторы ад іанізуючага выпраменьвання кампанентаў паліва і прадуктаў ядзернай рэакцыі).



Мал. 226. Дыяграма, якая паказвае работу атамнай электрастанцыі з герметычным вадзяным контурам ахаладжвання

Ядзерныя рэактары адрозніваюцца па тыпе выкарыстоўваемага ядзернага гаручага, запавольніка і цепланосьбіта.

Выпрацоўка электраэнергіі, заснаваная на выкарыстанні кіруемай ядзернай рэакцыі, ажыццяўляецца на атамных электрастанцыях (АЭС) (мал. 226).

Перавагі атамных электрастанцый:

- 1) не спажываюць кісларод і арганічнае паліва;
- 2) не забруджваюць навакольнае асяроддзе попелам, серай і іншымі прадуктамі згарання арганічнага паліва.

Небяспечныя фактары ўздзеяння АЭС на навакольнае асяроддзе:

- 1) радыеактыўныя адходы;
- 2) радыеактыўнае забруджванне мясцовасці;
- 3) небяспека экалагічных катастроф;
- 4) парушэнне цеплавога балансу ў наваколлі АЭС.

Усім вядома Чарнобыльская катастрофа, якая адбылася на 4-м блоку Чарнобыльскай атамнай станцыі ў красавіку 1986 г. У выніку парушэння тэхналагічных працэсаў адбылося пераграванне актыўнай зоны. Выбух, які адбыўся пасля гэтага, разбурыў абалонку рэактара. Вялікая колькасць радыеактыўных рэчываў была выкінута ў атмасферу. Кароткачасоваму забруджванню кароткажывучымі ізатопамі падвергліся велізарныя тэрыторыі. Доўгачасовае забруджванне зрабіла немагчымымі для пражывання тысячы квадратных кіламетраў тэрыторыі Беларусі, Расіі і Украіны, дзе выпалі найбольш небяспечныя нукліды стронцыю $^{90}_{38}\text{Sr}$ (перыяд паўраспаду 27,7 года) і цэзію $^{137}_{55}\text{Cs}$ (перыяд паўраспаду каля

30 гадоў). Нуклід $^{90}_{38}\text{Sr}$ адкладаюцца ў касцявых тканках і касцявым мозгу — органе крыватварэння, што можа прывесці да развіцця рака крыві (лейкеміі) і касцей. Нуклід $^{137}_{55}\text{Cs}$, якія трапляюць у арганізм галоўным чынам праз стрававальны тракт і дыхальныя шляхі, назапашваюцца ў асноўным у шкільных мышцах, выпускае γ -выпраменьванне, якое наносіць значныя пашкоджанні арганізму.

▶ Першая ў свеце атамная электрастанцыя была пабудавана ў СССР у г. Обнінску і дала ток 27 чэрвеня 1954 г. Першая ў Беларусі атамная электрастанцыя пабудавана ў паўночна-заходняй частцы краіны паблізу ад горада Астравец Гродзенскай вобласці. Яе праектная магутнасць з двума энергаблокамі складае 2,4 ГВт.



1. Што называюць ядзерным рэактарам? Што з'яўляецца ядзерным гаручым у рэактарах?
2. Якое рэчыва выступае запавольнікам нейтронаў у ядзерных рэактарах? Для чаго патрэбен запавольнік?
3. Што выкарыстоўваюць у якасці цепланосьбіта ў ядзерных рэактарах?
4. Як ажыццяўляецца кіраванне ланцуговай рэакцыяй дзялення?
5. Што выкарыстоўваецца ў сістэме біялагічнай абароны ад патоку нейтронаў і γ -выпраменьвання, якія ўзнікаюць у рэактары?
6. У чым заключаюцца перавагі выкарыстання атамных электрастанцый у параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі?
7. У чым заключаюцца асноўныя недахопы ядзернай энергетыкі?

§ 42. Рэакцыі ядзернага сінтэзу

■ У нетрах зорак, якія свецяцца (у тым ліку і Сонца), «бушуюць» ядзерныя рэакцыі сінтэзу, якія прыводзяць да вылучэння энергіі з іх паверхні ў выглядзе выпраменьвання. Энергетычная праблема будучыні на нашай планеце (з улікам абмежаванасці запасаў вугалю, нафты і газу) можа быць вырашана за кошт стварэння кіруемай рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу, у якой будуць скарыстаны воды Сусветнага акіяна.

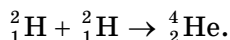
Нягледзячы на тое што атамныя электрастанцыі экалагічна больш чыстыя ў параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі, у ядзернай энергетыкі ёсць істотныя недахопы. Па-першае, радыеактыўныя элементы (уран і торый) складаюць $\sim (3 - 8) \cdot 10^{-4} \%$ па масе ў зямной кары і іх здабыча ўсё больш ускладняецца. Па-другое, што рабіць з радыеактыўнымі адходамі, колькасць якіх увесь час нарастае?

Гэтых недахопаў можна пазбегнуць, калі для атрымання энергіі выкарыстоўваць не рэакцыі дзялення цяжкіх ядзер, а рэакцыі сінтэзу лёгкіх ядзер.

Гэтыя рэакцыі эфектыўна працякаюць пры звышвысокіх тэмпературах $T \sim 10^9 \text{ K}$ і самападтрымліваюцца за кошт значнага вылучэння ў іх энергіі. Такія рэакцыі называюцца **тэрмаядзернымі**. Прычына вылучэння энергіі тая ж, што і ў выпадку рэакцый дзялення — удзельная энергія сувязі прадуктаў рэакцыі вышэйшая, чым у зыходных матэрыялах.

Энергія спакою двух лёгкіх ядзер большая, чым ва ўтворанага з іх выніковага ядра. Паколькі выніковае ядро мае меншую масу, то пры яго ўтварэнні павінна вызваляцца энергія $Q = \Delta mc^2$.

Найпрасцейшым прыкладам тэрмаядзернай рэакцыі з'яўляецца пераўтварэнне дэйтэрыю ${}^2_1\text{H}$ у гелій ${}^4_2\text{He}$:



Масавы лік ядра дэйтэрыю ${}^2_1\text{H}$ $m_{\text{H}} = 2,01355 \text{ а. а. м.}$, масавы лік ядра гелію ${}^4_2\text{He}$ $m_{\text{He}} = 4,00150 \text{ а. а. м.}$ У выніку рэакцыі сінтэзу дэфект мас:

$$\Delta m = m_{\text{He}} - 2m_{\text{H}} = 4,00150 \text{ а. а. м.} - 2 \cdot 2,01355 \text{ а. а. м.} = -0,0256 \text{ а. а. м.}$$

Гэта складае 0,63 % агульнай масы ядзер вадароду. У той час як пры дзяленні ўрану дэфект мас складае 0,056 %. Такім чынам, для адной і той жа масы рэчыва пры ядзерным сінтэзе вылучаецца прыкладна ў 10 разоў больш энергіі, чым пры дзяленні ядра. Калі б гэты працэс атрымалася выкарыстаць для вытворчасці энергіі, то ён апынуўся б у 10 раз больш эфектыўным за працэс дзялення ўрану.

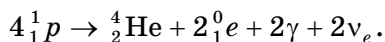
Асноўная перавага выкарыстання ядзернага сінтэзу для атрымання энергіі заключаецца, перш за ўсё, у колькасці запасаў паліва. Для чалавецтва было б вельмі зручна, калі б для рэакцыі сінтэзу патрабаваўся найбольш часта сустракаемы ізатоп вадароду ${}^1_1\text{H}$. Аднак для рэакцыі сінтэзу яго неабходна нагрэць да велізарнай тэмпературы. Дэйтэрый ${}^2_1\text{H}$ уступае ў рэакцыю сінтэзу пры больш нізкай тэмпературы, чым ізатоп вадароду ${}^1_1\text{H}$, а трытый ${}^3_1\text{H}$ яшчэ пры больш нізкай тэмпературы. Але паколькі трытый ${}^3_1\text{H}$ нестабільны, то ў якасці асноўнага ядзернага паліва застаецца толькі дэйтэрый ${}^2_1\text{H}$.

У Сусветным акіяне з 7000 атамаў вадароду толькі адзін з'яўляецца дэйтэрыем ${}^2_1\text{H}$. Значыць, запасы дэйтэрыю ў ім складаюць 80 000 км³. У выніку рэакцыі сінтэзу вадароду, які змяшчаецца ў 1 л вады, вылуча-

ецца столькі ж энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні 300 л бензіну. Такім чынам, з дэйтэрыю, які змяшчаецца ў акіяне, можна атрымаць столькі энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні бензіну, аб'ём якога перавышае аб'ём зямнога шара, г. зн. яго запасы практычна невычэрпныя. Акрамя таго, пры рэакцыях сінтэзу фактычна не ўтвараюцца радыеактыўныя адходы.

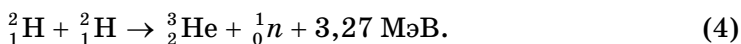
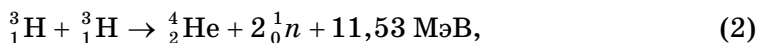
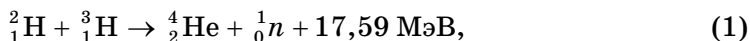
Аднак сур'ёзнай перашкодай на шляху да атрымання энергіі з'яўляецца кулонаўскае адштурхванне ядзер дэйтэрыю, якое пры пакаёвай тэмпературы не дазваляе ім зблізіцца да адлегласцей, на якіх узнікаюць караткадзеючыя ядзерныя сілы прыцягнення. Для пераадолення сіл адштурхвання неабходна нагрэць дэйтэрыі ${}^2_1\text{H}$ да вельмі высокіх тэмператур $T \sim 10^9$ К, пры якіх магчымы рэакцыі сінтэзу. Гэта з'яўляецца істотнай перашкодай для шырокага ўжывання рэакцый ядзернага сінтэзу ў энергетыцы. Гэта тэмпература нашмат вышэйшая за тэмпературу ўнутры Сонца ($T \sim 10^7$ К). Тэрмаядзерная рэакцыя адбываецца і ў іншых зорках. У іх ёсць адна істотная перавага: дзякуючы каласальным масам і памерам у іх аптымальна рашаецца праблема гравітацыйнага ўтрымання і тэрмаізаляцыі рэчыва, якое ўяўляе сабой плазму.

Асноўнай крыніцай энергіі Сонца з'яўляюцца рэакцыі, якія прыводзяць да ператварэння чатырох пратонаў у ядро гелію ${}^4_2\text{He}$ з вылучэннем 26,72 МэВ энергіі:



У прыродных умовах такія рэакцыі працякаюць толькі ў нетрах зорак, а для ажыццяўлення іх на Зямлі неабходна моцна разагрэць рэчыва або ядзерным выбухам, або магутным газавым разрадам, або гіганцкім імпульсам лазернага выпраменьвання, або бамбардзіроўкай інтэнсіўным пучком часціц.

Для кіравання рэакцыямі сінтэзу неабходна стварыць тэрмаядзерны рэактар. Найбольш верагодна ажыццяўленне такога рэактара на наступных ядзерных рэакцыях сінтэзу:



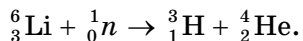
Найбольш даступнай з рэакцый сінтэзу (па абсягу неабходных тэмператур) і энергетычна выгаднай з'яўляецца рэакцыя (1) паміж ядрамі дэйтэрыю і трытыю. Пры гэтым на адзін нуклон вылучаецца 3,5 МэВ, а пры рэакцыях дзялення — 1 МэВ. Для таго каб дэйтэрыі мог пранікнуць да ядра трытыю, яму неабходна мець энергію парадку 1 МэВ. Разлічым тэмпературу, якую павінна мець часціца, каб мець такую энергію.

Сярэдняя кінетычная энергія часціцы ў газе $E = \frac{3}{2}kT$, тады

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ В}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

Пры такой тэмпературы рэчыва амаль кожнае сутыкненне часціц прыводзіла б да ядзернай рэакцыі, аднак на Зямлі такія ўмовы недасяжныя.

У праблеме тэрмаядзернага сінтэзу ёсць яшчэ адно пытанне: дзе ўзяць трытый? Трытый у прыродзе ўтрымліваецца ў нязначнай колькасці. Ён утвараецца ў верхніх пластах атмасферы пры сутыкненні касмічных часціц з атамамі азоту. Але яго можна атрымліваць у ядзерных рэактарах пры апраменьванні ${}^6_3\text{Li}$ нейтронамі. Ён можа быць атрыманы ў самім тэрмаядзерным рэактары, калі выкарыстаць магутныя патокі нейтронаў:



Дэйтэрыі прысутнічае ў прыродным вадародзе, і яго можна атрымаць, падзяляючы ізатопы вадароду. Запасы дэйтэрыю ў Сусветным акіяне велізарныя, на шматлікія тысячы гадоў хопіць таксама запасаў літыю, неабходнага для вытворчасці іншага ізатопа — трытыю.

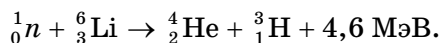
Для практычнага кіравання тэрмаядзернымі рэакцыямі найважнейшым з'яўляецца стварэнне такіх умоў, пры якіх высокатэмпературная плазма з дапамогай магнітных палёў устойліва ўтрымліваецца ў стане цеплаізаляцыі. Для гэтай мэты выкарыстоўваюцца магнітныя камеры. Асноўнымі відамі страт з'яўляюцца цеплата, якая сыходзіць праз сценкі рэактара, і тармазнае выпраменьванне ў плазме.

Да пераваг выкарыстання рэакцый сінтэзу для атрымання энергіі адносяцца:

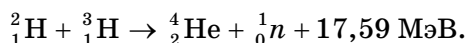
- 1) высокі выхад энергіі;
- 2) экалагічная бяспека рэактара;
- 3) адсутнасць праблемы пахавання радыеактыўных адходаў.

Ажыццявіць кіруемую тэрмаядзерную рэакцыю ў прамысловых маштабах, г. зн. дамагчыся энергетычнага выхаду, які перавышае выдаткі, пакуль не атрымалася.

На Зямлі ў наш час змаглі ажыццявіць толькі некіруемую тэрмаядзерную рэакцыю сінтэзу пры выбуху вадароднай бомбы. Трэба адзначыць, што спачатку ў вадароднай бомбе выбухае змешчаная ўнутры яе атамная бомба. У выніку адбываецца рэзкі рост тэмпературы да значэнняў $(10 - 20) \cdot 10^6 \text{ К}$, пры гэтым узнікае паток нейтронаў і электрамагнітнага выпраменьвання. Нейтроны ўступаюць у рэакцыю з ізатопаў літыю, што знаходзіцца ў бомбе, з утварэннем трытыю:



Павышэнне тэмпературы да неабходнага значэння разам з утвораным трытыем прыводзіць да тэрмаядзернай рэакцыі:



Асноўная частка энергіі (70 %) адносіцца хуткімі нейтронамі і ядрамі атамаў гелію (20 %).

► Даследаванне механізмаў ядзернага сінтэзу і распаўсюджанасці розных ядзер дае магчымасць зазірнуць у далёкае мінулае, калі «нараджаліся» хімічныя элементы. Вывучэнне радыеактыўнасці, адкрыццё дзялення і сінтэзу ядзер паказалі, што на ранніх стадыях Сусвет складаўся толькі з самых лёгкіх элементаў — вадароду і гелію, а ўсе цяжэйшыя элементы ўтварыліся ў выніку ядзерных рэакцый у зорках і пры выбухах зорак.

У 2005 г. было прынята рашэнне аб будаўніцтве Міжнароднага эксперыментальнага тэрмаядзернага рэактара ў г. Кадараш (Францыя).



1. Якія рэакцыі называюцца тэрмаядзернымі?
2. Як растлумачыць, што пры сінтэзе лёгкіх ядзер вылучаецца энергія?
3. Якія ўмовы ажыццяўлення ядзернай рэакцыі сінтэзу?
4. Як называюцца найбольш вядомыя ізатопы вадароду і як іх абазначаюць?
5. Параўнайце энергію, якая выпрадае на адзін нуклон пры тэрмаядзернай рэакцыі і ланцуговай ядзернай рэакцыі.
6. Абмяркуйце добрыя якасці і недахопы розных спосабаў атрымання энергіі: спальванне выкапнёвага гаручага, дзяленне ядра і ядзерны сінтэз.

7. Ці прымянімая формула Эйнштэйна $E = mc^2$:

- а) да дзялення ядзер;
- б) да ядзернага сінтэзу;
- в) да ядзерных рэакцый?

8. Крыніцай электрамагнітнай энергіі, якая выпраменьваецца Сонцам і іншымі зоркамі, служыць тэрмаядзерны сінтэз. Якія ўмовы ў нетрах зорак робяць магчымым праходжанне тэрмаядзернага сінтэзу?

§ 43. Іанізуючае выпраменьванне. Элементы дазіметрыі

Чалавек штосекундна падвяргаецца ўздзеянню выпраменьванняў. Выпраменьванне Сонца з'яўляецца адным з ключавых фактараў узнікнення і існавання жыцця на Зямлі. Аднак некаторыя віды выпраменьванняў небяспечныя для здароўя чалавека. Якія гэта выпраменьванні? Як ад іх можна абараніцца?

Зараджаныя часціцы, рэнтгенаўскае і γ -выпраменьванне, распаўсюджваючыся ў рэчыве, узаемадзейнічаюць з яго атамамі. За кошт сваёй энергіі часціцы выпраменьвання могуць іанізаваць атамы, выбіваючы з іх электроны. Часта адна часціца ў стане іанізаваць некалькі атамаў, таму працэс распаўсюджвання такога выпраменьвання праз рэчыва суправаджаецца яго моцнай іанізацыяй. З прычыны гэтага **іанізуючым** называюць такі від выпраменьвання, узаемадзеянне якога з рэчывам прыводзіць да іанізацыі яго атамаў і малекул (мал. 227).

Аснову біялагічнага дзеяння іанізуючага выпраменьвання на жывыя тканкі складаюць хімічныя працэсы, якія адбываюцца ў іх клетках пры



Мал. 227. Віды выпраменьванняў

паглыннанні імі выпраменьвання. Іанізацыя атамаў і малекул тканак рэчыва прыводзіць да пашкоджання клетак і змянення структуры тканак. Частка атамаў і малекул пераходзіць ва ўзбуджаны стан і, вяртаючыся ў няўзбуджаны стан, аддае лішак энергіі ў выглядзе электрамагнітнага выпраменьвання. Пад уздзеяннем гэтага выпраменьвання ў тканках адбываюцца біяхімічныя рэакцыі, абумоўленыя ўтварэннем новых малекул, чужых для звычайнай клеткі. У выніку парушаецца клетачнае дзяленне і ўтварэнне новых клетак. У сваю чаргу гэта прыводзіць да храмасомных перабудоў і ўзнікнення мутацый, якія прыводзяць да змянення ў генах клеткі. Такім чынам, біялагічнае дзеянне іанізуючага выпраменьвання адбываецца не толькі на дадзеным арганізме, але і на наступных пакаленнях.

Пашкоджанні жывога арганізма, выкліканыя дзеяннем іанізуючага выпраменьвання, называюцца *прамянёвай хваробай*. Небяспека гэтай хваробы пагаршаецца наяўнасцю ўтоенага перыяду, г. зн. яе сімптомы выяўляюцца толькі праз некаторы прамежак часу. Сімптомамі прамянёвай хваробы з'яўляюцца млоснасць, рвота, агульная слабасць, павышаная тэмпература, выпадзенне валасоў, кровазліццё.

Розныя віды іанізуючага выпраменьвання маюць розную пранікальную здольнасць (гл. мал. 227). Біялагічнае дзеянне розных відаў выпраменьвання на жывыя арганізмы неаднолькавае. Напрыклад, α -часціцы не здольныя пранікнуць праз знешні слой скуры. Таму яны не ўяўляюць небяспекі да таго часу, пакуль радыеактыўныя рэчывы, што выпускаюць α -часціцы, не патрапяць унутр арганізма з ежай, удыхаемым паветрам, на слізистую абалонку ці праз адкрытую рану. β -выпраменьванне валодае большай пранікальнай здольнасцю: яно пранікае ў тканкі арганізма на 1—2 см. Пранікальная здольнасць γ -выпраменьвання настолькі вялікая, што паглынуць яго можа толькі досыць тоўстая свінцовая ці бетонная пліта. Чым больш энергіі перадае выпраменьванне тканкам жывога арганізма, тым больш у іх будзе пашкоджанняў.

Асноўную частку апраменьвання насельніцтва зямнога шара атрымлівае ад натуральных крыніц іанізуючага выпраменьвання: касмічных праменяў, радыеактыўных ізатопаў, натуральнай радыеактыўнасці горных парод і глебы, радыеактыўных радыеізаатопаў, якія трапляюць у ежу. Чалавек падвяргаецца апраменьванню двума спосабамі. Радыеактыўныя рэчывы могуць знаходзіцца па-за арганізмам і апраменьваць яго звонку. У гэтым выпадку гавораць аб *знешнім апраменьванні*. У той жа час яны могуць знаходзіцца ў ежы, вадзе, паветры і трапіць унутр арганізма. Такі спосаб апраменьвання называюць *унутраным*.

Асноўнымі крыніцамі ўнутранага фонавага апраменьвання арганізма чалавека з'яўляюцца:

1) натуральны ізатоп вугляроду $^{14}_6\text{C}$, што змяшчаецца ва ўсіх тканках арганізма чалавека;

2) радон $^{222}_{86}\text{Rn}$, торый $^{232}_{90}\text{Th}$ і іх даччыныя прадукты распаду, якія ўдыхаюцца з паветрам і адкладваюцца ў дыхальных органах чалавека;

3) даўгавечны ізатоп радыю $^{226}_{88}\text{Ra}$ і яго кароткажывучы ізатоп $^{224}_{88}\text{Ra}$, якія адкладаюцца ў касцявых тканках;

4) натуральны радыеактыўны ізатоп калію $^{40}_{19}\text{K}$, які змяшчаецца ў мяккіх тканках (пераважна ў мышцах).

Акрамя таго, асобныя крыніцы іанізуючага выпраменьвання выбарча канцэнтруюцца ў асобных органах: ёд — у шчытападобнай залозе, стронцый — у касцях, уран — у нырках — і падвяргаюць іх павышанаму апраменьванню.

Вельмі важна ўмець вызначаць вынік дзеяння іанізуючага выпраменьвання на рэчыва, мерай якога з'яўляецца *доза*. Гэтым займаецца **дазіметрыя**.

Колькасць энергіі, перададзенай адзінцы масы арганізма іанізуючым выпраменьваннем, называецца *дозай* (ад грэч. *δοση* (доза) — доля, порцыя). Існуюць розныя віды доз у залежнасці ад віду выпраменьвання, віду органа ці тканкі, якія падвергліся апраменьванню.

Паглынутая доза — колькасць энергіі W , перададзенай рэчыву іанізуючым выпраменьваннем любога віду ў пераліку на адзінку масы цела любога рэчыва.

Доза ў органе ці біялагічнай тканцы — сярэдняя паглынутая доза D у пэўным органе ці тканцы чалавечага цела:

$$D = \frac{W}{m}, \quad (1)$$

дзе W — поўная энергія, перададзенай іанізуючым выпраменьваннем тканцы або органу; m — маса органа або тканкі.

У СІ адзінкай паглынутай дозы з'яўляецца **Грэй** (Гр). $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Паглынутая доза выпраменьвання роўна 1 Гр, калі адным кілаграмам рэчыва паглынута іанізуючае выпраменьванне, энергія якога роўна 1 Дж.

Паглынутая доза расходзецца на награванне рэчыва і на фізічныя і хімічныя ператварэнні ў ім. Велічыны дозы залежыць ад віду выпраменьвання, энергіі яго часціц, шчыльнасці іх патоку і ад складу апраменьваемага рэчыва.

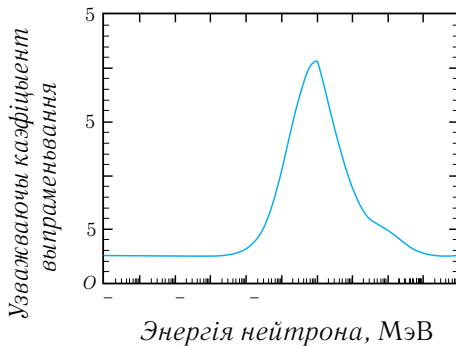
Пры аднолькавай паглынутае дозе α -выпраменьванне значна больш небяспечнае за β - і γ -выпраменьванні. Для ўліку гэтага фактару дозу выпраменьвання трэба памножыць на каэфіцыент w_R , які ўлічвае здольнасць выпраменьвання дадзенага віду пашкоджаць тканкі арганізма. Ён называецца *каэфіцыентам якасці выпраменьвання (узважаючым каэфіцыентам)*.

Каэфіцыент якасці выпраменьвання паказвае, у колькі разоў радыяцыйная небяспека ад уздзеяння на жывы арганізм дадзенага віду выпраменьвання большая, чым ад уздзеяння γ -выпраменьвання (пры аднолькавых паглынутых дозах).

Значэнні w_R для розных відаў іанізуючага выпраменьвання прыведзены ў табліцы 12.

Табліца 12. Узважаючыя каэфіцыенты w_R (каэфіцыенты якасці) для розных відаў іанізуючага выпраменьвання

Від выпраменьвання	Узважаючы каэфіцыент выпраменьвання (w_R)
Фатоны	1
Электронны і мюоны	1
Пратоны і зараджаныя піоны	2
Альфа-часціцы, асколкі дзялення, цяжкія іоны	20
Нейтроны	гл. мал. 228



Мал. 228. Залежнасць узважаючага каэфіцыента выпраменьвання нейтронаў ад іх энергіі

Пералічаную такім чынам дозу называюць *эквівалентнай дозай*. *Эквівалентная доза H* — гэта паглынутае доза ў органе або тканцы, памножаная на адпаведны каэфіцыент якасці выпраменьвання:

$$H = w_R D. \quad (2)$$

У СІ адзінкай эквівалентнай дозы з'яўляецца *зіверт (Зв)*.

1 Зв роўны эквівалентнай дозе, пры якой паглынутае доза роўна 1 Гр і ўзважаючы каэфіцыент роўны адзінцы.

Неабходна ўлічваць таксама, што адны часткі цела больш адчувальныя да апраменьвання, чым іншыя. Таму дозы апраменьвання органаў і тканак арганізма неабходна ўлічваць з рознымі ўзважваючымі каэфіцыентамі w_T (табліца 13). Пры множанні эквівалентнай дозы на адпаведныя каэфіцыенты і сумаванні па ўсіх органах і тканках атрымліваюць **эфектыўную** дозу, якая адлюстроўвае сумарны эфект апраменьвання для арганізма.

Табліца 13. Тканкавы ўзважваючы каэфіцыент w_T (2007)

Тканка	w_T
Касцявы мозг (чырвоны), тоўстая кішка, лёгкія, страўнік	0,12
Малочная залоза, астатнія тканкі	0,12
Палавыя залозы	0,08
Мачавы пузырь, стрававод, печань, шчытападобная залоза	0,04
Паверхня косці, галаўны мозг, слінныя залозы, скура	0,01

На практыцы шырока выкарыстоўваюцца пазасістэмныя адзінкі:
рад — адзінка паглынутаі дозы выпраменьвання:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}; \quad (3)$$

бэр (біялагічны эквівалент рад) — адзінка эквівалентнай дозы:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}, 1 \text{ Зв} = 1 \cdot 10^2 \text{ бэр}. \quad (4)$$

Апраменьванню ад натуральных крыніц падвяргаецца любы жыхар Зямлі. Натуральны фон складае каля 1,3 мЗв у год на чалавека. Аднак адны людзі атрымліваюць большую дозу, а іншыя — меншую. Гэта залежыць ад месца пражывання, ладу жыцця. Выкарыстанне газу для прыгатавання ежы, герметызацыя памяшканняў, палёты на самалётах, прымяненне некаторых будаўнічых матэрыялаў — усё гэта павялічвае ўзровень апраменьвання за кошт натуральных крыніц. У сярэднім зямныя крыніцы іанізуючага выпраменьвання забяспечваюць больш за $\frac{5}{6}$ гадавой эфектыўнай дозы, якую атрымлівае насельніцтва, галоўным чынам за кошт унутранага апраменьвання. Астатнюю частку натуральнага апраменьвання ўносяць касмічныя прамені шляхам знешняга апраменьвання.

Радыацыйны фон, ствараемы касмічнымі прамянямі, дае менш паловы знешняга апраменьвання, якое атрымлівае насельніцтва ад на-



туральных крыніц радыяцыі. Людзі, якія жывуць на ўзроўні мора, атрымліваюць у сярэднім з-за касмічнага выпраменьвання эфектыўную дозу каля 300 мкЗв у год. Для людзей, якія жывуць вышэй за 2 км над узроўнем мора, гэта велічыня ў некалькі разоў большая. Пры пад'ёме з вышыні 4 км да вышыні 12 км узровень апраменьвання за кошт касмічных прамяняў нарастае прыкладна ў 25 разоў.

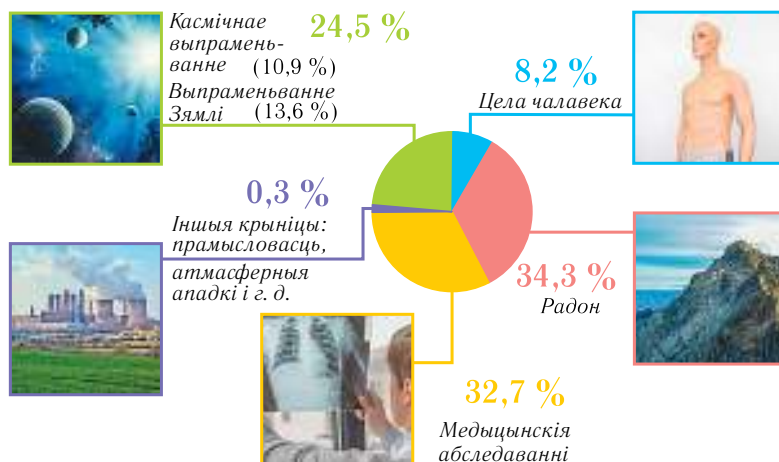
У сярэднім прыкладна $\frac{2}{3}$ эфектыўнай дозы апраменьвання, якую чалавек атрымлівае ад натуральных крыніц выпраменьвання, паступаюць ад радыеактыўных рэчываў, якія трапілі ў арганізм з вадой, ежай і паветрам.

► Найбольш значным з усіх натуральных крыніц іанізуючага выпраменьвання з'яўляецца нябачны цяжкі газ радон, які не мае густы і паху, і яго даччыныя прадукты. Менавіта яны адказваюць прыкладна за $\frac{3}{4}$ гадавой індывідуальнай эфектыўнай дозы апраменьвання, якая атрымліваецца насельніцтвам ад зямных крыніц іанізуючага выпраменьвання (мал. 229).



Для абароны ад іанізуючага выпраменьвання, па магчымасці, трэба выкарыстоўваць наступныя спосабы:

- 1) аддаленне на вялікую адлегласць ад крыніцы;
- 2) абмежаванне часу знаходжання ў забруджанай мясцовасці;
- 3) выкарыстанне ахоўных рэчываў (свінец, бор, кадмій), якія эфектыўна паглынаюць іанізуючае выпраменьванне;
- 4) выкарыстанне рэчываў, якія аслабляюць уздзеянне іанізуючых выпраменьванняў на арганізм;



Мал. 229. Крыніцы іанізуючага выпраменьвання

5) дазіметрычны кантроль навакольнага асяроддзя і прадуктаў харчавання.

Шырокае ўжыванне знаходзіць іанізуючае выпраменьванне ў навукі і тэхніцы. У выніку ўзаемадзеяння часціц высокіх энергій з даследуемым рэчывам утвараюцца радыеактыўныя нукліды. Пры пераходзе іх у стабільны стан выпускаецца γ -выпраменьванне. Па выглядзе γ -спектраў і інтэнсіўнасці спектральных ліній вызначаюць хімічны склад рэчыва і канцэнтрацыі элементаў, якія змяшчаюцца ў ім. Для гэтага метаду характэрны ўніверсальнасць metodyкі, хуткасць вымярэння і вельмі высокая адносная адчувальнасць. Яна дасягае велічыні парадку 10^{-7} .

Радыеактывацыйны аналіз шырока ўжываецца ў геалагаразведцы, асабліва пры даследаванні руд, якія змяшчаюць рэдкія і каштоўныя металы. У тэхніцы дзякуючы высокай адчувальнасці ім даследуюць скорасць зносу металічных дэталей. Напрыклад, даследуюць знос чыгуначных рэек.

Радыенукліды (ізатопы ёду, тэхнецыю, ксенону, талію) шырока выкарыстоўваюцца ў медыцынскай дыягностыцы.

У якасці прыбораў для вымярэння дозы ці яе магутнасці выкарыстоўваюцца дазіметры. Імі служаць прыборы, здольныя рэгістраваць іанізуючае выпраменьванне. Шкалы прыбораў спецыяльна праградуіраваны ў адзінках дозы або ў адзінках магутнасці дозы.

Увага! Знак, які папярэджвае аб радыяцыйнай небяспецы, паказаны на малюнку 230.



Мал. 230. Знак радыяцыйнай небяспекі

▶ Бекерэль першы адчуў «вынікі» ўздзеяння радыеактыўнага выпраменьвання на тканкі жывого арганізма. Ён паклаў прабірку з радыем у кішэнь і атрымаў сур'ёзны апёк скуры.

Іанізуючае выпраменьванне выкарыстоўваецца ў медыцыне як для лячэння, так і для дыягностыкі. Адным з самых распаўсюджаных медыцынскіх прыбораў з'яўляецца рэнтгенаўскі апарат. Самым значным дасягненнем рэнтгенадыягностыкі стала камп'ютарная тамаграфія. Яе выкарыстанне дазволіла паменшыць дозы апраменьвання ў дзясяткі разоў.

Найбольш адчувальнымі да паражэння іанізуючым выпраменьваннем з'яўляюцца крывятворныя органы, а найбольш небяспечнымі з'яўляюцца дозы, атрыманыя на працягу вельмі малога прамежку часу. Чырвоны касцявы мозг і іншыя элементы крывятворнай сістэмы губляюць здольнасць звычайна функцыянаваць пры дозах 0,5—1 Гр.

► Па правілах МАГАТЭ (Міжнароднага Агенцтва па Атамнай Энергіі), гранічная доза апраменьвання складае 5 мЗв у год для насельніцтва і 0,05 Зв год для людзей шkodных прафесій (не лічачы фонавага выпраменьвання). У Рэспубліцы Беларусь з 28 снежня 2012 г. уведзены наступныя Нормы радыяцыйнай бяспекі. Асноўнай мяжой доз для насельніцтва з'яўляецца эфектыўная доза, роўная 1 мЗв у год у сярэднім за любыя паслядоўныя 5 гадоў, але не больш за 5 мЗв у год або эфектыўная доза за перыяд жыцця (70 гадоў) — 70 мЗв. Эквівалентныя дозы за год: у хрусталіку вока — 15 мЗв; у скуры, кісцях і ступнях — 50 мЗв.



1. Якое выпраменьванне называюць іанізуючым?
2. У чым праяўляецца біялагічнае ўздзеянне іанізуючага выпраменьвання на жывыя арганізмы?
3. Якое выпраменьванне мае найбольшую пранікальную здольнасць?
4. Да якіх наступстваў можа прывесці апраменьванне чалавека іанізуючым выпраменьваннем?
5. Што з'яўляецца асноўнымі натуральнымі крыніцамі іанізуючага выпраменьвання?
6. Чым займаецца дазіметрыя?
7. Дайце азначэнне паглынутаі дозы выпраменьвання. Што з'яўляецца адзінкай вымярэння паглынутаі дозы ў СІ?
8. Што такое эквівалентная доза? Што з'яўляецца адзінкай эквівалентнай дозы ў СІ?
9. Што такое эфектыўная доза? Што з'яўляецца адзінкай эфектыўнай дозы ў СІ?
10. Якія пазасістэмныя адзінкі выкарыстоўваюцца для вымярэння паглынутаі і эквівалентнай доз?
11. Якія з натуральных унутраных крыніц іанізуючага выпраменьвання з'яўляюцца найбольш небяспечнымі?
12. Якія органы чалавека з'яўляюцца найбольш адчувальнымі да паражэння іанізуючым выпраменьваннем?

§ 44. Элементарныя часціцы і іх узаемадзеянні

- Доўгі час пратон, нейтрон і электрон лічыліся непарушнымі «цаглінкамі» матэрыі. Аднак па меры адкрыцця новых часціц перад фізікамі паўстала праблема іх класіфікацыі: колькі ўсяго «цаглінак» матэрыі, якія з іх з'яўляюцца найбольш простымі, а якія маюць складаную структуру, г. зн. утвораны з іншых часціц. Як часціцы ўзаемадзейнічаюць паміж сабой? Як яны распадаюцца?



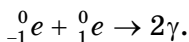
Кожны электрон характарызуецца ўласным механічным момантам руху, які называецца спінам (ад англ. *spin* — круціць).

Аж да канца XIX ст. атамы лічыліся непадзельнымі «цаглінкамі» матэрыі. Але ў канцы XIX — пачатку XX ст. вучонымі была вызначана складаная будова атамаў і раскрыта структура ядзер. Адкрыты новыя часціцы — электроны, фатоны, пратоны і нейтроны, якія вызначаюць уласцівасці атамаў і ядзер і іх узаемадзеянне. Менавіта яны, а не атамы з'яўляліся найбольш простымі непадзельнымі часціцамі, іх трэба было лічыць «цаглінкамі светабудовы».

У 1932 г. была адкрыта новая часціца і першая антычасціца — пазітрон. Хоць яшчэ ў 1928 г. англійскі фізік П. Дзірак, зыходзячы з распрацаванай ім рэлятывісцкай тэорыі руху электрона, прадказаў, што павінен існаваць «двайнік» электрона, які мае дадатны зарад. Пазітрон з'явіўся першай вынайздзенай антычасціцай. У 1955 г. быў адкрыты антыпротон, у 1956 г. — антынейтрон. У тым жа годзе была адкрыта яшчэ адна новая часціца — нейтрына.

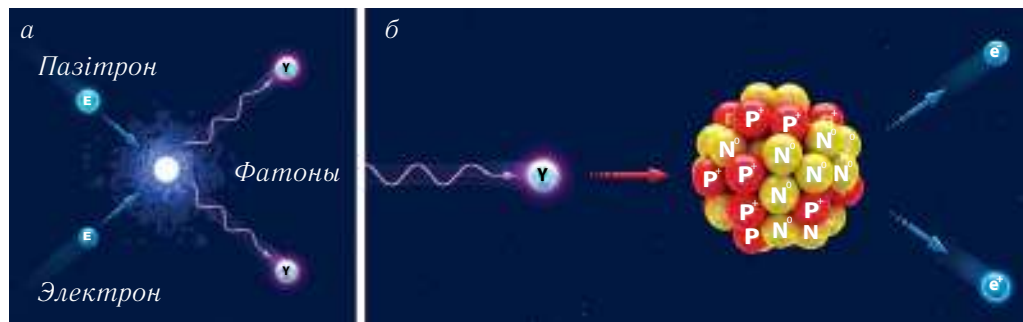
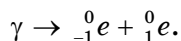
Існаванне пазітрона (ад лац. *positus* — дадатны), які прадказаў Поль Дзірак, у 1932 г. даказаў амерыканскі фізік К. Андрэсан, даследуючы касмічныя прамені.

Пры сутыкненні электрона і пазітрона, якія павольна рухаюцца, яны анігілююць (ад лац. *nihil* — нішто), і ўзнікаюць звычайна два фатоны (мал. 231, а):

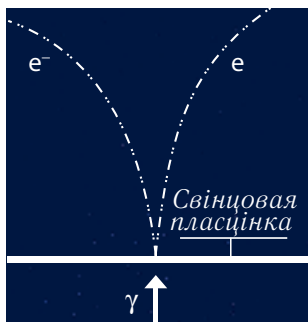


Утварэнне пры анігіляцыі менавіта двух (рэдка трох) фатонаў з'яўляецца вынікам закону захавання імпульсу і энергіі.

Магчымы і адваротны працэс нараджэння электронна-позітроннай пары ў полі ядра за кошт энергіі фатона:



Мал. 231. а — анігіляцыя электрона і пазітрона пры сутыкненні;
б — нараджэнне электронна-позітроннай пары з γ -кванта ў полі ядра



Мал. 232. Нараджэнне электронна-позитроннай пары з γ -кванта пры праходжанні квантаў праз свінцовую пласцінку

Схематычны відарыс такога працэсу паказаны на малюнку 231, б. На малюнку 232 паказана нараджэнне пары электрон-позитрон у свінцовай пласцінцы, якая апраменьваецца γ -квантамі.

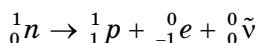
Неўзабаве быў сфармуляваны прынцып зарадавага спалучэння: кожная зараджаная часціца мае антычасціну. Гэты прынцып распаўсюджваецца на нейтральныя часціцы — нейтрон і нейтрына.

Такім чынам, фактычна палову ўсіх элементарных часціц складаюць антычасціцы.

У тым жа 1932 г. пры даследаванні $\beta^\pm$ -распаду была адкрыта яшчэ адна новая часціца — нейтрына.

Вучоным пры даследаванні асаблівасцей $\beta^\pm$ -распаду, а таксама ўласцівасцей нейтрына (антынейтрына) упершыню прыйшлося мець справу з яшчэ адным відам фундаментальнага ўзаемадзеяння — *слабым узаемадзеяннем*. Яно праяўляецца пры ўзаемаператварэннях элементарных часціц. Для характарыстыкі слабых узаемадзеянняў уводзіцца квантавы лік — *лептонны зарад*, які абазначаецца лацінскай літарай L . Неабходнасць увядзення лептоннага зараду абумоўлена тым, што дагэтуль не выяўлена ні адной з'явы, у якой не выконваецца *закон захавання лептоннага зараду: сума лептонных зарадаў да і пасля ўзаемадзеяння захоўваецца*. Лептонны зарад уяўляе сабой безразмерны цэлы лік. Ва ўсіх лептонаў (часціц і антычасціц) $L = \pm 1$, а ў часціц, якія не з'яўляюцца лептонамі (напрыклад, нуклонаў), $L = 0$. Нейтрына, таксама як і электрон, адносяць да класа *лептонаў*.

Разгледзім рэакцыі $\beta^\pm$ ператварэнняў. З закону захавання лептоннага зараду для ўраўнення рэакцыі распаду нейтрона:



вынікае:

$$0 = 0 + 1 + L.$$

Адкуль знаходзім:

$$L = -1.$$

Такім чынам, лептонны зарад нейтрына ў дадзенай рэакцыі адмоўны. Значыць, як вынікае з азначэння лептонаў, падчас β^- -рас-

паду ядра нараджаецца не нейтрына, а *антынейтрына* $\bar{\nu}$ (гл. мал. 216).

Адзначым, што свабодны пратон, у адрозненне ад нейтрона, стабільны. Аднак у ядры становіцца магчымым β^+ ператварэнне пратона ў нейтрон з выпусканнем *пазітрона* і *нейтрына*:

$${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0e + {}_0^0\nu.$$

Гэта вынікае з закону захавання лептоннага зараду, паколькі

$$0 = 0 - 1 + L,$$

адкуль $L = +1$.

Такім чынам, пры электронным распадзе ўзнікае антынейтрына $\bar{\nu}$, пры пазітронным распадзе — нейтрына ν . Гэта абумоўлена фундаментальным законам захавання лептоннага зараду.

Перш чым перайсці да класіфікацыі часціц, неабходна даць азначэнне таго, што разумеецца ў наш час пад элементарнай часціцай.

Элементарнымі называюць часціцы, якія на сучасным узроўні развіцця фізікі можна лічыць першаснымі нераскладальнымі далей часціцамі, і з іх пабудавана ўся матэрыя. Непадзельнасць элементарных часціц не азначае, што ў іх адсутнічае ўнутраная структура.

Элементарныя часціцы здольныя ўзаемадзейнічаць адна з адной. Для ўсіх элементарных часціц характэрна здольнасць узнікаць і паглынацца (нараджацца і знішчацца) пры ўзаемадзеянні з іншымі часціцамі. Напрыклад, хоць нейтрон і не складаецца з пратона, электрона і антынейтрына, але ён можа ператварацца ў названыя часціцы пры ўзаемадзеяннях.

Агульнымі характарыстыкамі ўсіх элементарных часціц з'яўляюцца маса, сярэдні час жыцця, электрычны зарад і спін.

Адрозненне ў масах часціц атрымала адлюстраванне ў назвах тыпаў часціц: **лептоны** (ад грэч. λεπτος — лёгкі), **мезоны** (ад грэч. μεσος — сярэдні), **барыёны** (ад грэч. βαρυς — цяжкі). Аднак у далейшым аказалася, што такая класіфікацыя не адлюстроўвае ўсе ўласцівасці элементарных часціц.

Электрычныя зарады элементарных часціц з'яўляюцца кратнымі велічыні элементарнага электрычнага зараду.

Спін элементарных часціц з'яўляецца цэлым ці напайцэлым і кратным пастаяннай Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

У 50-х гг. XX ст. было вынайджена, што ў ядзерных рэакцыях могуць нараджацца новыя віды часціц, калі часціца, што бамбардзіруе, мае дастатковую энергію. Агульны лік элементарных часціц з антычасціцамі — каля 500, і іх колькасць павялічваецца з кожным годам. З іх 30 — адносна стабільныя з сярэднім часам жыцця не менш за 10^{-17} с і больш за 400 — кароткажывучыя, з сярэднім часам жыцця 10^{-23} с. Час жыцця залежыць ад прыроды ўзаемадзеяння.

У залежнасці ад часу жыцця элементарныя часціцы падзяляюцца на *стабільныя, квазістабільныя і нестабільныя (рэзанансы)*.

Калі распад абумоўлены моцным узаемадзеяннем, то сярэдні час жыцця часціцы аказваецца вельмі малым (10^{-22} — 10^{-24} с), і гістарычна яны былі названы (нестабільнымі) *рэзанансамі*.

Пры распадзе, абумоўленым слабым узаемадзеяннем, сярэдні час жыцця часціц $\geq 10^{-10}$ с, пры электрамагнітным узаемадзеянні — 10^{-16} — 10^{-19} с. Такія часціцы называюцца *квазістабільнымі*.

Стабільнымі ў межах дакладнасці сучасных вымярэнняў з'яўляюцца электрон, пратон, фатон і нейтрына.

Вывучэннем іх уласцівасцей і ўзаемадзеянняў займаюцца ў раздзеле фізікі, які называецца *фізікай элементарных часціц*.

► Электрычны зарад часціц у ядзернай фізіцы прынята таксама выражаць не ў кулонах, а ў выглядзе цэлага ліку, які паказвае, колькі элементарных зарадаў складаюць зарад дадзенай часціцы $\left(Z = \frac{q}{e}\right)$. Таму для пратона зарад роўны +1, для электрона −1, а для атамнага ядра — Z .



1. Якая антычасціца была адкрыта першай?
2. Ці ўсе элементарныя часціцы маюць антычасціцу?
3. Чым адрозніваецца антычасціца ад часціцы?
4. Якая часціца называецца элементарнай?
5. Якія часціцы з'яўляюцца стабільнымі?
6. Якія часціцы адносяцца да квазістабільных і нестабільных (рэзанансаў)?



§44-1

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 7

Ядзерная фізіка вывучае атамныя ядры. Пратон і нейтрон з'яўляюцца двума рознымі станамі адной і той жа часціцы — **нуклона**.

Лік пратонаў у ядры называецца **атамным нумарам** і абазначаецца літарай Z . Агульны лік нуклонаў называецца **масавым лікам** і абазначаецца літарай A . Лік нейтронаў у ядры

$$N = A - Z.$$

Ядзерныя сілы — кароткадзеючыя сілы прыцягнення дзейнічаюць толькі паміж дадзеным нуклонам і яго непасрэднымі суседзямі.

Ядзерная рэакцыя — гэта працэс узаемадзеяння атамнага ядра з іншым ядром ці элементарнай часціцай, які можа суправаджацца змяненнем саставу і будовы ядра.

Энергіяй рэакцыі Q называецца рознасць энергій спакою пачатковага і канечнага станаў часціц, якія ўдзельнічаюць у рэакцыі. Ядзерныя рэакцыі, якія адбываюцца з вылучэннем энергіі ($Q > 0$), называюцца *экзаэнергетычнымі*, а з паглыннаннем энергіі ($Q < 0$), — *эндаэнергетычнымі*. Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, называецца **энергетычным выхадам** ядзернай рэакцыі.

Пад **энергіяй сувязі** атамных ядзер разумеецца энергія, необходимая для падзелу ядра на асобныя нуклоны:

$$E_{\text{сув}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2.$$

Дэфект масы ядра — рознасць паміж сумарнай масай усіх нуклонаў ядра ў свабодным стане і масай ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}.$$

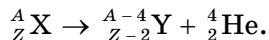
Характарыстыкай трываласці (звязанасці) ядзер з'яўляецца **ўдзельная энергія сувязі ε ядра**, г. зн. энергія сувязі, якая прыпадае на адзін нуклон:

$$\varepsilon = \frac{|E_{\text{сув}}|}{A}.$$

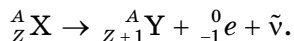
Радыеактыўнасць — з'ява самаадвольнага ператварэння ядзер, якая суправаджаецца выпусканнем часціц ці ядзер і караткахвалевага электрамагнітнага выпраменьвання.

Радыеактыўныя ператварэнні ядзер, як правіла, суправаджаюцца выпусканнем α - і β -часціц і γ -выпраменьвання.

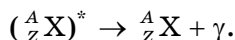
Пры α -распадзе прадуктам распаду аказваецца ізатоп з лікам пратонаў $Z - 2$ з выпусканнем α -часціцы:



Пры β^- -распадзе ўтвараецца ізатоп з атамным нумарам $Z + 1$:



Выпусканне γ -выпраменьвання не прыводзіць да ператварэнняў элементаў:



Закон радыеактыўнага распаду:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_1}}.$$

Ланцуговай рэакцыяй называецца працэс, у якім прадукты пэўнай рэакцыі выклікаюць наступныя рэакцыі такога ж тыпу.

Крытычнай масай называецца мінімальная маса ядзернага гаручага, необходимая для падтрымання ланцуговай рэакцыі.

Ядзерным рэактарам называецца прылада, у якой можа адбывацца самападтрымліваемая ланцуговая ядзерная рэакцыя дзялення ядзер цяжкіх элементаў пад дзеяннем нейтронаў.

Адным з відаў ядзерных рэакцый з'яўляюцца рэакцыі сінтэзу лёгкіх ядзер, якія эфектыўна ажыццяўляюцца пры звышвысокіх тэмпературах $\sim 10^9$ K і самападтрымліваюцца за кошт значнага вылучэння ў іх энергіі. Такія рэакцыі называюцца **тэрмаядзернымі**.

Іанізуючым называюць такі від выпраменьвання, узаемадзеянне якога з рэчывам прыводзіць да іанізацыі яго атамаў і малекул.

Колькасць энергіі, перададзенай адзінцы масы рэчыва іанізуючым выпраменьваннем, называецца **дозай**.

Прыборы для рэгістрацыі іанізуючага выпраменьвання называюць **дэтэктарамі**.

Элементарныя часціцы — першасныя, нераскладаемыя далей часціцы, якія нельга лічыць злучэннем іншых часціц, што існуюць у свабодным стане. Асноўнымі характарыстыкамі элементарных часціц з'яўляюцца іх маса, электрычны зарад, сярэдні час жыцця, спін.

Для ўсіх элементарных часціц характэрна здольнасць выпускацца і паглынацца (нараджацца і знішчацца) пры ўзаемадзеянні з іншымі

часціцамі. Адрозніваюць чатыры тыпы **фундаментальных** узаемадзеянняў: гравітацыйнае; электрамагнітнае; моцнае; слабае.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне характэрна для ўсіх часціц, якія валодаюць электрычным зарадам. Квант электрамагнітнага поля — **фатон**.

У мікрасвеце выконваюцца фундаментальныя законы захавання энергіі, імпульсу і зарадаў.

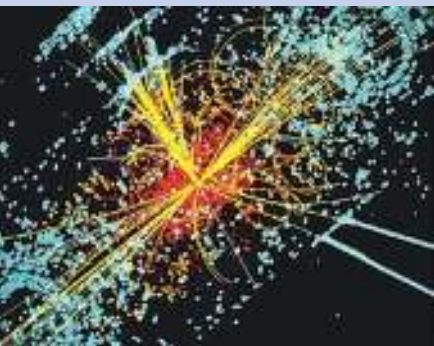


Заданні для самастойных даследаванняў



1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (А. Бекерэль, Э. Рэзерфард, Д. Чэдвік, М. Складоўская-Кюры, П. Кюры, Э. Фермі, В. Паўлі, Ф. Содзі, І. Курчатаў, П. Хігс).

2. Падрыхтуйце рэфераты на тэмы: «Мас-спектраскапія і яе прымяненне», «Выкарыстанне радыеактыўных ізатопаў у прамысловасці», «Ужыванне гама-выпраменьвання ў медыцыне», «Ядзерная геахраналогія», «Метады лячэння і дыягностыкі з ужываннем іанізуючага выпраменьвання», «Паскаральнікі зараджаных часціц і іх прымяненне ў навуцы, медыцыне, вытворчасці», «Віды ядзерных энергетычных рэактараў».



Раздзел 8

Асновы адзінай фізічнай карціны свету

§ 45. Сучасная прыродазнаўчанавуковая карціна свету

Галоўная мэта прыродазнаўчых навук — адкрыць адзінства сіл Прыроды.

Л. Больцман

Найбольш неспазнавальнай з’явай прыроды з’яўляецца той факт, што яна пазнавальная.

А. Эйнштэйн

Прырода — гэта храм навукі, дзе могуць камяні сказаць,

Хоць часта мова іх для нас незразумела.

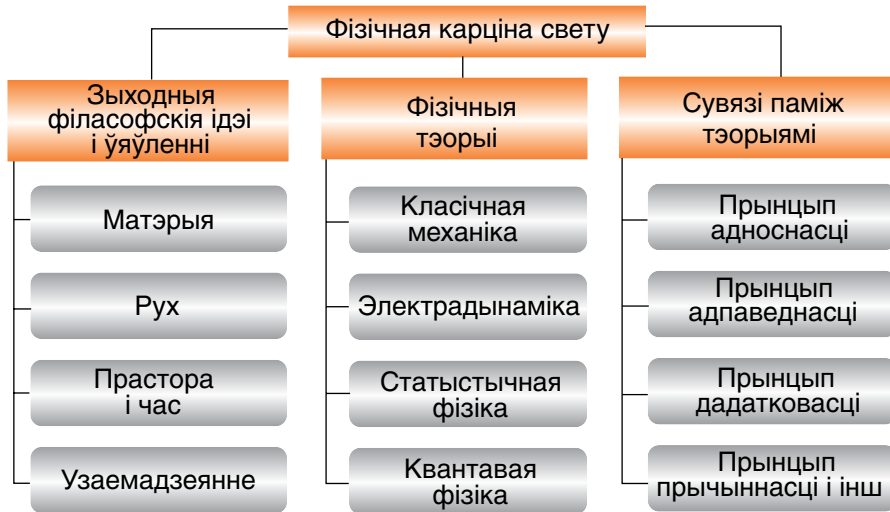
Вакол — лес сімвалаў, трывожны і бязмерны,

І сімвалы на нас з усмешкаю глядзяць.

Паводле Ш. Бадлера

■ Фізіка, з’яўляючыся наукай аб прыродзе, дае чалавеку веды аб навакольным свеце, дазваляючы тым самым, з аднаго боку, рашаць праблемы цывілізацыі, а з другога — берагчы нашу планету для будучых пакаленняў. Як аб’яднаць назапашаныя веды? Што сёння павінен ведаць кожны адукаваны чалавек аб фізічных з’явах?

У курсе фізікі вы пазнаёміліся з рознымі відамі ўзаемадзеянняў цел і аб’ектаў у прыродзе, якія вызначаюць не толькі разнастайнасць фізічных з’яў навакольнага свету, але і напрамак эвалюцыі Сусвету. Фізіка — навукі аб прыродзе, аднак кожны яе раздзел падрабязна разглядае фізічныя з’явы толькі з аднаго боку, вылучаючы тыя ці іншыя ўласцівасці матэрыі па пэўнай прымеце. Спазнанне законаў прыроды гістарычна таксама ішло галоўным чынам на базе таго ці іншага фізічнага падыходу.



Мал. 233. Структура фізічнай карціны свету

Па меры назапашвання ведаў чалавецтва імкнулася «злучыць» усе разрозненыя факты і законы ў рамках абагульненай навуковай **карціны свету**. Пад карцінай свету разумеюць сукупнасць тэорый, законаў і прынцыпаў, якія апісваюць навакольны свет.

Першая, **механічная карціна** свету грунтавалася на класічнай механіцы І. Ньютана (мал. 233). У аснове пабудовы гэтай карціны свету знаходзілася тлумачэнне прычын і вызначэнне заканамернасцей механічнага руху нябесных цел, а таксама макра- і мегасістэм (Зямля, Месяц, Сонца, Сонечная сістэма, Галактыка). У якасці першапрычыны механічнага руху разглядалася гравітацыйнае ўзаемадзеянне паміж цэламі, якое бясконца хутка перадаецца на любыя адлегласці ў Сусвеце.

Напомнім, што на падставе сілавых або энергетычных уяўленняў можна вызначыць законы руху розных аб'ектаў: ад атамаў і малекул да планет і зорак. Найважнейшую ролю адыгрываюць прынцыпы інерцыі і адноснасці, уведзеныя ў механіку Г. Галілеем.

На падставе механічнай карціны свету ў XVIII—XIX стст. былі распрацаваны «зямная», нябесная і малекулярная механіка. Аднак у той жа час у фізіцы назапашвалася значная колькасць эксперыментальных даных, якія супярэчылі ідэям атамізму (дыскрэтнасці будовы рэчыва), што складалі яе фундамент.

Вывучэнне электрычных і магнітных узаемадзеянняў істотна змяніла ўяўленні аб матэрыі і прывяло да з'яўлення **электрамагнітнай карціны свету** (гл. мал. 233). У яе аснове ляжалі ўяўленні аб свеце, у якім усе з'явы апісваюцца з дапамогай сіл (гравітацыйных і электрамагнітных). Асноўны ўклад у стварэнне электрадынамікі зрабілі Ш. Кулон (электростатычныя ўзаемадзеянні), А. Вольт (крыніца пастаяннага току), А. Ампер (магнітныя палі і токі), М. Фарадэй (электрамагнітная індукцыя), Д. Максвел (тэорыя электрамагнетызму), Г. Герц (адкрыццё электрамагнітных хваль) і Г. Лорэнц (класічная электронная тэорыя будовы рэчыва).

М. Фарадэй прыйшоў да думкі аб неабходнасці замены дыскрэтных (карпускулярных) уяўленняў аб матэрыі непарарывнымі (кантынуальнымі). Матэрыя па Фарадэю ўяўлялася як непарарывнае бясконцае поле з сілавымі пунктавымі цэнтрамі. Д. Максвел стварыў матэматычную тэорыю электрамагнітнага поля. На падставе гэтай тэорыі ён зрабіў вывад, што распаўсюджванне электрамагнітнага ўзбурэння адбываецца з канчатковай скорасцю ў выглядзе электрамагнітных хваль. Новая карціна свету змяніла і прынцыпы перадачы ўзаемадзеяння: яны перадаюцца пасродкам поля бесперапынна ад пункта да пункта і з канчатковай скорасцю. Як вынікае з электрамагнітнай карціны свету, унутраная будова рэчыва вызначаецца дзеяннем электрамагнітных сіл.

Фактычным завяршэннем фарміравання электрамагнітнай карціны свету стала спецыяльная тэорыя адноснасці А. Эйнштэйна. Ён дапоўніў законы электрадынамікі ідэяй адноснасці як прасторы, так і часу.

Аднак на мяжы XIX—XX ст. выявіўся шэраг тэарэтычных праблем і эксперыментальных фактаў, якія не знаходзілі тлумачэння ў рамках электрамагнітнай карціны свету: радыеактыўнасць, цеплавое выпраменьванне, атамныя спектры, устойлівасць атамаў.

Першыя радыкальныя крокі ў стварэнні **квантава-палявой** карціны свету (гл. мал. 233) былі зроблены на пачатку XX ст. Квантаванне выпраменьвання ў працэсах выпускавання, паглынання і распаўсюджвання (М. Планк, А. Эйнштэйн); стацыянарныя станы электронаў у атаме (Н. Бор); зусім фантастычная для свайго часу ідэя — карпускулярна-хвалевага дуалізму (Л. дэ Бройль) і, нарэшце, стварэнне квантавай механікі (Э. Шродзінгер, В. Гейзенберг, П. Дзірак, В. Паўлі).

Вывучэнне будовы атамнага ядра (Э. Рэзерфорд, П. Кюры і М. Складоўская-Кюры, Д. Чэдвік) прывяло да станаўлення фізікі атамнага ядра і элементарных часціц. Былі адкрыты прынцыпова новыя тыпы

ўзаемадзеянняў, уласцівыя толькі мікрасвету субатамных часціц, — моцнае і слабае. Энергія ядзерных рэакцый была пастаўлена на службу людзям (Э. Фермі, І. Курчатаў).

Асаблівасцю сучаснай фізічнай карціны свету з’яўляецца яе імавернасны характар, які выражаецца ў выглядзе статыстычных законаў (гл. мал. 233), што вывучаюцца ў рамках статыстычнай фізікі. Тут, у адрозненне ад механічнай карціны свету, няма «жорсткай» пэўнасці «будучыні».

Тут выпадковасць падзей выступае як аб’ектыўная ўласцівасць матэрыі. У сучаснай фізіцы асноўным матэрыяльным аб’ектам з’яўляецца квантавае поле, пераход якога з аднаго стану ў іншы і прыводзіць да з’яўлення часціц.

Адзначым дзве заканамернасці, якія ўласцівы развіццю фізікі. Першая прадстаўлена прынцыпам адпаведнасці (гл. мал. 233): прыватныя тэорыі, справядлівасць якіх эксперыментальна пацверджана, са з’яўленнем больш агульных тэорый захоўваюць сваё значэнне як прыватны ці гранічны выпадак. Прыкладам можа служыць спецыяльная тэорыя адноснасці, вывады якой пры малых скарасцях адпавядаюць вывадам механікі Ньютана.

Другая заканамернасць — інтэграцыя ці ўзаемапранікненне раздзелаў фізікі. Напрыклад, развіццё фізікі элементарных часціц і яе злучэнне з астраноміяй прывялі да з’яўлення астрафізікі, якая займаецца заканамернасцямі эвалюцыі зорак і Сусвету.

Квантава-палявая карціна свету па меры назапашвання новых навуковых фактаў і з’яўлення новых навуковых гіпотэз працягвае развівацца.

Такім чынам, пад **прыродазнаўчанавуковай карцінай свету** разумеюць сукупныя сучасныя ведаў аб навакольным свеце, назапашаныя прыродазнаўчымі навукамі: фізікай, астраноміяй, матэматыкай, хіміяй, біялогіяй. Фізічная карціна свету з’яўляецца састаўной часткай прыродазнаўчанавуковай карціны свету.

Фізічная карціна свету не вычэрпваецца ўяўленнямі аб структурнай будове матэрыі. Яна праяўляецца таксама і ў законах руху часціц, і ў законах іх узаемадзеяння.

Нягледзячы на дзіўную разнастайнасць узаемадзеянняў аб’ектаў у навакольным свеце (часціц, цел, галактык), у прыродзе, па сучасных даных, прысутнічаюць толькі чатыры тыпы **фундаментальных узаемадзеянняў**. Яны адрозніваюцца па інтэнсіўнасці і радыусе дзеяння. Менавіта гэтыя фундаментальныя ўзаемадзеянні і з’яўляюцца галоўнымі



«дзеючымі асобамі і выканаўцамі» ў пабудове сучаснай фізічнай карціны свету.

Самае слабае з узаемадзеянняў — **гравітацыйнае ўзаемадзеянне**. Яно прыкладна ў 10^{38} разоў слабейшае за ядзернае. Гэта ўзаемадзеянне апісваецца законам сусветнага прыцягнення, які быў адкрыты І. Ньютанам у 1687 г. Гравітацыйныя сілы дзейнічаюць паміж любымі цэламі, у тым ліку і паміж элементарнымі часціцамі, аднак вырашальную ролю яны адыгрываюць толькі ў астранамічных аб'ектаў, якія маюць каласальныя масы.

У **электрамагнітным узаемадзеянні** ўдзельнічаюць любыя электрычна зараджаныя часціцы і целы, а яго «пераносчыкам» (квантам электрамагнітнага поля) з'яўляюцца фатоны. Электрамагнітныя сілы забяспечваюць магчымасць стабільнага існавання атамаў, малекул, вызначаюць механічныя ўласцівасці цвёрдых цел, вадкасцей і газаў.

Моцнае ўзаемадзеянне праяўляецца пры ўзаемадзеяннях нуклонаў унутры ядра (адронаў). У адрозненне ад гравітацыйнага і электрамагнітнага ўзаемадзеянняў, якія можна аднесці да далёкадзеючых, г. зн. дзеючых на адлегласцях, характэрных для макрасвету, моцнае ўзаемадзеянне з'яўляецца караткадзеючым, паколькі яно праяўляецца на адлегласцях, не большых за памеры ядра ($\sim 10^{-15}$ м). Аднак на гэтых адлегласцях моцнае ўзаемадзеянне значна больш інтэнсіўнае за электрамагнітнае і тым больш гравітацыйнае, за што і атрымала сваю назву. Вобразна моцнае ўзаемадзеянне можна назваць «волатам з кароткімі рукамі». Моцныя ўзаемадзеянні паміж нуклонамі ў ядрах атамаў забяспечваюць устойлівасць ядзер розных атамаў. Паводле сучасных уяўленняў, моцнае ўзаемадзеянне пераносіцца квантамі новага тыпу — глюёнамі, якія падобна фатонам з'яўляюцца бязмасавымі часціцамі.

У **слабым узаемадзеянні** ўдзельнічаюць любыя элементарныя часціцы, акрамя фатонаў. Радыус дзеяння слабых сіл вызначаецца характэрным памерам элементарных часціц ($\sim 10^{-18}$ м). Гэта ўзаемадзеянне мацнейшае за гравітацыйнае, але значна слабейшае за электрамагнітнае і моцнае ўзаемадзеянні. Слабыя ўзаемадзеянні праяўляюцца пры распадах адных элементарных часціц, у выніку чаго з'яўляюцца іншыя элементарныя часціцы. Такім чынам, слабае ўзаемадзеянне вызначае стабільнасць элементарных часціц і адыгрывае вырашальную ролю пры іх узаемаператварэннях. Яно ажыццяўляецца пасродкам абмену досыць масіўнымі часціцамі — базонамі (W^+ , W^- , Z^0), масы якіх складаюць каля 80 мас пратона. Базоны былі эксперыментальна адкрыты ў 1983 г.

Калі прыняць інтэнсіўнасць моцнага ўзаемадзеяння за адзінку (~ 1), то адносная інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння будзе складаць $\sim 10^{-2}$, слабага $\sim 10^{-10}$, гравітацыйнага $\sim 10^{-38}$. З гэтага вынікае цікавы факт — найвялікшыя намаганні ў прыродзе неабходны для ўтрымання найбольш дробных часціц, а не планет ці зорных гігантаў!

Уся разнастайнасць узаемадзеянняў навакольнага свету, паводле сучаснай квантава-палявой карціны свету, зводзіцца да ўзаемадзеяння дзвюх груп квантавых аб'ектаў, першую з якіх складаюць **удзельнікі фундаментальных узаемадзеянняў**, а другую — іх **пераносчыкі**.

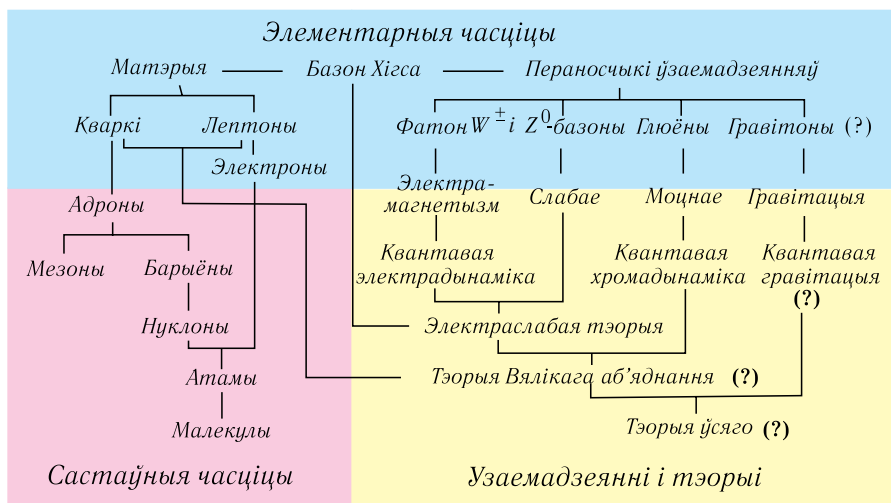
Да ўдзельнікаў узаемадзеянняў адносяцца электроны, пратоны, нейтроны, якія і з'яўляюцца першасным «будаўнічым матэрыялам» для стварэння ўсяго матэрыяльнага ў прыродзе. Абмен часціцамі-пераносчыкамі (гравітон, фатон, глюёны і бозоны) дазваляе часціцам-удзельнікам ажыццяўляць чатыры тыпы фундаментальных узаемадзеянняў, да якіх зводзяцца ўсе назіраемыя ўзаемадзеянні ў прыродзе. Вобразна можна ўявіць сабе навакольны свет як царства фундаментальных часціц, «якія кішаць і ўзаемадзеіючы адна з адной».

На наступным «узроўні» больш складанай арганізацыі матэрыі размяшчаюцца элементарныя часціцы, складзеныя з фундаментальных, агульны лік якіх, паводле сучасных даных, — большы за 500. Далей ідуць ядры, якія складаюцца з нуклонаў, агульны лік адпавядае ліку хімічных элементаў і іх ізатопаў — 2000. На наступным этапе арганізацыі матэрыі з'яўляюцца атамы, складзеныя з ядзер і электронаў, колькасць якіх адпавядае колькасці ядзер.

Атамы, узаемадзеіючы паміж сабой, утвараюць малекулы, агульны лік якіх ацэньваецца прыкладна ў 10 млн і ўвесь час нарастае за кошт сінтэзу новых злучэнняў. Малекулы ўтвараюць розныя рэчывы, рэчывы — целы, целы — астранамічныя аб'екты, астранамічныя аб'екты — Сусвет.

У наш час актуальнай з'яўляецца праблема **аб'яднання** розных тыпаў фундаментальных узаемадзеянняў у рамках адной тэорыі. Абназдзейлівым поспехам на гэтым шляху стала аб'яднанне электрамагнітнага і слабага ўзаемадзеянняў у адзінае **электраслабае ўзаемадзеянне** (мал. 234). На павестцы дня — пабудова тэорыі вялікага аб'яднання, якая ўключае ў сябе электрамагнітнае, слабае і моцнае ўзаемадзеянні.

Яшчэ больш грандыёзная ідэя аб'яднання ўсіх чатырох фундаментальных узаемадзеянняў, уключаючы гравітацыю, у рамках тэорыі



Мал. 234. Элементарныя часціцы і тэорыі ўзаемадзеянняў

супераб'яднання. Гэта тэорыя можа быць створана на аснове навейшай фізічнай тэорыі «суперструн», распрацаванай амерыканскімі фізікамі М. Грынам і Д. Шварцам, якая аб'ядноўвае ўсе фундаментальныя ўзаемадзеянні пры звышвысокіх энергіях.

Акрамя пабудовы сучаснай фізічнай карціны свету, якая з'яўляецца састаўной часткай сучаснай прыродазнаўчанавуковай карціны свету, фізіка «сфармулявала» шэраг прынцыпаў, якія з'яўляюцца агульнымі для любога навуковага даследавання, г. зн. яны могуць лічыцца філасофскімі прынцыпамі. Сюды адносіцца прынцып **прычыннасці**, прынцып **адноснасці**, прынцыпы **захавання**, прынцып **інварыянтнасці**, прынцып **дадатковасці**, прынцып **адпаведнасці** і некаторыя іншыя.



1. Што разумеюць пад навуковай карцінай свету?
2. Што называецца механічнай карцінай свету? На чым яна грунтуецца?
3. Пералічыце асноўныя паняцці і законы электрамагнітнай карціны свету. Калі яна ўзнікла?
4. Якія навуковыя адкрыцці пакладзены ў аснову квантава-палявой карціны свету?
5. Што з'яўляецца асноўным матэрыяльным аб'ектам у сучаснай фізічнай карціне свету?
6. Якія часціцы з'яўляюцца пераносчыкамі фундаментальных узаемадзеянняў?
7. Якая колькасць фундаментальных часціц паводле сучасных уяўленняў?

8. Якая колькасць вядомых сёння элементарных часціц? Ядзер? Атамаў? Малекул?
9. У чым заключаецца сутнасць тэорыі вялікага аб'яднання? Супер-аб'яднання?
10. Якія агульнанавуковыя (філасофскія) прынцыпы былі сфармуляваны ў сучаснай фізічнай карціне свету?

Самае важнае ў раздзеле 8

Адрозніваюць чатыры тыпы **фундаментальных** узаемадзеянняў: гравітацыйнае, электрамагнітнае, моцнае, слабае.

У мікрасвеце выконваюцца фундаментальныя законы захавання **энергіі, імпульсу, электрычнага, барыённага і лептоннага зарадаў.**

Электрамагнітнае і слабае ўзаемадзеянні з'яўляюцца праяўленнем адзінага **электраслабага ўзаемадзеяння.**

У наш час актуальна праблема пабудовы тэорыі **вялікага аб'яднання**, якая магла б апісаць усе тыпы існуючых узаемадзеянняў.

Лабараторны эксперымент

Лабораторная работа № 1

Вывучэнне ваганняў груза на нітцы

Мэта работы: даследаванне залежнасці характарыстык ніцаных маятнікаў ад даўжыні ніткі, масы грузаў, амплітуды ваганняў.

Прыборы і прыналежнасці: два ніцаныя маятнікі з падвесамі для іх (шарыкі рознай масы), штатыў з заціскачкай, метровая лінейка з міліметровымі дзяленнямі, секундамер або гадзіннік з секунднай стрэлкай, вагі, разнавагі.

Разліковая формула

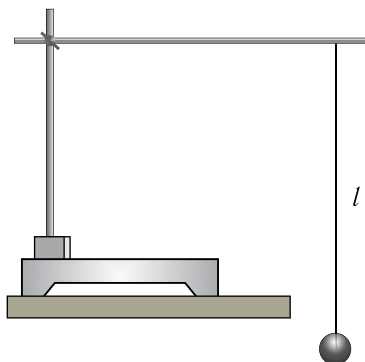
$$T = \frac{t}{n}.$$

Парадак выканання работы

1. Пастаўце штатыў на край стала так, каб заціскачка штатыва выступала за край стала (мал. 235).

2. Замацуйце ў заціскачцы штатыва падвес для маятніка і зацісніце ў ёй свабодны канец ніткі даўжынёй не менш за 1 м. Адвядзіце шарык ўбок і адпусціце яго: маятнік пачне вагацца.

3. Даследуйце, ці залежыць перыяд ваганняў матэматычнага маятніка ад амплітуды. Для гэтага адвядзіце шарык уздоўж стала ўбок на адлегласць ~10 см і асцярожна адпусціце яго,



Мал. 235

і імкнучыся пазбягаць бакавых штуршкоў. Вымерайце час 10 поўных ваганняў маятніка. Вызначыце перыяд ваганняў. Паўтарыце вымярэнні яшчэ не менш за 4 разы, вынікі занясіце ў табліцу. Вызначыце перыяд ваганняў гэтага ж маятніка, адхіляючы шарык на 20 см і 30 см. Вынікі вымярэнняў занясіце ў табліцу. Па выніках вымярэнняў зрабіце вывад: ці залежыць перыяд ваганняў матэматычнага маятніка ад амплітуды ваганняў $T(A)$.

4. Вазьміце другі маятнік той жа даўжыні, але з шарыкам іншай масы. Паўтараючы працэдуру, апісаную ў папярэднім пункце, вызначыце перыяд ваганняў маятніка з новым шарыкам. Параўнайце яго з перыядам, знойдзеным у папярэднім пункце, і зрабіце вывад: ці залежыць перыяд ваганняў ад масы шарыка $T(m)$.

5. Змяніце даўжыню маятніка, узяўшы яе роўнай 75 см і 50 см, і зноў вызначыце перыяд ваганняў маятніка, таксама як апісана ў пункце 3. Па выніках вымярэнняў зрабіце вывад: ці залежыць перыяд ваганняў маятніка ад яго даўжыні $T(l)$.

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	m , кг	n	l , м	Δl , м	t , с	Δt , с	T , с
Не менш за 4 доследы							
Сярэдняе значэнне							

Кантрольныя пытанні

1. Якую даўжыню мае матэматычны маятнік, перыяд ваганняў якога 1 с?

2. Як зменіцца перыяд ваганняў маятніка, калі масу шарыка павялічыць у 2 разы, а даўжыню ніткі маятніка паменшыць у 4 разы?

Вывады

Суперзаданне

Зрабіце матэматычны маятнік даўжынёй, разлічанай у кантрольным пытанні № 1. Эксперыментальна вызначыце перыяд яго ваганняў. Вынік прааналізуйце і зрабіце вывад.

Лабораторная работа № 2

Вымярэнне паскарэння свабоднага падзення з дапамогай матэматычнага маятніка

Мэта работы: вымярэнне паскарэння свабоднага падзення з выкарыстаннем формулы Гюйгенса для разліку перыяду ваганняў матэматычнага маятніка.

Прыборы і прыналежнасці: матэматычны маятнік, штатыў з заціскачкай, метровая лінейка з міліметровымі дзяленнямі, секундамер або гадзіннік з секунднай стрэлкай.

Разліковая формула

$$g = 4\pi^2 \frac{ln^2}{t^2}.$$

Парадак выканання работы

1. Пастаўце штатыў на край стала так, каб заціскачка штатыва выступала за край стала (мал. 235), і зацісніце ў ёй свабодны канец ніткі даўжынёй не менш за 1 м. Вымерайце даўжыню маятніка 3—5 разоў. Вылічыце сярэдняе значэнне $\langle l \rangle$. Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў занясіце ў табліцу.

2. Адвядзіце шарык убок на $5 \div 10$ см і адпусціце яго.

3. Вымерайце 3—5 разоў час 10 ваганняў маятніка і вылічыце сярэдняе значэнне $\langle t \rangle$. Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў занясіце ў табліцу.

4. Вылічыце сярэдняю абсалютную хібнасць вымярэння часу $\langle \Delta t \rangle$. Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

5. Вылічыце сярэдняе значэнне паскарэння свабоднага падзення. Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

6. Вызначыце адносную хібнасць вымярэння паскарэння свабоднага падзення і запішыце вынік вымярэння ў табліцу.

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	l , м	t , с	n	g , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	Δt , с	ϵ , %
3—5 доследаў						
Сярэдняе						

Кантрольныя пытанні

1. Ці аднолькавае паскарэнне свабоднага падзення на полюсе Зямлі і на яе экватары? Адказ абгрунтуйце.

2. Ці можна вымераць паскарэнне свабоднага падзення з дапамогай матэматычнага маятніка ва ўмовах бязважкасці? Адказ абгрунтуйце.

Вывады**Суперзаданне**

Матэматычны маятнік адхілілі на невялікі вугал і адпусцілі без штуршка. Праз прамежак часу t_1 ён апынецца ў становішчы раўнавагі. У другім выпадку яго паднялі да пункта падвешвання і адпусцілі (без штуршка). Праз прамежак часу t_2 ён таксама апынецца ў становішчы раўнавагі. Параўнайце прамежкі часу t_1 і t_2 руху шарыка. Адказ абгрунтуйце.

Лабораторная работа № 3

Вымярэнне жорсткасці sprужыны на падставе заканамернасцей ваганняў sprужыннага маятніка

Мэта работы: вымярэнне жорсткасці sprужыны з дапамогай sprужыннага маятніка.

Прыборы і прыналежнасці: набор грузаў па механіцы, трымальнік са спіральнай sprужынай, штатыў, лінейка з міліметровымі дзяленнямі, секундамер або гадзіннік з секунднай стрэлкай.

Разліковая формула

$$k = 4\pi^2 m \frac{n^2}{t^2}.$$

Парадак выканання работы

1. Вызначыце масу аднаго груза 3—5 разоў з дапамогай вагі. Вылічыце сярэдняе значэнне масы. Вынікі вымярэнняў занясіце ў табліцу.

2. Замацуйце sprужыну ў штатыве і падвесце да яе груз масай $m_1 = 0,1$ кг (мал. 236). Адхіліўшы груз уніз на адлегласць, прыкладна роўную 2 см, адпусціце яго. Вымерайце 3—5 разоў час, неабходны для выканання $n = 10$ поўных ваганняў. Вылічыце сярэдняе значэнне часу. Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў занясіце ў табліцу.

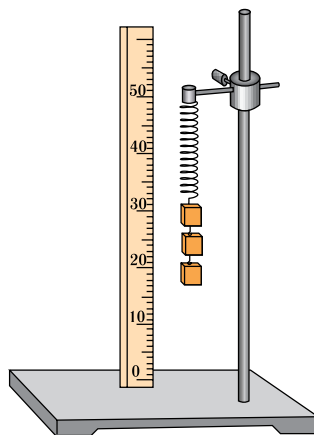
3. Вылічыце перыяд яго ваганняў T . Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

4. Вылічыце сярэдняе значэнне жорсткасці sprужыны, разлічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэння жорсткасці sprужыны. Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу. Запішыце значэнне жорсткасці sprужыны.

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	m , кг	Δm , кг	n	t , с	Δt , с	k , $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	Δk , $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	T , с	ϵ , %
3—5 доследаў									
Сярэдняе									

5. Запішыце значэнне жорсткасці sprужыны.



Мал. 236

Кантрольныя пытанні

1. Па якім законе адбываецца ваганне цела, падвешанага на спружыне?
2. Ці залежыць частата ваганняў спружыннага маятніка ад амплітуды ваганняў?
3. Якім быў бы вынік доследу ва ўмовах бязважкасці?

Вывады

Суперзаданне

Як зменіцца перыяд ваганняў груза на спружыне, калі дзве спружыны злучыць паслядоўна? Паралельна? Адказ абгрунтуйце тэарэтычна і праверце эксперыментальна.

Лабораторная работа № 4

Вымярэнне даўжыні светлавой хвалі з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі

Мэта работы: вымярэнне даўжыні светлавой хвалі для чырвонай і фіялетавай меж спектра з выкарыстаннем дыфракцыйнай рашоткі з вядомым перыядам.

Прыборы і прыналежнасці: прыбор для вызначэння даўжыні светлавой хвалі (мал. 237, а), лямпа напальвання, дыфракцыйная рашотка, штатыў.

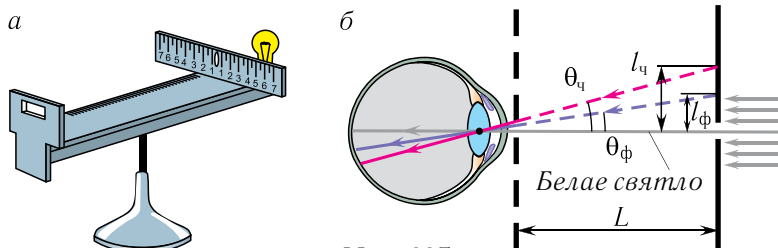
Разліковая формула

Калі глядзець на лямпу напальвання скрозь рашотку і шчыліну ў чорным экране, то на экране можна назіраць па абодва бакі ад шчыліны дыфракцыйныя спектры 1, 2, 3-га і г. д. парадкаў.

Даўжыня хвалі дыфракцыйнага максімуму першага парадку:

$$\lambda = \frac{ld}{L},$$

дзе d — шырыня шчыліны, L — адлегласць ад дыфракцыйнай рашоткі да экрана, l — адлегласць ад цэнтра шчыліны на экране да адпаведнага дыфракцыйнага максімуму (мал. 237, б).



Мал. 237

Парадак выканання работы

1. Устанавіце экран на адлегласці $L \sim 45\text{—}50$ см ад дыфракцыйнай рашоткі. Уключыце лямпу і размясціце яе за экранам са шчылінай (гл. мал. 237). Дамажыцеся найлепшых умоў бачнасці спектра.

2. Вымерайце адлегласць L 3—5 разоў, разлічыце сярэдняе значэнне $\langle L \rangle$. Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў занясіце ў табліцу.

3. Вымерайце адлегласці ад цэнтра шчыліны на экране да чырвонага $l_{\text{ч}}$ і фіялетавага $l_{\text{ф}}$ краёў спектра. Гэтыя адлегласці вымерайце 3—5 разоў справа і злева ад шчыліны на экране. Разлічыце сярэднія значэнні $\langle l_{\text{ч}} \rangle$ і $\langle l_{\text{ф}} \rangle$. Вынікі занясіце ў табліцу.

4. Разлічыце перыяд d рашоткі. Запішыце яго ў табліцу.

5. Вылічыце па формуле даўжыню хвалі для чырвонай $\langle \lambda_{\text{ч}} \rangle$ і фіялетавай $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle$ меж спектра.

6. Разлічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэнняў даўжынь хваль:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}, \quad \Delta \lambda = \varepsilon_{\lambda} \langle \lambda \rangle.$$

7. Запішыце значэнні даўжынь хваль і адноснай хібнасці іх вымярэння.

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	L , м	$l_{\text{ч1}}$, м	$l_{\text{ч2}}$, м	$l_{\text{ф1}}$, м	$l_{\text{ф2}}$, м	$\langle l_{\text{ч}} \rangle$, м	$\langle l_{\text{ф}} \rangle$, м	d , м	$\lambda_{\text{ч}}$, нм	$\lambda_{\text{ф}}$, нм	ε_{λ} , %	$\Delta \lambda$, нм
3—5 доследаў												
Сярэдняе												

Кантрольныя пытанні

1. Чаму нельга атрымаць геаметрычны (светлавы) прамень, памяншаючы да нуля шырыню шчыліны?

2. У якім парадку ідуць асноўныя колеры ў дыфракцыйным спектры? Ці супадае гэты парадак колераў у вясёлцы?

3. Як зменіцца характар дыфракцыйнага спектра, калі выкарыстаць дыфракцыйную рашотку з перыядам, у два разы большым, чым у вашым эксперыменце? У два разы меншым?

Вывады

Суперзаданне

Накіруйце прамень ад крыніцы святла на працоўную паверхню кампакт-дыска. Намалюйце, апішыце і растлумачце назіраемую карціну ў адбітым ад кампакт-дыска святле.

Лабораторная работа № 5

Вымярэнне паказчыка праламлення шкла

Мэта работы: вывучэнне праламлення святла на мяжы падзелу асяроддзяў паветра — шкло, вымярэнне паказчыка n праламлення шкла.

Прыборы і прыналежнасці: лабараторны камплект па опыцы, аркуш міліметровай паперы, лінейка, аловак, цыркуль.

Разліковая формула

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \approx n,$$

дзе α і γ — вуглы падзення і праламлення святла, n_2 — паказчык праламлення шкла.

Парадак выканання работы

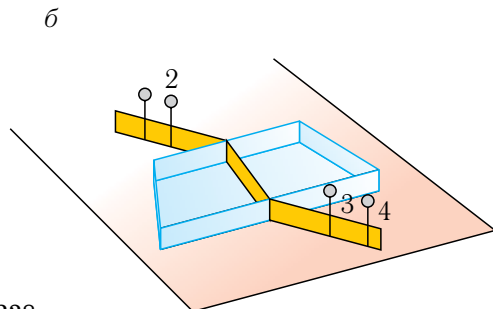
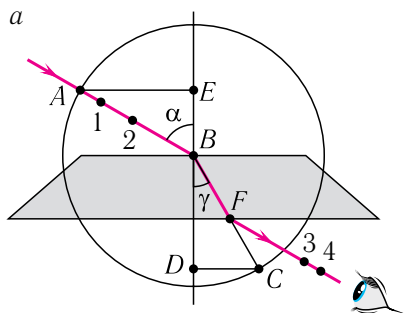
1. Устаноўце крыніцу святла на сталё, у акно прыбора ўстаўце экран са шчылінай. Шчыліна павінна быць размешчана вертыкальна.

2. Збярыце электрычны ланцуг, далучыўшы лямпачку да крыніцы пастаяннага току праз выключальнік. Замкніце ланцуг і атрымайце яркую, тонкую палоску святла на паперы (светлавы прамень).

3. Плоскапаралельную шкляную пласцінку размясціце на аркушы з міліметровымі дзяленнямі, абвядзіце яе контур востра заточаным алоўкам.

4. Назірайце з'яву праламлення святла пры розных вуглах падзення. Зафіксуйце ход праменяў, выкарыстаўшы шпількі (мал. 238, б).

5. Выканайце пабудову ў адпаведнасці з малюнкам 238, а. Вымерайце адрэзкі AE і DC . Вынікі вымярэнняў занясіце ў табліцу. Выканайце дадзены эксперымент не менш за 2 разы, змяняючы вугал падзення праменя на пласцінку. Правядзіце адпаведныя пабудовы і вымярэнні адрэзкаў AE і DC . Вынікі вымярэнняў занясіце ў табліцу.



Мал. 238

6. Вылічыце сярэднія значэнні даўжынь адрэзкаў $\langle AE \rangle$ і $\langle DC \rangle$. Даныя занясіце ў табліцу.

7. Вылічыце паказчык праламлення шкла:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle AE \rangle}{\langle DC \rangle}.$$

8. Разлічыце абсалютныя хібнасці вымярэння адрэзкаў:

$$\Delta AE = \Delta_i AE + \Delta_a AE, \quad \Delta DC = \Delta_i DC + \Delta_a DC.$$

Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

9. Разлічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэння абсалютнага паказчыка праламлення шкла:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta AE}{\langle AE \rangle} + \frac{\Delta DC}{\langle DC \rangle}.$$

Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

10. Запішыце значэнне паказчыка праламлення шкла і адноснай хібнасці яго вымярэння:

$$n = \langle n \rangle \pm \Delta n, \quad \varepsilon = \dots \%$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	AE , м	DC , м	$\langle n \rangle$	ΔAE , м	ΔDC , м	$\varepsilon = \dots \%$	Δn
Не менш за 2 доследы							
Сярэдняе							

Кантрольныя пытанні

1. Запішыце формулу для вылічэння скорасці святла ў рэчыве з паказчыкам праламлення n .

2. Ад чаго залежыць абсалютны паказчык праламлення рэчыва?

3. У чым заключаецца з'ява поўнага адбіцця святла на мяжы падзелу двух асяроддзяў?

Вывады

Суперзаданне

Паспрабуйце, выкарыстаўшы дадзеную шкляную пласцінку, назіраць з'яву поўнага адбіцця. Намалюйце аптычную схему для яго назірання. Ацаніце вугал поўнага адбіцця для пласцінкі.

Лабораторная работа № 6

Вывучэнне тонкай збіральнай лінзы

Мэта работы: вызначэнне фокуснай адлегласці і аптычнай сілы збіральнай лінзы.

Прыборы і прыналежнасці: лабараторны камплект па оптыцы, лінейка вымяральная, крыніца току, электрычная лампа, ключ, злучальныя правады, экран.

Вывучэнне тонкай збіральнай лінзы

Разліковая формула

Фокусная адлегласць F збіральнай лінзы вызначаецца па формуле:

$$F = \frac{df}{d+f}$$

і аптычная сіла

$$D = \frac{1}{F},$$

дзе d — адлегласць ад лінзы да прадмета, f — адлегласць ад лінзы да відарыса.

Парадак выканання работы

1. Устаноўце на сталае ўздоўж адной прамой крыніцу святла S (мал. 239) (лямпочку з каўпачком, у якім ёсць прарэз у выглядзе стрэлкі), збіральную лінзу і экран. Перасоўвайце лінзу да атрымання рэзкага і выразнага відарыса S' стрэлкі на экране.

2. Не змяняючы адлегласць паміж лямпай і экранам, вымерайце адлегласць d ад прарэзу ў акне прыбора да лінзы і адлегласць f ад лінзы да экрана 2—3 разы. Вынікі вымярэнняў занясіце ў табліцу.

3. Вылічыце сярэднія значэнні $\langle d \rangle$ і $\langle f \rangle$. Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

4. Вылічыце фокусную адлегласць

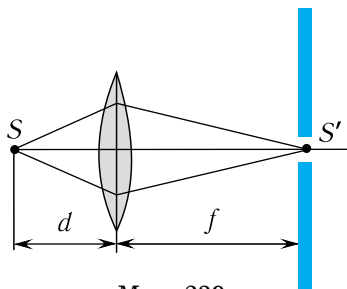
$$\langle F \rangle = \frac{\langle d \rangle \langle f \rangle}{\langle d \rangle + \langle f \rangle} \text{ і аптычную сілу } \langle D \rangle = \frac{1}{\langle F \rangle} \text{ лінзы.}$$

Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

5. Вылічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэнняў фокуснай адлегласці збіральнай лінзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle + \langle f \rangle}, \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.



Мал. 239

6. Вылічыце абсалютную хібнасць ускосных вымярэнняў фокуснай адлегласці збіральнай лінзы:

$$\Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

Вынікі вылічэнняў занясіце ў табліцу.

7. Запішыце значэнне фокуснай адлегласці збіральнай лінзы і адноснай хібнасці яе вымярэння ў выглядзе:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}, \varepsilon_F = \dots \%.$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	d , м	Δd , м	f , м	Δf , м	F , м	D , дптр	ε_F , %	ΔF , м
2—3 доследы								
Сярэдняе								

8. Павярніце лінзу да акна і атрымайце на экране малюнак аддаленага прадмета за акном. Вымерайце адлегласць ад лінзы да экрана і параўнайце яго з атрыманымі раней значэннямі фокуснай адлегласці лінзы. Зрабіце адпаведныя вывады.

Кантрольныя пытанні

1. У якім выпадку лінзу можна лічыць тонкай? Адказ абгрунтуйце.
2. Як па знешніх прыметах адрозніць збіральную лінзу ад рассеявальнай?

Вывады

Суперзаданне

Закрыйце аркушам цёмнай паперы палову лінзы і апішыце, як пры гэтым зменіцца відарыс прадмета на экране.



Адказы да практыкаванняў

- Пр. 1.** 1. $A = 0,60$ м; $T = 8,0$ с; $\nu = 0,13$ Гц. 3. $S = 15$ м. 4. $T = 0,33$ с;
 $\nu = 3,0$ Гц; $\omega = 19 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. 5. $x(t) = 20 \cos(2\pi t)$ (см) $= 0,20 \cos(2\pi t)$ (м).
- Пр. 2.** 1. $T = 7,3$ с; $\nu = 0,14$ Гц. 2. $l = 25$ см. 3. $k = 16 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. 4. $\Delta l = 10$ см.
 5. Адначасова. 6. $l_2 = 28$ см. 7. $T = 1,3$ с. 8. $l = 24,87$ см, $\varepsilon = 1,9\%$.
- Пр. 3.** 2. $W_{\text{мех}} = 0,80$ Дж; $h_{\text{мах}} = 80$ см. 3. $\Delta W_{\text{п}} = 0,10$ Дж; $\Delta W_{\text{кмах}} = 0,10$ Дж.
 4. $\eta_1 = 3,0$; $\eta_2 = 0,78$; $\eta_3 = 0$. 5. $W = 52$ мДж; $W_{\text{п}} = 19$ мДж;
 $W_{\text{к}} = 33$ мДж. 6. $W_{\text{п}} = 0,13$ Дж; $W_{\text{к}} = 50$ мДж; $x(t) = 5 \cos(32t)$ (см).
 7. $n = \frac{1}{8}$. 8. $W = 2\pi^2 \nu^2 A^2 m$.
- Пр. 4.** 2. Для ліквідацыі магчымага рэзанансу. 3. $\nu = 30 \frac{\text{км}}{\text{г}}$. 4. $l = 11,0$ см.
- Пр. 5.** 1. $\nu = 75 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 2. $T = 1,3$ с; $A = 5,0$ мкм. 3. $T = 2,9$ с. 4. $\nu = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
 5. $l = 0,63$ км. 6. $h = 50$ км.
- Пр. 6.** 1. $\Delta t_1 = 30$ с; $\Delta t_2 = 2,0$ с. 2. $\lambda_1 = 6,0$ мм; $\lambda_2 = 1,4$ мм. 3. $l = 0,34$ км.
 4. $H = 1,5 \cdot 10^2$ м. 5. $l = 0,26$ км. 6. $l = 0,45$ км. 7. $h = 2,0$ см; $d = 5,0$ см.
- Пр. 7.** 1. $T = 1,2$ мс. 2. $T = 0,89$ с. 3. $\nu = 36$ кГц. 4. Павялічыцца (паменшыцца) у 4 разы. 5. а) $U = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0,71U_0$; б) $U = -0,71U_0$. 6. Змяняецца ад
 1,2 пФ да 0,14 пФ. 7. Не; павялічыць абодва значэнні ў 1,24 раза.
- Пр. 8.** 1. $I_0 = 10$ А; $T = 1,0$ с; $\nu = 1,0$ Гц; $I_1 = 1,3$ А.
 2. $I(t) = -0,30 \sin(314t)$ (мА); $I_1 = -0,30$ мА; $I_2 = 0,30$ мА.
 3. $I(t) = 3,0 \sin(157t)$ (мА); $I_1 = 3,0$ мА; $I_2 = -2,1$ мА.
 4. $q(t) = 20 \cos(1570t)$ (мКл); $q_1 = -14$ мКл; $q_2 = 19$ мКл.
 5. $\nu = 25$ Гц; $U = 200$ В. 6. $\nu = 50$ Гц. 7. $U_0 = 6,2$ В.
- Пр. 9.** 1. $T = 50$ нс; $\nu = 2,0 \cdot 10^7$ Гц. 2. $l = 0,90$ км.
 3. $l_1 = 4,1 \cdot 10^{10}$ м; $l_2 = 3,2 \cdot 10^{10}$ м. 4. $N = 7,5 \cdot 10^3$. 5. $\lambda_1 = 30$ км;
 $\lambda_2 = 0,10$ км. 6. $\lambda = 7,5$ км. 7. $13 \text{ м} \leq \lambda \leq 0,10$ км. 8. $d_2 = 5,6$ мм.
- Пр. 10.** 1. $\tau = 493$ с. 2. $\nu = 1,95 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 3. $k = 1,135$. 4. $\tau = 2,00$ мс. 5. $l = 1,7$ км.
 6. $n = 1,52$.
- Пр. 11.** 1. Паслабленне (мінімум). 2. $N = 5$. 3. Паслабленне (мінімум).
- Пр. 12.** 1. $\theta = 6,2^\circ$. 2. $N = 1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{рыс}}{\text{м}}$. 3. $N = 1,3 \cdot 10^4 \frac{\text{рыс}}{\text{см}}$. 4. $m_{\text{мах}} = 3$.
 5. $m = 3$; $\theta_2 = 25^\circ$; $\theta_3 = 39^\circ$; $\theta_4 = 56^\circ$. 6. У другім парадку. Не залежыць.

Пр. 13. 1. $\alpha = 37^\circ$. 2. $H = 6,0$ м. 3. Так, магчыма; $x = 4,4$ м. 4. $b = 1,0$ м.

6. $u = 0,60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Пр. 15. 1. $H = 5,3$ м. 2. $n_{21} = 0,89$. 3. $\alpha = 41^\circ$. 4. $\alpha_2 = 82^\circ$. 5. $\alpha = 51^\circ$. 6. $\alpha = 49^\circ$.
7. $n_2 = 1,59$.

Пр. 16. 1. $n_1 = 1,5$; $n_2 = 1,3$; $n_3 = 1,8$. 2. $n_1 = 1,6$; $n_2 = 1,4$; $n_3 = 1,8$. 4. $l = 22$ мм.

Пр. 17. 4. Збіральная; $F = 18,3$ см. 5. $d = 24$ см; $h = 1,8$ см. 6. $d = 30$ см;
 $\Gamma = 0,67$. 7. $d = 5,8$ см.

Пр. 18. 1. $E = 9,0 \cdot 10^{10}$ Дж. 2. $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. 3. $\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-8}$ кг.

4. $\Delta m = 1,4 \cdot 10^{17}$ кг.

Пр. 19. 1. $E = 3,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. 2. $E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Дж; $\frac{E_2}{E_1} = 2,4$; $\frac{E_3}{E_1} = 6,0 \cdot 10^3$;
 $\frac{E_4}{E_1} = 6,0 \cdot 10^6$. 3. $v_{\min} = 5,0 \cdot 10^{14}$ Гц. 4. $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-7}$ м.

5. $A_{\text{вых}} = 4,2$ эВ; $N = 3,8 \cdot 10^{17}$. 6. $N = 1,4 \cdot 10^3$. 7. $E_{\text{к}}^{\max} = 6,27 \cdot 10^{-19}$ Дж;
 $v_{\max} = 1,17 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 8. $A_{\text{вых}} = 2,0$ эВ.

Пр. 20. 1. $N = 6$. 2. Энергія атама паменшылася на $\Delta E \approx 2,6$ эВ $\approx 4,1 \cdot 10^{-19}$ Дж.
3. З узроўню $N = 5$ на ўзровень $N = 1$; з узроўню $N = 1$ на ўзровень
 $N = 5$. 4. $\Delta E = 4,1 \cdot 10^{-19}$ Дж = 2,6 эВ. 5. $\Delta E = 12,1$ эВ. 6. $\lambda_1 = 2,3 \cdot 10^{-7}$ м;
 $\lambda_2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$ м; $\lambda_3 = 2,9 \cdot 10^{-7}$ м.

Пр. 21. 1. $A_1 = 225$; $A_2 = 131$; $A_3 = 91$. 3. а) $A = 11$; $N = 5$; $Z = 6$; б) $A = 19$;
 $N = 10$; $Z = 9$; в) $A = 40$; $N = 22$; $Z = 18$; г) $A = 64$; $N = 35$; $Z = 29$;
д) $A = 55$; $N = 30$; $Z = 25$. 4. а) Кальцый (Ca); б) магній (Mg); неон (Ne);
рэзерфарды (Rf). 5. а) Азот (N); б) алюміній (Al); магній (Mg).

Пр. 22. 1. Нейтрон (${}_0^1n$). 2. а) ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_4^7\text{Be} + {}_0^1n$; б) ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$;
в) ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He} + {}_1^1p$; г) ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_4^8\text{Be} + {}_0^0\gamma$. 3. $E = 127$ МэВ.
5. ${}_{12}^{25}\text{Mg} + {}_1^1p \rightarrow {}_{11}^{22}\text{Na} + {}_2^4\text{He}$. 6. $\Delta m = 0,0256$ а. а. м.; $Q = 23,8$ МэВ.
7. $\Delta m = 0,01549$ а. а. м.; вылучаецца, $Q = 14,4$ МэВ; $E = 14,4$ МэВ.

Пр. 23. 1. $\Delta m = 0,24157$ а. а. м. 2. $m_{\text{я}} = 7,0547$ а. а. м. = $1,1711 \cdot 10^{-26}$ кг.
3. $\varepsilon = 7,42 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. 4. $\varepsilon = 7,074 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. 5. $\Delta m = 0,10851$ а. а. м.;
 $\varepsilon = 7,22 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. 6. $E_{\text{суб}}(\text{N}) = 104,72$ МэВ; $E_{\text{суб}}(\text{He}) = 28,3$ МэВ;
 $E_{\text{суб}}(\text{O}) = 131,8$ МэВ.

Пр. 24. 1. α -часціцу. 2. Указанне: вылічыце дэфект мас. 3. Указанне: вылічыце
дэфект мас. 4. ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1n$; ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_1^0e$.
5. ${}_{8}^{19}\text{O} \rightarrow {}_9^{19}\text{F} + {}_{-1}^0e$. 6. ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + {}_2^4\alpha$.

Пр. 25. 1. $k_2 = 4,0$. 2. $k = 1,6$ %. 3. $t = 145$ гадоў. 4. $N_1 = 1,8 \cdot 10^{21}$; $N_2 = 5,7 \cdot 10^{19}$.
5. $m = 0,25$ кг.

Пр. 26. 1. а) $Q = 172$ МэВ; б) $Q = 185$ МэВ; в) $Q = 173$ МэВ; г) $Q = 168$ МэВ.

ЗМЕСТ

Ад аўтараў	3
------------------	---

Раздзел 1. Механічныя ваганні і хвалі

§ 1. Вагальны рух. Гарманічныя ваганні	5
§ 2. Спружынны і матэматычны маятнікі	14
§ 3. Ператварэнні энергіі пры гарманічных ваганнях	21
§ 4. Свабодныя і вымушаныя ваганні. Рэзананс	26
§ 5. Распаўсюджванне ваганняў у пругкім асяроддзі. Падоўжныя і папярочныя хвалі	32
§ 6. Гукавыя хвалі	39
Самае важнае ў раздзеле 1	47

Раздзел 2. Электрамагнітныя ваганні і хвалі

§ 7. Вагальны контур. Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры. Формула Томсана. Ператварэнні энергіі ў вагальным контуры	51
§ 8. Вымушаныя электрамагнітныя ваганні. Пераменны электрычны ток	59
§ 9. Пераўтварэнне пераменнага току. Трансфарматар	65
§ 10. Вытворчасць, перадача і выкарыстанне электрычнай энергіі	68
§ 11. Экалагічныя праблемы вытворчасці і перадачы электрычнай энергіі ...	71
§ 12. Электрамагнітныя хвалі і іх уласцівасці. Шкала электрамагнітных хваль	74
§ 13. Дзеянне электрамагнітнага выпраменьвання на жывыя арганізмы	81
Самае важнае ў раздзеле 2	86

Раздзел 3. Оптыка

§ 14. Электрамагнітная прырода святла	88
§ 15. Інтэрферэнцыя святла	94
§ 16. Прынцып Гюйгенса — Фрэнеля. Дыфракцыя святла. Дыфракцыйная рашотка	102
§ 17. Прамалінейнае распаўсюджванне і адбіццё святла. Люстры	110
§ 18. Увагнутыя і выпуклыя сферычныя люстры. Пабудова відарысаў	114
§ 19. Закон праламлення святла. Паказчык праламлення. Поўнае адбіццё	121
§ 20. Праходжанне святла праз аптычныя элементы	127
§ 21. Формула тонкай лінзы	130
§ 22. Аптычныя прыборы для атрымання сапраўдных відарысаў	139
§ 23. Аптычныя прыборы для павелічэння вугла зроку	141
Самае важнае ў раздзеле 3	146

Раздзел 4. Асновы спецыяльнай тэорыі адноснасці

§ 24. Прынцып адноснасці Галілея і электрамагнітныя з’явы. Эксперыментальныя перадумовы спецыяльнай тэорыі адноснасці	151
---	-----

§ 25. Пастулаты спецыяльнай тэорыі адноснасці	155
§ 26. Элементы рэлятывісцкай дынамікі. Узаемасувязь масы і энергіі	158
Самае важнае ў раздзеле 4	161

Раздзел 5. Фатоны. Дзеянні святла

§ 27. Фотаэфект. Эксперыментальныя законы знешняга фотаэфекту. Квантавая гіпотэза Планка	163
§ 28. Фатон. Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту	169
§ 29. Ціск святла. Карпускулярна-хвалевы дуалізм	177
Самае важнае ў раздзеле 5	181

Раздзел 6. Фізіка атама

§ 30. З'явы, якія пацвярджаюць складаную будову атама. Ядзерная мадэль атама	183
§ 31. Квантавыя пастулаты Бора	188
§ 32. Выпраменьванне і паглыннанне святла атамам. Спектры выпускаання і паглынання	195
§ 33. Спонтаннае і індукцыраванае выпраменьванне	199
§ 34. Лазеры	203
Самае важнае ў раздзеле 6	206

Раздзел 7. Ядзерная фізіка і элементарныя часціцы

§ 35. Пратонна-нейтронная мадэль будовы ядра атама	208
§ 36. Ядзерныя рэакцыі. Законы захавання ў ядзерных рэакцыях	214
§ 37. Энергія сувязі ядра атама	220
§ 38. Радыеактыўнасць	224
§ 39. Закон радыеактыўнага распаду	232
§ 40. Дзяленне цяжкіх ядзер. Ланцуговыя ядзерныя рэакцыі	235
§ 41. Ядзерны рэактар	241
§ 42. Рэакцыі ядзернага сінтэзу	246
§ 43. Іанізуючае выпраменьванне. Элементы дазіметрыі	251
§ 44. Элементарныя часціцы і іх узаемадзеянні	258
Самае важнае ў раздзеле 7	263

Раздзел 8. Асновы адзінай фізічнай карціны свету

§ 45. Сучасная прыродазнаўчанавуковая карціна свету	266
Дадатак. Лабараторны эксперымент	274
Адказы да практыкаванняў	284

(Назва ўстановы адукацыі)

Навучальны год	Імя і прозвішча навучэнца	Стан вучэбнага дапаможніка пры атрыманні	Адзнака навучэнцу за карыстанне вучэбным дапаможнікам
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Вучэбнае выданне

Жылко Віталій Уладзіміравіч
Марковіч Леанід Рыгоравіч
Сакольскі Анатоль Аляксеевіч

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання

(з электронным дадаткам для павышанага ўзроўню)

Галоўны рэдактар *А. У. Ліцвіновіч*. Рэдактар *Г. А. Бабаева*.
Мастацкі рэдактар *А. А. Праваловіч*.

Тэхнічнае рэдагаванне і камп'ютарная вёрстка *Г. А. Дудко*.
Карэктары *В. С. Казіцкая, А. П. Тхір, Г. В. Алешка*.

Падпісана да друку 07.05.2021. Фармат $70 \times 90^{1/16}$. Папера афсетная.
Друк афсетны. Ум. друк. арк. 21,06 + 0,29 форз.
Ул.-выд. арк. 15,2 + 0,4 форз. + 22,3 эл. дадатак.
Тыраж 10 500 экз. Заказ .

Выдавецкае рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства
«Народная асвета» Міністэрства інфармацыі Рэспублікі Беларусь.
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/2 ад 08.07.2013.
Пр. Пераможцаў, 11, 220004, Мінск, Рэспубліка Беларусь.

Адкрытае акцыянернае таварыства «Паліграфкамбінат імя Я. Коласа».

Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/3 ад 10.09.2018.
Вул. Каржанеўскага, 20, 220024, Мінск, Рэспубліка Беларусь.

Правообладатель Народная асвета

ПЕРЫЯДЫЧНАЯ СИСТЭМА ХІМІЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАЎ Д. І. МЕНДЗЯЛЕЕВА

ГРУПЫ ЭЛЕМЕНТАЎ

Атамы нумар

37

Сымвал элемента

Rb

Назва элемента

РУБІДЫЙ

Адносная атамная маса

85,468

Д. І. Мендэлееў
(1834–1907)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																



Д. І. Мендзэлеў
(1834–1907)

Атамны нумар → 37

Сімвал элемента → **Rb**

Назва элемента → **РУБІДЫЙ**

Адносная атамная маса → 85,468

ЛАНТАНЫДЫ

АКТЫНІДЫ

- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы