В. У. Жылко
Л. Р. Марковіч

Фізіка

11

В. У. Жылко Л. Р. Марковіч

Фізіка

Вучэбны дапаможнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання

Дапушчана
Міністэрствам адукацыі
Рэспублікі Беларусь

2-е выданне, перагледжанае і дапоўненае

Мінск «Народная асвета» 2014

Правообладатель Народная асвета

УДК 53(075.3=161.3)
ББК 22.3я721
Ж94

Пераклад з рускай мовы *Н. Г. Ляўчук*

Рэцэнзент

кафедра фізікі і тэхнічных дысцыплін фізіка-матэматычнага факультэта ўстановы адукацыі «Магілёўскі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. А. Куляшова» (кандыдат педагагічных навук, дацэнт, загадчык кафедры *В. М. Кротаў*)

Жылко, В. У.

Ж94 Фізіка : вучэб. дапам для 11-га кл. устаноў агул. сярэд. адукацыі з беларус. мовай навучання / В. У. Жылко, Л. Р. Марковіч ; пер. з рус. мовы Н. Г. Ляўчук. — 2-е выд., перагледж. і дап. — Мінск : Народная асвета, 2014. — 287 с. : іл.

ISBN 978-985-03-2171-8.

Папярэдняе выданне выйшла ў 2009 г.

УДК 53(075.3=161.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-985-03-2171-8

© Жылко В. У., Марковіч Л. Р., 2009
© Жылко В. У., Марковіч Л. Р., 2014, са змяненнямі
© Ляўчук Н.Г., пераклад на беларускую мову, 2014
© Афармленне. УП «Народная асвета», 2014

Правообладатель Народная асвета

АД АЎТАРАЎ

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

У 11-м класе вы будзеце вывучаць фізіку ваганняў і хвалевых працэсаў, а таксама оптыку. Вы пазнаёміцеся з цікавымі з'явамі і законамі квантавай фізікі, фізікі мікрасвету (атама, ядра, элементарных часціц), асновамі спецыяльнай тэорыі адноснасці, якая ў свой час «перавярнула свет».

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

Матэрыял дадзенага вучэбнага дапаможніка складаецца з васьмі раздзелаў, якія падзелены на параграфы.

У вучэбным дапаможніку ёсць рубрыка «Паўтарэнне», адзначаная знакам , якая дазваляе перад пачаткам вывучэння новай тэмы коратка паўтарыць раней вывучаны вамі матэрыял.

У кожным з параграфаў для канцэнтрацыі ўвагі азначэнні і фармулёўкі законаў вылучаны тлустым шрыфтам, а формулы для запамінання змешчаны ў рамкі. Кантрольныя пытанні да параграфа адзначаны знакам , далей прыведзены прыклады рашэння задач і задачы для самастойнага рашэння. Для засваення матэрыялу вам варта не толькі вывучыць тэорыю, але і самастойна выканаць заданні, прапанаваныя ў практыкаваннях.

У канцы кожнага раздзела пададзены найбольш важны матэрыял для засваення тэарэтычных ведаў і фарміравання практычных уменняў.

Правообладатель Народная асвета

У Дадатку да вучэбнага дапаможніка прыведзены інструкцыі да лабараторных работ, а ў канцы дапаможніка — адказы да практыкаванняў і прадметна-імянны паказальнік.

У рубрыцы «Гэта цікава», адзначанай знакам , тлумачацца незвычайныя фізічныя факты і з'явы, а таксама прапаноўваюцца дадатковыя звесткі, звязаныя з матэрыялам, які разглядаецца. Гэтыя звесткі могуць быць карыснымі пры напісанні рэфератаў, падрыхтоўцы дакладаў для школьнай канферэнцыі і г. д.

Старанна выконвайце заданні і рэкамендацыі настаўніка. Цудаў не бывае — толькі самастойная і настойлівая праца ў класе і дома прывядзе вас да поспеху пры вывучэнні фізікі.

Жадаем поспехаў! *Аўтары*

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 1
Механічныя ваганні і хвалі

Если Вы посмотрите историю физики, то увидите, что главные открытия, по существу, были колебательные.

Л. І. Мандэльштам

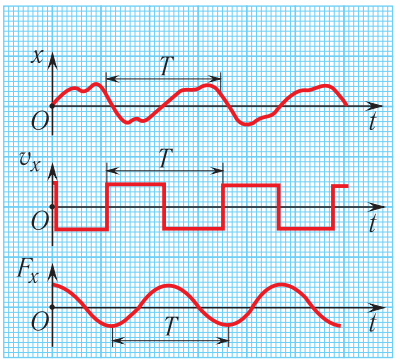
А круговое движение первее прямолинейного: оно проще и более совершенно.

Арыстоцель

§ 1. Вагальны рух. Гарманічныя ваганні. Амплітуда, перыяд, частата, фаза ваганняў. Ураўненне гарманічных ваганняў

Пры руху матэрыяльнага пункта (МП) па акружнасці, радыус якой R, з пастаяннай вуглавой скорасцю ω вугал павароту φ радыус-вектара МП змяняецца з часам па законе $\varphi = \omega t$. Цэнтраімклівае (нармальнае) паскарэнне МП накіравана да цэнтра акружнасці, і яго модуль роўны $a_ц = \omega^2 R$.
Цела знаходзіцца ў раўнавазе, калі вектарная сума ўсіх сіл, прыкладзеных да яго, і алгебраічная сума момантаў гэтых сіл адносна любой восі роўны нулю.

Рух, пры якім усе фізічныя велічыні, што яго характарызуюць (напрыклад, каардыната x, праекцыя скорасці v_x, праекцыя дзеючай сілы F_x), прымаюць аднолькавыя значэнні праз роўныя прамежкі часу T (рыс. 1), называецца **перыядычным**.

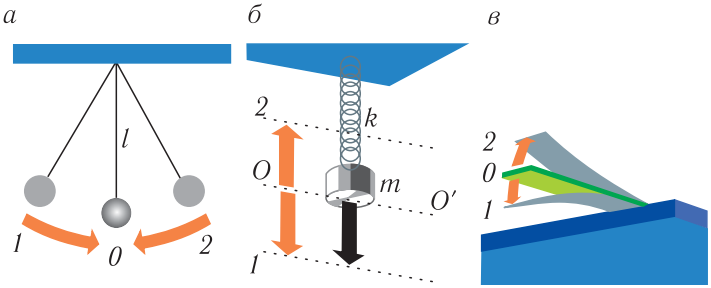


Рыс. 1. Графікі перыядычных залежнасцей x, v_x, F_x ад часу

Перыядычны рух з'яўляецца вагальным, калі цела або матэрыяльны пункт рухаецца паблізу становішча раўнавагі, адхіляючыся ад яго то ў адзін, то ў другі бок. Напрыклад, механічным вагальным рухам з'яўляецца рух цела, падвешанага на нітцы (рыс. 2, *а*), а таксама рух грузу на спружыне (рыс. 2, *б*) і металічнай пласцінкі, адзін канец якой замацаваны (рыс. 2, *в*).

Пры гэтым праз любы пункт траекторыі (акрамя крайніх) цела праходзіць як у прамым, так і ў адваротным напрамку.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 2. Вагальныя рухі: *а* — цела, падвешанага на нітцы; *б* — грузу на спружыне; *в* — металічнай пласцінкі, замацаванай на канцы

Такім чынам, **вагальным** называецца перыядычны рух (працэс), пры якім любая фізічная велічыня (напрыклад, каардыната), што яго характарызуе, пачаргова прымае то дадатнае, то адмоўнае значэнне ў параўнанні са значэннем становішча устойлівай раўнавагі. Значыць, перыядычны вагальны рух (ваганні) валодае уласцівасцю **паўтаральнасці ў часе.**

Падкрэслім, што па сваёй прыродзе ваганні могуць быць не толькі механічнымі, але і электрамагнітнымі (якія адпавядаюць змяненням напружання і сілы току ў электрычным ланцугу), тэрмадынамічнымі (якія адпавядаюць перыядычным змяненням тэмпературы сістэмы з цягам часу) і г. д.

Ваганні — асаблівая 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.

Эксперыменты паказваюць, што для ўзнікнення і існавання механічных ваганняў неабходна выкананне пэўных умоў. Перш за ўсё пры вывядзенні (напрыклад, пры невялікім зрушэнні) цела са становішча раўнавагі ў сістэме павінна ўзнікаць выніковая сіла, якая будзе імкнуцца вярнуць цела ў становішча раўнавагі. Акрамя таго, у сістэме не павінна існаваць вялікае трэнне, паколькі ў гэтым выпадку ваганні хутка знікнуць (з прычыны страты энергіі) або не ўзнікнуць наогул.

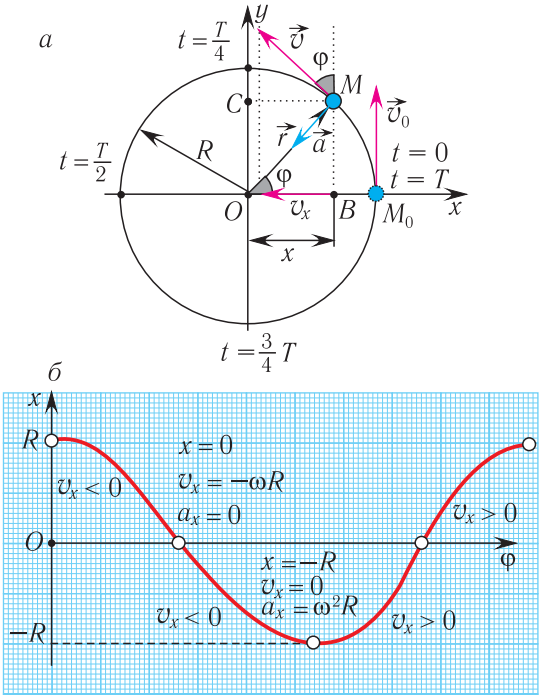
Разгледзім раўнамерны рух матэрыяльнага пункта M па акружнасці радыусам R (рыс. 3, *а*). Няхай разглядаемы рух адбываецца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі. Выберам вось Ox, як паказана на рысунку 3, *а*. Калі ў пачатковы момант часу $t_0 = 0$ матэрыяльны пункт знаходзіцца ў становішчы M_0, то праз прамежак часу $\Delta t = t - t_0$ ён апынецца ў некаторым становішчы M. Спраецыруем на вось Ox радыус-вектар $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ пункта, што рухаецца, яго лінейную скорасць $\vec{v}$ і цэнтраімклівае паскарэнне $\vec{a}$.

Правообладатель Народная асвета

Праекцыя x радыус-вектара ў становішчы M (пункт B) з'яўляецца зрушэннем матэрыяльнага пункта ад цэнтра акружнасці O ўздоўж восі Ox (гл. рыс. 3, *а*). Значыць, на восі Ox гэтаму зрушэнню пункта адпавядае каардыната x пункта B.

Паколькі пры раўнамерным вярчэнні пункта M па акружнасці яго каардыната (зрушэнне) x будзе перыядычна змяняцца ад $x_{max} = +R$ да $x_{min} = -R$, то можна сказаць, што пункт B выконвае *вагальны рух уздоўж восі Ox*, а яго каардыната x з'яўляецца каардынатай пункта, што вагаецца (рыс. 3, *б*).

Значыць, праекцыя лінейнай скорасці матэрыяльнага пункта M на вось Ox з'яўляецца праекцыяй скорасці v_x пункта B і перыядычна змяняецца ад $+v_0 = \omega R$ да $-v_0 = -\omega R$, а праекцыя яго цэнтраімклівага паскарэння — праекцыяй паскарэння a_x пункта B, якое таксама перыядычна змяняецца ад $+\omega^2 R$ да $-\omega^2 R$.



Рыс. 3. Рух матэрыяльнага пункта M па акружнасці: *а* — характарыстыкі руху; *б* — вагальная залежнасць каардынаты $x(\varphi)$, якая адпавядае руху па акружнасці

Радыус-вектар $\vec{r}$ за прамежак часу Δt павярнуўся на вугал $\varphi = \omega \Delta t$ (гл. рыс. 3, *а*). Пры раўнамерным вярчэнні пункта M па акружнасці яго лінейная скорасць $\vec{v}$ накіравана па датычнай, а цэнтраімклівае паскарэнне $\vec{a}$ — да цэнтра акружнасці (гл. рыс. 3, *а*). Такім чынам,

$$x = R\cos\varphi; \qquad v_x = -v_0 \sin\varphi; \qquad a_x = -a_0 \cos\varphi.$$

З улікам таго, што модуль лінейнай скорасці $v_0 = \omega R$, модуль цэнтраімклівага паскарэння $a_0 = \omega^2 R$ і $\omega = \frac{2\pi}{T}$, выконваюцца суадносіны:

$$v_0 = \omega R = \frac{2\pi}{T} R = \omega x_{max};$$

$$a_0 = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \omega^2 x_{max} = \omega v_0,$$

дзе T — перыяд вярчэння цела па акружнасці.

Правообладатель Народная асвета

Калі пры $t = 0$ матэрыяльны пункт знаходзіўся ў пункце M_0, то каардынату x, праекцыі скорасці v_x і паскарэння a_x пункта B у любы момант часу можна вызначыць па формулах:

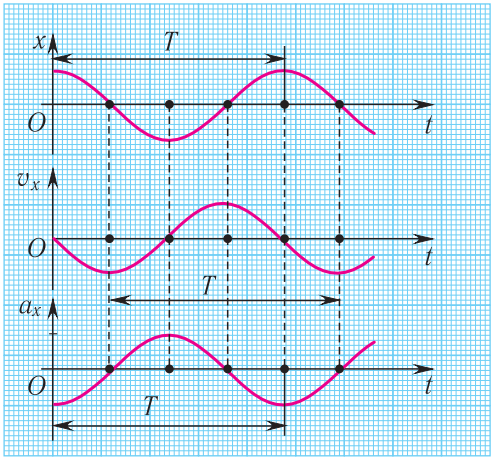
$$x = R\cos\omega t = R\cos\frac{2\pi}{T}t;$$

$$v_x = -\omega R\sin\omega t = -\frac{2\pi}{T}R\sin\frac{2\pi}{T}t = -v_0\sin\frac{2\pi}{T}t;$$

$$a_x = -\omega^2 R\cos\omega t = -\frac{4\pi^2}{T^2}R\cos\omega t = -a_0\cos\frac{2\pi}{T}t.$$

Табліца 1. **Каардыната x, праекцыі скорасці v_x і паскарэння a_x цела, якое рухаецца па акружнасці, у розныя моманты часу**

t	x	v_x	a_x
0	R	0	$-a_0$
$\frac{T}{4}$	0	$-v_0$	0
$\frac{T}{2}$	$-R$	0	a_0
$\frac{3T}{4}$	0	v_0	0
T	R	0	$-a_0$



Рыс. 4. Залежнасці x, v_x, a_x ад часу пры вагальным руху матэрыяльнага пункта

Паколькі функцыі $\sin\omega t$ і $\cos\omega t$ перыядычныя, то праз прамежак часу, роўны перыяду T, пасля якога вугал φ зменіцца на 2π, усе характарыстыкі руху пункта B уздоўж восі Ox (каардыната, праекцыі скорасці і паскарэння) прымуць ранейшыя значэнні (табл. 1), г. зн. значэнні характарыстык перыядычна паўтараюцца.

Пункт B на працягу гэтага прамежку часу два разы праходзіць праз пачатак каардынат, рухаючыся ў процілеглых напрамках уздоўж восі Ox (гл. рыс. 3, *а*). Як ужо было адзначана, паўтаральнасць — асноўная прымета перыядычнага руху.

Графікі залежнасцей каардынаты x, праекцыі скорасці v_x і праекцыі паскарэння a_x ад часу паказаны на рысунку 4, дзе t — час, які адлічваецца ад моманту пачатку ваганняў.

Звернем увагу на тое, што праекцыя паскарэння $a_x(t)$ ($a_x = -\omega^2 R\cos\omega t$) пункта B (гл. рыс. 3, *а*) у любы момант часу прапарцыянальная зрушэнню (каардынаце) $x(t)$ ($x = R\cos\omega t$) і процілеглая яму па знаку:

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

Правообладатель Народная асвета

Перапішам дадзеную суадносіну ў выглядзе

$$\boxed{a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0.} \qquad (1)$$

Ваганні, што апісваюцца ўраўненнем (1), з'яўляюцца *гарманічнымі*, а сістэма, якая выконвае такія ваганні, — **гарманічнай вагальнай сістэмай**, або **гарманічным асцылятарам** (ад лац. oscillo — вагаюся).

Ураўненне (1) апісвае **гарманічныя ваганні**, пры якіх каардыната (зрушэнне) цела ад часу змяняецца па **законе косінуса**:

$$x(t) = x_{\max}\cos(\omega t + \varphi_0) = A\cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (2)$$

або **сінуса**:

$$x(t) = x_{\max}\sin(\omega t + \varphi_0) = A\sin(\omega t + \varphi_0), \qquad (3)$$

дзе φ_0 — *пачатковая фаза*, якая вызначае стан вагальнай сістэмы ў пачатковы момант часу, $A = x_{\max}$ — амплітуда ваганняў.

Залежнасць каардынаты ад часу $x(t)$ (суадносіны (2) і (3)) называецца кінематычным **законам (або ўраўненнем) гарманічных ваганняў (законам руху)**, паколькі дазваляе вызначыць становішча цела, яго скорасць, паскарэнне ў адвольны момант часу.

Найбольш важнымі велічынямі, якія характарызуюць механічныя перыядычныя ваганні, з'яўляюцца:

$x(t)$ — **каардыната** МП (зрушэнне са становішча раўнавагі) у момант часу t:

$$x = f(t); \qquad f(t) = f(t + T),$$

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

$A\ (A > 0)$ — **амплітуда ваганняў** — максімальнае зрушэнне $x_{\max}$ цела або сістэмы цел са становішча ўстойлівай раўнавагі;

$T = \frac{t}{N}$ — **перыяд** — працягласць аднаго поўнага вагання, г. зн. найменшы прамежак часу, па заканчэнні якога паўтараюцца значэнні ўсіх фізічных велічынь, што характарызуюць ваганне. Тут t — час выканання N поўных ваганняў.

У СІ адзінкай перыяду ваганняў з'яўляецца **1 секунда** (1 с).

ν — **частата** — лік поўных ваганняў, якія выконваюцца ў адзінку часу:

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

Правообладатель Народная асвета

У СІ адзінкай частаты ваганняў з'яўляецца **1 герц** (1 Гц); 1 Гц роўны частаце ваганняў цела, пры якой за 1 с цела выконвае адно поўнае ваганне ($1\ \text{Гц} = 1\ \text{с}^{-1}$).

ω — **цыклічная частата** — лік поўных ваганняў, якія выконваюцца за прамежак часу Δt, роўны 2π секунд:

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

У СІ адзінкай цыклічнай частаты з'яўляецца **1 радыян у секунду** $\left(1\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$.

$\varphi = \omega t + \varphi_0$ — **фаза** (ад грэч. φασιζ (фазіс) — з'яўленне, момант з'яўлення) — аргумент перыядычнай функцыі, які вызначае значэнне фізічнай велічыні ў любы момант часу t. Фаза вызначае стан вагальнай сістэмы (каардынаты, скорасці, паскарэння) у любы момант часу пры зададзенай частаце і амплітудзе.

Адзінкай фазы з'яўляецца **1 радыян** (1 рад).

φ_0 — **пачатковая фаза**, якая вызначае стан вагальнай сістэмы ў пачатковы момант часу ($t_0 = 0$).

Цыклічная частата ω гарманічных ваганняў залежыць толькі ад уласцівасцей сістэмы, у якой адбываюцца ваганні, але не залежыць ад амплітуды ваганняў. Амплітуда ваганняў A і пачатковая фаза φ_0 вызначаюцца не ўласцівасцямі самой сістэмы, а тым спосабам, якім у сістэме выкліканы ваганні.

Паколькі паскарэнне цела заўсёды абумоўлена дзеяннем сілы, то па другім законе Ньютана ў праекцыі на вось Ox можна запісаць:

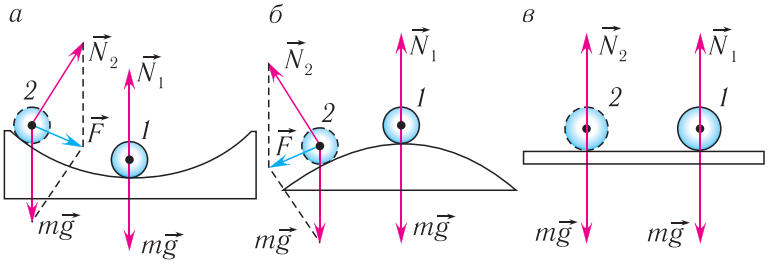
$$F_x = ma_x = -m\omega^2 x.$$

Значыць, пры гарманічных ваганнях праекцыя сілы F_x, якая вяртае цела ў становішча раўнавагі ($x = 0$), прапарцыянальна яго зрушэнню ад гэтага становішча (каардынаце) ($F_x = -kx$), прычым знак «мінус» адлюстроўвае «зваротны» характар сілы, што ўзнікае. Як ужо адзначалася, з'яўленне сілы, што вяртае цела пры яго адхіленні ад становішча раўнавагі, з'яўляецца неабходнай умовай узнікнення ваганняў.

Становішчу раўнавагі цела адпавядае пункт, у якім раўнадзейная ўсіх сіл, прыкладзеных да яго, роўна нулю ($\vec{F} = \vec{0}$). Каардынату гэтага пункта, як правіла, прымаюць роўнай нулю ($x = 0$).

Адрозніваюць некалькі відаў раўнавагі (рыс. 5). Раўнавага называецца *ўстойлівай*, калі пры невялікім адхіленні цела ад становішча раўнавагі ўзнікаюць сілы, якія вяртаюць яго ў зыходнае становішча. Раўнавага называецца

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 5. Становішчы ўстойлівай (*а*), няўстойлівай (*б*) і абыякавай (*в*) раўнавагі

няўстойлівай, калі пры невялікім адхіленні цела ад становішча раўнавагі ўзнікаюць сілы, якія выклікаюць далейшае адхіленне цела ад становішча раўнавагі. Раўнавага называецца *абыякавай*, калі пры адхіленні цела ад становішча раўнавагі раўнадзейная сіла застаецца роўнай нулю. Прыкладам устойлівай раўнавагі можа служыць раўнавага невялікага шарыка ў сферычнай ямцы, а няўстойлівай — раўнавага шарыка на вяршыні сферычнай горкі. Раўнавага шарыка на гарызантальнай паверхні з'яўляецца абыякавай.

Такім чынам, ваганні матэрыяльнага пункта могуць узнікаць толькі пры адхіленні ад становішча ўстойлівай раўнавагі. Калі пры гэтым ваганні адбываюцца пад дзеяннем вяртаючай сілы, модуль якой прама прапарцыянальны зрушэнню пункта са становішча раўнавагі і якая накіравана да становішча раўнавагі вагальнага цела, то яны будуць *гарманічнымі*.

Заўважым, што такім жа чынам, як мы разглядалі змяненне каардынаты x матэрыяльнага пункта M, які верціцца па акружнасці, можна разглядаць і змяненне яго каардынаты y (пункт C) (гл. рыс. 3, *а*). Значыць, пункт C будзе выконваць гарманічныя ваганні ўздоўж восі Oy.

Раўнамернае вярчэнне матэрыяльнага пункта па акружнасці можна разглядаць як накладанне двух аднолькавых па амплітудзе гарманічных ваганняў, якія адбываюцца адначасова ў двух узаемна перпендыкулярных напрамках.

1. Які рух называюць перыядычным?
2. Які рух называюць вагальным?
3. Якую вагальную сістэму называюць гарманічным асцылятарам?
4. Якое ўраўненне апісвае гарманічныя ваганні?
5. Што называюць амплітудай вагання? Перыядам? Частатой?
6. Якой суадносінай звязаны паміж сабой частата ν ваганняў з цыклічнай частатой ω?

Правообладатель Народная асвета

7. Што называецца фазай гарманічнага вагання? Пачатковай фазай гарманічнага вагання?
8. Што ўяўляе сабой кінематычны закон руху? Запішыце закон руху маятніка пры гарманічных ваганнях.
9. Ці могуць у нейкі момант часу супадаць напрамкі зрушэння і скорасці гарманічнага асцылятара?
10. У чым падабенства вярчальнага і вагальнага рухаў і ў чым іх адрозненне?

Прыклад рашэння задачы

За якую частку перыяду цела, што выконвае гарманічныя ваганні, праходзіць адлегласць: а) ад становішча раўнавагі да максімальнага зрушэння; б) першую палову гэтай адлегласці; в) другую палову гэтай адлегласці?

Рашэнне

Каардыната x цела, якое выконвае гарманічныя ваганні, вызначаецца суадносінай:

$$x = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

Тут A — амплітуда ваганняў, t — час, які адлічваецца ад моманту праходжання целам становішча раўнавагі, T — перыяд ваганняў, φ_0 — пачатковая фаза.

Няхай цела знаходзіцца ў становішчы раўнавагі ў пачатковы момант часу $t_0 = 0$, тады $x(0) = 0$ і $\varphi_0 = 0$.

а) Прамежак часу Δt_1, неабходны целу для праходжання адлегласці ад сярэдняга становішча ў крайняе $x = A$, вызначаецца з ураўнення:

$$A = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_1\right).$$

Найменшае значэнне Δt_1, пры якім выконваецца гэта роўнасць, атрымліваецца пры

$$\frac{2\pi}{T}\Delta t_1 = \frac{\pi}{2}.$$

Адкуль шуканы прамежак часу:

$$\Delta t_1 = \frac{T}{4}.$$

б) Прамежак часу Δt_2, неабходны для праходжання першай паловы гэтай адлегласці $x = \frac{A}{2}$, вызначаецца з ураўнення:

$$\frac{A}{2} = A\sin\frac{2\pi}{T}\Delta t_2 \Rightarrow \frac{1}{2} = \sin\frac{2\pi}{T}\Delta t_2 \Rightarrow \frac{2\pi}{T}\Delta t_2 = \frac{\pi}{6}.$$

Правообладатель Народная асвета

Адсюль знаходзім

$$\Delta t_2 = \frac{T}{12}.$$

в) Прамежак часу Δt_3, неабходны для праходжання другой паловы гэтай адлегласці, вызначаецца з суадносіны:

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{T}{6}.$$

Адказ: а) $\Delta t_1 = \frac{T}{4}$; б) $\Delta t_2 = \frac{T}{12}$; в) $\Delta t_3 = \frac{T}{6}$.

Такім чынам, для праходжання першай паловы адлегласці цела затрачвае ў 2 разы менш часу, чым для праходжання другой паловы.

Практыкаванне 1

1. Матэрыяльны пункт за прамежак часу $\Delta t = 1{,}0$ мін выканаў $N = 180$ ваганняў. Вызначыце перыяд T, частату ν і цыклічную частату ω ваганняў матэрыяльнага пункта.

2. Вызначыце найбольшыя значэнні модуляў (амплітуду) скорасці v_{max} і паскарэння a_{max} вагальнага матэрыяльнага пункта, калі амплітуда яго ваганняў $A = 5{,}0$ см, а перыяд ваганняў — $T = 3{,}0$ с.

3. Матэрыяльны пункт выконвае ваганні па законе $x(t) = A\cos(\omega t + \varphi_0)$. За перыяд ваганняў пункт праходзіць шлях $l = 40$ см. Вызначыце каардынату x_1 матэрыяльнага пункта ў момант часу t_1, калі фаза ваганняў $\varphi = 0{,}20\pi$.

4. Амплітуда ваганняў матэрыяльнага пункта $A = 1{,}0$ см, частата $\nu = 0{,}50$ Гц. Запішыце кінематычны закон руху $x(t)$ і пабудуйце графік залежнасці каардынаты пункта ад часу. Вызначыце фазу φ і каардынату x пункта праз прамежак часу $t = 2{,}5$ с, калі пачатковая фаза $\varphi_0 = 0$.

5. Запішыце кінематычны закон руху $x(t)$ матэрыяльнага пункта, калі за прамежак часу $t = 1{,}0$ мін ён выконвае $N = 120$ ваганняў, амплітуда якіх $A = 10$ см. У момант часу $t_0 = 0$ пункт рухаўся ў напрамку восі Ox і яго каардыната $x(0) = 5{,}0$ см.

§ 2. Спружынны і матэматычны маятнікі

Другі закон Ньютана (асноўны закон дынамікі): паскарэнне цела прама прапарцыянальна выніковай сіле і адваротна прапарцыянальна масе цела:

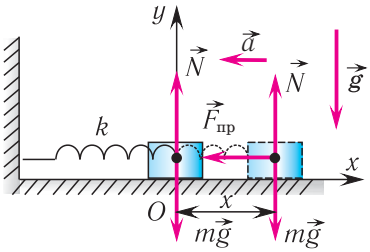
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_N}{m}.$$

Правообладатель Народная асвета

Закон Гука: пры пругкіх дэфармацыях сціскання і расцяжэння модуль сілы пругкасці прама прапарцыянальны 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.



Рыс. 6. Гарызантальны спружынны маятнік

Вагальная сістэма, якая складаецца з цела і прымацаванай да яго спружыны, называецца **спружынным маятнікам**. Спружына можа размяшчацца як вертыкальна (*вертыкальны спружынны маятнік*), так і гарызантальна (*гарызантальны спружынны маятнік*).

Разгледзім ваганні гарызантальнага спружыннага маятніка. Няхай груз масай m, які ляжыць на гладкай гарызантальнай паверхні, прымацаваны да свабоднага канца бязважкай спружыны жорсткасцю k (рыс. 6). Другі канец спружыны нерухомы адносна дадзенай інерцыяльнай сістэмы адліку (ІСА).

Выведзем груз са становішча раўнавагі, зрушыўшы яго на адлегласць x управа (гл. рыс. 6). Тады ў спружыне ўзнікне сіла пругкасці $\vec{F}_{\text{пр}}$, якая дзейнічае на груз і накіравана ўлева.

Згодна з другім законам Ньютана для руху грузу маем:

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

У праекцыі на вось Ox сіл, якія дзейнічаюць на груз (гл. рыс. 6), і з улікам закону Гука атрымліваем:

$$-ma_x = -F_{\text{пр}} = kx,$$

або

$$ma_x + kx = 0.$$

Перапішам атрыманую суадносіну ў выглядзе:

$$\boxed{a_x + \left(\frac{k}{m}\right)x = 0,} \qquad (1)$$

у якім яна з'яўляецца **ўраўненнем гарманічных ваганняў спружыннага маятніка.**

Параўноўваючы (1) з ураўненнем гарманічных ваганняў $a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0$, знаходзім цыклічную частату ваганняў гарызантальнага спружыннага маятніка:

Правообладатель Народная асвета

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad (2)$$

якая вызначаецца масай m груза і жорсткасцю k спружыны.

Для знаходжання перыяду ваганняў спружыннага маятніка выкарыстаем формулу $T = \frac{2\pi}{\omega}$, падставіўшы ў яе выраз (2):

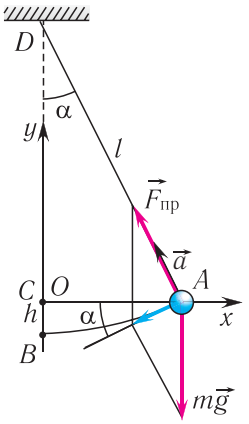
$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.} \qquad (3)$$

Як вынікае з формул (2) і (3), перыяд і частата ваганняў спружыннага маятніка не залежаць ад амплітуды яго ваганняў (у межах выканальнасці закону Гука).

Уласцівасць незалежнасці перыяду ваганняў маятніка ад амплітуды называецца *ізахроннасцю* (ад грэч. υσος (ізас) — роўны і χρονοζ (хронос) — час). Значыць, ваганні спружыннага маятніка валодаюць уласцівасцю ізахроннасці.

Ізахроннасць ваганняў маятніка была адкрыта Галілеа Галілеем у 1583 г. пры вывучэнні руху грузу, падвешанага на нітцы. Мадэллю дадзенай вагальнай сістэмы з'яўляецца *матэматычны маятнік*.

Вагальная сістэма, якая ўключае падвешанае на лёгкай нерасцяжной нітцы цела, што знаходзіцца ў полі сілы цяжару, памеры якога зусім нязначныя ў параўнанні з даўжынёй ніткі, а яго маса значна большая за масу ніткі, называецца **матэматычным маятнікам**. Пры такіх умовах цела можна лічыць матэрыяльным пунктам, а нітку — лёгкай (бязважкай) нерасцяжной (рыс. 7).



Рыс. 7. Ваганні матэматычнага маятніка

Разгледзім ваганні матэматычнага маятніка.

Адхіленне маятніка ад становішча раўнавагі будзем характарызаваць вуглом α (гл. рыс. 7), які ўтварае нітка з вертыкаллю.

Пасля адхілення маятніка на яго дзейнічаюць дзве сілы: накіраваная вертыкальна ўніз сіла цяжару $m\vec{g}$ і накіраваная ўздоўж ніткі сіла пругкасці $\vec{F}_{пр}$. Пад дзеяннем гэтых сіл цела рухаецца па дузе акружнасці да ўстойлівага становішча раўнавагі.

Згодна з другім законам Ньютана для руху маятніка можам запісаць:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{пр} = m\vec{a}. \qquad (4)$$

Правообладатель Народная асвета

У праекцыях на выбраныя восі каардынат Ox і Oy (гл. рыс. 7) атрымліваем:

$$-F_{\text{пр}}\sin\alpha = ma_x; \quad (5)$$

$$-mg + F_{\text{пр}}\cos\alpha = ma_y. \quad (6)$$

Для вуглоў адхілення $\alpha \leqslant 10°$ значэнні α і $\sin\alpha$ адрозніваюцца менш чым на 1 %. Таму пры малых вуглах адхілення $\sin\alpha \approx \alpha$ і даўжыня дугі $\overset{\frown}{AB} = l\alpha$ вельмі нязначна адрозніваецца ад даўжыні хорды $AC = l\sin\alpha \approx l\alpha$, дзе вугал α выражаны ў радыянах. Тады зрушэнне маятніка ўздоўж дугі $x = l\alpha$. Але практычна маятнік рухаецца ўздоўж восі Ox. З $\triangle ACD$ знаходзім $\sin\alpha = \frac{x}{l}$ і, падставіўшы гэты выраз у (5), атрымаем:

$$-F_{\text{пр}}\sin\alpha \approx -F_{\text{пр}}\frac{x}{l} = ma_x. \quad (7)$$

Такім чынам, сілай, якая вяртае маятнік да ўстойлівага становішча раўнавагі, з'яўляецца сіла пругкасці яго ніткі.

Пры малых вуглах адхілення маятніка праекцыя вектара паскарэння $a_y \ll g$ і яе можна не прымаць да ўвагі, а $\cos\alpha \approx 1$, тады з ураўнення (6) вынікае, што $F_{\text{пр}} \approx mg$.

Значыць, ураўненне руху маятніка ўздоўж восі Ox можна запісаць у выглядзе:

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

дзе g — паскарэнне, якое надаецца грузу маятніка сілай пругкасці ніткі.

Адсюль атрымліваем **ураўненне гарманічных ваганняў матэматычнага маятніка**:

$$\boxed{a_x + \frac{g}{l}x = 0.} \quad (8)$$

Пры параўнанні ўраўнення (8) з ураўненнем гарманічных ваганняў $a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0$ можна зрабіць вывад, што пры малых адхіленнях матэматычны маятнік выконвае гарманічныя ваганні з цыклічнай частатой

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (9)$$

Тады перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка ў полі цяжару Зямлі вызначаецца па формуле **Гюйгенса**:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},} \quad (10)$$

якую ўпершыню атрымаў вучань І. Ньютана Хрысціян Гюйгенс.

Правообладатель Народная асвета

Пры вуглах адхілення матэматычнага маятніка $\alpha \leqslant 20°$ хібнасць разліку перыяду ваганняў матэматычнага маятніка па формуле Гюйгенса не пераўзыходзіць 1 %.

Як відаць з формул (9) і (10), цыклічная частата і перыяд матэматычнага маятніка не залежаць ад масы маятніка і амплітуды яго ваганняў, а вызначаюцца толькі яго даўжынёй l і модулем паскарэння свабоднага падзення g.

Галілеа Галілей упершыню эксперыментальна вызначыў, што перыяд малых ваганняў ($\alpha \leqslant 10°$) матэматычнага маятніка даўжынёй l у полі сілы цяжару не залежыць ад яго масы m і амплітуды ваганняў (вугла пачатковага адхілення α). Ён вызначыў таксама, што перыяд гэтых ваганняў прама прапарцыянальны $\sqrt{l}$.

Калі маятнік набывае дадатковае паскарэнне $\vec{a}$, абумоўленае, напрыклад, паскарэннем руху пункта падвесу, то пры гэтым будзе змяняцца сіла пругкасці ніткі. У такім выпадку перыяд ваганняў маятніка будзе вызначацца па формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g^*}},$$

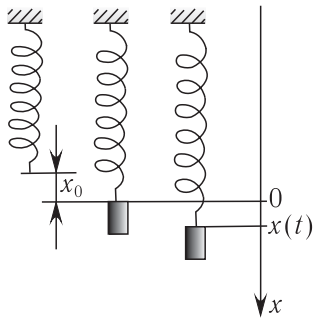
дзе $\vec{g}^*$ — «эфектыўнае паскарэнне», роўнае вектарнай рознасці $\vec{g}^* = \vec{g} \pm \vec{a}$.

1. Які маятнік называюць спружынным?
2. Запішыце ўраўненне гарманічных ваганняў спружыннага маятніка.
3. Па якой формуле вызначаецца цыклічная частата ваганняў спружыннага маятніка? Перыяд яго ваганняў?
4. Як зменіцца характар ваганняў спружыннага маятніка, калі яго прывесці ў стан бязважкасці?
5. Ці зменіцца перыяд ваганняў спружыннага маятніка, калі яго «перанесці» з паверхні Зямлі на паверхню Месяца?
6. Які маятнік называюць матэматычным?
7. Запішыце ўраўненне гарманічных ваганняў матэматычнага маятніка.
8. Як накіравана раўнадзейная сіл, прыкладзеных да маятніка, у моманты, калі ён знаходзіцца ў крайніх становішчах? Праходзіць праз становішча раўнавагі?
9. Па якой формуле вызначаецца перыяд ваганняў матэматычнага маятніка?
10. Якім чынам, выкарыстоўваючы матэматычны маятнік, можна вызначыць паскарэнне свабоднага падзення ў дадзеным месцы?
11. Ці ўплывае змяненне тэмпературы на дакладнасць ходу маятнікавых гадзіннікаў?
12. Якая ўласцівасць маятніка называецца ізахроннасцю?

Правообладатель Народная асвета

Прыклады рашэння задач

1. Выведзіце формулу для перыяду ваганняў вертыкальнага спружыннага маятніка, калі маса грузу m і жорсткасць спружыны k.



Рыс. 8

Рашэнне

Разгледзім вертыкальны рух грузу, які адбываецца пад дзеяннем сілы пругкасці спружыны і сілы цяжару грузу пасля штуршка. Пачатак каардынат змесцім у пункт, які адпавядае раўнаважнаму становішчу цела (рыс. 8). У гэтым становішчы спружына расцягнута на велічыню x_0, якая вызначаецца суадносінай:

$$mg = kx_0. \qquad (1)$$

Пры зрушэнні грузу на велічыню x са становішча раўнавагі сіла, якая дзейнічае з боку спружыны на груз, роўна $F_x = -k(x + x_0)$.

Тады па другім законе Ньютана

$$-k(x + x_0) + mg = ma_x.$$

З улікам суадносіны (1) гэта ўраўненне перапішам у выглядзе:

$$-kx = ma.$$

Калі ўвесці абазначэнне $\omega^2 = \frac{k}{m}$, то ўраўненне руху грузу можна запісаць:

$$a + \omega^2 x = 0.$$

Гэта ўраўненне апісвае гарманічныя ваганні вертыкальнага спружыннага маятніка з такой сама частатой, як і ў гарызантальнага спружыннага маятніка. Значыць, перыяд ваганняў вертыкальнага спружыннага маятніка такі ж самы, як і гарызантальнага:

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

Адказ: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Такім чынам, пастаянная сіла, якая дзейнічае ў вагальнай сістэме, толькі зрушвае становішчы раўнавагі, але не змяняе частату ваганняў.

2. Вызначыце амплітуду A, цыклічную частату ω, перыяд T і пачатковую фазу φ_0 ваганняў цела масай $m = 500$ г, падвешанага да вертыкальнай спружыны (рыс. 9). 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 ад становішча раўнавагі і адпускаюць.

Правообладатель Народная асвета

Дадзена:

$m = 500$ г $= 0{,}500$ кг

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

$x = 30$ мм $= 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

A — ? T — ? ω — ? φ_0 — ?

Рашэнне

Цыклічная частата ваганняў вертыкальнага спружыннага маятніка такая ж, як і гарызантальнага, і вызначаецца па формуле (гл. прыклад 1):

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

Для знаходжання жорсткасці k спружыны запішам умову раўнавагі цела:

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

Па законе Гука

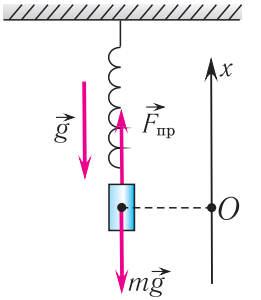
$$F_{\text{пр}x} = -kx_0.$$

Запішам умову раўнавагі ў праекцыі на вось Ox:

$$mg = kx_0 \Rightarrow k = \frac{mg}{x_0}.$$

Адсюль для цыклічнай частаты ω атрымліваем:

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



Рыс. 9

Амплітуда ваганняў маятніка вызначаецца пачатковым зрушэннем:

$$A = x = 3{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}.$$

Перыяд ваганняў знаходзім з суадносіны:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{x_0}{g}};$$

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

Паколькі ў пачатковы момант часу цела было зрушана на максімальную велічыню, то пачатковая фаза ваганняў $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$.

Адказ: $A = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м; $\omega = 31\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $T = 0{,}20$ с; $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$.

Практыкаванне 2

1. Вызначыце перыяд T і частату ν ваганняў грузу масай $m = 100$ г, які рухаецца па гладкай гарызантальнай паверхні пад дзеяннем лёгкай спружыны жорсткасцю $k = 0{,}050\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Правообладатель Народная асвета

2. Якую даўжыню l павінен мець матэматычны маятнік на паверхні Зямлі, каб перыяд яго ваганняў быў роўны $T = 1{,}0$ с?

3. Два целы з аднолькавымі масамі падвешаны да дзвюх аднолькавых спружын. Целы зрушваюць уніз: адно на адлегласць $x_1 = 10$ см, другое — на адлегласць $x_2 = 20$ см ад становішча раўнавагі — і затым адначасова адпускаюць. Якое з іх першым пройдзе становішча раўнавагі?

4. На спружыне вагаецца груз з частатой $\nu = 0{,}620$ Гц. Калі да яго прымацавалі дадатковы груз масай $\Delta m = 700$ г, частата ваганняў стала $\nu_1 = 0{,}480$ Гц. Знайдзіце масу m пачатковага грузу.

5. Маятнікавы гадзіннік спяшаецца. Як трэба змяніць даўжыню падвеса, каб ён ішоў дакладна?

6. На паверхні Зямлі перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка $T = 0{,}60$ с. Якім будзе перыяд T_1 яго ваганняў на Марсе, калі модуль паскарэння свабоднага падзення на Марсе $a = 0{,}37g$?

7. Адзін матэматычны маятнік выканаў за некаторы прамежак часу $N_1 = 10$ ваганняў, а другі — $N_2 = 8$ ваганняў. Вызначыце даўжыню l_2 другога маятніка, калі вядома, што рознасць даўжынь маятнікаў $\Delta l = 20$ см.

8. Цела масай m падвешана на спружыне жорсткасцю k. Спружыну разрэзалі папалам і прымацавалі да адной паловы таго ж цела. У колькі разоў n змянілася частата ваганняў?

9. Дзве лёгкія спружыны, жорсткасці якіх k_1 і k_2, злучаны адзін раз паслядоўна, другі — паралельна. У колькі разоў n будуць адрозніваццa перыяды ваганняў грузу на такіх спружынах?

§ 3. Ператварэнні энергіі пры гарманічных ваганнях

Механічная энергія сістэмы роўна суме яе кінетычнай і патэнцыяльнай энергіі. Механічная энергія замкнутай сістэмы, у якой не дзейнічаюць сілы трэння (супраціўлення), захоўваецца.

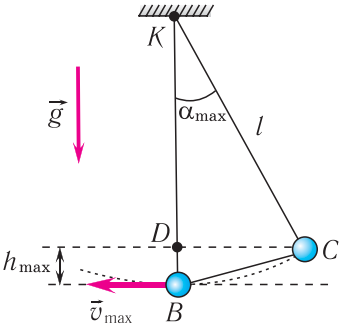
Паколькі пры ваганнях гарманічнага асцылятара сілу трэння не ўлічваюць, то яго механічная энергія захоўваецца. Разгледзім ператварэнні энергіі пры ваганнях матэматычнага маятніка. Выберам сістэму адліку такім чынам, каб у становішчы раўнавагі яго патэнцыяльная энергія была роўна нулю.

Правообладатель Народная асвета

Пры адхіленні маятніка на вугал α_{max} (рыс. 10), які адпавядае максімальнаму зрушэнню ад становішча раўнавагі, патэнцыяльная энергія максімальная, а кінетычная энергія роўна нулю:

$$(W_п)_{max} = mgh_{max}; \qquad W_к = 0.$$

Паколькі пры праходжанні становішча раўнавагі патэнцыяльная энергія роўна нулю ($W_п = 0$), то з закону захавання механічнай энергіі вынікае (гл. рыс. 10), што $(W_к)_B = (W_п)_C$, г. зн. кінетычная энергія маятніка (а значыць, і скорасць) будзе максімальнай:



Рыс. 10. Вызначэнне v_{max} і h_{max}

$$(W_к)_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2}; \quad W_п = 0.$$

Запішам закон захавання механічнай энергіі, падставіўшы ў яго выразы для патэнцыяльнай і кінетычнай энергіі:

$$(W_к)_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = mgh_{max} = (W_п)_{max}. \qquad (1)$$

Адсюль знойдзем модуль максімальнай скорасці маятніка:

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

Вышыню h_{max} можна выразіць праз даўжыню l маятніка і амплітуду A ваганняў. Калі ваганні малыя, то $A \approx l\alpha_{max}$. З $\triangle KCD$ (гл. рыс. 10) знаходзім:

$$h_{max} = l - l\cos\alpha_{max} = l(1 - \cos\alpha_{max}) = l \cdot 2\sin^2\left(\frac{\alpha_{max}}{2}\right) \approx 2l\left(\frac{\alpha_{max}}{2}\right)^2 = \frac{l\alpha_{max}^2}{2},$$

або

$$h_{max} = \frac{l\alpha_{max}^2}{2} = \frac{(l\alpha_{max})^2}{2l} = \frac{A^2}{2l}. \qquad (3)$$

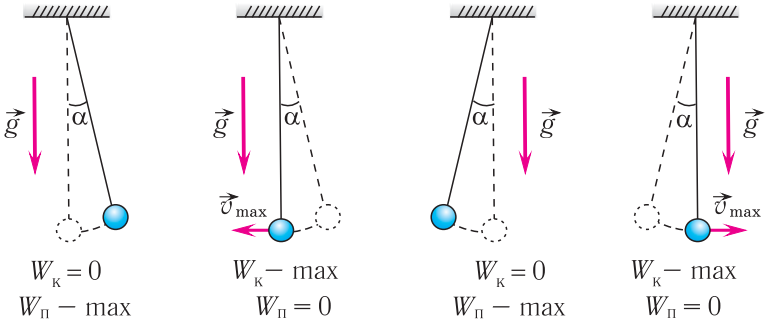
Падставіўшы выраз (3) для h_{max} у формулу (2), атрымаем:

$$v_{max} = A\sqrt{\frac{g}{l}}. \qquad (4)$$

Падстаўляючы выраз (3) для h_{max} і выраз (4) для v_{max} у суадносіну (1), знаходзім:

$$(W_к)_{max} = (W_п)_{max} = m\frac{g}{2l}A^2. \qquad (5)$$

Правообладатель Народная асвета

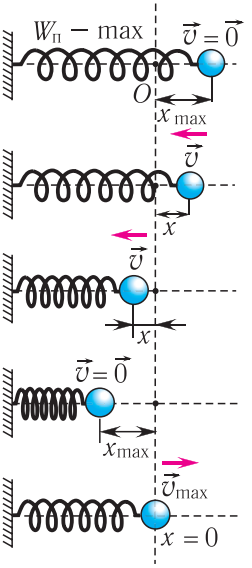


Рыс. 11. Ператварэнні энергіі пры ваганнях матэматычнага маятніка

Такім чынам, у становішчы раўнавагі патэнцыяльная энергія цалкам пераходзіць у кінетычную, а ў становішчах максімальнага адхілення кінетычная энергія цалкам пераходзіць у патэнцыяльную (рыс. 11).

У любым прамежкавым становішчы

$$W_к + W_п = \text{const} = (W_к)_{max} = (W_п)_{max}.$$



Рыс. 12. Ператварэнні энергіі пры ваганнях спружыннага маятніка

Пакажам, што аналагічныя ператварэнні энергіі маюць месца і для спружыннага маятніка (рыс. 12).

У крайніх становішчах, калі $x_{max} = \pm A$, модуль скорасці маятніка $v = 0$, кінетычная энергія грузу цалкам пераходзіць у патэнцыяльную энергію дэфармаванай спружыны:

$$(W_п)_{max} = \frac{kA^2}{2}. \qquad (6)$$

Такім чынам, з суадносіны (6) вынікае, што механічная энергія спружыннага маятніка прапарцыянальна квадрату амплітуды ваганняў.

У становішчы раўнавагі, калі $x = 0$, уся энергія спружыннага маятніка пераходзіць у кінетычную энергію грузу:

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

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

Правообладатель Народная асвета

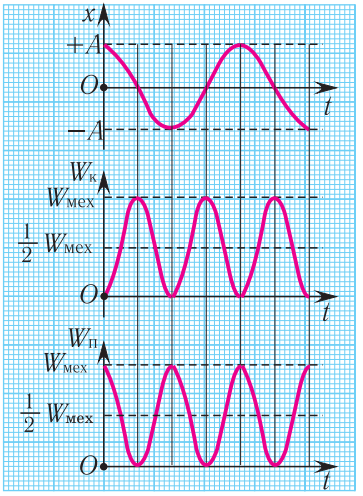
У становішчах паміж крайнімі пунктамі поўная энергія:

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

З улікам выразаў для каардынаты $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$ і праекцыі скорасці грузу $v = -A\omega\cos(\omega t + \varphi_0)$, а таксама для $k = m\omega^2$ знаходзім яго патэнцыяльную энергію $W_{\text{п}} = \frac{mA^2\omega^2\cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$ і кінетычную энергію $W_{\text{к}} = \frac{mA^2\omega^2\sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$ у адвольны момант часу t.

Тады поўная механічная энергія спружыннага маятніка ў гэты ж момант часу ёсць велічыня пастаянная і роўная

$$W_{\text{мех}} = W_{\text{к}} + W_{\text{п}} = \frac{mA^2\omega^2\sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2} + \frac{mA^2\omega^2\cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$



Рыс. 13. Залежнасці зрушэння маятніка, яго кінетычнай і патэнцыяльнай энергіі ад часу

Такім чынам, пачатковае зрушэнне $A = x_{\max}$ вызначае пачатковую патэнцыяльную энергію, а пачатковая скорасць $v_0 = v_{\max}$ вызначае пачатковую кінетычную энергію вагальнага цела. Пры адсутнасці ў сістэме страт энергіі працэс ваганняў суправаджаецца толькі пераходам энергіі з патэнцыяльнай у кінетычную і наадварот.

Заўважым, што частата перыядычных змяненняў кінетычнай (патэнцыяльнай) энергіі цела, якое вагаецца, у два разы большая за частату ваганняў маятніка. Сапраўды, двойчы за перыяд механічная энергія цела будзе цалкам ператварацца ў патэнцыяльную (у двух крайніх становішчах маятніка) і двойчы за перыяд — у кінетычную (пры яго праходжанні праз становішча раўнавагі) (рыс. 13).

1. Якой энергіяй валодае матэматычны маятнік пры праходжанні становішча раўнавагі?
2. Якой энергіяй валодае спружынны маятнік пры найбольшым зрушэнні ад становішча раўнавагі?
3. Чаму роўна патэнцыяльная энергія матэматычнага і спружыннага маятнікаў у становішчы раўнавагі?
4. Як змяняецца пры ваганнях маятніка яго механічная энергія? Кінетычная? Патэнцыяльная?

Правообладатель Народная асвета

5. Як звязана энергія спружыннага (матэматычнага) маятніка (гарманічнага асцылятара) з яго амплітудай?
6. Запішыце формулы для вызначэння механічнай энергіі гарманічнага асцылятара пры праходжанні ім становішча раўнавагі і пры максімальным зрушэнні з яго.

Прыклады рашэння задач

1. Матэматычны маятнік пры ваганнях ад аднаго крайняга становішча да другога зрушваецца на адлегласць $d = 4{,}0$ см і пры праходжанні становішча раўнавагі дасягае скорасці, модуль якой $v = 10\ \frac{\text{см}}{\text{с}}$. Вызначыце перыяд T ваганняў маятніка.

Дадзена:
$d = 4{,}0$ см $= 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м
$v = 10\ \frac{\text{см}}{\text{с}} = 1{,}0 \cdot 10^{-1}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

T — ?

Рашэнне

Па законе захавання механічнай энергіі маем:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{m\omega^2\left(\frac{d}{2}\right)^2}{2} = \frac{m}{2}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2\left(\frac{d}{2}\right)^2.$$

Адсюль

$$T = 2\pi\frac{d}{2v} = \frac{\pi d}{v};\quad T = \frac{3{,}14 \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м}}{1{,}0 \cdot 10^{-1}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1{,}3\ \text{с}.$$

Адказ: $T = 1{,}3$ с.

2. Груз масай $m = 100$ г знаходзіцца на гладкай гарызантальнай паверхні і замацаваны на лёгкай спружыне, жорсткасць якой $k = 100\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Яго зрушваюць на адлегласць $x = 3{,}00$ см ад становішча раўнавагі і надаюць у тым жа напрамку скорасць, модуль якой $v = 10{,}0\ \frac{\text{см}}{\text{с}}$. Вызначыце патэнцыяльную $W_{0\text{п}}$ і кінетычную $W_{0\text{к}}$ энергію грузу ў пачатковы момант часу. Запішыце кінематычны закон руху грузу.

Дадзена:
$m = 100$ г $= 0{,}100$ кг
$k = 100\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
$x = 3{,}00$ см $= 3{,}00 \cdot 10^{-2}$ м
$v = 10{,}0\ \frac{\text{см}}{\text{с}} = 0{,}100\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$W_{0\text{п}}$ — ? $W_{0\text{к}}$ — ?

Рашэнне

Патэнцыяльная энергія грузу:

$$W_{0\text{п}} = \frac{kx^2}{2};$$

$$W_{0\text{п}} = \frac{100\ \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{-2}\ \text{м})^2}{2} = 4{,}50 \cdot 10^{-2}\ \text{Дж}.$$

Кінетычная энергія грузу:

$$W_{0\text{к}} = \frac{mv^2}{2};\quad W_{0\text{к}} = \frac{0{,}100\ \text{кг} \cdot \left(0{,}100\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{2} = 5{,}00 \cdot 10^{-4}\ \text{Дж}.$$

Правообладатель Народная асвета

Пачатковае зрушэнне грузу не з'яўляецца амплітудай, паколькі разам з пачатковым адхіленнем грузу надалі і скорасць. Аднак поўная энергія можа быць выражана праз амплітуду ваганняў:

$$W = W_{0п} + W_{0к} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{kA^2}{2}; \quad W = 4{,}55 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}.$$

Адсюль

$$A = \sqrt{\frac{2W}{k}}; \quad A = \sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}55 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}}{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}}} = 3{,}02 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Цыклічная частата:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \omega = \sqrt{\frac{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}}{0{,}100 \text{ кг}}} = 31{,}6 \ \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

У пачатковы момант часу $t_0 = 0$ каардыната грузу $x = A \sin \varphi_0$.

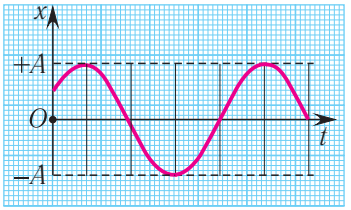
Адсюль пачатковая фаза:

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{x}{A}; \quad \varphi_0 = \arcsin \frac{3{,}00 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{3{,}02 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = \arcsin (0{,}9944) = 1{,}46 \text{ рад}.$$

Тады закон гарманічных ваганняў мае выгляд (рыс. 14):

$$x = 3{,}02 \cdot 10^{-2} \sin(31{,}6t + 1{,}46) \ (\text{м}).$$

Адказ: $W_{0п} = 4{,}50 \cdot 10^{-2}$ Дж; $W_{0к} = 5{,}00 \cdot 10^{-4}$ Дж; $x = 3{,}02 \cdot 10^{-2} \sin(31{,}6t + 1{,}46)$ (м).



Рыс. 14. Залежнасць зрушэння маятніка ад часу

Практыкаванне 3

1. Вызначыце механічную энергію W гарызантальнага спружыннага маятніка, які выконвае ваганні з амплітудай $A = 4{,}0$ см, калі жорсткасць спружыны $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

2. Вызначыце механічную энергію W гарманічных ваганняў матэрыяльнага пункта, калі вядомы яго маса m, частата ν і амплітуда A ваганняў.

3. Вертыкальны спружынны маятнік выконвае гарманічныя ваганні з амплітудай $A = 2{,}4$ см. Вызначыце зрушэнне x_1 грузу ад становішча раўнавагі ў пункце, дзе на яго дзейнічае вяртаючая сіла, модуль якой $F = 30$ мН, калі поўная механічная энергія маятніка $W = 3{,}6$ мДж.

4. Спружынны маятнік, які знаходзіцца на гладкай гарызантальнай паверхні, вывелі са становішча раўнавагі і без штуршка адпусцілі. Праз якую частку n пе-

Правообладатель Народная асвета

рыяду кінетычная энергія $W_к$ прымацаванага да спружыны цела будзе роўна патэнцыяльнай энергіі $W_п$ дэфармаванай спружыны?

5. Матэрыяльны пункт масай m выконвае гарманічныя ваганні, перыяд якіх T і пачатковая фаза $\varphi_0 = 0$. Максімальная кінетычная энергія пункта, які вагаецца, $(W_к)_{max}$. Вызначыце амплітуду A ваганняў, модуль максімальнай скорасці v_{max} пункта і запішыце кінематычны закон яго руху.

6. Куля масай $m = 10$ г, рухаючыся гарызантальна са скорасцю, модуль якой $v = 500\ \frac{м}{с}$, трапіла ў падвешаны на лёгкай нітцы драўляны шар масай $M = 1{,}0$ кг і завязла ў ім. Пры гэтым нітка адхілілася ад вертыкалі на вугал $\alpha = 20°$. Вызначыце перыяд T ваганняў шара.

§ 4. Свабодныя і вымушаныя ваганні. Рэзананс

Сілы ўзаемадзеяння цел сістэмы называюць унутранымі. Целы, якія не ўваходзяць у сістэму, называюць знешнімі целамі. Сілы, якія дзейнічаюць на целы сістэмы з боку знешніх цел, называюць знешнімі сіламі.

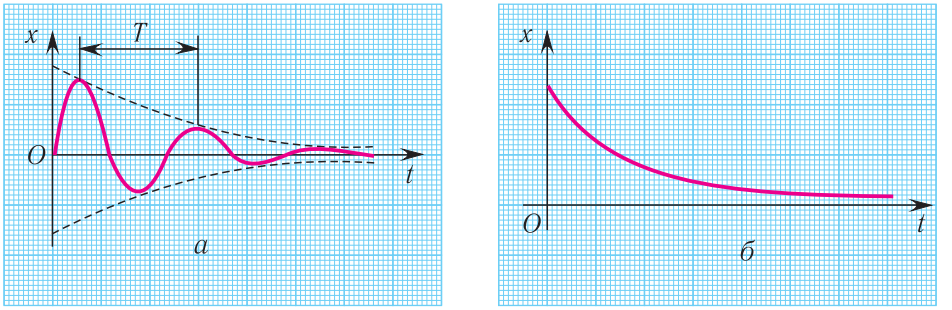
Як вам ужо вядома, механічная энергія гарманічнага асцылятара (напрыклад, грузу на спружыне) прапарцыянальна квадрату амплітуды яго ваганняў. Ваганні, якія адбываюцца з пастаяннай у часе амплітудай, называюцца **незатухаючымі ваганнямі**.

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 адбываюцца са строга вызначанай частатой ω_0, так званай **частатой свабодных (уласных) ваганняў сістэмы**. Гэта частата залежыць толькі ад параметраў сістэмы. Прыкладамі такіх ваганняў могуць служыць ваганні матэматычнага і спружыннага маятнікаў, якія адбываюцца пры адсутнасці сіл трэння. Амплітуда свабодных ваганняў вызначаецца пачатковымі ўмовамі, г. зн. тым пачатковым адхіленнем або штуршком, якім маятнік або груз на спружыне прыведзены ў рух. 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. Разам з тым змяншэнне механічнай энергіі азначае і памяншэнне амплітуды ваганняў.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 15. Затухаючыя механічныя ваганні: *а* — малая сіла трэння; *б* — вялікая сіла трэння

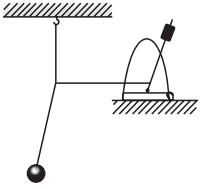
Ваганні, амплітуда якіх памяншаецца з цягам часу з прычыны страты энергіі вагальнай сістэмай, называюцца **затухаючымі ваганнямі** (рыс. 15). Памяншэнне механічнай энергіі сістэмы (ператварэнне яе ва ўнутраную энергію) адбываецца з прычыны трэння і супраціўлення навакольнага асяроддзя.

Сістэму называюць дысыпатыўнай (ад лац. dissipation — рассейванне), калі яе механічная энергія з цягам часу памяншаецца за кошт ператварэння яе ва ўнутраную энергію.

Пры малых стратах энергіі ваганні можна лічыць перыядычнымі і карыстацца такімі паняццямі, як перыяд і частата ваганняў. Так, напрыклад, перыяд — прамежак часу паміж двума паслядоўнымі максімумамі фізічнай велічыні, якая вагаецца (гл. рыс. 15, *а*).

Ваганні ў любой рэальнай сістэме рана або позна затухаюць. Каб ваганні не затухалі, неабходна ўздзеянне знешняй сілы. Аднак не ўсякая знешняя сіла прымушае сістэму рухацца перыядычна. Напрыклад, немагчыма разгайдаць арэлі, калі дзейнічаць на іх пастаяннай сілай. Знешняя сіла таксама павінна быць *перыядычнай*.

Правядзём наступны эксперымент. Злучым матэматычны маятнік з метраномам (рыс. 16). Змяняючы частату ваганняў маятніка метранома, дабіваемся павелічэння амплітуды ваганняў матэматычнага маятніка. Аказваецца, што яго амплітуда будзе максімальнай пры супадзенні ўласнай частаты ваганняў маятніка і маятніка метранома.



Рыс. 16. Назіранне з'явы рэзанансу ў сістэме матэматычнага маятніка

Ваганні цел пад дзеяннем знешняй перыядычнай сілы называюцца **вымушанымі**, а сіла — **вымушаючай**. У выпадку

Правообладатель Народная асвета

гарманічнай сілы: $F(t) = F_0 \sin \omega t$ або $F(t) = F_0 \cos \omega t$. З пачатку дзеяння знешняй сілы назіраецца дастаткова складаны рух цела. Праз некаторы час пасля пачатку дзеяння знешняй сілы ваганні набываюць стацыянарны характар і не залежаць ад пачатковых умоў. Такім чынам, пры вымушаных ваганнях сістэма поўнасцю «забывае» свой пачатковы стан. Частата вымушаных ваганняў, якія ўстанавіліся, заўсёды роўна частаце вымушаючай сілы.

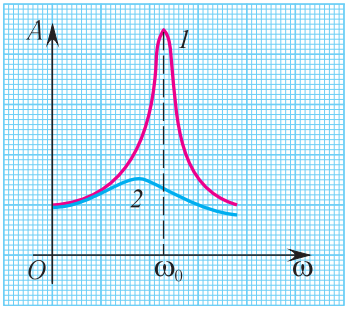
Амплітуда ваганняў і энергія, якая перадаецца сістэме за перыяд вымушаных ваганняў, залежаць ад таго, наколькі адрозніваюцца частата ω вымушаючай сілы і частата ω_0 уласных ваганняў, а таксама ад велічыні трэння ў сістэме.

Пры вымушаных ваганнях магчыма з'ява, якая называецца *рэзананс* (ад лац. resono — адгукаюся, гучу ў адказ).

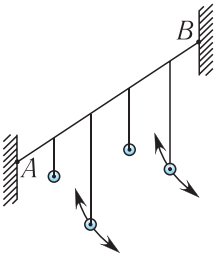
Рэзананс — гэта з'ява рэзкага нарастання амплітуды вымушаных ваганняў пры дзеянні на вагальную сістэму знешняй сілы з частатой ω, якая супадае з уласнай частатой ω_0 сістэмы ($\omega = \omega_0$) (рыс. 17).

Падвесім на пругкай нітцы (AB) чатыры матэматычныя маятнікі з аднолькавымі грузамі, тры з якіх маюць розную даўжыню, а даўжыня чацвёртага роўна даўжыні другога (рыс. 18). Спачатку паглядзім, што будзе з маятнікамі, калі разгайдаць першы або трэці маятнік. Назіранні паказваюць, што праз некаторы час пачнуць гайдацца і астатнія маятнікі. Але амплітуда іх ваганняў невялікая, і хутка ваганні затухаюць. А вось калі разгайдаць другі маятнік, то амплітуда ваганняў чацвёртага будзе безупынна нарастаць, пакуль не дасягне найбольшага значэння.

Гэта адбываецца таму, што частата ўласных ваганняў чацвёртага маятніка супадае з частатой ваганняў знешняй сілы (частатой ваганняў другога маятніка), паколькі іх даўжыні роўныя. А ваганні першага і трэцяга маятнікаў, як і ў першым эксперыменце, хутка затухаюць.



Рыс. 17. Рэзананс: *1* — малая сіла трэння; *2* — вялікая сіла трэння



Рыс. 18. Назіранне з'явы рэзанансу ў сістэме маятнікаў

Правообладатель Народная асвета

Пры рэзанансе ствараюцца аптымальныя ўмовы для перадачы сістэме энергіі ад знешняй крыніцы, паколькі на працягу ўсяго перыяду работа знешняй сілы над сістэмай дадатная. Успомніце працэс разгойдвання на арэлях — калі арэлі штурхаць вельмі хутка або вельмі павольна, іх практычна немагчыма будзе разгайдаць. Калі ж падбіраць частату штуршкоў, блізкую да частаты ўласных ваганняў арэляў, то разгойдванне будзе эфектыўным.

Большасць збудаванняў і машын, валодаючы пэўнай пругкасцю, здольныя выконваць свабодныя ваганні. Таму пры знешніх перыядычных уздзеяннях у іх з прычыны з'явы рэзанансу могуць узбуджацца ваганні вялікай амплітуды, якія могуць прывесці да разбуральных наступстваў. Напрыклад, каб пазбегнуць разбурэння мастоў з прычыны з'явы рэзанансу, пры праходжанні па мосце вайсковых часцей загадваюць ісці вольным крокам (не ў нагу). Цягнікі пераязджаюць масты або вельмі павольна, або на максімальнай скорасці.

У 1750 г. ланцуговы мост паблізу г. Анжэр (Францыя) быў разбураны ў выніку рэзанансу ў час праходжання атрада салдат, паколькі частата іх крокаў супала з частатой свабодных ваганняў моста.

У 1906 г. у г. Пецярбургу (Расія) абваліўся Егіпецкі мост, па якім праходзіў кавалерыйскі эскадрон.

7 лістапада 1940 г. моцны парыў ветру выклікаў рэзанансныя ваганні Такомскага моста (США), што прывяло да яго разбурэння.

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 уласных ваганняў?
5. Якія ваганні называюцца вымушанымі?
6. Ад чаго залежыць частата вымушаных ваганняў?
7. Чаму для ўзнікнення ваганняў у сістэме знешняя сіла павінна быць перыядычнай?
8. Што такое рэзананс?
9. Вада, якую хлопчык нясе ў вядры, пачынае моцна расплюхвацца. Чаму расплюхванне спыняецца пры змяненні тэмпу хады?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце модуль скорасці v руху поезда, пры якой матэматычны маятнік, падвешаны ў вагоне, асабліва моцна гайдаецца. Даўжыня маятніка $l = 11$ см, даўжыня рэйкі $L = 12{,}5$ м.

Правообладатель Народная асвета

Дадзена:	Рашэнне
$l = 11$ см $= 0{,}11$ м $L = 12{,}5$ м	Маятнік пачынае моцна гайдацца, калі частата яго ўласных ваганняў
v — ?	

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

супадае з частатой вымушаючай сілы

$$\nu_2 = \frac{1}{T} = \frac{v}{L},$$

якая супадае з частатой удараў колаў вагона аб стыкі рэек: $\nu_1 = \nu_2$.

Адсюль

$$\frac{v}{L} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}; \qquad v = \frac{L}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}; \qquad v = \frac{12{,}5\ \text{м}}{2 \cdot 3{,}14} \cdot \sqrt{\frac{9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0{,}11\ \text{м}}} = 19\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

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

Практыкаванне 4

1. Для чаго ў вышынных будынках устаноўкі, якія вібрыруюць (электрарухавікі, дызельныя ўстаноўкі і г. д.), ставяцца на спецыяльныя рызінавыя або металічныя амартызатары?

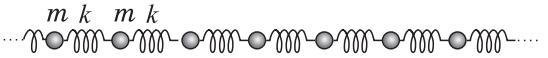
2. Якой даўжыні l матэматычны маятнік неабходна падвесіць у вагоне, каб ён гайдаўся найбольш моцна пры руху поезда са скорасцю, модуль якой $v = 72{,}0\ \frac{\text{км}}{\text{г}}$, калі адлегласць паміж стыкамі рэек $L = 15{,}0$ м?

3. Праз ручай перакінута доўгая вузкая дошка. Калі дзяўчынка стаіць на ёй нерухома, дошка прагінаецца на $\Delta x = 10$ см. Вызначыце даўжыню l крокаў дзяўчынкі, пры якіх дошка пачне гайдацца так, што дзяўчынка з цяжкасцю будзе ўтрымліваць раўнавагу пры руху са скорасцю, модуль якой $v = 3{,}6\ \frac{\text{км}}{\text{г}}$.

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

Што будзе адбывацца, калі гарызантальныя спружынныя маятнікі злучыць адзін з адным у ланцужок (рыс. 19) і падзейнічаць на адзін з шарыкаў (напрыклад, першы) перыядычнай знешняй сілай, накіраванай уздоўж ланцужка?

Паколькі паміж целамі ланцужка дзенічаюць сілы пругкасці, абумоўленыя спружынамі, то ў вагальны рух уздоўж ланцужка з той жа частатой прыйдуць



Рыс. 19. Ланцужок злучаных спружынамі шарыкаў

Правообладатель Народная асвета

і ўсе наступныя шарыкі. Будзе адбывацца працэс распаўсюджвання ваганняў, але ваганні кожнага наступнага з іх будуць спазняцца ў параўнанні з ваганнямі папярэдняга шарыка. Гэта спазненне абумоўлена інертнасцю шарыкаў, зрушэнні якіх вызначаюць сілы пругкасці спружын.

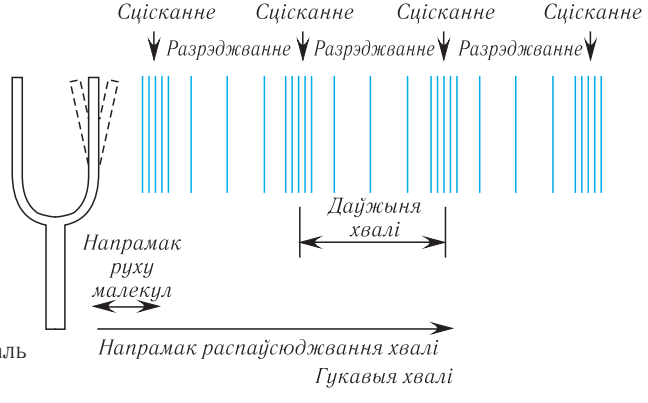
Разгледжаная сістэма (ланцужок шарыкаў, звязаных паміж сабой спружынамі) уяўляе сабой найпрасцейшую (аднамерную) мадэль *пругкага асяроддзя*. **Пругкім** называецца асяроддзе, часціцы якога звязаны паміж сабой сіламі пругкасці.

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, якія з часам дасягаюць берага. Ваганні сэрца, размешчанага ўнутры грудной клеткі, можна адчуць на запясці, што выкарыстоўваецца для вызначэння пульсу. Пералічаныя прыклады звязаны са з'явай распаўсюджвання *механічных ваганняў у асяроддзі*.

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

Механічныя хвалі не могуць распаўсюджвацца ў беспаветранай прасторы.

Крыніцай механічных хваль з'яўляецца якое-небудзь вагальнае цела. Вагальнае цела, якое стварае вагальны рух у навакольным асяроддзі, называецца *крыніцай ваганняў* (*вібратарам*). Механізм утварэння хвалі можна прадставіць наступным чынам. Крыніца ваганняў (напрыклад, камертон) уздзейнічае на часціцы пругкага асяроддзя, датыкальныя да яго, і прымушае іх выконваць вымушаныя ваганні (рыс. 20). Асяроддзе паблізу крыніцы дэфармуецца, і ў ім узнікаюць сілы



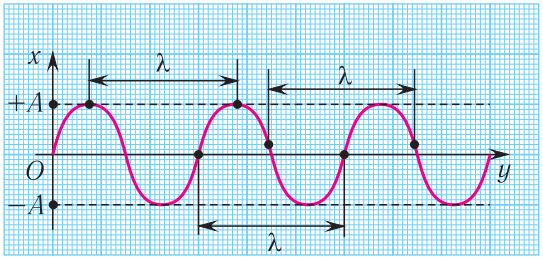
Рыс. 20. Утварэнне гукавых хваль пры ваганні камертона

Правообладатель Народная асвета

пругкасці, якія перашкаджаюць дэфармацыі. Калі часціцы асяроддзя збліжаюцца, то сілы, якія ўзнікаюць, іх адштурхваюць, а калі аддаляюцца адна ад адной, то, наадварот, іх прыцягваюць. Паступова сілы будуць дзейнічаць на ўсё больш аддаленыя ад крыніцы часціцы асяроддзя, прыводзячы іх у вагальны рух. У выніку ён будзе распаўсюджвацца ў выглядзе хвалі.

Калі крыніца ваганняў вагаецца сінусоідна, то і хваля ў пругкім асяроддзі будзе мець форму сінусоіды. Ваганні, выкліканыя ў якім-небудзь месцы пругкага асяроддзя, распаўсюджваюцца ў ім з вызначанай скорасцю, якая залежыць ад шчыльнасці і пругкіх уласцівасцей асяроддзя.

Падкрэслім, што пры распаўсюджванні хваль *адсутнічае перанос рэчыва*, г. зн. часціцы асяроддзя вагаюцца паблізу становішчаў раўнавагі.



Рыс. 21. Асноўныя характарыстыкі хвалі

Хвалевы фронт (хвалевая паверхня) — гэта паверхня, усе пункты якой вагаюцца ў аднолькавых фазах, г. зн. гэта паверхня роўных фаз. Калі хвалевымі паверхнямі з'яўляюцца плоскасці, то хваля называецца *плоскай*.

Асноўнымі характарыстыкамі хвалі з'яўляюцца (рыс. 21):

амплітуда (A) — модуль максімальнага зрушэння пунктаў асяроддзя са становішчаў раўнавагі пры ваганнях;

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

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

дзе τ — прамежак часу, на працягу якога выконваюцца N ваганняў;

частата (ν) — лік поўных ваганняў, выкананых у дадзеным пункце ў адзінку часу:

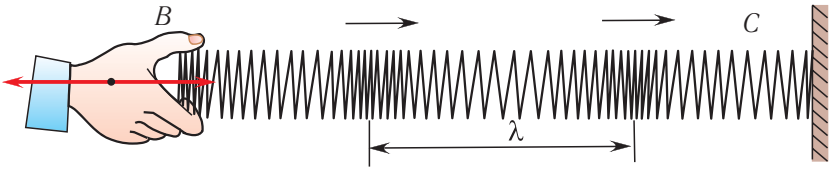
$$\nu = \frac{N}{\tau},$$

частата хвалі вызначаецца частатой ваганняў крыніцы;

даўжыня хвалі (λ) — найменшая адлегласць паміж двума пунктамі, ваганні ў якіх адбываюцца ў аднолькавай фазе, г. зн. адлегласць, на якую хваля распаўсюджваецца за прамежак часу, роўны перыяду ваганняў крыніцы:

$$\boxed{\lambda = vT;}$$

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 22. Падоўжная хваля

скорасць распаўсюджвання хвалі ($\vec{v}$) — гэта скорасць распаўсюджвання грэбеня хвалі або любога іншага пункта хвалі з пэўнай фазай (гэта не скорасць часціц!), модуль гэтай скорасці:

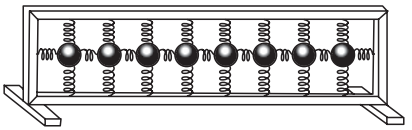
$$v = \lambda\nu.$$

Бягучую хвалю можна назіраць, правёўшы наступны эксперымент. Калі адзін канец гумавага шнура, што ляжыць на гладкім стале, замацаваць і, злёгку нацягнуўшы шнур рукой, прывесці яго другі канец у вагальны рух у напрамку, перпендыкулярным да шнура, то па ім пабяжыць хваля.

Хваля называецца **падоўжнай**, калі ваганні часціц асяроддзя адбываюцца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі. Распаўсюджванне хваль уздоўж ланцужка гарызантальных спружынных маятнікаў (гл. рыс. 19) з'яўляецца прыкладам распаўсюджвання падоўжных пругкіх хваль. Пры гэтым распаўсюджванне хвалі суправаджаецца ўтварэннем згушчэнняў і разрэджванняў уздоўж напрамку яе распаўсюджвання.

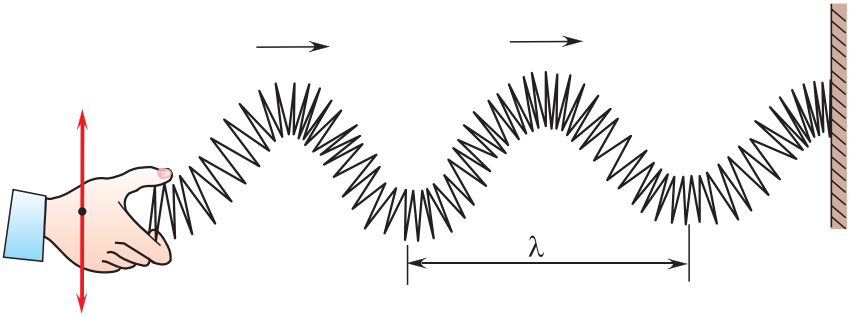
Падоўжную хвалю лёгка атрымаць з дапамогай доўгай спружыны, якая ляжыць на гладкай гарызантальнай паверхні і адзін канец яе замацаваны. Лёгкім ударам па свабодным канцы *B* спружыны мы выклічам з'яўленне хвалі (рыс. 22). Пры гэтым кожны віток спружыны будзе вагацца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі *BC*. Пругкія хвалі ў газах і вадкасцях узнікаюць толькі пры сціскванні або разрэджванні асяроддзя і не могуць узнікаць пры зрушванні часціц вадкасці або газу. Таму ў такіх асяроддзях магчыма распаўсюджванне толькі падоўжных хваль.

Хваля называецца **папярочнай**, калі часціцы асяроддзя вагаюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі. Папярочная хваля будзе распаўсюджвацца ўздоўж ланцужка спружынных маятнікаў (рыс. 23), калі на адзін з іх падзейнічаць



Рыс. 23. Устройства для дэманстрацыі падоўжных і папярочных хваль

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 24. Папярочная хваля

перыядычнай сілай, накіраванай перпендыкулярна да ланцужка. Выкарыстаўшы доўгую спружыну, можна прадэманстраваць распаўсюджванне папярочных хваль, калі выконваць ваганні незамацаванага канца ў напрамку, перпендыкулярным да падоўжнай восі спружыны (рыс. 24).

У адрозненне ад вадкасцей і газаў у цвёрдых целах магчыма распаўсюджванне і папярочных хваль, паколькі яны ўзнікаюць пры зрушэнні або ссоўванні адных слаёў асяроддзя адносна другіх. З прычыны таго, што распаўсюджванне падоўжных хваль звязана з дэфармацыяй сціскання, а папярочных — з дэфармацыяй зрушэння, а пругкія ўласцівасці цел у адносінах да гэтых відаў дэфармацыі неаднолькавыя, то і скорасці іх распаўсюджвання будуць адрозніваццa. Напрыклад, у сталі папярочныя хвалі распаўсюджваюцца са скорасцю, модуль якой 3300 $\frac{м}{с}$, а падоўжныя — 6100 $\frac{м}{с}$.

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

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

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 5

1. Вызначыце модуль скорасці v распаўсюджвання хвалі, калі яе даўжыня $\lambda = 15$ м, а перыяд ваганняў $T = 0{,}20$ с.

2. Нерухомы назіральнік за прамежак часу $t = 20$ с налічыў $N = 8$ грабянёў хваль, якія прайшлі міма. Вызначыце перыяд T ваганняў часціц.

3. Крыніца, частата якой $\nu = 1{,}0$ кГц і амплітуда $A = 0{,}50$ мм, узбуджае ў пругкім шнуры хвалі даўжынёй $\lambda = 0{,}70$ м. Вызначыце: а) модуль скорасці v распаўсюджвання хвалі; б) модуль максімальнай скорасці v_{max} пунктаў шнура, якія вагаюцца.

4. Хваля ад катара, які праходзіць па возеры, дайшла да берага праз прамежак часу $t = 5{,}0$ мін, прычым адлегласць паміж суседнімі грабянямі аказалася роўнай $l = 1{,}5$ м, а прамежак часу паміж двума паслядоўнымі ўдарамі хваль аб бераг $\Delta t = 4{,}0$ с. На якой адлегласці L ад берага праходзіў катар?

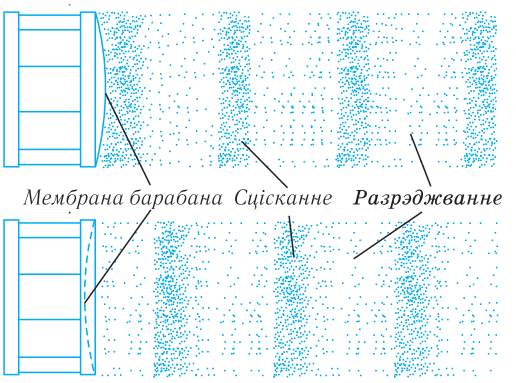
5. Рыбалоў заўважыў, што за прамежак часу $t = 20$ с паплавок выканаў $N_1 = 40$ ваганняў на хвалях. Пры гэтым адлегласць паміж берагам і рыбаловам $l = 12$ м і на гэтай адлегласці ўкладваецца $N_2 = 20$ грабянёў хвалі. Вызначыце модуль v скорасці распаўсюджвання хвалі.

6. Вызначыце адлегласць l ад сейсмічнай станцыі да месца землетрасення, калі прыход падоўжнай і папярочнай хваль на станцыі быў зарэгістраваны з інтэрвалам $t = 4{,}0$ мін. Модуль скорасці распаўсюджвання падоўжнай хвалі $v_{\parallel} = 9{,}0\ \frac{м}{с}$, папярочнай — $v_{\perp} = 5{,}0\ \frac{м}{с}$.

§ 6. Гук

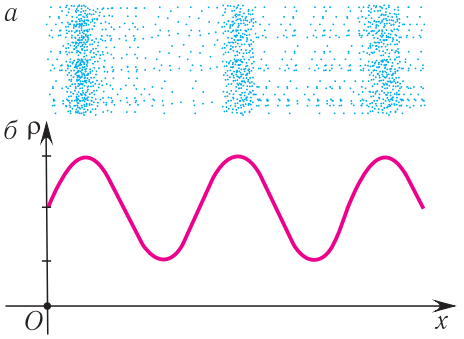
Асабліва важнае месца сярод усіх тыпаў пругкіх хваль займаюць гукавыя хвалі (гукі). Свет навакольных гукаў разнастайны і складаны, аднак мы дастаткова лёгка арыентуемся ў ім і можам беспамылкова адрозніць спеў птушак ад шуму гарадской вуліцы.

Разгледзім у якасці прыкладу крыніцы гуку барабан (рыс. 25). Мембрана барабана стварае папераменна сціскані і разрэджванні ў прылеглай да яе вобласці паветра, з прычыны чаго ўтва-



Рыс. 25. Утварэнне гукавой хвалі, якая ствараецца мембранай барабана

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 26. Залежнасць шчыльнасці ρ паветра ад каардынаты *x* у падоўжнай хвалі

раецца падоўжная хваля, якая і распаўсюджваецца. Графічна такую хвалю можна паказаць як залежнасць шчыльнасці малекул паветра ад каардынаты (рыс. 26).

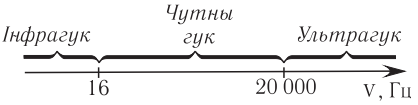
Такім чынам, у працэсе распаўсюджвання гукавой хвалі з цягам часу змяняюцца такія характарыстыкі асяроддзя, як шчыльнасць і ціск.

Для распаўсюджвання гукавых хваль неабходны асяроддзі з пругкімі ўласцівасцямі. Калі змясціць крыніцу гуку (званок) пад каўпак паветранай помпы і паступова адпампоўваць паветра, то гук робіцца ўсё больш слабым і слабым і затым знікае. Значыць, гукавыя хвалі ў беспаветранай прасторы не распаўсюджваюцца.

Калі абгарнуць званок слоем порыстага матэрыялу (паралон, вата, лямец і да т. п.), то гукавыя хвалі ў ім хутка затухаюць. Таму такія матэрыялы шырока выкарыстоўваюцца для гукаізаляцыі.

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека слыхавыя адчуванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**. Вуха чалавека ўспрымае гук у частотным дыяпазоне ад 16 да 20 000 Гц.

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



Рыс. 27. Шкала гукавых хваль

Гукавыя хвалі класіфікуюцца па частаце наступным чынам (рыс. 27):

інфрагук ($\nu < 16$ Гц);
чутны чалавекам гук (16 Гц $< \nu <$ 20 000 Гц);
ультрагук (20 000 Гц $< \nu < 10^9$ Гц);
гіпергук (10^9 Гц $< \nu < 10^{12}$ Гц — 10^{13} Гц).

Шматлікія жывёлы могуць успрымаць ультрагукі. Напрыклад, сабакі могуць чуць гукі частатой да 50 000 Гц, а кажаны — да 100 000 Гц.
Інфрагук, распаўсюджваючыся ў вадзе на сотні кіламетраў, дапамагае кітам і многім іншым марскім жывёлам арыентавацца ў тоўшчы вады.

Асноўнымі фізічнымі характарыстыкамі гуку з'яўляюцца *інтэнсіўнасць* і *спектральны састаў (спектр)*.

Для характарыстыкі энергіі, якая пераносіцца хвалямі, выкарыстоўваецца паняцце **інтэнсіўнасці** хвалі (*I*). Гэта энергія (*W*), што пераносіцца хваляй за адзінку

Правообладатель Народная асвета

часу ($\Delta t = 1$ с) праз паверхню плошчай $S = 1$ м^2, размешчаную перпендыкулярна да напрамку распаўсюджвання хвалі:

$$I = \frac{W}{S\Delta t} = \frac{P}{S}.$$

Іншымі словамі, інтэнсіўнасць уяўляе сабой магутнасць (P), якая пераносіцца хвалямі праз паверхню адзінкавай плошчы перпендыкулярна да напрамку распаўсюджвання хвалі.

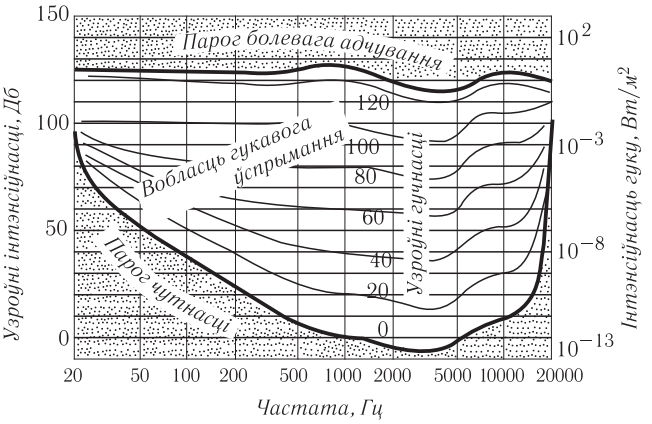
Адзінкай інтэнсіўнасці ў СІ з'яўляецца **1 ват на метр у квадраце** $\left(1\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right)$.

Узровень інтэнсіўнасці гуку L вызначаюць па шкале, адзінкай якой з'яўляецца **бел** (Б) або яе долевая адзінка — **1 дэцыбел** (дБ) (адна дзясятая бела). Узровень інтэнсіўнасці самага слабага гуку, які ўспрымае наша вуха, адпавядае 1 белу (1 Б). Адзінка названа ў гонар вынаходцы тэлефона Аляксандра Бела.

Так, поезд метро стварае ўзровень інтэнсіўнасці гуку 100 дБ, магутныя ўзмацняльнікі — 120 дБ, а рэактыўны самалёт — 150 дБ. Тым, хто пры рабоце падвяргаецца ўздзеянню шуму вышэй за 100 дБ, трэба карыстацца навушнікамі.

Інтэнсіўнасць гуку, які ўлоўліваецца вухам чалавека, знаходзіцца ў шырокіх межах: ад $1 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог чутнасці*) да $1\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог болевага адчування*) (рыс. 28).

Мінімальная інтэнсіўнасць, пры якой вуха чалавека перастае ўспрымаць гук, называецца **парогам чутнасці**. Крывая парога чутнасці для ўсяго гукавога дыя-



Рыс. 28. Дыяграма ўспрыняцця гуку вухам чалавека

Правообладатель Народная асвета

пазону паказана на рысунку 28 (у лагарыфмічным маштабе). Найбольш адчувальнае наша вуха да хваль, частата якіх прыкладна 3 кГц, паколькі інтэнсіўнасці парадку $10^{-12}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ужо дастаткова, каб вуха ўспрыняло гук. А для таго каб пачуць гук на частаце 50 Гц, яго інтэнсіўнасць павінна быць прыкладна ў 100 000 разоў большай, г. зн. пры інтэнсіўнасці парадку $10^{-7}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Пры значнай інтэнсіўнасці ваганняў вуха перастае ўспрымаць ваганні як гук і зведвае боль. Такая інтэнсіўнасць, пры якой адзначаецца боль, называецца **парогам болевага адчування**. Парог болевага адчування адпавядае інтэнсіўнасці, роўнай прыкладна $1\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Рэактыўны самалёт можа ствараць гук, інтэнсіўнасць якога парадку $10^3\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, магутныя ўзмацняльнікі на канцэрце ў закрытым памяшканні — да $1\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, поезд метро — $10^{-2}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

У тэхніцы лічаць за лепшае вымяраць змяненне інтэнсіўнасці гуку не ў ватах на метр у квадраце (на дыяграме яны прыведзены справа), а ў дэцыбелах (на дыяграме яны прыведзены злева).

Такім чынам, для ўзнікнення гукавых адчуванняў неабходна:

наяўнасць крыніцы гуку;

наяўнасць пругкага асяроддзя паміж крыніцай гуку і вухам;

частата ваганняў крыніцы гуку павінна знаходзіцца ў межах ад 16 да 20 000 Гц;

магутнасць гукавых хваль павінна быць дастатковай для таго, каб выклікаць адчуванне гуку.

Спектрам называецца набор гукаў розных частот, 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 вызначанымі частотамі і амплітудамі, якія ўтвараюць разглядаемы сігнал.

Па тыпе спектра гукі падзяляюцца на *шумы* і *музычныя тоны*.

Шум — сукупнасць разнастайных кароткатэрміновых гукаў (*хрусценне, шолах, шоргат, стук* і да т. п.) — уяўляе сабой накладанне вялікай колькасці ваганняў з блізкімі амплітудамі, але рознымі частотамі (*мае суцэльны спектр*).

Правообладатель Народная асвета

Музычны тон ствараецца перыядычнымі ваганнямі цела, якое гучыць (*камертон, струна*), і ўяўляе сабой гарманічнае ваганне адной частаты. На аснове музычных тонаў створана 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*.

Музычны гук (сугучча) — вынік накладання некалькіх музычных тонаў, што гучаць адначасова, з якіх можна вылучыць **асноўны тон**, адпаведны найменшай частаце. Асноўны тон называецца таксама *першай гармонікай*. Усе астатнія тоны называюцца **абертонамі**. Абертоны называюцца *гарманічнымі*, калі частоты абертонаў кратныя частаце асноўнага тону. Такім чынам, музычны гук мае *дыскрэтны спектр*.

Фізічным характарыстыкам гуку адпавядаюць вызначаныя (суб'ектыўныя) характарыстыкі, звязаныя з успрыманнем яго канкрэтным чалавекам. Гэта абумоўлена тым, што ўспрыманне гуку — працэс не толькі фізічны, але і фізіялагічны. Чалавечае вуха ўспрымае гукавыя ваганні пэўных частот і інтэнсіўнасцей (гэта аб'ектыўныя, якія не залежаць ад чалавека, характарыстыкі гуку) па-рознаму, у залежнасці ад «характарыстык прымальніка» (тут уплываюць суб'ектыўныя (індывідуальныя) рысы кожнага чалавека).

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 чалавечага вуха на розных частотах. Найбольшай адчувальнасцю чалавечае вуха валодае ў дыяпазоне частот ад 1000 да 5000 Гц.

З узростам парог чутнасці павялічваецца. Трэба адзначыць, што болевы парог змяняецца ў залежнасці ад частаты не так значна, як парог чутнасці.

Пры павелічэнні інтэнсіўнасці ў 10 разоў узровень гучнасці павялічваецца на 20 дБ. З прычыны гэтага гук у 50 дБ аказваецца ў 100 разоў больш інтэнсіўным, чым гук у 30 дБ.

Вышыня гуку вызначаецца частатой гукавых ваганняў, якія валодаюць найбольшай інтэнсіўнасцю ў спектры.

Тэмбр (адценне гуку) залежыць ад таго, колькі *абертонаў* далучаюцца да *асноўнага тону* і якая іх інтэнсіўнасць і частата. Па тэмбры мы лёгка адрозніваем гукі скрыпкі і раяля, флейты і гітары, галасы людзей (табл. 2) і г. д.

Правообладатель Народная асвета

Табліца 2. **Частата ваганняў розных крыніц гуку**

Крыніца гуку	ν, Гц	Крыніца гуку	ν, Гц
Мужчынскі голас:	80—500	Кантрабас	60—8000
бас	80—350	Віяланчэль	70—8000
барытон	100—400	Труба	60—6000
тэнар	130—500	Саксафон	80—8000
Жаночы голас:	170—1400	Раяль	90—9000
кантральта	170—780	*Музычныя тоны*	
меца-сапрана	200—1000	(першая актава):	
сапрана	250—1300	нота *до*	261,63
каларатурнае сапрана	260—1400	нота *рэ*	293,66
Арган	22—16 000	нота *мі*	329,63
Флейта	260—15 000	нота *фа*	349,23
Скрыпка	260—15 000	нота *соль*	392,0
Арфа	30—15 000	нота *ля*	440,0
Барабан	90—14 000	нота *сі*	493,88

Модуль скорасці 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 модуль скорасці гуку ў газах меншы, чым у вадкасцях, а ў вадкасцях, як правіла, меншы, чым у цвёрдых целах (табл. 3).

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

Табліца 3. **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

Упершыню модуль скорасці гуку ў паветры быў вызначаны ў 1640 г. французскім фізікам Марэнам Мерсэнам. Ён вымяраў прамежак часу паміж момантамі з'яўлення ўспышкі і гуку пры ружэйным стрэле. Мерсэн вызначыў, што модуль скорасці гуку ў паветры роўны 414 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Правообладатель Народная асвета

Спосаб арыентацыі або даследавання навакольных аб'ектаў, які заснаваны на выпраменьванні ўльтрагукавых імпульсаў з наступным успрыманнем адбітых імпульсаў (рэха) ад розных аб'ектаў, называецца **рэхалакацыяй**, а адпаведныя прыборы — **рэхалакатарамі**.

Рэхалакацыю выкарыстоўваюць розныя кітападобныя (дэльфіны), а таксама кажаны, птушкі гуахара, якія гняздуюцца ў глыбокіх пячорах Венесуэлы і на востраве Трынідад, стрыжы-салаганы, якія жывуць у пячорах Паўднёва-Усходняй Азіі.

Хвалі ўльтрагукавых частот шырока прымяняюць у медыцыне ў мэтах дыягностыкі. УГД-сканеры дазваляюць даследаваць унутраныя органы чалавека.

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. Ад чаго і як залежыць вышыня гуку?
6. У якіх межах знаходзяцца частоты інфрагукавых і ўльтрагукавых хваль?
7. Якімі асноўнымі фізічнымі велічынямі характарызуецца гук?
8. Што такое парог чутнасці? Болевы парог?
9. На якой частаце вуха чалавека мае найлепшую адчувальнасць?

Прыклад рашэння задачы

Стальныя дэталі правяраюцца ўльтрагукавым дэфектаскопам. Вызначыце таўшчыню d дэталі і глыбіню h размяшчэння дэфекту, калі пасля выпраменьвання ўльтрагукавога сігналу атрыманы два адбітыя сігналы праз прамежкі часу $\tau_1 = 0{,}15$ мс і $\tau_2 = 0{,}10$ мс. Модуль скорасці распаўсюджвання ўльтрагуку $v = 5{,}2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Дадзена:

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

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

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

d — ? h — ?

Рашэнне

Паколькі сігнал праходзіць дэталь туды і назад, то таўшчыню дэталі вызначым па формуле:

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

Аналагічна знаходзіцца глыбіня, на якой размешчаны дэфект:

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

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

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 6

1. Адлегласць паміж дзвюма чыгуначнымі станцыямі $l = 8{,}3$ км. Колькі часу (τ_1) распаўсюджваецца гук ад адной станцыі да другой па паветры і па стальных рэйках (τ_2)? Тэмпература паветра $t = 20$ °С.

2. Дэльфіны выпраменьваюць ультрагукавыя імпульсы частатой $\nu = 250$ кГц. Вызначыце даўжыню хвалі такога ўльтрагуку ў вадзе (λ_1) і ў паветры (λ_2) пры тэмпературы $t = 20$ °С.

3. Вызначыце глыбіню мора H у дадзеным месцы, калі ўльтрагукавы імпульс вярнуўся на судна праз прамежак часу $t = 0{,}20$ с пасля пасылкі. Модуль скорасці распаўсюджвання ўльтрагуку ў марской вадзе $v = 1{,}5 \cdot 10^3\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

4. Чалавек бачыць, як цяжкі камень падае на бетонны тратуар. Праз некаторы час ён чуе два гукі ад удару каменя: адзін прыйшоў па паветры, а другі распаўсюджваўся ў бетоне. Прамежак часу паміж імі $\Delta t = 1{,}2$ с. На якой адлегласці l ад чалавека ўпаў камень, калі модуль скорасці распаўсюджвання гуку ў бетоне $v_б = 4500\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$? Тэмпература паветра $t = 20$ °С.

5. Даўжыня гукавой хвалі ў першым асяроддзі ўтрая большая, чым у другім. У колькі разоў k зменіцца модуль скорасці распаўсюджвання гукавой хвалі пры пераходзе з першага асяроддзя ў другое?

6. Пры стрэле з гарматы пад вуглом $\alpha = 60{,}0°$ да гарызонту снарад мае пачатковую скорасць, модуль якой $v_0 = 500\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Праз які прамежак часу t пасля стрэлу артылерыст пачуе гук ад разрыву снарада на зямлі? Модуль скорасці распаўсюджвання гуку ў паветры $v_п = 340\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

7. Як па гуках, з якімі ляцяць муха і камар, вызначыць, хто з іх у палёце часцей махае крыламі?

8. Чаму паніжаецца вышыня гуку цыркулярнай пілы, калі да яе прыціскаюць дошку?

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 1

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

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

Правообладатель Народная асвета

Перыядычным вагальным рухам (ваганнямі) называюць любы працэс, які валодае ўласцівасцю паўтаральнасці ў часе.

Ваганні любой фізічнай прыроды, якія апісваюцца ўраўненнем

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

з'яўляюцца **гарманічнымі**, а сістэма, што выконвае такія ваганні, — **гарманічнай вагальнай сістэмай**, або **гарманічным асцылятарам**.

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

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

або

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

называюцца **гарманічнымі**.

Залежнасць каардынаты ад часу $x(t)$ называецца кінематычным **законам гарманічных ваганняў (законам руху)**.

Ваганні матэрыяльнага пункта з'яўляюцца **гарманічнымі**, калі яны адбываюцца пад дзеяннем вяртаючай сілы, модуль якой прама прапарцыянальны зрушэнню пункта са становішча раўнавагі $F_x = -kx$, накіраванай да становішча раўнавагі вагальнага цела.

Амплітуда ваганняў A $(A > 0)$ — максімальнае зрушэнне $x_{\max}$ цела або сістэмы цел са становішча раўнавагі.

Фаза ваганняў $\varphi = \omega t + \varphi_0$ вызначае стан вагальнай сістэмы (каардынаты, скорасць, паскарэнне) у любы момант часу пры зададзенай амплітудзе. У пачатковы момант часу $t = 0$ яна роўна пачатковай фазе φ_0.

Адзінкай фазы з'яўляецца **1 радыян** (1 рад).

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

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

Перыяд вагання T — час аднаго поўнага вагання:

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

Частата ваганняў ν — лік поўных ваганняў, выкананых за адзінку часу:

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

Правообладатель Народная асвета

Вагальная сістэма, якая складаецца з цела з прымацаванай да яго спружынай, называецца **спружынным маятнікам**. Яго перыяд ваганняў:

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

Вагальная сістэма, якая складаецца з невялікага цела, падвешанага на лёгкай нерасцяжной нітцы, называецца **матэматычным маятнікам**.

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. Яны адбываюцца са строга вызначанай частатой, так званай **частатой уласных ваганняў** сістэмы.

Затухаючымі называюцца ваганні, энергія якіх памяншаецца з цягам часу.

Вымушанымі называюцца ваганні сістэмы, выкліканыя дзеяннем на яе перыядычных знешніх сіл.

Рэзанансам называецца з'ява рэзкага ўзрастання амплітуды вымушаных ваганняў, калі частата перыядычнай знешняй сілы супадае з уласнай частатой ваганняў сістэмы.

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 грэбеня хвалі або любога іншага пункта хвалі з вызначанай фазай, модуль якой

$$v = \lambda\nu.$$

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

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

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека слыхавыя адчуванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**.

Правообладатель Народная асвета

Асноўнымі фізічнымі характарыстыкамі гуку з'яўляюцца *інтэнсіўнасць* і *спектральны састаў (спектр)*.

Адзінкі асноўных велічынь механічных ваганняў і хваль

Назва	Абазначэнне	Адзінкі	Выраз праз асноўныя адзінкі ў СІ
Частата	ν	Герц (Гц)	$с^{-1}$
Перыяд	T	Секунда (с)	с
Цыклічная (кругавая) частата	ω	Радыян у секунду $\left(\frac{рад}{с}\right)$	$с^{-1}$
Амплітуда	A	Метр (м)	м
Даўжыня хвалі	λ	Метр (м)	м
Модуль скорасці хвалі	v	Метр у секунду $\left(\frac{м}{с}\right)$	$\frac{м}{с}$

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 2
Электрамагнітныя ваганні і хвалі

Правильно ... рассматривать сходство в вещах, далеко отстоящих друг от друга.

Арыстоцель

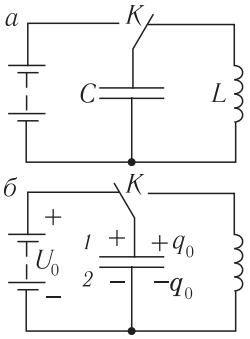
§ 7. Вагальны контур. Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры. Формула Томсана. Ператварэнні энергіі ў вагальным контуры

З'ява ўзнікнення ЭРС у любым контуры пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, называецца з'явай электрамагнітнай індукцыі.

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

Правіла Ленца: індукцыйны ток, які 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 электраёмістасцю C і шпулі (саленоіда) індуктыўнасцю L (рыс. 29, *а*), так званы **ідэальны вагальны контур** або ***LC*-контур**. Электрычнае супраціўленне ідэальнага контуру лічаць роўным нулю ($R = 0$). Значыць, ідэальны вагальны контур з'яўляецца спрошчанай мадэллю рэальнага вагальнага контуру.

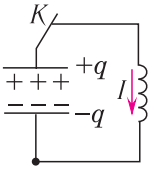


Рыс. 29. Вагальны контур (*а*); зарадка кандэнсатара ад крыніцы (*б*)

Падключыўшы (з дапамогай ключа K) крыніцу току, зарадзім кандэнсатар да напружання U_0, надаўшы яму зарад q_0 (рыс. 29, *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 электрастатычнае поле, ствараемае зарадамі абкладак кандэнсатара, валодае энергіяй $W_C = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}$.

Правообладатель Народная асвета

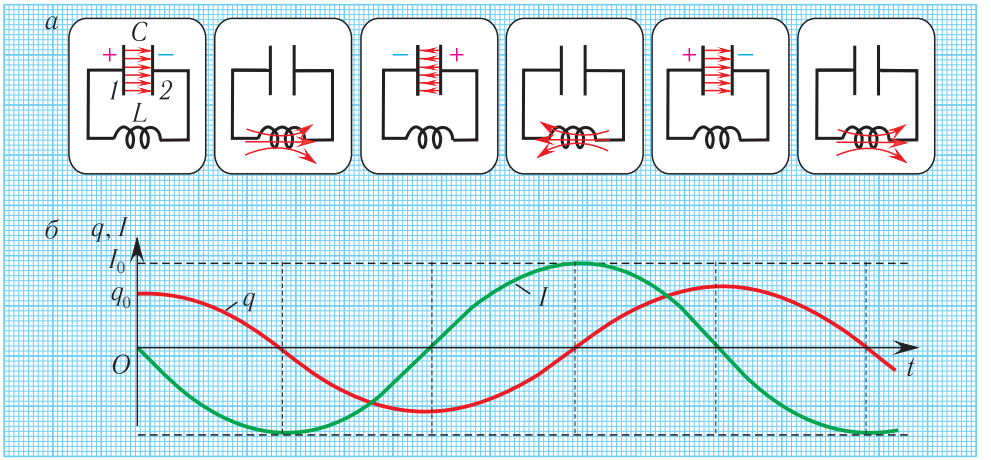
Разгледзім працэс разрадкі кандэнсатара ў вагальным контуры. Пасля злучэння зараджанага кандэнсатара са шпуляй (з дапамогай ключа *K*) (рыс. 30) ён пачне разраджацца, паколькі пад дзеяннем электрастатычнага поля, ствараемага зарадамі на абкладках кандэнсатара, свабодныя электроны будуць перамяшчацца па ланцугу ад адмоўна зараджанай абкладкі да дадатна зараджанай. На рысунку 30 стрэлкай паказаны пачатковы напрамак току ў электрычным ланцугу.



Рыс. 30. Праходжанне току ў вагальным контуры

Такім чынам, у контуры з'явіцца нарастаючы па модулі электрычны ток, сіла $I(t)$ якога будзе змяняцца з цягам часу (рыс. 31, *а*). Але імгненная разрадка кандэнсатара немагчыма, паколькі змяненне магнітнага поля шпулі, ствараемае нарастаючым па модулі токам, выклікае ўзнікненне віхравога электрычнага поля. Сапраўды, у шпулі індуктыўнасці ўзнікае магнітны паток, які змяняецца ў часе, і выклікае з'яўленне ЭРС самаіндукцыі. Згодна з правілам Ленца ЭРС самаіндукцыі імкнецца процідзейнічаць прычыне, якая яе выклікала, г. зн. павелічэнню сілы току па модулі.

З прычыны 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 электраёмістасцю кандэнсатара (рыс. 31, *б*).



Рыс. 31. Электрамагнітныя ваганні ў ідэальным *LC*-контуры (*а*) і залежнасці зараду кандэнсатара, сілы току ў шпулі ад часу (*б*)

Правообладатель Народная асвета

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

$$\frac{q_0^2}{2C} - \frac{q^2}{2C} = 0 + \frac{LI^2}{2}, \text{ або } \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2},$$

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. рыс. 31, *б*). У адпаведнасці з законам захавання энергіі назапашаная ў кандэнсатары энергія электрастатычнага поля пяройдзе 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 ўбываць па модулі. Гэта таксама адбываецца не імгненна, паколькі ЭРС самаіндукцыі, якая зноў узнікла, згодна з правілам Ленца стварае індукцыйны ток. Ён мае такі ж напрамак, як і ток у ланцугу, які змяншаецца па модулі, і таму «падтрымлівае» яго. Індукцыйны ток, які ствараецца ЭРС самаіндукцыі шпулі, перазараджае кандэнсатар да пачатковага напружання U_0, але знак зараду на кожнай абкладцы аказваецца процілеглым знаку пачатковага зараду. Значыць, да моманту знікнення току зарад кандэнсатара дасягне максімальнага значэння q_0. Пры гэтым яго абкладка, першапачаткова зараджаная дадатна, будзе зараджана адмоўна. Далей працэс паўторыцца з тым толькі адрозненнем, што электрычны ток у контуры будзе праходзіць у процілеглым напрамку, што паказана на рысунку 31, *а*.

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

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

Такім чынам, існаванне свабодных электрамагнітных ваганняў у контуры абумоўлена перазарадкай кандэнсатара, якая выклікана ўзнікненнем ЭРС сама-

Правообладатель Народная асвета

індукцыі 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. рыс. 31 *а, б*).

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, выкарыстоўваючы закон захавання энергіі. Паколькі поўная энергія ідэальнага LC-контуру, роўная суме энергій электрастатычнага поля кандэнсатара і магнітнага поля шпулі, захоўваецца, то ў любы момант часу справядлівая роўнасць:

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

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

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

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

Перыяд яго ваганняў:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (3)$$

Прааналізуем суадносіны (1) і (2). Бачна, што энергія электрастатычнага поля кандэнсатара $W_C = \frac{q^2(t)}{2C}$ з'яўляецца аналагам патэнцыяльнай энергіі пругкай дэфармацыі спружыны $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$. Адпаведна, энергія магнітнага поля шпулі $W_L = \frac{LI^2(t)}{2}$, якая абумоўлена ўпарадкаваным рухам зарадаў, з'яўляецца аналагам кінетычнай энергіі грузу $W_{\text{к}} = \frac{mv_x^2}{2}$. Значыць, аналагам каардынаты $x(t)$ спружыннага маятніка пры ваганнях у электрычным контуры з'яўляецца зарад кандэнсатара $q(t)$. Тады, адпаведна, аналагам праекцыі скорасці грузу будзе сіла току ў вагальным контуры, паколькі сіла току характарызуе скорасць змянення зараду кандэнсатара з цягам часу.

Правообладатель Народная асвета

Кіруючыся праведзенай аналогіяй, заменім у формуле для перыяду ваганняў спружыннага маятніка масу m на індуктыўнасць L і жорсткасць k на $\frac{1}{C}$. Тады для перыяду свабодных ваганняў у LC-контуры атрымаем формулу:

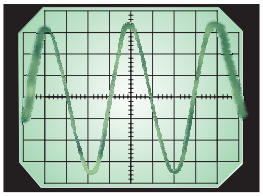
$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{LC},} \qquad (4)$$

якая называецца **формулай Томсана**.

Нескладаныя далейшыя разважанні дазваляюць вызначыць аналогіі паміж фізічнымі велічынямі пры электрамагнітных і механічных ваганнях (табл. 4).

Таблiца 4. **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)
$x(t)$ (праекцыя зрушэння ад становішча раўнавагі або каардыната)	$q(t)$ (зарад кандэнсатара)
$v_x(t)$ (праекцыя скорасці цела)	$I(t)$ (сіла току)
$W_п = \frac{kx^2}{2}$ (патэнцыяльная энергія пругкай дэфармацыі спружыны)	$W_C = \frac{q^2}{2C}$ (энергія электрастатычнага поля кандэнсатара)
$W_к = \frac{mv^2}{2}$ (кінетычная энергія грузу)	$W_L = \frac{LI^2}{2}$ (энергія магнітнага поля шпулі)
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (перыяд ваганняў)	$T = 2\pi\sqrt{LC}$ (перыяд ваганняў)
$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (цыклічная частата ваганняў)	$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (цыклічная частата ваганняў)



Для назірання і даследавання электрамагнітных ваганняў прымяняюць электронны асцылограф, на экране якога атрымліваюць часавую разгортку ваганняў (рыс. 32).

Рыс. 32. Гарманічныя электрамагнітныя ваганні на экране асцылографа

Правообладатель Народная асвета

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

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

Таксама па гарманічным законе змяняецца сіла току (але з другой 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 контуру — спружынны маятнік з улікам трэння.

§ ?

1. Якія электрамагнітныя ваганні ў контуры называюцца свабоднымі?
2. З якіх асноўных элементаў складаецца ідэальны вагальны контур?
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 вагальнага контуру ад 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, зменяцца, а якія — застануцца ранейшымі?
7. Як размеркавана энергія элетрамагнітных ваганняў паміж электрастатычным 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. Чаму свабодныя электрамагнітныя ваганні ў рэальным кантуры ($R = 0$) з'яўляюцца затухаючымі?
9. Ці залежыць перыяд свабодных электрамагнітных ваганняў ад энергіі, назапашанай у контуры ў пачатковы момант часу?

Правообладатель Народная асвета

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:
$C = 400$ пФ $= 4{,}00 \cdot 10^{-10}$ Ф
$L = 10$ мГн $= 1{,}0 \cdot 1{,}0^{-2}$ Гн
$U_0 = 500$ 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.

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

Адсюль

$$I_0 = U_0\sqrt{\frac{C}{L}};$$

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

Адказ: $I_0 = 0{,}10$ А.

Практыкаванне 7

1. Вызначыце перыяд T свабодных электрамагнітных ваганняў у ідэальным вагальным контуры, які складаецца з кандэнсатара ёмістасцю $C = 15$ мкФ і шпулі індуктыўнасцю $L = 2{,}5$ мГн.

2. Кандэнсатар ёмістасцю $C = 1{,}2$ мкФ злучаны са шпуляй, індуктыўнасць якой $L = 16$ мкГн. Вызначыце частату ν свабодных электрамагнітных ваганняў у контуры.

3. Як зменіцца перыяд свабодных электрамагнітных ваганняў у контуры, калі індуктыўнасць L шпулі контуру павялічыць (паменшыць) у $n = 16$ разоў пры нязменнай ёмістасці кандэнсатара?

4. Уваходны контур радыёпрыёмніка змяшчае шпулю індуктыўнасцю $L = 0{,}32$ мГн. У якіх межах павінна змяняцца ёмістасць C кандэнсатара контуру,

Правообладатель Народная асвета

каб радыёпрыёмнік змог прымаць сігналы радыёстанцыі, якая працуе ў дыяпазоне частот ад $\nu_1 = 8{,}0$ МГц да $\nu_2 = 24$ МГц?

5. У вагальным контуры індуктыўнасць шпулі $L = 0{,}20$ Гн, а максімальнае значэнне сілы току $I_0 = 40$ мА. Знайдзіце энергію электрастатычнага поля W_C кандэнсатара і магнітнага поля W_L шпулі ў той момант, калі імгненнае значэнне сілы току ў 2 разы меншае за яго максімальнае значэнне.

6. Ідэальны вагальны контур змяшчае шпулю індуктыўнасцю $L = 2{,}0$ мГн і плоскі кандэнсатар, плошча кожнай абкладкі якога $S = 20$ см^2, а адлегласць паміж імі $d = 1{,}0$ мм. Вызначыце дыэлектрычную пранікальнасць ε асяроддзя, якое запаўняе прастору паміж абкладкамі, калі максімальнае значэнне сілы току ў контуры $I_0 = 12$ мА, а максімальнае значэнне напружання $U_0 = 10$ В.

§ 8. Вымушаныя электрамагнітныя ваганні. Пераменны электрычны ток. Дзеючыя значэнні сілы току і напружання

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: $\Phi = BS\cos\alpha$.

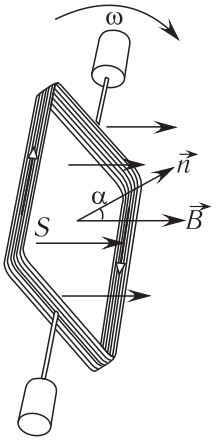
Закон электрамагнітнай індукцыі: ЭРС індукцыі ў контуры роўна скорасці змянення магнітнага патоку, што яго пранізвае, узятай з процілеглым знакам: $\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

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 вымушаныя ваганні. Аналагічна гэтаму **вымушаныя электрамагнітныя ваганні** ў вагальным контуры адбываюцца пад дзеяннем знешняй ЭРС, якая перыядычна змяняецца, і знешняга напружання, якое змяняецца. Пры гэтым напружанне ў ланцугу і сіла току змяняюцца як па знаку, так і па модулі.

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

Асноўная частка электраэнергіі ў свеце ў цяперашні час выпрацоўваецца генератарамі пераменнага току, якія ствараюць *сінусоіднае напружанне*. Такая ж функцыянальная залежнасць сілы току ад часу дазваляе, у параўнанні з іншымі залежнасцямі, найбольш проста і эканамічна здзяйсняць перадачу, размеркаванне і выкарыстанне электрычнай энергіі.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 33. Вярчэнне праводзячай рамкі ў магнітным полі

Электратэхнічнае ўстройства, прызначанае 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 ў яе плоскасці перпендыкулярна да ліній індукцыі аднароднага магнітнага поля, індукцыя якога $\vec{B}$ (рыс. 33).

Пры раўнамерным вярчэнні рамкі вугал α паміж напрамкамі індукцыі магнітнага поля і нармалі да плоскасці рамкі змяняецца з цягам часу па лінейным законе. Калі ў момант часу $t_0 = 0$ вугал $\alpha_0 = 0$ (гл. рыс. 33), то

$$\alpha = \omega t.$$

Падстаўляючы атрыманы выраз для α у формулу для магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную рамкай, $\Phi = BS\cos\alpha$, знойдзем залежнасць гэтага патоку ад часу:

$$\Phi(t) = BS\cos\omega t.$$

Паколькі магнітны паток, што пранізвае рамку, змяняецца з часам (рыс. 34), то ў ёй, згодна з законам Фарадэя, індуцыруецца ЭРС індукцыі $\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Знойдзем адносіну $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ пры дастаткова малых значэннях Δt. Для гэтага запішам:

$$\Delta\Phi = \Phi(t+\Delta t) - \Phi(t) = BS(\cos(\omega t + \omega\Delta t) - \cos\omega t) =$$
$$= BS(\cos\omega t \cdot \cos\omega\Delta t - \sin\omega t \cdot \sin\omega\Delta t - \cos\omega t).$$

Паколькі $\omega\Delta t \ll 1$, то $\cos\omega\Delta t \approx 1$ і $\sin\omega\Delta t \approx \omega\Delta t$.
Канчаткова маем:

$$\Delta\Phi \approx BS(\cos\omega t - \omega\Delta t \cdot \sin\omega t - \cos\omega t) \approx -BS\omega\Delta t\sin\omega t.$$

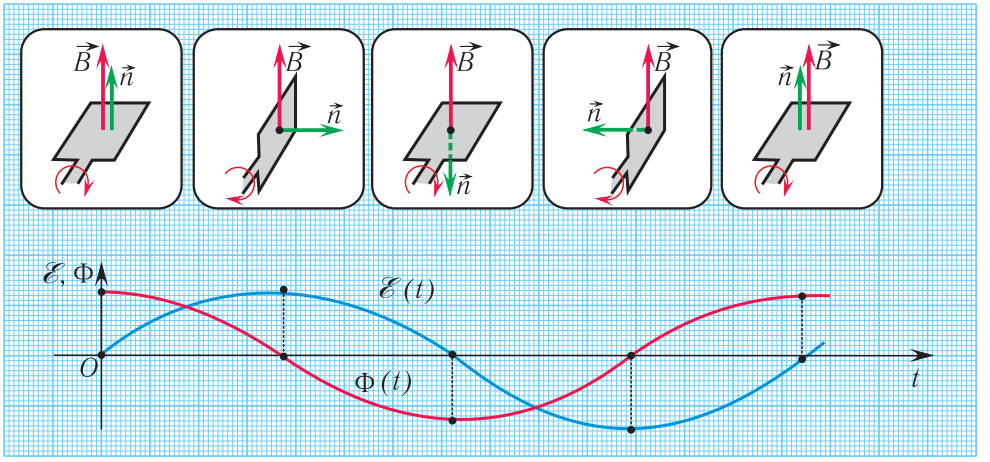
Адсюль

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -BS\omega\sin\omega t.$$

Значыць,

$$\mathscr{E}(t) = BS\omega\sin\omega t.$$

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 34. Узнікненне ЭРС індукцыі пры вярчэнні праводзячай рамкі ў магнітным полі

Як відаць, ЭРС індукцыі змяняецца па сінусоідным законе:

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin \omega t, \qquad (1)$$

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

Пры падключэнні да вывадаў рамкі прыстасавання, якое спажывае энергію (напрыклад, нагрузкі з дастаткова вялікім супраціўленнем $R \gg r$ (r — супраціўленне рамкі)), па ім будзе праходзіць пераменны электрычны ток. Па законе Ома для поўнага ланцуга сіла току, які праходзіць:

$$I = \mathscr{E}\frac{1}{R} = \frac{BS\omega}{R}\sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \qquad (2)$$

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

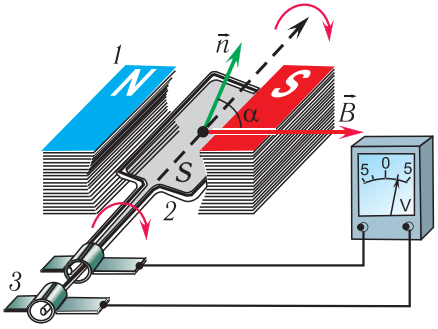
Аналізуючы выразы (1) і (2), можам зрабіць вывад, што ў ланцугу, які змяшчае, акрамя рамкі, толькі актыўнае супраціўленне R, ваганні напружання і сілы току супадаюць па фазе, адначасова дасягаючы максімумаў і мінімумаў.

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

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

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

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 35. Часткі індукцыйнага генератара: *1* — індуктар; *2* — якар; *3* — калектар са шчоткамі

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

Асноўнымі часткамі індукцыйнага генератара пераменнага току з'яўляюцца (рыс. 35):

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

якар — абмотка, у якой індуцыруецца пераменная ЭДС;

калектар — кантактныя кольцы і кантактныя пласцінкі (шчоткі), якія слізгаюць па кольцах, — прылада, з дапамогай якой ток здымаецца або падводзіцца да частак, што верцяцца.

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

У залежнасці ад канструкцыі генератара яго якар можа быць як ротарам, так і статарам. Для атрымання пераменных токаў вялікай магутнасці якар робяць нерухомым, каб канструкцыйна спрасціць схему перадачы току ў прамысловую сетку. Акрамя таго, гэта робіць генератар больш надзейным у эксплуатацыі, з прычыны памяншэння іскрэння і абгарання шчотак.

На сучасных гідраэлектрастанцыях падаючая вада верціць вал электрагенератара з частатой 1—2 абароты ў секунду. Такім чынам, калі б якар генератара меў толькі адну рамку (абмотку), то атрымліваўся б пераменны ток частатой 1—2 Гц. Таму для атрымання пераменнага току прамысловай частаты 50 Гц якар павінен змяшчаць некалькі абмотак, якія дазваляюць павялічыць частату выпрацоўваемага току да неабходнай велічыні.

Для паравых турбін, ротар якіх верціцца вельмі хутка, выкарыстоўваюць якар з адной абмоткай. У гэтым выпадку частата вярчэння ротара супадае з частатой пераменнага току, г. зн. ротар павінен рабіць $50\,\frac{\text{аб}}{\text{с}}$ $\left(3000\,\frac{\text{аб}}{\text{мін}}\right)$.

Для павелічэння амплітуднага значэння ЭРС індукцыі трэба або павялічыць індукцыю магнітнага поля, якое пранізвае абмоткі якара, або павялічыць лік віткоў яго абмотак. Для павелічэння індукцыі магнітнага поля $\vec{B}$ абмотку індуктара

Правообладатель Народная асвета

размяшчаюць у стальным стрыжні, а зазор паміж стрыжнямі якара і індуктара робяць як мага меншым.

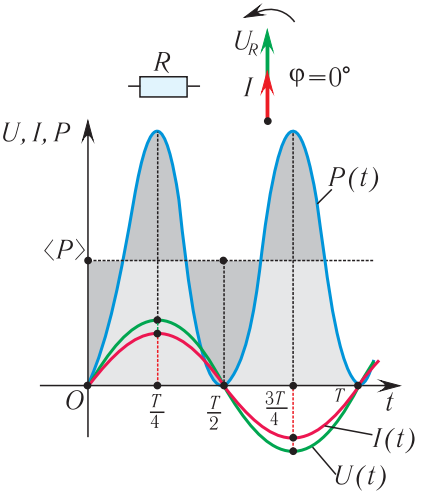
Магутныя генератары выпрацоўваюць напружанне 15—20 кВ і маюць ККДз 97—98 %.

Пры падключэнні электрычных ланцугоў да крыніцы пераменнага току ўзнікаюць новыя заканамернасці, якія і разгледзім далей.

Няхай крыніца току стварае пераменнае гарманічнае напружанне:

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

Згодна з законам Ома для ўчастка ланцуга сіла току на ўчастку ланцуга, які змяшчае толькі рэзістар супраціўленнем R (рыс. 36), падключаны да гэтай крыніцы, змяняецца з часам таксама па сінусоідным законе:



Рыс. 36. Залежнасці U, I і P ад часу ў электрычным ланцугу з актыўным супраціўленнем

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

дзе $I_0 = \frac{U_0}{R}$.

Сіла току ў такім ланцугу таксама змяняецца з цягам часу па сінусоідным законе.

Максімальныя велічыні напружання і сілы току U_0, I_0 называюцца **амплітуднымі значэннямі напружання** і **сілы току** адпаведна.

Значэнні напружання $U(t)$ і сілы току $I(t)$ у любы момант часу называюцца **імгненнымі**. Ведаючы імгненныя значэнні $U(t)$ і $I(t)$, можна вылічыць імгненную магутнасць пераменнага току $P(t) = U(t)I(t)$, якая, у адрозненне ад ланцугоў пастаяннага току, змяняецца з цягам часу.

З улікам залежнасці сілы току ад часу перапішам выраз для імгненнай магутнасці на рэзістары супраціўленнем R у ланцугу пераменнага току ў выглядзе

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

Паколькі імгненная магутнасць змяняецца з цягам часу, то выкарыстоўваць гэту велічыню на практыцы ў якасці характарыстыкі працэсаў, якія доўгі час адбываюцца, вельмі нязручна.

Правообладатель Народная асвета

Перапішам формулу для імгненнай магутнасці інакш:

$$P = UI = U_0 I_0 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} U_0 I_0 (1 - \cos 2\omega t) = \frac{U_0 I_0}{2} - \frac{U_0 I_0}{2} \cos 2\omega t.$$

Першае складаемае не залежыць ад часу. Другое складаемае — пераменная састаўляючая — функцыя косінуса двайнога вугла. Яе сярэдняе значэнне за прамежак часу, роўны (або кратны) перыяду ваганняў, роўна нулю ($\langle \cos 2\omega t \rangle = 0$) з прычыны таго, што палову перыяду косінус мае дадатныя значэнні, а другую палову перыяду — такі ж набор адмоўных значэнняў.

Таму сярэдняе значэнне магутнасці пераменнага электрычнага току за працяглы ў параўнанні з перыядам ваганняў прамежак часу можна знайсці па формуле:

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

Гэты выраз дазваляе ўвесці *дзеючыя (эфектыўныя)* значэнні сілы току і напружання, якія выкарыстоўваюцца ў якасці асноўных характарыстык пераменнага току.

Дзеючае (эфектыўнае) значэнне сілы пераменнага току роўна сіле такога пастаяннага току, які праходзячы ў электрычным ланцугу па рэзістары супраціўленнем R, вылучае за прамежак часу, кратны перыяду ваганняў ($\tau = nT$), такую ж колькасць цеплаты, што і дадзены пераменны ток.

Паколькі для пастаяннага току $P_{\text{паст}} = I^2 R$, то з улікам раней атрыманага выразу для сярэдняга значэння магутнасці пераменнага току *дзеючае значэнне сілы сінусоіднага пераменнага току*:

$$\boxed{I_{\text{дз}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.}$$

Аналагічна можна ўвесці *дзеючае значэнне* і для *напружання*:

$$\boxed{U_{\text{дз}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.}$$

Такім чынам, выразы для разліку магутнасці, спажываемай рэзістарамі ў ланцугах пастаяннага току, аналагічны і для пераменнага току, калі выкарыстоўваць у іх дзеючыя значэнні сілы току і напружання:

$$\boxed{P = U_{\text{дз}} I_{\text{дз}} = I_{\text{дз}}^2 R = \frac{U_{\text{дз}}^2}{R};}$$

$$\boxed{I_{\text{дз}} = \frac{U_{\text{дз}}}{R}.}$$

Правообладатель Народная асвета

У ланцугах пераменнага току большасць электравымяральных прыбораў вымяраюць дзеючыя значэнні току і напружання. Так, напрыклад, дзеючым значэннем напружання ў Рэспубліцы Беларусь у бытавых сетках пераменнага току з'яўляецца $U_{дз} = 220$ В.

Неабходна адзначыць, што закон Ома для ўчастка ланцуга пераменнага току, які змяшчае толькі рэзістар супраціўленнем R, выконваецца як для амплітудных і дзеючых, так і для імгненных значэнняў напружання і сілы току з прычыны таго, што іх ваганні супадаюць па фазе (гл. рыс. 36).

Такім чынам, рэзістары аказваюць супраціўленне як пастаяннаму, так пераменнаму току, пры гэтым у абодвух выпадках у іх адбываецца ператварэнне электрычнай энергіі ў энергію цеплавога руху часціц. З прычыны гэтага супраціўленне рэзістараў R атрымала назву **актыўнага** або **амічнага** супраціўлення.

1. Для чаго служыць генератар пераменнага току?
2. На якой з'яве заснавана работа індукцыйнага генератара пераменнага току?
3. З якіх асноўных частак складаецца індукцыйны генератар пераменнага току?
4. Растлумачце прызначэнне кожнай часткі генератара.
5. Чаму ў рамцы, якая раўнамерна верціцца ў аднародным магнітным полі, узбуджаецца ЭРС і ад якіх велічынь яна залежыць?
6. Які ток называюць пераменным?
7. Што такое перыяд, частата, фаза пераменнага току?
8. Якое значэнне пераменнага току называюць імгненным? Амплітудным?
9. Што называецца дзеючым значэннем сілы пераменнага току?
10. Калі для разліку магутнасці пераменнага току можна карыстацца формулай $P = UI$?

Практыкаванне 8

1. Уключаны ў сетку пераменнага току вальтметр паказвае напружанне $U = 220$ В. Вызначыце амплітуднае значэнне напружання U_0 у сетцы.

2. У ланцугу пераменнага току напружанне змяняецца па законе $U = U_0 \sin \omega t$, дзе $U_0 = 200$ В, $\omega = 50\pi \frac{рад}{с}$. Вызначыце частату ν пераменнага току, а таксама дзеючае значэнне напружання $U_{дз}$ у ланцугу. На якое напружанне U павінна быць разлічана ізаляцыя правадоў?

3. Сіла току ў ланцугу пераменнага току змяняецца па законе $I = I_0 \sin \omega t$, дзе $I_0 = 3{,}0$ А, $\omega = 100\pi \frac{рад}{с}$. Вызначыце частату ν ваганняў току ў ланцугу і дзеючае значэнне сілы току $I_{дз}$.

4. Напружанне на ўчастку электрычнага ланцуга, па якім праходзіць пераменны ток, змяняецца з часам па законе $U = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$. Вызначыце амп-

Правообладатель Народная асвета

літуднае значэнне напружання U_0, калі ў момант часу $t = \frac{T}{6}$ імгненнае значэнне напружання $U = 6{,}0$ В.

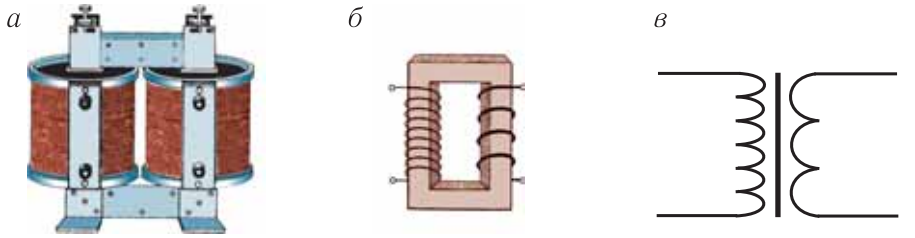
5. Плоскі праводзячы віток плошчай $S = 0{,}12$ м^2 раўнамерна верціцца ў аднародным магнітным полі, выконваючы $n = 5{,}0\ \frac{\text{аб}}{\text{с}}$ вакол восі, размешчанай у плоскасці вітка і перпендыкулярнай да ліній індукцыі. Як змяняецца ЭРС індукцыі ў вітку з цягам часу, калі модуль індукцыі магнітнага поля $B = 50$ мТл і ў пачатковы момант часу плоскасць вітка перпендыкулярна да ліній індукцыі магнітнага поля? Вызначыце амплітуднае значэнне ЭРС $\mathscr{E}_0$ у вітку.

§ 9. Пераўтварэнне пераменнага току. Трансфарматар

Генератары пераменнага току ствараюць у разліку на пэўныя значэнні напружання. Для практычнага выкарыстання электрычнай энергіі ў розных устройствах і прыборах неабходны розныя значэнні напружанняў. Для гэтага выкарыстоўваюцца *трансфарматары* (ад лац. transformo — пераўтвараю). Першую мадэль (прататып) трансфарматара стварыў у 1831 г. Майкл Фарадэй, наматаўшы на жалезнае кольца дзве ізаляваныя абмоткі, якую выкарыстаў у сваіх эксперыментах. Трансфарматар быў упершыню выкарыстаны для змянення напружання ў 1878 г. рускім вучоным Паўлам Мікалаевічам Яблачкавым для сілкавання вынайдзеных ім крыніц святла — «электрычных свечак».

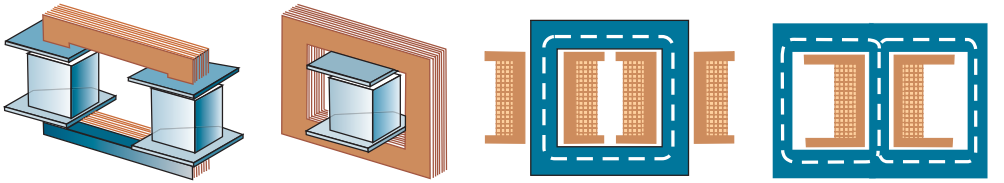
Трансфарматар (рыс. 37, *а*) — гэта электрамагнітны апарат, які пераўтварае пераменны ток аднаго напружання ў пераменны ток другога напружання з захаваннем яго частаты.

Трансфарматар, які павялічвае напружанне, называюць *павышаючым*, а які памяншае напружанне — *паніжаючым*. Схематычны відарыс і ўмоўнае абазначэнне трасфарматара паказаны на рысунку 37 *б, в*.



Рыс. 37. Трансфарматар: *а* — агульны выгляд; *б* — схематычны відарыс; *в* — умоўнае абазначэнне

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 38. Розныя размяшчэнні абмотак трансфарматараў

Самы просты трансфарматар складаецца з дзвюх абмотак (шпуль), надзетых на агульны замкнуты стрыжань (гл. рыс. 37, *а*). Абмотка трансфарматара, на якую падаецца пераменнае напружанне, называецца *першаснай,* а абмотка, з якой здымаецца пераўтворанае пераменнае напружанне, — *другаснай*. Лік віткоў у першаснай абмотцы трансфарматара абазначым N_1, а ў другаснай — N_2.

Абмоткі трансфарматара могуць быць размешчаны на стрыжні розным чынам (рыс. 38).

Прынцып дзеяння трансфарматара заснаваны на з'яве электрамагнітнай індукцыі. Магнітнае поле, ствараемае пераменным токам у першаснай абмотцы (гл. рыс. 37, *а*), дзякуючы наяўнасці замкнутага стрыжня практычна без страт (без рассейвання) пранізвае віткі другаснай абмоткі. Для гэтага стрыжань вырабляюць са спецыяльнага (ферамагнітнага) матэрыялу, што дазваляе ствараемае токам у абмотках магнітнае поле амаль поўнасцю лакалізаваць унутры стрыжня. У выніку магнітны паток існуе толькі ўнутры стрыжня і аднолькавы ва ўсіх сячэннях. Гэта дае магчымасць 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 прымаць у разлік 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. Значыць, адносіна ЭРС у першаснай $\mathscr{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ і другаснай $\mathscr{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ абмотках роўна адносіне ліку віткоў у іх:

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1 e}{N_2 e} = \frac{N_1}{N_2}, \qquad (1)$$

дзе e — значэнне ЭРС індукцыі ў адным вітку.

Паколькі актыўнае супраціўленне першаснай абмоткі нязначнае, то

$$U_1 \approx \mathscr{E}_1.$$

Правообладатель Народная асвета

Рэжымам халастога ходу трансфарматара называецца рэжым з разамкнутай другаснай абмоткай. У гэтым выпадку напружанне на другаснай абмотцы роўна індуцыруемай у ёй ЭРС:

$$U_2 \approx \mathscr{E}_2.$$

Значыць, у рэжыме халастога ходу з суадносіны (1) атрымліваем:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1, \qquad (2)$$

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

Як вынікае з выразу (2), 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**, які роўны адносіне ліку віткоў першаснай шпулі да ліку віткоў другаснай:

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

Згодна з выразам (2) адносіна дзеючых значэнняў напружанняў на першаснай і другаснай абмотках трансфарматара ў рэжыме халастога ходу роўна каэфіцієнту трансфармацыі:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}. \qquad (3)$$

Як вынікае з суадносіны (3), $U_2 = \frac{U_1}{k}$, і пры $k > 1$ напружанне на другаснай абмотцы будзе меншым за напружанне на першаснай ($U_2 < U_1$). Значыць, у гэтым выпадку трансфарматар будзе *паніжаючым*. Адпаведна, пры $k < 1$ трансфарматар будзе *павышаючым*.

Рабочым ходам (рэжымам) трансфарматара называецца рэжым, пры якім у ланцуг яго другаснай абмоткі ўключана некаторая нагрузка. Уключэнне нагрузкі ў другасны ланцуг трансфарматара прыводзіць да з'яўлення ў ёй току. Згодна з правілам Ленца магнітны паток, які ствараецца токам у другаснай абмотцы, імкнецца скампенсаваць змяненне магнітнага патоку праз віткі другаснай абмоткі, а значыць, і праз віткі першаснай абмоткі (агульны стрыжань).

Гэта прыводзіць да некаторага памяншэння магнітнага патоку ў першаснай абмотцы, для кампенсацыі якога дзеючае значэнне сілы току ў першаснай абмотцы трансфарматара павялічваецца. Значыць, пасля ўключэння нагрузкі трансфарматара ў другасную абмотку сіла току ў яго першаснай шпулі павялічваецца

Правообладатель Народная асвета

такім чынам, каб сумарны магнітны паток праз першасную абмотку дасягнуў ранейшай велічыні.

Трансфарматар не стварае, а пераўтварае энергію. Згодна з законам захавання энергіі магутнасць току, якая вылучаецца ў ланцугу другаснай абмоткі трансфарматара ў рэжыме нагрузкі, паступае з ланцуга яго першаснай абмоткі, г. зн. ад знешняй крыніцы. Не прымаючы да ўвагі страты энергіі, звязаныя з награваннем абмотак і работай на перамагнічванне стрыжня, якія ў сучасных трансфарматарах не перавышаюць 2 %, можам запісаць, што магутнасці току ў ланцугах абедзвюх абмотак трансфарматара практычна аднолькавыя:

$$U_2 I_2 \approx U_1 I_1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}.$$

Такім чынам, павышаючы напружанне ў некалькі разоў, трансфарматар у столькі ж разоў памяншае сілу току.

Рэжымам кароткага замыкання называецца рэжым, пры якім другасная абмотка трансфарматара замкнута без нагрузкі. Дадзены рэжым небяспечны для трансфарматара, паколькі ў гэтым выпадку дзеючае значэнне току ў другаснай абмотцы максімальнае і адбываюцца электрычная і цеплавая перагрузкі сістэмы.

Пры рабоце трансфарматара заўсёды ёсць энергетычныя страты, звязанныя з такімі фізічнымі працэсамі, як:

награванне абмотак трансфарматара пры праходжанні электрычнага току;

работа па перамагнічванні стрыжня;

рассейванне магнітнага патоку.

Найбольш значныя энергетычныя страты пры рабоце трансфарматара абумоўлены цеплавым дзеяннем *віхравых токаў* **(токаў Фуко)**, якія ўзнікаюць у стрыжні пры змяненні магнітнага патоку.

Для памяншэння цеплавых страт стрыжні (магнітаправоды) трансфарматараў вырабляюць не з суцэльнага кавалка металу, а з тонкіх пласцін спецыяльнай трансфарматарнай сталі, падзеленых вельмі тонкімі слаямі дыэлектрыка (пласціны пакрываюць лакам). Такая канструкцыя стрыжня дазваляе значна павялічыць яго электрычнае супраціўленне, што прыводзіць да памяншэння страт на яго награванне.

Для прадухілення перагрэву магутных трансфарматараў выкарыстоўваецца маслянае ахаладжэнне.

Сучасныя трансфарматары маюць вельмі высокія ККДз (да 98—99 %), што дазваляе ім працаваць практычна без страт.

Правообладатель Народная асвета

1. Што называецца трансфарматарам? Апішыце будову прасцейшага трансфарматара.
2. На якой фізічнай з'яве заснаваны прынцып дзеяння трансфарматара?
3. Якая ўзаемасувязь паміж дзеючымі значэннямі напружання на ўваходзе і выхадзе трансфарматара?
4. Які рэжым работы трансфарматара называецца халастым ходам?
5. Што называюць каэфіцыентам трансфармацыі?
6. Чым адрозніваецца рабочы рэжым трансфарматара ад рэжыму халастога ходу?
7. Чым небяспечны рэжым кароткага замыкання трансфарматара?
8. Ці можа трансфарматар выкарыстоўвацца для пераўтварэння пастаяннага току?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце сілу току I_1 у першаснай абмотцы трансфарматара, калі напружанне на яе зацiскачках на $\Delta U = 1500$ В большае, чым на другаснай абмотцы. Супраціўленне першаснай абмоткі $R_1 = 35$ Ом, каэфіцыент трансфармацыі $k = 20$.

Дадзена:	Рашэнне
$\Delta U = 1500$ В $R_1 = 35$ Ом $k = 20$	Па законе Ома сіла току ў першаснай абмотцы $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$,
I_1 — ?	дзе U_1 — напружанне на першаснай абмотцы.

Каэфіцыент трансфармацыі:

$$k = \frac{U_1}{U_2},$$

дзе U_2 — напружанне на другаснай абмотцы.

Па ўмове задачы:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_1\left(\frac{k-1}{k}\right).$$

Тады сіла току ў першаснай абмотцы

$$I_1 = \frac{\Delta U k}{R_1(k-1)}; \quad I_1 = \frac{1500\ \text{В} \cdot 20}{35\ \text{Ом}\,(20-1)} = 45\ \text{А}.$$

Адказ: $I_1 = 45$ А.

Практыкаванне 9

1. Першасная абмотка трансфарматара змяшчае $N_1 = 185$ віткоў, другасная — $N_2 = 65$. Які гэта трансфарматар — павышаючы або паніжаючы? У колькі разоў k ён змяняе напружанне, што падаецца на першасную абмотку?

Правообладатель Народная асвета

2. Для сілкавання неонавых трубак светлавой рэкламы патрабуецца дзеючае значэнне напружання $U_2 = 120$ В. Якой павінна быць адносіна k ліку віткоў у першаснай і другаснай абмотках трансфарматара для сілкавання трубак ад сеткі з дзеючым значэннем напружання $U_1 = 1{,}2$ кВ?

3. Першасная абмотка трансфарматара змяшчае $N_1 = 1800$ віткоў, другасная — $N_2 = 120$. Не прымаючы ў разлік страты, вызначыце дзеючае значэнне сілы току I_1 у першаснай абмотцы, калі ў другаснай абмотцы яно — $I_2 = 8{,}0$ А. Знайдзіце дзеючае значэнне напружання U_2 на другаснай абмотцы, калі на першаснай абмотцы $U_1 = 120$ В.

4. Трансфарматар, магутнасць якога $P = 280$ Вт, мае на выхадзе дзеючае значэнне напружання $U_2 = 6{,}0$ В, а дзеючае значэнне сілы току ў першаснай абмотцы — $I_1 = 20$ А. Які гэта трансфарматар — паніжаючы або павышаючы? У колькі разоў k змяняецца напружанне? Страты ў трансфарматары не прымаць у разлік.

5. Па двух правадах, супраціўленне кожнага з іх $R = 0{,}055$ Ом, перадаецца электрычная магутнасць $P = 80$ кВт. Якіх страт магутнасці ў лініі атрымаецца пазбегнуць, калі спачатку павысіць дзеючае значэнне напружання ад $U = 120$ В да $U_1 = 1200$ В, а ў канцы лініі панізіць да $U = 120$ В з дапамогай трансфарматараў, ККДз кожнага з якіх $\eta = 99$ %?

6. У радыёпрыёмніку ёсць трансфарматар, які мае дзве другасныя абмоткі, дзеючае значэнне напружання на першай $U_{21} = 4$ В, а на другой — $U_{22} = 40$ В. Дзеючае значэнне напружання на першаснай абмотцы трансфарматара, якая мае $N_1 = 180$ віткоў, $U_1 = 120$ В. Знайдзіце лік віткоў N_{21} і N_{22} у другасных абмотках трансфарматара.

§ 10. Вытворчасць, перадача і спажыванне электрычнай энергіі. Экалагічныя праблемы вытворчасці і перадачы электрычнай энергіі

Электрычная энергія вырабляецца на электрастанцыях. У залежнасці ад віду носьбіта энергіі, які выкарыстоўваецца, усе сучасныя электрастанцыі падзяляюцца на цеплавыя, гідраэлектрастанцыі і атамныя. Прывядзём характарыстыкі асноўных тыпаў электрастанцый.

Цеплавыя электрастанцыі (ЦЭС) выкарыстоўваюць цеплату, якая атрымліваецца пры спальванні вугалю, нафты, мазуту, газу і іншых гаручых выкапняў (ККДз $\eta = 40$ %).

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

Правообладатель Народная асвета

Рыс. 39. Высакавольтная лінія электрапередачы

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

Пры перадачы электраэнергіі ад электрастанцый да вялікіх прамысловых цэнтраў і гарадоў найбольш часта выкарыстоўваюць правадныя лініі электрапередачы, якія з'яўляюцца надзейным і параўнальна недарагім спосабам перадачы энергіі. Частка перадаваемай энергіі непазбежна губляецца ў адпаведнасці з законам Джоўля — Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t, \qquad (1)$$

дзе I — дзеючае значэнне сілы току ў лініі электрапередачы, R — супраціўленне правадоў, Δt — прамежак часу перадачы энергіі.

Як вынікае з закону Джоўля — Ленца, для памяншэння цеплавых страт у лініі электрапередачы неабходна паменшыць яе супраціўленне і дзеючае значэнне сілы току. Аднак памяншэнне супраціўлення $\left(R = \rho \frac{l}{S}\right)$ правадоў магчыма толькі за кошт павелічэння іх папярочнага сячэння, што прыводзіць да значнага павелічэння іх масы.

З прычыны гэтага найбольш эфектыўна перадаваць электраэнергію пры малым дзеючым значэнні сілы току. Памяншэнне сілы току ў n разоў паніжае цеплавыя страты ў правадах у n^2 разоў. Для захавання велічыні перадаваемай па лініі электрапередачы магутнасці трэба павышаць дзеючае значэнне напружання ў столькі ж разоў, у колькі разоў паменшылі дзеючае значэнне сілы току, зыходзячы з формулы $I_1 U_2 \approx I_2 U_2$. Таму на практыцы прымяняюць высакавольтныя (сотні тысяч вольт) лініі электрапередачы (рыс. 39).

Паколькі генератары пераменнага току на электрастанцыях даюць напружанні не большыя за 16—20 кВ, то для павышэння напружання ў лініях электрапередачы да неабходнага значэння прымяняюць павышаючыя трансфарматары.

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

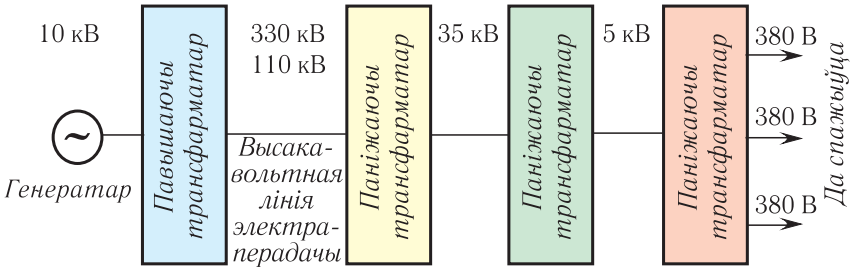
Разгледзім блок-схему перадачы і размеркавання электраэнергіі (рыс. 40):

генератар пераменнага току (10—20 кВ) ⇒

павышаючы трансфарматар (да 110 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ) ⇒

высакавольтныя лініі электрапередачы ⇒

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 40. Блок-схема перадачы электраэнергіі

паніжаючыя трансфарматары (да 220 В, 127 В, 380 В, 660 В) ⇒ спажывец.

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

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

Па-першае, пастаянны ток у адрозненне ад пераменнага не стварае пераменныя магнітныя палі, якія індуцыруюць токі ў бліжэйшых праваднікаx, што прыводзіць да страт магутнасці.

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

Развіццё цывілізацыі суправаджаецца бесперапынным ростам энергаспажывання на нашай планеце. Аднак запасы прыроднага паліва (нафта, газ, вугаль, торф) і іншых карысных выкапняў на Зямлі абмежаваны, паколькі з-за змянення геалагічных умоў іх фарміраванне ў цяперашні час практычна спынілася.

Яўным лідэрам сярод энерганосьбітаў на сягонняшні дзень з'яўляецца нафта, паколькі яе параўнальна лёгка здабываць, транспартаваць, ачышчаць і выкарыстоўваць. Акрамя таго, нафта таксама з'яўляецца крыніцай розных сінтэтычных матэрыялаў — фарбаў, лякарстваў, сінтэтычных валокнаў, пластмас і інш.

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

Правообладатель Народная асвета

Рыс. 41. Ветраныя генератары

У Рэспубліцы Беларусь запасы нафты і вугалю не з'яўляюцца стратэгічнымі. На нашай тэрыторыі да асноўных відаў здабываемых паліўных рэсурсаў трэба аднесці дровы і торф.

Работа 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 рассейвання цеплавой энергіі;

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

АЭС — небяспека радыеактыўнага забруджвання асяроддзя пры аварыях, праблемы захавання 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 да плёнкі, перашкаджаючы яе ахаладжэнню. Гэта прыводзіць да *парніковага эфекту*, пры якім сярэдняя тэмпература на Зямлі павольна павышаецца. Адпаведна, за апошнія дзесяцігоддзі на планеце назіраецца *глабальнае пацяпленне*, якое, згодна з прагнозамі вучоных, можа прывесці да неабарачальных змяненняў у клімаце Зямлі.

Рост энергаспажывання прымушае 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.

Ветраэнергетыка — выкарыстанне кінетычнай энергіі *ветру* для атрымання электраэнергіі. Энергія ветру ўжо дастаткова паспяхова пераўтвараецца ў электраэнергію ў шматлікіх невялікіх ветраных генератарах у зонах устойлівых вятроў (рыс. 41).

Праекты будучыні прапаноўваюць выкарыстоўваць у якасці аднаўляльных крыніц энергіі каласальную энергію акіянічных і паветраных плыняў, трапічных ураганаў і тарнада. Ключавая прычына іх фарміравання — нераўнамернае награванне Сонцам розных участкаў паверхні Зямлі.

Правообладатель Народная асвета

Геатэрмальная энергетыка — выкарыстанне натуральнага цяпла *Зямлі* для выпрацоўкі электрычнай энергіі. Геатэрмальная энергія ў месцах натуральных разломаў зямной кары выкарыстоўваецца для патрэб чалавека. Напрыклад, сталіца Ісландыі — Рэйк'явік поўнасцю ацяпляецца за коші геатэрмальных крыніц. Запасы геатэрмальнай энергіі дастаткова вялікія, аб чым можна меркаваць па велізарнай разбуральнай сіле землетрасенняў і вывяржэнняў вулканаў і гейзераў.

Рыс. 42. Сонечныя батарэі ў космасе

Прыліўная энергетыка выкарыстоўвае энергію марскіх *прыліваў*. У цяперашні час робяцца першыя крокі для выкарыстання энергіі акіянічных прыліваў і адліваў. Інжынерная ідэя падобных праектаў простая: выкарыстоўваць перапад узроўняў вады ў час прыліву і адліву для вярчэння вадой гідратурбін, каб на злучаных з імі гідрагенератарах атрымліваць электрычнасць.

Геліаэнергетыка — атрыманне электрычнай энергіі з энергіі *сонечнага выпраменьвання*. Развіццё сучасных тэхналогій дазваляе эфектыўна выкарыстоўваць энергію, якая выпрацоўваецца сонечнымі батарэямі. Так, у паўднёвых шыротах энергіі падобных батарэй, устаноўленых на даху, хапае для энергазабеспячэння невялікага дома. Сучасныя тэхналогіі дазваляюць, выкарыстаўшы сонечныя батарэі, атрымліваць электрычную энергію ад сонечнага выпраменьвання не толькі на Зямлі, але і ў космасе (рыс. 42). Ёсць смелыя праекты, у якіх прапаноўваецца размясціць сонечныя батарэі ў блізкім космасе на адлегласці 36 000 км ад паверхні Зямлі. Гэта так званая «сінхронная» арбіта, на якой батарэі будуць здавацца «нерухомымі» для зямнога назіральніка, паколькі перыяд іх абарачэння 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, пераўтвораная ў электрамагнітны пучок звышвысокай частаты, будзе перадавацца на Зямлю на вялікія антэны.

Вадародная энергетыка. Самай распаўсюджанай перспектыўнай крыніцай энергіі ў маштабах Сусвету трэба лічыць вадарод, паколькі яго ізатопы дазваляюць правесці рэакцыю тэрмаядзернага сінтэзу (гл. § 41) . Энергіі тэрмаядзернага сінтэзу трэба аддаць перавагу над энергіяй ядзернага расшчаплення (гл. § 39),

Правообладатель Народная асвета

паколькі з аднолькавай масы рэчыва пры сінтэзе можа быць атрымана ў 10 разоў больш энергіі, чым пры расшчапленні. Акрамя таго, вадарод (паліва сінтэзу) значна больш лягчэй здабываць у Сусветным акіяне, чаго нельга сказаць аб уране і торыі, што служаць палівам пры рэакцыях ядзернага расшчаплення. Немалаважным з'яўляецца і той факт, што пры рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу не ўзнікаюць радыеактыўныя адходы, паколькі яе асноўны прадукт — гелій, які з'яўляецца інертным газам. А радыеактыўныя ізатопы гелію $^{5}_{2}\mathrm{He}$, $^{6}_{2}\mathrm{He}$ маюць перыяды паўраспаду адпаведна $2 \cdot 10^{-21}$ с і 0,81 с.

Аднаўляемыя крыніцы энергіі параўнальна бяспечныя, паколькі іх выкарыстанне не прыводзіць да забруджвання навакольнага асяроддзя.

1. Якая частата прамысловага пераменнага току?
2. Якія тыпы электрастанцый вы ведаеце?
3. Як здзяйсняецца перадача электраэнергіі на вялікія адлегласці?
4. Назавіце альтэрнатыўныя спосабы атрымання электраэнергіі, якія не забруджваюць навакольнае асяроддзе.
5. Пералічыце найбольш распаўсюджаныя віды прыроднага паліва.
6. Якія віды прыроднага паліва здабываюцца ў Рэспубліцы Беларусь?
7. У чым заключаецца сутнасць парніковага эфекту?
8. Чым небяспечна глабальнае пацяпленне?
9. Якія крыніцы энергіі называюцца аднаўляемымі?
10. Пералічыце асноўныя праекты выкарыстання аднаўляемых крыніц энергіі. Якія з іх з'яўляюцца найбольш перспектыўнымі для Рэспублікі Беларусь?
11. Пералічыце перавагі рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу перад рэакцыяй расшчаплення (дзялення) цяжкіх ядраў, якая выкарыстоўваецца на АЭС у цяперашні час.

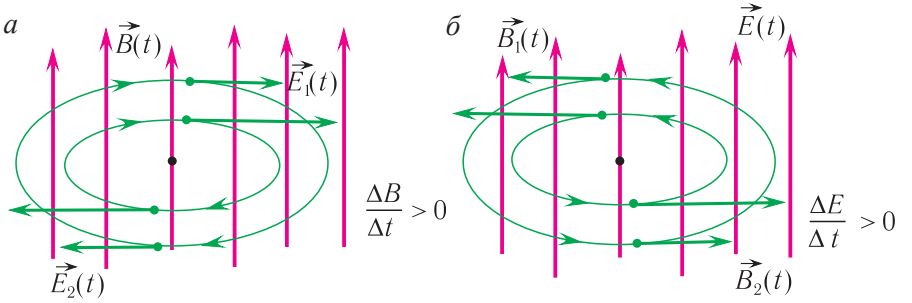
§ 11. Электрамагнітныя хвалі і іх уласцівасці. Шкала электрамагнітных хваль

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 электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца (электрычным токам), або пераменнымі электрычнымі палямі.

Змяненне індукцыі магнітнага поля з цягам часу выклікае з'яўленне ў навакольнай прасторы віхравога электрычнага поля. Сілавыя лініі гэтага поля замкнуты і ахопліваюць лініі індукцыі магнітнага поля, і напружанасць $\vec{E}(t)$ электрычна-

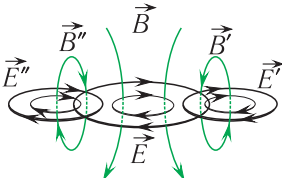
Правообладатель Народная асвета



Рыс. 43. Пераменныя электрычныя і магнітныя палі, якія параджаюць адно аднаго

га поля ў любым пункце прасторы перпендыкулярна да індукцыі $\vec{B}(t)$ магнітнага поля (рыс. 43, *а*). Максвел выказаў здагадку, што любое змяненне напружанасці віхравога электрычнага поля суправаджаецца ўзнікненнем пераменнага магнітнага поля (рыс. 43, *б*). Далей гэты працэс можа паўтарацца «да бясконцасці», паколькі палі змогуць папераменна ўзнаўляць адно аднаго нават у вакууме.

Такім чынам, у вакууме ўзнікае сістэма электрычных і магнітных палёў, якія змяняюцца і ўзаемна параджаюць адно аднаго і захопліваюць усё большыя і большыя вобласці прасторы (рыс. 44).



Рыс. 44. Утварэнне электрамагнітнай хвалі

Сукупнасць звязаных аднаго з адным электрычнага і магнітнага палёў, якія перыядычна змяняюцца, называюць пераменным **электрамагнітным полем**. Згодна з тэорыяй Максвела электрамагнітнае поле распаўсюджваецца ў прасторы з канчатковай скорасцю.

Разгледзім больш падрабязна працэс утварэння электрамагнітнага поля ў прасторы вакол праваднікa.

Няхай у праваднікy ўзбуджаны электрамагнітныя ваганні, у выніку чаго сіла электрычнага току ў ім неперарыўна змяняецца. Паколькі сіла току звязана са скорасцю руху свабодных зарадаў у праваднікy, то скорасць руху зарадаў таксама будзе неперарыўна змяняцца з цягам часу. Гэта сведчыць аб тым, што свабодныя зарады ўнутры праваднікa будуць рухацца з паскарэннем.

Згодна з тэорыяй Максвела пры паскораным руху свабодных зарадаў у праваднікy ў прасторы вакол яго ствараецца пераменнае магнітнае поле, якое параджае пераменнае віхравое электрычнае поле. Віхравое электрычнае поле, у сваю чаргу, зноў выклікае з'яўленне пераменнага магнітнага поля ўжо на большай адлегласці ад зарада і г. д. Такім чынам, у прасторы вакол праваднікa ўтва-

Правообладатель Народная асвета

Рыс. 45. Электрамагнітная хваля

раюцца узаемазвязаныя электрычныя і магнітныя палі, якія распаўсюджваюцца з цягам часу ў выглядзе хвалі.

Электрамагнітнае поле, якое распаўсюджваецца ў вакууме або ў якім-небудзь асяроддзі з канчатковай скорасцю, называецца **электрамагнітнай хваляй** (рыс. 45).

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. рыс. 45).

Падобна да пругкіх механічных хваль электрамагнітныя хвалі зведваюць адбіццё ад перашкод, але ў адрозненне ад пругкіх хваль яны могуць распаўсюджвацца і ў вакууме.

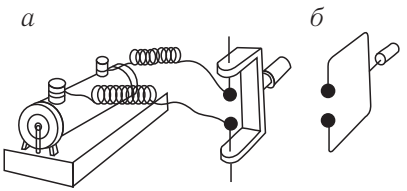
Частата электрамагнітных хваль супадае з частатой ваганняў часціц, якія выпраменьваюць. Максімальнае значэнне паскарэння пры гарманічных ваганнях прапарцыянальна квадрату частаты ваганняў: $a \sim \nu^2$. Паколькі выпраменьваюць толькі зарады, якія рухаюцца паскорана, то модуль напружанасці электрычнага поля таксама, як і модуль індукцыі магнітнага поля, прапарцыянальны модулю паскарэння: $E \sim a$, $B \sim a$, значыць, $E \sim \nu^2$. Тады інтэнсіўнасць выпраменьвання электрамагнітнай хвалі прапарцыянальна чацвёртай ступені частаты $I \sim \langle E^2 \rangle \sim \nu^4$. Значыць, для атрымання інтэнсіўных электрамагнітных хваль у іх крыніцы неабходна ствараць ваганні дастаткова высокай частаты.

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:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Правообладатель Народная асвета

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



Рыс. 46. Схематычны відарыс эксперыментальнай устаноўкі Герца: *а* — вібратар Герца; *б* — прыёмны контур

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

Электрамагнітные хвалі былі эксперыментальна адкрыты нямецкім фізікам Генрыхам Герцам у 1887 г. Для іх генерацыі ён выкарыстаў спецыяльнае ўстройства (рыс. 46, *а*), у далейшым названае *вібратарам Герца*.

Герц даследаваў электрамагнітнае поле, якое выпраменьваецца вібратарам. У паветраным зазоры паміж шарамі пры пераменным напружанні, якое дасягае значэння прабою паветра, адбываўся іскравы разрад. Пры гэтым у вібратары ўзнікалі электрамагнітныя ваганні высокай частаты. Індыкатарам электрамагнітных хваль, якія ўзнікалі ў доследах Герца, служыла іскра, што ўтваралася ў прыёмным контуры (рыс. 46, *б*). Памеры прыёмнага контуру выбіраліся такім чынам, каб уласная частата ваганняў, што ў ім узнікаюць, была роўна частаце хваль, якія выпраменьваліся.

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

Даўжыня хвалі, якая ўзнікла ў вібратары Герца, была $\lambda = (0{,}6 — 10)$ м.

Да 1889 г. Герц сумеў не толькі пераканаўча даказаць існаванне электрамагнітных хваль, але і вызначыць іх асноўныя ўласцівасці:

распаўсюджваюцца не толькі ў розных асяроддзях, але і ў вакууме;

у вакууме распаўсюджваюцца са скорасцю, модуль якой $c \approx 3 \cdot 10^8 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

адбіваюцца і праламляюцца на межах падзелу асяроддзяў;

з'яўляюцца папярочнымі.

Герц лічыў, што электрамагнітныя хвалі немагчыма выкарыстоўваць для здзяйснення сувязі без правадоў. Аднак рускі вучоны Аляксандр Сцяпанавіч Папоў 7 мая 1895 г. на пасяджэнні Рускага фізіка-хімічнага грамадства ў г. Пецярбургу

Правообладатель Народная асвета

паведаміў аб магчымасці прыёму электрамагнітных сігналаў. 18 снежня 1897 г. ён перадаў на адлегласць 250 м першую ў свеце радыёграму з двух слоў «Генрых Герц».

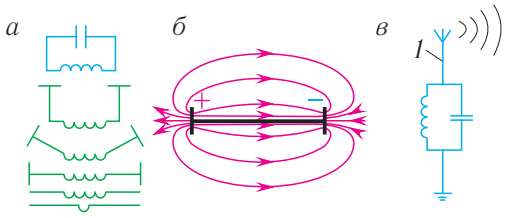
У 1901 г. італьянскі інжынер Г. Марконі ўпершыню здзейсніў радыёсувязь цераз Атлантычны акіян.

Даследаванні па перадачы інфармацыі электрамагнітнымі хвалямі, праведзеныя А. С. Паповым, паказалі, што для радыёсувязі можна выкарыстаць вагальны контур.

Закрыты контур выпраменьвае слаба, паколькі электрычнае поле сканцэнтравана ў асноўным паміж абкладкамі кандэнсатара, а магнітнае — у шпулі, г. зн. палі раздзелены прасторай. Такая сістэма з засяроджанымі параметрамі практычна не выпраменьвае электрамагнітныя хвалі.

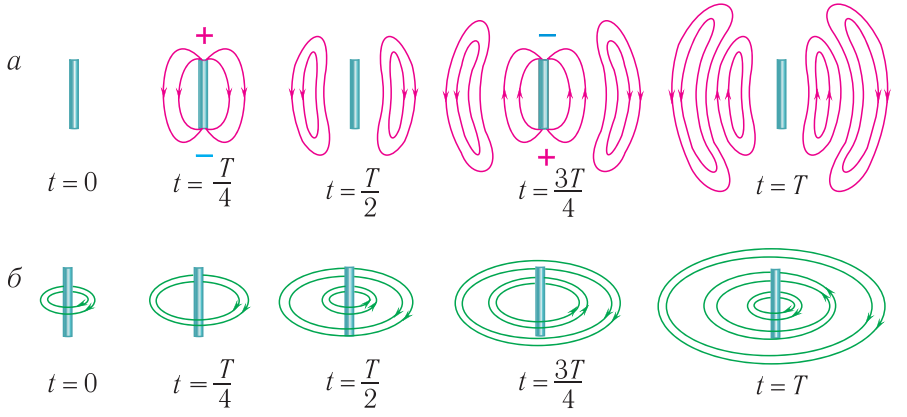
Прасочым за змяненнямі ў сістэме пры павелічэнні адлегласці d паміж абкладкамі кандэнсатара, пры памяншэнні плошчы S абкладак кандэнсатара і пры памяншэнні ліку N віткоў шпулі. Паколькі пры гэтым электраёмістасць кандэнсатара і індуктыўнасць шпулі памяншаюцца, то ўласная частата ваганняў контуру $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ павялічваецца. Адпаведна павялічыцца і інтэнсіўнасць выпраменьвання, якая пры іншых роўных умовах $I \sim \omega^4$.

Такім чынам, для эфектыўнага выпраменьвання контур неабходна «адкрыць», рассунуўшы абкладкі кандэнсатара, г. зн. стварыць умовы «выхаду» поля ў прастору (рыс. 47, *а*). Калі замяніць шпулю прамым провадам, то частата ω павялічыцца яшчэ больш. У выніку прыходзім да *адкрытага вагальнага контуру* — гэта прамы провад (рыс. 47, *б*). Аднак у такім выглядзе яго немагчыма выкарыстоўваць на практыцы, паколькі магутнасць выпраменьвання і ў гэтым выпадку нязначная. Інтэнсіўнае выпраменьванне пачынаецца пры дасягненні частот каля соцень тысяч герц. Таму ў сапраўднасці контур складаецца са шпулі і доўгага провада — антэны (рыс. 47, *в*). Адзін канец провада злучаны з зямлёй (заземлены), другі — падняты над паверхняй Зямлі. Даўжыня антэны вырабляецца кратнай палове даўжыні хвалі, паколькі ў гэтым выпадку яна наладжана ў рэзананс з генератарам ваганняў, што забяспечвае аптымальныя ўмовы для выпраменьвання і прыёму электрамагнітных хваль. Вымушаныя ваганні



Рыс. 47. Схема атрымання адкрытага вагальнага контуру (*а*); адкрыты вагальны контур (*б*); вагальны контур з антэнай *1* (*в*)

Правообладатель Народная асвета

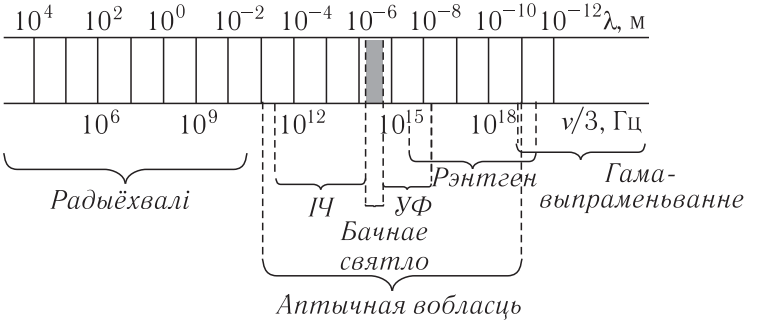


Рыс. 48. Выпраменьванне электрамагнітных хваль найпрасцейшай антэнай (дыполем): *а* — размяшчэнне сілавых ліній электрычнага поля; *б* — размяшчэнне ліній індукцыі магнітнага поля

высокай частаты ў антэне ствараюць у навакольнай прасторы электрамагнітнае поле, і электрамагнітныя хвалі распаўсюджваюцца ад антэны (рыс. 48).

Спектр электрамагнітнага выпраменьвання зручна паказваць у выглядзе шкалы электрамагнітных хваль, прапанаванай на рысунку 49.

Уласцівасці электрамагнітных хваль вельмі моцна залежаць ад іх частаты. Выпраменьванне электронаў, абумоўленае іх рухам у праваднікам, дазваляе генерыраваць электрамагнітныя хвалі з частатой да 10^{12} Гц. Для генерацыі выпраменьванняў з частатой вышэй за 10^6 Гц выкарыстоўваюць выпраменьванне атамаў. Верхняя мяжа частот, якія могуць генерыраваць атамныя сістэмы, складае 10^{20} Гц. Выпраменьванні больш высокіх частот (гама-выпраменьванне) вылучаюцца атамнымі ядрамі.



Рыс. 49. Шкала электрамагнітных хваль

Правообладатель Народная асвета

Класіфікацыя электрамагнітных хваль у залежнасці ад частот (даўжынь хваль) прыведзена ў табліцы 5.

Табліца 5. **Класіфікацыя электрамагнітных хваль**

Віды выпраменьвання	Інтэрвал частот, Гц	Інтэрвал даўжынь хваль (вакуум), м	Крыніцы выпраменьвання
Нізкачастотныя хвалі	$< 3 \cdot 10^3$	$> 1 \cdot 10^5$	Высакавольтныя ЛЭП, генератары пераменнага току, электрычныя машыны
Радыёхвалі	$3 \cdot 10^3 — 3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^5 — 1 \cdot 10^{-1}$	Вагальныя контуры, вібратары Герца
Мікрахвалі	$3 \cdot 10^9 — 1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-1} — 1 \cdot 10^{-4}$	Лазеры, паўправадніковыя прыборы
Інфрачырвонае выпраменьванне	$1 \cdot 10^{12} — 4 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{-4} — 7 \cdot 10^{-7}$	Сонца, электралямпы, лазеры, касмічнае выпраменьванне
Бачнае выпраменьванне	$4 \cdot 10^{14} — 8 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{-7} — 4 \cdot 10^{-7}$	Сонца, электралямпы, люмінесцэнтныя лямпы, лазеры
Ультрафіялетавае выпраменьванне	$8 \cdot 10^{14} — 1 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7} — 3 \cdot 10^{-8}$	Сонца, касмічнае выпраменьванне, лазеры, электрычныя лямпы
Рэнтгенаўскае выпраменьванне	$1 \cdot 10^{16} — 3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-8} — 1 \cdot 10^{-10}$	Бэтатроны, сонечная карона, нябесныя целы, рэнтгенаўскія трубкі
Гама-выпраменьванне	$3 \cdot 10^{20} — 3 \cdot 10^{29}$	$1 \cdot 10^{-10} — 1 \cdot 10^{-21}$	Касмічнае выпраменьванне, радыеактыўныя распады, бэтатроны

У цяперашні час электрамагнітныя хвалі знаходзяць шырокае прымяненне ў навуцы і тэхніцы ў 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, рэзанне, плаўленне металаў лазерамі, прыборы начнога бачання (*інфрачырвонае выпраменьванне*);

асвятленне, галаграфія, лазеры (*бачнае выпраменьванне*);

люмінесцэнцыя ў газаразрадных лямпах, лазеры (*ультрафіялетавае выпраменьванне*);

рэнтгенатэрапія, рэнтгенаструктурны аналіз, лазеры (*рэнтгенаўскае выпраменьванне*);

Правообладатель Народная асвета

дэфектаскапія, дыягностыка і тэрапія ў медыцыне, даследаванне ўнутранай структуры атамаў, ваенная справа (*гама-выпраменьванне*).

1. Што з'яўляецца крыніцай віхравога электрычнага поля?
2. Чым адрозніваецца віхравое электрычнае поле ад: а) магнітнага; б) электрастатычнага?
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. Чаму для выпраменьвання электрамагнітных хваль неабходна выкарыстоўваць адкрыты вагальны контур?
7. Прывядзіце прыклады прымянення электрамагнітных хваль розных частот.

Прыклад рашэння задачы

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

Дадзена:
$\lambda_1 = 25$ м
$\lambda_2 = 31$ м

n — ?

Рашэнне

Даўжыня хвалі вызначаецца па формуле:

$$\lambda = cT,$$

дзе $c = 3{,}0 \cdot 10^8 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Па формуле Томсана

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

Тады для дзвюх даўжынь хваль можам запісаць:

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

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

Падзяліўшы другое ўраўненне на першае, атрымаем:

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

Адсюль

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

Адказ: $\frac{C_2}{C_1} = 1{,}5.$

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 10

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

2. Вызначыце колькасць N даўжынь хваль монахраматычнага выпраменьвання частатой $\nu = 150$ ГГц, якія ўкладваюцца на адрэзку даўжынёй $l = 15$ м.

3. Вызначыце даўжыню хвалі λ, на якую наладжаны радыёпрыёмнік, калі напружанне ў прыёмным контуры змяняецца па законе $U(t) = 200 \cos(2 \cdot 10^4 \pi t)$ (В).

4. Вызначыце даўжыню хвалі λ, на якую наладжаны радыёпрыёмнік, калі яго вагальны контур змяшчае кандэнсатар ёмістасцю $C = 4{,}0$ нФ і шпулю індуктыўнасцю $L = 4{,}0$ мГн.

5. Вызначыце адлегласць d_2 паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара, каб вагальны контур прыёмніка быў наладжаны на даўжыню хвалі $\lambda_2 = 120$ м, калі пры адлегласці паміж імі $d_1 = 3{,}6$ мм прыёмнік наладжаны на даўжыню хвалі $\lambda_1 = 150$ м.

6. Разлічыце адлегласць l да аб'екта, калі адбіты ад яго радыёсігнал вярнуўся праз прамежак часу $\Delta t = 3{,}0$ мкс.

7. Радыёлакацыйная станцыя выпраменьвае імпульс электрамагнітных хваль, які змяшчае $N = 937{,}5$ хвалі. Вызначыце працягласць τ імпульсу, калі даўжыня выпрамененай хвалі $\lambda = 1{,}6$ см.

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**:

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

Дзеючым (эфектыўным) значэннем сілы пераменнага току называецца сіла такога пастаяннага току, які, праходзячы па рэзістары супраціўленнем R у электрычным ланцугу, вылучае ў адзінку часу такую ж колькасць цеплаты, што і дадзены пераменны ток:

$$I_{дз} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Дзеючае значэнне напружання:

$$U_{дз} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Правообладатель Народная асвета

Супраціўленне R рэзістара, на якім у ланцугу пераменнага току адбываецца ператварэнне электрычнай энергіі ва ўнутраную энергію, называецца **актыўным** або **амічным** супраціўленнем.

Трансфарматар — электрамагнітны апарат, які пераўтварае пераменны ток аднаго напружання ў пераменны ток той жа частаты, але другога напружання. Прынцып дзеяння трансфарматара заснаваны на з'яве электрамагнітнай індукцыі.

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

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

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.

Модуль скорасці распаўсюджвання электрамагнітных хваль у вакууме роўны модулю скорасці распаўсюджвання святла:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 3
Оптыка

«Солнце, небо, звезд сиянье, море в блеске голубом,
Всю природу и созданья мы лишь в свете познаем.»

Лібрэта оперы «Іаланта» П. І. Чайкоўскага

§ 12. Электрамагнітная прырода святла. Скорасць святла

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

Оптыка — раздзел фізікі, у якім вывучаецца фізічная прырода і ўласцівасці святла, а таксама яго ўзаемадзеянне з рэчывам. Адпаведна светлавыя з'явы часта называюць аптычнымі з'явамі. Слова «оптыка» паходзіць ад грэчаскага слова οπτικος («оптыкас») — «бачны», «зрокавы», паколькі асноўную частку інфармацыі аб прыродзе і з'явах, якія адбываюцца ў ёй, чалавек атрымлівае праз зрокавыя адчуванні, што ўзнікаюць пад дзеяннем святла.

Па колькасці і якасці інфармацыі, якую атрымлівае чалавек аб навакольным свеце, зрок значна перавышае слых. Гэты факт абумоўлены істотным адрозненнем даўжынь хваль бачнага святла ($\lambda < 10^{-6}$ м) і чутнага гуку ($\lambda > 10^{-2}$ м). Вядома, што мінімальныя памеры відарыса, які ствараецца з дапамогай хвалевага працэсу, параўнальны з адпаведнай даўжынёй хвалі.

Пад **святлом** у оптыцы разумеюць электрамагнітныя хвалі, частоты якіх знаходзяцца ў дыяпазоне ад $1{,}5 \cdot 10^{11}$ Гц да $3{,}0 \cdot 10^{16}$ Гц. Гэты дыяпазон падзяляецца на інфрачырвоны ($1{,}5 \cdot 10^{11}$ — $4{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц), бачны ($4{,}0 \cdot 10^{14}$ — $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц) і ўльтрафіялетавы ($7{,}5 \cdot 10^{14}$ — $3{,}0 \cdot 10^{16}$ Гц).

Сучасная оптыка грунтуецца на электрамагнітнай тэорыі святла. Як вам ужо вядома, у другой палове XIX ст. Джэймс 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.

У 1672 г. англійскі вучоны Роберт Гук у дакладзе англійскаму Каралеўскаму грамадству выказаў гіпотэзу аб тым, што святло ўяўляе сабой папярочныя хвалі, якія хутка распаўсюджваюцца.

Тэорыю падоўжных светлавых хваль распрацаваў галандскі фізік Хрысціян Гюйгенс у 1690 г. у «Трактаце аб святле». Ён, зыходзячы з аналогіі паміж

Правообладатель Народная асвета

акустычнымі і аптычнымі з'явамі, дапускаў, што святло як пругкія хвалі распаўсюджваецца ў асаблівым асяроддзі — эфіры, якое запаўняе ўсю прастору як унутры матэрыяльных цел, так і паміж імі. У трактаце з пазіцый хвалевай прыроды святла тлумачылася адбіццё і праламленне святла.

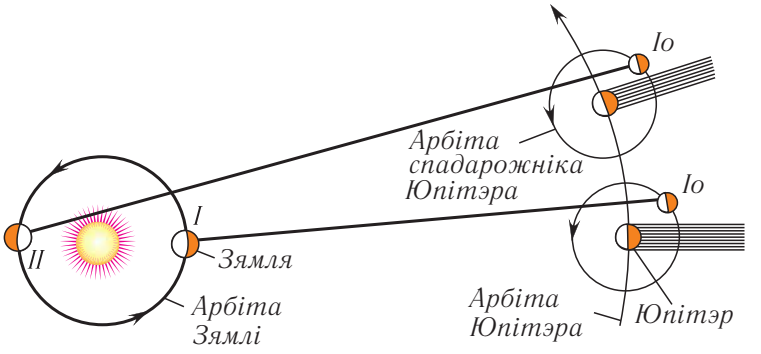
Першыя спробы вымярэння скорасці святла на адлегласці некалькіх кіламетраў, якія былі прадпрыняты Галілеа Галілеем і іншымі вучонымі, не ўвянчаліся поспехам з прычыны недастатковай дакладнасці вымярэння часу (хронаметрыравання). З гэтых эксперыментаў Галілей зрабіў вывад, што вымераць модуль скорасці святла на малых адлегласцях практычна немагчыма, паколькі святло пераадольвае іх «імгненна» з прычыны вялікага значэння скорасці распаўсюджвання.

Рэнэ Дэкарт упершыню прапанаваў выкарыстоўваць для вымярэння модуля скорасці святла велізарныя (астранамічныя) адлегласці, на пераадоленне якіх святлу спатрэбіцца значны час. Вымераць час можна было з дастатковай дакладнасцю.

Гістарычна першае эксперыментальнае вызначэнне модуля скорасці святла ў вакууме ў 1672 г. зрабіў дацкі астраном Олаф Ромер, які праводзіў сістэматычныя назіранні зацьменняў спадарожніка Юпітэра — Іо ў тэлескоп. Прыкладна праз паўгода пасля пачатку назіранняў ён заўважыў, што момант зацьмення спадарожніка Іо спазняецца амаль на 16 мін у параўнанні з вылічаным значэннем.

Апісанне эксперыментаў Ромера па вымярэнні скорасці святла Гюйгенс прывёў у сваім «Трактаце аб святле».

Ромер растлумачыў гэта спазненне канчатковасцю скорасці распаўсюджвання святла. Паколькі за паўгода Зямля перамясцілася са становішча I (рыс. 50) у



Рыс. 50. Схема назіранняў Ромера

Правообладатель Народная асвета

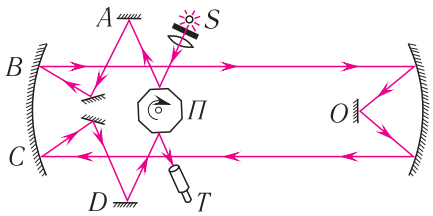
становішча II, то трэба ўлічваць час, неабходны для таго, каб святло прайшло дабавачную адлегласць, прыкладна роўную дыяметру зямной арбіты.

На падставе даных, што меліся на той час, аб дыяметрах арбіт Зямлі і Юпітэра ён атрымаў для модуля скорасці святла значэнне:

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

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

Значэнне модуля скорасці святла, атрыманае Ромерам, удакладніў французскі фізік Арман Фізо ў 1849 г., вымераўшы яго лабараторным спосабам. Атрыманае ім значэнне модуля скорасці святла — $3{,}13 \cdot 10^5 \ \frac{\text{км}}{\text{с}}$.



Рыс. 51. Схема доследу Майкельсана: *П* — стальная прызма, якая верціцца; *T* — назіральная труба; *S* — крыніца святла

Амерыканскі фізік Альберт Майкельсан у 1926 г. для больш дакладнага вымярэння скорасці святла выкарыстаў прыстасаванне, размешчанае паміж дзвюма горнымі вяршынямі, адлегласць паміж якімі $L = 35\,373{,}21$ м. Схема прыстасавання паказана на рысунку 51. Люстрам з'яўлялася васьмігранная стальная прызма, якая вярцелася з частатой $\nu = 528\ \text{с}^{-1}$. Метад вымярэння грунтаваўся на тым, што прамень святла ад крыніцы S можа трапіць у назіральную трубу T толькі ў тым выпадку, калі за час яго распаўсюджвання па шляху $ABOCD$ стальная прызма паспее павярнуцца на $\frac{1}{8}$ абароту (гл. рыс. 51). Значыць, вымераны час $\tau = 0{,}00023$ с складаў $\tau = \frac{T}{8}$, дзе T — перыяд вярчэння прызмы.

Майкельсан атрымаў значэнне модуля скорасці святла, блізкае да сучасных даных:

$$c = (299\,796 \pm 4) \ \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

У 1972 г. значэнне модуля скорасці было вызначана на падставе незалежных вымярэнняў даўжыні хвалі і частаты святла. Гэта дазволіла значна павысіць дакладнасць вымярэнняў. У якасці крыніцы быў абраны геліева-неонавы лазер. Такім чынам, было атрымана значэнне скорасці святла, якое пераўзыходзіць усе раней вядомыя значэнні больш чым на два парадкі.

Згодна з сучаснымі вымярэннямі модуль скорасці распаўсюджвання святла ў вакууме:

$$c = (299\,792\,458{,}0 \pm 1{,}2) \ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Правообладатель Народная асвета

У 1983 г. на пасяджэнні Генеральнай асамблеі мер і вагаў было прынята новае азначэнне эталона метра з улікам таго, што скорасць распаўсюджвання святла ў вакууме *дакладна* роўна $c = 299\,792\,458\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Заўважым, што пры рашэнні задач выкарыстоўваюць прыбліжанае значэнне модуля скорасці святла:

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

Адным з параметраў, якія характарызуюць светлавую хвалю ў вакууме, з'яўляецца даўжыня хвалі λ, звязаная з перыядам ваганняў T суадносінай

$$\lambda = cT$$

і з частатой ν суадносінай

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

Вымярэнні паказалі, што модуль скорасці святла v у розных рэчывах заўсёды меншы, чым модуль скорасці святла c у вакууме. У 1862 г. французскі фізік Жан Фуко вымераў модуль скорасці распаўсюджвання святла ў вадзе і атрымаў значэнне $2{,}23 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Праз некалькі гадоў Майкельсан вызначыў модуль скорасці распаўсюджвання святла ў серавугляродзе — $1{,}71 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Значыць, у вадзе модуль скорасці распаўсюджвання святла памяншаецца ў 1,33 раза ў параўнанні з вакуумам, а ў серавугляродзе — у 1,64 раза.

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

Абсалютны паказчык праламлення n рэчыва характарызуе яго ўласцівасці і паказвае, у колькі разоў модуль скорасці распаўсюджвання святла ў дадзеным рэчыве меншы за модуль скорасці распаўсюджвання свтяла ў вакууме:

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

Паколькі модуль скорасці распаўсюджвання святла ў любым рэчыве заўсёды меншы, чым у вакууме, то абсалютны паказчык праламлення рэчыва заўсёды большы за адзінку ($n > 1$). Абсалютны паказчык праламлення залежыць як ад уласцівасцей рэчыва, г. зн. яго хімічнага саставу, агрэгатнага стану, тэмпературы, ціску, так і ад частаты святла.

Правообладатель Народная асвета

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

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

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

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = ... = c, \tag{3}$$

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

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

$$n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 = ... = \lambda_0,$$

дзе λ_1, λ_2 — даўжыні светлавых хваль у асяроддзях, λ_0 — даўжыня хвалі ў вакууме.

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

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

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}. \tag{4}$$

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

Белае святло ўяўляе сабой сукупнасць электрамагнітных хваль розных частот бачнага дыяпазону. Хваля адной пэўнай і строга пастаяннай частаты называецца **монахраматычнай** (ад грэч. μονοσ (монас) — святло і χρομα (хрома) — колер, г. зн. аднакаляровы).

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

Кожнай частаце адпавядае сваё колеравае адчуванне. Так, напрыклад, святло частатой $\nu_1 = 4{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц выклікае адчуванне чырвонага колеру, а $\nu_2 = 7{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц — фіялетавага. Паколькі колер хваль, успрымаемых вокам, вы-

Правообладатель Народная асвета

значаецца толькі частатой светлавой хвалі, то пры пераходах з аднаго рэчыва ў другое *колеравае ўспрыняцце не змяняецца*.

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

Прыклад рашэння задачы

Монахраматычнае святло, даўжыня хвалі якога $\lambda = 0{,}550$ мкм, пераходзіць са шкла ў паветра. Вызначыце, на якое значэнне $\Delta\lambda$ павялічыцца даўжыня хвалі святла ў паветры, калі абсалютны паказчык праламлення шкла $n = 1{,}40$. Знайдзіце модуль распаўсюджвання скорасці v святла ў шкле, калі модуль скорасці распаўсюджвання святла ў паветры $c = 3{,}00 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Дадзена:

$\lambda = 0{,}550$ мкм $= 5{,}50 \cdot 10^{-7}$ м

$n = 1{,}40$

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

$\Delta\lambda$ — ? v — ?

Рашэнне

Улічыўшы, што частата святла не залежыць ад уласцівасцей асяроддзя, можам запісаць:

$$\lambda = \frac{v}{\nu};\quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu},$$

дзе λ_0 — даўжыня хвалі ў паветры. Паколькі даўжыня хвалі прама прапарцыянальна скорасці распаўсюджвання святла, то

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

Запішам λ_0 з апошняй роўнасці і знойдзем:

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

Паколькі $n = \frac{c}{v}$, то формулу для $\Delta\lambda$ можна перапісаць у выглядзе:

$$\Delta\lambda = (n-1)\lambda;\quad \Delta\lambda = (1{,}40 - 1) \cdot 5{,}50 \cdot 10^{-7}\ \text{м} = 2{,}20 \cdot 10^{-7}\ \text{м} = 0{,}220\ \text{мкм};$$

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

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

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 11

1. Які прамежак часу Δt неабходны святлу, каб дайсці ад Сонца да Зямлі, адлегласць паміж якімі $l = 1{,}48 \cdot 10^8$ км? Ці ўплывае гэты прамежак часу на моманты ўзыходу і заходу Сонца?

2. Пасля ўспышкі маланкі гром прагрымеў праз прамежак часу $\Delta t = 5{,}0$ с. Знайдзіце, на якой адлегласці l ад назіральніка адбыўся навальнічны разрад. Модуль скорасці распаўсюджвання гуку ў паветры $v_п = 3{,}4 \cdot 10^2 \ \frac{м}{с}$.

3. Вызначыце модуль скорасці v распаўсюджвання святла у кварцы, абсалютны паказчык праламлення якога $n = 1{,}54$.

4. Модуль скорасці распаўсюджвання святла ў вадзе $v_1 = 2{,}250 \cdot 10^5 \ \frac{км}{с}$, а ў шкле — $v_2 = 1{,}982 \cdot 10^5 \ \frac{км}{с}$. Вызначыце адносіну k паказчыкаў праламлення шкла і вады.

5. Вызначыце прамежак часу Δt, за які святло праходзіць адлегласць $l = 450$ км у вадзе, паказчык праламлення якой $n = 1{,}33$.

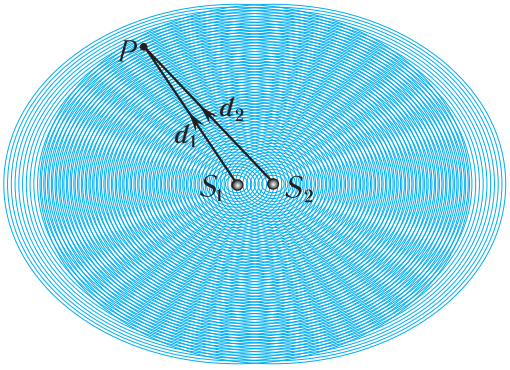
6. Пры пераходзе святла з вакууму ў некаторае рэчыва даўжыня хвалі паменшылася ў $k = 1{,}52$ раза. Чаму роўны паказчык праламлення n дадзенага рэчыва?

§ 13. Інтэрферэнцыя святла

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

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

Разгледзім працэс накладання хваль даўжынёй λ, якія ўзбуджаюцца аднолькавымі пунктавымі монахраматычнымі крыніцамі святла S_1 і S_2 (рыс. 52). У той вобласці асяроддзя, дзе сустракаюцца дзве хвалі ад розных крыніц, адбываецца іх накладанне.

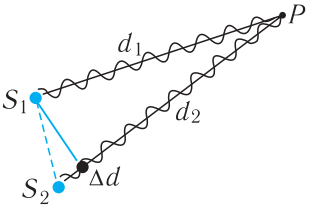


Рыс. 52. Працэс накладання аднолькавых хваль

Згодна з *прынцыпам суперпазіцыі* (ад лац. superposition — дабаўленне) ваганні, выкліканыя хвалямі, складваюцца

Правообладатель Народная асвета

такім чынам, што выніковае зрушэнне кожнай часціцы асяроддзя роўна суме паасобных зрушэнняў. Прычым кожная з хваль распаўсюджваецца незалежна адна ад адной. Больш таго, хвалі свабодна «праходзяць адна праз адну» і пры гэтым ніяк не ўзаемадзейнічаюць паміж сабой.



Рыс. 53. Схема працэсу накладання аднолькавых хваль

Калі ў пункт P ад монахраматычных крыніц частатой ω прыйшлі дзве хвалі, што прайшлі розныя адлегласці d_1 і d_2 (рыс. 53), то рознасць адлегласцей $\Delta d = d_2 - d_1$, якую называюць *рознасцю ходу,* абумоўлівае зрушэнне па фазе

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

Значыць, вынік складання хваль залежыць ад рознасці фаз $\Delta\varphi$ паміж імі, а яна вызначаецца рознасцю ходу Δd.

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

Дапусцім, што хвалі, якія прыходзяць, будуць мець у пункце P напружанасці электрычнага поля

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

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

Як вынікае з (2), хвалі, якія прыходзяць у некаторы пункт прасторы P, узбуджаюць у ім ваганні аднолькавай частаты, што вызначаецца частатой ω крыніц S_1 і S_2. Будзем лічыць, што напрамкі ваганняў у кожнай з хваль аднолькавыя.

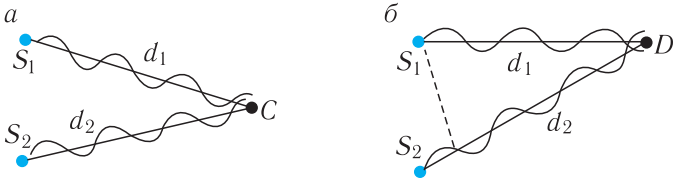
Заўважым, што рознасць фаз ваганняў, якія ўзбуджаюцца разглядаемымі крыніцамі ў пункце P, застаецца пастаяннай з цягам часу, нават калі пачатковыя фазы гэтых ваганняў розныя.

Амплітуда выніковага вагання згодна з прынцыпам суперпазіцыі ў любы момант часу роўна вектарнай суме амплітуд кожнай хвалі паасобку. Выніковае ваганне ўяўляе сабой іх суму:

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

Правообладатель Народная асвета

Калі рознасць ходу хваль ад крыніц S_1 і S_2 кратная даўжыні хвалі $\Delta d = m\lambda$ ($m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots$), то $\Delta\varphi = 2\pi m$, і ваганні, якія ўзбуджаюцца хвалямі ў пункце C (рыс. 54, *а*), адбываюцца ў аднолькавай фазе.



Рыс. 54. Складанне монахраматычных ваганняў дзвюх хваль: *а* — максімальная амплітуда ў пункце C; *б* — мінімальная амплітуда ў пункце D

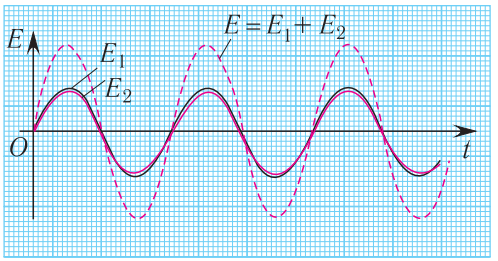
Пры гэтым грэбень адной хвалі накладваецца на грэбень другой. Адпаведна амплітуда выніковага вагання ў пункце C роўна суме амплітуд хваль, што накладваюцца, і аказваецца максімальнай (рыс. 55):

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

Калі ж рознасць ходу хваль у пункце D (рыс. 54, *б*) роўна няцотнаму ліку паўхваль

$$\Delta d = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots),$$

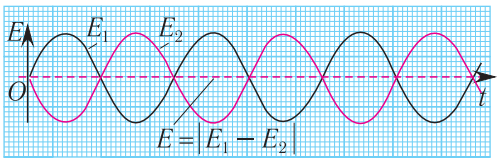
то $\Delta\varphi = \pi(2m + 1)$, і ваганні адбываюцца ў проціфазе.



Рыс. 55. Складанне амплітуд хваль

Пры гэтым грэбень адной хвалі накладваецца на ўпадзіну другой. У гэтым выпадку амплітуда выніковага вагання роўна модулю рознасці амплітуд хваль, якія накладваюцца, і аказваецца мінімальнай (рыс. 56):

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



Рыс. 56. Адніманне амплітуд хваль

Заўважым, што ва ўсіх іншых пунктах хваль, якія накладваюцца, амплітуда A выніковага вагання мае прамежкавае значэнне:

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

Правообладатель Народная асвета

Прыёмнікі выпраменьвання фіксуюць не самую светлавую хвалю, а энергію, прынесеную хваляй у дадзеную вобласць прасторы. Параметрам, што характарызуе гэту энергію, з'яўляецца *інтэнсіўнасць* светлавой хвалі, якая абазначаецца лацінскай літарай *I*. Інтэнсіўнасць светлавой хвалі лікава роўна сярэдняй энергіі, якая пераносіцца хваляй за адзінку часу праз пляцоўку адзінкавай плошчы, арыентаваную перпендыкулярна да напрамку распаўсюджвання хвалі. Згодна з хвалевай тэорыяй электрамагнетызму інтэнсіўнасць электрамагнітнай хвалі прапацыянальна квадрату амплітуды вектара напружанасці яе электрычнага поля $I = \langle E^2 \rangle$. Сімвал $\langle\ \rangle$ абазначае пасярэдняе значэнне велічыні ў часе.

Такім чынам, інтэнсіўнасць выніковай хвалі не роўна суме інтэнсіўнасцей зыходных хваль. Гэта азначае, што хвалі *інтэрферыруюць* 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 — ударяю, паражаю) — з'ява ўзнікнення ўстойлівай у часе карціны максімумаў і мінімумаў, якія чаргуюцца, амплітуд выніковай хвалі пры складанні дзвюх (або некалькіх) кагерэнтных хваль.

Заканамернасці інтэрферэнцыі хваль сапраўдныя і для хваль любой прыроды (рыс. 57), г. зн. маюць універсальны характар.

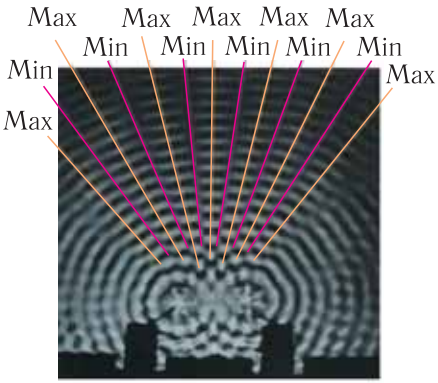
Пры разгляданні інтэрферэнцыі святла (электрамагнітных хваль) трэба ўлічыць, што даўжыня хвалі святла ў рэчыве змяняецца ў залежнасці ад паказчыка праламлення рэчыва. Калі адна хваля распаўсюджваецца ў рэчыве з паказчыкам праламлення n_1, а другая — з паказчыкам праламлення n_2, то рознасць фаз ваганняў

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

дзе

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

Тут δ — **аптычная рознасць ходу** хваль ад крыніцы да пункта назірання. Гэта велічыня вызначаецца адлегласцямі d_1 і d_2, пройдзенымі хвалямі з улікам іх розных модуляў скарасцей v_1 і v_2 распаўсюджвання ў гэтых асяроддзях з паказчыкамі праламлення n_1 і n_2.



Рыс. 57. Інтэрферэнцыйная карціна папярочных хваль на паверхні вады

Правообладатель Народная асвета

Такім чынам, калі аптычная рознасць ходу (7) роўна цэламу ліку даўжынь хваль:

$$\boxed{\delta = 2m\frac{\lambda}{2} = m\lambda,}\ m = 0,\ \pm1,\ \pm2,\ \ldots\ (\textbf{умова максімуму інтэрферэнцыі}), \qquad (8)$$

то хвалі прыходзяць у пункт P (гл. рыс. 53) сінфазна, паколькі рознасць фаз у гэтым выпадку кратная 2π.

Сапраўды:

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

Калі аптычная рознасць ходу (7) роўна няцотнаму ліку паўхваль:

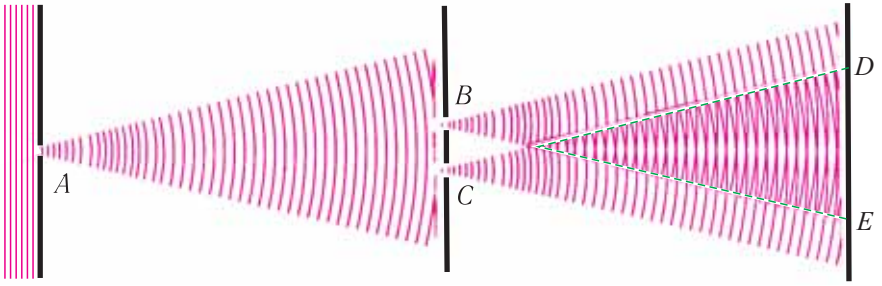
$$\boxed{\delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2},}\ m = 0,\ \pm1,\ \pm2,\ \ldots\ (\textbf{умова мінімуму інтэрферэнцыі}), \qquad (9)$$

то хвалі прыходзяць у пункт P у проціфазе. Рознасць фаз ваганняў у гэтым выпадку роўна:

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

Для назірання інтэрферэнцыі святла неабходны кагерэнтныя крыніцы, якія выпраменьваюць хвалі з фіксаванай рознасцю фаз. Распаўсюджаныя звычайна крыніцы святла (лямпы напальвання, лямпы 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 інтэрферынцыйнай карціны карыстаюцца класічнай **інтэрферэнцыйнай схемай (схемай Юнга)**, дзе пучок святла ад невялікай адтуліны A ў шырме падзяляецца на два кагерэнтныя пучкі з дапамогай невялікіх адтулін B і C у наступнай шырме (рыс. 58). Паколькі гэтыя пучкі створаны адной і той жа



Рыс. 58. Схема эксперымента Юнга па інтэрферэнцыі святла

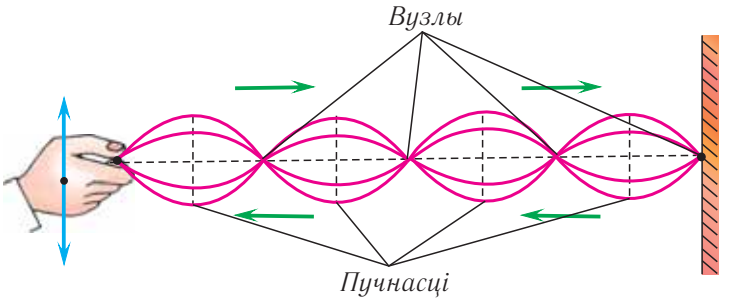
Правообладатель Народная асвета

крыніцай *A*, яны з'яўляюцца кагерэнтнымі. Таму на экране ў вобласці перакрыцця пучкоў *DE* назіраецца інтэрферэнцыйная карціна.

Класічны эксперымент па назіранні інтэрферэнцыі святла англійскі вучоны Томас Юнг правёў у 1801 г. Гэта дазволіла вымераць даўжыню светлавой хвалі і пераканаўча пацвердзіць хвалевую прыроду святла.

Вынаходства і распаўсюджванне кагерэнтных крыніц выпраменьвання — *лазераў* — зрабіла дэманстрацыю з'явы інтэрферэнцыі дастаткова простай.

Адзначым яшчэ адзін распаўсюджаны выпадак інтэрферэнцыі — складанне хваль аднолькавай частаты, якія распаўсюджваюцца ў процілеглых напрамках (напрыклад, падаючай і адбітай хвалі). Гэта прыводзіць да ўтварэння ў прасторы ўстойлівай карціны чаргавання максімумаў амплітуды ваганняў (пучнасцей) і мінімумаў (вузлоў) (рыс. 59). Хваля, якая ўзнікае ў выніку складання дзвюх хваль аднолькавай частаты, што распаўсюджваюцца ў процілеглых напрамках, называецца **стаячай хваляй**.



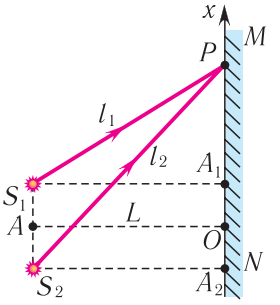
Рыс. 59. Стаячая хваля

1. Што такое кагерэнтнасць? Якія хвалі называюцца кагерэнтнымі?
2. Што называюць інтэрферэнцыяй хваль? Пры якіх умовах адбываецца гэта з'ява?
3. Што называюць рознасцю ходу хваль? Аптычнай рознасцю ходу хваль?
4. Запішыце ўмовы ўтварэння інтэрферэнцыйных максімумаў і мінімумаў. Якой павінна быць аптычная рознасць ходу дзвюх хваль, каб іх інтэрферэнцыя прыводзіла да аслаблення (узмацнення) выніковага сігналу?
5. Чаму не ўзнікае інтэрферэнцыйная карціна ад святла дзвюх фар аддаленай аўтамашыны?
6. Калі дзве хвалі інтэрферыруюць адна з адной, то ці ўплывае адна хваля на распаўсюджванне другой?

Правообладатель Народная асвета

Прыклад рашэння задачы

Разлічыце становішча максімумаў і мінімумаў інтэрферэнцыйнай карціны на экране, які знаходзіцца на адлегласці $L = AO = 2{,}0$ м ад дзвюх аднолькавых кагерэнтных крыніц святла S_1 і S_2, што размешчаны ў вакууме на адлегласці $d = 5{,}0$ мм адна ад адной (рыс. 60). Даўжыня хвалі выпраменьвання крыніц $\lambda = 600$ нм. Знайдзіце адлегласць Δx паміж суседнімі максімумамі.



Рыс. 60

Дадзена:

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

$L = 2{,}0$ м

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

Δx — ?

Рашэнне

Да некаторага пункта P на экране кожная з хваль праходзіць розны шлях l_1 і l_2. Максімумы і мінімумы будуць назірацца пры выкананні ўмоў:

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

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

З трохвугольнікаў S_1PA_1 і S_2PA_2 па теарэме 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.

Далей, аднімаючы ад суадносіны (2) суадносіну (1), атрымаем:

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

З улікам таго, што $d << L$ 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 максімумаў вынікае:

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

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

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

Правообладатель Народная асвета

З умовы для мінімумаў 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:

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

З атрыманай формулы відаць, што шырыня інтэрферэнцыйных палос павялічваецца пры памяншэнні адлегласці d паміж кагерэнтнымі крыніцамі:

$$\Delta x = 6{,}00\cdot10^{-7}\ \text{м}\cdot\frac{2{,}0\ \text{м}}{5{,}0\cdot10^{-3}\ \text{м}} = 2{,}4\cdot10^{-4}\ \text{м}.$$

Адказ: $x_{m\max} = m\lambda\frac{L}{d}$; $x_{m\min} = (2m+1)\frac{\lambda L}{2d}$; $\Delta x = 2{,}4\cdot10^{-4}$ м.

Практыкаванне 12

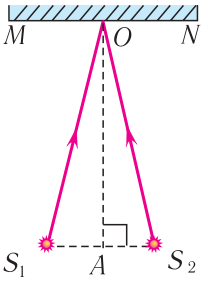
1. Дзве кагерэнтныя хвалі, даўжыні якіх $\lambda = 400$ нм, прыходзяць у адзін пункт на экране. Што будзе назірацца ў гэтым пункце (узмацненне або аслабленне святла), калі аптычная рознасць ходу роўна $\delta = 17{,}17$ мкм?

2. Што будзе назірацца ў некаторым пункце прасторы ў выніку інтэрферэнцыі дзвюх кагерэнтных хваль даўжынёй $\lambda = 400$ нм, аптычная рознасць ходу якіх $\delta = 2{,}25$ мкм?

3. Колькі даўжынь хваль N монахраматычнага выпраменьвання частатой $\nu = 800$ МГц укладваецца на адрэзку, даўжыня якога $l = 2{,}0$ м?

4. Экран MN асветлены кагерэнтнымі монахраматычнымі крыніцамі S_1 і S_2 (гл. рыс. 60), перыяд ваганняў якіх T. Узмацненне або аслабленне 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?

5. Дзве кагерэнтныя крыніцы святла S_1 і S_2 асвятляюць экран MN, плоскасць якога паралельная адрэзку S_1S_2 (рыс. 61). Дакажыце, што ў пункце O будзе максімум асветленасці, калі $S_1O = S_2O$.



Рыс. 61

6. Ва ўстаноўцы Юнга адлегласць паміж шчылінамі $d = 1{,}5$ см, а экран размешчаны на адлегласці $l = 2{,}0$ м ад шчылін. Шчыліны асвятляюцца монахраматычнай крыніцай, даўжыня хвалі якой $\lambda = 687$ нм. Вызначыце адлегласць Δx паміж інтэрферэнцыйнымі палосамі на экране.

Правообладатель Народная асвета

7. На экран A ад пунктавай крыніцы, якая знаходзіцца ад яго на вялікай адлегласці, падае святло. Экран мае дзве паралельныя шчыліны на адлегласці $d = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ м адна ад адной. На экране B, што размешчаны на адлегласці $l = 1{,}0$ м паралельна экрану A, адлегласць паміж інтэрферэнцыйнымі палосамі $\Delta x = 5{,}6 \cdot 10^{-3}$ м. Вызначыце даўжыню хвалі λ выпраменьвання.

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

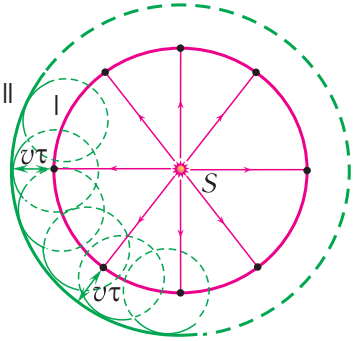
Асяроддзе называецца аднародным, калі яго фізічныя ўласцівасці па ўсім аб'ёме аднолькавыя ва ўсіх пунктах прасторы. Асяроддзе называецца ізатропным, калі яго фізічныя ўласцівасці аднолькавыя па ўсіх напрамках у прасторы.

Хвалевы фронт — гэта паверхня, усе пункты якой вагаюцца ў аднолькавых фазах, г. зн. гэта паверхня роўных фаз.

Хваля называецца плоскай, калі яе хвалевы фронт з'яўляецца плоскасцю.

Заканамернасці распаўсюджвання хваль любой прыроды ў розных асяроддзях маюць універсальны характар.

Для нагляднасці разгледзім працэс распаўсюджвання хваль на паверхні вады. Хвалі, узбуджаныя пунктавай крыніцай S, распаўсюджваюцца па ўсіх напрамках з аднолькавай па модулі скорасцю v. Значыць, фронт хвалі будзе мець выгляд акружнасці (рыс. 62). Адпаведна, калі хваля будзе распаўсюджвацца ў аднародным ізатропным асяроддзі па ўсіх напрамках у прасторы, то яе хвалевы фронт будзе мець выгляд сферычнай паверхні. Як бачым з рысунка 62, калі ў некаторы момант часу t фронт хвалі займаў становішча I, то праз прамежак часу τ фронт зойме становішча II, пункты якога будуць аддалены ад пачатковага фронту хвалі на адлегласць $l = v\tau$.



Рыс. 62. Перамяшчэнне фронту хвалі па прынцыпе Гюйгенса

Агульныя заканамернасці працэсу распаўсюджвання хваль растлумачыў Хрысціян Гюйгенс, сфармуляваўшы ў 1690 г. у «Трактаце аб святле» прынцып, які дазваляў вызначаць становішча хвалевага фронту праз невялікі прамежак часу, ведаючы яго становішча ў дадзены момант часу. Згодна з **прынцыпам Гюйгенса**:

Правообладатель Народная асвета

кожны пункт асяроддзя, якога хвалевы фронт дасягнуў у момант часу t, з'яўляецца крыніцай другасных сферычных хваль. Новае становішча хвалевага фронту праз малы 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 правядзём акружнасці радыусам $l = v\tau$, якія з'яўляюцца франтамі другасных хваль з цэнтрамі на фронце ў становішчы I (гл. рыс. 62).

Адпаведна, агібаючая хвалевых франтоў другасных хваль вызначае новае становішча хвалевага фронту — становішча II.

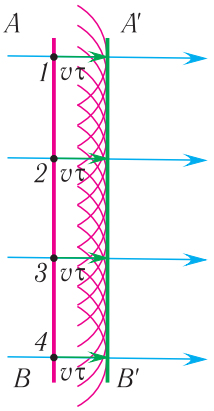
Напомнім, што агібаючай называецца паверхня, датычная да ўсіх другасных хваль. На вельмі вялікіх адлегласцях ад пунктавай крыніцы выпрамененыя ёй хвалі можна лічыць плоскімі.

Лінія, перпендыкулярная да хвалевага фронту ў дадзеным пункце, называецца **праменем**.

Прамень вызначае напрамак распаўсюджвання хвалі, а таксама напрамак пераносу энергіі хваляй. Напрыклад, у сонечным выпраменьванні, якое прыходзіць на Зямлю, светлавыя прамені з'яўляюцца практычна паралельнымі адзін аднаму.

Прынцып Гюйгенса тлумачыць *прамалінейнае распаўсюджванне* хваль у аднародным асяроддзі.

Паколькі у такім асяроддзі радыусы франтоў другасных хваль ($v\tau$) аднолькавыя на ўсіх участках (рыс. 63), то хвалевы фронт ($A'B'$) плоскай хвалі з цягам часу перамяшчаецца ў адным і тым жа напрамку, застаючыся паралельным свайму першапачатковаму становішчу AB.

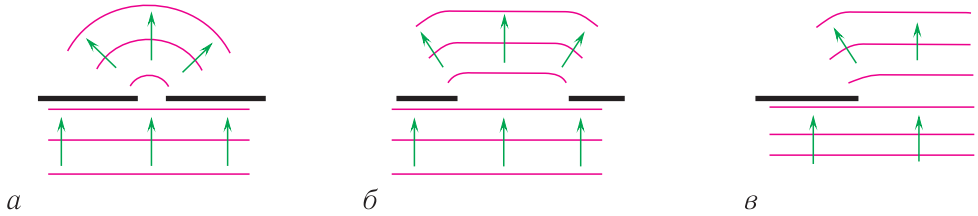


Рыс. 63. Прамалінейнае распаўсюджванне хваль (фарміраванне фронту плоскай хвалі)

Аднак ад закону прамалінейнага распаўсюджвання святла назіраюцца адхіленні пры яго распаўсюджванні паблізу межаў непразрыстых цел або праходжанні праз адтуліны ў непразрыстых экранах, г. зн. у асяроддзях з рэзка выражанымі неаднароднасцямі. Прычым адхіленне істотна залежыць ад суадносіны паміж даўжынёй хвалі і памерам перашкоды. Сапраўды, стоячы за вуглом дома, мы добра чуем, што едзе аўтамабіль, хоць і не бачым яго, паколькі знаходзімся ў вобласці «ценю». Такім чынам, гукавыя хвалі быццам «заварочваюць за вугал», у той час як светлавым хвалям гэтага зрабіць не ўдаецца.

З'ява агібання хвалямі перашкод, якая праяўляецца ў адхіленні напрамку распаўсюджвання хваль ад прамалінейга, на-

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 64. Дыфракцыя хваль на розных перашкодах

зываецца **дыфракцыяй** (рыс. 64). З'ява дыфракцыі служыць адным з пацвярджэнняў хвалевай прыроды святла.

Для праяўлення дыфракцыі памеры перашкод (адтулін) павінны быць меншыя або параўнальныя з даўжынёй хвалі, вось чаму ў разгледжаным прыкладзе гук $\left(v \approx 3 \cdot 10^2\ \frac{\text{м}}{\text{с}},\ \nu = 1 \cdot 10^2\ \text{Гц},\ \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2\ \text{Гц}} = 3\ \text{м}\right)$ матора аўтамабіля змог «завярнуць за вугал», а святло $\left(c = 3 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}},\ \lambda = 500\ \text{нм} = 5{,}00 \cdot 10^{-7}\ \text{м}\right)$, адбітае ад аўтамабіля, — не.

Прынцып Гюйгенса дазваляе рашаць задачы толькі аб напрамку распаўсюджвання хвалевага фронту и не закранае пытанне аб амплітудзе, 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 пачатковым становішчы.

Такім чынам, згодна з Фрэнелем дыфракцыя святла тлумачыцца інтэрферэнцыяй другасных хваль ад розных участкаў пачатковага становішча хвалевага фронту.

Для назірання дыфракцыі святла выкарыстоўваецца *дыфракцыйная рашотка*.

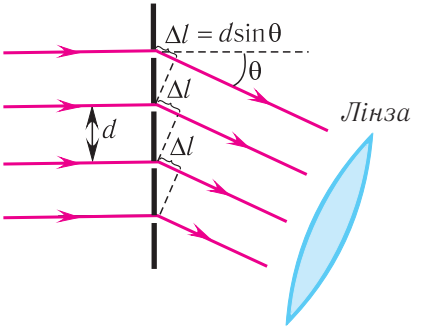
Дыфракцыйнай рашоткай называюць аптычны прыбор, прызначаны для дакладнага вымярэння даўжынь хваль і аналізу саставу святла.

Дыфракцыйная рашотка складаецца з вялікага ліку роўнааддаленых паралельных штрыхоў (шчылін), нанесеных на шкляную або металічную паверхню. Даўжыня рашотак складае 10—15 см. Яны змяшчаюць 10 000 — 20 000 штрыхоў

Правообладатель Народная асвета

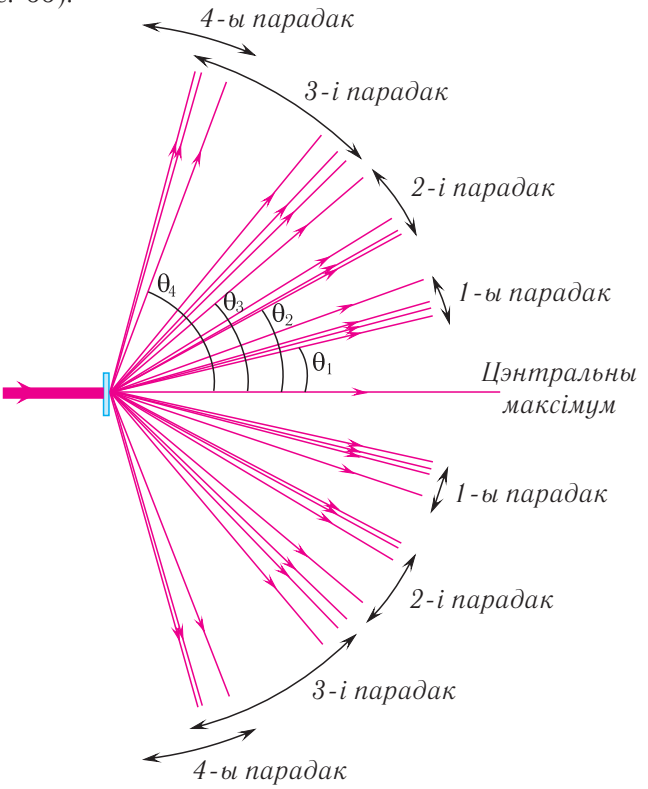
на 1 см. Назіранні праводзяцца як у адбітым святле (на металічных рашотках), так і ў святле, якое праходзіць (на шкляных).

Разгледзім дыфракцыйную рашотку, якая ўяўляе сабой сістэму з N аднолькавых роўнааддаленых паралельных шчылін (празрыстыя ўчасткі) у плоскім непразрыстым экране (рыс. 65). Калі шырыня кожнай шчыліны b, шырыня непразрыстай часткі паміж шчылінамі a, то велічыня $d = a + b$ называецца *пастаяннай рашоткі* або яе *перыядам*.



Рыс. 65. Умова ўтварэння галоўных максімумаў на дыфракцыйнай рашотцы

Няхай на рашотку, пастаянная якой роўна d, падае плоская хваля даўжынёй λ. З прынцыпу Гюйгенса вынікае, што хвалі, якія дыфрагуюць на шчылінах, распаўсюджваюцца за рашоткай па ўсіх напрамках (рыс. 66).



Рыс. 66. Дыфракцыйныя спектры, атрыманыя з дапамогай рашоткі, якая мае 500 $\frac{\text{штр}}{\text{мм}}$

Правообладатель Народная асвета

Для назірання дыфракцыйнай карціны на экране паміж ім і рашоткай размяшчаюць збіраючую лінзу такім чынам, каб экран знаходзіўся ў факальнай плоскасці лінзы (гл. рыс. 65). Збіраючая лінза факусіруе на экране падаючыя на яе паралельныя прамені (другасныя хвалі).

У залежнасці ад рознасці ходу паміж другаснымі хвалямі, якія выпраменены рознымі шчылінамі, яны інтэрферыруюць адна з адной, узмацняючы або аслабляючы адна адну. На экране атрымліваецца *дыфракцыйная карціна* ў выглядзе сістэмы светлых і цёмных палос.

Найбольш яркія дыфракцыйныя максімумы атрымалі назву *галоўных дыфракцыйных максімумаў*.

Умова ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімумаў, назіраемых пад вуглами θ, мае выгляд:

$$\boxed{d \sin \theta = m\lambda.} \qquad (1)$$

Тут $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ — *парадак максімуму*, або *парадак спектра*, λ — даўжыня хвалі падаючага выпраменьвання.

Атрыманая вышэй ўмова вызначае напрамкі распаўсюджвання святла ў прасторы, па якіх на адрэзку $\Delta l = d \sin \theta$ укладваецца цэлы лік даўжынь хваль $m\lambda$ (гл. рыс. 65).

Значыць, другасныя хвалі ад усіх шчылін рашоткі прыходзяць у пункт назірання сінфазна (з фазамі, якія адрозніваюцца на лік, кратны 2π) і ўзмацняюць адна адну.

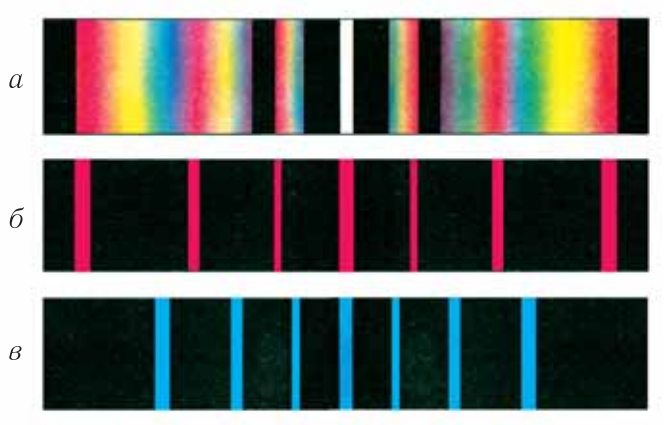
Паміж максімумамі інтэнсіўнасці размешчаны мінімумы, паколькі пры змяненні вугла θ на адрэзку Δl (гл. рыс. 65) ужо не будзе ўкладвацца цэлы лік даўжынь хваль.

Значыць, другасныя хвалі прыходзяць у пункт назірання, аслабляючы выніковае дзеянне.

З умовы ўзнікнення галоўных дыфракцыйных максімумаў (1) вынікае, што пры $m = 0$ для любых даўжынь хваль $\theta = 0$. Значыць, прама па цэнтру рашоткі ўтвараецца нулявы максімум, які называецца таксама *цэнтральным* максімумам. Дыфракцыйныя максімумы, якія адпавядаюць $m = 1$, утвараюць спектр *першага парадку*, $m = 2$ — спектр *другога парадку* і г. д. (гл. рыс. 66).

Колькасць максімумаў m у дыфракцыйнай карціне абмежавана, паколькі $|\sin\theta| \leqslant 1$. Максімальны парадак спектра m_{max}, які дае дыфракцыйная рашотка пры нармальным падзенні святла на яе, вызначаецца з умовы $|\sin\theta| \leqslant 1$.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 67. Дыфракцыйны спектр белага святла (*а*); дыфракцыйныя максімумы чырвонага святла (*б*); дыфракцыйныя максімумы сіняга святла (*в*)

Тады з суадносіны (1) вынікае:

$$m_{\max} \leqslant \frac{d}{\lambda}, \qquad (2)$$

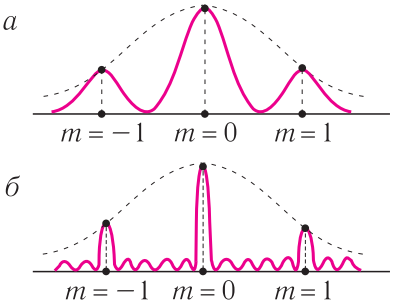
г. зн. залежыць ад перыяду рашоткі і даўжыні светлавой хвалі.

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

Пры падзенні на рашотку белага святла цэнтральны максімум ($m = 0$) уяўляе сабой відарыс крыніцы (рыс. 67, *а*), паколькі ў гэтым напрамку збіраецца выпраменьванне ўсіх даўжынь хваль. Для ўсіх максімумаў ненулявога парадку ($m \neq 0$) у дыфракцыйнай рашотцы $\sin\theta \sim \lambda$. Значыць, чырвоныя прамені, якія маюць большую даўжыню хвалі, чым сінія, адхіляюцца дыфракцыйнай рашоткай больш моцна (рыс. 67, *б, в*). Такім чынам, пры асвятленні рашоткі белым святлом справа і злева ад цэнтральнага максімуму назіраюцца максімумы першага, другога і больш высокіх парадкаў, звернутых фіялетавым краем да цэнтра дыфракцыйнай карціны, а чырвоным ад яго (гл. рыс. 67, *а*).

З павелічэннем ліку шчылін у дыфракцыйнай рашотцы павялічваецца колькасць светлавой энергіі, якая прапускаецца рашоткай, значыць, інтэнсіўнасць галоўных максімумаў пры гэтым павялічваецца.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 68. Змяненне дыфракцыйнай карціны пры павелічэнні ліку шчылін: *а* — дзве шчыліны; *б* — шэсць шчылін

Акрамя таго, галоўныя максімумы з расплывістых ператвараюцца ў рэзкія і вузкія, якія падзелены практычна цёмнымі прамежкамі, паколькі другасныя максімумы вельмі слабыя і складаюць не больш за 5 % ад галоўнага (рыс. 68). Адносіна інтэнсіўнасцей максімумаў у нулявым, першым і другім парадку наступная: $I_0 : I_1 : I_2 = 1 : 0{,}047 : 0{,}017$. Таму пры падзенні монахраматычнага выпраменьвання на рашоткі, у якіх лік штрыхоў на 1 см дасягае 10^5, дыфракцыйны спектр складаецца з вельмі рэзкіх ліній.

Першая дыфракцыйная рашотка, сканструяваная амерыканскім вучоным Рытэнхаўзам, складалася з паралельнага рада валаскоў дыяметрам каля 0,1 мм і даўжынёй 10 мм, нацягнутых на адлегласці каля 0,2 мм адзін ад аднаго. Нямецкі фізік Ёзаф Фраўнгофер замест валаскоў выкарыстоўваў штрыхі, якія наносіліся на шкло алмазным вастрыём. Іх лік на 1 мм рашоткі дасягаў 300.

1. Што называюць дыфракцыяй святла? Пры якіх умовах яе назіраюць?
2. У чым сутнасць прынцыпу Гюйгенса?
3. Ці прымяняльны прынцып Гюйгенса да распаўсюджвання гукавых хваль? Да распаўсюджвання хваль на паверхні вады?
4. Чаму, калі аркестр, аддаляючыся, зайшоў за вугал дома, праз некаторы час чутны толькі гукі барабана і труб-басоў?
5. У чым сутнасць прынцыпу Гюйгенса — Фрэнеля?
6. У чым падабенства і адрозненне паміж інтэрферэнцыяй і дыфракцыяй?
7. Што называюць дыфракцыйнай рашоткай?
8. Запішыце формулу для вызначэння максімумаў інтэнсіўнасці, ствараемых дыфракцыйнай рашоткай.
9. Як можна павысіць дакладнасць вымярэння даўжыні хвалі з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі?
10. Чым можна растлумачыць вясёлкавую афарбоўку кампакт-дыскаў?

Прыклад рашэння задачы

На дыфракцыйную рашотку, якая мае $N = 500\ \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$, падае монахраматычнае выпраменьванне даўжынёй хвалі $\lambda = 550$ нм. Вызначыце найбольшы парадак m_{max} дыфракцыйнага максімуму, які можна назіраць пры нармальным падзенні выпраменьвання на рашотку.

Правообладатель Народная асвета

Дадзена:

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

$N = 500\ \frac{\text{штр}}{\text{мм}} = 5{,}00 \cdot 10^5\ \frac{\text{штр}}{\text{м}}$

m_{max} — ?

Рашэнне

Умова дыфракцыйных максімумаў:

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

Значыць,

$$\sin\theta = Nm\lambda.$$

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

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

тады найбольшы парадак максімуму знаходзіцца па формуле:

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

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

$$m_{max} = \left[\frac{1}{N\lambda}\right] = \left[\frac{1}{5{,}00 \cdot 10^5\ \frac{\text{штр}}{\text{м}} \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{м}}\right] = [3{,}6] = 3.$$

Адказ: $m_{max} = 3$.

Практыкаванне 13

1. Пад якім вуглом θ назіраецца максімум трэцяга парадку пры нармальным падзенні святла з даўжынёй хвалі $\lambda = 840$ нм на дыфракцыйную рашотку з перыядам $d = 2{,}35 \cdot 10^{-3}$ см?

2. У чым перавагі дыфракцыйнай рашоткі з вялікім лікам шчылін? З малым перыядам рашоткі?

3. Дыфракцыйная рашотка, якая мае $N = 5000\ \frac{\text{штр}}{\text{см}}$, асвятляецца белым святлом, што падае нармальна на рашотку. Дыфракцыйныя максімумы якога найбольшага парадку m_{max} можна назіраць: а) у чырвонай вобласці спектра ($\lambda_1 = 760$ нм); б) у фіялетавай вобласці спектра ($\lambda_2 = 400$ нм)?

4. Белае святло, даўжыні хваль якога ад $\lambda_1 = 400$ нм да $\lambda_2 = 700$ нм, падае нармальна на дыфракцыйную рашотку, што мае $N = 8000\ \frac{\text{штр}}{\text{см}}$. Вызначыце рознасць вуглоў дыфракцыі (вуглавую шырыню) $\Delta\theta$ спектра першага парадку на экране.

5. Дыфракцыйная рашотка асвятляецца падаючым на яе нармальна святлом з даўжынёй хвалі $\lambda_1 = 589$ нм. На экране, што знаходзіцца на $l = 42{,}0$ см ад рашоткі,

Правообладатель Народная асвета

дыфракцыйны максімум першага парадку знаходзіцца на адлегласці $x_1 = 2{,}48$ см ад цэнтральнага максімуму. Пры замене крыніцы дыфракцыйны максімум другога парадку знаходзіцца на адлегласці $x_2 = 3{,}84$ см ад цэнтральнага максімуму. Вызначыце даўжыню хвалі λ_2 святла, якое выпраменьваецца гэтай крыніцай.

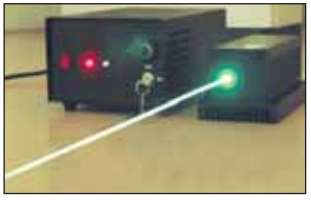
6. Вызначыце найбольшы парадак спектра m_{max}, які назіраецца пры нармальным падзенні монахраматычнага святла на дыфракцыйную рашотку, што мае $N = 500\ \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$, калі даўжыня хвалі святла $\lambda = 520$ нм.

§ 15. Закон праламлення святла. Паказчык праламлення. Поўнае адбіццё

Змяненне напрамку распаўсюджвання праменя святла пры праходжанні праз мяжу падзелу двух асяроддзяў называецца праламленнем святла.

Геаметрычнай оптыкай называюць раздзел оптыкі, у якім вывучаюцца законы распаўсюджвання аптычнага выпраменьвання на падставе ўяўлення аб светлавых праменях.

Пад праменем разумеюць лінію, уздоўж якой пераносіцца энергія электрамагнітнай хвалі. Дамовімся паказваць светлавыя прамені графічна з дапамогай геаметрычных ліній са стрэлкамі. У геаметрычнай оптыцы хвалевая прырода святла не ўлічваецца.



Рыс. 69. Светлавы пучок

Геаметрычнаму праменю на практыцы адпавядае тонкі *светлавы пучок*, што атрымліваецца пры прапусканні светлавога выпраменьвання, якое ідзе ад аддаленай крыніцы, праз адтуліну (дыяфрагму) у экране (рыс. 69).

Такім чынам, трэба адрозніваць геаметрычны прамень (матэматычнае паняцце) і светлавы пучок (матэрыяльны аб'ект), які атрымліваюць ад крыніцы святла.

Ужо ў пачатковыя перыяды аптычных даследаванняў былі эксперыментальна вызначаны чатыры асноўныя законы геаметрычнай оптыкі:

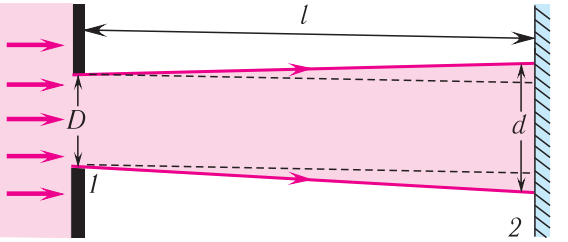
закон прмалінейнага распаўсюджвання святла;
закон незалежнасці светлавых праменяў;
закон адбіцця светлавых праменяў;
закон праламлення светлавых праменяў.

Светлавы паток можна падзяліць на асобныя светлавыя пучкі, вылучаючы іх з дапамогай дыяфрагмаў. Вынік дзеяння вылучаных светлавых пучкоў аказваецца незалежным адзін ад аднаго, г. зн. эфект, што робіць асобны пучок, не залежыць ад

Правообладатель Народная асвета

таго, ці дзейнічаюць адначасова з ім іншыя пучкі або не дзейнічаюць.

Светлавыя пучкі атрымліваюць пры прапусканні светлавога выпраменьвання, якое ідзе ад аддаленай крыніцы, праз адтуліну (дыяфрагму) у экране *1* (рыс. 70). Для таго каб можна было не прымаць да ўвагі дыфракцыйнае расшырэнне пучка, павінна выконвацца ўмова:



Рыс. 70. Распаўсюджванне святла праз шчыліну

$$l \ll \frac{D^2}{\lambda}, \qquad (1)$$

дзе D — памер перашкоды (адтуліны), на якой святло дыфрагуе, λ — даўжыня светлавой хвалі, l — адлегласць ад перашкоды да месца назірання дыфракцыйнай карціны.

У гэтым выпадку пучок, што выходзіць з дыяфрагмы, будзе заставацца нязменным, і ён называецца *паралельным*.

Суадносіна (1) выконваецца, калі даўжыня светлавой хвалі імкнецца да нуля ($\lambda \to 0$). Таму геаметрычная оптыка з'яўляецца гранічным прыбліжаным выпадкам хвалевай оптыкі.

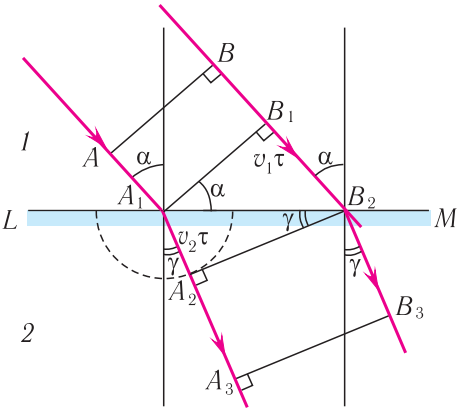
Калі дыяметр дыяфрагмы або памеры прадмета аказваюцца параўнальнымі з даўжынёй светлавой хвалі ($D \approx \lambda$), то светлавы пучок, што выходзіць, разыходзіцца, святло пранікае ў вобласць геаметрычнага ценю, адбываецца дыфракцыя святла, г. зн. праяўляецца хвалевы характар светлавога выпраменьвання.

Прамені, што выходзяць з аднаго пункта, называюць **разыходнымі**, а што збіраюцца ў адным пункце, — **сыходнымі**. Прыкладам разыходных прамяняў можа служыць назіраемае святло далёкіх зорак, а прыкладам сыходных — сукупнасць прамяняў, якія трапляюць у зрэнку нашага вока ад розных прадметаў.

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 значна большыя за даўжыню хвалі падаючага выпраменьвання.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 71. Праламленне святла ў адпаведнасці з прынцыпам Гюйгенса: AB — фронт падаючай плоскай хвалі; A_2B_2 — фронт хвалі пасля праламлення

Няхай на плоскую паверхню падзелу LM двух асяроддзяў падае плоская светлавая хваля, фронт якой AB (рыс. 71). Калі вугал падзення α адрозны ад нуля, то розныя пункты фронту AB хвалі дасягнуць мяжы падзелу LM не адначасова.

Разгледзім, што будзе адбывацца ў другім асяроддзі, лічачы, што модуль скорасці v_2 распаўсюджвання святла ў ім меншы, чым у першым ($v_2 < v_1$) (гл. рыс. 71).

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, што распаўсюджваецца ў другім асяроддзі, можна атрымаць, правёўшы прамую лінію, датычную да паўакружнасці, цэнтр якой у пункце A_1.

З пабудавання вынікае, што $\angle B_1A_1B_2 = \alpha$, $\angle A_1B_2A_2 = \gamma$ як вуглы з узаемна перпендыкулярнымі старанамі. З трохвугольніка $A_1B_1B_2$ знаходзім: $A_1B_2 = \frac{v_1\tau}{\sin\alpha}$ і з трохвугольніка $A_1A_2B_2$ — $A_1B_2 = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}$.

Адкуль:

$$\frac{v_1\tau}{\sin\alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}.$$

З гэтага выразу вынікае закон праламлення:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Напомнім, што абсалютным паказчыкам праламлення называецца адносіна модуля скорасці распаўсюджвання светлавой хвалі ў вакууме c да модуля скорасці распаўсюджвання ў дадзеным асяроддзі v: $n = \frac{c}{v}$.

З улікам гэтай суадносіны закон праламлення прымае выгляд:

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.}$$

Правообладатель Народная асвета

Велічыня

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

роўная адносіне абсалютных паказчыкаў праламлення n_2 другога і n_1 першага асяроддзя, называецца **адносным паказчыкам праламлення** другога асяроддзя адносна першага. У адрозненне ад абсалютнага паказчыка праламлення адносны паказчык праламлення можа быць і меншым за адзінку, калі $n_2 < n_1$.

Такім чынам, зыходзячы з хвалевай тэорыі святла, атрыманы **закон праламлення** светлавых хваль:

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 пункт падзення праменя да плоскасці мяжы падзелу двух асяроддзяў.

Перапішам закон праламлення ў наступным выглядзе:

$$\boxed{n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.}$$

Пры такім запісе закону праламлення не трэба запамінаць абсалютны паказчык праламлення якога асяроддзя стаіць у лічніку, а якога — у назоўніку.

Неабходна заўсёды памножыць абсалютны паказчык праламлення на сінус вугла, які адносіцца да аднаго і таго ж асяроддзя.

Для назірання з'явы праламлення святла дастаткова змясціць аловак у шклянку з вадой і паглядзець на яго збоку — аловак будзе здавацца «надломленым» (праломленым) (рыс. 72), застаючыся пры гэтым зусім цэлым.

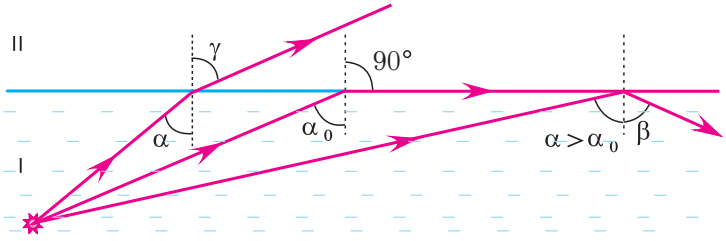
Першыя ўпамінанні аб праламленні святла ў вадзе і шкле сустракаюцца ў творы Клаўдзія Пталамея «Оптыка», які выйшаў у свет у II ст. н. э.

Закон праламлення святла быў эксперыментальна вызначаны ў 1620 г. галандскім вучоным Вілебродам Снеліусам. Заўважым, што незалежна ад Снеліуса закон праламлення быў таксама адкрыты Рэнэ Дэкартам.

Рыс. 72. Праламленне святла на мяжы падзелу двух асяроддзяў

Прычынай праламлення хваль, г. зн. змянення напрамку распаўсюджвання хваль на мяжы падзелу двух асяроддзяў, з'яўляецца

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 73. Поўнае адбіццё святла на мяжы падзелу асяроддзяў

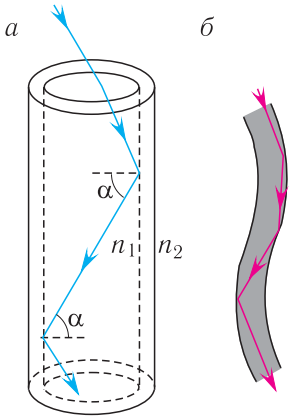
змяненне модуля скорасці распаўсюджвання электрамагнітных хваль пры пераходзе выпраменьвання з аднаго асяроддзя ў другое.

Як вынікае з закону праламлення, пры пераходзе святла з *аптычна больш шчыльнага* асяроддзя I (з большым абсалютным паказчыкам праламлення n_1) у *аптычна менш шчыльнае* асяроддзе II (з меншым паказчыкам праламлення n_2), вугал праламлення γ будзе большым за вугал падзення α (рыс. 73).

Па меры павелічэння вугла падзення, пры некаторым яго значэнні α_0, вугал праламлення будзе $\gamma = 90°$, г. зн. святло не будзе трапляць у другое асяроддзе. Энергія праломленай хвалі пры гэтым будзе роўнай нулю, а энергія адбітага выпраменьвання будзе роўна энергіі падаючага. Значыць, пачынаючы з гэтага вугла падзення, уся светлавая энергія поўнасцю адбіваецца ад мяжы падзелу гэтых асяроддзяў у асяроддзе I.

Гэта з'ява называецца **поўным адбіццём святла** (гл. рыс. 73). Вугал α_0, пры якім узнікае поўнае адбіццё, называецца **гранічным вуглом поўнага адбіцця**. Ён вызначаецца з закону праламлення пры ўмове, што вугал праламлення $\gamma = 90°$:

$$\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1).$$



Рыс. 74. Ход праменяў у святлаводзе: *а* — прамым; *б* — гнуткім

Такім чынам, праломленая хваля адсутнічае пры вуглах падзення, большых за гранічны вугал $\alpha \geqslant \alpha_0$. Напрыклад, для мяжы вада ($n = 1{,}33$) — паветра гранічны вугал поўнага адбіцця $\alpha_0 = 49°$, для мяжы алмаз ($n = 2{,}42$) — паветра — $\alpha_0 = 24°$.

З'яву поўнага адбіцця выкарыстоўваюць у валаконнай оптыцы для перадачы святла і відарыса па пучках празрыстых гнуткіх святлаводаў (рыс. 74), а таксама ў адбівальных прызмах розных аптычных прыбораў. У валаконна-аптычных прыстасаваннях, у якіх святло распаўсюджваецца па тонкіх святлаводах, шкляная святловядучая жыла пакрыта слоем рэчыва з меншым паказчыкам праламлення.

Правообладатель Народная асвета

У 2009 г. кітайскі вучоны Чарльз Пао атрымаў Нобелеўскую прэмію за значны ўклад у даследаванне святлаводаў для аптычнай сувязі.

У 1954 г. беларускім фізікам, акадэмікам Фёдарам Іванавічам Фёдаравым была тэарэтычна прадказана новая фізічная з'ява — папярочнае зрушэнне (перпендыкулярна да плоскасці падзення) светлавога пучка пры яго поўным адбіцці. Гэта зрушэнне меншае за даўжыню хвалі, і для яго назірання светлавы пучок павінен быць абмежаваным у папярочным напрамку. У 1969 г. французскім фізікам К. Эмберам папярочнае зрушэнне было пацверджана эксперыментальна і атрымала назву «зрушэнне Фёдарава».

1. Што называюць праменем?
2. Ці можна лічыць праменем вельмі вузкі пучок святла?
3. Якому закону падпарадкоўваецца распаўсюджванне святла ў аднародным празрыстым асяроддзі?
4. Якая з'ява называецца праламленнем святла?
5. Што з'яўляецца прычынай праламлення хваль на мяжы падзелу асяроддзяў?
6. Растлумачце, чаму аловак, апушчаны ў ваду, здаецца зламаным (гл. рыс. 72).
7. Сфармулюйце закон праламлення святла.
8. Па якой формуле разлічваецца гранічны вугал поўнага адбіцця святла?
9. Чаму роўны вугал праламлення пры нармальным падзенні святла на мяжу двух асяроддзяў?

Прыклад рашэння задачы

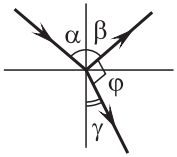
Вызначыце вугал падзення α праменя на шкляную пласцінку з паказчыкам праламлення $n = 1{,}5$, калі паміж адбітым і праломленым праменем вугал $\varphi = 90°$.

Дадзена:	Рашэнне
$n = 1{,}5$ $\varphi = 90°$	З закону праламлення знаходзім: $\sin\alpha = n\sin\gamma.$
α — ?	З геаметрычнага пабудавання (рыс. 75) вынікае, што вуглы адбіцця і праламлення звязаны суадносінай:

$$\beta + \gamma = 90°.$$

Адкуль

$$\gamma = 90° - \beta.$$



Рыс. 75

Падстаўляем знойдзены вугал γ у формулу закону праламлення і з улікам закону адбіцця ($\beta = \alpha$) вызначаем шуканы вугал падзення:

$$\sin\alpha = n\sin(90° - \beta) = n\sin(90° - \alpha) = n\cos\alpha.$$

Адкуль

$$\operatorname{tg}\alpha = n; \qquad \operatorname{tg}\alpha = 1{,}5; \qquad \alpha = 56°.$$

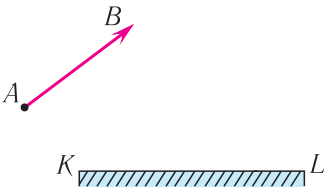
Адказ: $\alpha = 56°$.

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 14

1. Матавая лямпачка ў выглядзе шара дыяметрам $d = 50$ мм асвятляе непразрысты шар дыяметрам $D = 25$ см. Вызначыце дыяметр ценю D_1 і паўценю D_2 ад шара на сцяне, калі адлегласць ад цэнтра лямпачкі да цэнтра шара $l_1 = 1{,}0$ м і ад цэнтра шара да сцяны $l_2 = 2{,}0$ м.

2. Пабудуйце відарыс прадмета AB у плоскім люстры KL (рыс. 76). Вызначыце графічна вобласць поўнага бачання відарыса.



Рыс. 76

3. Вызначыце глыбіню ракі h, калі чалавеку, які глядзіць нармальна да яе паверхні, яна здаецца роўнай $h' = 4{,}0$ м. Паказчык праламлення вады адносна паветра прыняць $n = \frac{4}{3}$.

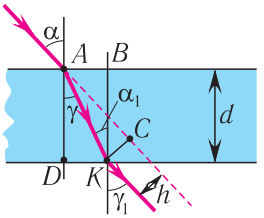
4. Знайдзіце адносны паказчык праламлення n_{21} другога асяроддзя адносна першага, калі вугал адбіцця праменя на мяжы падзелу двух асяроддзяў $\alpha = 40°$, а вугал яго праламлення — $\gamma = 46°$.

5. 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 $n = 1{,}5$.

6. Вызначыце гранічны вугал поўнага адбіцця α_2 на мяжы рэчыва са шклом (паказчык праламлення шкла $n = 1{,}4$), калі на мяжы гэтага рэчыва з паветрам ($n_п = 1{,}0$) гранічны вугал поўнага адбіцця $\alpha_1 = 45°$.

§ 16. Праходжанне святла праз плоскапаралельныя пласцінкі і прызмы

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, лінзы.



Рыс. 77. Ход праменя ў плоскапаралельнай пласцінцы

Люстры, прызмы, пласцінкі і лінзы з'яўляюцца элементамі, камбінуючы якія, ствараюць розныя аптычныя прыборы. Разгледзім некаторыя элементы аптычных прыбораў.

Плоскапаралельная пласцінка. Разгледзім ход праменя ў плоскапаралельнай пласцінцы. На рысунку 77 паказаны ход светлавога праменя ў плоскапаралельнай пласцінцы таўшчынёй d, якая знаходзіцца ў паветры.

Правообладатель Народная асвета

Згодна з законам праламлення на першай і другой межах падзелу для праменя, што падае пад вуглом α на першую мяжу, маем:

$$\sin\alpha = n\sin\gamma;$$
$$n\sin\alpha_1 = \sin\gamma_1.$$

Тут γ — вугал праламлення на першай мяжы, α_1 — вугал падзення праменя 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 межаў) роўны, г. зн. $\alpha_1 = \gamma$. Значыць, $\sin\alpha = n\sin\gamma = n\sin\alpha_1 = \sin\gamma_1$. Адкуль вынікае, што

$$\boxed{\alpha = \gamma_1.} \qquad (1)$$

Такім чынам, *прамень святла, які праходзіць праз плоскапаралельную пласцінку, з абодвух бакоў якой знаходзіцца адно і тое ж асяроддзе, зрушваецца паралельна свайму пачатковаму напрамку на некаторую адлегласць h.*

Адпаведна, усе прадметы, калі глядзець на іх праз празрыстую плоскапаралельную пласцінку пад вуглом, не роўным нулю, будуць таксама здавацца зрушанымі.

Знойдзем, ад якіх параметраў пласцінкі залежыць зрушэнне h праменя.

З $\triangle AKC$ вынікае, што

$$h = KC = AK\sin(\alpha - \gamma).$$

З $\triangle AKD$ маем:

$$AK = \frac{AD}{\cos\gamma} = \frac{d}{\cos\gamma}.$$

Адкуль:

$$h = \frac{d}{\cos\gamma}\sin(\alpha - \gamma) = \frac{d}{\cos\gamma}(\sin\alpha\cos\gamma - \sin\gamma\cos\alpha).$$

З улікам закону праламлення $\sin\gamma = \frac{\sin\alpha}{n}$ і трыганаметрычнай тоеснасці $\sin^2\gamma + \cos^2\gamma = 1$ знаходзім:

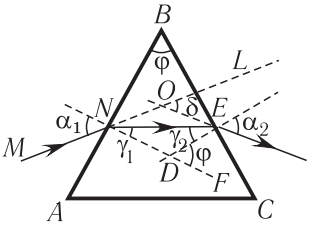
$$\cos\gamma = \sqrt{1 - \sin^2\gamma} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2\alpha}{n^2}} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}{n}.$$

Канчаткова адлегласць h паміж напрамкамі падаючага і праломленага праменя можна вызначыць з суадносіны

$$\boxed{h = \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2\alpha}{n^2 - \sin^2\alpha}}\right)d\sin\alpha.} \qquad (2)$$

Як відаць з суадносіны (2), зрушэнне h праменя пры дадзеным вугле падзення α залежыць ад таўшчыні d пласцінкі і яе паказчыка праламлення n.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 78. Ход праменя ў прызме

Трохгранная прызма. Разгледзім ход праменя ў трохграннай прызме. Няхай светлавы прамень *MN* падае пад вуглом α_1 на бакавую грань трохграннай прызмы *ABC*, сячэнне якой паказана на рысунку 78. Прызма, выраблена з рэчыва, абсалютны паказчык праламлення якога n_2, знаходзіцца ў асяроддзі з абсалютным паказчыкам праламлення n_1. Вугал φ пры вяршыні *B* $\triangle ABC$ называецца **праламляльным вуглом** прызмы. Грані прызмы, якія ўтвараюць праламляльны вугал φ, называюцца **праламляльнымі**. Грань, якая ляжыць супраць праламляльнага вугла, называецца **асновай прызмы**.

Няхай прамень *MN* і трохвугольнік *ABC* ляжыць у адной плоскасці — плоскасці ліста кнігі. З закону праламлення святла знаходзім вугал праламлення γ_1:

$$\sin\gamma_1 = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha_1. \qquad (3)$$

Калі паказчык прызмы $n_2 > n_1$, то праломлены прамень *NE* падае на другую бакавую грань прызмы пад вуглом γ_2. Поўнага адбіцця на другой праламляльнай грані не адбываецца пры ўмове $\sin\gamma_2 < \frac{n_1}{n_2}$, і прамень выходзіць з прызмы пад вуглом α_2, які знаходзім з закону праламлення:

$$\sin\alpha_2 = \frac{n_2}{n_1}\sin\gamma_2. \qquad (4)$$

Адхіленне ад пачатковага напрамку праменя *MN* з прычыны праламленняў на гранях прызмы вызначаецца $\angle LOE = \delta$ (гл. рыс. 78). Вугал δ паміж напрамкамі ўваходнага і выходнага праменя называецца **вуглом адхілення**. Разгледзім трохвугольнік *NDE*. З улікам таго, што $\angle EDF = \varphi$, па тэарэме аб знешнім вугле трохвугольніка знаходзім:

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \varphi. \qquad (5)$$

Прыменім гэту ж тэарэму да $\triangle ONE$:

$$(\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \delta. \qquad (6)$$

З формул (5) і (6) вызначым сувязь вугла падзення α_1, вугла праламлення α_2 з праламляльным вуглом φ прызмы і вуглом адхілення δ выходнага праменя ад пачатковага напрамку:

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi. \qquad (7)$$

Правообладатель Народная асвета

У выніку атрымаем сістэму ўраўненняў (3), (4), (5), (7):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\gamma_1} = \frac{\sin\alpha_2}{\sin\gamma_2},$$
$$\gamma_1 + \gamma_2 = \varphi, \qquad (8)$$
$$\alpha_1 + \alpha_2 - \varphi = \delta.$$

Сістэма ўраўненняў (8) дазваляе рашыць задачу на праходжанне праменя святла праз трохгранную прызму без поўнага адбіцця на яе гранях.

Калі вугал падзення α_1 на грань прызмы і праламляльны вугал прызмы φ малы, то малымі будуць і вуглы γ_1, γ_2 і α_2. Таму ў законах праламлення (3) і (4) адносіну сінусаў можна замяніць адносінай вуглоў, выражаных у радыянах, г. зн.:

$$\alpha_1 \approx \frac{n_2}{n_1}\gamma_1 \quad \text{і} \quad \alpha_2 \approx \frac{n_2}{n_1}\gamma_2.$$

Падстаўляючы атрыманыя выразы для α_1 і α_2 у суадносіну (7), знаходзім:

$$\delta \approx \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\varphi. \qquad (9)$$

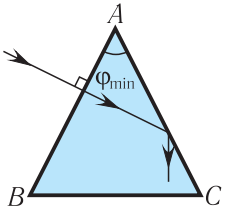
З суадносіны (9) вынікае, што, па-першае: чым большы праламляльны вугал φ, тым большы вугал адхілення δ праменяў прызмай; па-другое, вугал адхілення δ праменяў павялічваецца з ростам абсалютнага паказчыка праламлення n_2 рэчыва прызмы. Як відаць з рысунка 78, прамень святла, праходзячы праз трохгранную прызму, адхіляецца да яе патоўшчанай часткі, калі абсалютны паказчык праламлення рэчыва прызмы большы за абсалютны паказчык праламлення навакольнага асяроддзя ($n_2 > n_1$).

§ ?

1. Начарціце ход светлавога праменя ў плоскапаралельнай пласцінцы і трохграннай прызме.
2. Як паводзіць сябе светлавы пучок пры праходжанні праз шкляную прызму?
3. Пры якім вугле падзення прамень святла, праходзячы праз плоскапаралельную пласцінку, не зрушваецца?
4. Ці застанецца паралельным пучок монахраматычнага святла, праходзячы праз трохгранную прызму, калі ён быў паралельным пры падзенні на праламляльную грань прызмы?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце найменшы праламляльны вугал φ_{min} шкляной прызмы, што знаходзіцца ў паветры, пры якім прамень, падаючы нармальна на грань прызмы, не выходзіць праз яе другую бакавую грань (рыс. 79). Паказчык праламлення шкла прызмы $n = 1{,}6$.



Рыс. 79

Правообладатель Народная асвета

Дадзена:	Рашэнне
$n = 1{,}6$	Запішам умову поўнага адбіцця на бакавой грані AC:
φ_{min} — ?	$\sin\alpha = \frac{1}{n}$.

З прычыны таго, што $\alpha = \varphi_{min}$ як вуглы з узаемна перпендыкулярнымі старанамі:

$$\varphi_{min} = \arcsin\frac{1}{1{,}6} = 39°.$$

Адказ: $\varphi_{min} = 39°$.

Практыкаванне 15

1. Вызначыце зрушэнне h праменя святла пры яго падзенні пад вуглом $\alpha = 45°$ на шкляную плоскапаралельную пласцінку таўшчынёй $d = 6{,}0$ мм, калі паказчык праламлення шкла $n = 1{,}5$.

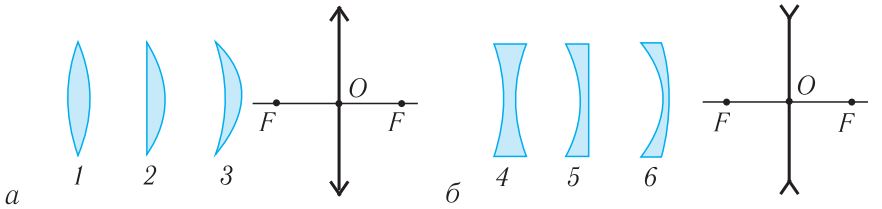
2. Вугал падзення двух паралельных праменяў святла на плоскапаралельную шкляную пласцінку $\alpha = 30°$, а адлегласць паміж імі $l_0 = 20$ мм. Вызначыце адлегласць l паміж праменямі ў пласцінцы. Паказчык праламлення шкла $n = 1{,}6$.

3. Вызначыце праламляльны вугал φ шкляной прызмы, калі прамень, які падае перпендыкулярна да бакавой грані прызмы, выходзіць з яе адхіленым на вугал $\delta = 45°$. Паказчык праламлення шкла $n = 1{,}55$.

4. Прамень святла выходзіць з прызмы пад тым жа вуглом, пад якім ён на яе падае. Пры гэтым ён адхіляецца ад першапачатковага напрамку на вугал $\delta = 25°$. Вызначыце паказчык праламлення n рэчыва прызмы, калі яе праламляльны вугал $\varphi = 45°$.

§ 17. Формула тонкай лінзы

Лінза называецца *збіральнай*, калі пасля праламлення ў ёй паралельны пучок робіцца сыходным. Калі ж пасля праламлення ў лінзе паралельны пучок робіцца разыходным, то лінза называецца *рассейвальнай* (рыс. 80).



Рыс. 80. Тыпы лінз і іх умоўныя абазначэнні: *а* — збіральныя: *1* — дваякавыпуклая; *2* — плоскавыпуклая; *3* — выпукла-ўвагнутая; *б* — рассейвальныя: *4* — дваякаўвагнутая; *5* — плоскаўвагнутая; *6* — увагнута-выпуклая

Правообладатель Народная асвета

Велічыня, адваротная фокуснай адлегласці лінзы, выражаная ў метрах, называецца яе *аптычнай сілай*:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Адзінка аптычнай сілы — 1 *дыяптрыя* (1 дптр).

1 дптр адпавядае аптычнай сіле лінзы з фокуснай адлегласцю $F = 1$ м (1 дптр $= 1$ м$^{-1}$).

Лінзы можна паказаць у выглядзе сукупнасці частак трохгранных прызмаў. На рысунку 81, *а* паказана мадэль дваякавыпуклай лінзы, сабранай з частак прызмаў, павернутых асновамі да цэнтра лінзы. Адпаведна мадэль дваякаўвагнутай лінзы будзе паказана часткамі прызмаў, павернутых асновамі ад цэнтра лінзы (рыс. 81, *б*).

Праламляльныя вуглы гэтых прызмаў можна падабраць такім чынам, каб падаючыя на яе паралельныя прамені пасля праламлення ў прызмах сабраліся ў адным пункце F.

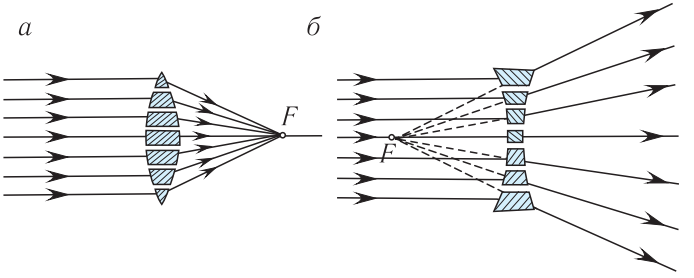
Лінза лічыцца **тонкай**, калі яе таўшчыня ў цэнтры намнога меншая за радыусы паверхняў, што яе абмяжоўваюць. Тонкая лінза дае нескажоны відарыс толькі ў тым выпадку, калі святло монахраматычнае і прадмет дастаткова малы, значыць, прамені распаўсюджваюцца паблізу галоўнай аптычнай восі. Такія прамені атрымалі назву **параксіяльных**.

Адзначым умовы, пры *адначасовым* выкананні якіх лінза з'яўляецца **збіральнай:**

таўшчыня ў цэнтры большая за таўшчыню каля краёў;

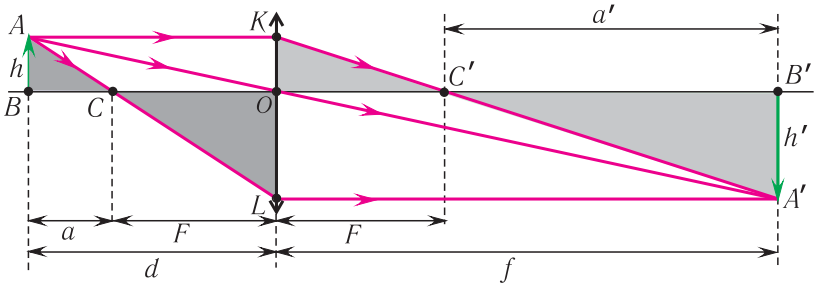
яе паказчык праламлення большы за паказчык праламлення навакольнага асяроддзя.

Пры невыкананні (або выкананні) *толькі адной* з гэтых умоў лінза з'яўляецца **рассейвальнай**.



Рыс. 81. Мадэль лінзы: *а* — дваякавыпуклай; *б* — дваякаўвагнутай

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 82. Пабудова відарыса прадмета ў тонкай збіральнай лінзе

Паміж фокуснай адлегласцю тонкай лінзы, адлегласцю ад прадмета да лінзы і ад лінзы да відарыса існуе пэўная колькасная залежнасць, якая называецца **формулай лінзы**.

Выведзем формулу тонкай лінзы з геаметрычных разуменняў, разглядаючы ход характэрных праменяў. Звернем увагу на прамень, які праходзіць праз аптычны цэнтр O лінзы, прамень, паралельны галоўнай аптычнай восі лінзы, і прамень, што праходзіць праз галоўны фокус лінзы.

Пабудуем відарыс прадмета AB у тонкай збіральнай лінзе (рыс. 82). Няхай адлегласць ад прадмета да лінзы d, адлегласць ад лінзы да відарыса f, фокусная адлегласць лінзы F, адлегласць ад прадмета да пярэдняга галоўнага фокуса a, адлегласць ад задняга галоўнага фокуса да відарыса a', вышыня прадмета h, вышыня яго відарыса h'.

З рысунка 82 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:

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{F}; \qquad (1)$$

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F}; \qquad (2)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h'}{f}. \qquad (3)$$

Выкарыстаўшы суадносіны (1) і (2), атрымаем:

$$aa' = F^2. \qquad (4)$$

Суадносіна $aa' = F^2$ называецца формулай Ньютана.

З улікам таго, што $d = a + F$, $f = a' + F$ (гл. рыс. 82), знаходзім: $a = d - F$, $a' = f - F$ і падстаўляем у формулу (4):

Правообладатель Народная асвета

$$(d - F)(f - F) = df - Ff - dF + F^2 = F^2 \Rightarrow df = Ff + dF.$$

Падзяліўшы абедзве часткі апошняга выразу на dfF, атрымліваем **формулу тонкай лінзы:**

$$\boxed{\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.}$$

Лінейным (папярочным) павелічэннем Г называецца адносіна лінейнага памеру відарыса h' да лінейнага памеру прадмета h. З суадносіны (3) знаходзім лінейнае павелічэнне тонкай лінзы:

$$\boxed{\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}.}$$

У 1604 г. у даследаванні «Дополнения к Вителло» І. Кеплер вывучаў праламленне святла ў лінзах рознай канфігурацыі і для малых вуглоў падзення прыйшоў да формулы лінзы.

Для практычнага выкарыстання формулы лінзы трэба цвёрда запомніць **правіла знакаў**:

для збіральнай лінзы, сапраўднай крыніцы і сапраўднага відарыса велічыні F, d, f лічаць *дадатнымі*. Для рассейвальнай лінзы, уяўнай крыніцы і ўяўнага відарыса велічыні F, d, f лічаць *адмоўнымі*.

Заўважым, што прадмет або крыніца з'яўляюцца *ўяўнымі* толькі ў тым выпадку, калі на лінзу падае пучок сыходных прамеяў.

Такім чынам, лінза з $F > 0$ з'яўляецца **збіральнай** (дадатнай), а з $F < 0$ — **рассейвальнай** (адмоўнай).

Аптычная сіла лінзы залежыць ад уласцівасцей навакольнага асяроддзя (успомніце, як кепска мы бачым пад вадой без плавальных акуляраў).

У сучасных аптычных прыборах для паляпшэння якасці відарысаў выкарыстоўваюцца **сістэмы лінз**. Аптычная сіла D сістэмы тонкіх лінз, складзеных разам, роўна суме іх аптычных сіл D_i:

$$\boxed{D = D_1 + D_2 + \ldots + D_n = \sum_{i=1}^{n} D_i.}$$

1. Што называюць аптычнай сілай лінзы? У якіх адзінках яна вымяраецца?
2. Па якой формуле вызначаецца папярочнае павелічэнне лінзы?
3. Як вядома, светлавыя прамені абарачальныя. Як гэта сцверджанне можна прымяніць пры выкарыстанні формулы тонкай лінзы?
4. Якія відарысы можа даць збіральная лінза? Рассейвальная?

Правообладатель Народная асвета

5. Па якой формуле вызначаецца аптычная сіла сістэмы тонкіх лінз?
6. Чаму роўна фокусная адлегласць плоскага люстра?
7. Чаму роўна павелічэнне плоскага люстра?

Прыклад рашэння задачы

На якой адлегласці d ад рассейвальнай лінзы з аптычнай сілай $D = -4$ дптр трэба змясціць прадмет, каб яго ўяўны відарыс атрымаўся ў $k = 5$ разоў меншым $\left(\Gamma = \frac{1}{5}\right)$ за сам прадмет? Пабудуйце відарыс прадмета.

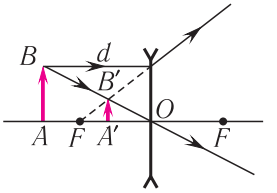
Дадзена:	Рашэнне
$D = -4$ дптр $\Gamma = \frac{1}{5}$	З формулы для лінейнага павелічэння $$\frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \Gamma$$
d — ?	знаходзім:

$$f = \Gamma d.$$

Па формуле тонкай лінзы (рыс. 83) з улікам правіла знакаў:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

з улікам выразу для f атрымліваем:



Рыс. 83

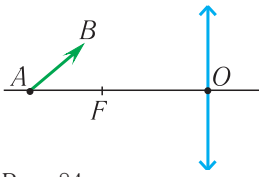
$$d = \frac{1 - \frac{1}{\Gamma}}{D};$$

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\frac{1}{5}}}{-4 \text{ дптр}} = \frac{1 - 5}{-4} \text{ м} = 1 \text{ м}.$$

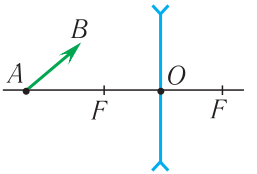
Адказ: $d = 1$ м.

Практыкаванне 16

1. Пабудуйце відарыс прадмета AB у тонкіх збіральнай і рассейвальнай лінзах (рыс. 84, 85). Які гэта відарыс?



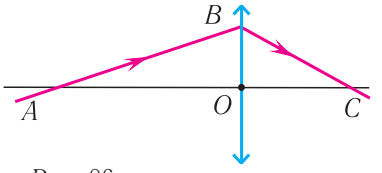
Рыс. 84



Рыс. 85

Правообладатель Народная асвета

2. Вызначыце пабудаваннем становішчы фокусаў тонкай лінзы, калі зададзена галоўная аптычная вось і ход адвольнага праменя *ABC* (рыс. 86).



Рыс. 86

3. Запоўніце табліцу класіфікацыі відарысаў, якія дае тонкая лінза ў розных выпадках.

d	f	Г	Відарыс
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 пунктавая 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 Г 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?

8. Прадмет знаходзіцца на адлегласці $l = 60$ см ад экрана. Выкарыстоўваючы тонкую лінзу, на экране атрымліваюць спачатку паменшаны відарыс прадмета, а затым, перамяшчаючы лінзу, — павялічаны відарыс, які ў $\Gamma = 2{,}0$ раза большы за першы. Вызначыце фокусную адлегласць F лінзы.

9. Вузкі паралельны пучок святла падае на свабодную паверхню вады (паказчык праламлення якой $n_в = 1{,}33$) у акварыуме пад вуглом $\alpha = 40°$. Праломлены

Правообладатель Народная асвета

прамень праходзіць да дна акварыума, дзе падае на гарызантальнае плоскае люстра, якое адбівае прамень назад да паверхні, дзе прамень праламляецца ў паветра. Знайдзіце вугал δ паміж падаючым праменем і праменем, які выйшаў з вады. Вызначыце адлегласць l паміж пунктамі ўваходу і выхаду праменя на свабоднай паверхні вады. Глыбіня акварыума $h = 40$ см.

§ 18. Аптычныя прыборы для атрымання сапраўдных відарысаў

Посредством глаза, а не глазом
Смотреть на мир умеет разум.

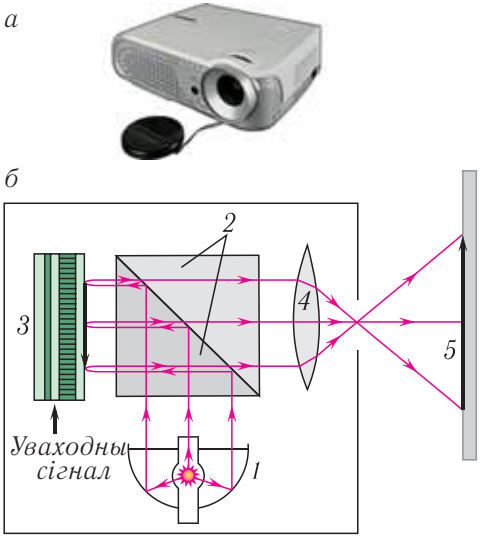
Вільям Блейк

Пазнаёмімся з аптычнымі прыборамі, якія шырока выкарыстоўваюцца чалавекам.

Па сваім прызначэнні аптычныя прыборы падзяляюцца на дзве вялікія групы:

1) для атрымання сапраўдных відарысаў прадметаў (праекцыйныя, фотаапараты);

2) для павелічэння вугла зроку (лупа, мікраскоп, падзорная труба).



Рыс. 87. Мультымедыйны праектар, які працуе па тэхналогіі адбіцця: *а* — агульны выгляд; *б* — аптычная схема

У дадзеным параграфе разгледзім прыборы для атрымання сапраўдных відарысаў прадметаў.

Мультымедыйны праектар — аптычны прыбор, выкарыстоўваючы які на экране атрымліваюць сапраўдны (прамы або адваротны) павялічаны відарыс, «зняты» з экрана камп'ютара, тэлевізара або іншых крыніц відэасігналу (рыс. 87, *а*).

Для фарміравання відарыса ў мультымедыйных праектарах выкарыстоўваюцца розныя базавыя тэхналогіі: вадкакрышталічная тэхналогія, тэхналогія лічбавай апрацоўкі святла або тэхналогія фарміравання лічбавых відарысаў метадам адбіцця.

Пры фарміраванні лічбавага відарыса метадам адбіцця крыніца святла *1* з дапа-

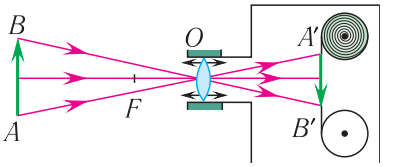
Правообладатель Народная асвета

могай раздзяляльных прызмаў *2* асвятляе аптычную матрыцу з відарысам *3* і з дапамогай сістэмы праекцыйных лінз *4* перадае відарыс на экран *5* (рыс. 87, *б*).

Папулярнасць мультымедыйных праектараў абумоўлена іх універсальнасцю, паколькі, акрамя камп'ютарнага відарыса, яны падтрымліваюць практычна ўсе стандарты відэазапісаў, што існуюць, а таксама поўнасцю сумяшчальныя з тэлебачаннем высокай выразнасці, якое актыўна развіваецца.

Мультымедыйныя праектары актыўна выкарыстоўваюцца на навуковых канферэнцыях, выставах, семінарах і г. д., паколькі па памерах відарыса і па магчымасцях яго наладкі з імі не здольныя канкурыраваць ні вадкакрышталічныя тэлевізары, ні плазменныя.

Фотаапарат — прыбор, прызначаны для атрымання сапраўдных паменшаных адваротных відарысаў прадметаў на фотаплёнцы. Пры гэтым прадметы могуць быць размешчаны на розным аддаленні ад пункта здымкі. Фотаапарат складаецца з закрытай святлонепранікальнай камеры і сістэмы лінз, якая называецца **аб'ектывам** (*O*) (рыс. 88).



Рыс. 88. Ход праменяў у фотаапараце: *AB* — прадмет; *A′B′* — відарыс на фотаплёнцы; *O* — аб'ектыў

Перамяшчаючы аб'ектыў фотаапарата, дабіваюцца наводкі на рэзкасць, пры якой відарыс прадмета фарміруецца дакладна на фотаплёнцы. У адваротным выпадку відарыс атрымліваецца невыразным (размытым). Колькасць светлавой энергіі, якая паступае на плёнку, вызначаецца памерамі *дыяфрагмы* і часам адкрыцця затвора (*вытрымкай*).

Фатаграфічны метад рэгістрацыі відарыса вынайшлі ў 1839 г. Л. Дагер і Ж. Ньепс.

Рыис. 89. Лічбавы фотаапарат

На змену плёначным прыйшлі электронныя (лічбавыя) фотакамеры (рыс. 89), у якіх відарыс запісваецца не на фотаплёнку, а на спецыяльны адчувальны элемент. Ён пакрыты сэнсарамі асветленасці, кожны з якіх мае фільтр аднаго з асноўных колераў: сіні, чырвоны або зялёны.

На элеменце фарміруецца пункт відарыса — **піксель** (ад англ. pixel (*picture element*) — элемент відарыса). Чым больш пікселяў, тым больш якасны відарыс атрымліваецца. Таму найважнейшай характарыстыкай лічбавага фотаапарата з'яўляецца яго вырашальнасць, г. зн. колькасць пікселяў. У самых простых фотаапаратах яна складае некалькі мегапікселяў, а ў лепшых — да некалькіх дзясяткаў мегапікселяў. Колькасць сэнсараў уплы-

Правообладатель Народная асвета

вае таксама на велічыню відарыса, якую можна атрымаць з дапамогай дадзенага апарата.

Пры націсканні на кнопку затвора на кожным пікселі адчувальнага элемента апарата фіксуецца інтэнсіўнасць кожнага з трох колераў. Працэсар апарата, як у камп'ютара, збірае інфармацыю аб колеры ў файл і запісвае яе на запамінальнае ўстройства — карту памяці. Пасля гэтага інфармацыю можна праглядаць на камп'ютары або спецыяльнай прыстаўцы. Але самае важнае — і на самом фотаапараце можна адразу прагледзіць зроблены здымак, што з'яўляецца велізарнай перавагай лічбавага фотаапарата.

Якія яшчэ перавагі 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 з розных адлегласцей (напрыклад, у некаторых мадэлей ад 2 см) без дадатковых прыстасаванняў.

Па-трэцяе, магчымасць выкарыстання лічбавых відарысаў для пераносу на розныя паверхні і размяшчэння на Web-сайце, а таксама рэдагавання з дапамогай розных камп'ютарных праграм.

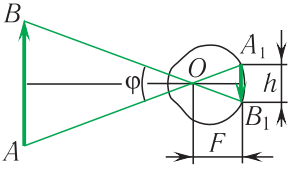
Па-чацвёртае, магчымасць зрабіць вялікую колькасць здымкаў з мінімальным інтэрвалам часу (10 і больш кадраў у секунду).

Нарэшце, габарытныя памеры і маса. Напрыклад, некаторыя апараты маюць памеры $10 \times 6 \times 5$ см і масу 200 г.

1. Для чаго прызначаны мультымедыйны праектар?
2. Для чаго служыць фотаапарат? Назавіце яго асноўныя часткі і растлумачце іх прызначэнне.
3. Ці можна сфатаграфаваць сябе ў люстры? Што пры гэтым атрымаем на фотаплёнцы? Адказ абгрунтуйце.

§ 19. Аптычныя прыборы для павелічэння вугла зроку

Асноўную частку інфармацыі (прыкладна 90 %) аб навакольным свеце мы атрымліваем з дапамогай органаў зроку.



Рыс. 90. Ход праменяў у воку

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 (рыс. 90) вызначаецца *вуглом зроку* $\varphi = \frac{h}{F}$, вяршыня якога знаходзіцца ў аптычным цэнтры вока — пункце O.

Правообладатель Народная асвета

Вугал зроку ўтвораны праменямі, 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.

Ад бясконца аддаленага прадмета ў вока трапляе пучок паралельных праменяў. У гэтым выпадку ($d = \infty$) акамадацыі не патрабуецца. Калі прадмет набліжаецца, то прамені робяцца разыходнымі. У гэтым выпадку аптычная сістэма вока збірае прамені на сятчатцы. У адрозненне ад фотаапарата наводка 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 (дальні пункт), які знаходзіцца ў бязмежнасці.

З узростам магчымасць акамадацыі хутка памяншаецца ў асноўным з-за ўшчыльнення хрусталіка, які губляе здольнасць да сціскання. Пажылы чалавек не можа выразна бачыць блізкія прадметы, а таксама адрозніваць літары ў газетах і кнігах. Да 50 гадоў адлегласць найлепшага зроку павялічваецца ў сярэднім да 50 см.

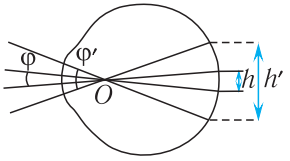
З узростам з прычыны хваробы або пры невыкананні гігіены вока можа набыць дэфекты. Два найбольш распаўсюджаныя дэфекты зроку — *блізарукасць* і *дальназоркасць*.

Акуляры — першы аптычны прыбор, прыменены чалавекам. З'явіліся акуляры даволі даўно — у XIII — XIV стст. Для выпраўлення блізарукасці выкарыстоўваюць акуляры з рассейвальнымі лінзамі, а дальназоркасці — акуляры са збіральнымі лінзамі. Цяпер акуляры сталі звычайным прадметам у абыходжанні і многім дазваляюць нармальна жыць і працаваць. Другім прыстасаваннем, якое карэкціруе 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 бачыць вельмі малыя аб'екты без спецыяльных дапаможных прыстасаванняў, паколькі мы выразна бачым аб'ект толькі ў тым выпадку, калі ўспрымаем зрокавыя ўражанні ад розных пунктаў аб'екта.

Адпаведна, два пункты можна бачыць паасобку толькі тады, калі іх відарысы атрымліваюцца на розных адчувальных элементах сятчаткі — палачках або колбачках. Для гэтага неабходна, каб прамені ад разглядаемых пунктаў ішлі праз аптычны цэнтр вока пад вуглом каля 1′. Таму для нармальнага вока мінімальны памер відарыса складае прыкладна 3,6 мкм. Акрамя таго, мінімальны вугал зроку павінен адпавядаць дыфракцыйнаму расшырэнню пучка, якое выклікаецца яго праходжаннем праз зрэнкі.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 91. Павелічэнне вугла зроку

Чым большы вугал φ паміж прамымі, якія злучаюць аптычны цэнтр вока O (рыс. 91) з крайнімі пунктамі прадмета (вугал зроку), тым больш выразна бачны прадмет і тым большы лік розных дэталей можна адрозніць. Вугал зроку можна павялічыць ($\varphi' > \varphi$), набліжаючы прадмет да вока або вока да прадмета. Пры гэтым памер відарыса на сятчатцы таксама павялічваецца ($h' > h$).

Такім чынам, павелічэнне аб'ёму зрокавай інфармацыі можа быць дасягнута толькі за кошт павелічэння вугла зроку. Найпрасцейшы 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. Дослед паказвае, што аб'ект не факусуецца на сятчатцы, калі ён знаходзіцца ад вока на адлегласці бліжэй за 14 см. З прычыны гэтага ўзнікае патрэбнасць у стварэнні прыбораў, якія дазваляюць павялічыць вугал зроку.

Аптычныя прыборы, якія «ўзбройваюць» вока, падзяляюцца на дзве групы:

1) прыборы для разглядання *вельмі дробных аб'ектаў* (лупа, мікраскоп), якія гэтыя аб'екты быццам бы «павялічваюць»;

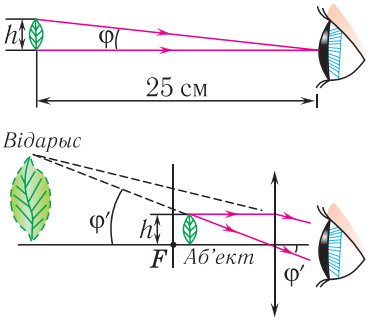
2) прыборы, прызначаныя для разглядання *аддаленых аб'ектаў* (зрокавыя трубы, біноклі, тэлескопы), якія гэтыя аб'екты быццам бы «набліжаюць».

Лупа — аптычны прыбор (збіральная лінза), які дазваляе павялічыць вугал зроку (г. зн. павялічыць дробныя дэталі прадметаў) (рыс. 92).

Лупа ўяўляе сабой кароткафокусную лінзу (F ад 10 мм да 100 мм), якая размяшчаецца паміж вокам і прадметам.

Уяўны павялічаны відарыс прадмета атрымліваецца на *адлегласці найлепшага зроку* — $d_0 = 25$ см для нармальнага вока (рыс. 93). Такім чынам, відарыс прадмета разглядаецца вокам практычна без напружання.

Рыс. 92. Лупа



Рыс. 93. Дробны прадмет, які разглядаецца: *а* — няўзброеным вокам на адлегласці найлепшага зроку; *б* — праз лупу

Правообладатель Народная асвета

Бачнае павелічэнне, якое дае лупа:

$$\boxed{\Gamma = \frac{d_0}{F},}$$

дзе d_0 — адлегласць найлепшага зроку, F — фокусная адлегласць лупы.

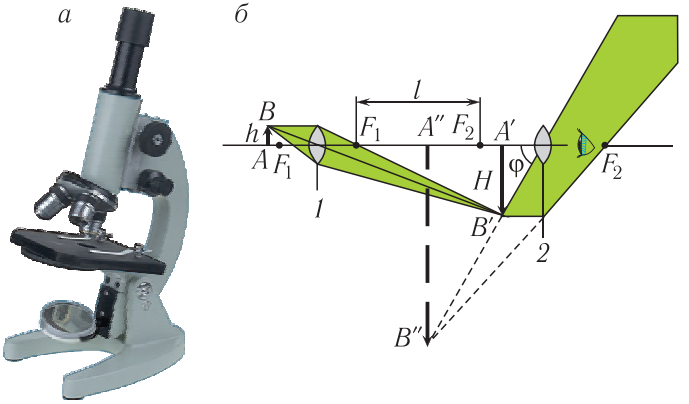
З прычыны таго, што $d_0 = 0{,}25$ м, звычайна лупы маюць павелічэнне ад 2,5 да 25 разоў. Лупы з павелічэннем $\Gamma > 40$ не прымяняюцца з-за вялікіх скажэнняў відарыса або нязначнасці абзору.

У XVII ст. галандскі майстар Антоні Ван Левенгук з дапамогай лінз мог бачыць капіляры крывяноснай сістэмы, чырвоныя крывяныя цельцы, вывучаць падрабязнасці будовы найпрасцейшых аднаклетачных.

Мікраскоп (ад грэч. micros — малы і skopeo — гляджу) — аптычны прыбор для атрымання вельмі павялічаных відарысаў аб'ектаў або дэталей іх структуры, якія не бачны няўзброеным вокам.

Такім чынам, прызначэнне мікраскопа заключаецца ў тым, каб атрымаць з яго дапамогай такі відарыс не распазнаваемага для вока прадмета, які, не знаходзячыся бліжэй за 14 см ад вока, разглядаўся б пад вуглом зроку, большым за гранічны вугал у 1′.

Мікраскоп (рыс. 94, *а*) складаецца з дзвюх збіральных лінзавых сістэм: аб'ектыва *1* з фокуснай адлегласцю F_1, роўнай некалькім міліметрам, і акуляра *2* з фокуснай адлегласцю F_2, роўнай некалькім сантыметрам (рыс. 94, *б*). Прадмет *AB* змяшчаецца перад фокусам аб'ектыва. Адлегласць паміж фокусамі аб'ектыва і акуляра роўна l, прычым $l \gg F_1$, $l \gg F_2$.



Рыс. 94. Мікраскоп: *а* — агульны выгляд; *б* — аптычная схема і ход праменяў

Правообладатель Народная асвета

За аб'ектывам (за фокусам F_2) атрымліваецца сапраўдны павялічаны відарыс $A'B'$ прадмета, які з'яўляецца прадметам назірання для акуляра. Канчатковы відарыс $A''B''$ прадмета з'яўляецца ўяўным, перавернутым і павялічаным (гл. рыс. 94, *б*). Павелічэнне Г мікраскопа вызначаецца павелічэннем аб'ектыва $\Gamma_1 = \frac{l}{F_1}$ і акуляра $\Gamma_2 = \frac{d_0}{F_2}$:

$$\Gamma = \Gamma_1\Gamma_2 = \frac{ld_0}{F_1F_2}.$$

Тут l — аптычная даўжыня тубуса мікраскопа, г. зн. адлегласць паміж факальнымі пунктамі F_1 і F_2, $d_0 \approx 25$ см — адлегласць найлепшага зроку для нармальнага вока.

У мікраскоп аб'ект бачны больш дэтальна, паколькі разгляданне ўяўнага відарыса $A''B''$ аб'екта ў акуляр адбываецца пад большым вуглом зроку.

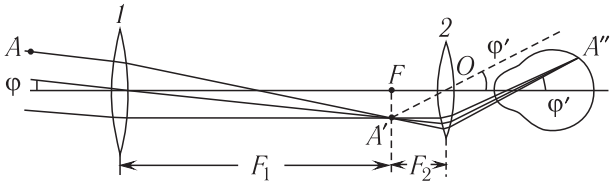
З-за з'явы дыфракцыі з дапамогай мікраскопа немагчыма разглядаць аб'екты, памеры якіх параўнальныя з даўжынёй хвалі святла. Такім чынам, максімальнае павелічэнне мікраскопа абмежавана ($\Gamma \leqslant 2000$) з прычыны хвалевай прыроды святла.

У XVII ст. з'явіліся першыя мікраскопы. Левенгук праславіўся сваімі мікраскопамі, якія давалі павелічэнне да 270 разоў.

Пры разгляданні вельмі вялікіх, але і вельмі аддаленых аб'ектаў вугал зроку малы і можа быць меншым за гранічны. У гэтым выпадку для павелічэння вугла зроку прымяняюцца біноклі і тэлескопы.

Тэлескопы — астранамічныя аптычныя прыборы, прызначаныя для назірання за нябеснымі целамі. Пра іх вам будзе падрабязна расказана ў курсе астраноміі.

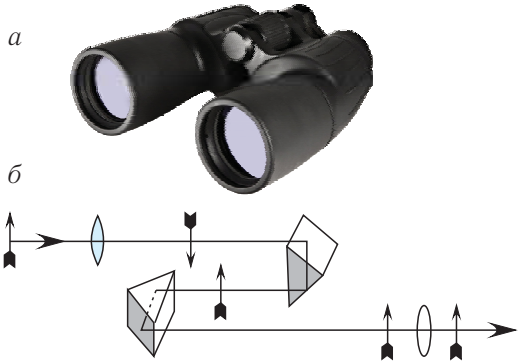
Найпрасцейшым тэлескопам з'яўляецца *падзорная труба*. Яна складаецца з дзвюх лінзавых сістэм — аб'ектыва *1* і акуляра *2* (рыс. 95). Падзорная труба са збіральным акулярам называецца *трубой Кеплера*. Для атрымання максімаль-



Рыс. 95. Ход праменяў у трубе Кеплера

Правообладатель Народная асвета

нага вугла зроку ў трубе Кеплера сумяшчаюць задні фокус аб'ектыва і пярэдні фокус акуляра. У такім выпадку пры разгляданні аддаленага прадмета з акуляра выходзяць пучкі паралельных прамяняў. Гэта дазваляе назіраць аддаленыя аб'екты ў тэлескоп нармальным вокам у ненапружаным стане (без акамадацыі).



Рыс. 96. Бінокль: *а* — агульны выгляд; *б* — абарачальная сістэма прызмаў

Разглядаемы прадмет A звычайна знаходзіцца на вельмі вялікай адлегласці ад аб'ектыва. Прамежкавы відарыс A' атрымліваецца практычна адразу за фокусам аб'ектыва. Ён размешчаны ад акуляра на адлегласці, якая меншая за яго фокусную адлегласць. Канчатковы відарыс A'' (павялічаны ўяўны і перавернуты) утвараецца на сятчатцы вока (гл. рыс. 95). Павелічэнне Г, якое дае труба Кеплера:

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_2},$$

дзе F_1 — фокусная адлегласць аб'ектыва, F_2 — фокусная адлегласць акуляра. Даўжыня тэлескопа $l = F_1 + F_2$.

Дзве маленькія падзорныя трубы, складзеныя разам для двух вачэй, утвараюць **бінокль** (рыс. 96, *а*). Паколькі труба Кеплера дае перевернуты відарыс, то ў біноклях, пабудаваных на яе аснове, прымяняецца абарачальная сістэма з дзвюх прызмаў з поўным адбіццём (рыс. 96, *б*).

Наяўнасць дзвюх прызмаў дазваляе стварыць прамы відарыс, паколькі адна прызма пераварочвае 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. рыс. 96). Адпаведна і відарыс у такім біноклі не толькі прыбліжаны, але і аб'ёмны.

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?

Прыклад рашэння задачы

Адзін і той жа прадмет фатаграфуюць двойчы з адлегласцей $d_1 = 60$ см і $d_2 = 11$ дм. Вызначыце фокусную адлегласць F аб'ектыва фотаапарата, калі вышыня відарысаў прадмета на здымках адпаведна $h_1 = 4{,}0$ см і $h_2 = 2{,}0$ см.

Правообладатель Народная асвета

Дадзена:

$d_1 = 60$ см $= 0{,}60$ м
$d_2 = 11$ дм $= 1{,}1$ м
$h_1 = 4{,}0$ см $= 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м
$h_2 = 2{,}0$ см $= 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

F — ?

Рашэнне

Лінейнае павелічэнне прадмета вышынёй H у першым і ў другім выпадках адпаведна:

$$\Gamma_1 = \frac{h_1}{H} = \frac{f_1}{d_1}; \quad \Gamma_2 = \frac{h_2}{H} = \frac{f_2}{d_2}.$$

Запішам формулу тонкай лінзы для гэтых выпадкаў:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}.$$

З першых двух ураўненняў знаходзім:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{h_1 d_1}{h_2 d_2}.$$

Адкуль

$$f_2 = f_1 \frac{h_2 d_2}{h_1 d_1}; \quad f_2 = f_1 \frac{2{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м} \cdot 1{,}1\ \text{м}}{4{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{м} \cdot 0{,}60\ \text{м}} = \frac{11}{12} f_1.$$

Падставім атрыманае значэнне ў формулу тонкай лінзы і рэшым сістэму ўраўненняў:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{12}{11 f_1};$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}.$$

Знойдзем адлегласць:

$$f_1 = \frac{\frac{12}{11} - 1}{\frac{1}{0{,}60} - \frac{1}{1{,}1}}\ \text{м} = 0{,}12\ \text{м}.$$

Падстаўляючы атрыманае значэнне f_1 у формулу тонкай лінзы, знойдзем шуканую фокусную адлегласць аб'ектыва:

$$F = \frac{f_1 d_1}{f_1 + d_1};$$

$$F = \frac{0{,}12\ \text{м} \cdot 0{,}60\ \text{м}}{0{,}12\ \text{м} + 0{,}60\ \text{м}} = 0{,}10\ \text{м}.$$

Адказ: $F = 0{,}10$ м.

Практыкаванне 17

1. Вызначыце аптычную сілу D аб'ектыва праекцыйнага апарата, калі на дыяпазітыве вышыня прадмета $h = 4{,}0$ см, а яго відарыс на экране, які знаходзіцца ад аб'ектыва на адлегласці $f = 6{,}0$ м, мае вышыню $H = 1{,}6$ м.

Правообладатель Народная асвета

2. Аб'ектыў фотаапарата мае фокусную адлегласць $F = 12{,}5$ см. На якой адлегласці d ад аб'ектыва павінен знаходзіцца прадмет, каб на здымку яго відарыс атрымаўся ў $n = 4{,}00$ раза меншым за прадмет?

3. Вышыня будынка на фотаздымку $H = 7{,}0$ см. Вызначыце сапраўдную вышыню h будынка, калі вядома, што фокусная адлегласць аб'ектыва $F = 20$ см, а здымка праводзілася на адлегласці $d = 8{,}0$ м ад будынка.

4. Лупа з трохкратным павелічэннем для нармальнага вока факусуецца на відарыс паблізу адлегласці найлепшага зроку для нармальнага вока. Вызначыце фокусную адлегласць F лупы.

5. Блізарукі чалавек чытае без акуляраў, трымаючы кнігу на адлегласці $d = 15$ см ад вачэй. Вызначыце аптычную сілу D кантактных лінз, неабходных яму для чытання.

6. Вызначыце аптычную сілу D_1 аб'ектыва мікраскопа, які дае павелічэнне $\Gamma = 400$, калі даўжыня яго тубуса $l = 15$ см, а фокусная адлегласць акуляра $F_2 = 5{,}0$ см.

7. Якую аптычную сілу D павінны мець акуляры для чытання, каб іх уладальнік, які мае адлегласць найлепшага зроку $d_0 = 120$ см, змог чытаць кнігу на адлегласці $d = 25$ см? Лічыць, што адлегласць ад лінз акуляраў да вачэй $f = 2{,}0$ см.

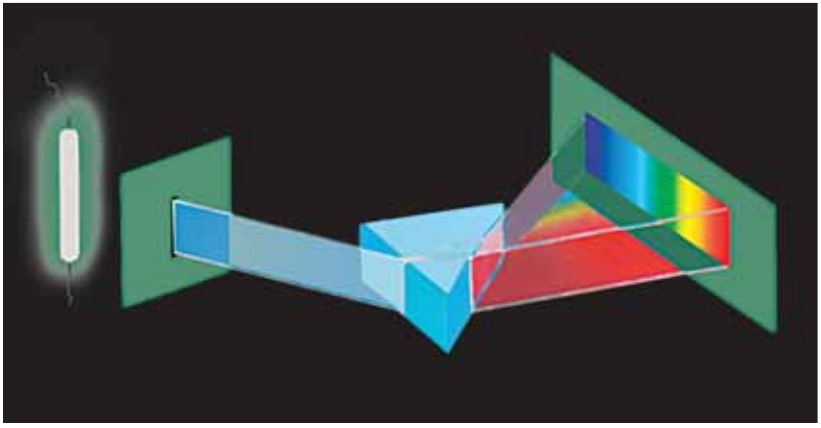
8. З якой вытрымкай t трэба фатаграфаваць канькабежца, модуль скорасці якога $v = 6{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, каб размытасць відарыса (зрушэнне ў час здымкі) не перавышала $\Delta x = 0{,}10$ мм? Фокусная адлегласць аб'ектыва $F = 15$ см, адлегласць ад канькабежца да фотаапарата $d = 20$ м.

§ 20. Дысперсія святла. Спектр. Спектральныя прыборы

Крыніцай аптычнага выпраменьвання называецца фізічнае цела, якое пераўтварае любы від энергіі ў энергію электрамагнітных выпраменьванняў аптычнага дыяпазону. Любая крыніца святла характарызуецца поўнай энергіяй, якую яна выпраменьвае ў адзінку часу. Гэта энергія размяркоўваецца нераўнамерна паміж хвалямі рознай даўжыні. У агульным выпадку адвольны электрамагнітны сігнал складаецца з набору розных электрамагнітных хваль, даўжыні (або частоты) якіх можна вызначыць.

Падобную працэдуру называюць *спектральным аналізам* сігналу, а сукупнасць атрыманых «найпрасцейшых» электрамагнітных хваль — *спектрам*. Такім

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 97. Раскладанне белага святла прызмай

чынам, **спектр** — размеркаванне энергіі, якая выпраменьваецца або паглынаецца рэчывам, па частотах або даўжынях хваль.

Калі накіраваць пучок белага святла на прызму, то мы выявім за прызмай на экране рознакаляровую палоску (рыс. 97). Ньютан, упершыню выканаўшы дадзены эксперымент, назваў палоску спектрам.

Раскладанне пучка белага святла ў спектр за прызмай з'яўляецца вынікам **дысперсіі** (ад лац. dispersio — рассеянне) **святла** — залежнасці скорасці хвалі ў асяроддзі ад яго частаты $v(\nu)$. Паколькі скорасць святла ў рэчыве $v = \frac{c}{n}$, то абсалютны паказчык праламлення рэчыва робіцца залежным ад частаты $n(\nu)$ або даўжыні хвалі $n(\lambda)$ выпраменьвання, якое распаўсюджваецца. З прычыны з'явы дысперсіі прызма па-рознаму праламляе светлавыя хвалі розных колераў.

Колер залежыць ад частаты светлавой хвалі падобна да таго, як розным вышыням гуку адпавядаюць розныя частоты гукавых хваль.

Дысперсія рэчываў можа быць істотна рознай. У табліцы 6 прыведзены ў якасці прыкладу значэнні абсалютных паказчыкаў праламлення некаторых празрыстых рэчываў.

Дысперсія ўласціва ўсім асяроддзям, акрамя вакууму. Калі абсалютны паказчык праламлення асяроддзя памяншаецца з павелічэннем даўжыні хвалі, то такая **дысперсія** называецця **нармальнай**, у процілеглым выпадку — **анамальнай**.

Парадак чаргавання колераў у спектры:

Правообладатель Народная асвета

чырвоны — 770—630 нм
аранжавы — 630—590 нм
жоўты — 590—570 нм
зялёны — 570—495 нм
блакітны, сіні — 495—435 нм
фіялетавы — 435—390 нм

Табліца 6. **Залежнасць абсалютных паказчыкаў праламлення рэчываў ад даўжыні хвалі**

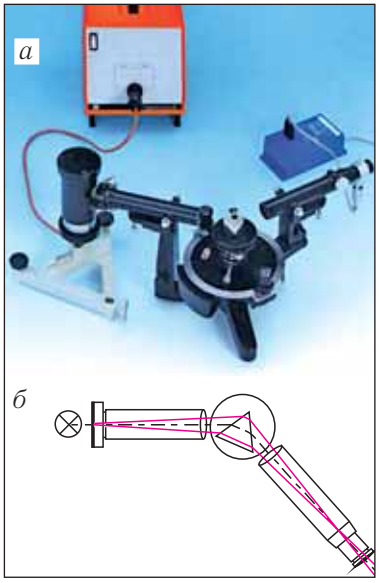
λ, нм	Колер	Шкло, *n*	Кварц, *n*	Алмаз, *n*	Лёд, *n*
410	Фіялетавы	1,5380	1,5570	2,4580	1,3170
470	Блакітны	1,5310	1,5510	2,4439	1,3136
530	Зялёны	1,5260	1,5468	2,4260	1,3110
590	Жоўты	1,5225	1,5438	2,4172	1,3087
610	Аранжавы	1,5216	1,5432	2,4150	1,3080
670	Чырвоны	1,5200	1,5420	2,4100	1,3060

З'явы дысперсіі і поўнага адбіцця прыводзяць да ўтварэння **вясёлкі**, з прычыны праламлення сонечных прамяняў на дробненькіх вадзяных кропельках у час дажджу, да непажаданага «афарбоўвання» відарысаў у аптычных сістэмах (храматычная аберацыя) і г. д.

Вымярэнні і назіранні аптычных спектраў выконваюцца з дапамогай спецыяльных прыбораў.

Прыборы для візуальнага назірання спектраў называюцца **спектраскопамі**, прыборы з фатаграфічнай рэгістрацыяй спектраў — **спектрографамі** (прымяняюцца ў розных частках спектра з адпаведнай адчувальнасцю фотаматэрыялаў).

Прыборы, якія аснашчаны фотаэлектрычнымі і цеплавымі прыёмнікамі выпраменьвання, — **спектрометрамі** або **спектрафатометрамі** (рыс. 98).

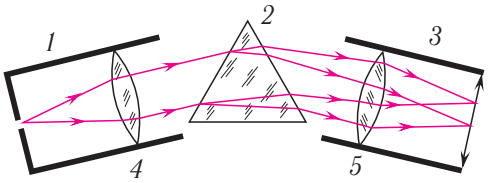


Рыс. 98. Прызменны спектрафатометр: *а* — агульны выгляд; *б* — аптычная схема

Правообладатель Народная асвета

Першы спектраскоп сканструяваў у 1815 г. нямецкі фізік Ёзаф Фраўнгофер.

Любы спектральны прыбор мае *ўваходны каліматар*, *дыспергуючы элемент* (прызма, дыфракцыйная рашотка) і *выхадны каліматар*.



Рыс. 99. Будова спектрографа: *1* — уваходны каліматар; *2* — дыспергуючы элемент (прызма); *3* — выхадны каліматар; *4*, *5* — лінзы

Уваходны каліматар *1* (рыс. 99) уяўляе сабой трубу, на адным канцы якой ёсць шырма з вузкай шчылінай, а на другім — збіральная лінза *4*. Уваходная шчыліна, што асвятляецца даследуемым выпраменьваннем, устанаўліваецца ў фокусе збіральнай лінзы *4*, якая ўтварае паралельны пучок святла і накіроўвае яго на дыспергуючы элемент *2*.

Дыспергуючы элемент пераўтварае зыходны пучок у сістэму паралельных монахраматычных пучкоў, што выходзяць з элемента пад рознымі вугламі, якія залежаць ад даўжыні хвалі выпраменьвання. Збіральная лінза *5* выхаднога каліматара *3* (гл. рыс. 99) стварае на экране (фотапласцінцы), які размешчаны ў факальнай плоскасці лінзы, сукупнасць монахраматычных відарысаў уваходнай шчыліны. У выніку на экране атрымліваецца прасторавае раскладанне выпраменьвання ў спектр.

Прызначэнне спектральных прыбораў — рэгістраваць залежнасць інтэнсіўнасці спектральных ліній ад частаты (даўжыні) хвалі выпраменьвання, г. зн. фактычна вызначаць, з якіх монахраматычных хваль складаецца дадзенае выпраменьванне.

Напомнім, што ў якасці дыспергуючых элементаў спектральных прыбораў выкарыстоўваюцца прызма або дыфракцыйная рашотка, прычым у найбольш дасканалых спектральных прыборах выкарыстоўваюцца менавіта дыфракцыйныя рашоткі.

1. Што называюць спектрам?
2. Што такое дысперсія святла?
3. Чаму шкляная прызма раскладае пучок белага святла ў спектр?
4. Якія прыборы прымяняюцца для назірання і рэгістрацыі спектраў?
5. Якое прызначэнне, прынцып будовы і работы спектральных прыбораў?
6. Чым будуць адрозніваца спектры, якія атрымліваюцца ад адной і той жа крыніцы выпраменьвання з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі і прызмы?

Правообладатель Народная асвета

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 3

Оптыка — раздзел фізікі, у якім вывучаюць уласцівасці святла, яго фізічную прыроду і ўзаемадзеянне з рэчывам.

Пад **святлом** разумеюць электрамагнітныя хвалі, частоты якіх ад $1{,}5 \cdot 10^{11}$ Гц да $3 \cdot 10^{16}$ Гц (даўжыні хваль змяняюцца ў дыяпазоне, які адпавядае інфрачырвонаму, бачнаму і ўльтрафіялетаваму 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:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n},$$

дзе λ_0 — даўжыня хвалі ў вакууме, n — абсалютны паказчык праламлення рэчыва.

Пры пераходзе светлавой хвалі з вакууму ў рэчыва або з аднаго рэчыва ў другое **частата святла застаецца нязменнай**.

Інтэрферэнцыя святла — з'ява ўзнікнення ўстойлівай у часе карціны максімумаў і мінімумаў амплітуд, якія чаргуюцца, выніковай хвалі пры складанні дзвюх (або некалькіх) кагерэнтных хваль.

Аптычная рознасць ходу хваль $\delta = n_1 l_1 - n_2 l_2 = c\left(\frac{l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2}\right)$ — рознасць адлегласцей, пройдзеных хвалямі з улікам іх розных модуляў скарасцей v_1 і v_2 распаўсюджвання ў гэтых асяроддзях з паказчыкамі праламлення n_1 і n_2.

Умова максімумаў інтэрферэнцыі:

$$\delta = m\lambda,\ m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ \ldots\ .$$

Умова мінімумаў інтэрферэнцыі:

$$\delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2},\ m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ \ldots\ .$$

Правообладатель Народная асвета

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, якая выпраменьваецца крыніцай.

З'ява агібання хвалямі перашкод, якая праяўляецца ў адхіленні напрамку распаўсюджвання хваль ад прамалінейнага, называецца **дыфракцыяй**.

Дыфракцыйнай рашоткай называюць аптычны прыбор, прызначаны для раскладання святла ў спектр і дакладнага вымярэння даўжынь хваль. Ён складаецца з вялікага ліку роўнааддаленых паралельных штрыхоў, нанесеных на шкляную або металічную паверхню.

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 прамеяў.

Змяненне напрамку распаўсюджвання святла пры праходжанні праз мяжу падзелу двух асяроддзяў называецца **праламленнем святла**.

Закон праламлення 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 пункт падзення праменя да плоскасці мяжы падзелу двух асяроддзяў:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

З'ява поўнага адбіцця падаючага праменя ад мяжы падзелу асяроддзяў называецца **поўным адбіццём святла**. Найменшы вугал, з якога пачынаецца поўнае адбіццё, называецца **гранічным вуглом поўнага адбіцця**:

$$\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1).$$

Формула лінзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Правообладатель Народная асвета

Правіла знакаў:

у выпадку збіральнай лінзы, сапраўдных крыніцы і відарыса знакі перад велічынямі F, d, f трэба выбіраць *дадатнымі*; у выпадку рассейвальнай лінзы, уяўных крыніцы і відарыса — знакі выбіраюць *адмоўнымі*.

Лінейным (папярочным) павелічэннем Г 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 носьбіты (флэш-карты, дыскі і г. д.).

Лупа — аптычны прыбор (збіральная лінза), які дазваляе павялічыць вугал бачання.

Мікраскоп — аптычны прыбор для атрымання вельмі павялічаных відарысаў аб'ектаў або дэталей іх структуры, якія нябачны для няўзброенага вока.

Спектр — размеркаванне энергіі, якая выпраменьваецца або паглынаецца рэчывам, па частотах або даўжынях хваль.

Вымярэнні і назіранні аптычных спектраў выконваюцца з дапамогай *спектральных прыбораў*. Прызначэнне спектральных прыбораў — рэгістраваць залежнасць інтэнсіўнасці спектральных ліній ад частаты (даўжыні) хвалі выпраменьвання, г. зн. вызначаць, з якіх монахраматычных хваль яно складаецца.

Правообладатель Народная асвета

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 $c = 299\,792\,458\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Доследы паказваюць, што з такой скорасцю распаўсюджваецца ў вакууме не толькі бачнае святло, але і любое электрамагнітнае выпраменьванне — ад радыёхваль да гама-выпраменьвання.

Развіццё навукі і тэхнікі дазволіла фізікам ужо на рубяжы XIX—XX стст. правесці дастаткова дакладныя вымярэнні скорасці святла. Як атрымалася, скорасць святла не залежыць ні ад скорасці руху прыёмніка святла, ні ад скорасці крыніцы, якая выпраменьвае святло.

Гэтыя дзіўныя 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 *рэлятывісцкай тэорыяй* (ад лац. relativus — адносны). З'явы, якія 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*.

Заўважым, што, акрамя спецыяльнай тэорыі адноснасці (СТА), ёсць і *агульная тэорыя адноснасці* (АТА), якая абагульвае СТА на выпадак, калі грунтоўнымі будуць гравітацыйныя з'явы.

У паўсядзённым жыцці і ў сучасных тэхналогіях (нават касмічных) мы не сустракаемся з рэлятывісцкімі скарасцямі. Навошта ж тады вывучаць тэорыю адноснасці? Для гэтага ёсць цэлы шэраг прычын.

Па-першае, асноўную інфармацыю аб навакольным асяроддзі мы атрымліваем з дапамогай зроку, непасрэдна ўспрымаючы светлавое выпраменьванне. Такім чынам, «самы рэлятывісцкі» аб'ект прыроды — святло адыгрывае найважнейшую ролю ў жыцці кожнага чалавека.

Правообладатель Народная асвета

Па-другое, як паказвае ўвесь назапашаны вопыт, скорасць святла ў вакууме мае фундаментальнае, пэўнае значэнне: ні адзін сігнал не можа распаўсюджвацца, 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 і стварэнне паскаральнікаў элементарных часціц.

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.

Нарэшце, кожны чалавек павінен мець уяўленні аб прасторы і часе, аб адносных і абсалютных з'явах, аб такіх дзіўных рэлятывісцкіх эфектах, як адноснасць адначасовасці, запавольванне часу і скарачэнне даўжыні пры руху аб'ектаў.

§ 21. Прынцып адноснасці Галілея і электрамагнітныя з'явы. Эксперыментальныя прадпасылкі спецыяльнай тэорыі адноснасці

Сістэма адліку, адносна якой усе целы знаходзяцца ў спакоі або рухаюцца з пастаяннай скорасцю, называецца *інерцыяльнай* (ІСА).

Прынцып адноснасці Галілея: ва ўсіх ІСА ўсе механічныя з'явы пры аднолькавых пачатковых умовах адбываюцца аднолькава.

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 абасаблялі фізіку Галілея і Ньютана ад фізікі Максвела і Герца, у ёй назапасілася вялікая колькасць новых навуковых фактаў. У той жа час уяўленне аб светабудове грунтавалася на **механічнай** карціне свету, заснаванай на механіцы Галілея — Ньютана (*класічнай* механіцы).

Як мы ведаем, у класічнай механіцы такія паняцці, як каардыната, скорасць, траекторыя цела, з'яўляюцца *адноснымі* — яны змяняюцца пры пераходзе ад адной ІСА да другой. У той жа час некаторыя паняцці і велічыні ў класічнай фі-

Правообладатель Народная асвета

зіцы лічыліся *абсалютнымі*. Напрыклад, як зразумелае прымалася палажэнне аб *абсалютнасці часу* (ход часу ўсюды аднолькавы). Відавочным вынікам гэтых уяўленняў з'яўляецца класічны закон складання скарасцей. Згодна з гэтым законам пры пераходзе да ІСА, якая рухаецца са скорасцю $\vec{V}$ насустрач целу, модуль скорасці цела робіцца большым на велічыню, роўную V. Гэта азначае, што ў механіцы Галілея — Ньютана не існуе максімальна магчымай (*гранічнай*) скорасці.

Такія ўяўленні ўзгадняліся як са штодзённым вопытам, так і з эксперыментамі ў механіцы, акустыцы, гідрадынаміцы і г. д.

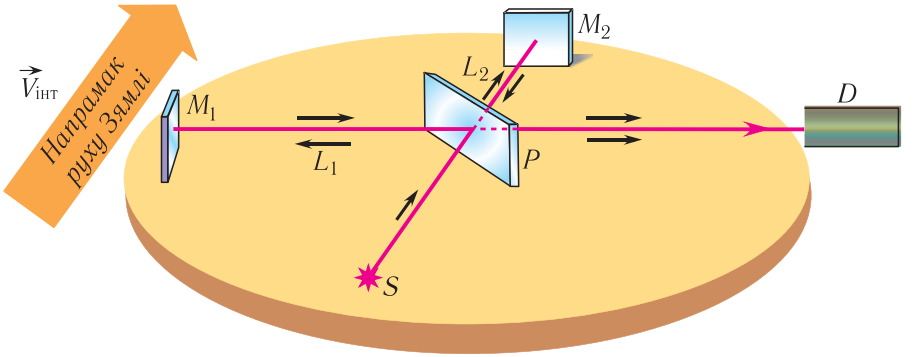
Аднак электрамагнітныя працэсы адбываюцца са скарасцямі, параўнальнымі са скорасцю святла, г. зн. значна большымі, чым скорасці руху цел, з якімі мае справу механіка. У сувязі з гэтым узнікаюць пытанні: ці будзе справядлівым прынцып адноснасці Галілея (найважнейшы прынцып класічнай механікі) для электрамагнітных з'яў? Ці залежыць скорасць святла ў вакууме ад руху крыніцы і (або) 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 або цвёрдым. Значыць, можна дапусціць, што і для распаўсюджвання святла неабходна некаторае асяроддзе. Яго назвалі *сусветным эфірам*. Пры такім падыходзе рашаючым робіцца 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 $v_г$. Дослед паказвае, што пры вымярэнні скорасці гуку прыстасаваннем, якое рухаецца адносна гэтага асяроддзя са скорасцю $\vec{V}$ насустрач гуку, атрымліваецца велічыня, роўная $v_г + V$.

А што атрымаецца для распаўсюджвання святла? Ці залежыць скорасць святла ад руху лабараторыі, у якой праводзяцца вымярэнні гэтай скорасці? У якасці такой лабараторыі, якая хутка рухаецца $\left(V \approx 30\ \frac{км}{с}\right)$, было прапанавана выкарыстаць Зямлю. Калі лічыць, што Зямля пры сваім абарачэнні вакол Сонца рухаецца праз нерухомы эфір, то ў лабараторыі, якая знаходзіцца на Зямлі, трэба чакаць так званага «эфірнага ветру» (падобна да таго, як узнікае сустрэчны паток паветра пры яздзе на матацыкле ў бязветраную пагоду). Як паўплывае «эфірны вецер» на скорасць святла ў сістэме адліку «Зямля»?

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 100. Доследм Майкельсана — Морлі

У 1887 г. амерыканскія фізікі А. Майкельсан і Р. Морлі правялі эксперымент, дакладнасць вымярэнняў у якім была дастатковай для выяўлення ўплыву «эфірнага ветру».

Разгледзім прынцыповую схему іх эксперыментальнай устаноўкі, якая атрымала назву *інтэрферометр Майкельсана* (рыс. 100). Яна складалася з аптычнага ўстройства, размешчанага на масіўнай каменнай платформе, што плавала ў басейне з ртуццю. Такая канструкцыя практычна выключала ўплыў механічных ваганняў платформы на аптычныя працэсы. Святло ад крыніцы S з дапамогай паўпразрыстай пласціны P падзялялася на два ўзаемна перпендыкулярныя прамені L_1 і L_2 (гл. рыс. 100). Прамені адбіваліся ад люстраў M_1 і M_2, а затым зводзіліся разам з дапамогай той жа самай паўпразрыстай пласціны і траплялі на дэтэктар D. У выніку складання гэтых праменяў атрымлівалася інтэрферэнцыйная карціна (пачарговыя цёмныя і светлыя палосы, якія назіраліся з дапамогай дэтэктара). Чакалася, што гэта карціна будзе істотна залежаць ад арыентацыі інтэрферометра ў адносінах да яго скорасці $\vec{V}_{інт}$ адносна «нерухомага» эфіру (гл. рыс. 100).

Сапраўды, калі адзін з пучкоў накіраваны ўздоўж скорасці $\vec{V}_{інт}$, а другі — перпендыкулярна да яе, то «эфірны вецер» будзе неаднолькавым для гэтых праменяў. Адпаведна будзе розным і час праходжання святла для праменей L_1 і L_2 ад крыніцы S да прымальніка 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 інтэрферэн-

Правообладатель Народная асвета

цыйнай 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). Ва ўсіх выпадках зрушэнне адсутнічала. Гэта было так неверагодна і падобна да таго, калі вы пры яздзе на матацыкле не адчулі б сустрэчнага паветранага патоку.

Вынікі доследу Майкельсана — Морлі і многіх іншых эксперыментаў па вымярэнні скорасці святла прывялі да выводу аб незалежнасці скорасці святла ў вакууме як ад руху прыёмніка, так і ад руху крыніцы выпраменьвання. Уяўленні аб існаванні сусветнага эфіру аказаліся неабгрунтаванымі.

Дадзены факт быў адной з вялікіх загадак фізікі канца XIX — пачатку XX ст. Выявілася яўная супярэчнасць паміж эксперыментам і класічнымі ўяўленнямі.

Так, згодна з класічным законам складання скарасцей пры пераходзе ад адной ІСА да другой да скорасці святла павінна вектарна дадавацца скорасць руху гэтых ІСА адна адносна другой. Аднак эксперымент упарта сцвярджаў, што скорасць святла ў вакууме пастаянная і ва ўсіх ІСА аднолькавая.

Гэта быў выклік механічнай карціне свету, якая складвалася вякамі.

Выдатныя вучоныя таго часу (А. Пуанкарэ, Г. А. Лорэнц і інш.) прапанавалі шэраг карысных ідэй для тлумачэння гэтай супярэчнасці. Аднак рашаючы крок быў зроблены ў 1905 г. 25-гадовым 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 доследу Майкельсана — Морлі, але і дала 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 скарасцей ў класічнай механіцы.
4. Апішыце эксперымент Майкельсана — Морлі.
5. У чым заключаецца супярэчнасць паміж класічным законам складання скарасцей і данымі эксперыментаў па вымярэнні скорасці святла?
6. Якую ролю адыграў эксперымент Майкельсана — Морлі ў развіцці фізікі?

Правообладатель Народная асвета

§ 22. Пастулаты спецыяльнай тэорыі адноснасці. Адноснасць адначасовасці

Фундаментальнае сцверджанне, якое складае аснову тэорыі і прымаецца без доказу, называецца *пастулатам* (аксіёмай). У фізіцы пастулат, як правіла, з'яўляецца абагульненнем эксперыментальных фактаў.

Як адзначалася ў папярэднім параграфе, фізіка сутыкнулася з супярэчнасцю паміж пастаянствам скорасці святла ў вакууме і класічным законам складання скарасцей. Праілюструем гэту праблему на простым прыкладзе: аўтамабіль рухаецца са скорасцю $\vec{V}$ насустрач праменю пражэктара. Згодна з класічным законам складання скарасцей у сістэме адліку «аўтамабіль» скорасць святла павінна быць роўнай $c + V$. Аднак вынікі эксперыментаў сведчаць: ва ўсіх ІСА скорасць святла ў вакууме роўна c.

Для пераадолення названай супярэчнасці давялося 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 аднолькава.

Дадзены пастулат уяўляе сабой абагульненне механічнага прынцыпу адноснасці на ўсе фізічныя з'явы. Ён сведчыць аб тым, што ніякімі эксперыментамі, праведзенымі ўнутры ІСА, немагчыма вызначыць, рухаецца яна ці знаходзіцца ў спакоі.

Уявім сабе вагон, які рухаецца раўнамерна і прамалінейна без штуршкоў і пагойдванняў. Ці можна вызначыць факт руху вагона з дапамогай эксперыментаў (механічных, электрамагнітных і любых іншых), якія праводзяцца ўнутры яго? Увесь назапашаны ў фізіцы вопыт 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 было сказана, гэты пастулат поўнасцю адпавядае вынікам шматкратна праведзеных эксперыментаў, але супярэчыць класічнаму закону складання скарасцей.

Правообладатель Народная асвета

Эйнштэйн вырашыў гэту супярэчнасць, правёўшы глыбокі аналіз уяўленняў аб часе і прасторы.

У аснове гэтага аналізу знаходзіцца паняцце *падзея*. Пад падзеяй разумеюць некаторую з'яву, якая адбываецца ў пэўным пункце прасторы і ў пэўны момант часу. Паняцце «падзея» з'яўляецца ідэалізацыяй рэальнай з'явы, якая адбываецца вельмі хутка ў вельмі нязначнай вобласці прасторы. Прыкладам такой падзеі можа быць успышка святла, стрэл гарматы, саўдары дзвюх часціц, перасячэнне спартсменам лініі фінішу і г. д. Для характарыстыкі часу і месца падзеі ў пэўнай ІСА дастаткова паказаць тры яе каардынаты і момант часу.

Падзеі, якія адбыліся ў адзін і той жа момант часу, называюцца *адначасовымі*. У класічнай фізіцы прымалася палажэнне аб *абсалютнасці адначасовасці*: калі дзве падзеі адбываліся адначасова ў некаторай ІСА, то яны адначасовы і ў любой іншай ІСА.

Эйнштэйн звярнуў увагу на тое, што *абсалютнасць адначасовасці* зусім не відавочная. Для вырашэння пытання аб адначасовасці (або неадначасовасці) дзвюх падзей, якія адбываюцца ў розных месцах некаторай ІСА, неабходна ў кожным месцы мець гадзіннікі, што знаходзяцца ў спакоі адносна гэтай ІСА і *сінхранізаваныя* паміж сабой. Толькі тады можна вырашыць пытанне аб адначасовасці падзей адносна дадзенай ІСА.

Рыс. 101. Сінхранізацыя гадзіннікаў

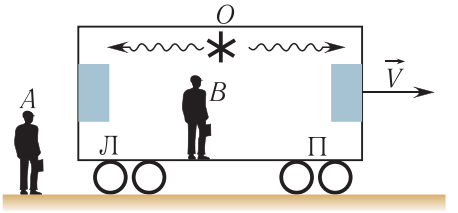
Працэдура сінхранізацыі павінна грунтавацца на надзейна праверaных фізічных законах. Эйнштэйн прапанаваў наступны спосаб. Няхай у пункце a знаходзіцца гадзіннік A, а ў пункце b — гадзіннік B (рыс. 101). Светлавы сігнал ідзе з пункта a ў пункт b, імгненна адбіваецца ў гэтым пункце і вяртаецца ў пункт a. Паколькі скорасць святла пастаянная, то гадзіннік A і гадзіннік B трэба лічыць сінхранізаванымі, калі выконваецца роўнасць:

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2, \qquad (1)$$

дзе t_1 — паказанне гадзінніка A ў момант старту сігналу з пункта a, t_2 — паказанне гадзінніка B у момант прыходу сігналу ў пункт b, t_3 — паказанне гадзінніка A ў момант вяртання сігналу ў пункт a. Выкарыстаўшы ўмову (1), можна правесці сінхранізацыю для любой пары гадзіннікаў, якія знаходзяцца ў спакоі ў некаторай ІСА. Ход такой сукупнасці сінхранізаваных гадзіннікаў і ёсць *ход часу ў дадзенай ІСА*.

Правообладатель Народная асвета

Цяпер можна прыступіць да праверкі абсалютнасці (або адноснасці) адначасовасці. Разгледзім магчымы эксперымент з вагонам і двума назіральнікамі, адзін з якіх (A) стаіць на платформе, а другі (B) знаходзіцца ў вагоне (рыс. 102).



Рыс. 102. Адноснасць адначасовасці

Няхай у цэнтры вагона ў пункце O размешчана крыніца святла (гл. рыс. 102), а правая і левая сценкі вагона абсталяваны фотаэлементамі (П і Л), якія дазваляюць вызначаць момант прыходу светлавога сігналу. Зразумела, што калі светлавая ўспышка адбудзецца пасярэдзіне *нерухомага* вагона, то светлавы сігнал будзе зарэгістраваны фотаэлементамі П і Л адначасова як па гадзінніку, што знаходзіцца ў вагоне, так і па гадзінніку ІСА, звязанай з платформай.

Няхай цяпер вагон *рухаецца* ўправа раўнамерна і прамалінейна (гл. рыс. 102) са скорасцю V. З пункту гледжання назіральніка B, для якога вагон паранейшаму знаходзіцца ў спакоі, светлавыя сігналы ад успышкі ў пункце O дасягнуць фотаэлементаў П і Л адначасова.

Іншую карціну бачыць назіральнік A. Адносна яго вагон рухаецца. У выніку гэтага правая сценка вагона аддаляецца ад таго месца, дзе адбылася ўспышка, а левая — набліжаецца да яго. Значыць, адносна платформы святлу давядзецца прайсці ад месца ўспышкі O да фотаэлемента Л меншы шлях, чым ад O да фотаэлемента П. Пры гэтым, згодна з другім пастулатам, скорасць святла адносна платформы роўна c і для сігналу, што рухаецца ўправа, і для сігналу, што рухаецца ўлева. У выніку святло спачатку дойдзе да фотаэлемента Л і толькі потым — да фотаэлемента П . Для назіральніка A гэтыя падзеі неадначасовыя.

Хто ж з назіральнікаў мае рацыю? Маюць рацыю абодва. **Падзеі, адначасовыя ў адной ІСА, могуць быць не адначасовымі ў другой ІСА, якая рухаецца адносна першай.**

Такім чынам, *адначасовасць падзей — паняцце адноснае*. Адзначым аднак, што адначасовыя падзеі, якія адбыліся ў адным і тым жа месцы, адначасовыя ў любой ІСА. Іх адначасовасць абсалютная.

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?
6. Якія падзеі трэба лічыць адначасовымі?
7. Што разумеецца пад адноснасцю адначасовасці?

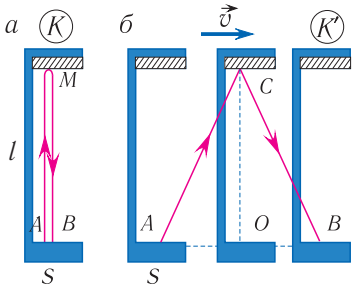
Правообладатель Народная асвета

§ 23. Прастора і час у спецыяльнай тэорыі адноснасці

Вызначэнне таго факта, што адначасовасць адносная, прымусіла па-новаму паглядзець на ўласцівасці прасторы і часу. Як змяняюцца ўласцівасці прасторы і часу пры скарасцях, блізкіх да скорасці святла? Дзе і як гэта неабходна ўлічваць?

Разгледзім два эфекты СТА: эфект запавольвання часу і эфект скарачэння даўжыні.

Эфект запавольвання часу. Здаецца відавочным, што прамежак часу паміж дзвюма падзеямі не залежыць ад таго, ці вымераны ён гадзіннікам, што знаходзіцца ў спакоі або што рухаецца. Няхай, напрыклад, удзельнік аўтагонкі вымераў па гадзінніку, што знаходзіцца ў яго аўтамабілі, прамежак часу ад старту да фінішу. Ён не сумняваецца, што вынік будзе такім самым і ў судзейскай брыгады. А ці адрозніваюцца гэтыя вынікі на самай справе?



Рыс. 103. Светлавы гадзіннік

Уявім і разгледзім просты эксперымент. Замацуем лямпу S і люстра M на процілеглых канцах жорсткага стрыжня, даўжыня якога l (рыс. 103). Лямпа S дае кароткатэрміновую ўспышку (падзея A). Святло адбіваецца ад люстра M і вяртаецца назад (падзея B) (гл. рыс. 103, *а*). Няхай стрыжань рухаецца ўправа з пастаяннай скорасцю $\vec{v}$, перпендыкулярнай да стрыжня (гл. рыс. 103, *б*).

У сістэме адліку K', якая рухаецца разам са стрыжнем (у яго «ўласнай» ІСА, гл. рыс. 103, *а*) падзеі A і B адбываюцца ў адным і тым жа месцы. Прамежак часу τ паміж гэтымі падзеямі, вымераны гадзіннікам сістэмы K', называюць прамежкам *уласнага* часу. Відавочна, што $\tau = \frac{2l}{c}$.

Знойдзем цяпер прамежак часу Δt паміж гэтымі падзеямі па гадзінніку сістэмы K, адносна якой стрыжань рухаецца («лабараторнай» ІСА). Велічыню Δt называюць прамежкам *лабараторнага* часу.

З пункту гледжання лабараторнай сістэмы K падзеі A і B адбываюцца ў розных месцах (гл. рыс. 103, *б*). Згодна з гэтым рысункам за час Δt святло праходзіць шлях $AC + BC$, роўны

$$s = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{AB}{2}\right)^2}. \qquad (1)$$

Правообладатель Народная асвета

Адносна сістэмы K стрыжань рухаецца са скорасцю v, а святло — са скорасцю c.

Таму $AB = v\Delta t$, $s = c\Delta t$ і роўнасць (1) прыме выгляд

$$c\Delta t = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2},$$

адкуль $\Delta t = \dfrac{2l}{c\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$.

Параўнаўшы Δt і τ, атрымаем:

$$\tau = \Delta t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (2)$$

З суадносіны (2) вынікае, што прамежак уласнага часу τ паміж дзвюма падзеямі заўсёды меншы, чым прамежак часу Δt паміж гэтымі ж падзеямі па гадзінніку лабараторнай ІСА. Гэты эфект называюць **рэлятывісцкім запавольваннем часу**.

Сувязь (2) паміж уласным і лабараторным часам запісваюць таксама ў выглядзе

$$\tau = \frac{\Delta t}{\gamma},$$

дзе каэфіцыент $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ называецца *лорэнцавым множнікам*. Пры ўсіх значэннях скорасці $0 < v < c$ множнік $\gamma > 1$.

Рэлятывісцкае запавольванне часу заключаецца ў тым, што ўласны час у γ разоў меншы, чым лабараторны.

Як вызначаюцца паняцці *ўласнага* і *лабараторнага* часу ў агульным выпадку?

Уласным часам τ з'яўляецца прамежак часу паміж дзвюмя падзеямі, вымераны гадзіннікам той ІСА, адносна якой гэтыя падзеі адбыліся ў адным і тым жа месцы. Уласны час можна заўсёды вымераць *адным гадзіннікам*.

Прамежак часу, вымераны гадзіннікам ІСА, аднасна якой падзеі адбыліся ў розных месцах, мы называем лабараторным часам. Для яго вымярэння неабходны як мінімум два гадзіннікі, якія сінхранізаваны паміж сабой.

Вернемся да прыкладу з аўтагонкамі. Прамежак часу ад старту да фінішу, вымераны па гадзінніку ў аўтамабілі, з'яўляецца *ўласным* часам, а прамежак часу паміж гэтымі падзеямі, вымераны па гадзінніку судзейскай брыгады, — *лабараторным*. Значыць, суддзі зафіксуюць час, які ў γ разоў большы, чым зафіксаваны аўтагоншчыкам. Падлічыце самастойна, ці істотнае гэта адрозненне для аўтагонак

Правообладатель Народная асвета

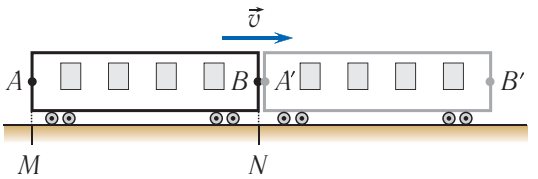
(скорасць аўтамабіля і даўжыню трасы задайце самастойна) і для «гонак» пратонаў, якія выкідвае Сонца ў час успышкі і якія рухаюцца са скорасцю $2 \cdot 10^8 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ па трасе «Сонца — Зямля».

Колькасныя ацэнкі рэлятывісцкага запавольвання часу дадзены ў табліцы 7 (с. 145).

Эфект запавольвання часу — гэта яго аб'ектыўная ўласцівасць. Пры рэлятывісцкіх скарасцях эфект можа быць вельмі значным. Аднак адзначым, што на ўяўляемым касмічным караблі, які рухаецца з рэлятывісцкай скорасцю, людзі, якія знаходзяцца ў ім, не адчуюць запавольвання жыццёвага рытму. Справа ў тым, што ў ІСА, якая рухаецца, усе працэсы (фізічныя, хімічныя, біялагічныя), што адбываюцца, будуць запавольвацца ў адной і той жа меры — усе яны будуць адбывацца ў адпаведнасці з ходам уласнага часу гэтай ІСА.

З-за эфекту рэлятывісцкага запавольвання часу ход гадзіннікаў на арбітальных спутніках адрозніваецца ад зямнога на некалькі дзясяткаў мікрасекунд за суткі. Гэта адрозненне ўлічваецца ў спутнікавых сістэмах навігацыі. Без такога ўліку яны не забяспечвалі б неабходнай дакладнасці пазіцыяніравання аб'ектаў.

Эфект скарачэння даўжыні. Няхай вагон AB рухаецца адносна платформы з пастаяннай скорасцю v (рыс. 104). Чаму роўна даўжыня вагона, які рухаецца, з пункту гледжання інерцыяльнай сістэмы адліку, звязанай з платформай?



Рыс. 104. Скарачэнне даўжыні

Не спыняючы вагон, нанясём на платформу меткі M і N (гл. рыс. 104) так, каб метка M знаходзілася пад пунктам A вагона, а метка N — пад пунктам B у адзін і той жа момант часу *па гадзінніку платформы*. Даўжыню вагона, што рухаецца ў сістэме адліку «платформа», *вызначым* як адлегласць l паміж гэтымі меткамі ($l = MN$). Згодна са звычайным уяўленнем пры любой скорасці v даўжыня l і *ўласная* даўжыня вагона l_0 (г. зн. даўжыня вагона ў той сістэме адліку, у якой ён знаходзіцца ў спакоі) роўныя паміж сабой.

Рэлятывісцкая теорыя сцвярджае, што гэта не так. Згодна з СТА даўжыні l і l_0 звязаны суадносінай:

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}. \qquad (3)$$

Правообладатель Народная асвета

З пункту гледжання нерухомага назіральніка цела, што рухаецца, скарачаецца ў напрамку свайго руху ў $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ разоў.

Гэта з'ява называецца **лорэнцавым (або рэлятывісцкім) скарачэннем даўжыні**. Заўважым, што пры гэтым *папярочныя памеры* цела (г. зн. вымераныя ўздоўж восей, перпендыкулярных да напрамку руху) *не змяняюцца*. Пастаянства папярочных памераў мы выкарыстоўвалі пры вывадзе формулы (2).

Для ацэнкі эфекта лорэнцава скарачэння можна выкарыстаць табліцу 7. Яе даныя сведчаць аб тым, што пры разліках з дакладнасцю 0,5 % для скарасцей $v < 0{,}1c$ няма неабходнасці прымяняць рэлятывісцкія формулы.

Табліца 7. **Скарачэнне даўжыні і запавольванне часу**

$\frac{v}{c}\cdot 100\,\%$	$\frac{l_0}{l} = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
10,00	1,005
50,00	1,155
80,00	1,667
90,00	2,294
99,00	7,090
99,90	22,36
99,99	70,71
99,999	223,6

Выведзем суадносіну (3). Уявім, што пры праходжанні пункта вагона B над меткай N (гл. рыс. 104) адбываецца кароткатэрміновая ўспышка чырвонага колеру (падзея *1*), а затым пры праходжанні пункта A над меткай N — сіняга колеру (падзея *2*). З пункту гледжання ІСА «платформа» гэтыя падзеі адбыліся ў адным і тым жа месцы — там, дзе нанесена метка N. Значыць, час, які прайшоў паміж чырвонай і сіняй успышкай у гэтай ІСА, з'яўляецца прамежкам уласнага часу τ. Яго можна вымераць адным гадзіннікам, што знаходзіцца на платформе каля меткі N (гл. рыс. 104).

З пункту гледжання ІСА «вагон» падзеі *1* і *2* адбыліся ў розных месцах: чырвоная ўспышка — у пункце B вагона, сіняя — у пункце A. Час, які прайшоў паміж гэтымі падзеямі ў ІСА «вагон», з'яўляецца прамежкам лабараторнага часу Δt. Згодна з формулай (2) $\frac{\tau}{\Delta t} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$.

Адносна ІСА «платформа» пункт A вагона за час τ прайшоў шлях $MN = l = v\tau$. Адносна ІСА «вагон» метка N за час Δt — шлях $BA = l_0 = v\Delta t$. Такім чынам, $\frac{l}{l_0} = \frac{\tau}{\Delta t} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$, што і трэба было даказаць.

Правообладатель Народная асвета

1. Якая сістэма адліку называецца ўласнай? Якая — лабараторнай?
2. Што называецца ўласным часам? Лабараторным часам? Які з іх заўсёды можна вымераць адным гадзіннікам?
3. Што называецца ўласнай даўжынёй?
4. У чым заключаюцца рэлятывісцкія эфекты запавольвання часу і скарачэння даўжыні?

Прыклад рашэння задачы

Вызначыце модуль скорасці v, з якой павінен рухацца касмічны карабель, калі з пункту гледжання назіральніка на Зямлі ход часу на ім запаволіўся ў $k = 1{,}5$ раза. Скорасць распаўсюджвання святла ў вакууме $c = 3{,}00 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Дадзена:

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

$k = 1{,}5$

v — ?

Рашэнне

З формулы запавольвання часу:

$$\tau = \Delta t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

дзе Δt — прамежак часу, вымераны на Зямлі, τ — адпаведны яму прамежак часу, вымераны на караблі, атрымаем:

$$\frac{\Delta t}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = k.$$

З гэтага выразу знаходзім модуль скорасці руху карабля:

$$v = c\sqrt{1 - \frac{1}{k^2}};\quad v = 3{,}00 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{(1{,}5)^2}} = 2{,}24 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Адказ: $v = 2{,}24 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Практыкаванне 18

1. Касмічны карабель пралятае міма вас са скорасцю, модуль якой $v = 0{,}80\,c$. Па вашых вымярэннях яго даўжыня $l = 90$ м. Вызначыце ўласную даўжыню l_0 касмічнага карабля.

2. Стрыжань рухаецца ў падоўжным напрамку з пастаяннай скорасцю адносна ІСА. Вызначыце модуль скорасці v руху стрыжня ў гэтай ІСА, калі даўжыня стрыжня ў ёй у $\eta = 1{,}66$ разоў меншая за яго ўласную даўжыню.

3. Вызначыце час жыцця τ нестабільнай часціцы, што знаходзіцца ў спакоі адносна назіральніка, калі пры яе руху са скорасцю, модуль якой $v = 0{,}95\,c$, ён роўны $\Delta t = 6{,}0$ мкс.

Правообладатель Народная асвета

4. Найбліжэйшая да Зямлі зорка α-Цэнтаўра знаходзіцца на адлегласці $l = 4{,}00$ светлавых гадоў (1 светлавы год — гэта адлегласць, якую праходзіць свет у вакууме за адзін год). З якой па модулі скорасцю v павінен ляцець касмічны карабель, які стартаваў з Зямлі, каб даляцець да гэтай зоркі за $\tau = 3{,}00$ гады па гадзінніках спадарожнікаў? Якой будзе здавацца працягласць Δt палёту назіральніку на Зямлі?

5. Вызначыце час жыцця τ нестабільнай часціцы, якая рухаючыся са скорасцю $v = 0{,}80\,c$ праляцела ад месца свайго нараджэння да пункта распаду адлегласць $l = 560$ м.

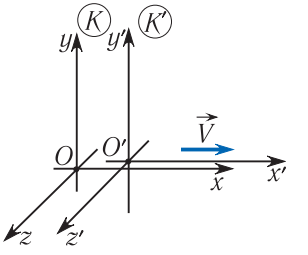
6. Вызначыце перыметр P фігуры ў сістэме адліку назіральніка, калі ён рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 0{,}75\,c$, у напрамку, паралельным адной са старон квадрата, уласная даўжыня стараны якога $a = 20$ см.

7. Вызначыце плошчу S квадрата, уласная даўжыня стараны якога $a = 1{,}0$ м, што рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 0{,}80\,c$, у напрамку, паралельным адной са старон.

8. Вы задумалі адправіцца ў касмічны палёт да зоркі, аддаленай ад Зямлі на адлегласць $l_0 = 65$ светлавых гадоў. З якой па модулі скорасцю v неабходна ляцець, каб гэта адлегласць з пункту гледжання зямнога назіральніка скарацілася да $l = 20$ светлавых гадоў?

§ 24. Пераўтварэнні Галілея. Пераўтварэнні Лорэнца. Рэлятывісцкі закон складання скарасцей

Няхай у пачатковы момант часу восі каардынат дзвюх інерцыяльных сістэм адліку K і K' супадаюць, а сістэма K' рухаецца адносна K са скорасцю $\vec{V}$, накіраванай уздоўж восі Ox (рыс. 105). Няхай з пункту гледжання сістэмы K некаторая падзея адбылася ў момант часу t у пункце з каардынатамі x, y, z. Чаму роўны каардынаты x', y', z' і момант часу t' гэтай падзеі ў сістэме K'?



Рыс. 105. Рух ІСА K' адносна ІСА K

У рамках класічных уяўленняў аб прасторы і часе адказ відавочны:

$$x' = x - Vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t, \qquad (1)$$

дзе V — модуль скорасці руху сістэмы K' адносна сістэмы K.

Суадносіны (1) называюцца **пераўтварэннямі Галілея**. Яны адлюстроўваюць абсалютнасць часу ў класічнай механіцы ($t' = t$) і адпавядаюць кла-

Правообладатель Народная асвета

січным уяўленням аб нязменнасці памераў цел пры пераходзе ад адной ІСА да другой.

Зразумела, што пераўтварэнні Галілея супярэчаць СТА, у якой і час, і даўжыня могуць змяняцца пры пераходзе ад адной ІСА да другой. Пры ўліку эфектаў рэлятывісцкага запавольвання часу і скарачэння даўжынь замест пераўтварэнняў Галілея (1) атрымаюцца суадносіны:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \qquad (2)$$

Яны былі адкрыты нідэрландскім фізікам Хендрыкам Лорэнцам і называюцца **пераўтварэннямі Лорэнца**. Адзначым, што *пры малых скарасцях ($V \ll c$) пераўтварэнні Лорэнца пераходзяць у пераўтварэнні Галілея, справядлівыя ў класічнай механіцы*. Да гэтага выводу лёгка прыйсці, параўнаўшы формулы (1) і (2).

З дапамогай пераўтварэнняў Лорэнца можна атрымаць *рэлятывісцкі закон складання скарасцей*. Прывядзём без выводу формулу, якая выражае гэты закон для простага прыватнага выпадку. Няхай некаторы аб'ект (цела, часціца, светлавы імпульс і г. д.) рухаецца адносна сістэмы K са скорасцю $\vec{v}$ насустрач сістэме K' (так што вектары $\vec{v}$ і $\vec{V}$ маюць процілеглыя напрамкі). Тады, згодна з СТА, модуль скорасці гэтага аб'екта адносна сістэмы K' будзе роўны:

$$v' = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}}. \qquad (3)$$

Па формуле (3) лёгка знайсці, што светлавы імпульс, для якога $v = c$, будзе мець адносна K' скорасць

$$v' = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = c\frac{c + V}{c + V} = c$$

пры любым магчымым значэнні V ($0 \leqslant V < c$). Лёгка праверыць таксама, што, нават калі і скорасць V сістэмы K', і скорасць v цела, што рухаецца насустрач ёй, блізкія да скорасці святла c, па формуле (3) атрымаецца: $v' < c$. Значыць, рэлятывісцкі закон складання скарасцей знаходзіцца ў поўным узгадненні са сцвярджэннем, што **скорасць святла c у вакууме з'яўляецца гранічнай скорасцю руху матэрыяльных аб'ектаў і распаўсюджвання сігналаў.**

Правообладатель Народная асвета

Заўважым, што пры $V \ll c$, $v \ll c$ рэлятывісцкая формула (3) пераходзіць у суадносіну $v' = v + V$, якая вынікае з закону складання скарасцей Галілея.

1. Чым адрозніваюцца пераўтварэнні Лорэнца ад пераўтварэнняў Галілея?
2. Пры якіх умовах пераўтварэнні Лорэнца пераходзяць у пераўтварэнні Галілея?
3. Запішыце рэлятывісцкі закон складання скарасцей. Як на яго падставе зрабіць вывад аб існаванні гранічнай скорасці?
4. Як з пераўтварэнняў Лорэнца вывесці эфект адноснасці адначасовасці? Эфект запавольвання часу? Эфект скарачэння даўжыні?

§ 25. Элементы рэлятывісцкай дынамікі. Узаемасувязь масы і энергіі

Змяненне ўяўленняў аб уласцівасцях прасторы і часу прывяло да выяўлення цеснай узаемасувязі паміж масай і энергіяй і да змянення законаў дынамікі. Чым законы рэлятывісцкай дынамікі адрозніваюцца ад законаў дынамікі Ньютана?

Неабходнасць змянення дынамікі відавочная хоць бы з таго, што згодна з законам Ньютана любое цела можна ў прынцыпе разагнаць да любой скорасці. Прыкладзём да цела, якое знаходзіцца ў спакоі і маса якога m, пастаянную сілу $\vec{F}$. Выкарыстаўшы другі закон Ньютана, знойдзем, што да моманту часу t цела набывае скорасць $v = \frac{F}{m}t$. Значыць, 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.

Якія ж суадносіны дынамікі змяніліся пры пераходзе ў СТА, а якія — засталіся нязменнымі?

Захавалі свой выгляд законы змянення імпульсу і энергіі цела:

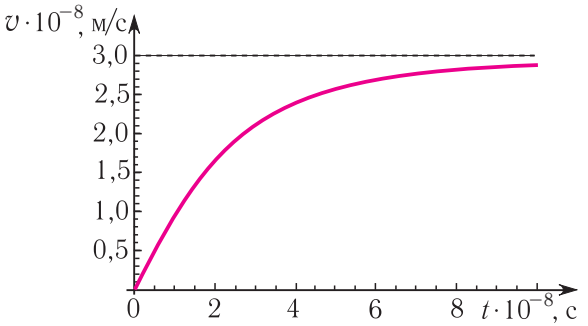
$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t; \qquad \Delta E = A, \tag{1}$$

дзе A — работа, якая выконваецца сілай $\vec{F}$. Змяніліся суадносіны, якія выражаюць залежнасць імпульсу і энергіі цела ад яго скорасці:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \qquad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \tag{2}$$

Рэшым задачу аб руху цела пад дзеяннем пастаяннай сілы па законах дынамікі СТА. Калі пры $t = 0$ цела знаходзілася ў спакоі, то згодна з першай з суадносін (1) у момант часу t модуль імпульсу часціцы будзе роўны $p = Ft$ (як і ў механіцы

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 106. Залежнасць скорасці рэлятывісцкай часціцы ад часу (m = 1,0 кг, F = 1,0 Н)

Ньютана). Але калі ў ньютанаўскай механіцы з $p = Ft$ вынікае $v = \frac{F}{m}t$ і скорасць v з цягам часу неабмежавана павялічваецца, то ў рэлятывісцкім выпадку з улікам (2) атрымліваецца:

$$Ft = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (3)$$

Выразіўшы v з формулы (3), знаходзім:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \left(\frac{mc}{Ft}\right)^2}}.$$

Графік залежнасці v ад t (рыс. 106) паказвае, што скорасць цела ніколі не дасягне гранічнага значэння c.

З дапамогай формулы (3) лёгка знайсці прамежак часу Δt, неабходны для павелічэння скорасці часціцы ад v_1 да v_2:

$$\Delta t = \frac{m}{F}\left(\frac{v_2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} - \frac{v_1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}\right).$$

Лікавыя разлікі па дадзенай формуле пры m = 1 кг, F = 1 Н, с = 299 792 458 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ паказваюць: разгон цела ад v_1= 0 да v_2 = 1 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, як і ад 100 000 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ да 100 001 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, адбудзецца практычна за адну секунду, як і па законах Ньютана. Разгон ад 100 000 000 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ да 100 000 001 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ зойме 1,2 с. Аднак, каб дабавіць яшчэ 1 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ да скорасці v_1 = 299 792 451 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, цела трэба было б разганяць больш чым тры тысячы гадоў!

Аб чым сведчыць гэты прыклад? Аб тым, што **інертнасць цела неабмежавана павялічваецца па меры набліжэння яго скорасці да скорасці святла c**.

Пры гэтым маса цела m у СТА для кожнага цела застаецца пастаяннай велічынёй, якая характарызуе яго інертнасць. Як і ў нерэлятывісцкай механіцы, лікавае значэнне масы паказвае, наколькі дадзенае цела больш інертнае, чым цела, прынятае за эталон масы.

Правообладатель Народная асвета

Згодна з суадносінамі (2), якія выражаюць залежнасць імпульсу і энергіі цела ад яго скорасці, пры скорасці $v = 0$ энергія цела роўна велічыні

$$E_0 = mc^2, \tag{4}$$

якая называецца *энергіяй спакою*.

Такім чынам, згодна з СТА *маса* цела *з'яўляецца мерай яго энергіі ў стане спакою*. Гэта ўласцівасць масы была невядомай у класічнай механіцы. У кожным целе хаваецца велізарны запас энергіі. Напрыклад, цела масай $m = 1{,}0$ г валодае энергіяй спакою

$$E_0 = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8)^2\ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 9{,}0 \cdot 10^{13}\ \text{Дж} = 2{,}5 \cdot 10^7\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Яна эквівалентная энергіі, якая вылучаецца пры згаранні 2000 т нафты. Так, дзякуючы прагрэсу фізікі ў 1905 г. чалавецтва даведалася аб практычна невычарпальных запасах энергіі, якія змяшчаюцца ў любым рэчыве.

З роўнасці (4) вынікае, што змяненне энергіі спакою цела на ΔE_0 выклікае змяненне яго масы на Δm, дзе

$$\boxed{\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.} \tag{5}$$

Сцверджанне аб тым, што *энергія спакою прапарцыянальна масе, а змяненне энергіі спакою выклікае змяненне масы*, называюць **законам узаемасувязі масы і энергіі**. Матэматычным выражэннем гэтага закону служаць формулы (4) і (5).

Формула (5) прымяняльная да ўсіх з'яў, у якіх змяняецца ўнутраная энергія рэчыва. Пры працэсах, якія адбываюцца на атамна-малекулярным узроўні, змяненні масы вельмі малыя. Так, пры поўным ператварэнні лёду ў ваду адноснае змяненне масы $\frac{\Delta m}{m} = 3{,}7 \cdot 10^{-12}$, пры награванні на $\Delta t = 200$ °С 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 $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}$, у дзясяткі мільёнаў разоў бóльшыя, чым для хімічных рэакцый.

У формуле (2) энергія E цела, што рухаецца, уключае яго энергію спакою E_0. Кінетычная энергія $E_к$ ў СТА вызначаецца як рознасць $E - E_0$:

$$E_к = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \tag{6}$$

Правообладатель Народная асвета

Калі адпаведнасць паміж рэлятывісцкім імпульсам і класічным імпульсам пры $v \ll c$ відавочная, то для кінетычнай энергіі яна патрабуе доказу. Увядзём абазначэнне

$$\theta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

і выканаем простыя пераўтварэнні:

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 \frac{1 - \theta}{\theta} = mc^2 \frac{1 - \theta^2}{\theta(1 + \theta)} = \frac{mv^2}{2} \cdot \frac{2}{\theta + \theta^2}.$$

Множнік $\frac{2}{\theta + \theta^2}$ пры малых скарасцях практычна роўны адзінцы. Значыць, пры $v \ll c$ кінетычная энергія (6), як і павінна быць, пераходзіць у нерэлятывісцкі выраз $\frac{mv^2}{2}$.

Выключаючы скорасць v з формул (2), можна атрымаць суадносіну

$$E^2 - c^2p^2 = m^2c^4. \qquad (7)$$

Формула (7) дазваляе з большай дакладнасцю вызначыць масу часціцы па выніках вымярэнняў яе энергіі і імпульсу. Такі метад шырока выкарыстоўваецца ў фізіцы элементарных часціц.

У пачатку параграфа было паказана, што, згодна з СТА, часціца не можа дасягнуць скорасці святла. Дадзеная забарона не распаўсюджваецца на часціцы, маса якіх $m = 0$. Такія *бязмасавыя* часціцы знаходзяцца заўсёды ў стане руху са скорасцю $v = c$. Энергія бязмасавай часціцы ў адпаведнасці з рэлятывісцкай суадносінай (7) прапарцыянальна яе імпульсу: $E = cp$.

Згодна з **прынцыпам 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 поўнасцю задавальняе прынцыпу адпаведнасці. Пры скарасцях $v \ll c$ яе законы пераходзяць у законы класічнай механікі.

1. Прывядзіце выразы для імпульсу і кінетычнай энергіі цела ў класічнай і ў рэлятывісцкай механіцы.
2. Пры якіх скарасцях інертнасць цела можна лічыць практычна пастаяннай, а пры якіх — нельга?

Правообладатель Народная асвета

3. Якой суадносінай звязаны паміж сабой маса цела і энергія спакою? Сфармулюйце закон узаемасувязі масы і энергіі.

4. Чаму роўна маса часціцы, калі яна рухаецца са скорасцю $v = c$?

5. Сфармулюйце прынцып адпаведнасці.

Прыклад рашэння задачы

Сонца штосекундна выпраменьвае ў прастору $\Delta E = 3{,}75 \cdot 10^{26}$ энергіі. На колькі тон памяншаецца штосекундна маса Δm Сонца з прычыны выпраменьвання? На колькі гадоў t_M «хопіць» Сонца пры такім расходзе масы, калі маса Сонца $M = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг?

Дадзена:
$\Delta E = 3{,}75 \cdot 10^{26}$ Дж
$M = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг

Δm — ? t_M —?

Рашэнне

З закону ўзаемасувязі масы і энергіі знаходзім:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}; \quad \Delta m = \frac{3{,}75 \cdot 10^{26}\ \text{Дж}}{\left(3{,}00 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2} = 4{,}17 \cdot 10^9\ \text{кг} \ \ (\text{за } 1\ \text{с});$$

$$t_M = \frac{M}{\Delta m}\Delta t = \frac{1{,}99 \cdot 10^{30}\ \text{кг}}{4{,}17 \cdot 10^9\ \text{кг}} \cdot 1\ \text{с} = 4{,}77 \cdot 10^{20}\ \text{с} = 1{,}51 \cdot 10^{13}\ \text{гадоў}.$$

Адказ: $\Delta m = 4{,}17 \cdot 10^9$ кг; $t_M = 4{,}77 \cdot 10^{20}$ с $= 1{,}51 \cdot 10^{13}$ гадоў.

Практыкаванне 19

1. Якая энергія E вылучыцца пры поўным ператварэнні ў выпраменьванне рэчыва, маса якога $m = 1{,}0$ мг?

2. Вызначыце масу m часціцы, якая знаходзіцца ў спакоі, калі яе поўная энергія $E = 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

3. Якой масе Δm рэчыва адпавядае рэлятывісцкая энергія, неабходная для таго, каб лямпа магутнасцю $P = 100$ Вт магла гарэць на працягу прамежку часу $\Delta t = 1{,}0$ года?

4. Вызначыце масу Δm, якую губляе Сонца за год, калі на паверхню Зямлі плошчай $S = 1{,}0$ см^2 штосекундна трапляе $E = 8{,}4$ Дж энергіі выпраменьвання. Адлегласць ад Зямлі да Сонца $R = 1{,}5 \cdot 10^8$ км.

5. Вызначыце модуль скорасці v руху часціцы, пры якой яе кінетычная энергія $E_к = \frac{3mc^2}{4}$.

6. Касмічны карабель масай $m = 20$ т разганяецца да скорасці, модуль якой $v = 0{,}25c$. Вызначыце яго кінетычную энергію $E_к$. На колькі працэнтаў вы памыліцеся, калі выкарыстаеце для вылічэння кінетычнай энергіі класічную формулу?

Правообладатель Народная асвета

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 4

Пастулаты спецыяльнай тэорыі адноснасці

Пастулат адноснасці: ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку ўсе фізічныя з'явы пры аднолькавых пачатковых умовах адбываюцца аднолькава.

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.

Гранічная скорасць

Скорасць святла ў вакууме з'яўляецца гранічнай скорасцю руху матэрыяльных аб'ектаў і распаўсюджвання сігналаў.

Рэлятывісцкае запавольванне часу

Прамежак уласнага часу τ паміж дзвюма падзеямі, вымераны нерухомым гадзіннікам A, меншы, чым прамежак часу Δt паміж гэтымі ж падзеямі, які прайшоў у інерцыяльнай сістэме адліку, адносна якой гадзіннік A рухаўся:

$$\tau = \Delta t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Рэлятывісцкае скарачэнне даўжыні

Лінейны памер цела, што рухаецца, скарачаецца ў напрамку яго руху: $l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, дзе l — даўжыня цела ў інерцыяльнай сістэме адліку, адносна якой яно рухаецца, а l_0 — даўжыня цела ў інерцыяльнай сістэме адліку, у якой яно знаходзіцца ў спакоі. Папярочныя памеры цела пры руху не змяняюцца.

Энергія і імпульс цела

Энергія, імпульс цела і яго інертнасць неабмежавана растуць пры набліжэнні скорасці цела да гранічнай скорасці c.

Узаемасувязь энергіі і масы

Энергія спакою E_0 цела прапарцыянальна яго масе:

$$E_0 = mc^2.$$

Змяненні масы і энергіі спакою ўзаемазвязаны:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 5
Фатоны. Дзеянні святла

Каждый век, приобретая новые идеи,
приобретает и новые глаза.
Г. Гейнэ

У канцы XIX ст. многія вучоныя лічылі, што развіццё фізікі закончылася. Законы механікі і тэорыя сусветнага прыцягення былі вядомы больш за 200 гадоў таму. Да гэтага часу была развіта і стала агульнапрызнанай тэорыя электрамагнітнага поля, асновы якой былі закладзены Д. Максвелам.

Аднак на пачатку XX ст. узніклі праблемы, якія мелі дачыненне да фізічнай прыроды выпраменьвання і рэчыва, а таксама іх узаемадзеяння. У рамках класічнай фізікі ўзніклі неадольныя супярэчнасці пры тлумачэнні эксперыментальных даных для працэсаў паглынання і выпраменьвання святла атамамі, заканамернасцей электрамагнітнага выпраменьвання нагрэтымі целамі, фотаэфекту і да т. п.

Аналіз гэтых супярэчнасцей прывёў 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 сучаснай **квантавай фізікі**, якая прыйшла на змену класічнай фізіцы пры разгляданні з'яў на атамным і ўнутрыатамным (субатамным) узроўнях. У наступных двух раздзелах (5-ы і 6-ы) разглядаюцца асноўныя пытанні квантавай фізікі.

§ 26. Фотаэфект. Эксперыментальныя законы знешняга фотаэфекту. Квантавая гіпотэза Планка

Сіла току I — скалярная фізічная велічыня, роўная адносіне зараду Δq, які прайшоў за прамежак часу Δt праз папярочнае сячэнне праваднікa, да гэтага прамежку часу: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$.

Наша зрокавае ўспрыняцце фізічных з'яў у навакольным свеце вызначаецца ўзаемадзеяннем святла з рэчывам. Уздзеянне святла на рэчыва заключаецца ў паглынанні ім светлавой энергіі, якую прыносіць выпраменьванне, г. зн. першасным працэсам з'яўляецца паглынанне святла. Такое ўзаемадзеянне, напрыклад, у сятчатцы вока прыводзіць да зрокавых адчуванняў.

Пры падзенні святла на паверхню непразрыстага прадмета частка выпраменьвання пранікае ў яго і паглынаецца, другая частка адбіваецца ад паверхні, і мы ба-

Правообладатель Народная асвета

чым прадметы ў адбітым святле. Больш цёмныя паверхні паглынаюць святло мацней, чым больш светлыя. Доля адбітага ад паверхні святла залежыць ад даўжыні хвалі.

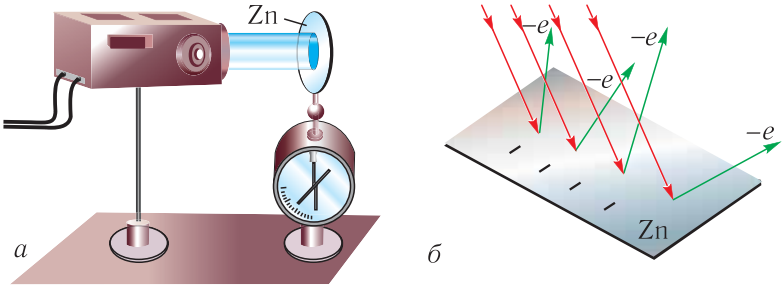
Для празрыстага асяроддзя, напрыклад шкла, пры падзенні на яго светлавой хвалі галоўным вынікам узаемадзеяння з'яўляецца яе адбіццё і праламленне, а паглынанне электрамагнітнай энергіі ў бачным дыяпазоне можна не прымаць да ўвагі. Менавіта таму асяроддзе і ўспрымаецца як празрыстае.

Мы бачым не толькі целы, якія адбіваюць або рассейваюць святло, але і целы, якія свецяцца самі, напрыклад Сонца, іншыя зоркі, полымя. Электрамагнітнае выпраменьванне вылучаюць усе целы, прычым яго інтэнсіўнасць залежыць ад тэмпературы паверхні цела. У бачным дыяпазоне спектра выпраменьванне дастатковай інтэнсіўнасці, якое дазваляе бачыць прадмет, узнікае, калі тэмпература паверхні прадмета значна большая за пакаёвую.

Узаемадзеянне электрамагнітных хваль з рэчывам прыводзіць і да іншых фізічных з'яў, вывучэнне якіх дапамагло вызначыць прыроду святла.

У 1887 г. Генрых Герц выявіў, што прабой паветранага прамежку паміж электродамі іскравога разрадніка адбываецца пры меншым напружанні, калі асвятляць адмоўна зараджаны электрод ультрафіялетавым выпраменьваннем. Далейшыя эксперыменты паказалі, што адмоўна зараджаная цынкавая пласцінка пры апрамяненні ультрафіялетавым выпраменьваннем (рыс. 107, *а*) разраджаецца. Абедзве гэтыя з'явы можна растлумачыць, мяркуючы, што пад дзеяннем падаючага выпраменьвання з металу вылятаюць адмоўна зараджаныя часціцы — электроны (рыс. 107, *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, што прыводзіць да разрыву сувязей электронаў і ядзер у атамах.



Рыс. 107. Фотаэлектрычны эфект: *а* — дзеянне ультрафіялетавага выпраменьвання на пласцінку; *б* — вылет электронаў з паверхні цынку пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання

Правообладатель Народная асвета

Калі фотаэфект суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **знешнім фотаэфектам**, а вылятаючыя электроны — **фотаэлектронамі.** Калі фотаэфект не суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **унутраным фотаэфектам**. Пры ўнутраным фотаэфекце частка электронаў, якія знаходзяцца ў рэчыве ў звязаным стане, пераходзіць у свабодны стан, павялічваючы канцэнтрацыю носьбітаў току.

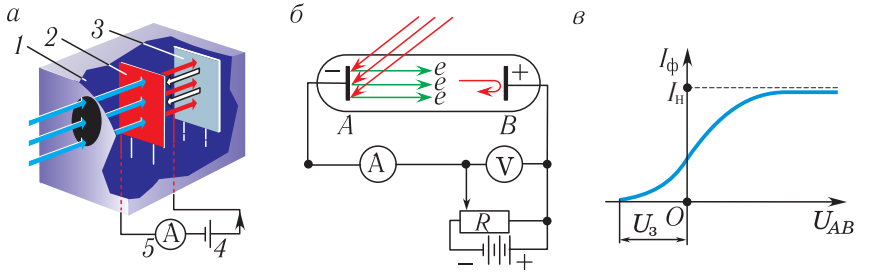
Вылучэнне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй** (**фотаэмісіяй**).

«Φοτοξ» (фотас) па-грэчаску азначае «святло».

Сістэматычнае вывучэнне фотаэфекту было праведзена ў 1888—1889 гг. рускім фізікам Аляксандрам Рыгоравічам Сталетавым.

Устаноўка для вывучэння знешняга фотаэфекту паказана на рысунку 108, *а*. У эксперыментах Сталетава ў электрычны ланцуг быў уключаны кандэнсатар, адна з абкладак якога была выраблена з меднай сеткі, а другая — у выглядзе цынкавай пласцінкі. Медная сетка была зараджана дадатна, а цынкавая пласцінка — адмоўна. Назіранні паказалі, што пад дзеяннем падаючага ўльтрафіялетавага выпраменьвання ў ланцугу ўзнікае электрычны ток. Гэты ток называецца **фототокам**.

Змяняючы напружанне U паміж пласцінамі A і B з дапамогай рэастата (рыс. 108, *б*), Сталетаў даследаваў залежнасць сілы фототоку $I_ф$ ад напружання U (вольт-амперную характарыстыку). Як відаць з паказанай на рысунку 108, *в* залежнасці, нават пры адсутнасці рознасці патэнцыялаў паміж пласцінамі ў ланцугу праходзіць фототок. Паколькі скорасці электронаў, якія вылучаюцца катодам, розныя як па модулі, так і па напрамку, то не ўсе яны пры малых



Рыс. 108. Вывучэнне знешняга фотаэфекту: *а* — від устаноўкі: *1* — герметычны корпус; *2* — медная сетка; *3* — цынкавая пласцінка; *4* — крыніца току; *5* — амперметр; *б* — электрычная схема зняцця вольт-амперпай характарыстыкі $I(U)$; *в* — вольт-амперная характарыстыка ўстаноўкі

Правообладатель Народная асвета

значэннях напружання могуць дасягнуць анода. Пры павелічэнні напружання сіла фотатоку павялічваецца да некаторага максімальнага значэння $I_н$, якое называецца **фотатокам насычэння**. Яно вызначаецца пры такім значэнні напружання, пры якім усе электроны, вылучаемыя катодам, дасягаюць анода. Далейшае павелічэнне напружання не прыводзіць да росту сілы фотатоку. Змяненне палярнасці напружання прыводзіць да знікнення фотатоку пры напружанні $U_з$, якое называецца **затрымліваючым напружаннем**.

Для большасці рэчываў фотаэфект узнікае толькі пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання. Аднак некаторыя металы, напрыклад літый, натрый і калій, вылучаюць электроны і пры іх апраменьванні бачным святлом.

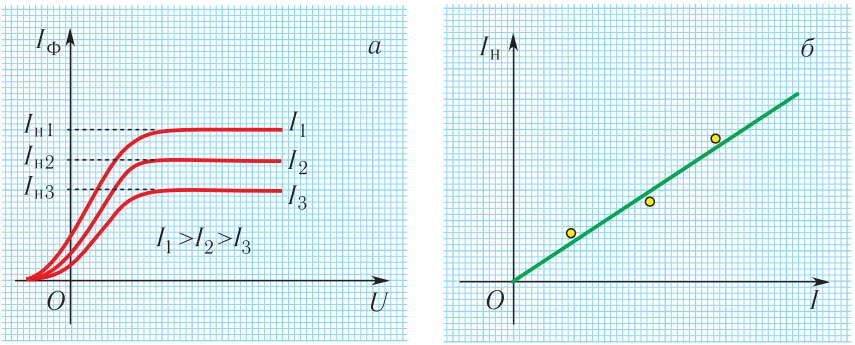
Эксперыментальна вызначаны наступныя **законы знешняга фотаэфекту**.

1. Сіла фотатоку насычэння $I_н$ прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання (першы закон фотаэфекту).

Вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту паказана на рысунках 108, *в* і 109, *а*, а залежнасць сілы фотатоку насычэння $I_н$ ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання I — на рысунку 109, *б*.

З графіка залежнасці $I_н$ ад I (графік выходзіць з пачатку каардынат), паказанага на рысунку 109, *б*, відаць, што сіла фотатоку насычэння роўна нулю ($I = 0$) толькі пры адсутнасці выпраменьвання. Інакш кажучы, фотаэфект назіраецца нават пры малых значэннях інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання.

2. Максімальная кінетычная энергія $E_к^{max}$ фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання і лінейна нарастае з павелічэннем частаты ν падаючага выпраменьвання (другі закон фотаэфекту).



Рыс. 109. Вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры розных інтэнсіўнасцях падаючага выпраменьвання (*а*); залежнасць сілы фотатоку насычэння ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання (*б*)

Правообладатель Народная асвета

Падкрэслім, што кінетычная энергія фотаэлектронаў, якія вылятаюць з фотакатода, змяняецца ў некаторым дыяпазоне ад нуля да $E_к^{max}$, паколькі фотаэлектроны частку сваёй энергіі, што атрымліваюць ад падаючага выпраменьвання, перадаюць часціцам рэчыва да вылету з яго паверхні.

На рысунку 110 паказана залежнасць $E_к^{max}$ ад частаты падаючага выпраменьвання.

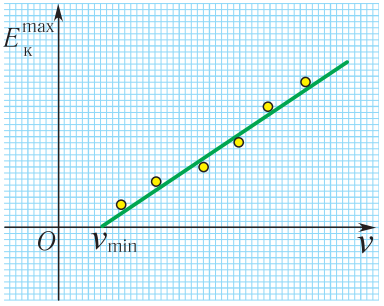
3. Для кожнага рэчыва існуе гранічная частата ν_{min}, такая, што выпраменьванне меншай частаты не можа вырываць электроны з яго паверхні (трэці закон фотаэфекту).

Гэта мінімальная частата ν_{min} называецца **чырвонай мяжой** фотаэфекту. Такая назва звязана з тым, што мінімальнай частатой выпраменьвання ў бачным дыяпазоне валодае выпраменьванне, якое адпавядае чырвонаму колеру.

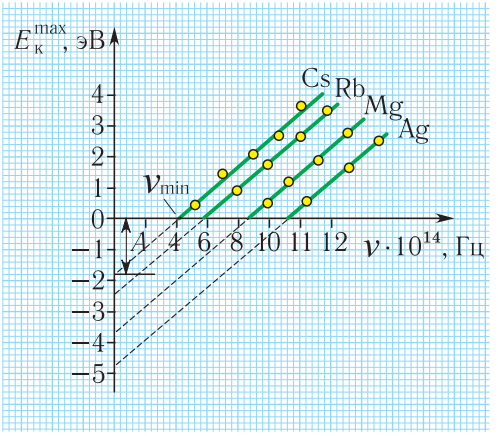
Чырвоная мяжа фотаэфекту для розных рэчываў зусім не абавязкова адпавядае чырвонаму колеру. Напрыклад, для рубідыю яна адпавядае жоўтаму колеру, для кальцыю — сіняму, а для некаторых рэчываў можа наогул знаходзіцца ў інфрачырвонай або ўльтрафіялетавай абласцях спектра.

На рысунку 111 паказаны эксперыментальныя залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў $E_к^{max}$ ад частаты падаючага выпраменьвання для цэзію, рубідыю, магнію і серабра. Як відаць з рысунка 111, эксперыментальныя прамыя паралельныя адна адной, прычым пункты перасячэння графікаў з воссю абсцыс (частот) вызначаюць чырвоныя межы фотаэфекту для кожнага з іх.

Пры частотах, большых за ν_{min}, выпраменьванне нават вельмі малой інтэнсіўнасці выклікае фотаэфект. Акра-



Рыс. 110. Графік залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў ад частаты падаючага выпраменьвання



Рыс. 111. Графікі залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў ад частаты падаючага выпраменьвання для Cs, Rb, Mg і Ag

Правообладатель Народная асвета

мя таго, паміж момантам уключэння крыніцы выпраменьвання і вылетам электронаў фактычна няма затрымкі ў часе: электроны вылятаюць з рэчыва праз прамежак часу парадку 10^{-9}—10^{-10} с пасля пачатку апраменьвання.

Трэба заўважыць, што да моманту адкрыцця фотаэфекту ў 1887 г. яшчэ нічога не было вядома аб электронах, адкрытых Д. Томсанам толькі ў 1897 г.

У 1898 г. Філіпам Ленардам і Джазефам Джонам Томсанам была вызначана адносіна зараду q часціцы, якая вылятае з паверхні металу пры фотаэфекце, да яе масы m $\left(\text{так званы ўдзельны зарад — } \frac{q}{m}\right)$ па яе адхіленню 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.

За работы па вызначэнні ўдзельнага зараду $\frac{e}{m}$, якія прывялі да адкрыцця першай элементарнай часціцы — электрона, Д. Томсан у 1906 г. быў удастоены Нобелеўскай прэміі па фізіцы.

Устаноўленыя эксперыментальна законы фотаэфекту немагчыма растлумачыць на аснове 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 2-і і 3-і законы фотаэфекту ў рамках класічнай тэорыі выпраменьвання немагчыма.

Так, напрыклад, незразумела, чаму максімальная кінетычная энергія фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання. Немагчыма таксама растлумачыць існаванне чырвонай мяжы фотаэфекту. Сапраўды, нават пры невялікай частаце падаючага выпраменьвання, але пры працяглым уздзеянні электрамагнітнай хвалі на электрон яму можна надаць энергію, неабходную для выхаду з рэчыва. Значыць, чырвоная мяжа фотаэфекту не павінна існаваць. Усе гэтыя супярэчнасці былі зняты квантавай тэорыяй.

Квантавыя ўяўленні былі ўпершыню ўведзены нямецкім фізікам Максам Планкам пры распрацоўцы тэорыі цеплавога выпраменьвання. Планк выказаў фундаментальную гіпотэзу аб тым, што энергія любой вагальнай сістэмы, якая выконвае гарманічныя ваганні з частатой ν (асцылятара), можа прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, што адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**:

Правообладатель Народная асвета

$$E_n = nE = nh\nu \ (n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots),$$

дзе n — цэлы дадатны лік, h — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які называюць **пастаяннай Планка**. Гэта фундаментальная пастаянная, значэнне якой:

$$h = (6{,}62606957 \pm 0{,}00000029) \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка, якое прымяняецца пры рашэнні задач:

$$h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Слова **квант** паходзіць ад лацінскага слова quantum — «колькі» або «як многа». Гэта слова, наогул, азначае частку, долю або непадзельную порцыю. Планк паэтычна назваў новую фундаментальную пастаянную h — «таямнічым паслом з рэальнага свету».

Значыць, асобны асцылятар можа валодаць не любой энергіяй, а толькі энергіяй, кратнай $\Delta E = h\nu$. Такім чынам упершыню з'явілася ідэя аб квантаванні энергіі.

14 снежня 1900 г. Планк паведаміў аб выніках сваёй работы на пасяджэнні Нямецкага фізічнага грамадства. Гэты дзень і 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 прапанаванай гіпотэзы Планка 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.

1. У чым сутнасць з'явы знешняга фотаэфекту? Унутранага фотаэфекту?
2. Калі і кім была адкрыта з'ява знешняга фотаэфекту?
3. Нарысуйце схему эксперыментальнай устаноўкі Сталетава і растлумачце сутнасць прароблены ім эксперыментаў.
4. Растлумачце асаблівасці вольт-амперная характарыстыкі фотаэфекту.
5. Сфармулюйце эксперыментальныя законы фотаэфекту. Якія з іх немагчыма растлумачыць з пункту гледжання хвалевай тэорыі святла?
6. Выкарыстаўшы заканамернасці з'явы рэзанансу, растлумачце, чаму згодна з хвалевай тэорыяй святла павелічэнне (памяншэнне) частаты падаючага выпраменьвання павінна прыводзіць да павелічэння (памяншэння) сілы фотатоку.
7. У чым заключаецца гіпотэза Планка?
8. Запішыце прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка.

Правообладатель Народная асвета

§ 27. Фатон. Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту

Электрон-вольт — энергія, якую набывае часціца з зарадам, роўным элементарнаму, пры перамяшчэнні паміж двума пунктамі з паскараючай рознасцю патэнцыялаў 1 В (1,0 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ 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 выпраменьвання квантаў.

Паводле гіпотэзы Эйнштэйна, монахраматычнае электрамагнітнае выпраменьванне частатой ν валодае не толькі хвалевымі ўласцівасцямі, але і ўласцівасцямі, характэрнымі 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:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \qquad (1)$$

Як вынікае з формулы (2) § 25, $\vec{p} = \vec{v}\frac{E}{c^2}$. Тады модуль імпульсу фатона ($v = c$) вызначаецца выразам:

$$p = c\frac{E}{c^2} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (2)$$

Значыць, для фатона:

$$E = pc.$$

Але згодна з СТА (гл. § 25) энергія і імпульс любой часціцы звязаны суадносінай:

$$E^2 - p^2c^2 = (mc^2)^2.$$

Пры падстаноўцы ў гэту формулу энергіі фатона $E = pc$ знаходзім, што маса фатона роўна нулю ($m = 0$).

Аказваецца, што фатон — гэта дзіўная часціца, якая валодае энергіяй $E = h\nu$, імпульсам $\vec{p}$, але з прычыны таго, што скорасць яго руху заўсёды роўна скорасці распаўсюджвання святла, яго маса роўна нулю ($m = 0$). Такія часціцы называюць *бязмасавымі*.

Фатон з'яўляецца элементарнай часціцай, толькі ў адрозненне ад іншых элементарных часціц не мае масы, а таму «асуджаны» заўсёды рухацца са скорасцю распаўсюджвання святла.

Правообладатель Народная асвета

Такім чынам, фатон валодае наступнымі ўласцівасцямі:

існуе толькі, калі рухаецца;

з'яўляецца бязмасавай часціцай ($m = 0$);

электрычна нейтральны ($q = 0$);

модуль яго скорасці руху роўны модулю скорасці распаўсюджвання святла ў вакууме ($v = c$) ва ўсіх ІСА;

яго энергія прапарцыянальна частаце адпаведнага электрамагнітнага выпраменьвання ($E = h\nu$);

модуль імпульсу фатона роўны адносіне яго энергіі да модуля скорасці руху $\left(p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}\right)$.

Разгледзім тлумачэнне эксперыментальных законаў фотаэфекту, прапанаванае Эйнштэйнам, на аснове квантавых уяўленняў. Пры асвятленні электрода электрамагнітным выпраменьваннем (гл. рыс. 109) адбываецца ўзаемадзеянне фатонаў з электронамі рэчыва. Калі энергія фатона $E = h\nu$ дастаткова вялікая, то які-небудзь з электронаў пасля паглынання фатона можа атрымаць энергію, дастатковую для таго, каб пакінуць цела, якое апрамяняецца. Электроны, якія пакінулі рэчыва, маюць некаторую скорасць, таму нават пры адсутнасці напружання паміж электродамі сіла фототоку не роўна нулю. Менавіта таму вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры напружанні, роўным нулю, не праходзіць праз нуль (гл. рыс. 109, *а*).

Для таго каб пакінуць рэчыва, электрон павінен выканаць работу супраць сіл сувязі электрона з атамамі рэчыва. Яна называецца **работай выхаду** і абазначаецца $A_{вых}$ ($A_{вых} > 0$). 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. 8).

Табліца 8. **Фотаэлектрычныя характарыстыкі некаторых рэчываў**

Рэчыва	$A_{вых}$, эВ	$\nu_{min} \cdot 10^{-14}$, Гц	$\lambda_ч$, 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

Частка энергіі паглынутага кванта, што засталася, складае кінетычную энергію электрона, які вызваліўся. Найбольшай кінетычнай энергіяй $\frac{mv_{max}^2}{2}$ будуць валодаць тыя электроны, якія паглы-

Правообладатель Народная асвета

нуць кванты святла паблізу 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:

$$\boxed{h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}.} \qquad (3)$$

Атрыманую суадносіну называюць **ураўненнем Эйнштэйна** для знешняга фотаэфекту.

Адзначым, што $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{\text{к}}^{\max}$ — гэта максімальная кінетычная энергія электрона ($v_{\max} \ll c$), якой ён можа валодаць, вылецеўшы з рэчыва. З-за розных страт энергія электрона можа быць меншай за разліковае значэнне.

Калі энергія фатонаў вельмі вялікая (для рэнтгенаўскага або γ-выпраменьвання), то скорасці фотаэлектронаў параўнальныя са скорасцю святла ($v_{\max} \approx c$). У гэтым выпадку для кінетычнай энергіі фотаэлектрона неабходна выкарыстаць рэлятывісцкі выраз:

$$E_{\text{к}}^{\max} = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_{\max}^2}{c^2}}} - 1\right).$$

Выкарыстоўваючы ўраўненне Эйнштэйна, можна растлумачыць эксперыментальныя законы фотаэфекту.

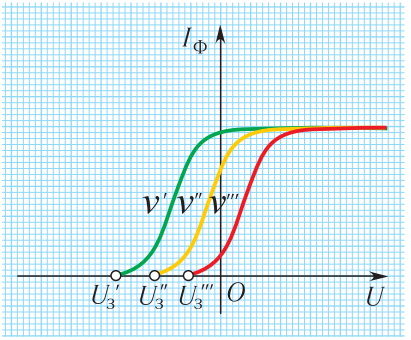
Тлумачэнне першага закону фотаэфекту. Сіла фотатоку насычэння прапарцыянальна агульнаму ліку фотаэлектронаў, якія пакідаюць паверхню металу за адзінку часу. Лік такіх фотаэлектронаў прапарцыянальны ліку фатонаў, што падаюць на паверхню за гэты ж час. Менавіта прапарцыянальна, а не роўна, паколькі частка квантаў святла паглынаецца крышталічнай рашоткай, і іх энергія пераходзіць ва ўнутраную энергію металу. Павелічэнне інтэнсіўнасці падаючага святла прыводзіць да павелічэння 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 $E_{\text{к}}^{\max}$ фотаэлектронаў нарастае лінейна, як вынікае з ураўнення Эйнштэйна для фотаэфекту (3), згодна з суадносінай:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}. \qquad (4)$$

Правообладатель Народная асвета

Вядома, што фотатокам можна кіраваць, падаючы на металічныя пласціны розныя напружанні. Калі на сістэму падаць невялікае напружанне адваротнай палярнасці, якое «замаруджвае» вылет электронаў, то сіла току паменшыцца, паколькі цяпер фотаэлектронам, акрамя работы выхаду, давядзецца выканаць дадатковую работу супраць сіл электрычнага поля.



Рыс. 112. Вольт-амперныя характарыстыкі знешняга фотаэфекту пры розных частотах падаючага выпраменьвання ($\nu' > \nu'' > \nu'''$)

Пры некаторым адмоўным напружанні $U_з$ электроны затарможваюцца і, не дасягнуўшы паверхні анода, вяртаюцца на катод. Сіла току ў ланцугу пры гэтым будзе роўна нулю (рыс. 112). Велічыню $U_з$, пры якой сіла току ў ланцугу роўна нулю, называюць *затрымліваючым напружаннем*. Значыць, уся кінетычная энергія электронаў затрачваецца на работу супраць сіл электрычнага поля. Пры гэтым максімальная кінетычная энергія электронаў выражаецца праз затрымліваючае напружанне наступным чынам:

$$E_к^{max} = eU_з. \qquad (5)$$

Тлумачэнне трэцяга закону фотаэфекту. Калі частата ν падаючага выпраменьвання меншая за гранічную частату ν_{min} ($\nu < \nu_{min}$), пры якой $h\nu_{min} = A_{вых}$, то вылучэння электронаў не адбываецца. 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:

$$\boxed{\nu_{min} = \frac{A_{вых}}{h}}. \qquad (6)$$

Яна залежыць толькі ад работы выхаду электронаў, г. зн. вызначаецца будовай металу і станам яго паверхні.

Даўжыня хвалі $\lambda_ч$ выпраменьвання, якая адпавядае чырвонай мяжы фотаэфекту, можа быць вызначана з суадносіны:

$$\lambda_ч = \frac{c}{\nu_{min}} = \frac{ch}{A_{вых}}. \qquad (7)$$

Падстаўляючы ва ўраўненне (3) выразы (5) і (6), знойдзем залежнасць затрымліваючага напружання ад частаты падаючага святла:

$$U_з(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_{min}). \qquad (8)$$

Правообладатель Народная асвета

Знаходзячы тангенс вугла нахілу $\operatorname{tg}\alpha$ прамых ліній на рысунку 111, можна з суадносіны (8) з улікам (5) вылічыць пастаянную Планка:

$$h = e\frac{U_з(\nu)}{\nu - \nu_{min}},$$

а па пунктах перасячэння працягу графікаў з восямі $E_к^{max}$ і ν — знайсці работу выхаду $A_{вых}$ і чырвоную мяжу ν_{min}.

У 1921 г. пры прысуджэнні Альберту Эйнштэйну Нобелеўскай прэміі ў рашэнні Нобелеўскага камітэта было запісана, што «прэміяй асабліва адзначаецца тлумачэнне законаў фотаэлектрычнага эфекту».

1. У чым сутнасць гіпотэзы Эйнштэйна?
2. Што называецца фатонам?
3. Пералічыце асноўныя ўласцівасці фатона.
4. Па якой формуле можна вызначыць энергію фатона? Модуль імпульсу фатона?
5. Як накіраваны імпульс фатона?
6. Пакажыце, што ўраўненне Эйнштэйна для фотаэфекту з'яўляецца вынікам закону захавання і ператварэння энергіі.
7. Пералічыце ўмовы, неабходныя для ўзнікнення фотаэфекту.
8. Што такое затрымліваючае напружанне?
9. Што называецца чырвонай мяжой фотаэфекту? Ад чаго яна залежыць?
10. Як квантавая тэорыя тлумачыць існаванне гранічнай частаты фотаэфекту?
11. Запішыце формулу для чырвонай мяжы фотаэфекту.
12. Растлумачце законы фотаэфекту, зыходзячы з квантавай тэорыі святла.

Прыклад рашэння задачы

Монахраматычнае святло даўжынёй хвалі $\lambda = 450$ нм падае на паверхню натрыю. Вызначыце: а) энергію E фатона гэтага святла; б) модуль імпульсу p фатона падаючага святла; в) чырвоную мяжу ν_{min} фотаэфекту для натрыю; г) максімальную кінетычную энергію $E_к^{max}$ фотаэлектронаў.

Дадзена:

$\lambda = 450$ нм $= 4{,}50 \cdot 10^{-7}$ м
$A_{вых} = 3{,}7 \cdot 10^{-19}$ Дж
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
$c = 3{,}0 \cdot 10^{8}\ \frac{м}{с}$

E — ? p — ? ν_{min} — ?
$E_к^{max}$ — ?

Рашэнне

а) Энергія фатона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

$$E = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}\ \frac{м}{с}}{4{,}50 \cdot 10^{-7}\ м} =$$

$$= 4{,}4 \cdot 10^{-19}\ Дж = 2{,}8\ эВ.$$

Правообладатель Народная асвета

б) Модуль імпульсу фатона:

$$p = \frac{h}{\lambda}; \quad p = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}}{4{,}50 \cdot 10^{-7}\ \text{м}} = 1{,}50 \cdot 10^{-27}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Чырвоная мяжа звязана з работай выхаду суадносінай:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}; \quad \nu_{\min} = \frac{3{,}7 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}} = 5{,}6 \cdot 10^{14}\ \text{Гц}.$$

г) З ураўнення Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту знаходзім, што максімальная кінетычная энергія электрона, які вылецеў:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}; \quad E_{\text{к}}^{\max} = 2{,}8\ \text{эВ} - 2{,}3\ \text{эВ} = 0{,}5\ \text{эВ}.$$

Адказ: а) $E = 2{,}8$ эВ; б) $p = 1{,}50 \cdot 10^{-27}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; в) $\nu_{\min} = 5{,}6 \cdot 10^{14}$ Гц; г) $E_{\text{к}}^{\max} = 0{,}5$ эВ.

Практыкаванне 20

1. Вызначыце энергію E фатона для выпраменьвання частатой $\nu = 5{,}4 \cdot 10^{14}$ Гц.

2. Вызначыце модуль імпульсу p фатона, які адпавядае выпраменьванню даўжынёй хвалі $\lambda = 600$ нм.

3. Вылічыце энергію E_1 фатона бачнага святла даўжынёй хвалі $\lambda_1 = 0{,}60$ мкм і параўнайце яе з энергіямі фатонаў ультрафіялетавага выпраменьвання даўжынёй хвалі $\lambda_2 = 0{,}252$ мкм, рэнтгенаўскага выпраменьвання $\lambda_3 = 0{,}10$ нм і γ-выпраменьвання $\lambda_4 = 0{,}10$ пм.

4. Вызначыце даўжыню хвалі λ выпраменьвання, фатон якога мае такую ж энергію, як электрон, што прайшоў паскараючую рознасць патэнцыялаў $\Delta\varphi = 4{,}1$ В.

5. Вызначыце модуль максімальнай скорасці $v_{\max}$ фотаэлектронаў, якія вылецелі з паверхні цынку пры асвятленні яго ўльтрафіялетавым выпраменьваннем даўжынёй хвалі $\lambda = 300$ нм.

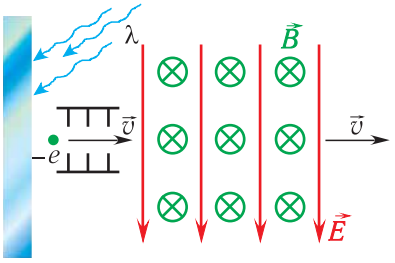
6. Вызначыце чырвоную мяжу $\nu_{\min}$ фотаэфекту для некаторага металу, калі работа выхаду электрона з яго $A_{\text{вых}} = 3{,}3 \cdot 10^{-19}$ Дж.

7. Вызначыце даўжыню хвалі λ ультрафіялетавага выпраменьвання, што падае на паверхню цынку, пры якой модуль максімальнай скорасці вылятаючых фотаэлектронаў складае $v_{\max} = 800\ \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

8. Вызначыце максімальную кінетычную энергію $E_{\text{к}}^{\max}$ і модуль максімальнай скорасці $v_{\max}$ фотаэлектрона, які вылецеў з натрыю пры апраменьванні яго ўльтрафіялетавым выпраменьваннем даўжынёй хвалі $\lambda = 200$ нм.

9. На металічную пласціну падае монахраматычнае святло даўжынёй хвалі $\lambda = 0{,}413$ мкм. Вызначыце работу выхаду $A_{\text{вых}}$, калі затрымліваючае напружанне $U_{\text{з}} = 1{,}0$ В.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 113

10. Вызначыце даўжыню хвалі λ электрамагнітнага выпраменьвання, якім апраменьваюць вальфрамавую пласцінку, калі вядома, што фотаэлектроны з максімальнай кінетычнай энергіяй $E_к^{max}$ праходзяць без адхілення вобласць аднародных узаемна перпендыкулярных электрычнага і магнітнага палёў (рыс. 113). Модуль напружанасці электрычнага поля $E = 10\ \frac{кВ}{м}$, модуль індукцыі магнітнага поля $B = 10$ мТл.

§ 28. Ціск святла. Карпускулярна-хвалевы дуалізм

Словечко громкое всегда
Из затрудненья вас выводит!
І. Гётэ «Фаўст»

Ціскам называецца скалярная фізічная велічыня, лікава роўная адносіне модуля сілы, якая дзейнічае па нармалі да пляцоўкі, да яе плошчы $p = \frac{F}{S}$. У СІ адзінкай ціску з'яўляецца 1 паскаль (1 Па): 1 Па $= \frac{1\ Н}{1\ м^2}$.

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 ўдару, так і няпругкага ўдару. А ці будзе ўзнікаць падобны эфект пры адбіцці і паглынанні святла некаторай паверхняй? Інакш кажучы, ці аказвае святло ціск на паверхню, з якой узаемадзейнічае? Пасля заканчэння пабудавання Д. Максвелам хвалевай тэорыі святла адказы на гэтыя пытанні сталі відавочнымі. Святло як электрамагнітная хваля валодае энергіяй і імпульсам і таму аказвае ціск на паверхню, на якую падае.

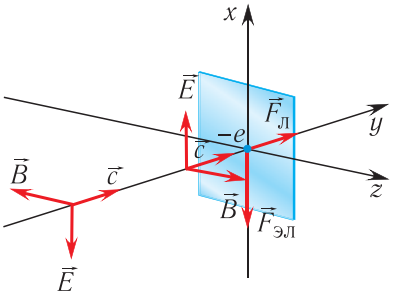
Растлумачыць ціск святла можна наступным чынам. Электрычнае поле напружанасцю $\vec{E}$ электрамагнітнай хвалі, падаючай на паверхню праваднікa, выклікае рух электронаў рэчыва пад дзеяннем электрычнай сілы ў напрамку, процілеглым $\vec{E}$. Магнітнае поле хвалі індукцыяй $\vec{B}$ дзейнічае на часціцы, што рухаюцца, з сілай Лорэнца $\vec{F}_Л$, якая ў дадзеным выпадку накіравана ўнутр рэчыва (рыс. 114) і супадае з напрамкам распаўсюджвання святла. Сумарная сіла, якая дзейнічае на ўсе электроны з боку электрамагнітнай хвалі, і ёсць сіла ціску святла.

Правообладатель Народная асвета

У 1873 г. Максвел вылічыў светлавы ціск, выкарыстаўшы распрацаваную ім тэорыю электрамагнітнага поля. Ён паказаў, што калі святло, якое падае перпендыкулярна на люстраную паверхню плошчай $S = 1$ м^2, прыносіць за прамежак часу $\Delta t = 1$ с энергію W, то яно аказвае на дадзеную паверхню ціск:

$$p_л = 2\frac{W}{c}, \qquad (1)$$

дзе c — модуль скорасці распаўсюджвання святла.



Рыс. 114. Дзеянне электрамагнітнай хвалі на электроны рэчыва

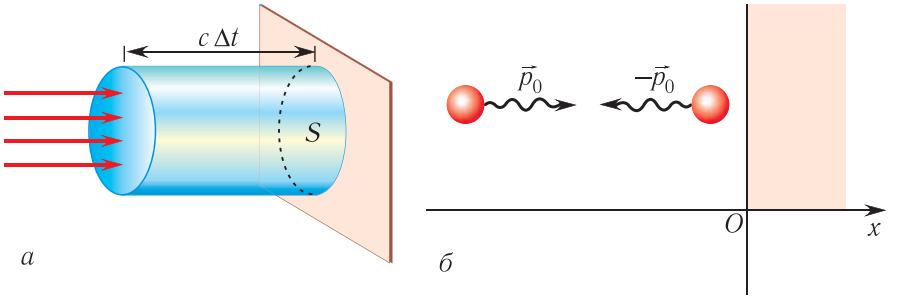
Паколькі для сонечнага выпраменьвання $W = 1370\ \frac{Вт}{м^2}$, то модуль сілы ціску, з якой сонечнае выпраменьванне дзейнічае пры нармальным падзенні на люстраную паверхню плошчай $S = 1$ м^2 $\left(F_ц = pS = 2\frac{W}{c}S\right)$, роўны $F_ц = 9{,}1 \cdot 10^{-6}$ Н $= 9{,}1$ мкН.

Пры нармальным падзенні святла на чорную (паглынаючую) паверхню модуль адпаведнай сілы ціску $F_ц = pS = \frac{W}{c}S$. Значыць, сіла, з якой сонечнае выпраменьванне дзейнічае на чорную паверхню плошчай $S = 1$ м^2, у два разы меншая, чым на люстраную, і складае $F_ц = 4{,}6 \cdot 10^{-6}$ Н $= 4{,}6$ мкН.

Ціск святла можна растлумачыць і з квантавага пункту гледжання. Разгледзім святло як паток фатонаў з энергіяй $h\nu$, якія падаюць нармальна на люстраную паверхню (рыс. 115, *а*) і прыносяць за прамежак часу $\Delta t = 1$ с на плошчу $S = 1$ м^2 энергію, роўную W.

Лік n гэтых фатонаў вызначаецца з умовы $nh\nu = W$:

$$n = \frac{W}{h\nu}.$$



Рыс. 115. Тлумачэнне ціску святла з квантавага пункту гледжання

Правообладатель Народная асвета

Пры адбіцці ад люстра фатон зведвае «пругкі» ўдар, пры якім адбываецца змяненне напрамку імпульсу фатона на процілеглы (рыс. 115, *б*). Модуль гэтага змянення:

$$\left|\Delta\vec{p}_{\text{ф}}\right| = \left|\vec{p}_0 - (-\vec{p}_0)\right| = 2\left|\vec{p}_0\right| = \frac{2h\nu}{c}.$$

Адпаведна модуль змянення імпульсу патоку фатонаў, падаючых на люстра плошчай S за прамежак часу Δt:

$$\left|\Delta\vec{p}_{\text{пат}}\right| = nS\Delta t\left|\Delta\vec{p}_{\text{ф}}\right| = \frac{W}{h\nu}S\Delta t\frac{2h\nu}{c} = \frac{2W}{c}S\Delta t.$$

Змяненне імпульсу патоку фатонаў выклікана сілай $\vec{F}$, якая дзейнічае на фатоны з боку люстра. Модуль гэтай сілы і модуль сілы, якая дзейнічае з боку патоку фатонаў (г. зн. святла) на люстра, знаходзяцца з закону змянення імпульсу:

$$\left|\vec{F}\right| = \frac{\left|\Delta\vec{p}_{\text{пат}}\right|}{\Delta t} = \frac{2W}{c}S.$$

Значыць, ціск святла на люстра:

$$p = \frac{\left|\vec{F}\right|}{S} = 2\frac{W}{c},$$

што супадае з вынікам, атрыманым Максвелам.

Пры падзенні святла на паверхню, якая поўнасцю паглынае (чорную), змяненне імпульсу фатона будзе ў 2 разы меншым, паколькі

$$\left|\Delta\vec{p}'_{\text{ф}}\right| = \left|\vec{0} - \vec{p}_0\right| = \left|\vec{p}_0\right| = \frac{h\nu}{c}.$$

Адпаведна і ціск святла ў гэтым выпадку будзе ў 2 разы меншым:

$$p' = \frac{W}{c}.$$

Няхай з поўнага ліку n фатонаў, што падаюць на адзінкавую паверхню за $\Delta t = 1$ с, адбіваецца Rn фатонаў (R называецца каэфіцыентам адбіцця), а $(1 - R)n$ фатонаў паглынаецца. Тады імпульс, які надаецца адзінцы паверхні, лікава роўны ціску і знаходзіцца па формуле:

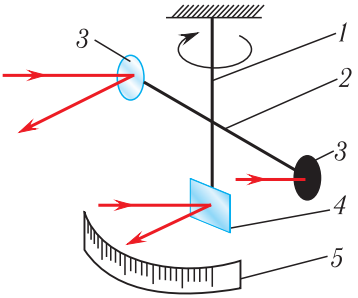
$$p = (1 - R)n\frac{h\nu}{c} + Rn\left(2\frac{h\nu}{c}\right) = n\frac{h\nu}{c}(1 + R) = \frac{W}{c}(1 + R).$$

Рускі фізік Пётр Мікалаевіч Лебедзеў у 1899 г. упершыню вымераў светлавы ціск. Ён падвесіў на тонкай нітцы каромысел з двума крыльцамі на канцах (рыс. 116), паверхня ў аднаго з якіх была зачэрненай, забяспечваючы гэтым амаль

Правообладатель Народная асвета

поўнае паглынанне ($R = 0$), а ў другога — люстранай ($R = 1$). Падвес з крыльцамі ўтвараў адчувальныя вагі, якія змяшчаліся ў пасудзіну, паветра з якой адпампоўвалася.

У доследах святло пачаргова накіроўвалася на кожнае крыльца каромысла. Пры гэтым святло практычна поўнасцю адбівалася ад люстранай паверхні і практычна поўнасцю паглыналася зачэрненай паверхняй, з прычыны чаго ціск святла на люстранае крыльца быў прыкладна ў два разы большым, чым на зачэрненае. Адпаведна, большым быў і момант сіл, які паварочваў каромысел пры падзенні святла на люстраную паверхню (гл. рыс. 116). Вымяраючы вугал павароту каромысла пад дзеяннем святла ў абодвух выпадках, можна было меркаваць аб сіле, якая дзейнічала на крыльцы, а значыць, вызначыць светлавы ціск.



Рыс. 116. Схема доследу Лебедзева: *1* — падвес; *2* — каромысел; *3* — крыльцы; *4* — люстра; *5* — шкала

Аб складанасці і дасканаласці падрыхтоўкі і правядзення вымярэнняў сведчыць той факт, што пры асвятленні крыльцаў святлом у звычайных умовах узнікаюць сілы, якія па велічыні пераўзыходзяць сілу ціску святла ў тысячы разоў. Асноўнымі з'яўляюцца сілы, якія ўзнікаюць з прычыны дзеяння канвекцыйных патокаў газу і радыеметрычнага дзеяння.

Радыеметрычнае дзеянне ўзнікае з прычыны рознасці тэмператур асветленага і неасветленага бакоў крыльца ў разрэджаным газе. Малекулы газу, якія застаюцца ў балоне, адбіваюцца ад больш нагрэтага боку з большай скорасцю, і з прычыны аддачы крыльцы імкнуцца павярнуцца ў тым жа напрамку, што і пад дзеяннем светлавога ціску. Радыеметрычнае дзеянне памяншаецца, калі прымяніць вельмі тонкія металічныя крыльцы для памяншэння рознасці тэмператур, а таксама павялічыць разрэджанне газу ў балоне.

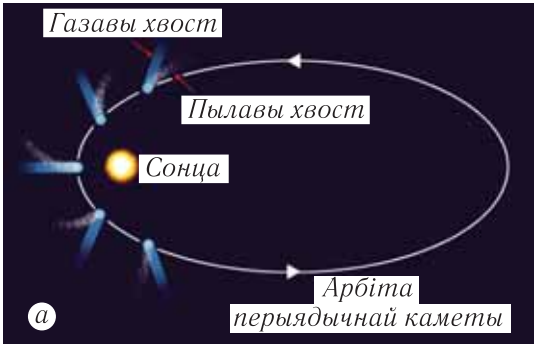
Вымярэнні Лебедзева далі велічыню светлавога ціску, якая ўзгаднялася з тэорыяй Максвела з хібнасцю да 20 %. У 1923 г. нямецкі фізік Вальтэр Герлах, выкарыстаўшы больш дасканалыя метады атрымання вакууму, паўтарыў доследы Лебедзева. Яму ўдалося атрымаць рэзультаты, якія ўзгадняліся з тэарэтычнымі значэннямі з хібнасцю да 2 %.

Факт існавання светлавога 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.

Правообладатель Народная асвета

Нягледзячы на параўнальна малое значэнне ў звычайных умовах, светлавы ціск адыгрывае значную ролю ў прыродзе: перашкаджае гравітацыйнаму сціскванню зорак, арыентуе хвасты камет у бок ад Сонца (рыс. 117), скарачае тэрмін службы штучных спадарожнікаў Зямлі з прычыны паступовага памяншэння радыуса іх арбіты. Яшчэ ў 1604 г. нямецкі астраном Іаган Кеплер растлумачыў выгнутую форму хваста каметы дзеяннем сіл светлавога ціску з боку Сонца.

У цяперашні час актыўна абмяркоўваюцца і рэалізуюцца праекты касмічных караблёў — «паруснікаў», якія будзе прымушаць рухацца «сонечны вецер».



Рыс. 117. Рух каметы вакол Сонца (*а*); камета Галея (*б*)

Яшчэ з часоў Ісаака Ньютана і Хрысціяна Гюйгенса (XVII ст.) уяўленні аб прыродзе святла былі супярэчлівымі. Адны вучоныя, на чале з Ньютанам, лічылі святло патокам часціц — карпускул, другія, услед за Гюйгенсам, дапускалі, што святло ўяўляе сабой не што іншае, як хвалі.

«Карпускула» ад лацінскага слова corpusculum — маленькая часціца.

Да пачатку XIX ст. абодва пункты гледжання абараняліся з пераменным поспехам. Так, зыходзячы з гіпотэзы аб карпускулах, можна было растлумачыць законы прамалінейнага распаўсюджвання і адбіцця святла, а такія з'явы, як інтэрферэнцыя і дыфракцыя святла, тлумачыліся толькі яго хвалевымі ўласцівасцямі.

Аднак у XX ст. было ўстаноўлена, што шмат у якіх з'явах, такіх як, напрыклад, фотаэфект, святло паводзіць сябе як сукупнасць часціц з пэўнай энергіяй і імпульсам. Адначасовае валоданне аб'ектам хвалевымі і карпускулярнымі ўласцівасцямі атрымала назву **карпускулярна-хвалевага дуалізму**.

Правообладатель Народная асвета

У адных працэсах у большай меры праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла, у іншых — карпускулярныя. Доўгі час прырода гэтага дуалізму была зусім незразумелая, і ён здаваўся штучным аб'яднаннем супярэчлівых уласцівасцей матэрыі.

Толькі пасля стварэння квантавай механікі высветлілася, што «раздваенне асобы» святла заканамернае і ўяўляе сабой праяўленне спецыфічных уласцівасцей, якімі валодае мікрасвет цалкам.

Французскі фізік Луі дэ Бройль у 1923 г. выказаў смелую гіпотэзу, што карпускулярна-хвалевы дуалізм павінен мець месца для ўсіх мікрааб'ектаў.

У сваім тэарэтычным артыкуле «Кванты святла, дыфракцыя і інтэрферэнцыя» (1923 г.) дэ Бройль упэўнена прадказаў, што «дыфракцыйныя з'явы выявяцца і ў патоку электронаў, якія праходзяць праз дастаткова малую адтуліну».

У квантавай фізіцы з кожнай матэрыяльнай часціцай звязваюць хвалю, што распаўсюджваецца ў напрамку руху часціцы, якую называюць хваляй дэ Бройля, а даўжыню гэтай хвалі — дэбройлеўскай даўжынёй хвалі. Частата ν звязана з энергіяй E часціцы суадносінай $E = h\nu$. Дэ Бройль знайшоў, што модуль імпульсу p часціцы павінен выражацца праз даўжыню яе хвалі λ_B такім жа чынам, як і ў святла:

$$p = \frac{h}{\lambda_B}. \qquad (1)$$

Гэта суадносіна «ўзаконьвае» карпускулярна-хвалевы дуалізм, паколькі ўсякаму аб'екту, які мае імпульс $\vec{p}$, незалежна ад яго прыроды, ставяць у адпаведнасць хвалевы працэс, даўжыня хвалі якога

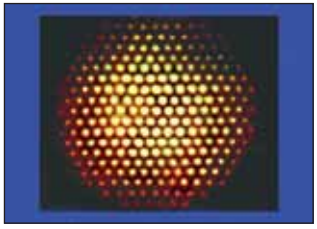
$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \qquad (2)$$

Яна таксама дазваляе вызначыць, у якіх з'явах хвалевыя ўласцівасці істотныя, а ў якіх — не. Для макраскапічных аб'ектаў іх модуль імпульсу, як правіла, вельмі вялікі. Адпаведна ў гэтым выпадку даўжыня хвалі невялікая — шмат меншая за памеры самога аб'екта, і хвалевыя ўласцівасці робяцца незаўважнымі.

Гіпотэза дэ Бройля аб наяўнасці хвалевых уласцівасцей у электрона і іншых мікрачасціц была праверана эксперыментальна.

Паколькі дыфракцыя святла назіраецца на рашотках, перыяд якіх параўнальны з даўжынёй хвалі λ, то для назірання дыфракцыі электронаў трэба выбіраць рашоткі з адпаведным перыядам. Напрыклад, кожнаму з электронаў у пучку, які прайшоў паміж абкладкамі кандэнсатара, зараджанага да напружання $U = 150$ В,

Правообладатель Народная асвета



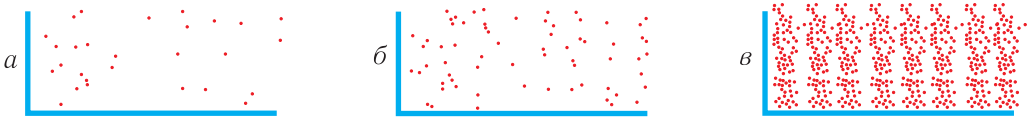
Рыс. 118. Карціна дыфракцыі электронаў на слюдзе

адпавядае энергія $W = 150$ эВ, і яго дэбройлеўская даўжыня хвалі $\lambda_B = 1 \cdot 10^{-10}$ м. Таму для выяўлення хвалевых уласцівасцей электронаў неабходна ў якасці дыфракцыйнай рашоткі выкарыстаць крышталі, што з'яўляюцца ўпарадкаванымі структурамі, адлегласць паміж атамамі якіх $d \sim 10^{-10}$ м.

У 1927 г. амерыканскія фізікі Клінтан Дэвісан і Люстэр Джэрмер упершыню назіралі дыфракцыю электронаў на крышталі нікелю.

На рысунку 118 паказана фатаграфія дыфракцыйнай карціны электронаў на слюдзе.

Сучасныя эксперыменты дазваляюць назіраць працэс утварэння дыфракцыйнай карціны пры паслядоўным павелічэнні ліку электронаў, якія праходзяць праз шчыліну, а камп'ютарнае мадэліраванне гэтага працэсу паказана на рысунку 119.



Рыс. 119. Вынікі камп'ютарнага мадэліравання з'явы дыфракцыі N электронаў на дзвюх шчылінах: *а* — $N = 27$; *б* — $N = 70$; *в* — $N = 735$

Рыс. 120. Электронны мікраскоп

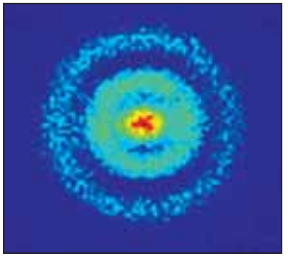
Здольнасць да інтэрферэнцыі і дыфракцыі была выяўлена не толькі ў электронаў, але і ў іншых часціц — пратонаў, нейтронаў і альфа-часціц.

Хвалевыя ўласцівасці часціц знайшлі сваё прымяненне ў электроннай оптыцы, якая займаецца даследаваннем, пабудаваннем і выкарыстаннем электронных пучкоў для атрымання відарысаў.

Так, выкарыстанне хвалевых уласцівасцей пучка электронаў дазволіла стварыць новае пакаленне мікраскопаў — *электронныя мікраскопы*, адзін з якіх паказаны на рысунку 120. Гэтыя прыборы значна пераўзыходзяць па ступені павелічэння аптычныя мікраскопы, з прычыны таго што дэбройлеўская даўжыня хвалі электронаў значна меншая за даўжыню хвалі бачнага святла.

Правообладатель Народная асвета

Ужо першы электронны прасвятляльны мікраскоп (Э. Руска, 1933 г.) дазваляў вывучаць дэталі ў дзесяць разоў меншыя, чым тыя, якія здольны распазнаваць самыя «магутныя» аптычныя мікраскопы. Далейшыя даследаванні дазволілі супрацоўнікам лабараторыі фірмы IBM у Цюрыху (Швейцарыя) Г. Бінінгу і Г. Рорэру ў 1981 г. стварыць электронны сканіруючы тунэльны мікраскоп, які дазваляў разгледзець нават «асобны» атам.



Рыс. 121. «Фатаграфія», а больш дакладна «хваляграфія», атама вадароду

У маі 2013 г. міжнародная група вучоных (Германія, Грэцыя, Нідэрланды, ЗША, Францыя) з дапамогай фотаіанізацыйнага мікраскопа сумела «сфатаграфаваць» асобны атам вадароду. Вучоным удалося атрымаць прамы відарыс самага лёгкага і самага маленькага з усіх атамаў (рыс. 121).

Дацкі фізік Нільс Бор сфармуляваў **прынцып дапаўняльнасці**, які сцвярджаў, што **для апісання ўласцівасцей матэрыі (як поля, так і рэчыва) неабходны ўлік як хвалевых, так і карпускулярных уласцівасцей.**

Такім чынам, карпускулярна-хвалевы дуалізм уласцівы не толькі электрамагнітнаму выпраменьванню, але і элементарным часціцам. На іх таксама распаўсюджваецца і прынцып дапаўняльнасці, у адпаведнасці з якім выкарыстоўваюцца як хвалевыя, так і карпускулярныя ўяўленні ў залежнасці ад канкрэтнай сітуацыі.

У 1929 г. Луі дэ Бройль за адкрыццё хвалевай прыроды электрона быў удастоены Нобелеўскай прэміі.

У 1986 г. Герду Бінінгу і Гейнрыху Рорэру сумесна з Эрнстам Руска была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за стварэнне электроннага мікраскопа.

1. Як электрамагнітная тэорыя тлумачыць ціск святла?
2. Апішыце сутнасць доследу Лебедзева па вымярэнні светлавога ціску.
3. Як растлумачыць светлавы ціск на падставе квантавых уяўленняў аб святле?
4. У чым заключаецца карпускулярна-хвалевы дуалізм святла?
5. Пералічыце з'явы, у якіх праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла; карпускулярныя (квантавыя) уласцівасці святла.
6. Чаму роўны модуль сілы F светлавога ціску, які прыходзіцца на зачэрненую паверхню плошчай $S = 1$ м^2? Сонечная пастаянная (колькасць светлавой энергіі, якая пераносіцца праз пляцоўку адзінкавай плошчы за адзінку часу) роўна $I = 1{,}37\ \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.
7. Ацаніце плошчу касмічнага ветразя, пры якім сіла цягі складзе 1 Н.

Правообладатель Народная асвета

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 5

Раздзел фізікі, які апісвае фізічныя з'явы на атамным і ўнутрыатамным (субатамным) узроўнях, называецца **квантавай фізікай**.

Энергія вагальнай сістэмы (асцылятара), якая выконвае гарманічныя ваганні з частатой ν, згодна з гіпотэзай Планка можа прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, якія адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**.

Эйнштэйн развіў гіпотэзу Планка, уявіўшы, што святло выпраменьваецца, паглынаецца і распаўсюджваецца ў выглядзе асобных порцый (квантаў).

Найменшая порцыя (квант) энергіі, якую нясе выпраменьванне частатой ν, вызначаецца па формуле:

$$E = h\nu,$$

дзе пастаянная h — фундаментальная пастаянная — **пастаянная Планка**. Яе прыбліжанае значэнне:

$$h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Модуль імпульсу фатона вызначаецца суадносінай:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

З'ява вылучэння электронаў рэчывам пад дзеяннем падаючага на яго святла атрымала назву **знешняга фотаэфекту**. Вылучэнне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй** (**фотаэмісіяй**), а вылятаючыя электроны — **фотаэлектронамі**.

Эксперыментальна вызначаны наступныя **законы знешняга фотаэфекту**.

1. Сіла фотатоку насычэння $I_н$ прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання.

2. Максімальная кінетычная энергія $E_к^{max}$ фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці I падаючага выпраменьвання і лінейна нарастае з павелічэннем частаты ν падаючага выпраменьвання.

3. Для кожнага рэчыва існуе гранічная частата ν_{min}, такая, што выпраменьванне меншай частаты не можа вырываць электроны з яго паверхні.

Формула Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{mv^2}{2}.$$

Правообладатель Народная асвета

Чырвоная мяжа фотаэфекту — найменшая частата выпраменьвання, пры якой назіраецца фотаэфект, $\nu_{min} = \frac{A_{вых}}{h}$. Яна залежыць толькі ад работы выхаду электронаў для дадзенага рэчыва ($A_{вых} > 0$), г. зн. вызначаецца хімічнай прыродай рэчыва і станам яго паверхні.

Пад **карпускулярна-хвалевым дуалізмам** разумеюць той факт, што ўсім аб'ектам у прыродзе характэрны як хвалевыя, так і карпускулярныя ўласцівасці. У адных умовах у большай ступені праяўляюцца хвалевыя, а ў другіх — карпускулярныя ўласцівасці аб'ектаў.

Прынцып дапаўняльнасці сцвярджае, што для апісання ўласцівасцей матэрыі (як поля, так і рэчыва) неабходны ўлік як хвалевых, так і карпускулярных уласцівасцей.

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 6
Фізіка атама

§ 29. З'явы, якія пацвярджаюць складаную будову атама. Доследы Рэзерфарда. Ядзерная мадэль атама

Еще, быть может, каждый атом —
Вселенная, где сто планет;
Там все, что здесь, в объеме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.

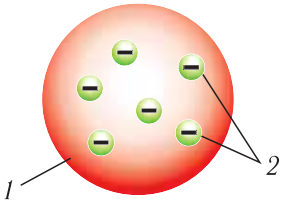
В. Брусаў

Атам гелію змяшчае дадатна зараджанае ядро і два электроны, якія верцяцца вакол яго. Ядро атама гелію ($^{4}_{2}He$) з'яўляецца α-часціцай.

Старажытнагрэчаскі вучоны Дэмакрыт у V ст. да н. э. прыйшоў да ідэі аб існаванні найдрабнейшых і непадзельных часціц, якія ён назваў **атамамі**. І толькі праз больш чым 2,5 тыс. гадоў было даказана, што атам мае складаную структуру. Апошняе дзесяцігоддзе XIX ст. азнаменавалася вельмі важнымі адкрыццямі ў фізіцы — *прыроднай радыеактыўнасці* французскім фізікам Антуанам Анры Бекерэлем (1896 г.) і *электрона* англійскім фізікам Джозефам Джонам Томсанам і нямецкім фізікам Эмілем Віхертам (1897 г.). Радыеактыўнае выпраменьванне змяшчала дадатна і адмоўна зараджаныя часціцы, таму можна было дапусціць, што гэтыя часціцы ўваходзяць у састаў атамаў. А з адкрыццём электрона стала зразумелым, што менавіта электроны і ўваходзяць у састаў атама.

Назваць найменшы адмоўны зарад «электронам» прапанаваў у 1891 г. Джордж Джонстан Стоні, а ў 1897 г. Джордж Фрэнсіс Фіцджэральд прапанаваў выкарыстаць гэты тэрмін для назвы самой часціцы.

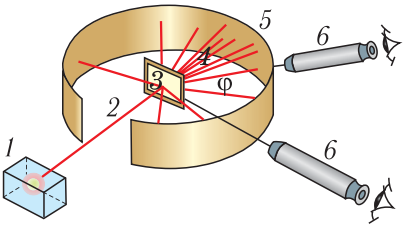
На пачатку XX ст. у навуковым свеце шырокае распаўсюджанне атрымала мадэль атама англійскага фізіка Джозефа Джона Томсана. Згодна з гэтай мадэллю дадатны зарад раўнамерна размеркаваны па ўсім аб'ёме атама ў выглядзе нейкай аднароднай масы, якую Томсан называў «сферай аднароднай дадатнай электрызацыі». Паколькі атам электрычна нейтральны, то электроны плаваюць у гэтым дадатна зараджаным асяроддзі і поўнасцю кампенсуюць яго дадатны электрычны зарад (рыс. 122).



Рыс. 122. Мадэль атама Томсана: *1* — дадатна зараджаны шар; *2* — электроны

Правообладатель Народная асвета

Для праверкі справядлівасці такой мадэлі атама англійскі фізік Эрнэст Рэзерфард з супрацоўнікамі ў 1911 г. выканаў эксперыменты, вынікі якіх супярэчылі мадэлі атама Томсана.

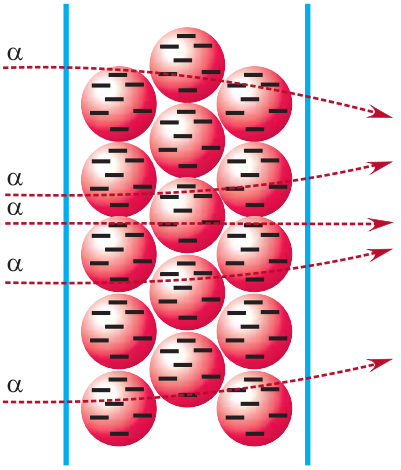


Рыс. 123. Схема эксперыментальнай устаноўкі Рэзерфарда па рассеянні α-часціц: *1* — крыніца α-часціц; *2* — α-часціцы; *3* — залатая фольга; *4* — рассеяныя α-часціцы; *5* — сцынтыляцыйны экран; *6* — мікраскоп

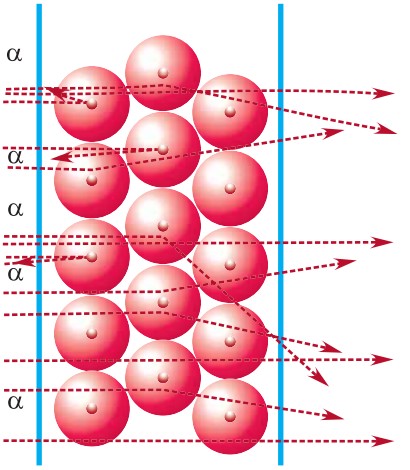
Пучок α-часціц накіроўваўся на тонкую залатую фольгу таўшчынёй каля 400 нм (рыс. 123). Светлавыя ўспышкі ад часціц, якія прайшлі праз фольгу, рэгістраваліся на сцынтыляцыйным экране з дапамогай мікраскопа.

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 нязначна адхіляцца ад прамалінейнай траекторыі (рассейвацца). Пры гэтым карціна іх рассеяння павінна быць прыкладна такой, як паказана на рысунку 124.

Аднак атрыманыя вынікі зусім не адпавядалі гэтым прадказанням. У эксперыментах значная частка α-часціц сапраўды адхілялася на малыя вуглы θ (ад нуля да 4°—6°) ад напрамку свайго пачатковага руху. Але былі і такія часціцы, якія рассейваліся на вуглы, большыя за 90°, або нават вярталіся назад (рыс. 125).

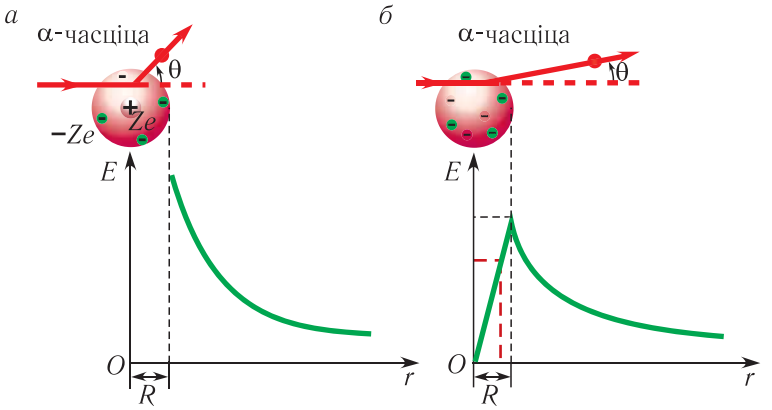


Рыс. 124. Мяркуемае рассеянне α-часціц атамамі золата згодна з мадэллю атама Томсана



Рыс. 125. Назіраемае рассеянне α-часціц атамамі золата ў доследах Рэзерфарда

Правообладатель Народная асвета

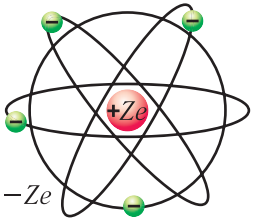


Рыс. 126. Мадэлі атама і залежнасці модуля напружанасці электрычнага поля ад адлегласці: *а* — ядзерная мадэль; *б* — мадэль атама Томсана

Як пісаў сам Рэзерфард: «Гэта было амаль такім жа непраўдападобным, як калі б вы выстралілі ў ліст папяроснай паперы 15-дзюймавым снарадам, а ён вярнуўся б назад і трапіў у вас».
Таўшчыня фольгі ў эксперыментах Рэзерфарда адпавядала прыкладна 1600 слаям атамаў.

Прыкладна адна з 20 000 α-часціц зведвала 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 аб тым, што ўнутры атама ёсць вельмі моцнае электрычнае поле, якое ствараецца дадатным зарадам, сканцэнтраваным у вельмі малым аб'ёме. Назва «ядро» для гэтага зараду была прапанавана Рэзерфардам. Памер ядра малы, але ў ім сканцэнтравана практычна ўся маса атама. Пры набліжэнні α-часціцы да ядра ў адпаведнасці з законам Кулона паміж імі ўзнікаюць вялікія сілы адштурхвання, якія істотна змяняюць траекторыю α-часціц (рыс. 126, *а*).



Рыс. 127. Мадэль атама Рэзерфарда

У мадэлі атама Томсана электрычнае поле адпавядае электрычнаму полю раўнамерна зараджанага па аб'ёме шара (рыс. 126, *б*), і пры набліжэнні да цэнтра атама модуль яго напружанасці імкнецца да нуля. 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 (рыс. 127):

Правообладатель Народная асвета

1) у цэнтры атама размешчана ядро памерам $d \leqslant 10^{-15}$ м, яго зарад $q = +Ze$, дзе Z — парадкавы нумар элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева;

2) амаль уся маса атама (99,96 %) сканцэнтравана ў дадатна зараджаным ядры;

3) ядро абкружаюць электроны, утвараючы электронную абалонку атама; лік электронаў роўны Z; сумарны зарад электронаў $q = Z(-e)$, таму атам цалкам электрычна нейтральны.

Унутры атама электроны не могуць знаходзіцца ў спакоі, паколькі пад дзеяннем сіл Кулона яны ўпалі б на ядро. Таму атамы верцяцца вакол ядра па пэўных арбітах.

Такую мадэль атама называюць таксама *планетарнай*, паколькі яна нагадвае Сонечную сістэму, у якой планеты верцяцца вакол масіўнага цэнтра — Сонца.

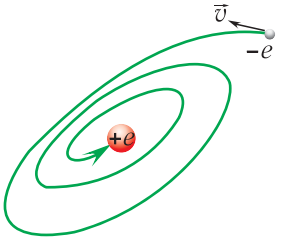
Мадэль атама Рэзерфарда з паказам электронных арбіт стала папулярнай эмблемай XX ст. Так, на рысунку 128 паказана эмблема фізічнага факультэта Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта.

На падставе ядзернай мадэлі атама былі растлумачаны эксперыментальныя даныя, атрыманыя пры вывучэнні рассеяння α-часціц. Але яна супярэчыла законам класічнай механікі і электрадынамікі, паколькі не дазваляла растлумачыць факт стабільнасці існавання атама.

Рыс. 128. Эмблема фізічнага факультэта БДУ

Сапраўды, па-першае, у адпаведнасці з законамі класічнай электрадынамікі Максвела пры паскораным руху электронаў па арбітах яны павінны бесперапынна выпраменьваць электрамагнітныя хвалі, частата якіх павінна быць роўнай частаце абарачэння электронаў вакол ядра.

Па-другое, пры выпраменьванні электроны павінны былі губляць энергію і «ўпасці» на ядро за прамежак часу парадку 10^{-13} с (рыс. 129). Адпаведна, у такім выпадку атамы павінны былі быць няўстойлівымі і мець вельмі кароткі час жыцця.



Рыс. 129. Траекторыя «падзення» электрона на ядро атама вадароду

Па-трэцяе, частата абарачэння электрона вакол ядра (з набліжэннем да ядра) павінна была безупынна змяняцца, што прывяло б да неперарыўнага характару

Правообладатель Народная асвета

спектра выпраменьвання атама (частата выпраменьвання роўна частаце ваганняў крыніцы). Аднак у праведзеных эксперыментах назіраўся лінейчасты спектр.

Такім чынам, поўнае тлумачэнне будовы атама на падставе механікі Ньютана і электрадынамікі Максвела было немагчымым.

1. Растлумачце сутнасць мадэлі атама Томсана.
2. Растлумачце схему эксперыментаў Рэзерфарда па рассеянні α-часціц.
3. Чаму фольга ў эксперыментах Рэзерфарда павінна быць як мага больш тонкая?
4. Растлумачце прычыну рассеяння α-часціц атамамі рэчыва.
5. Сфармулюйце асноўныя палажэнні ядзернай мадэлі атама.
6. Пакажыце схематычна ядзерную мадэль атама.
7. Якая сіла ўтрымлівае электроны на арбітах у ядзернай мадэлі атама?
8. Чаму ядзерную мадэль атама называюць таксама планетарнай? Якія элементы мадэлі з'яўляюцца аналагамі планет?
9. Якія цяжкасці ўзнікаюць пры тлумачэнні працэсаў выпраменьвання энергіі атамамі на падставе класічнай механікі і электрадынамікі пры выкарыстанні ядзернай мадэлі атама?

§ 30. Квантавыя пастулаты Бора

Сплетеньем концентрических кругов
И эксцентрических расчертят сферу,
И, циклов, эпициклов навертев,
Орбиты уместят внутри орбит.

Дж. Мільтан

Для пераадолення супярэчнасцей, якія ўзнікалі пры апісанні будовы атама на падставе законаў класічнай механікі і электрадынамікі, з эксперыментальнымі данымі, дацкі фізік Нільс Бор у 1913 г. у сваёй працы «Аб будове атамаў і малекул» прапанаваў квантавую мадэль атама, якая грунтавалася на двух пастулатах. У сучасным выглядзе яны фармулююцца наступным чынам.

I пастулат Бора (пастулат стацыянарных станаў):

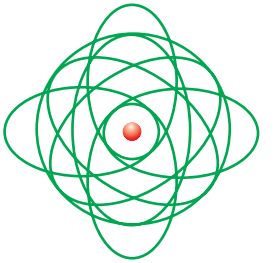
атам можа знаходзіцца ў асобых стацыянарных (квантавых) станах, кожнаму з якіх адапавядае пэўная энергія. У стацыянарным стане атам не выпраменьвае.

Стацыянарныя станы можна пранумараваць, прысвоіўшы ім парадкавыя нумары $n = 1, 2, 3, ...$, прычым кожнаму стану адпавядае пэўнае дыскрэтнае значэнне энергіі E_n.

Згодна з мадэллю Бора стацыянарным станам атама адпавядаюць пэўныя (дазволеныя) арбіты, па якіх электроны рухаюцца вакол ядра. Бор для праста-

Правообладатель Народная асвета

ты дапускаў, што гэтыя арбіты з'яўляюцца акружнасцямі, хоць у агульным выпадку арбіты могуць мець форму эліпса, прычым ядро размяшчаецца ў адным з яго фокусаў (рыс. 130).



Рыс. 130. Электронныя арбіты ў атаме па тэорыі Бора — Зомерфельда

Планеты Сонечнай сістэмы таксама рухаюцца па эліпсах, у адным з фокусаў якіх знаходзіцца Сонца. Гэта абставіна робіць аналогію паміж ядзернай мадэллю атама і Сонечнай сістэмай яшчэ больш цеснай.

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 другі. Пры гэтым пераходзе можа вылучацца або паглынацца квант электрамагнітнага выпраменьвання, частата якога вызначаецца рознасцю энергій атама ў дадзеных станах:

$$\boxed{\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},} \qquad (1)$$

дзе ν_{kn} — частата паглынутага або вылучанага кванта выпраменьвання, E_k, E_n — энергіі атама ў k-м і n-м стацыянарных станах, h — пастаянная Планка.

Калі $E_k > E_n$, то пры пераходзе адбываецца выпраменьванне энергіі, калі $E_k < E_n$, — яе паглынанне.

Стан атама, якому адпавядае найменшая энергія, называецца **асноўным**, а станы, якім адпавядаюць большыя значэнні энергіі, — **узбуджанымі**. У асноўным энергетычным стане атам можа знаходзіцца неабмежавана доўга, а ў астатніх стацыянарных станах парадку 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 энергій атама E_k і E_n ў пачатковым і канечным станах. Пераход атама з аднаго стацыянарнага стану ў другі суправаджаецца электрамагнітным выпраменьваннем, даўжыня хвалі якога

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \qquad (2)$$

Правообладатель Народная асвета

Такім чынам, пастулаты Бора дазволілі растлумачыць лінейчастую структуру атамных спектраў — яна абумоўлена дыскрэтнасцю значэнняў энергіі атама ў стацыянарных станах.

Бор прапанаваў таксама колькасную *ўмову квантавання* для знаходжання радыусаў арбіт электронаў, якія рухаюцца па кругавых арбітах. Стацыянарныя (дазволеныя) арбіты электронаў у атаме знаходзяцца з умовы

$$m_e v_n r_n = n\frac{h}{2\pi}, \qquad (3)$$

дзе $n = 1, 2, 3, \ldots$ — 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 прадпасылках — 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 (3), можна растлумачыць структуру энергетычных узроўняў найпрасцейшага атама — атама вадароду, які складаецца з ядра (пратона) і аднаго электрона, што абарачаецца вакол яго.

На падставе другога закону Ньютана і закону Кулона, а таксама ўмовы квантавання арбіт (3) Бор змог вызначыць радыусы арбіт электронаў, а таксама энергіі стацыянарных станаў. Радыус першай (найбліжэйшай да атамнага ядра) арбіты электрона ($n = 1$) вызначае памер атама вадароду ў асноўным стане. Ён роўны $r_1 = 0{,}529 \cdot 10^{-10}$ м.

З другога закону Ньютана вынікае, што пры руху электрона па кругавой арбіце радыусам r вакол ядра з лінейнай скорасцю, модуль якой v, сіла Кулона $\vec{F}_к$ надае электрону цэнтраімклівае паскарэнне

$$k\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}, \qquad (4)$$

дзе m_e — маса электрона, e — модуль зараду электрона.

Адкуль

$$v^2 = k\frac{e^2}{m_e r}. \qquad (5)$$

З умовы квантавання арбіт (3) знаходзім модуль скорасці на арбіце з нумарам n:

$$v_n = n\frac{h}{2\pi m_e r_n}. \qquad (6)$$

Правообладатель Народная асвета

Падставім выраз (6) у суадносіну (5) і знойдзем радыус стацыянарнай арбіты электрона з нумарам n:

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 k m_e e^2}. \qquad (7)$$

Як відаць з формулы (7), радыус арбіты нарастае прапарцыянальна n^2.

Модуль скорасці электрона на арбіце знаходзім, падстаўляючы выраз (7) у формулу (6):

$$v_n = k\frac{2\pi e^2}{nh}. \qquad (8)$$

Паколькі радыус r арбіты можа прымаць толькі дыскрэтныя (квантаваныя) значэнні r_n (3), то і энергія атама ў розных стацыянарных станах можа таксама прымаць толькі дыскрэтныя значэнні E_n. Энергія атама вадароду вызначаецца толькі нумарам арбіты n.

Энергія электрона ў атаме вадароду роўна суме яго кінетычнай энергіі $E_к$ пры руху па кругавой арбіце і патэнцыяльнай энергіі $E_п$ ў электрастатычным полі ядра. Паколькі ўзаемадзейнічаюць часціцы, што маюць зарады процілеглых знакаў (зарад ядра $q_1 = +e$, зарад электрона $q_2 = -e$), то паміж імі дзейнічае сіла кулонаўскага прыцяжэння і патэнцыяльная энергія іх узаемадзеяння адмоўная:

$$E_п = -k\frac{e^2}{r}. \qquad (9)$$

Энергія электрона ў атаме супадае з поўнай энергіяй атама — сістэмы, якая складаецца з атамнага ядра і электрона:

$$E = E_к + E_п = \frac{m_e v^2}{2} - k\frac{e^2}{r}. \qquad (10)$$

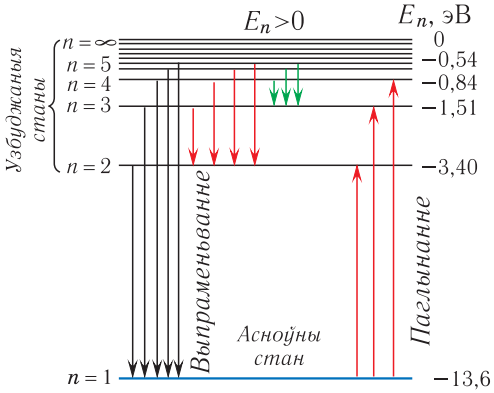
Падставіўшы ў формулу (10) выраз для модуля скорасці (8) і радыуса r_n n-й арбіты (7) для значэнняў энергетычных узроўняў атама E_n, атрымліваем:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots). \qquad (11)$$

Як відаць з формулы (11), энергія атама вадароду вызначаецца толькі нумарам арбіты n, паколькі ўсе астатнія велічыні ў гэтай формуле — фундаментальныя канстанты. Знак «мінус» паказвае, што сістэма з'яўляецца звязанай.

Згодна з формулай (11) энергія атама вадароду ў *асноўным стане* ($n = 1$) атрымліваецца роўнай $E_1 = -13{,}6$ эВ, а яго энергія ў іанізаваным стане (калі электрон знаходзіцца бясконца далёка ад ядра, г. зн. $n = \infty$) —

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 131. Энергетычная дыяграма стацыянарных станаў атама вадароду

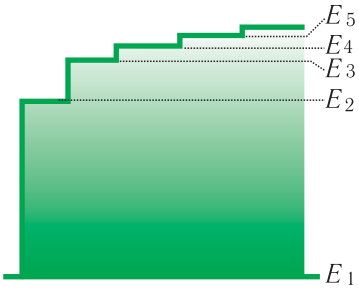
$E_1 = 0$. У другім стане $(n = 2)$ энергія $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3{,}40$ эВ, у трэцім $(n = 3)$ — $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1{,}51$ эВ і г. д. Энергію атама вадароду можна разлічыць па формуле:

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2} \text{ (эВ).} \qquad (12)$$

Паколькі энергія атама можа прымаць толькі дыскрэтны набор значэнняў, то кажуць, што яна **квантавана**.

Для нагляднага ўяўлення стацыянарных энергетычных станаў атама выкарыстоўваецца **энергетычная дыяграма** (рыс. 131). Магчымыя значэнні энергіі атама графічна паказваюць у выглядзе схемы ўзроўняў энергіі **(энергетычных узроўняў)** — гарызантальных прамых, праведзеных на адлегласцях у пэўным маштабе, які адпавядае рознасцям дазволеных значэнняў энергіі. Пераходы атама з аднаго стану ў другі паказваюцца на дыяграме вертыкальнымі лініямі паміж адпаведнымі ўзроўнямі. Напрамак пераходу абазначаецца стрэлкамі.

Энергетычную дыяграму можна лічыць своеасаблівай «лесвіцай» з «ніжняй пляцоўкай» (асноўным станам) і «ступенямі» (узбуджанымі станамі), што ідуць уверх. Формула для энергетычных узроўняў энергіі E_n атама паказвае важную заканамернасць: чым вышэй падымаецца над асноўным (першым) узроўнем энергетычная «лесвіца», тым менш «крутымі» робяцца яе ступені (на рысунку 132 гэта добра відаць пры $n > 4$).



Рыс. 132. Энергетычная «лесвіца» станаў атама вадароду

Значыць, чым далей электрон ад ядра, тым на меншую велічыню адрозніваюцца суседнія ўзроўні энергіі, г. зн. гушчыня энергетычных узроўняў нарастае. Квантавыя скачкі пры гэтым памяншаюцца, з прычыны чаго пераходы паміж стацыянарнымі станамі атама ўсё больш і больш робяцца «падобнымі» да безупыннага змянення энергіі. Такім чынам, з павелічэннем аддалення ад ядра (з павелічэннем n) энергетычная «лесвіца»

Правообладатель Народная асвета

паступова ператвараецца ў пакаты «плаўны пад'ём» (гл. рыс. 132), г. зн. энергія становіцца амаль безупыннай велічынёй, як у класічнай тэорыі. Для выдалення электрона з атама вадароду, які знаходзіцца ў асноўным стане, атаму неабходна надаць энергію $E_{\text{сув}} = E_{\infty} - E_1 = 13{,}6$ эВ. Энергія $E_{\text{сув}}$ называецца **энергіяй сувязі электрона ў атаме**, а працэс выдалення электрона з атама — **іанізацыяй**. Рознасць энергій $E_{\text{і}} = E_{\infty} - E_1 = 13{,}6$ эВ роўна энергіі іанізацыі атама вадароду. Вышэй за ўзровень $n = \infty$ (пры $E > 0$) электрон з'яўляецца свабодным і можа мець любую энергію.

У адпаведнасці з уяўленнямі квантавай механікі свабодны рух электрона, які адарваны ад атама, падобны да распаўсюджвання бягучай хвалі ў неабмежаванай прасторы. Для яе магчымы любыя значэнні даўжынь хваль. Значыць, энергія свабоднага электрона не квантуецца, і спектр яго энергій выпраменьвання неперарыўны. З прычыны гэтага лінія, абазначаная на энергетычнай дыяграме $n = \infty$, адпавядае кароткахвалевай мяжы лінейчастай структуры выпраменьвання (паглынання) атама. Да яе прымыкае неперарыўны спектр выпраменьвання электрона.

Іанізацыя складаных атамаў можа быць аднакратнай (атам губляе адзін электрон), двухкратнай (два электроны) і г. д.

Паколькі пры ўзбуджэнні атама радыус арбіты электрона павялічваецца, то вылучэнне выпраменьвання атамам адбываецца пры пераходах электронаў у атаме са знешніх арбіт на ўнутраныя (рыс. 133).

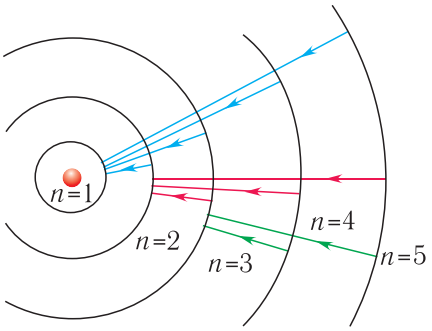
Мадэль атама Бора дазваляе апісаць не толькі атам вадароду, але і іанізаваныя атамы (іоны) іншых элементаў, вакол ядзер якіх, як і ў атаме вадароду, рухаецца толькі адзін электрон.

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 вылучэнні або паглынанні энергіі, але і пры сутыкненні атамаў.

Пры няпругкім сутыкненні змяняецца ўнутраная энергія атамаў, што сутыкнуліся, і электроны ў іх пераходзяць на іншыя ўзроўні энергіі.



Рыс. 133. Пераходы электронаў у атаме пры вылучэнні выпраменьвання

Правообладатель Народная асвета

У 1922 г. Нільсу Бору была прысуджана Нобелеўская прэмія «за заслугі ў даследаванні будовы атамаў і выпраменьвання».

Даследаванні Бора фактычна сталі пачаткам новага этапу развіцця спектраскапіі, якая з эмпірычнай навукі ператварылася ў эфектыўны метад вывучэння атамнай структуры. Праз паўстагоддзя з гэтай нагоды Бор скажа: «Я ўбачыў шлях нараджэння спектраў!»

З дапамогай мадэлі атама Бора атрымалася:

па-першае, вылічыць энергію іанізацыі атама вадароду, якая добра ўзгаднялася з эксперыментам: як тэорыя, так і эксперымент далі значэнне $E_i = 13{,}6$ эВ;

па-другое, значна далей пайсці ў тлумачэнні заканамернасцей перыядычнай сістэмы хімічных элементаў Мендзялеева. Згодна з мадэллю атама Бора электроны рухаюцца па пэўных арбітах, якія ўтвараюць розныя групы — электронныя абалонкі. Структура электронных абалонак вызначае 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 цырконію ($Z = 40$).

Мадэль атама Бора тлумачыла асноўныя заканамернасці спектра атама вадароду, хоць пры гэтым часткова захоўвала класічны характар, паколькі ў ёй дапускалася, што электроны рухаюцца па арбітах вакол ядра. На аснове дадзенай мадэлі не атрымалася пабудаваць тэорыю больш складаных атамаў, напрыклад растлумачыць спектр выпраменьвання наступнага за вадародам атама гелію, які змяшчае ўсяго два электроны. Адпаведна, не магло быць размовы аб тлумачэнні на падставе дадзенай мадэлі будовы малекул, паколькі ў іх карціна руху і ўзаемадзеяння электронаў і атамных ядзер шмат больш складаная, чым у атамах.

Тэорыя атама Бора з'явілася найважнейшым этапам на шляху стварэння паслядоўнай тэорыі мікраскапічных з'яў — квантавай механікі.

1. Што дапусціў 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 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?

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 21

1. Колькі розных квантаў святла N можа вылучыць узбуджаны атам вадароду, калі ён знаходзіцца на чацвёртым энергетычным узроўні?

2. У атаме вадароду электрон перайшоў з чацвёртага энергетычнага ўзроўню ($n = 4$) на другі ($k = 2$). Як пры гэтым змянілася энергія атама?

3. На якія ўзроўні энергіі можа пераходзіць электрон у атаме вадароду з асноўнага стану пры ўздзеянні бачнага выпраменьвання? Ультрафіялетавага? Інфрачырвонага?

4. Знайдзіце адноснае памяншэнне масы $\frac{\Delta m}{m}$ атама вадароду пры пераходзе электрона з энергетычнага ўзроўню $n = 2$ у асноўны стан на энергетычны ўзровень $k = 1$.

5. Пратон, што ляціць са скорасцю, модуль якой $v_0 = 7{,}5 \cdot 10^4\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, сутыкаецца з няўзбуджаным атамам вадароду ў стане спакою. Пасля сутыкнення пратон ляціць са скорасцю, модуль якой $v_1 = 1{,}5 \cdot 10^4\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, у тым самым напрамку, а атам пераходзіць ва ўзбуджаны стан. Вызначыце даўжыню хвалі λ выпраменьвання, якое можа вылучыць атам, пераходзячы ў асноўны стан. (Адрозненне мас пратона і атама вадароду не прымаць у разлік.)

6. Разлічыце радыус трэцяй і трохсотай арбіт электрона ў атаме вадароду ў рамках мадэлі атама Бора.

7. Электрон у мадэлі атама вадароду паводле Бора рухаецца па кругавой арбіце радыусам $r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ м. Якую энергію E павінен паглынуць атам, каб радыус арбіты электрона павялічыўся ў $k = 4$ разы?

8. Калі б атам вадароду ва ўзбуджаным стане меў радыус $r_n = 1{,}0$ мм, то які квантавы лік n і якая энергія E адпавядалі б гэтай арбіце?

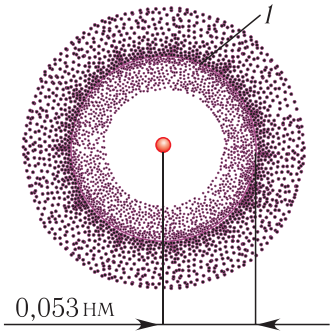
§ 31. Квантава-механічная мадэль атама

Теория Бора предложила физикам пользоваться по понедельникам, средам и пятницам классическими законами, а по вторникам, четвергам и субботам — квантовыми.
Вільям Брэг-старэйшы

Атамная арбіталь — вобласць каляядзернай прасторы, у якой найбольш верагодна знаходжанне дадзенага электрона (рыс. 134). У залежнасці ад энергіі электронаў арбіталі маюць розныя форму і памеры. Кожны электрон характарызуецца ўласным механічным момантам руху, што называецца

Правообладатель Народная асвета

спінам (ад англ. spin — вярцець), праекцыя якога прымае два значэнні. На адной арбіталі можа знаходзіцца не больш за два электроны, якія маюць процілеглыя (антыпаралельныя) спіны.



Рыс. 134. Схема электроннага воблака атама вадароду

У класічнай механіцы рух часціцы апісваецца заданнем яе каардынат і імпульсу (скорасці) у кожным пункце траекторыі. Каб разлічыць параметры руху любой складанай сістэмы, дастаткова задаць каардынаты і імпульсы (скорасці) усіх часціц, якія ўваходзяць у сістэму, у пачатковы момант часу і ўмовы, пры якіх адбываецца рух (дзеючыя сілы, палі). Пасля гэтага, выкарыстоўваючы ўраўненні руху (другі закон Ньютана), можна знайсці каардынаты і імпульсы (скорасці) у любы момант часу, г. зн. вызначыць, дзе будзе знаходзіцца часціца ў той або іншы момант часу.

Пры пераходзе ў вобласць мікрасвету аказваецца, што такі спосаб непрымяльны. Для апісання з'яў мікрасвету была распрацавана *квантавая механіка*.

Квантавая механіка — раздзел фізікі, у якім вывучаюцца ўласцівасці і паводзіны мікрачасціц, а таксама сувязь велічынь, якія характарызуюць часціцы, з фізічнымі велічынямі, што непасрэдна вымяраюцца ў эксперыментах.

Вынікі эксперыментаў паказвалі, што мікрааб'екты валодаюць адначасова карпускулярнымі і хвалевымі ўласцівасцямі. Так, напрыклад, электрон з'яўляецца часціцай, якая мае пэўную масу і зарад, але пры яго руху вакол ядра неабходна ўлічваць яго хвалевыя ўласцівасці, паколькі ў яго адсутнічае пэўная траекторыя руху і дакладнае размяшчэнне ў прасторы. Для тлумачэння дваістых паводзін мікрааб'ектаў патрабаваўся кардынальны перагляд сталых уяўленняў.

У квантавай механіцы рух часціцы апісваецца хвалевай функцыяй $\psi(x, y, z, t)$ — функцыяй каардынат і часу. Ведаючы хвалевую функцыю часціцы і выкарыстоўваючы вымяральныя прыборы, можна атрымаць звесткі аб паводзінах гэтай часціцы і аб выніках любога яе ўзаемадзеяння. Пры гэтым хвалевая функцыя характарызуе імавернасць любога выніку вымярэння. Квадрат яе модуля $|\psi(x, y, z, t)|^2$ вызначае імавернасць знаходжання часціцы ў наваколлі пункта з каардынатамі (x, y, z) у момант часу t. У квантавай механіцы, нават калі задаць усе пачатковыя ўмовы ў нейкі момант часу і поўнасцю рашыць сістэму

Правообладатель Народная асвета

ўраўненняў для хвалевых функцый, можна вызначыць толькі імавернасць тых або іншых працэсаў. Напрыклад, імавернасць выявіць электрон у дадзеным месцы можа быць у 10 разоў большая за імавернасць яго знаходжання ў іншым месцы. Аднак прадказаць яго становішча са стапрацэнтнай дакладнасцю, як гэта было ў класічнай механіцы, ужо нельга.

Электроны ў атаме прыбліжана разглядаюцца як «размазаныя» ў прасторы і ўтвараючыя вакол ядра электроннае воблака (гл. рыс. 134). Электроннае воблака, якое адпавядае асноўнаму стану, канцэнтруецца ў вобласці, што знаходзіцца дастаткова блізка да ядра. Для ўзбуджаных станаў яно размяркоўваецца на ўсё большыя адлегласці ад ядра. Слабей за ўсё звязаны з ядром электроны знешняй абалонкі, якія вызначаюць памеры атама цалкам.

У залежнасці ад таго, што і як вымяраецца ў пэўным стане часціцы, на першы план выступаюць то яе карпускулярныя ўласцівасці, то яе хвалевыя ўласцівасці. Прымяненне хвалевай функцыі дазваляе апісаць як карпускулярныя, так і хвалевыя ўласцівасці мікрачасціц.

Найважнейшым фізічным палажэннем квантавай механікі з'яўляецца **прынцып няпэўнасці Гейзенберга**, згодна з якім:

ні пры якім павелічэнні дакладнасці вымярэнняў немагчыма дасягнуць таго, каб здабытак няпэўнасцей вымярэння каардынаты і імпульсу часціцы быў меншым за пастаянную Планка.

Гэты прынцып матэматычна выражаецца ў выглядзе наступнай няроўнасці, якая звязвае няпэўнасць Δx каардынаты x з няпэўнасцю Δp_x праекцыі імпульсу p_x:

$$\Delta p_x \Delta x \geqslant h,$$

якую звычайна называюць **суадносінай няпэўнасцей Гейзенберга**.

На думку Бора, каардынаты і імпульсы падобны да дзвюх праекцый прадмета, які можа быць сфатаграфаваны або спераду, або збоку, але не адразу з усіх бакоў. Яны не абвяргаюць, а дапаўняюць адзін аднаго.

Такім чынам, у квантавай механіцы для сістэмы, якая знаходзіцца ў некаторым вядомым стане, можна прадказаць вынікі вымярэнняў або яе становішча, або яе імпульсу паасобку. Імавернасная інтэрпрэтацыя прадказвае, што вымярэнні аднолькавым дэтэктарам для аднолькавых часціц у аднолькавых станах адной і той жа велічыні будуць даваць розныя вынікі. У прыватнасці, імавернасць каардынаты вызначаецца як $|\psi|^2$.

Правообладатель Народная асвета

Адзін з найважнейшых вывадаў квантавай механікі заключаецца ў тым, што існуе самы нізкі ўзровень энергіі, якому адпавядае асноўны стан сістэмы. У гэтым стане сістэма валодае мінімальнай кінетычнай энергіяй, прычым $\langle E_{\text{к}}^{\min} \rangle \neq 0$.

Ядзерная мадэль атама не азначае, што існуюць арбіты электронаў і што электрон неабходна параўнаць з цвёрдым шарыкам, які рухаецца вакол ядра. Адказ ад такога механічнага ўяўлення аб электроне і яго руху дазволіў В. Гейзенбергу і Э. Шродзінгеру пабудаваць квантавую тэорыю атама, у якой пастулаты Бора аказваюцца вынікамі больш агульных прынцыпаў.

У квантавай механіцы для задання кожнага стану электрона ў атаме неабходны чатыры розныя квантавыя лікі n, l, m_l, m_s. У табліцы 9 прапанаваны дапушчальныя значэнні ўсіх чатырох квантавых лікаў электрона.

Табліца 9. **Квантавыя лікі**

Квантавы лік	Сімвал	Значэнне	Поўны лік значэнняў
Галоўны	n	1, 2, 3, ...	∞
Арбітальны	l	0, 1, ..., $n-1$	n (пры зададзеным n)
Магнітны	m_l	$-l$, $-l+1$, ..., $l-1$, l	$2l+1$ (пры зададзеным l)
Спінавы	m_s	$-\frac{1}{2}$, $+\frac{1}{2}$	2

Разгледзім асновы квантава-механічнага апісання найбольш простага атама — атама вадароду. Квантавы лік n з мадэлі атама Бора захоўваецца пад назвай **галоўнага квантавага ліку**. Ён прымае цэлалікавыя значэнні ад 1 да ∞. Ад яго залежыць поўная энергія стану атама вадароду:

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\,(\text{эВ}),\ n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots .$$

Лік l называецца **арбітальным квантавым лікам**, які (пры зададзеным n) прымае цэлалікавыя значэнні:

$$l = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ (n-1).$$

Лік m_l называецца **магнітным квантавым лікам** і прымае (пры зададзеным l) цэлалікавыя значэнні ад $-l$ да $+l$:

$$m_l = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ \ldots,\ \pm l.$$

Для апісання станаў электрона ў атаме ўводзіцца яшчэ адзін квантавы лік — **спінавы m_s**, які прымае два значэнні:

$$m_s = \pm\frac{1}{2}.$$

Правообладатель Народная асвета

Гэта звязана з тым, што пры зададзеных n, l, m_l электрон можа знаходзіцца ў двух розных станах, якія характарызуюцца праекцыяй спіна.

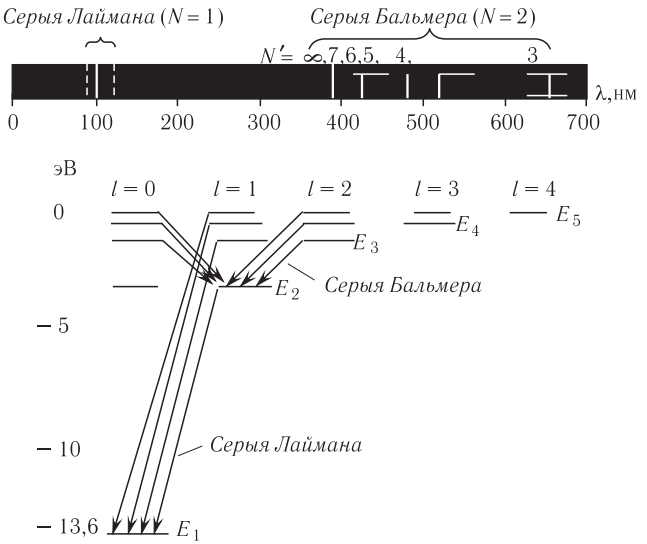
Швейцарскі фізік-тэарэтык Вольфганг Паўлі прапанаваў простае правіла **(прынцып забароны Паўлі) — у адным і тым жа квантавым стане можа знаходзіцца не больш за адзін электрон.**

У 1925 г. Паўлі напісаў: «У атаме не можа існаваць двух або больш электронаў, для якіх значэнні ўсіх квантавых лікаў аднолькавыя. Калі ў атаме знаходзіцца электрон, для якога ўсе гэтыя лікі маюць пэўнае значэнне, то гэты стан «заняты».

Згодна з гэтым прынцыпам два электроны не могуць мець аднолькавага набору квантавых лікаў, і на яго падставе тлумачыцца наяўнасць груп з 2, 8, 18 і 32 элементаў перыядычнай табліцы Мендзялеева.

Гэтыя групы элементаў з'яўляюцца вынікам прынцыпу забароны Паўлі, а таксама квантава-механічнага правіла, згодна з якім значэнне квантавага ліку l не большае за $n - 1$ ($0 \leqslant l \leqslant n - 1$), а квантавы лік m набывае цэлалікавыя значэнні ад $-l$ да $+l$ ($-l \leqslant m \leqslant +l$).

Атам вадароду можа мець адно і тое ж значэнне энергіі, знаходзячыся ў розных станах (рыс. 135). Энергія атама вадароду залежыць толькі ад галоўнага квантавага ліку n, але ўзроўню энергіі з зададзеным n адпавядае некалькі станаў,



Рыс. 135. Спектр атама вадароду і энергетычная дыяграма

Правообладатель Народная асвета

якія адрозніваюцца значэннямі l, m_l, m_s. Станы з зададзенымі значэннямі n, l прынята абазначаць як $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, ..., дзе лічбы паказваюць значэнні n, а літары s, p, d, f, ... — адпаведныя значэнні $l = 0, 1, 2, 3, \ldots$. Узровень, якому адпавядае толькі адзін квантавы стан, называецца *нявыраджаным*.

Поўны лік усіх магчымых станаў электрона з рознымі l і m пры фіксаваным значэнні галоўнага квантавага ліку n, атрымаецца n^2. З улікам двух магчымых значэнняў спіна агульны лік электронаў у абалонцы будзе роўным $2n^2$. Гэта і ёсць максімальны лік электронаў у абалонцы з нумарам n.

Спектр выпраменьвання (паглынання) атама вадароду можна поўнасцю апісаць як вынік пераходаў электронаў у атамах з адных станаў, якія апісваюцца квантавымі лікамі n, l, m_l, m_s, у другія, што будуць апісвацца іншым наборам. Аднак, як даказана тэарэтычна і пацверджана эксперыментальна, дазволены не ўсе пераходы, а толькі тыя, што задавальняюць *правілы адбору*.

Правілы адбору маюць дачыненне да змяненняў арбітальнага l і магнітнага m_l квантавых лікаў пры пераходах з выпраменьваннем (г. зн. вылучэннем або паглынаннем). Іх змяненне задавальняе ўмовы:

$$\Delta l = \pm 1; \ \Delta m_l = 0, \pm 1.$$

У той жа час правілы адбору не накладваюць ніякіх абмежаванняў на змяненні галоўнага квантавага ліку n.

Сукупнасць у шматэлектронным атаме электронаў, якія маюць адзін і той жа галоўны квантавы лік, называюць *электроннай абалонкай або слоем*.

Асноўныя законы квантавай механікі былі адкрыты ў 1900—1928 гг. У гэты ж час адбылося яе станаўленне як новай навукі — паўнапраўнага раздзела тэарэтычнай фізікі. Былі прапанаваны новыя фундаментальныя ідэі — кванта энергіі і святла, стацыянарных станаў атамных сістэм і пераходаў паміж імі, прынцыпу адпаведнасці і карпускулярна-хвалевага дуалізму для выпраменьвання і мікрачасціц.

Пасля паспяховага апісання атама вадароду квантавая механіка пачала прымяняцца для вырашэння розных праблем сучаснай фізікі мікраскапічных з'яў — у тэорыях атамаў і малекул, ядзер, элементарных часціц, сутыкненняў і выпраменьвання. Як было вызначана ў мінулым стагоддзі, квантавыя ўласцівасці часціц праяўляюцца ў такіх фізічных з'явах, як звышправоднасць, ферамагнетызм, звышцякучасць.

У 1932 г. Вернеру Гейзенбергу была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за распрацоўку асноў квантавай механікі.
У 1933 г. «за адкрыццё новых формаў атамнай тэорыі» Эрвін Шродзінгер быў удастоены Нобелеўскай прэміі па фізіцы.

Правообладатель Народная асвета

У 1945 г. В. Паўлі была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за адкрыццё прынцыпу забароны.

У 1954 г. М. Борн быў удастоены Нобелеўскай прэміі за фундаментальныя даследаванні ў квантавай механіцы, у асаблівасці за статыстычную інтэрпрэтацыю хвалевай функцыі.

1. Што вывучаецца ў квантавай механіцы?
2. Растлумачце прынцыповае адрозненне квантава-механічнага апісання стану сістэмы ад яе класічнага апісання.
3. Чаму ў квантавай механіцы паняцце траекторыі часціцы не мае сэнсу?
4. Сфармулюйце прынцып забароны Паўлі. Што магло б адбыцца, калі б гэты прынцып не выконваўся?
5. Колькі квантавых лікаў неабходна для вызначэння стану электрона ў атаме?

§ 32. Выпраменьванне і паглынанне святла атамам. Спектры выпраменьвання і паглынання

З прычыны таго што энергія атама квантавана, яна характарызуецца пэўным наборам энергетычных узроўняў E_n. Вылучэнне выпраменьвання адбываецца пры пераходзе электронаў 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), энергія якога $h\nu_{kn} = E_k - E_n$. Частата выпраменьвання пры гэтым:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \qquad (1)$$

Атам самаадвольна пераходзіць у асноўны стан не толькі адразу, але і паэтапна — праз прамежкавы стан, выпраменьваючы пры гэтым адпаведныя кванты святла. Набор іх частот утварае **лінейчасты спектр выпраменьвання** атама.

Паглынанне святла — працэс, адваротны выпраменьванню. Атам, паглынаючы фатон $h\nu_{kn} = E_k - E_n$, пераходзіць з ніжэйшага стану k у больш высокі стан n ($E_k < E_n$). Пры гэтым частата паглынутага фатона будзе роўна:

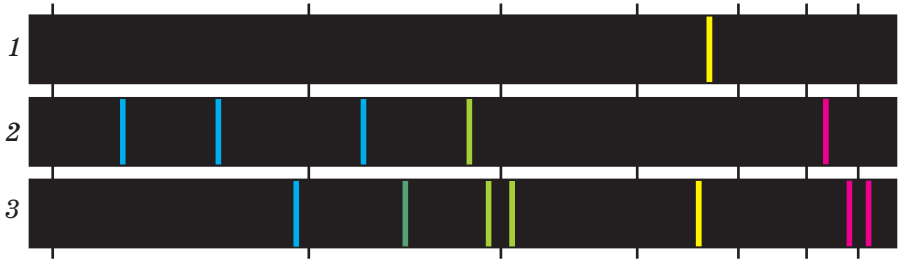
$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \qquad (2)$$

Дадзеныя пераходы даюць **лінейчасты спектр паглынання** атама.

Частоты пераходаў з выпраменьваннем і паглынаннем, якія адбываюцца паміж аднымі і тымі ж энергетычнымі ўзроўнямі, супадаюць.

Такім чынам, спектры атамаў дазваляюць вызначаць змяненні энергіі атама пры вылучэнні або паглынанні выпраменьвання.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 136. Лінейчастыя спектры выпраменьвання: *1* — натрыю; *2* — вадароду; *3* — гелію

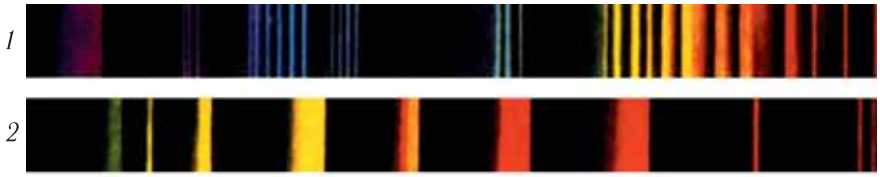
Спектры, атрыманыя ад цел, якія самі свецяцца, называюцца **спектрамі выпраменьвання**. Яны бываюць трох тыпаў: *лінейчастыя*, *паласатыя* і *суцэльныя*.

Лінейчастыя спектры маюць усе рэчывы ў газападобным атамарным стане. Звычайна (напрыклад, пры нармальных умовах) атамы газу знаходзяцца ў асноўным стане і не выпраменьваюць святло. Калі награваць такі газ, то электроны ў некаторых атамах пераходзяць на больш высокія энергетычныя ўзроўні. Такія (узбуджаныя) атамы пры пераходзе электронаў на больш нізкія энергетычныя ўзроўні і вылучаюць фатоны. У выніку атамарныя спектры складаюцца з асобных вузкіх ліній рознага колеру, падзеленых цёмнымі прамежкамі (рыс. 136).

Вывучэнне лінейчастых спектраў выявіла, што кожны хімічны элемент валодае сваім строга індывідуальным спектрам. Такія спектры адрозніваюцца адзін ад аднаго колерам асобных ліній, якія свецяцца, 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 малекулах, акрамя руху электронаў, адбываюцца вагальны рух каля становішча раўнавагі і вярчальны рух малекулы цалкам. Згодна з квантавай механікай, энергія ўсіх відаў руху можа прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні (квантуецца). Поўная энергія малекулы вызначаецца трыма відамі яе ўнутраных рухаў. Электроннаму, вагальнаму і вярчальнаму рухам адпавядаюць тры тыпы ўзроўняў энергіі: электронны, вагальны і вярчальны. Пры злучэнні атамаў у малекулы кожны атамны ўзровень ператвараецца ў рад блізкіх узроўняў, якія адпавядаюць вагальным і вярчальным рухам. Паколькі адлегласць паміж гэтымі ўзроўнямі вельмі нязначная, асабліва ў выпадку вярчальных узроўняў (характэрная адлегласць паміж узроўнямі ~10^{-3} эВ), то ў выніку пераходаў паміж гэтымі ўзроўнямі ўзнікае мноства вельмі блізкіх спектральных ліній. Гэта абумоўлівае з'яўленне сістэмы палос у спектрах такіх малекул

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 137. Паласатыя спектры выпраменьвання: *1* — вугальнай дугі; *2* — малекул ёду

(рыс. 137). Спектры малекул можна выкарыстоўваць для ідэнтыфікацыі малекул і іх структуры.

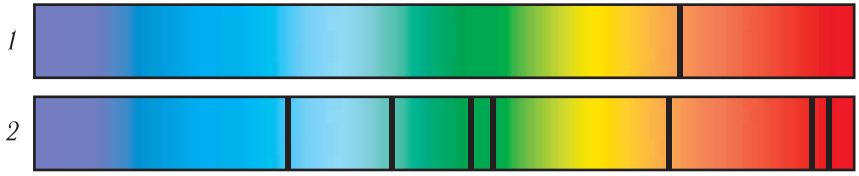
Неперарыўныя (суцэльныя) спектры маюць нагрэтыя целы, якія знаходзяцца ў цвёрдым і вадкім станах, а таксама газы пры высокім ціску і плазма. З прычыны інтэнсіўнага ўзаемадзеяння паміж малекуламі індывідуальныя рысы, уласцівыя асобным часціцам, у такіх спектрах нераспазнавальныя. У іх паказаны ўсе даўжыні хваль, няма цёмных прамежкаў і на экране бачна суцэльная рознакаляровая паласа (рыс. 138).

Рыс. 138. Неперарыўны (суцэльны) спектр выпраменьвання Сонца

Празрыстыя рэчывы паглынаюць частку падаючага на іх выпраменьвання, і ў спектры, атрыманым пасля праходжання белага святла праз такія рэчывы, з'яўляюцца цёмныя лініі, або палосы паглынання. Такі спектр называецца **спектрам паглынання** (рыс. 139).

Так, рэчыва ў газападобным стане паглынае найбольш моцна святло тых даўжынь хваль, якія яно выпраменьвае ў нагрэтым стане.

Гэта азначае, што цёмныя лініі ў спектры паглынання будуць знаходзіцца якраз у тых месцах, дзе знаходзяцца лініі, што свецяцца, у спектры выпрамень-



Рыс. 139. Спектры паглынання: *1* — натрыю; *2* — гелію

Правообладатель Народная асвета

вання дадзенага хімічнага элемента. Гэтыя строга вызначаныя заканамернасці ў лінейчастых спектрах даюць магчымасць выявіць тыя або іншыя элементы ў дадзеным рэчыве.

Спектр паглынання атама вадароду пры нармальных умовах змяшчае толькі адну серыю ліній (серыю Лаймана), частоты якіх знаходзяцца ва ўльтрафіялетавай вобласці. Гэта тлумачыцца тым, што пры адносна невялікай тэмпературы і невялікім ціску атамы вадароду не ўзбуджаны і паглынанне будзе адбывацца толькі з першага энергетычнага ўзроўню.

Для вызначэння якаснага і колькаснага саставу рэчыва прымяняецца метад, які грунтуецца на атрыманні і даследаванні яго спектраў. Гэты метад называецца **спектральным аналізам**. Гэта самы хуткі і просты спосаб вызначэння саставу розных хімічных злучэнняў.

Заснавальнікі спектральнага аналізу нямецкія фізікі Роберт Бунзен і Густаў Кірхгоф, даследуючы пару 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 або хімічнае злучэнне характарызуецца пэўным спектрам;

2) інтэнсіўнасць ліній і палос у спектры залежыць ад канцэнтрацыі таго або іншага элемента ў рэчыве.

Да вартасцей спектральнага аналізу можна аднесці:

высокую адчувальнасць (выяўляе элементы з адноснай канцэнтрацыяй парадку 10^{-7}—10^{-8}, г. зн. адзін атам рэчыва на сто мільёнаў іншых атамаў);

невялікі час вымярэння;

нязначныя колькасці даследуемага рэчыва (дастаткова парадку 10^{-2}—10^{-3} г і нават да 10^{-5}—10^{-6} г) аж да магчымасці дэтэктыравання асобных малекул;

дыстанцыйнасць вымярэнняў (можна праводзіць даследаванні, напрыклад, саставу атмасферы далёкіх планет).

Па спектрах вызначаюць, з якіх хімічных элементаў складаецца рэчыва і іх колькасць.

Беларускі фізік акадэмік Міхаіл Аляксандравіч Ельяшэвіч распрацаваў асновы тэорыі ваганняў шмататамных малекул і іх вагальных спектраў. Ён зрабіў значны ўклад у тэорыю спектраў рэдказямельных элементаў і нізкатэмпературнай плазмы.

Правообладатель Народная асвета

1. Што называюць спектрам?
2. Якія віды спектраў вы ведаеце?
3. Якія віды спектраў выпраменьвання вы ведаеце?
4. Што называюць спектрам паглынання?
5. Што называюць спектральным аналізам?
6. На чым грунтуецца спектральны аналіз?

§ 33. Спантаннае і індуцыраванае выпраменьванне

Выпраменьванне, якое адбываецца з нязменнай частатой, называецца монахраматычным.

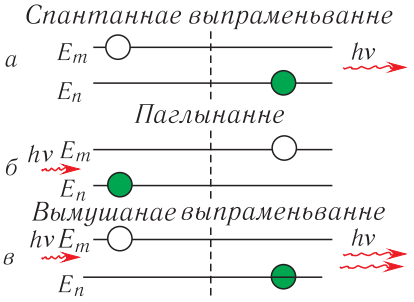
Энергія атама квантавана, г. зн. мае дыскрэтны рад значэнняў энергіі E_1, E_2, ..., E_n. Электроны ў атаме могуць знаходзіцца ў адным са станаў, якія вызначаюцца гэтымі ўзроўнямі энергіі. З прычыны гэтага пры пераходах электронаў з аднаго ўзроўню на другі атам выпраменьвае або паглынае кванты энергіі электрамагнітнага поля. Існуюць два віды пераходаў: *спантанныя* і *вымушаныя*.

Калі электрон у атаме, 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 **спантанны** пераход (рыс. 140, *а*). Пры такім пераходзе выпраменьваецца фатон, частата якога вызначаецца суадносінай:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}. \qquad (1)$$

Пераход такога роду з'яўляецца выпадковым (імавернасным) працэсам, які адбываецца ў прынцыпова непрадказальны момант часу. Гэтым пераходам адпавядае спантаннае выпраменьванне. Такія працэсы адбываюцца ў нагрэтых целах і газах, якія свецяцца. Пры награванні або электрычным разрадзе частка атмамаў пераходзіць ва ўзбуджаны стан. Затым яны выпраменьваюць святло, пераходзячы ў асноўны стан.

Выпадковасць спантанных пераходаў электронаў у атамах і малекулах розных рэчываў азначае тое, што яны адбываюцца неадначасова і незалежна адзін ад аднаго, таму фазы выпрамененых пры пераходах электрамагнітных хваль не ўзгоднены. Выпадковым з'яўляецца не толькі момант выпраменьвання фатонаў, але



Рыс. 140. Электронныя пераходы ў атаме

Правообладатель Народная асвета

і напрамак іх распаўсюджвання і іх палярызацыя (напрамак $\vec{E}$ электрычнага поля і $\vec{B}$ магнітнага поля ў электрамагнітнай хвалі). З прычыны гэтага спантаннае выпраменьванне рэчыва *ненакіраванае*, *некагерэнтнае* і *непалярызаванае*. Прыкладам такога выпраменьвання з'яўляецца святло лямпаў напальвання.

Пераход атама з аднаго стану ў другі можа адбывацца таксама і *без выпраменьвання*. У гэтым выпадку лішак энергіі вылучаецца ў якой-небудзь іншай форме. Напрыклад, ён можа перайсці ў кінетычную энергію навакольных малекул.

У атаме, які знаходзіцца ва ўзбуджаным стане, электрон можа перайсці з верхняга ўзроўню E_m на ніжні E_n не толькі спантанна, але і пад дзеяннем электрамагнітнага выпраменьвання, частата якога $\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$ супадае з частатой (1) (рыс. 140, *в*). Пераходы, якія адбываюцца пад дзеяннем знешняга электрамагнітнага выпраменьвання, называюцца **індуцыраванымі** або **вымушанымі**. Пры такім пераходзе выпраменьваецца квант энергіі $h\nu_{mn}$, які далучаецца да зыходнага ад знешняй крыніцы выпраменьвання. Адрознай асаблівасцю індуцыраванага выпраменьвання з'яўляецца тоеснасць выпрамененага фатона і фатона, які індуцыраваў дадзены пераход. Абодва фатоны пры гэтым маюць аднолькавыя частатату, фазу, напрамак распаўсюджвання, г. зн., вобразна кажучы, «кланіруюць» адзін аднаго. Менавіта таму індуцыраванае выпраменьванне набывае ўласцівасці *монахраматычнасці*, *кагерэнтнасці*, *накіраванасці*.

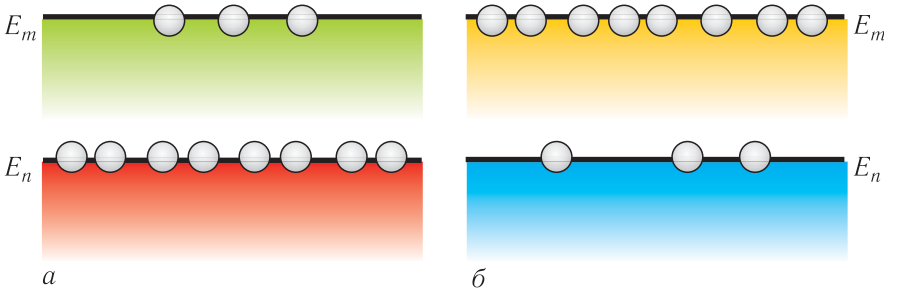
Паняцце «індуцыраванае выпраменьванне» было ўведзена А. Эйнштэйнам у 1916 г.

Акрамя разгледжанага індуцыраванага пераходу «зверху ўніз», могуць адбывацца і вымушаныя пераходы «знізу ўверх» (рыс. 140, *б*). Калі электрон у атаме 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 $h\nu_{mn} = E_m - E_n$.

Дыскрэтнасць энергетычнага спектра характэрна не толькі для атамаў, але і для любой сістэмы мікрачасціц, якія ўзаемадзейнічаюць, — малекул, іонаў, цвёрдых цел.

Найважнейшай характарыстыкай любога квантавага пераходу з'яўляецца імавернасць пераходу, якая вызначае, як часта адбываецца дадзены квантавы пераход. Вымушаныя пераходы адрозніваюцца ад спантанных залежнасцю ад знешніх умоў. Іх імавернасць прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання, у той час як імавернасць спантаннага пераходу пастаянная для дадзенай пары энергетычных узроўняў.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 141. Заселенасці энергетычных узроўняў: *а* — пры цеплавой раўнавазе; *б* — інверсная заселенасць

Лік атамаў, электроны якіх знаходзяцца на дадзеным энергетычным узроўні ў адзінцы аб'ёму рэчыва, называюць *населенасцю* гэтага ўзроўню. У прыродных 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 $E_m > E_n$ населенасць узроўню E_m меншая, чым узроўню з энергіяй E_n ($N_m < N_n$) (рыс. 141, *а*).

Для ўзмацнення выпраменьвання неабходна штучна змяніць населенасці ўзроўняў у рэчыве. Разгледзім два энергетычныя ўзроўні атама E_m і E_n. Калі пры падзенні на такое рэчыва электрамагнітнага выпраменьвання частатой ν_{mn} (1) дасягнуты нераўнаважны стан рэчыва, для якога на верхнім энергетычным узроўні знаходзіцца большы лік электронаў у атаме, 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 *узмацняльнік*.

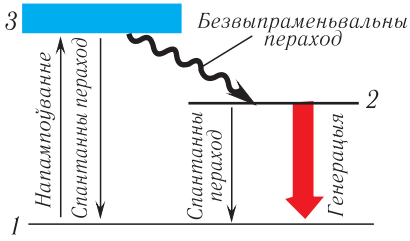
Стан рэчыва, пры якім для некаторай пары ўзроўняў населенасць верхняга ўзроўню большая, чым ніжняга, атрымаў назву стану з **інверснай населенасцю** (рыс. 141, *б*). Працэс стварэння інверснай населенасці называецца **напампоўкай**. Рэчыва, у якім выканана інверсія населенасцей, называецца **актыўным**.

Для таго каб узмацняльнік ператварыць у генератар, неабходна ўвесці падыходзячую «адваротную сувязь». Сэнс адваротнай сувязі заключаецца ў тым, што частка ўзмоцненага выпраменьвання застаецца ў актыўным рэчыве і зведвае паўторнае кагерэнтнае ўзмацненне.

З'ява індуцыраванага выпраменьвання дазваляе кіраваць выпраменьваннем атамаў, узмацняць і генерыраваць кагерэнтнае выпраменьванне.

Асноўная цяжкасць у практычным выкананні дадзенай ідэі — стварэнне інверснай населенасці. Савецкімі фізікамі Мікалаем Генадзьевічам Басавым і Аляк-

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 142. Трохузроўневая схема генерацыі

сандрам Міхайлавічам Прохаравым у сярэдзіне пяцідзясятых гадоў XX ст. быў прапанаваны ўніверсальны метад стварэння інверснай населенасці з дапамогай уздзеяння на малекулы знешняга электрамагнітнага выпраменьвання на рэзананснай частаце. У далейшым гэты метад атрымаў назву метад трох узроўняў.

Рэчыва, у якога ёсць метастабільныя ўзроўні, можна эфектыўна выкарыстоўваць для ўзмацнення святла. Разгледзім, як была вырашана гэта праблема на прыкладзе трохузроўневай сістэмы. Агульны лік узроўняў у рэчыве заўсёды вялікі, але ў ім існуюць тры «рабочыя» энергетычныя ўзроўні, якія дазваляюць стварыць інверсію населенасцей. У некаторых атамаў ёсць доўгажывучыя прамежкавыя ўзбуджаныя станы (іх называюць метастабільнымі), час жыцця ў якіх можа дасягаць некалькіх секунд, у той час як ў звычайных узбуджаных станах час жыцця $\sim 10^{-8}$ с.

У гэтым выпадку, калі напампоўка выконваецца на частаце пераходу паміж ніжнім і верхнім узроўнямі, можна перавесці частку атамаў з асноўнага стану *1* ва ўзбуджаны стан *3* (рыс. 142). За кароткі час (час жыцця парадку 10^{-8} с) большая частка гэтых атамаў самаадвольна пяройдзе ў метастабільны доўгажывучы ўзбуджаны стан *2* без выпраменьвання. Лішкавая энергія перадаецца рэчыву, з прычыны чаго яно награваецца.

Населенасць прамежкавага (метастабільнага) узроўню, павялічваючыся за кошт спантанных пераходаў з верхняга ўзроўню на прамежкавы, можа перавысіць населенасць ніжняга ўзроўню. Прапусціўшы праз метастабільны стан атамаў выпраменьванне з частатой $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ атрымліваем дадаткова да зыходных фатонаў яшчэ і індуцыравана вылучаныя фатоны (гл. рыс. 142). З прычыны 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.

1. Што такое спантаннае і індуцыраванае выпраменьванне?
2. Якія характарыстыкі мае спантаннае выпраменьванне?
3. Якія характарыстыкі мае індуцыраванае выпраменьванне?
4. Растлумачце працэс узбуджэння індуцыраванага выпраменьвання.
5. Што такое актыўнае асяроддзе?
6. Які працэс называецца напампоўкай?
7. Растлумачце прынцып работы трохузроўневай сістэмы генерацыі выпраменьвання.

Правообладатель Народная асвета

§ 34. Лазеры

Пры ўзаемадзеянні з актыўным рэчывам (асяроддзем) знешняе выпраменьванне будзе ўзмацняцца, паколькі да зыходных фатонаў дабавяцца індуцыраваныя 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 выкарыстаць вымушанае выпраменьванне для ўзмацнення электрамагнітных хваль і стварэння генератараў монахраматычнага кагерэнтнага выпраменьвання — *лазераў*.

Слова **лазер** з'яўляецца скарочаным запісам англійскай фразы — **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (**laser**), якая перакладаецца так: узмацненне святла шляхам вымушанага вылучэння выпраменьвання.

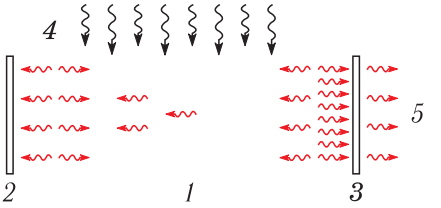
Такім чынам, прынцып работы лазераў заключаецца ў выкарыстанні вымушаных вылучальных пераходаў у сістэмах з інверсіяй населенасці для генерацыі кагерэнтных светлавых хваль.

Прынцыповая схема рубінавага лазера паказана на рысунку 143. Адваротная сувязь у лазеры дасягаецца размяшчэннем актыўнага рэчыва *1* у *аптычным рэзанатары*. Ён складаецца з двух паралельных плоскіх люстраў, адно з якіх *2* — поўнасцю адбівае, другое *3* — паўпразрыстае і служыць для выхаду выпраменьвання *5* з рэзанатару.

Напампоўка *4* стварае інверсію населенасцей узроўняў. На пачатковай стадыі генерацыі фатоны, якія спантанна вылучаны атамамі актыўнага асяроддзя, распаўсюджваюцца ў розных напрамках. Але толькі фатоны, якія распаўсюджваюцца перпендыкулярна да люстраў, шматкратна праходзяць праз актыўнае асяроддзе ў выніку адбіццяў ад люстраў рэзанатара.

Выпрамененая атамамі энергія назапашваецца ў рэзанатары і, уздзейнічаючы на актыўнае асяроддзе, выклікае новыя індуцыраваныя пераходы. Адбываецца лавінападобнае «размнажэнне» фатонаў у рэчыве. Далей пучок монахраматычнага лазернага выпраменьвання выходзіць вонкі праз паўпразрыстае люстра.

Магутнасць індуцыраванага выпраменьвання павінна быць большай за магутнасць непазбежных страт на паглынанне, рассеянне выпраменьвання, награванне люстраў рэзанатара і да т. п. Таму для эфектыўнай генерацыі інтэнсіўнасць падаючага на рэчыва выпраменьвання напампоўкі павінна перавысіць некаторае парогавае значэнне.



Рыс. 143. Прынцыповая схема лазера на рубіне

Правообладатель Народная асвета

Такім чынам, для работы лазера неабходна наяўнасць *актыўнага асяроддзя*, *рэзанатара*, а таксама *перавышэнне парога генерацыі ў сістэме*.

Асноўнымі характарыстыкамі лазернага выпраменьвання з'яўляюцца *кагерэнтнасць, малая разыходнасць (вузкая накіраванасць), монахраматычнасць, магчымасць атрымліваць звышкароткія імпульсы, вялікая магутнасць*.

У рубінавым лазеры выкарыстоўваецца аптычная напампоўка святлом магутнай імпульснай лямпы-ўспышкі (лямпы напампоўкі), у паўправадніковых лазерах нераўнаважны стан дасягаецца пры прапусканні электрычнага току праз p — n-пераход, а ў газавых лазерах атамы рабочага рэчыва ўзбуджаюцца электрычным разрадам.

Па выгляду актыўнага асяроддзя і спосабу напампоўкі лазеры можна падзяіць на *газавыя, цвёрдацелыя, паўправадніковыя, вадкасныя, хімічныя, газадынамічныя*.

Лазеры знаходзяць шырокае прымяненне ў галаграфіі, перадачы аптычнай інфармацыі, апрацоўцы матэрыялаў (зварка, рэзанне, свідраванне і да т. п.), медыцыне, лакацыі, рэкламе.

Рыс. 144. Знак небяспекі лазернага выпраменьвання

Пры рабоце з лазерамі неабходна быць уважлівымі і асцярожнымі. Найбольш небяспечным лазернае выпраменьванне з'яўляецца для вачэй і скуры. Пры пападанні ў вочы прамень лазера факусуецца ў пляму вельмі малых памераў, што можа за долі секунды выклікаць апёкі сятчаткі вока, частковую або поўную неабарачальную страту зроку. Прамое, а ў некаторых выпадках і рассеянае выпраменьванне лазераў вялікай магутнасці здольна выклікаць апёкі скуры. Лазернае выпраменьванне з'яўляецца таксама пажаранебяспечным.

Знак небяспекі, які папярэджвае аб лазерным выпраменьванні, паказаны на рысунку 144.

У 1964 г. Нобелеўская прэмія па фізіцы была прысуджана М. Г. Басаву, А. М. Прохараву і Ч. Таўнсу «за фундаментальныя работы ў галіне квантавай электронікі, якія прывялі да стварэння лазера».

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 геліева-неонавыя лазеры са значнай выходнай магутнасцю.

Правообладатель Народная асвета

У 1957 г. беларускі фізік, акадэмік Барыс Іванавіч Сцяпанаў вывеў універсальную суадносіну паміж спектрамі паглынання і выпраменьвання складаных малекул і паўправаднікоў, якая атрымала назву *суадносіна Сцяпанава*. Ён (сумесна з А. Н. Рубінавым і В. А. Мастоўнікавым) адкрыў новы клас генерыруючых злучэнняў — арганічных фарбавальнікаў.

1. Растлумачце прынцып дзеяння лазера.
2. У чым заключаецца роля метастабільных станаў у генерацыі лазернага выпраменьвання?
3. Для чаго ў лазеры неабходны рэзанатар?
4. Чым адрозніваецца лазернае выпраменьванне ад выпраменьванняў, ствараемых іншымі крыніцамі святла?
5. Дзе прымяняюцца лазеры?

САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 6

Да ліку першых мадэлей атама адносяць мадэль атама Томсана і ядзерную (планетарную) 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 другі. Пры гэтым пераходзе выпраменьваецца або паглынаецца 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 або выпрамененага кванта выпраменьвання, E_k, E_n — энергія атама ў k-м і n-м стацыянарным стане, h — пастаянная Планка.

Умова квантавання арбіт у атаме:

$$mvr_n = n\frac{h}{2\pi}, \ n = 1, 2, 3, \ldots .$$

Квантавая механіка — раздзел фізікі, у якім вывучаюцца ўласцівасці і паводзіны мікрачасціц, а таксама сувязь велічынь, што характарызуюць часціцы, з фізічнымі велічынямі, непасрэдна вымяраемымі у эксперыментах.

У квантавай механіцы для задання стану электрона ў атаме неабходны чатыры розныя квантавыя лікі: *галоўны квантавы* n, *арбітальны квантавы* l, *магнітны квантавы* m_l, *спінавы квантавы* m_s.

Правообладатель Народная асвета

Прынцып забароны Паўлі: у адным і тым жа квантавым стане можа знаходзіцца не больш за адзін электрон.

Прынцып адпаведнасці: любая новая тэорыя, якая прэтэндуе на больш глыбокае апісанне фізічных з'яў (адпаведна і на больш шырокае прымяненне) павінна ўключаць у сябе «папярэднія» тэорыі як гранічныя выпадкі.

Стан рэчыва, пры якім для некаторай пары ўзроўняў населенасць верхняга ўзроўню большая за населенасць ніжняга, атрымала назву стану з **інверснай населенасцю**.

Асяроддзе з інверснай населенасцю ўзроўняў энергіі — **актыўнае асяроддзе**.

Працэсс пераводу атамаў з асноўнага стану ва ўзбуджаны называюць **напампоўкай**.

Асноўны фізічны працэс, які вызначае дзеянне лазера, — гэта **індуцыраванае вылучэнне выпраменьвання**.

Асноўныя характарыстыкі лазернага выпраменьвання: кагерэнтнасць, малая разыходнасць (вузкая накіраванасць), монахраматычнасць, рэалізацыя звышкароткіх імпульсаў, вялікая магутнасць выпраменьвання.

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 7
Ядзерная фізіка і элементарныя часціцы

Быть может, эти электроны —
Миры, где пять материков,
Искусства, знанья, войны, троны.
И память сорока веков!

В. Брусаў

§ 35. Пратонна-нейтронная мадэль будовы ядра атама. Энергія сувязі ядра атама

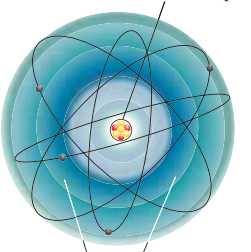
У эксперыментах Э. Рэзерфарда па вывучэнні рассеяння α-часціц рэчыва было выяўлена, што ў цэнтральнай частцы атама знаходзіцца *дадатна зараджане ядро*, памер якога парадку 10^{-15} м і ў якім сканцэнтравана 99,96 % масы атама (рыс. 145).

Для канчатковага пабудавання мадэлі атама неабходна было адказаць на пытанне: ці валодае атамнае ядро структурай, і калі валодае, то якой?

Наяўнасць у ядры дадатна зараджаных часціц — *пратонаў* — была эксперыментальна даказана Э. Рэзерфардам у 1919 г., а ў 1925 г. П. Блэкет упершыню атрымаў фатаграфіі следу пратона ў камеры Вільсана. Пратон, які абазначаецца лацінскай літарай p, уяўляе сабой ядро атама вадароду. Ён валодае масай $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ кг і элементарным зарадам $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

У 1930 г. нямецкія вучоныя Вальтэр Батэ і Ганс Бекер, вывучаючы рэакцыі, што адбываюцца пры апрамяненні берылію α-часціцамі, выявілі новае выпраменьванне, якое мела вялікую пранікальную здольнасць, першапачаткова названае берыліевымі праменямі. У 1932 г. англійскі фізік Джэймс Чэдвік правёў эксперыменты па вывучэнні ўласцівацей гэтага выпраменьвання і выявіў, што берыліевы прамені складаюцца з электрычна нейтральных часціц, маса якіх параўнальная з масай пратона. Гэтыя часціцы ён назваў *нейтронамі* (ад англ. neutral — нейтральны).

Нейтрон — яшчэ адна часціца побач з электронам, пратонам і фатонам. Гэта часціца абазначаецца лацінскай літарай n. Яна мае масу $m_n = 1{,}6750 \cdot 10^{-27}$ кг, амаль супадаючую з масай пратона, электрычна нейтральная і таму не ўдзельнічае ў электрастатычных узаемадзеяннях з атамнымі ядрамі і электронамі. З прычыны гэтага нейтрон рухаецца ў рэчыве прамалінейна да таго часу, пакуль не сутыкнецца



Рыс. 145. Будова атама

Правообладатель Народная асвета

з якім-небудзь атамным ядром. Пры сутыкненнях з цяжкімі атамамі нейтрон амаль не губляе энергію, як пругкі мячык, што адскоквае ад сцяны. Пры сутыкненні ж з лёгкімі атамамі (вадарод, берылій, вуглярод) нейтрон перадае ім частку сваёй энергіі і пачынае рухацца больш павольна. 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 цягам часу кінетычная энергія нейтрона будзе такой сама, як кінетычная энергія цеплавога руху часціц навакольнага асяроддзя. Такія нейтроны, што адносна павольна рухаюцца, называюцца **цеплавымі**.

Нейтроны ўстойлівыя толькі ў саставе стабільных ядзер. У свабодным стане, г. зн. калі знаходзіцца па-за ядром, нейтрон з'яўляецца нестабільнай часціцай. Яго час жыцця $\tau \approx 886$ с.

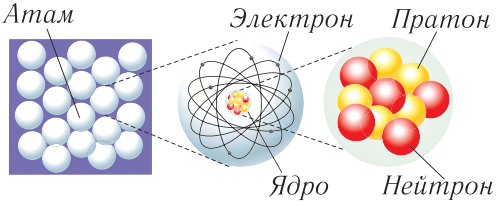
Д. Чэдвік за адкрыццё нейтрона атрымаў Нобелеўскую прэмію па фізіцы ў 1935 г.

Пасля адкрыцця нейтронў у 1932 г. савецкі фізік Дзмітрый Дзмітрыевіч Іваненка і нямецкі фізік Вернер Гейзенберг прапанавалі **пратонна-нейтронную мадэль** будовы ядра. Згодна з гэтай мадэллю ядро складаецца з часціц двух тыпаў — пратонаў і нейтронаў (рыс. 146).

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 ($q = e$) — пратонам.

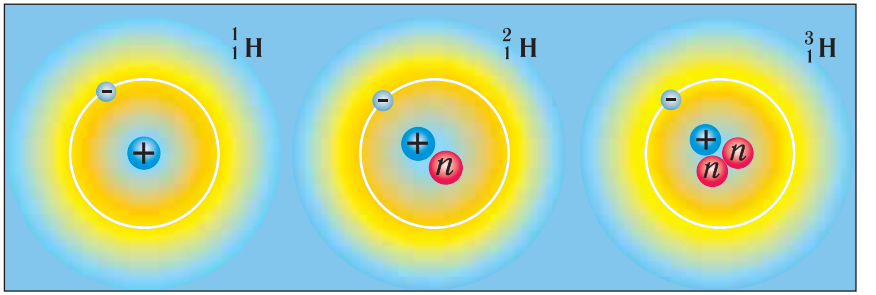
Лік пратонаў у ядры называецца **зарадавым лікам** і абазначаецца літарай Z. Зарадавы лік супадае з *парадкавым нумарам* хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева. Агульны лік нуклонаў называецца **масавым лікам** і абазначаецца літарай A. Пратон і нейтрон маюць масавы лік $A = 1$, 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 прымяняецца такі ж сімвал, як для адпаведнага хімічнага элемента. Унізе сімвала ставіцца зарадавы лік ядра Z, а ўверсе — масавы лік A. Напрыклад, запіс ${}^{12}_{6}C$ абазначае ядро вугляроду, якое змяшчае 12 нуклонаў, 6 з якіх пратоны, а 6 іншых — нейтроны.



Рыс. 146. Будова ядра

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 147. Ізатопы вадароду

Атам з пэўнымі значэннямі зарадавага ліку Z і масавага ліку A называецца **нуклідам**.

У ядрах аднаго хімічнага элемента заўсёды змяшчаецца адна і тая ж колькасць пратонаў, а лік нейтронаў можа быць розным. Напрыклад, у ядрах вуглероду лік пратонаў заўсёды 6, а лік нейтронаў можа быць 5, 6, 7, 8, 9 або 10.

Атамы, ядры якіх змяшчаюць аднолькавы лік пратонаў, але розны лік нейтронаў, называюцца **ізатопамі** (ад грэч. ιδιοζ (ізас) — аднолькавы і τοπος (топас) — месца) дадзенага хімічнага элемента. Напрыклад, добра вядомыя ізатопы вадароду — дэйтэрый $^{2}_{1}H$ і трытый $^{3}_{1}H$, якія змяшчаюць адпаведна адзін і два нейтроны ў ядры (рыс. 147).

Масы некаторых нуклідаў пададзены ў табліцы 10.

Табліца 10. **Масы нуклідаў некаторых хімічных элементаў**

Элемент	Ізатоп	Маса ядра, а. адз. м.	Элемент	Ізатоп	Маса ядра, а. адз. м.
Вадарод	$^{1}_{1}H$	1,00783	Вуглярод	$^{11}_{6}C$	11,01143
Вадарод	$^{2}_{1}H$	2,01410	Вуглярод	$^{12}_{6}C$	12,00000
Вадарод	$^{3}_{1}H$	3,01605	Азот	$^{14}_{7}N$	14,00307
Гелій	$^{4}_{2}He$	4,00260	Кісларод	$^{16}_{8}O$	15,99491
Літый	$^{6}_{3}Li$	6,01513	Фтор	$^{19}_{9}F$	18,99840
Літый	$^{7}_{3}Li$	7,01601	Алюміній	$^{27}_{13}Al$	26,98146

Правообладатель Народная асвета

Заканчэнне табл.

Элемент	Ізатоп	Маса ядра, а. адз. м.	Элемент	Ізатоп	Маса ядра, а. адз. м.
Берылій	$^{8}_{4}Be$	8,00531	Крэмній	$^{28}_{14}Si$	27,98154
Берылій	$^{9}_{4}Be$	9,01218	Уран	$^{235}_{92}U$	235,04393
Бор	$^{10}_{5}B$	10,01294	Уран	$^{238}_{92}U$	238,05079
Бор	$^{11}_{5}B$	11,00931	Плутоній	$^{239}_{94}Pu$	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, нукліды вадароду $^{3}_{1}H$ і гелію $^{3}_{2}He$ маюць блізкія па велічыні атамныя масы, але прынцыпова розныя хімічныя ўласцівасці.

У біялогіі ізатопы прымяняюцца для вывучэння фотасінтэзу, для даследавання выкарыстання раслінамі фосфару, азоту, калію і мікраэлементаў, а таксама працэсаў абмену рэчываў і біясінтэзу; у медыцыне — пры дыягностыцы захворванняў, для радыеімуннага аналізу і тамаграфіі; у экалогіі — для даследавання пераносу, назапашвання і распаду розных забруджвальнікаў у паветры, вадзе і глебе.

У рамках пратонна-нейтроннай мадэлі ядра ўзнікае пытанне аб яго ўстойлівасці. Сапраўды, паміж пратонамі, якія знаходзяцца ў ядры, дзейнічаюць велізарныя сілы электрастатычнага адштурхвання. Калі лічыць адлегласць паміж пратонамі $r \sim 10^{-15}$ м, то модуль сілы адштурхвання $F = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \approx 230$ Н, што з'яўляецца вельмі вялікай сілай для часціцы масай каля 10^{-27} кг.

Чым жа тлумачыцца ўстойлівасць ядра, калі ўнутры яго дзейнічаюць такія велізарныя сілы кулоўнаскага адштурхвання паміж пратонамі?

Прычына ўстойлівасці ядра заключаецца ў існаванні, акрамя сіл электрастатычнага адштурхвання паміж пратонамі (нуколанмі), *ядзерных сіл прыцяжэння* паміж нуклонамі. Ядзерныя сілы адрозніваюцца па сваёй прыродзе як ад сіл электрамагнітных, так і сіл гравітацыйных. Яны абумоўлены невядомым раней відам узаемадзеяння паміж нуклонамі, які называюць **моцным узаемадзеяннем**.

Правообладатель Народная асвета

Для характарыстыкі моцных узаемадзеянняў уводзіцца квантавы лік — *барыённы зарад*, які абазначаецца лацінскай літарай B. Барыённы зарад — адна з унутраных характарыстык элементарных часціц. Неабходнасць увядзення барыённага зараду абумоўлена тым, што да гэтай пары не выяўлена ні адна з'ява, у якой не выконваецца *закон захавання барыённага зараду*. Гэты зарад адрозны ад нуля для барыёнаў і роўны нулю для ўсіх астатніх часціц. Барыённы зарад уяўляе сабой безразмерны цэлы лік. Ва ўсіх бырыёнаў $B = \pm 1$. Барыённы зарад сістэмы часціц роўны алгебраічнай суме зарадаў часціц, якія яго складаюць. У прыватнасці, барыённы зарад атамных ядзер роўны іх масаваму ліку. Нуклоны адносяць да класу барыёнаў, і іх барыённы зарад $B = 1$. У часціц, якія не з'яўляюцца барыёнамі (напрыклад, электрон, фатон), $B = 0$.

Ядзерные сілы валодаюць шэрагам адрозных уласцівасцей:

1) з'яўляюцца сіламі прыцяжэння;

2) на адлегласцях парадку памеру ядра прыкладна ў 100 разоў пераўзыходзяць па велічыні кулонаўскія сілы адштурхвання ў ядры;

3) праяўляюцца толькі на адлегласцях паміж часціцамі парадку памеру ядра ($\sim 10^{-15}$ м), г. зн. з'яўляюцца кароткадзеючымі сіламі; на адлегласцях, большых за $(2—7) \cdot 10^{-15}$ м, яны не праяўляюцца;

4) не залежаць ад электрычнага зараду нуклонаў, што ўзаемадзейнічаюць (ядзерные сілы паміж двума пратонамі, нейтронамі або пратонам і нейтронам аднолькавыя); гэта ўласцівасць называецца *зарадавай незалежнасцю*;

5) валодаюць уласцівасцю насычэння, гэта азначае, што нуклоны, якія знаходзяцца ўнутры ядра, могуць узаемадзейнічаць толькі са сваімі бліжэйшымі суседзямі;

6) не з'яўляюцца цэнтральнымі, г. зн. яны не накіраваны па лініі, якая злучае цэнтры ўзаемадзеючых нуклонаў.

Шматлікія эксперыменты паказалі, што ядры маюць прыкладна сферычную форму, а аб'ём ядра прапарцыянальны масаваму ліку A. Згодна з эксперыментальнымі данымі радыус ядра павялічваецца ў залежнасці ад масавага ліку ў адпаведнасці з формулай

$$r \approx (1{,}3 \cdot 10^{-15}) \cdot A^{\frac{1}{3}} \text{ м}.$$

Паколькі памеры пратона і нейтрона прыкладна аднолькавыя (будзем лічыць іх жорсткімі шарыкамі масай $m_1 = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг), то аб'ём ядра будзе прапарцыянальны масаваму ліку A ядра. Паколькі аб'ём шара $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, то шчыльнасць ядзернага рэчыва ацэнім як

$$\rho = \frac{m_я}{V_я} = \frac{m_1 A}{\frac{4}{3}\pi r^3 A} = \frac{1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{\frac{4}{3} \cdot 3{,}14 \cdot (1{,}3 \cdot 10^{-15} \text{ м})^3} = 1{,}8 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Правообладатель Народная асвета

Значыць, усе ядры маюць шчыльнасць парадку $10^{17}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а адзін кубічны сантыметр ядзернага рэчыва мае масу 180 млн т.

Калі б можна было вырабіць галоўку запалкі з ядзернага рэчыва аб'ёмам некалькі кубічных міліметраў, то яна мела б масу каля мільёну тон. Гэта адпавядае масе вады ў кубічным рэзервуары, старана якога 100 м.

Для зручнасці вылічэнняў масу ў ядзернай фізіцы выражаюць у **атамных адзінках масы** (а. адз. м.), а энергію — у **электронвольтах** (эВ). Выкарыстоўваючы формулу Эйнштэйна для энергіі спакою $E = mc^2$, можна выразіць масу і ў адзінках энергіі — электронвольтах: $m = \frac{E}{c^2}$. Напрыклад, у атамных адзінках масы маса электрона $m_e = 0{,}00054858$ а. адз. м., маса пратона $m_p = 1{,}007276$ а. адз. м., маса нейтрона $m_n = 1{,}008665$ а. адз. м., а ў энергетычных адзінках — $m_e = 0{,}511$ МэВ, $m_p = 938{,}3$ МэВ, $m_n = 939{,}6$ МэВ, (1 МэВ $= 1 \cdot 10^6$ В).

Сувязь паміж рознымі адзінкамі масы вызначаецца наступнымі суадносінамі:

$$1 \text{ а. адз. м.} = 1{,}6605 \cdot 10^{-27}\,\text{кг} = 931{,}50\ \frac{\text{МэВ}}{c^2};$$

$$1{,}0 \text{ МэВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Энергія сувязі электрона з ядром атама вадароду ў асноўным стане роўна 13,6 эВ. Гэта азначае, што для іанізацыі атама вадароду патрабуецца выканаць работу, роўную 13,6 эВ.

А якая энергія неабходна для разбурэння ядра?

Для выдалення нуклона (пратона або нейтрона) з ядра неабходна выканаць работу супраць ядзерных сіл прыцяжэння паміж нуклонамі. З прычыны гэтага энергія сістэмы «выдалены нуклон — ядро, што засталося» павялічваецца на велічыню, роўную рабоце знешніх сіл.

У адпаведнасці з формулай Эйнштэйна ў выглядзе $E = \Delta mc^2$ знойдзем мінімальную энергію, неабходную для расшчаплення ядра на асобныя нуклоны, якая называецца **энергіяй сувязі ядра**:

$$E_{\text{сув}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2. \qquad (1)$$

Калі масу выражаць у атамных адзінках масы, а энергію сувязі ў электронвольтах, то выраз (1) можна запісаць у выглядзе:

$$E_{\text{сув}} = 931{,}5(Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}) \ \ (\text{МэВ}).$$

Правообладатель Народная асвета

Звярніце ўвагу на той факт, што звычайна ў табліцах прыводзяцца *масы атамаў*, а не масы ядзер. Паколькі пры такім падыходзе ўлічваюцца і масы электронаў, то для вылічэння энергіі сувязі ядра ў гэтым выпадку карыстаюцца формулай:

$$E_{\text{сув}} = (Zm_{\text{Н}} + (A - Z)m_n - m)c^2, \qquad (2)$$

дзе $m_{\text{Н}} = m_p + m_e$ — маса атама вадароду, а $m = m_{\text{я}} + Zm_e$ — маса атама.

Для таго каб атрымаць формулу (2), у суадносіне (1) неабходна дадаць і адняць Zm_e і не прымаць да ўвагі энергію сувязі электронаў у атаме, тады:

$$E_{\text{сув}} = (Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n - (m_{\text{я}} + Zm_e))c^2.$$

Адзначым, што паколькі $m_{\text{Н}}$ большая за масу пратона m_p на велічыню масы электрона m_e, то першае складаемае ўключае ў сябе масу Z электронаў. Але паколькі маса m атама адрозніваецца ад масы ядра на масу Zm_e электронаў, то вылічэнні па формулах (1) і (2) прыводзяць да аднолькавых вынікаў.

Эксперыменты паказваюць, што з прычыны ўстойлівасці ядраў для іх расшчаплення на асобныя часціцы неабходна выканаць знешнюю работу, роўную энергіі сувязі $E_{\text{сув}}$ дадзенага ядра. Пры такім працэсе энергія паглынаецца, паколькі энергія сістэмы павялічваецца. Адпаведна, пры ўтварэнні ядра (адваротны працэс) такая ж колькасць энергіі вылучаецца. Аднак, згодна з формулай Эйнштэйна ў выглядзе $E = \Delta mc^2$ змяненне энергіі звязана са змяненнем масы. Значыць, *маса ядра павінна быць меншай за суму мас асобных нуклонаў, якія яго ўтвараюць, на велічыню*

$$\Delta m = \frac{E_{\text{сув}}}{c^2}.$$

Такім чынам, масы ўсіх ядзер (за выключэннем ядра вадароду) меншыя за суму мас пратонаў і нейтронаў, якія іх утвараюць, у свабодным стане. Велічыня гэтай рознасці мас характарызуе ступень звязанасці нуклонаў у дадзеным ядры. Яе называюць *дэфектам* (недахопам) *мас*.

Дэфект мас — гэта рознасць паміж сумарнай масай усіх нуклонаў ядра ў свабодным стане і масай ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}.$$

Разлічым энергію сувязі нуклонаў у ядры. Дапусцім, што ядро складаецца з 4 пратонаў і 4 нейтронаў (ядро берылію $^{8}_{4}\text{Be}$). Маса пратона $m_p = 938{,}28$ МэВ, нейтрона — $m_n = 939{,}57$ МэВ. Сумарная маса ўсіх часціц складае $E_0 = 7511{,}4$ МэВ. Маса ядра $^{8}_{4}\text{Be}$ — $E_0 = 7454{,}7$ МэВ. Адкуль дэфект мас $\Delta m = 56{,}7$ МэВ. Гэта і будзе, згодна з азначэннем, *энергія сувязі* ядра берылію. Гэта энергія размер-

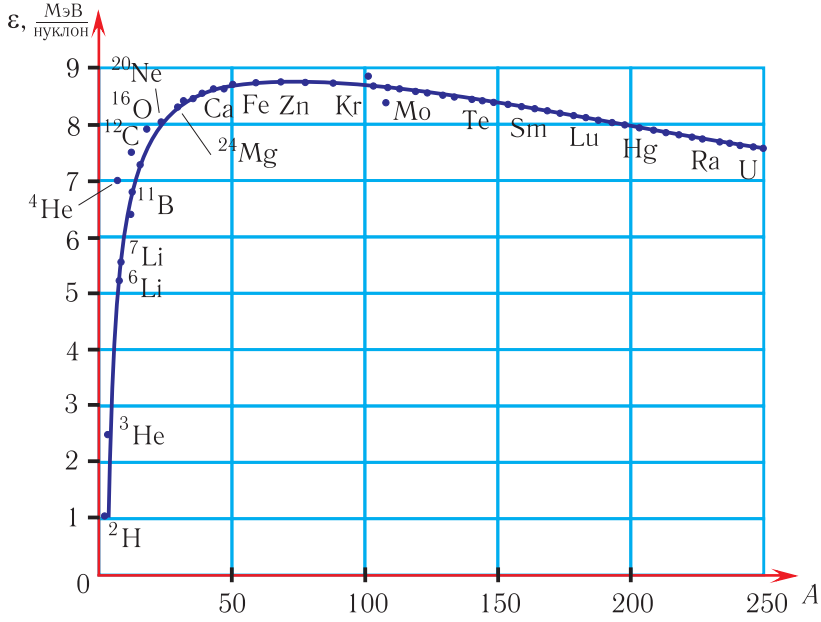
Правообладатель Народная асвета

кавана паміж усімі 8 нуклонамі ядра берылію. Значыць, на кожны нуклон прыпадае прыкладна 7 МэВ, што пацвярджаецца эксперыментальнымі данымі.

Больш зручнай характарыстыкай трываласці (звязанасці) ядзер з'яўляецца **ўдзельная энергія сувязі ε ядра**, г. зн. *энергія сувязі, якая прыпадае на адзін нуклон*. Яна роўна адносіне энергіі сувязі да масавага ліку: $\varepsilon = \frac{E_{\text{сув}}}{A}$. Адпаведна, чым большае значэнне ε, тым больш моцна звязаны кожны нуклон у ядры, значыць, тым больш трывалае ядро. Графік залежнасці ўдзельнай энергіі сувязі ад масавых лікаў ядзер $\varepsilon(A)$ паказаны на рысунку 148.

Графік сведчыць, што крывая мае пакаты максімум у сярэдняй частцы. Пры гэтым $\varepsilon(A)$ хутка нарастае пры малых значэннях ад $\varepsilon = 1$ МэВ пры $A = 1$ да $\varepsilon = 8$ МэВ пры $A = 16$. Максімум удзельнай энергіі сувязі ядра $\varepsilon_{max} = 8{,}8$ МэВ дасягаецца пры $A = 60$. Затым удзельная энергія сувязі ядра паступова памяншаецца да значэння $\varepsilon = 7{,}6$ МэВ для ўрану. Таму найбольш трывалыя ядры з сярэднімі значэннямі масавых лікаў (15—60).

Такім чынам, пры зрушэнні ядзер да цэнтральнай часткі графіка ўдзельная энергія сувязі павялічваецца, значыць, любыя ядзерныя рэакцыі, што прыводзяць да такога зрушэння, з'яўляюцца энергетычна выгадным (суправаджаюцца вылучэннем энергіі). З рысунка 148 вынікае, што падобнае зрушэнне магчыма



Рыс. 148. Удзельная энергія сувязі ядзер

Правообладатель Народная асвета

пры рэакцыях сінтэзу (аб'яднання) лёгкіх ядзер у вобласці змянення A прыкладна $0 \to 50$ і пры рэакцыях дзялення цяжкіх ядзер у вобласці змянення A прыкладна $250 \to 50$. Графічны відарыс (гл. рыс. 148) сведчыць (пад'ём графіка больш круты), што рэакцыі сінтэзу павінны адбывацца больш моцна, чым наступнае памяншэнне ўдзельнай энергіі сувязі.

1. У чым сутнасць пратонна-нейтроннай мадэлі атамнага ядра?
2. Што вызначае атамны нумар хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева?
3. Што вызначае масавы лік атамнага ядра?
4. Як у ядзернай фізіцы абазначаецца любы хімічны элемент?
5. Якія нукліды абазначаны сімвалам X: а) ${}^{18}_{7}X$; б) ${}^{82}_{38}X$; в) ${}^{247}_{97}X$?
6. Чаму роўны зарад і маса пратона?
7. Што называюць ізатопамі хімічнага элемента?
8. Што агульнага ў розных ізатопаў аднаго і таго ж хімічнага элемента? Чым яны адрозніваюцца?
9. Ці ўсе хімічныя элементы маюць ізатопы?
10. Як называецца лік нуклонаў у ядры?
11. Чаму атамная маса хімічных элементаў не выражаецца цэлым лікам?

Прыклад рашэння задачы

Вылічыце энергію, якая вылучаецца пры ядзернай рэакцыі:

$$ {}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \to 2\,{}^{4}_{2}He. $$

Рашэнне

Масы часціц (у атамных адзінках масы), якія ўступілі ў рэакцыю, і пасля яе: ${}^{7}_{3}Li$ — 7,01601 а. адз. м., ${}^{1}_{1}H$ — 1,00783 а. адз. м., ${}^{4}_{2}He$ — 4,00260 а. адз. м.

Маса часціц, якія ўступілі ў рэакцыю:

$$ m_1 = 7{,}01601 \text{ а. адз. м.} + 1{,}00783 \text{ а. адз. м.} = 8{,}02384 \text{ а. адз. м.} $$

Маса часціц пасля рэакцыі:

$$ m_2 = 2 \cdot 4{,}00260 \text{ а. адз. м.} = 8{,}00520 \text{ а. адз. м.} $$

Дэфект мас:

$$ \Delta m = m_1 - m_2 = 0{,}01864 \text{ а. адз. м.} $$

Энергія, якая вылучылася ў выніку рэакцыі:

$$ \Delta E = \Delta m c^2; $$

$$ \Delta E = 0{,}01864 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3{,}0 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2{,}8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}. $$

Адказ: $\Delta E = 2{,}8 \cdot 10^{-12}$ Дж.

Правообладатель Народная асвета

Практыкаванне 22

1. Вылічыце ўдзельную энергію сувязі $\varepsilon_{сув}$ для ядра гелію $^{4}_{2}He$.

2. Вылічыце поўную E і ўдзельную $\varepsilon_{сув}$ энергіі сувязі для ядра літыю $^{6}_{3}Li$.

3. Карыстаючыся графікам для ўдзельнай энергіі, ацаніце энергію сувязі ядзер з масавымі лікамі 20, 100, 200.

§ 36. Ядзерныя рэакцыі. Законы захавання ў ядзерных рэакцыях. Энергетычны выхад ядзерных рэакцый

Ядзернымі рэакцыямі называюцца ператварэнні атамных ядзер, якія выклікаюцца ўзаемадзеяннямі з якімі-небудзь часціцамі або аднаго з адным. Для здзяйснення ядзерных рэакцый неабходна збліжэнне часціц на адлегласць дзеяння ядзерных сіл.

У любой ядзернай рэакцыі выконваюцца законы захавання энергіі, імпульсу, зараду, масы. Паколькі ўсе ядры і зараджаныя часціцы, якія ўдзельнічаюць у рэакцыі, маюць электрычны зарад, кратны або роўны элементарнаму, то, як вынік з закону захавання электрычнага зараду, гавораць аб законе захавання зарадавага ліку. Закон захавання масавых лікаў вынікае з закону захавання барыённага зараду. Сума зарадавых і масавых лікаў ядзер і часціц, якія ўступаюць у ядзерную рэакцыю, роўна суме зарадавых і масавых лікаў ядзер і часціц, што атрымаліся ў выніку рэакцыі.

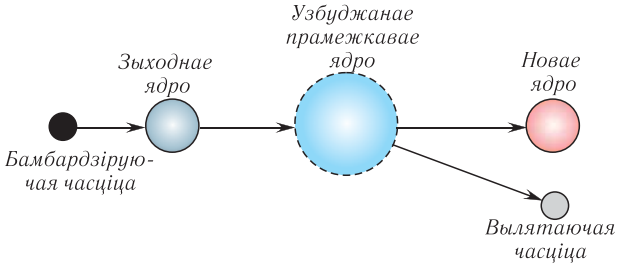
Дзеянне законаў захавання абмяжоўвае магчымыя варыянты ядзерных рэакцый і дазваляе прадказаць магчымыя шляхі (механізмы) ядзерных ператварэнняў.

Сімвалічна ядзерныя рэакцыі запісваюцца ў наступным выглядзе:

$$A + a \rightarrow B + b.$$

Тут A — зыходнае ядро, a — бамбардзіруючая часціца, B — канечнае ядро, b — часціца, якая выпраменьваецца. Для пратонаў і нейтронаў у ядзернай фізіцы прыняты наступныя сімвалічныя абазначэнні: $^{1}_{1}p$ і $^{1}_{0}n$. Для правядзення ядзернай рэакцыі пад дзеяннем дадатна зараджанай часціцы неабходна, каб часціца валодала кінетычнай энергіяй, дастатковай для пераадолення сіл кулонаўскага адштурхвання. Нейтроны, у адрозненне ад зараджаных часціц, не маюць электрычнага зараду і таму могуць пранікаць у атамныя ядры пры як заўгодна малой кінетычнай энергіі. Гэта дазваляе выкарыстоўваць іх асабліва эфектыўна.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 149. Ядзерная рэакцыя з пераходам ядра ва ўзбуджаны стан

У большасці ядзерных рэакцый, якія называюць *прамымі ядзернымі ўзаемадзеяннямі*, удзельнічаюць два ядры і дзве часціцы; першая пара «ядро — часціца» называецца *зыходнай*, а другая — *канечнай*. У такіх рэакцыях энергія, якую атрымлівае ядро, перадаецца пераважна аднаму або невялікай групе нуклонаў. Час праходжання прамой ядзернай рэакцыі вызначаецца часам пралёту $\tau \sim 10^{-22}$ с часціцы праз вобласць прасторы, якую займае ядро. Такі механізм рэакцыі з'яўляецца асноўным пры вялікіх энергіях бамбардзіруючых часціц.

Пры малых энергіях бамбардзіруючых часціц побач з прамымі ядзернымі рэакцыямі ў адпаведнасці з уяўленнямі, якія ўпершыню прапанаваў Н. Бор, адбываюцца таксама рэакцыі, якія праходзяць у два этапы з утварэннем *састаўнога ядра* (рыс. 149):

$$X + a \rightarrow C \rightarrow Y + b.$$

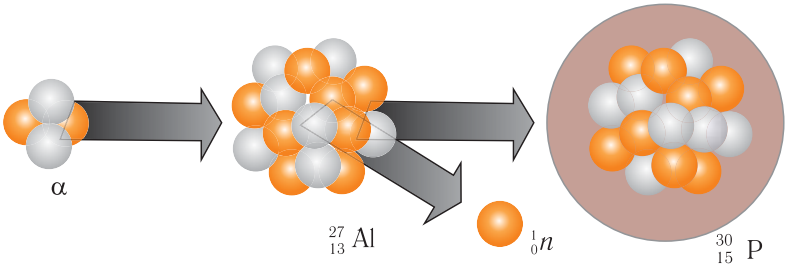
На першым этапе ядро паглынае (захоплівае) часціцу і ўтвараецца састаўное ядро ва ўзбуджаным стане. Энергія паглынутай часціцы размяркоўваецца паміж усімі нуклонамі састаўнога ядра, пры гэтым энергія, якая прыпадае на кожны нуклон, меншая за ўдзельную энергію сувязі. На другім этапе з-за абмену энергіяй паміж нуклонамі на адным або некалькіх з іх можа сканцэнтравацца энергія, дастатковая для пераадолення ядзерных сіл і вылету з састаўнога ядра. У выніку састаўное ядро ператвараецца ў канечнае і вылятаючую часціцу або γ-квант і вызваляецца ад лішку энергіі. Прамежак часу ад паглынання часціцы зыходным ядром да выпраменьвання часціцы (час жыцця ядра ва ўзбуджаным стане) складае велічыню парадку 10^{-15}—10^{-16} с, г. зн. значна большы за час пралёту часціцы праз вобласць прасторы, якую займае ядро.

Гістарычна першай ядзернай рэакцыяй пад дзеяннем α-часціц лічыцца рэакцыя, у выніку якой у 1919 г. Э. Рэзерфардам быў адкрыты пратон:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow (^{18}_{9}F)^* \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p,$$

дзе * азначае састаўное ядро ва ўзбуджаным стане.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 150. Ператварэнне алюмінію ў радыеактыўны ізатоп фосфару

Нейтрон быў адкрыты Д. Чэдвікам у 1932 г. у рэакцыі радыеактыўнага ператварэння ядзер берылію ў ізатопы вугляроду пры бамбардзіроўцы α-часціцамі:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow (^{13}_{6}\mathrm{C})^{*} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}n.$$

Як адну з самых вядомых ядзерных рэакцый адзначым яшчэ першае штучнае атрыманне Фрэдэрыкам і Ірэн Жаліо-Кюры ў 1934 г. радыеактыўных ізатопаў фосфару ў ходзе ядзернай рэакцыі (рыс. 150):

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow (^{31}_{15}\mathrm{P})^{*} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}n.$$

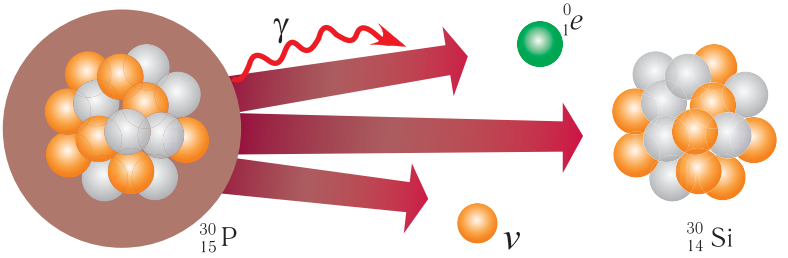
Далей ізатопы $^{30}_{15}\mathrm{P}$ ператвараюцца ў ізатопы $^{30}_{14}\mathrm{Si}$:

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{0}_{+1}e + \nu$$

з выпраменьваннем пазітронаў $^{0}_{+1}e$ (рыс. 151). Гэтыя часціцы маюць усе ўласцівасці (масу, спін, зарад) электрона, але адрозніваюцца знакам зараду.

Ядзерныя рэакцыі бываюць двух тыпаў: *эндатэрмічныя* (з паглынаннем энергіі) і *экзатэрмічныя* (з вылучэннем энергіі).

Калі сума мас зыходнага ядра і часціц, якія ўступаюць у рэакцыю, большая за суму мас канечнага ядра і часціц, якія выпраменьваюцца, то энергія вылучаецца, і наадварот.



Рыс. 151. Распад радыеактыўнага ізатопа фосфару з утварэннем крэмнію і выпраменьваннем пазітрона

Правообладатель Народная асвета

Разлічым энергетычны выхад некаторай ядзернай рэакцыі $A + a \rightarrow B + b$. Калі сума мас часціц да рэакцыі $m_A + m_a$, а пасля рэакцыі — $m_B + m_b$, то рознасць энергій канечнага і зыходнага станаў часціц:

$$\Delta E = (m_B + m_b)c^2 - (m_A + m_a)c^2 = (m_B + m_b - m_A - m_a)c^2.$$

Калі $\Delta E < 0$, то пры дадзенай рэакцыі энергія вылучаецца, а калі $\Delta E > 0$, то паглынаецца. Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, называецца **энергетычным выхадам** ядзернай рэакцыі. Падкрэслім, што энергетычны выхад розных ядзерных рэакцый можа дасягаць соцень мегаэлектронвольтаў, што ў мільёны разоў перавышае энергетычны выхад пры хімічных рэакцыях.

Такім чынам, ядзерныя рэакцыі класіфікуюцца па наступных прыметах:

1) па родзе часціц, якія ў іх удзельнічаюць (нейтроны, зараджаныя часціцы, выпраменьванні);

2) па энергіі часціц, якія іх выклікаюць, — малыя энергіі (парадку эВ), сярэднія энергіі (МэВ), высокія энергіі (100—1000 МэВ);

3) па родзе ядзер, якія ў іх удзельнічаюць (лёгкія, сярэднія, цяжкія);

4) па характары ядзерных ператварэнняў (якія адбываюцца з выпраменьваннем нейтронаў, зараджаных часціц, выпраменьвання).

1. Што называюць ядзернымі рэакцыямі?
2. Калі і кім быў адкрыты пратон і нейтрон?
3. Растлумачце рэакцыі прамых ядзерных узаемадзеянняў і рэакцыі, якія адбываюцца ў два этапы з утварэннем састаўнога ядра і запішыце іх сімваламі.
4. Назавіце асноўнае адрозненне ядзерных рэакцый на зараджаных часціцах ад ядзерных рэакцый на нейтронах.
5. Што называюць энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі?
6. У якіх выпадках рэакцыя адбываецца з паглынаннем энергіі, ў якіх — з вылучэннем?
7. Па якіх прыметах выконваецца класіфікацыя ядзерных рэакцый?

Прыклад рашэння задачы

Напішыце ядзерную рэакцыю, якая адбываецца пры бамбардзіроўцы берылію α-часціцамі і суправаджаецца выпраменьваннем нейтронаў.

Рашэнне

Для запісу ядзерных рэакцый неабходна ведаць законы захавання масавага і зарадавага лікаў:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{A}_{Z}\mathrm{X} + ^{1}_{0}n.$$

Сума масавых лікаў часціц, якія ўступілі ў рэакцыю, роўна суме масавых лікаў часціц, што ўтварыліся:

$$9 + 4 = A + 1.$$

Правообладатель Народная асвета

Адкуль $A = 12$.

Сума зарадавых лікаў часціц, якія ўступілі ў рэакцыю, роўна суме зарадавых лікаў часціц, што ўтварыліся:

$$4 + 2 = Z + 0.$$

Адкуль $Z = 6$.

З перыядычнай сістэмы хімічных элементаў Мендзялеева знаходзім, што шуканым элементам з'яўляецца вуглярод $^{12}_{6}C$.

Адказ: $^{12}_{6}C$.

Практыкаванне 23

1. Напішыце ядзерную рэакцыю, якая адбываецца пры бамбардзіроўцы ядзер нукліду бору $^{11}_{5}B$ α-часціцамі і суправаджаецца выпраменьваннем нейтронаў.

2. Ядро торыю $^{230}_{90}Th$ ператварылася ў ядро радыю $^{226}_{88}Ra$. Якую часціцу выпраменіла ядро торыю?

3. Пры апрамяненні ядзер ізатопаў фтору $^{19}_{9}F$ пратонамі ўтвараюцца ядры нукліду кіслароду $^{16}_{8}O$. Колькі энергіі E вылучаецца або паглынаецца ў гэтай рэакцыі?

4. Пры апрамяненні ядзер нукліду марганцу $^{54}_{25}Mn$ некаторымі часціцамі ўтвараюцца ядры нукліду жалеза $^{55}_{26}Fe$ і нейтроны — па адным на кожны акт ператварэння. Якія часціцы выклікаюць дадзеную рэакцыю? Напішыце ўраўненне рэакцыі.

5. Пакажыце, што самаадвольны распад $^{11}_{6}C \rightarrow {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{1}p$ немагчымы, паколькі ў гэтым выпадку будзе парушацца закон захавання энергіі.

6. Пакажыце, што ядро нукліду берылію $^{8}_{4}Be$ ($m_{Be} = 8{,}005308$ а. адз. м.) нестабільнае і распадаецца на дзве α-часціцы.

7. Ці стабільнае ядро нукліду вугляроду $^{12}_{6}C$ адносна распаду на тры α-часціцы? Адказ абгрунтуйце.

8. Пры бамбардзіроўцы нукліду алюмінію $^{27}_{13}Al$ α-часціцамі атрымліваецца радыеактыўны нуклід фосфару $^{30}_{15}P$, ядро якога затым распадаецца з вылучэннем пазітрона ($^{0}_{+1}e$). Напішыце ўраўненні абедзвюх рэакцый.

9. Пры бамбардзіроўцы ядзер жалеза $^{56}_{26}Fe$ нейтронамі ўтвараецца β^--радыеактыўны нуклід марганцу з масавым лікам $A = 56$. Напішыце рэакцыю атрымання штучнага марганцу і рэакцыю β^--распаду, які адбываецца.

10. Пры бамбардзіроўцы ядзер нукліду азоту $^{14}_{7}N$ нейтронамі атрымліваюцца ядры нукліду вугляроду $^{14}_{6}C$, якія аказваюцца β^--радыеактыўнымі. Напішыце ўраўненні абедзвюх рэакцый.

Правообладатель Народная асвета

§ 37. Радыеактыўнасць

Гісторыю ядзернай фізікі прынята адлічваць з 1896 г. Менавіта ў гэтым годзе французскі фізік Антуан Анры Бекерэль выявіў, што солі ўрану валодаюць здольнасцю засвечваць фотапласцінку, вылучаючы самаадвольна нейкае выпраменьванне. Гэта новая з'ява атрымала назву *радыеактыўнасці* (ад лац. radio — вылучаю прамені, action — дзеючы).

Радыеактыўнасць — з'ява самаадвольнага ператварэння ядзер, якая суправаджаецца вылучэннем часціц або ядзер або кароткахвалевым электрамагнітным выпраменьваннем.

У 1898 г. П'ер Кюры і Марыя Складоўская-Кюры адкрылі новыя радыеактыўныя хімічныя элементы — радый $^{226}_{88}Ra$ і палоній $^{210}_{84}Po$. Неўзабаве былі адкрыты і іншыя радыеактыўныя элементы. У 1903 г. Э. Рэзерфард і Ф. Содзі выявілі, што з'ява радыеактыўнасці суправаджаецца ператварэннем аднаго хімічнага элемента ў другі з вылучэннем энергіі, якая выдаляецца выпраменьваннем.

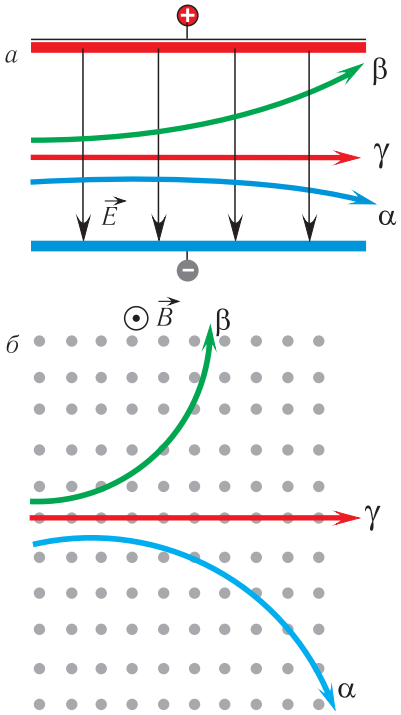
Радый на лацінскай мове азначае «які выпраменьвае прамяні», а палоній назвалі ў памяць аб радзіме Марыі Складоўскай-Кюры — Польшчы.

У 1898 г. Э. Рэзерфард выявіў, што па пранікальнай здольнасці выпраменьванне можна падзяліць на тры розныя віды. Выпраменьванне аднаго віду (α-часціцы) не праходзіла нават праз ліст паперы, другога (β-часціцы) — не пранікала ўжо праз алюміневую пласцінку таўшчынёй, большай за 3 мм, а трэцяга (γ-часціцы) — праходзіла нават праз слой свінцу таўшчынёй у некалькі сантыметраў (рыс. 152).

Гэтыя тры віды выпраменьвання былі названы згодна з першымі трыма літарамі грэчаскага алфавіта: α-, β- і γ-выпраменьваннем. Потым было выяўлена, што

Рыс. 152. Пранікаючая здольнасць розных відаў радыеактыўных выпраменьванняў

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 153. Паводзіны радыеактыўных выпраменьванняў у электрычным (*а*) і магнітным (*б*) палях

ўсе гэтыя віды выпраменьвання ўяўляюць сабой вядомыя часціцы: α-выпраменьванне — гэта ядры атамаў гелію $^{4}_{2}He$ (таксама абазначаецца $^{4}_{2}\alpha$), β⁻-выпраменьванне — электроны, γ-выпраменьванне — фатоны вельмі вялікай энергіі. Радыеактыўныя выпраменьванні па-рознаму паводзяць сябе ў электрычных і магнітных палях (рыс. 153).

Пры **α-распадзе** пачатковага (так званага мацярынскага) ядра $^{A}_{Z}X$ прадуктам распаду аказваецца ізатоп Y з лікам пратонаў $Z-2$ і масавым лікам $A-4$:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He. \qquad (1)$$

Асаблівасці α-распаду:

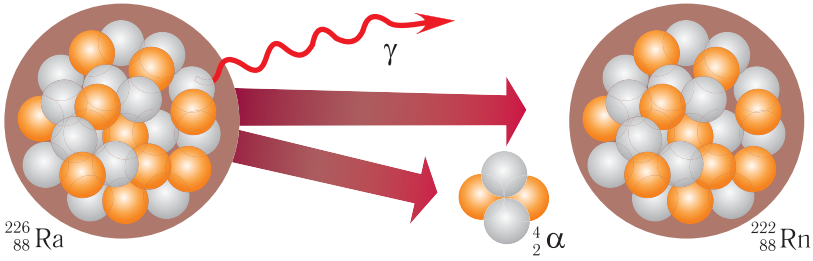
1) назіраецца для прыродных ядзер з $Z > 83$, а нестабільныя ізатопы і пры $Z < 83$, паколькі энергетычна выгадным робіцца выпраменьванне α-часціц;

2) энергія α-часціц, якія вылятаюць з розных ядзер, знаходзіцца ў асноўным у межах ад 4 да 9 МэВ;

3) вылятаючыя α-часціцы маюць дыскрэтны спектр значэнняў энергіі (пры распадзе дадзенага ядра выпраменьваецца α-часціца з пэўнай энергіяй).

Прыкладам α-распаду з'яўляецца рэакцыя $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$, у ходзе якой атрымліваецца радыеактыўны радон (рыс. 154).

Пры **β⁻-распадзе** ядра $^{A}_{Z}X$ утвараецца нуклід з атамным нумарам $Z+1$ і такім жа масавым лікам, як і ў мацярынскага ядра, і выпраменьваецца электрон.



Рыс. 154. Рэакцыя α-распаду радыю

Правообладатель Народная асвета

Для электронаў у ядзернай фізіцы прынята абазначэнне $^{0}_{-1}e$. З улікам гэтага рэакцыю β^--распаду можна запісаць наступным чынам:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \nu, \qquad (2)$$

дзе ν — невядомая ў той час часціца, зарадавы і масавы лікі якой роўны нулю.

Паколькі ў ядзерных ператварэннях элементы «зрушваюцца» па табліцы Мендзялеева, то заканамернасці ядзерных ператварэнняў (1) і (2), вызначаныя ў 1913 г. англійскім вучоным Фрэдэрыкам Содзі і польскім вучоным Казімежам Фаянсам, называюцца *правіламі зрушэння (зруху)*.

Асаблівасці β^--распаду:

1) назіраецца пры радыеактыўным распадзе ядзер з любымі значэннямі масавых лікаў;

2) вылятаючыя электроны маюць непарыўны спектр значэнняў энергіі ад 0 да E_{max}.

Прыклад β^--распаду — выпраменьванне электрона нуклідам стронцыю:

$$^{90}_{38}Sr \rightarrow {}^{90}_{39}Y + {}^{0}_{-1}e + \nu.$$

Пры β^--распадзе ядра, якое складаецца з нейтронаў і пратонаў, выпраменьваюцца электроны. Узнікае заканамернае пытанне: адкуль яны бяруцца? І што гэта за часціца ν?

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 прапанаванні Фермі, назвалі *нейтрына*, што ў перакладзе з італьянскага азначае «нейтрончык». Нейтрына абазначаецца грэчаскай літарай ν. Менавіта вылучэнне нейтрына 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 аснове 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.

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

Правообладатель Народная асвета

ў любым рэчыве нейтрына паводзіць сябе так, як быццам рэчыва няма. Напрыклад, у свінцы сярэдняя даўжныя прабегу паміж узаемадзеяннямі (пранікальная здольнасць) складае велічыню парадку 10^{18} м. Таму нейтрына свабодна пранізвае касмічную прастору, пралятаючы скрозь Зямлю, Сонца і іншыя нябесныя целы.

Аб фантастычнай пранікальнай здольнасці нейтрына можна меркаваць 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.

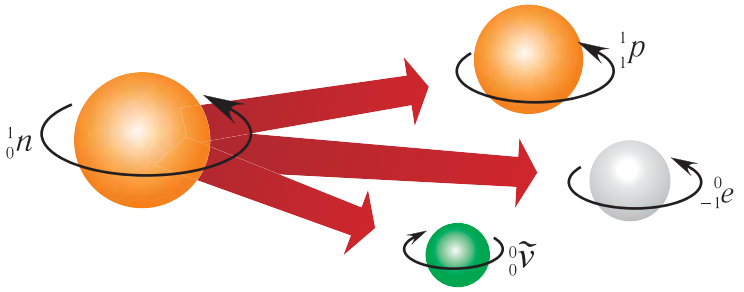
Рэакцыя распаду нейтрона мае выгляд:

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}, \qquad (3) $$

дзе $\tilde{\nu}$ абазначана *антынейтрына*.

Гэта рэакцыя схматычна паказана на рысунку 155.

Вучоным пры даследаванні асаблівасцей β^--распаду, а таксама ўласцівасцей нейтрына (антынейтрына) упершыню давялося 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 да гэтай пары не выяўлена ні адной з'явы, у якой не выконваецца *закон захавання лептоннага зараду*. Лептонны зарад таксама, як і барыённы, уяўляе сабой безразмерны цэлы лік. Ва ўсіх лептонаў $L = \pm 1$, а ў часціц, якія не з'яўляюцца лептонамі (напрыклад, нуклоны), $L = 0$. Нейтрына таксама, як і электрон, адносяць да класу *лептонаў*.



Рыс. 155. Рэакцыя распаду нейтрона на пратон, электрон і антынейтрына

Правообладатель Народная асвета

З закону захавання лептоннага зараду для рэакцыі (3) вынікае:

$$0 = 0 + 1 + L.$$

Адкуль знаходзім:

$$L = -1.$$

Такім чынам, лептонны зарад нейтрына ў дадзенай рэакцыі адмоўны. Значыць, у момант β^--распаду ядра нараджаецца не нейтрына, а антынейтрына (гл. рыс. 155).

У сучаснай фізіцы кожнай часціцы адпавядае свая *антычасціца*. Адрозненне паміж імі заключаецца ў тым, што ў антычасціц усе зарады (электрычны, барыённы, лептонны) маюць процілеглы ў адносінах да часціцы знак, у той час як масы часціц і антычасціц, што ім адпавядаюць, строга аднолькавыя.

Адзначым, што свабодны пратон, у адрозненне ад нейтрона, стабільны. Аднак у ядры з'яўляецца магчымасць β^+-ператварэння пратона ў нейтрон з выпраменьваннем *пазітрона* і *нейтрына*:

$$^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e + {}^0_0\nu.$$

Вылучэнне γ-**выпраменьвання**, у адрозненне ад α- і β-распадаў ядзер, не прыводзіць да ператварэнняў элементаў:

$$(^A_Z\mathrm{X})^* \rightarrow {}^A_Z\mathrm{X} + \gamma.$$

Уласцівасці γ-выпраменьвання:

1) кароткахвалевае электрамагнітнае выпраменьванне, даўжыня хвалі якога $\lambda \sim 10^{-10}$—10^{-13} м;

2) не мае электрычнага зараду;

3) спектр γ-выпраменьвання неперарыўны; энергія выпраменьвання знаходзіцца ў межах ад дзясяткаў кілаэлектронвольтаў да некалькіх мегаэлектронвольтаў.

Звычайна γ-выпраменьванне суправаджае радыеактыўныя ператварэнні ядзер пры α- і β-распадах. Атрыманыя пры ядзерных рэакцыях канечныя ядры (іх называюць даччынымі) знаходзяцца ва ўзбуджаных станах і пераходзяць затым у асноўныя станы, вылучаючы кванты γ-выпраменьвання.

Усе радыеактыўныя распады адбываюцца з вылучэннем энергіі, г. зн. з'яўляюцца экзатэрмічнымі, паколькі маса радыеактыўнага ядра перавышае сумарную масу ядзер прадуктаў распаду.

Няўстойлівымі з'яўляюцца як ядры, у якіх пратонаў значна больш, чым нейтронаў, так і ядры, у якіх лік нейтронаў значна большы за лік пратонаў.

Правообладатель Народная асвета

Многія нестабільныя ізатопы сустракаюцца ў прыродзе. Іх радыеактыўнасць называецца **натуральнай радыеактыўнасцю**. Стабільных ізатопаў вядома каля 270, штучных ізатопаў, якія атрымліваюць на паскаральніках і ў рэактарах, — каля 3000. Іх радыеактыўнасць называецца **штучнай радыеактыўнасцю**.

Асноўны спосаб атрымання радыеактыўных ізатопаў — бамбардзіроўка стабільных ізатопаў часціцамі высокай энергіі. Для гэтай мэты выкарыстоўваюць пучкі пратонаў або электронаў, якія разганяюць у паскаральніках, або нейтроны, што атрымліваюць у атамных рэактарах.

Гамма-выпраменьванне знаходзіць шырокае прымяненне ў медыцыне як для дыягностыкі, так і для лячэння. Пры дыягностыцы захворванняў выкарыстоўваюць радыеактыўны ёд ($E_\gamma \approx 0{,}3$ МэВ). Для лячэння злаякасных пухлін прымяняюць γ-выпраменьванне, энергія якога $E_\gamma = 1{,}3$ МэВ. Гамма-выпраменьванне натуральнага радыеактыўнага ізатопа калію $^{40}_{19}K$ служыць для вызначэння радыеактыўнасці чалавечага цела.

У 1903 г. А. Бекерэль атрымаў Нобелеўскую прэмію па фізіцы з «нагоды прызнання выдатных заслуг, якія выразіліся ў адкрыцці самаадвольнай радыяцыі». У 1903 г. П'ер Кюры і Марыя Складоўская-Кюры атрымалі Нобелеўскую прэмію па фізіцы за даследаванне радыеактыўнасці і адкрыццё радыю.

1. Якія нукліды называюць стабільнымі, а якія — радыеактыўнамі?
2. Што называюць радыеактыўнасцю?
3. Якія эксперыментальныя даныя сведчаць аб тым, што радыеактыўнасць — ядзерны працэс?
4. Пералічыце ўласцівасці і растлумачце прыроду α-, β-распаду і γ-выпраменьвання.
5. Ці можа адно і тое ж радыеактыўнае ядро адначасова выпраменьваць α- і β-часціцы?
6. У якіх выпадках выпраменьваюцца γ-прамені?
7. Сфармулюйце і запішыце правіла зрушэння для α-распаду. Ахарактарызуйце яго асаблівасці.
8. Сфармулюйце і запішыце правіла зрушэння для β^--распаду. Ахарактарызуйце яго асаблівасці.
9. Якія часціцы выпраменьваюцца пры α- і β-распадах?
10. Ахарактарызуйце асаблівасці γ-выпраменьвання.
11. Якія з законаў захавання выконваюцца пры радыеактыўных ператварэннях?

Правообладатель Народная асвета

§ 38. Закон радыеактыўнага распаду

Большасць ізатопаў любога хімічнага элемента ператвараецца ў больш устойлівыя ізатопы шляхам радыеактыўнага распаду. Кожны радыеактыўны элемент распадаецца са сваёй, толькі яму ўласцівай «скорасцю». Пры гэтым для кожнага радыеактыўнага ядра існуе характэрны час, так званы *перыяд паўраспаду* $T_{1/2}$, праз які ў зыходным стане застаецца палова ядзер, што меліся. Такім чынам, **перыядам паўраспаду** $T_{1/2}$ *называецца прамежак часу, за які распадаецца палова пачатковай колькасці* N_0 *радыеактыўных ядзер*. Пры гэтым ядры, што распаліся, ператвараюцца ў ядры іншых, больш устойлівых ізатопаў.

Адзначым, што перыяд паўраспаду не залежыць ад таго, у якім стане знаходзіцца рэчыва: цвёрдым, вадкім або газападобным. Акрамя таго, перыяд паўраспаду не залежыць ад часу, месца і ўмоў, у якіх знаходзіцца радыеактыўнае рэчыва. Таму колькасць радыеактыўных ядзер «тады» N_1 і «цяпер» N_2 залежыць толькі ад прамежку часу $\tau = t_2 - t_1$, які прайшоў з моманту пачатку рэгістрацыі працэсу распаду ядзер.

Немагчыма дакладна прадказаць, калі адбудзецца распад дадзенага ядра. Аднак можна ацаніць сярэдні лік ядзер, якія распадуцца за дадзены прамежак часу. Такім чынам, радыеактыўны распад з'яўляецца працэсам статычным і справядлівы толькі для дастаткова вялікай колькасці радыеактыўных ядзер.

Для знаходжання 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 — $\frac{N_0}{4}$. Праз прамежак часу, роўны n перыядам паўраспаду ($t = nT_{1/2}$), радыеактыўных ядзер застанецца

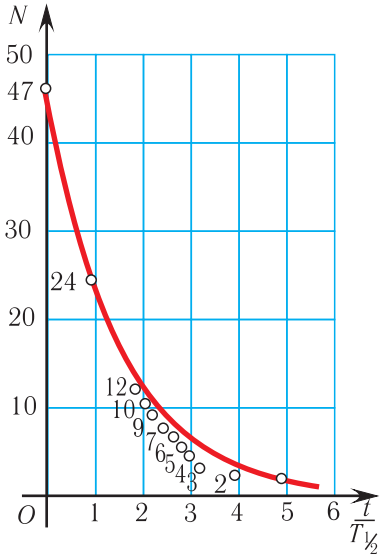
$$\boxed{N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.} \qquad (1)$$

Гэта суадносіна выражае **закон радыеактыўнага распаду**, які можна сфармуляваць наступным чынам:

лік радыеактыўных ядзер, якія не распаліся, памяншаецца з цягам часу па законе, выражанаму суадносінай (1).

Закон радыеактыўнага распаду дазваляе знайсці лік ядзер, якія не распаліся, у любы момант часу. Падкрэслім, што атрыманы выраз добра апісвае распад радыеактыўных ядзер толькі тады, калі іх колькасць дастаткова вялікая.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 156. Лік ядзер $^{256}_{100}Fm$, якія не распаліся, у залежнасці ад часу

Табліца 11. **Перыяды паўраспаду радыеактыўных ізатопаў рэчываў**

Рэчыва	Перыяд паўраспаду
$^{137}_{55}Cs$	30,17 года
$^{60}_{27}Co$	5,3 года
$^{131}_{53}I$	8,04 сутак
$^{239}_{94}Pu$	24 390 гадоў
$^{226}_{88}Ra$	1600 гадоў
$^{222}_{86}Rn$	3,8 сутак
$^{235}_{92}U$	700 млн гадоў
$^{238}_{92}U$	4,5 млрд гадоў

Прывядзём эксперыментальныя вынікі, якія сведчаць, што пры невялікай колькасці радыеактыўных ядзер гэты выраз непрымяняльны. На рысунку 156 паказаны графік распаду 47 ядзер ізатопаў фермію $^{256}_{100}Fm$, перыяд паўраспаду якога $T_{1/2} = 3{,}5$ г. З рысунка відаць, што пакуль ядзер было дастаткова многа — ад 47 да 12, 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.

Упершыню працэс радыеактыўнага распаду для вымярэння прамежкаў часу быў выкарыстаны ў 1904 г. Э. Рэзерфардам. Па адносіне канцэнтрацыі ўрану і яго даччынага прадукту распаду (гелію) ён вызначыў узрост уранавай пароды. Гэта работа з'явілася пачаткам ядзернай геахраналогіі — вызначэнню ўзросту розных мінералаў Зямлі па радыеактыўных доўгажывучых рэчывах. З цягам часу даследаванне працэсаў ядзернага сінтэзу дазволіла перайсці да ядзернай космахраналогіі, г. зн. да вызначэння працяглых прамежкаў часу, якія прайшлі з моманту ўтварэння элементаў у маштабах Галактыкі і Сусвету. Ядзерная космахраналогія грунтуецца на нязменнасці скорасці радыеактыўнага распаду.

Правообладатель Народная асвета

У 1921 г. Ф. Содзі была прысуджана Нобелеўская прэмія па хіміі «за ўклад у хімію радыеактыўных рэчываў».

1. Якім заканамернасцям падпарадкоўваецца закон радыеактыўнага распаду?
2. Што называюць перыядам паўраспаду радыеактыўнага рэчыва? Што ён характарызуе?
3. Выведзіце формулу закону радыеактыўнага распаду. Які характар гэтага распаду?
4. Колькі часу неабходна, каб распалася палова атамаў радыеактыўнага рэчыва?
5. Чаму на Зямлі да гэтага часу не распаліся ўсе радыеактыўныя ядры?

Практыкаванне 24

1. За прамежак часу t пачатковая колькасць некаторых радыеактыўных ізатопаў паменшылася ў $k_1 = 2{,}0$ раза. У колькі разоў k_2 яна паменшыцца за прамежак часу $t_1 = 2t$?

2. Якая доля ядзер ізатопаў германію $^{68}_{32}\mathrm{Ge}$, перыяд паўраспаду якога $T_{1/2} = 270$ сут, захаваецца праз прамежак часу $t = 4{,}5$ года?

3. Вызначыце масу m радыеактыўнага рэчыва, якое не распалася праз суткі, калі яго пачатковая маса была $m_0 = 1{,}0$ кг. Перыяд паўраспаду рэчыва $T_{1/2} = 10$ дзён.

4. Пры вымярэнні перыяду паўраспаду радыеактыўнага рэчыва выкарыстаны лічыльнік імпульсаў. На працягу прамежку часу $t = 1{,}0$ мін было зарэгістравана $n_1 = 250$ імпульсаў, а праз прамежак часу $t_1 = 60$ мін пасля пачатку першага вымярэння было зарэгістравана $n_2 = 92$ імпульсы за мінуту. Вызначыце перыяд паўраспаду $T_{1/2}$ дадзенага радыеактыўнага рэчыва.

5. Кавалак выкапнёвага дрэва змяшчае ізатопы вугляроду $^{12}_{6}\mathrm{C}$ і $^{14}_{6}\mathrm{C}$, агульная маса якіх $m = 240$ г. Пры гэтым назіраецца $N = 5$ распадаў ізатопаў вугляроду $^{14}_{6}\mathrm{C}$ за секунду. Ізатопы вугляроду $^{12}_{6}\mathrm{C}$ стабільны. Вызначыце ўзрост t дрэва, калі вядома, што ў жывых дрэвах адносіна $\frac{^{14}_{6}\mathrm{C}}{^{12}_{6}\mathrm{C}} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-12}$.

§ 39. Дзяленне цяжкіх ядзер. Ланцуговыя ядзерныя рэакцыі

Открытие деления урана означало появление нового вида топлива — самой массы материи.

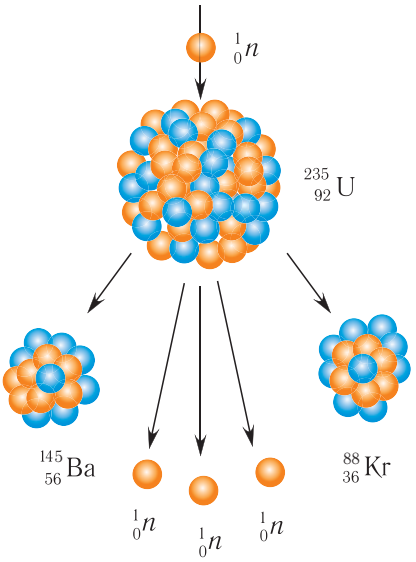
Д. Юз

Асобым тыпам ядзерных рэакцый з'яўляюцца ядзерныя рэакцыі дзялення элементаў, размешчаных у канцы перыядычнай сістэмы хімічных элементаў Мендзялеева. У выніку такіх рэакцый вылучаецца велізарная колькасць энергіі. Чаму гэта адбываецца? Звернемся да графіка ўдзельнай энергіі сувязі нуклонаў, па-

Правообладатель Народная асвета

казанага на рысунку 148. Для цяжкіх ядзер, напрыклад такіх, як $^{235}_{92}U$, удзельная энергія сувязі, якая прыпадае на нуклон, складае прыкладна 7,6 МэВ. Напомнім, што гэта энергія звязана з дэфектам мас — сумарная маса свабодных нуклонаў большая за масу ядра. Ядры хімічных элементаў з сярэдзіны перыядычнай сістэмы элементаў Мендзялеева валодаюць максімальнай удзельнай энергіяй сувязі — да 8,8 МэВ на нуклон. Такім чынам, пры расшчапленні цяжкага ядра на 2—3 больш лёгкія асколкі энергія сувязі, якая прыпадае на кожны нуклон, павялічыцца на велічыню парадку 1 МэВ. Згодна з законам захавання энергіі такая ж колькасць энергіі вылучыцца пры дзяленні ядра. Значыць, у ходзе ядзернай рэакцыі, што прыводзіць да з'яўлення ядзер з большай удзельнай энергіяй сувязі, павінна вылучацца энергія. Лік нуклонаў у кожным ядры ўрану роўны 235. Значыць, рэакцыя расшчаплення аднаго ядра прыводзіць да вылучэння больш за 200 МэВ энергіі. Нават улічыўшы магчымыя страты, гэты лік непараўнальны з энергіяй $E \approx 1$ эВ, што вылучаецца ў хімічных рэакцыях акіслення (гарэння паліва).

Вывады тэарэтыкаў знайшлі сваё пацверджанне ў працэсе шматлікіх эксперыментаў у сярэдзіне XX ст. Асноўнае пытанне заключалася ў тым, як прымусіць ядро дзяліцца. Бамбардзіроўка α-часціцамі або пратонамі неэфектыўная з-за іх моцнага адштурхвання ядром. Паколькі электроны ўяўляюць сабой занадта лёгкія «снарады», то 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 як заўгодна малой скорасцю. Трапіўшы ў сферу дзеяння ядзерных сіл прыцяжэння, нейтрон пранікае ў ядро.



Рыс. 157. Рэакцыя дзялення ядра $^{235}_{92}U$ пад дзеяннем нейтрона

У 1938 г. нямецкія радыехімікі Ота Ган, Фрыц Штрасман, Лізе Мейтнер, Ота Фрыш упершыню правялі рэакцыю дзялення $^{235}_{92}U$ нейтронамі:

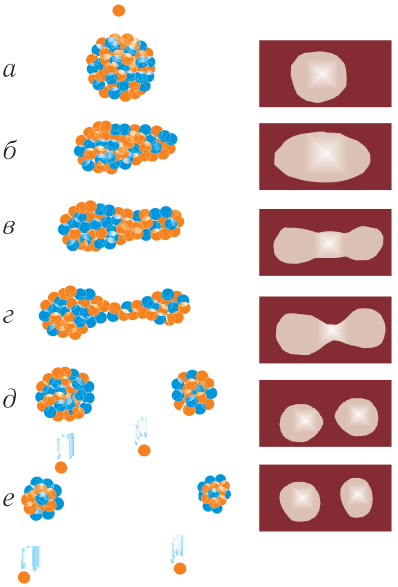
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{145}_{56}Ba + ^{88}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n + 200 \text{ МэВ}.$$

Адзначым, што сама ідэя расшчаплення ядра была такой незвычайнай, што вучоны свет спачатку не ўспрыняў вынікі іх эксперыментаў. І толькі праз некаторы час было ўсвядомлена, што ядро ўрану распадаецца на два асколкі. Дадзеная рэакцыя паказана на рысунку 157.

Правообладатель Народная асвета

У 1940 г. савецкія фізікі Георгій Мікалаевіч Флёраў і Канстанцін Антонавіч Петржак выявілі новы від радыеактыўных ператварэнняў — спантаннае дзяленне ядзер урану $^{238}_{92}U$. У працэсе дзялення ўтвараюцца асколкі — ізатопы элементаў з сярэдзіны перыядычнай сістэмы са значэннямі Z ад 34 (ізатопы селену $^{74}_{34}Se$) да 67 (ізатопы гольмію $^{162}_{67}Ho$).

Новая з'ява была названа дзяленнем ядра з-за падабенства з дзяленнем клеткі ў біялогіі. Найбольш імаверным з'яўляецца дзяленне ядра на два асколкі. Адносіна іх мас складае прыкладна 3 : 2. Імавернасць дзялення на тры асколкі складае велічыню парадку 10^{-2}—10^{-8} ад імавернасці дзялення на два. Рэакцыі дзялення ядзер звычайна з'яўляюцца экзатэрмічнымі з вылучэннем энергіі $E \sim 10^8$ МэВ у кожным акце рэакцыі.



Рыс. 158. Кропельная мадэль ядра і тлумачэнне працэсу дзялення ядзер на яе аснове. Справа — фатаграфіі працэсу дзялення кроплі вадкасці

Наглядна працэс дзялення можна паказаць, калі ўявіць ядро ў выглядзе кроплі зараджанай вадкасці. З прычыны таго, што ядзерныя сілы з'яўляюцца кароткадзеючымі, яны дзейнічаюць толькі на адлегласцях парадку 10^{-15} м. Таму нуклоны ўзаемадзейнічаюць толькі са сваімі найбліжэйшымі суседзямі. Рэчыва ядра практычна несціскальнае. Паміж пратонамі ў ядры, акрамя ядзерных сіл прыцяжэння, дзейнічаюць, у адрозненне ад нейтронаў, яшчэ і электрастатычныя сілы адштурхвання. Паколькі ядро няўстойлівае, то ядзерныя сілы і сілы электрастатычнага адштухвання ў ім скампенсаваны. Таму ядро імкнецца прыняць шарападобную форму, аналагічна кроплі вадкасці ў стане бязважкасці (рыс. 158, *а*).

Згодна з кропельнай мадэллю нейтрон пры паглынанні ядром перадае яму дадатковую энергію (падобна да нагрэву кроплі вадкасці), якая размяркоўваецца паміж усімі ўваходзячымі ў састаў ядра нуклонамі. Утвараецца прамежкавае ядро, якое знаходзіцца ва ўзбуджаным стане $(^{236}_{92}U)^*$:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow (^{236}_{92}U)^* \rightarrow ^{145}_{56}Ba + ^{88}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n + 200 \text{ МэВ}.$$

Ядзерная «вадкасць» пачынае выконваць ваганні, ядро набывае падоўжаную форму тыпу гантэлі (рыс. 158 *б, в, г*). Ядзерныя сілы ўжо не могуць утрымаць усе нуклоны разам. З прычыны электрастатычнага адштурхвання двух згусткаў

Правообладатель Народная асвета

ядзернай «вадкасці» ядро расшчапляецца на часткі (рыс. 158, *д*), якія называюцца асколкамі дзялення. Дзяленне суправаджаецца выпраменьваннем нейтронаў (рыс. 158, *е*).

Пры дзяленні ядра ўрану адзін нейтрон першапачаткова выклікае дзяленне аднаго ядра. Два асколкі дзялення, ужо не звязаныя магутнымі, але кароткадзеючымі ядзернымі сіламі, з вялікімі скарасцямі разлятаюцца з-за электрастатычнага адштурхвання. Сумарная кінетычная энергія ($E \approx 170$ МэВ) складае асноўную долю ўсёй энергіі, якая вызваляецца пры дзяленні ядра ($E \approx 200$ МэВ).

З'яўленне сколкаў — не адзіны вынік дзялення ядра. Першапачатковая адносіна ліку нейтронаў да ліку пратонаў у ядры-асколку значна большая за значэнне гэтай велічыні для стабільных ядзер параўнальнай масы.

Пры кожным акце дзялення ядра ўтвараецца 2—3 новыя нейтроны, кожны з якіх мае энергію ў сярэднім $E \approx 2$ МэВ $\left(v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$. Асколкі, якія ўтварыліся, з'яўляюцца β^--радыеактыўнымі. Таму пасля некалькіх β^--распадаў яны ператвараюцца ў стабільныя ізатопы. Часцей за ўсё даччынае ядро, якое ўтварылася пасля β^--распаду, аказваецца ўзбуджаным і пераходзіць у асноўны энергетычны стан з выпраменьваннем γ-кванта.

Уран $^{238}_{92}\text{U}$ і торый $^{232}_{90}\text{Th}$, выкарыстаныя ў якасці сыравіны для атрымання штучнага паліва, пачынаюць дзяліцца пры энергіі нейтронаў каля 1 МэВ. Асаблівасць ізатопаў $^{233}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{239}_{94}\text{Pu}$ заключаецца ў тым, што яны дзеляцца пад дзеяннем павольных нейтронаў.

У прынцыпе можна падзяліць любое ядро, але энергетычна выгадным дзяленне будзе для ўсіх элементаў, якія цяжэйшыя за серабро. Для гэтага іх неабходна «моцна ўдарыць». Напрыклад, ядро золата дзеліцца пры энергіі нейтронаў $E \geqslant 100$ МэВ.

Паколькі дзяленне ядзер выклікаюць нейтроны, а ў выніку дзялення зноў нараджаюцца нейтроны, то пры пэўных умовах працэс, які пачаўся аднойчы з аднаго нейтрона, можа прыняць характар *ланцуговай рэакцыі*: за адным дзяленнем пойдуць другія і г. д.

Ядзерная рэакцыя дзялення, у якой часціцы, што выклікаюць рэакцыю, утвараюцца як прадукты гэтай жа рэакцыі, называецца **ланцуговай**.

Якія ж умовы неабходны для ланцуговых ядзерных рэакцый?

1. Лік другасных нейтронаў $N > 1$.

2. Энергія нейтронаў, якія вылучаюцца пры дзяленні, павінна быць дастатковай, каб выклікаць дзяленне ядзер.

Правообладатель Народная асвета

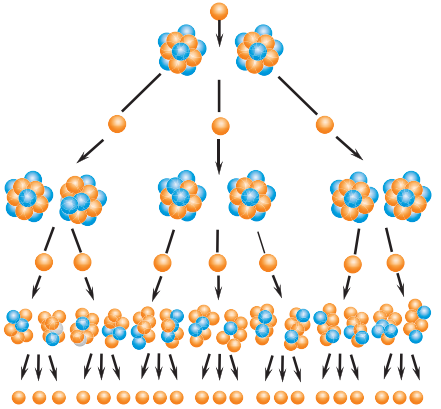
3. Павінны адсутнічаць прымесі, якія паглынаюць нейтроны.

4. Неабходна мець мінімальную колькасць рэчыва, каб нейтроны паспелі ўзбудзіць ядро да выхаду з вобласці дзялення ядзер.

Мінімальная маса рэчыва, неабходная для правядзення ланцуговай рэакцыі, называецца **крытычнай масай**. Калі маса ўзору недастатковая, то нейтроны дзялення пралятаюць праз яго практычна без узбуджэння новых ядзер. Найменшыя памеры і масу мае рэчыва сферычнай формы, паколькі для яго адносіна плошчы паверхні да аб'ёму мінімальная. Радыус сферы павінен быць большым за даўжыню прабегу нейтрона да саўдару з ядром. Тады крытычную масу ўрану $^{235}_{92}U$ можна ацаніць, і яна складае прыкладна 48 кг. Пры шчыльнасці ўрану $1{,}895 \cdot 10^4 \frac{кг}{м^3}$ радыус шара такой масы роўны прыкладна 8,5 см. Для ізатопаў плутонію $^{239}_{94}Pu$ крытычная маса складае ўжо 17 кг, што адпавядае шару, радыус якога 6,0 см.

Ланцуговая ядзерная рэакцыя ўпершыню была праведзена ў ЗША Энрыка Фермі ў 1942 г., у СССР — пад кіраўніцтвам Ігара Васільевіча Курчатава ў 1946 г.

Зноў утвораныя пры ядзернай рэакцыі дзялення два або тры нейтроны выклічуць дадатковыя акты дзялення, так што працэс лавінападобна нарастае (рыс. 159). Так запускаецца ланцуговая рэакцыя дзялення, некантралюемае (некіруемае) развіццё якой прыводзіць да вызвалення велізарнай колькасці энергіі за кароткі прамежак часу. Падобныя працэсы адбываюцца пры ядзерным выбуху (рыс. 160).



Рыс. 159. Ланцуговая рэакцыя дзялення

Рыс. 160. Ядзерны выбух

Правообладатель Народная асвета

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, якое прыводзіць да выбуху. Пры $k < 1$ лік нейтронаў памяншаецца, і рэакцыя з цягам часу спыняецца.

Нейтроны могуць паглынацца рознымі прымесямі, пакідаць вобласць, у якой адбываецца рэакцыя, губляць сваю энергію ў выніку вялікага ліку актаў рассеяння. З улікам усіх магчымых страт каэфіцыент размнажэння k павінен быць большым за адзінку.

Ланцуговая рэакцыя будзе *самападтрымлівацца*, калі колькасць нейтронаў у кожным наступным пакаленні не памяншаецца.

У ядзерных рэакцыях выконваюцца законы захвання энергіі і імпульсу, электрычнага і барыённага зарадаў. Менавіта яны дазваляюць прадказаць магчымыя шляхі ядзерных ператварэнняў.

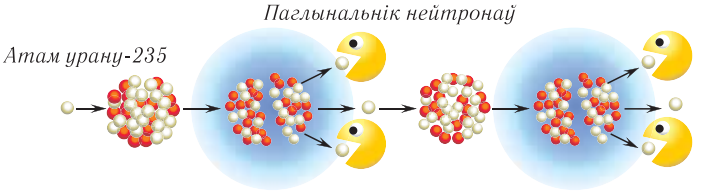
Называючы энергію, якая вылучаецца пры дзяленні ядра, атамнай, мы дапускаем двайную недакладнасць. Па-першае, дзеліцца не атам, а ядро, а па-другое, выраз «атамная энергія» ў літаральным сэнсе азначае «энергія непадзельнага». Ф. Содзі прапаноўваў узамен тэрмін «томная энергія» («энергія дзялімага») на той падставе, што слова «tomic» (дзялімы) устараніць, нарэшце, супярэчнасць «дзяленне непадзельнага». Аднак «томная» энергія не прыжылася, а так і засталася «а-томнай». Правільна яе называць ядзернай энергіяй. За выдатныя тэарэтчныя і эксперыментальныя адкрыцці ў вобласці ядзернай фізікі Энрыка Фермі ў 1938 г. быў удастоены Нобелеўскай прэміі па фізіцы.

1. Што называюць дзяленнем ядра? Якія асаблівасці мае гэты працэс?
2. Як растлумачыць здольнасць цяжкіх ядзер да дзялення? Чаму пры дзяленні ядзер адбываецца вылучэнне энергіі?
3. Апішыце механізм дзялення ядра ўрану і напішыце ўраўненне дадзенай ядзернай рэакцыі.
4. Якую рэакцыю называюць ланцуговай ядзернай рэакцыяй?
5. Дзякуючы чаму атрымалася магчымым існаванне ланцуговай ядзернай рэакцыі дзялення?
6. Што называюць каэфіцыентам размнажэння нейтронаў?
7. Чым выклікана неабходнасць запавольвання нейтронаў, якія выпраменьваюцца пры дзяленні ядзер?
8. Пакажыце схематычна і растлумачце працэсы, якія адбываюцца пры ланцуговай рэакцыі ва ўране $^{235}_{92}U$.

Правообладатель Народная асвета

§ 40. Ядзерны рэактар

Ланцуговая рэакцыя можа быць кіруемай і некіруемай (ядзерны выбух). Для кіравання ланцуговай рэакцыяй неабходна вельмі дакладна кантраляваць працэс размнажэння нейтронаў (рыс. 161), робячы яго такім, каб лік нейтронаў у працэсе рэакцыі заставаўся практычна нязменным.



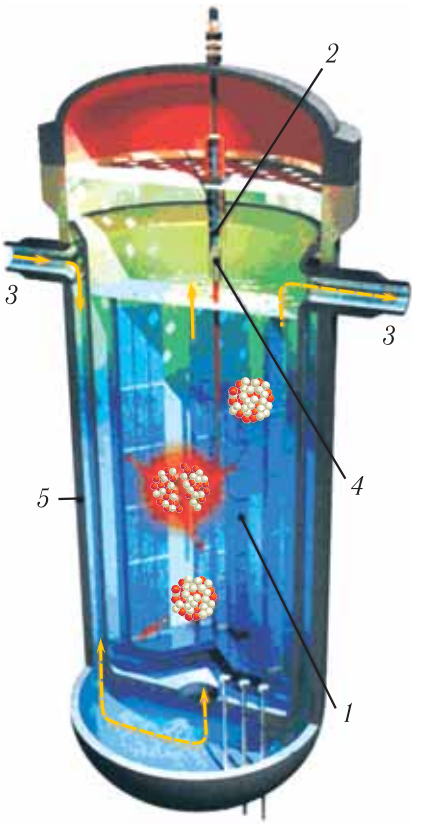
Рыс. 161. Кантралюемая ядзерная рэакцыя ў ядзерным рэактары

Пры каэфіцыенце размнажэння $k \approx 1{,}006$ ланцуговая ядзерная рэакцыя можа прыняць некіруемы характар, а пры $k > 1{,}006$ практычна імгненна адбываецца ядзерны выбух.

Ядзерны рэактар — гэта ўстройства, у якім адбываецца кіруемая ланцуговая ядзерная рэакцыя дзялення ядзер цяжкіх элементаў пад дзеяннем нейтронаў. У ходзе рэакцыі вызваляецца энергія, якую можна выкарыстаць для вытворчасці электрычнай энергіі.

Энергія, якая вызваляецца пры дзяленні ядра, выносіцца асколкамі дзялення, нейтронамі, γ-квантамі і электронамі з суправаджаючымі іх антынейтрына. У выніку гэтага ўся энергія дзялення ядра, каля 200 МэВ, пераходзіць ва ўнутраную энергію, якая вылучаецца як у самім рэактары, так і ў матэрыялах, што яго акружаюць (у бетоннай ахове і інш.).

Ядзерны рэактар мае пяць асноўных частак, паказаных на рысунку 162.



Рыс. 162. Схема ядзернага рэактара: *1* — актыўная зона з цвэламі; *2* — запавольнік (цяжкая вада); *3* — сістэма цеплаадводу; *4* — стрыжні кіравання рэакцыяй; *5* — ахоўны корпус

Правообладатель Народная асвета

1. *Актыўная зона*, якая змяшчае ядзернае паліва, што знаходзіцца ў спецыяльных **ц**яплов**ы**лучаючых **эл**ементах, або *цвэлах* (па першых літарах словазлучэння). Цвэлы ўяўляюць сабой вельмі доўгія трубкі, якія праходзяць праз усю актыўную зону рэактара. Менавіта ў цвэлах праходзіць ланцуговая рэакцыя. Актыўная зона абкружана адбівальнікам нейтронаў, які вяртае іх унутр актыўнай зоны для прадаўжэння рэакцыі. Добрым адбівальнікам нейтронаў з'яўляецца берылій.

У якасці ядзернага паліва выкарыстоўваецца тры віды радыеактыўных ізатопаў: урану $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{235}_{92}\mathrm{U}$ і плутонію $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$.

2. *Запавольнік хуткіх нейтронаў* (графіт, цяжкая вада, берылій, аксід берылію, гідрыды металаў, арганічныя вадкасці). Сярэдняя энергія нейтронаў, якія з'яўляюцца ў рэактары, каля 2 МэВ. Калі энергія нейтронаў меншая за 0,1 эВ, то іх называюць *цеплавымі*, паколькі іх скорасці блізкія да скорасці цеплавога руху, модуль якой $2{,}2\cdot10^3\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Калі энергія нейтронаў большая за 0,1 МэВ, а модуль іх скорасці парадку $10^7\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, то нейтроны называюць *хуткімі*. Прамежкавая вобласць энергій належыць прамежкавым (рэзанансным) нейтронам. Запавольнік эфектыўна адбірае энергію ў хуткіх нейтронаў, што нараджаюцца ў рэакцыі дзялення. (Успомніце сутыкненне двух цел аднолькавай масы.) Нейтроны запавольваюцца (адсюль і назва рэчыва — запавольнік) да энергій парадку долей электронвольта.

Пад дзеяннем павольных (цеплавых) нейтронаў дзеляцца толькі дастаткова рэдкія ў прыродзе ізатопы ўрану $^{235}_{92}\mathrm{U}$, у той час як значна больш распаўсюджаныя ізатопы $^{238}_{92}\mathrm{U}$ паглынаюць цеплавыя нейтроны без дзялення на асколкі. Пры кожным акце дзялення $^{235}_{92}\mathrm{U}$ вылучаецца ў сярэднім $W = 170$ МэВ у выглядзе кінетычнай энергіі асколкаў, якія разлятаюцца. Ізатопы $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$, $^{233}_{92}\mathrm{U}$, якія дзеляцца пад дзеяннем цеплавых нейтронаў, у прыродзе не сустракаюцца і атрымліваюцца штучным шляхам.

У рэактарах на хуткіх нейтронах выкарыстоўваецца *ўрана-плутоніевы* цыкл, у якім ядро $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ператвараецца ў ядро $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$, і *торыевы* цыкл, у якім ядро $^{230}_{90}\mathrm{Th}$ ператвараецца ў ядро $^{233}_{92}\mathrm{U}$.

Ядры ізатопаў $^{238}_{92}\mathrm{U}$ могуць дзяліцца толькі пад дзеяннем хуткіх нейтронаў. Аднак асноўнай рэакцыяй пры ўзаемадзеянні з нейтронамі з'яўляецца захоп нейтрона, пасля якога яны самаадвольна ператвараюцца ў ядры ізатопаў $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\mathrm{Pu}.$$

Атрыманыя ізатопы $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ з'яўляюцца практычна стабільнымі, паколькі іх перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 24\ 400$ гадоў. Плутоній $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ па здольнасці да ўзаемадзе-

Правообладатель Народная асвета

яння з нейтронамі падобны да ізатопаў урану $^{235}_{92}U$. Пры захопе нейтрона ядро плутонію дзеліцца і выпраменьвае ў сярэднім 3 нейтроны, якія здольны падтрымліваць развіццё ланцуговай рэакцыі.

Пад дзеяннем хуткіх нейтронаў ядры ізатопаў торыю $^{232}_{90}Th$ таксама самаадвольна зведваюць ланцужок распадаў, ператвараючыся ў ядры ізатопаў $^{233}_{92}U$:

$$^{232}_{90}Th + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{233}_{90}Th \rightarrow ^{233}_{91}Pa \rightarrow ^{233}_{92}U.$$

Ізатопы ўрану $^{233}_{92}U$ таксама з'яўляюцца практычна стабільнымі, паколькі іх перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 162\,000$ гадоў, але яны дзеляцца цеплавымі нейтронамі.

Такім чынам, захоп хуткіх нейтронаў ізатопамі $^{238}_{92}U$ і $^{232}_{90}Th$ дазваляе ўзнаўляць ядзернае паліва — ізатопы плутонію і ўрану $^{239}_{94}Pu$ і $^{233}_{92}U$.

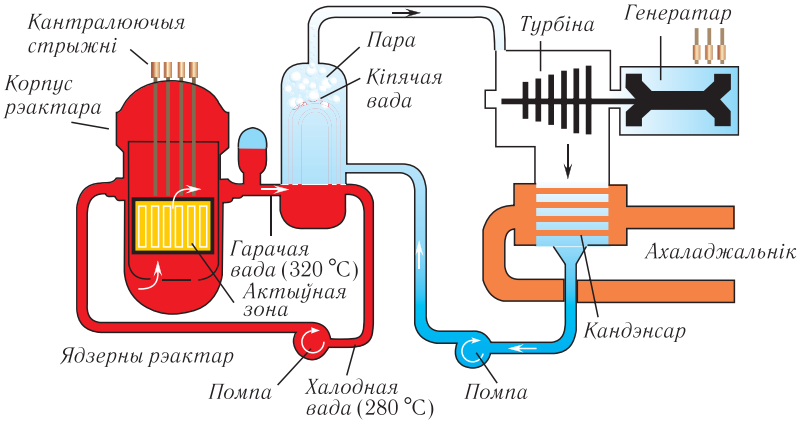
Ядзерны рэактар на хуткіх нейтронах выконвае адначасова дзве функцыі — вытворчасць энергіі і ўзнаўленне ядзернага паліва. Менавіта таму ён называецца яшчэ рэактарам-размнажальнікам (брыдэрам). Акрамя таго, у ім можна выкарыстоўваць у якасці паліва не толькі рэдкія ў прыродзе ізатопы ўрану $^{235}_{92}U$, але і значна больш распаўсюджаныя ізатопы ўрану $^{238}_{92}U$.

У сувязі з тым, што запасы радыеактыўных ізатопаў, якія натуральна дзеляцца, абмежаваны, магчымасць выканання працэсаў вытворчасці ядзернага паліва $^{239}_{94}Pu$ і $^{233}_{92}U$ 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. Прымяненне рэактара-размнажальніка дазваляе павялічыць эфектыўнасць выкарыстання паліва ў дзясяткі разоў.

3. *Сістэма ахаладжэння* — цепланосьбіт (для адводу з актыўнай зоны рэактара вылучанай у ёй энергіі) — вада, газы, вадкі натрый. Вада награваецца сценкамі цвэлаў да тэмпературы 300 °С і пад ціскам парадку 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* — устройства для забеспячэння магчымасці кіравання ланцуговай рэакцыяй. У сістэме рэгулявання выкарыстоўваецца кадмій, бор. Гэта так званыя паглынальнікі — рэчывы, якія актыўна паглынаюць нейтроны. Калі стрыжні з паглынальнікам увесці ў актыўную зону, то каэфіцыент размнажэння нейтронаў памяншаецца. І наадварот, вывядзенне стрыжняў з актыўнай зоны павялічвае каэфіцыент размнажэння. Гэтым і дасягаецца кіраванне рэакцыяй. Звычайна гэта робіцца аўтаматычна. У выпадку крытычных сітуацый прадугледжана ручная рэгулёўка апускання стрыжняў.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 163. Схема атамнай электрастанцыі з герметычным вадзяным контурам ахаладжэння

5. *Сістэма бяспекі* — абалонка з бетону з жалезным напаўняльнікам (для аховы навакольнага асяроддзя ад іанізуючага выпраменьвання кампанентаў паліва і прадуктаў ядзернай рэакцыі).

Ядзерныя рэактары адрозніваюцца па тыпе ядзернага паліва, што выкарыстоўваецца, запавольніка і цепланосьбіта.

Выпрацоўка электраэнергіі, якая грунтуецца на выкарыстанні кіруемай ядзернай рэакцыі, адбываецца на атамных электрастанцыях (АЭС) (рыс. 163).

Перавагі атамных электрастанцый:

1) не выкарыстоўваюць кісларод і арганічнае паліва;

2) адсутнічае забруджванне навакольнага асяроддзя попелам, серай і іншымі прадуктамі згарання арганічнага паліва.

Небяспечныя фактары ўздзеяння АЭС на навакольнае асяроддзе:

1) парушэнне цеплавога балансу ў наваколлі АЭС;

2) радыеактыўныя адходы;

3) радыеактыўнае забруджванне мясцовасці;

4) небяспека экалагічных катастроф.

Першая ў свеце атамная электрастанцыя была пабудавана ў СССР у г. Обнінску і дала ток 27 чэрвеня 1954 г.

Усім вядома катастрофа, якая адбылася на 4-м блоку Чарнобыльскай атамнай станцыі ў красавіку 1986 г. У выніку парушэння тэхналагічных працэсаў адбылося перагравaнне актыўнай зоны. Выбух, які адбыўся пасля гэтага, разбурыў абалонку рэактара. Вялікая колькасць радыеактыўных рэчываў была выкінута ў

Правообладатель Народная асвета

атмасферу. Пад кароткатэрміновае заражэнне кароткажывучымі ізатопамі трапілі велізарныя тэрыторыі. Доўгатэрміновае заражэнне зрабіла немагчымымі для пражывання тысячы квадратных кіламетраў тэрыторыі Беларусі, Расіі і Украіны, дзе выпалі найбольш небяспечныя ізатопы стронцыю $^{90}_{38}Sr$ (перыяд паўраспаду 27,7 года) і цэзію $^{137}_{55}Cs$ (перыяд паўраспаду каля 30 гадоў). Ізатопы $^{90}_{38}Sr$ канцэнтруюцца ў касцявых тканках і касцявым мозгу — органе крывятварэння, што прыводзіць да вельмі цяжкага захворвання — лейкеміі. А ізатопы $^{137}_{55}Cs$, што назапашваюцца ў мяккіх тканках арганізма, вылучаюць γ-выпраменьванне, якое наносіць значную шкоду арганізму.

1. Што называюць ядзерным рэактарам?
2. Што з'яўляецца ядзерным палівам у рэактарах?
3. Якое рэчыва служыць запавольнікам нейтронаў у ядзерных рэактарах? Навошта патрэбен запавольнік?
4. Што выкарыстоўваюць у якасці цепланосьбіту ў ядзерных рэактарах?
5. Як адбываецца кіраванне ланцуговай ядзернай рэакцыяй дзялення?
6. Што прымяняецца ў сістэме біялагічнай аховы ад патоку нейтронаў і γ-выпраменьвання, якія ўзнікаюць у рэактары?
7. У чым заключаюцца перавагі выкарыстання атамных электрастанцый у параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі?
8. У чым заключаюцца асноўныя недахопы атамнай энергетыкі?

§ 41. Рэакцыі ядзернага сінтэзу

Нягледзячы на тое, што атамныя электрастанцыі экалагічна больш чыстыя ў параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі і выкарыстоўваюць значна менш паліва, атамная энергетыка мае істотныя недахопы. Па-першае, радыеактыўныя элементы (уран і торый) складаюць каля $3—8 \cdot 10^{-4}$ % па масе ў зямной кары і іх здабыча ўсё ўскладняецца. Па-другое, што рабіць з растучай колькасцю радыеактыўных адходаў?

Гэтыя недахопы можна ўстараніць, калі для атрымання энергіі выкарыстоўваць не рэакцыі дзялення цяжкіх ядзер, а рэакцыі сінтэзу лёгкіх ядзер. Гэтыя рэакцыі эфектыўна адбываюцца пры звышвысокіх тэмературах парадку 10^9 К і самападтрымліваюцца за кошт значнага вылучэння ў іх энергіі. Такія рэакцыі названы **тэрмаядзернымі**. Прычына вылучэння энергіі тая ж, што і ў выпадку рэакцый дзялення, — удзельная энергія сувязі прадуктаў рэакцыі больш высокая, чым у зыходных матэрыялаў.

Энергія спакою двух лёгкіх ядзер большая, чым утворанага з іх выніковага ядра. Паколькі выніковае ядро мае меншую масу, то пры яго ўтварэнні павінна вызваляцца энергія $\Delta E = \Delta mc^2$.

Правообладатель Народная асвета

Найпрасцейшым прыкладам тэрмаядзернай рэакцыі з'яўляецца пераўтварэнне дэйтэрыю $^{2}_{1}H$ у гелій $^{4}_{2}He$:

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He.$$

Масавы лік ядра дэйтэрыю $^{2}_{1}H$ $m_H = 2{,}01410$ а. адз. м., масавы лік ядра гелію $^{4}_{2}He$ $m_{He} = 4{,}002080$ а. адз. м. У выніку рэакцыі сінтэзу дэфект мас будзе наступны:

$$\Delta m = m_{He} - 2m_H = 4{,}00280 \text{ а. адз. м.} - 2 \cdot 2{,}01410 \text{ а. адз. м.} = -0{,}0254 \text{ а. адз. м.}$$

Гэта складае 0,63 % агульнай масы ядзер вадароду. У той час як пры дзяленні ўрану дэфект мас складае 0,056 %. Значыць, 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 быў бы ў 10 разоў больш эфектыўным, чым 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 патрабаваліся ізатопы вадароду $^{1}_{1}H$, якія найбольш часта сустракаюцца, але для рэакцыі сінтэзу іх неабходна нагрэць да вельмі высокай тэмпературы. Дэйтэрый $^{2}_{1}H$ уступае ў рэакцыю сінтэзу пры больш нізкай тэмпературы, чым ізатопы вадароду $^{1}_{1}H$, а трытый $^{3}_{1}H$ — яшчэ пры больш нізкай тэмпературы. Але паколькі трытый $^{3}_{1}H$ нестабільны, то ў якасці асноўнага ядзернага паліва застаецца толькі дэйтэрый $^{2}_{1}H$.

У Сусветным акіяне з 7000 атамаў вадароду толькі адзін з'яўляецца дэйтэрыем $^{2}_{1}H$. Значыць, з улікам сусветных запасаў вады можам знайсці, што запасы дэйтэрыю складаюць 80 000 км^3. У выніку рэакцыі сінтэзу вадароду, які змяшчаецца ў 1 л вады Сусветнага акіяна, вылучаецца столькі ж энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні 300 л бензіну. Значыць, з дэйтэрыю, што змяшчаецца ў акіяне, можна атрымаць столькі энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні бензіну, аб'ём якога шматкратна перавышае аб'ём Сусветнага акіяна, г. зн. запасы дэйтэрыю практычна невычарпальныя. Акрамя таго, пры рэакцыях сінтэзу не ўтвараюцца радыеактыўныя адходы.

Аднак сур'ёзнай перашкодай на шляху да атрымання энергіі з'яўляецца электрастатычнае адштурхванне ядзер дэйтэрыю. Пры пакаёвай тэмпературы яно не дазваляе ядрам наблізіцца да адлегласцей, на якіх праяўляюцца кароткадзеючыя ядзерныя сілы прыцяжэння. Для пераадолення сіл адштурхвання неабходна нагрэць дэйтэрый $^{2}_{1}H$ да вельмі высокай тэмпературы парадку 10^9 К, пры якой магчымы рэакцыі сінтэзу. Гэта з'яўляецца істотнай перашкодай для шырокага пры-

Правообладатель Народная асвета

мянення ядзернага сінтэзу ў энергетыцы. Тэрмаядзерная рэакцыя адбываецца на Сонцы і іншых зорках. Дзякуючы велізарным масам і памерам у іх аптымальна вырашаецца праблема гравітацыйнага ўтрымання і тэрмаізаляцыі рэчыва, якое з'яўляецца плазмай.

Асноўнай крыніцай энергіі Сонца з'яўляюцца рэакцыі, якія прыводзяць да ператварэння чатырох пратонаў у ядро гелію $^{4}_{2}\mathrm{He}$ з вылучэннем 26,72 МэВ энергіі:

$$4\,^{1}_{1}p \rightarrow\, ^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,^{0}_{1}e + 2\gamma + 2\nu_e.$$

У прыродных умовах такія рэакцыі адбываюцца толькі ў нетрах зорак, а для існавання 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 стварэнне такога рэактара на наступных **ядзерных рэакцыях сінтэзу**:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + \,^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow\, ^{4}_{2}\mathrm{He} + \,^{1}_{0}n + 17{,}59 \ \text{МэВ}; \qquad (1)$$

$$^{3}_{1}\mathrm{H} + \,^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow\, ^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,^{1}_{0}n + 11{,}53 \ \text{МэВ}; \qquad (2)$$

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + \,^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow\, ^{4}_{2}\mathrm{He} + \,^{1}_{1}\mathrm{H} + 4{,}03 \ \text{МэВ}; \qquad (3)$$

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + \,^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow\, ^{3}_{2}\mathrm{He} + \,^{1}_{0}n + 3{,}27 \ \text{МэВ}. \qquad (4)$$

Найбольш даступнай з рэакцый сінтэзу (па вобласці 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 дэйтэрый змог 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:

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 1\ \text{В}}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7{,}7 \cdot 10^{9}\ \text{К}.$$

Пры такой тэмпературы рэчыва амаль кожнае сутыкненне часціц прыводзіла б да ядзернай рэакцыі, аднак на Зямлі такія ўмовы недасягальныя.

У праблеме тэрмаядзернага сінтэзу ёсць яшчэ адно пытанне: дзе ўзяць трытый? Трытый, які не сустракаецца ў прыродзе, можа быць атрыманы ў самім тэрмаядзерным рэактары, калі выкарыстаць магутныя патокі нейтронаў:

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + \,^{1}_{0}n \rightarrow\, ^{3}_{1}\mathrm{H} + \,^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Правообладатель Народная асвета

Цяпер трытый атрымліваюць з дапамогай нейтронаў ядзернага ўранавага рэактара. Дэйтэрый прысутнічае ў прыродным вадародзе, і яго можна атрымаць, раздзяляючы ізатопы вадароду. Запасы дэйтэрыю ў Сусветным акіяне велізарныя, на многія тысячы гадоў хопіць таксама запасаў літыю, неабходнага для вытворчасці другога ізатопу — 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 прымяняюцца магнітныя камеры. Асноўныя віды страт — цеплата, якая выходзіць праз сценкі рэактара, і тармазное выпраменьванне ў плазме.

Да пераваг выкарыстання рэакцый сінтэзу для атрымання энергіі адносяцца:

1) высокі выхад энергіі;

2) экалагічная бяспека рэактара;

3) адсутнасць праблемы захавання радыеактыўных адходаў.

Выканаць кіруемую тэрмаядзерную рэакцыю ў прамысловых маштабах, г. зн. атрымаць энергетычны выхад, які перавышае затраты, пакуль што не ўдалося.

На Зямлі ў цяперашні час праведзена некіруемая тэрмаядзерная рэакцыя сінтэзу пры выбуху вадароднай бомбы. Трэба заўважыць, што спачатку ў вадароднай бомбе ўзрываецца атамная бомба, якая знаходзіцца ўнутры яе. У выніку адбываецца рэзкі рост тэмпературы да $\approx (10—20) \cdot 10^6$ К, узнікае паток нейтронаў і электрамагнітнага выпраменьвання. Нейтроны ўступаюць у рэакцыю з ізатопамі літыю, якія знаходзяцца ў бомбе, з утварэннем трытыю:

$$^{1}_{0}n + ^{6}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H} + 4{,}6 \text{ МэВ}.$$

Павышэнне тэмпературы да неабходнага значэння разам з трытыем, што ўтварыўся, прыводзіць да тэрмаядзернай рэакцыі:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n + 17{,}59 \text{ МэВ}.$$

Асноўная частка энергіі (70 %) выносіцца хуткімі нейтронамі і ядрамі атамаў гелію (20 %).

Даследаванне механізмаў ядзернага сінтэзу і распаўсюджанасці розных ядзер дае магчымасць заглянуць 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 больш цяжкія элементы ўтварыліся ў выніку ядзерных рэакцый у зорках і пры выбухах зорак.

Правообладатель Народная асвета

У 2005 г. было прынята рашэнне аб будаўніцтве Міжнароднага эксперыментальнага рэактара ў г. Карадаш (Францыя), запуск якога прызначаны на 2018 г.

1. Якія рэакцыі называюцца тэрмаядзернымі?
2. Чым растлумачыць, што пры сінтэзе лёгкіх ядзер вылучаецца энергія?
3. Якія ўмовы неабходны для правядзення ядзернай рэакцыі сінтэзу?
4. Як называюцца ізатопы вадароду і як іх абазначаюць?
5. Параўнайце энергію, якая прыпадае на адзін нуклон пры тэрмаядзернай рэакцыі і ланцуговай ядзернай рэакцыі.
6. Якім чынам можна прымяніць формулу Эйнштэйна $E = mc^2$ да: а) дзялення ядзер; б) ядзернага сінтэзу; в) ядзерных рэакцый?
7. Крыніцай светлавой энергіі, якая выпраменьваецца Сонцам і іншымі зоркамі, служыць тэрмаядзерны сінтэз. Якія ўмовы ў нетрах зорак робяць магчымым праходжанне тэрмаядзернага сінтэзу?

§ 42. Іанізуючыя выпраменьванні. Элементы дазіметрыі

Зараджаныя часціцы, рэнтгенаўскае і γ-выпраменьванне, распаўсюджваючыся ў рэчыве, узаемадзейнічаюць з яго атамамі. За кошт сваёй энергіі часціцы могуць іанізаваць атамы, выбіваючы з іх электроны. Часта адна часціца можа іанізаваць некалькі атамаў, таму працэс распаўсюджвання такога выпраменьвання праз рэчыва суправаджаецца яго моцнай іанізацыяй. З прычыны гэтага **іанізуючымі** называюць такія выпраменьванні, узаемадзеянне якіх з рэчывам прыводзіць да іанізацыі яго атамаў і малекул (рыс. 164).

Аснову біялагічнага дзеяння іанізуючых выпраменьванняў на жывыя тканкі складаюць хімічныя працэсы, якія адбываюцца ў клетках пры паглынанні імі

Рыс. 164. Віды выпраменьванняў

Правообладатель Народная асвета

выпраменьванняў. 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 ўльтрафіялетавага выпраменьвання. Пад уздзеяннем гэтага выпраменьвання ў тканках адбываюцца біяхімічныя рэакцыі, абумоўленыя ўтварэннем новых малекул, непрыхільных да нармальнай клеткі. У выніку парушаецца клетачнае дзяленне і ўтварэнне новых клетак. У сваю чаргу гэта прыводзіць да храмасомных перабудоў і ўзнікнення мутацый, якія прыводзяць да змяненняў у генах клеткі. Такім чынам, біялагічнае дзеянне іанізуючых выпраменьванняў праяўляецца не толькі на дадзеным арганізме, але і на наступных пакаленнях.

Пашкоджанні жывога арганізма, выкліканыя дзеяннем іанізуючых выпраменьванняў, называюцца *прамянёвай хваробай*. Небяспека гэтай хваробы ўзмацняецца наяўнасцю скрытага перыяду, г. зн. яе сімптомы праяўляюцца толькі праз некаторы прамежак часу. Сімптомамі прамянёвай хваробы з'яўляюцца млоснасць, рвота, агульная слабасць, павышаная тэмпература, выпадзенне валасоў, кровазліццё.

А. Бекерэль першым сутыкнуўся з «вынікамі» ўздзеяння радыеактыўнага выпраменьвання на тканкі жывога арганізма. Ён паклаў прабірку з радыем у кішэню і атрымаў сур'ёзны апёк скуры.

Розныя віды іанізуючых выпраменьванняў валодаюць рознай пранікальнай здольнасцю (гл. рыс. 152). Біялагічнае дзеянне розных відаў выпраменьвання на жывыя арганізмы неаднолькавае. Напрыклад, α-часціцы не здольныя пранікнуць праз вонкавы слой скуры. Таму яны не з'яўляюцца небяспечнымі да таго часу, пакуль радыеактыўныя рэчывы, якія выпраменьваюць α-часціцы, не трапяць унутр арганізма з ежай, удыхаемым паветрам, на слізістую абалонку або 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 затрымаць яго можа толькі дастаткова тоўстая свінцовая або бетонная пліта. Чым больш энергіі перадае выпраменьванне тканкам жывога арганізма, тым больш яны атрымаюць пашкоджанняў.

Асноўную частку апрамянення насельніцтва зямнога шара атрымлівае ад натуральных крыніц іанізуючых выпраменьванняў: касмічных праменяў, натуральнай радыеактыўнасці горных парод і глебы, радыеактыўных ізатопаў, якія трапляюць у прадукты харчавання. Чалавек атрымлівае апрамяненне двума спосабамі. Радыеактыўныя рэчывы могуць знаходзіцца па-за арганізмам і апрамяняць яго звонку. У гэтым выпадку гавораць аб *знешнім апрамяненні*. У той жа час яны могуць

Правообладатель Народная асвета

знаходзіцца ў ежы, вадзе, паветры і трапіць унутр арганізма. Такі спосаб апрамянення называюць *унутраным*.

Асноўнымі крыніцамі ўнутранага фонавага апрамянення чалавечага арганізма з'яўляюцца:

1) натуральныя ізатопы вугляроду $^{14}_{6}C$, якія змяшчаюцца ва ўсіх тканках чалавечага арганізма;

2) натуральныя радыеактыўныя ізатопы калію $^{40}_{19}K$, якія змяшчаюцца ў мяккіх тканках (пераважна ў мышцах);

3) доўгажывучыя ізатопы радыю $^{226}_{88}Ra$ і яго кароткажывучыя ізатопы $^{224}_{88}Ra$, якія адкладваюцца ў касцявых тканках;

4) радон $^{222}_{86}Rn$, торый $^{232}_{90}Th$ і іх даччыныя прадукты распаду, якія ўдыхаюцца з паветрам і адкладваюцца ў органах дыхання чалавека.

Акрамя таго, некаторыя крыніцы іанізуючых выпраменьванняў выбіральна канцэнтруюцца ў асобных органах (ёд — у шчытападобнай залозе; стронцый — у касцях, уран — у нырках) і падвяргаюць іх павышанаму апрамяненню.

Вельмі важна ўмець вызначаць вынік дзеяння іанізуючага выпраменьвання на рэчыва, мерай якога з'яўляецца доза. Гэтым займаецца **дазіметрыя**.

Колькасць энергіі, перададзенай арганізму іанізуючым выпраменьваннем, называецца *дозай* (ад грэч. δοση (доза) — доля, порцыя). Існуюць розныя віды доз у залежнасці ад тыпу выпраменьвання, віду органа або тканкі, якія зведалі апрамяненне.

Энергія выпраменьвання W, паглынутая адзінкай масы m апрамененага цела (тканкамі арганізма), называецца **паглынутай дозай *D***:

$$D = \frac{W}{m}, \qquad (1)$$

дзе W — энергія, паглынутая целам (органам, тканкай), m — яго маса.

У СІ адзінкай паглынутай дозы з'яўляецца **1 грэй** (1 Гр). $1\ \text{Гр} = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Паглынутая доза выпраменьвання роўна 1 Гр, калі рэчывам масай 1 кг паглынута іанізуючае выпраменьванне, энергія якога роўна 1 Дж.

Паглынутая доза расходуецца на награванне рэчыва і на яго фізічныя і хімічныя ператварэнні. Велічыня дозы залежыць ад тыпу выпраменьвання, энергіі яго часціц, шчыльнасці іх патоку і ад саставу рэчыва, якое апраменьваецца. Пры аднолькавай паглынутай 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 тыпу пашкоджваць тканкі арганізма. Ён называецца *ўзважваючым каэфіцыен-*

Правообладатель Народная асвета

там выпраменьвання. Значэнні w_R для розных тыпаў іанізуючых выпраменьванняў прыведзены ў табліцы 12.

Пералічаную такім чынам дозу называюць *эквівалентнай дозай*. **Эквівалентная доза** H — гэта паглынутая доза, памножаная на ўзважваючы каэфіцыент выпраменьвання:

$$H = w_R D. \qquad (2)$$

У СІ адзінкай эквівалентнай дозы з'яўляецца **1 зіверт** (1 Зв).

1 Зв роўны эквівалентнай дозе, пры якой паглынутая доза роўна 1 Гр і ўзважваючы каэфіцыент роўны адзінцы.

Неабходна ўлічваць таксама, што адны часткі цела найбольш адчувальныя да апрамянення, чым другія. Таму дозы апрамянення органаў і тканак арганізма неабходна ўлічваць з рознымі ўзважваючымі каэфіцыентамі w_T. Напрыклад, касцявая тканка і шчытападобная залоза маюць каэфіцыент $w_T = 0{,}03$, лёгкія і чырвоны касцявы мозг — $w_T = 0{,}12$, малочная залоза — $w_T = 0{,}15$.

Табліца 12. **Узважваючыя каэфіцыенты для розных тыпаў іанізуючых выпраменьванняў**

Тып і энергія выпраменьвання	Узважваючы каэфіцыент, w_R
Фатоны любых энергій	1
β-Выпраменьванне (электроны любых энергій)	1
Пратоны	5
Нейтроны, энергія якіх меншая за 10 кэВ	5
Нейтроны, энергія якіх ад 10 кэВ да 100 кэВ	10
Нейтроны, энергія якіх ад 100 кэВ да 2 МэВ	20
Нейтроны, энергія якіх ад 2 МэВ да 20 МэВ	10
Нейтроны, энергія якіх большая за 20 МэВ	5
α-Часціцы і цяжкія іоны	20

Пры памнажэнні эквівалентнай дозы на адпаведныя каэфіцыенты і падсумоўванні па ўсіх органах і тканках атрымліваюць **эфектыўную эквівалентную дозу,** якая выражае сумарны эфект апрамянення для арганізма.

На практыцы шырока выкарыстоўваюцца пазасістэмныя адзінкі:

1 рад — адзінка паглынутай дозы апраменьвання:

$$1 \text{ рад} = 0{,}01 \text{ Гр}; \qquad (3)$$

1 бэр (біялагічны эквівалент рад) — адзінка эквівалентнай дозы:

$$1 \text{ бэр} = 0{,}01 \text{ Зв}; \; 1 \text{ Зв} = 1 \cdot 10^2 \text{ бэр}. \qquad (4)$$

Апрамяненне ад натуральных крыніц зведвае любы жыхар Зямлі. Натуральны фон складае каля 1,3 мЗв у год на чалавека. Аднак адны атрымліваюць большую дозу, а другія — меншую. Гэта залежыць ад месца пражывання, спосабу жыц-

Правообладатель Народная асвета

ця. Выкарыстанне газу для прыгатавання ежы, герметызацыя памяшканняў, палёты на самалётах, прымяненне некаторых будаўнічых матэрыялаў — усё гэта павялічвае ўзровень апрамянення за кошт натуральных крыніц. У сярэднім зямныя крыніцы іанізуючых выпраменьванняў забяспечваюць больш за $\frac{5}{6}$ гадавой эфектыўнай эквівалентнай дозы, якую атрымлівае насельніцтва ў асноўным за кошт унутранага апрамянення. Астатнюю частку натуральнага апрамянення прыносяць касмічныя прамяні шляхам знешняга апрамянення.

Радыяцыйны фон, што ствараецца касмічнымі праменямі, дае менш за палову знешняга апрамянення, якое атрымлівае насельніцтва ад натуральных крыніц радыяцыі. Людзі, якія жывуць на ўзроўні мора, атрымліваюць у сярэднім з-за касмічнага выпраменьвання эфектыўную эквівалентную 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 апрамянення за кошт касмічных праменяў павялічваецца прыкладна ў 25 разоў.

Пры пералёце Нью-Йорк — Парыж пасажыр рэактыўнага самалёта атрымлівае дозу каля 50 мкЗв. Усяго за кошт выкарыстання паветранага транспарту чалавецтва атрымлівае ў год калектыўную эфектыўную эквівалентную дозу каля 2000 чал.-Зв.

У сярэднім прыкладна $\frac{2}{3}$ эфектыўнай эквівалентнай дозы апрамянення, якую чалавек атрымлівае ад натуральных крыніц радыяцыі, паступае ад радыеактыўных рэчываў, што трапілі ў арганізм з вадой, ежай і паветрам.

Найбольш значнай з усіх натуральных крыніц іанізуючых выпраменьванняў з'яўляецца нябачны, які не мае смаку і паху, цяжкі газ радон і яго даччыныя прадукты. Менавіта яны адказныя прыкладна за $\frac{3}{4}$ гадавой індывідуальнай эфектыўнай дозы апрамянення, якую атрымлівае насельніцтва ад зямных крыніц іанізуючых выпраменьванняў (рыс. 165). Галоўная крыніца радону — гэта глеба, у якой ён пастаянна ўтвараецца.

Асноўны ўклад у індывідуальныя дозы, якія атрымліваюць людзі ад штучных крыніц радыяцыі, уносяць метады лячэння, звязаныя з прымяненнем іанізуючых выпраменьванняў. Яны выкарыстоўваюцца ў медыцыне як у дыягнастычных мэтах, так і для лячэння. Адным з самых распаўсюджаных медыцынскіх прыбораў з'яўляецца рэнтгенаўскі апарат. Значным дасягненнем рэнтгенадыягностыкі стала камп'ютарная тамаграфія. Яе прымяненне дазволіла паменшыць дозы апрамянення ў дзясяткі разоў.

Правообладатель Народная асвета

Рыс. 165. Крыніцы іанізуючых выпраменьванняў

Калі доза апрамянення дастаткова вялікая, то апраменены чалавек памірае. Доза апрамянення парадку 100 Гр так паражае цэнтральную нервовую сістэму, што чалавек можа памерці не толькі праз некалькі дзён, але нават і праз некалькі гадзін. Найбольш адчувальнымі да паражэння іанізуючымі выпраменьваннямі з'яўляюцца крывятворныя органы, а найбольш небяспечнымі — дозы, атрыманыя на працягу вельмі малога прамежку часу. Чырвоны касцявы мозг і іншыя элементы крывятворнай сістэмы губляюць здольнасць нармальна функцыянаваць пры дозах 0,5—1 Гр.

Для аховы ад іанізуючых выпраменьванняў па магчымасці трэба выкарыстоўваць наступныя спосабы:

1) аддаленне на вялікую адлегласць ад крыніцы;

2) абмежаванне часу знаходжання на забруджанай мясцовасці;

3) выкарыстанне ахоўных рэчываў (свінец, бор, кадмій), якія эфектыўна паглынаюць іанізуючае выпраменьванне;

4) выкарыстанне рэчываў, якія аслабляюць уздзеянне іанізуючых выпраменьванняў на арганізм;

5) дазіметрычны кантроль навакольнага асяроддзя і прадуктаў харчавання.

Шырокае прымяненне знаходзяць іанізуючыя выпраменьванні ў навуцы і тэхніцы. У выніку ўзаемадзеяння часціц высокіх энергій з даследуемым рэчывам утвараюцца радыеактыўныя нукліды. Пры пераходзе іх у стабільны стан вылучаецца γ-выпраменьванне. Па выгляду γ-спектраў і інтэнсіўнасці спектральных ліній вызначаюць хімічны састаў рэчыва і канцэнтрацыі элементаў, што змяшчаюцца ў ім. Гэты метад характарызуецца ўніверсальнасцю, хуткасцю вымярэння

Правообладатель Народная асвета

і вельмі высокай адчувальнасцю, якая дасягае велічыні парадку 10^{-7}.

Радыеактывацыйны метад аналізу шырока прымяняецца ў геолагаразведцы, асабліва пры даследаванні руд, якія змяшчаюць рэдкія і каштоўныя металы. У тэхніцы дзякуючы высокай адчувальнасці з дапамогай гэтага метаду даследуюць скорасць зносу металічных дэталей, напрыклад даследуюць знос чыгуначных рэльсаў.

Радыенукліды (ізатопы ёду, тэхнецыю, ксенону, талію) шырока выкарыстоўваюцца ў медыцынскай дыягностыцы.

Рыс. 166. Знак радыяцыйнай небяспекі

У якасці прыбораў для вымярэння дозы або яе магутнасці выкарыстоўваюцца дазіметры, здольныя рэгістраваць іанізуючыя выпраменьванні. Шкалы прыбораў спецыяльна праградуіраваны ў адзінках дозы або ў адзінках магутнасці дозы.

Увага! Знак, які папярэджвае аб радыяцыйнай небяспецы, паказаны на рысунку 166.

Па правілах МАГАТЭ (Міжнароднае Агенцтва па Атамнай Энергіі), гранічная доза апрамянення складае 5 мЗв у год для насельніцтва і 0,05 Зв у год для людзей шкодных прафесій (не лічачы фонавага апраменьвання).

У Рэспубліцы Беларусь з 19 красавіка 2000 г. уведзены наступныя Нормы радыяцыйнай бяспекі. Асноўнай гранічнай дозай 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. Якія выпраменьванні называюць іанізуючымі?
2. У чым праяўляецца біялагічнае ўздзеянне іанізуючага выпраменьвання на жывыя арганізмы?
3. Якое выпраменьванне валодае найбольшай пранікальнай здольнасцю?
4. Да якіх наступстваў можа прывесці апрамяненне чалавека іанізуючымі выпраменьваннямі?
5. Назавіце асноўныя крыніцы натуральных іанізуючых выпраменьванняў.
6. Чым займаецца дазіметрыя?
7. Дайце азначэнне паглынутай дозы апрамянення. Што з'яўляецца адзінкай вымярэння паглынутай дозы ў СІ?
8. Што такое эквівалентная доза? Што з'яўляецца адзінкай эквівалентнай дозы ў СІ?
9. Што такое эфектыўная эквівалентная доза? Што з'яўляецца адзінкай эфектыўнай эквівалентнай дозы ў СІ?
10. Якія пазасістэмныя адзінкі выкарыстоўваюцца для вымярэння паглынутаў і эквівалентнай дозы?
11. Якія з натуральных унутраных крыніц іанізуючых выпраменьванняў з'яўляюцца найбольш небяспечнымі?
12. Якія органы чалавека найбольш адчувальныя да ўздзеянняў іанізуючых выпраменьванняў?

Правообладатель Народная асвета

§ 43. Элементарныя часціцы і іх узаемадзеянні

Кожны электрон характарызуецца ўласным механічным момантам руху, які называецца *спінам* (ад англ. spin — вярцець).

Элементарныя часціцы — першасныя, нераскладальныя далей часціцы, якія нельга лічыць злучэннем іншых часціц, што існуюць у свабодным стане.

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'яўляецца маса, час жыцця, электрычны зарад і спін.

Першапачаткова класіфікацыя элементарных часціц выконвалася па іх масе, што і было выражана ў назвах тыпаў часціц (**лептоны** — лёгкія, **мезоны** — сярэднія, **барыёны** — цяжкія).

Электрычныя зарады элементарных часціц з'яўляюцца кратнымі велічыні элементарнага электрычнага зараду.

У залежнасці ад часу жыцця элементарныя часціцы падзяляюцца на *стабільныя*, *квазістабільныя* і *нестабільныя* (*рэзанансы*).

Стабільнымі ў межах дакладнасці сучасных вымярэнняў з'яўляюцца электрон, пратон, фатон і нейтрына.

Да квазістабільных адносяцца часціцы, якія распадаюцца за кошт электрамагнітнага і слабага ўзаемадзеянняў. Іх час жыцця $\tau > 10^{-20}$ с.

Рэзанансамі (нестабільнымі часціцамі) называюцца элементарныя часціцы, якія распадаюцца за кошт моцнага ўзаемадзеяння. Іх час жыцця 10^{-22}—10^{-24} с.

Спін элементарных часціц з'яўляецца цэлым або паўцэлым кратным пастаяннай Планка h.

У аснову сучаснай класіфікацыі элементарных часціц пакладзены тыпы фундаментальных узаемадзеянняў, у якіх яны ўдзельнічаюць (табл. 13).

Табліца 13. **Фундаментальныя ўзаемадзеянні, іх адносная інтэнсіўнасць і адпаведныя ім кванты**

Узаемадзеянне	Адносная інтэнсіўнасць	Квант поля
Моцнае	1	Мезон
Электрамагнітнае	10^{-2}	Фатон
Слабае	10^{-10}	$W^{\pm}$, Z^0
Гравітацыйнае	10^{-38}	

Правообладатель Народная асвета

З чатырох фундаментальных узаемадзеянняў толькі *гравітацыйнае* з'яўляецца ўніверсальным. *Электрамагнітныя* сілы ўплываюць галоўным чынам на часціцы, якія маюць электрычны зарад. У *слабых* узаемадзеяннях удзельнічаюць усе часціцы, за выключэннем фатонаў. *Моцнае* ўзаемадзеянне — самае выбіральнае. Яно служыць асновай для раздзялення элементарных часціц на две вялікія групы — групу **адронаў** (ад грэч. χαδρος (адрос) — вялікі, моцны), якія ўдзельнічаюць у моцных узаемадзеяннях, і групу **лептонаў** (ад грэч. λεπτος (лептас) — тонкі, лёгкі), якія не ўдзельнічаюць у моцных узаемадзеяннях.

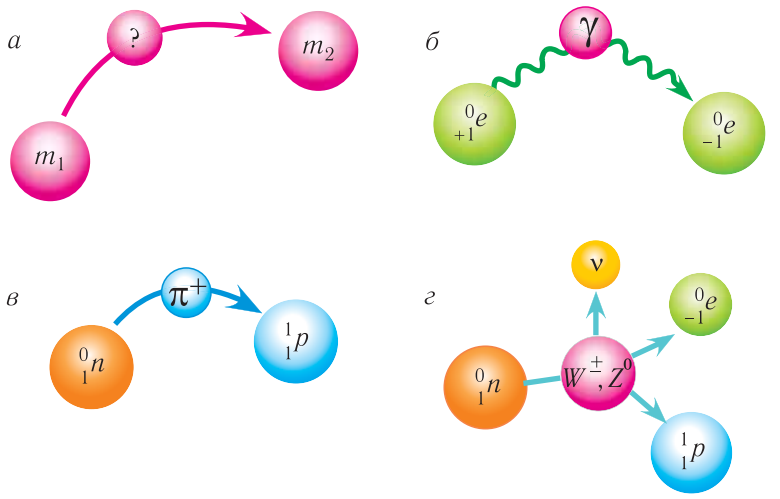
Унутры гэтых груп часціцы класіфікуюцца па сістэме квантавых лікаў.

Механізм усіх узаемадзеянняў — *абменны*, г. зн. узаемадзеянне паміж дзвюма часціцамі адбываецца ў выніку іх абмену прамежкавай часціцай — пераносчыкам узаемадзеяння.

Гравітацыйнае ўзаемадзеянне праяўляецца ў выглядзе сіл прыцягнення паміж усімі часціцамі (рыс. 167, *а*). Квант гравітацыйнага поля да цяперашняга часу эксперыментальна не выяўлены.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне характэрна для ўсіх часціц, якія маюць электрычны зарад. Квант электрамагнітнага поля — **фатон** (γ-квант). Фатоны не толькі здзяйсняюць электрамагнітнае ўзаемадзеянне, але і назіраюцца ў якасці свабодных часціц (рыс. 167, *б*).

Моцнае ўзаемадзеянне ўласціва адронам. Гэта самы шматлікі клас элементарных часціц. Характэрны маштаб масы адронаў задаецца масай пратона m_p.



Рыс. 167. Абменны характар фундаментальных узаемадзеянняў

Правообладатель Народная асвета

Найменшую масу сярод адронаў мае π-мезон $\left(\approx \frac{1}{7}m_p\right)$, найбольшую — ϒ-мезон ($\approx 10m_p$).

Адроны падзяляюцца на два класы:

з цэлым спінам — **мезоны** (**базоны**);

з паўцэлым спінам — **ферміёны** (**барыёны**).

Сярод элементарных часціц вылучаюць *фундаментальныя* і *састаўныя* элементарныя часціцы. Да фундаментальных элементарных часціц адносяцца лептоны і кваркі, а да састаўных — барыёны і мезоны. **Кваркі** выяўлены ўнутры пратонаў і нейтронаў, але не існуюць у свабодным стане. Яны маюць зарад $+\frac{2}{3}e$ або $-\frac{1}{3}e$ і з'яўляюцца састаўнымі часткамі адронаў. Барыёны складаюцца з трох розных кваркаў, мезоны — з кварка і антыкварка. Кваркі ў адронах узаемадзейнічаюць праз глюёны. Тлумачэнне кваркавай структуры састаўных часціц магчыма толькі пры наяўнасці ў кварка колеравага зараду.

У сучаснай тэорыі моцнага ўзаемадзеяння — *квантавай хромадынаміцы* — часціцы, якія пераносяць моцнае ўзаемадзеянне, атрымалі назву **глюёны** (ад англ. glue — клей) (рыс. 167, *в*). Глюёны з'яўляюцца электрычна нейтральнымі часціцамі з нулявой масай спакою і пераносяць моцнае ўзаемадзеянне паміж кваркамі. Яны не існуюць у свабодным стане, а праяўляюцца толькі ў працэсах нараджэння і знішчэння барыёнаў і мезонаў.

Кваркі і глюёны валодаюць асобным квантавым лікам — колерам (колеравым зарадам). Ёсць шэсць тыпаў («водараў») кваркаў — u, d, s, c, b, t, кожны з якіх існуе ў трох «колеравых» відах — «зялёным», «сінім», «чырвоным». Глюёны маюць 8 колераў. Абмен глюёнамі паміж кваркамі змяняе колер кварка. Састаўленыя часціцы не нясуць колеравага зараду, г. зн. з'яўляюцца бясколернымі.

Базонам моцнага ўзаемадзеяння з'яўляюцца **мезоны** (ад грэч. μεσος — сярэдні).

Да лептонаў, якія не ўдзельнічаюць у моцных узаемадзеяннях, адносяцца электрон e^-, электроннае нейтрына ν_e, мюён μ^-, мюённае нейтрына ν_μ, таён τ^-, таённае нейтрына ν_τ і іх антычасціцы. Масы лептонаў складаюць $\leqslant 0{,}1m_p$ (выключэнне τ-лептон). Для вылучэння лептонаў як групы элементарных часціц ім прыпісваюць лептонны зарад.

Слабае ўзаемадзеянне характэрна для ўсіх элементарных часціц. Пераносчыкамі слабага ўзаемадзеяння паміж лептонамі і кваркамі з'яўляюцца **цяжкія базоны** $W^\pm$, Z^0 (рыс. 167, *г*).

Правообладатель Народная асвета

У адпаведнасці з законамі захавання (энергіі, імпульсу, электрычнага, барыённага, лептоннага зарадаў), што дзейнічаюць у мікрасвеце, узнікненне антычасціц адбываецца толькі ў парах з часціцамі. Таму ўсе зараджаныя часціцы існуюць парамі. Гэта так званы прынцып зарадавага спалучэння. Аказалася, што ўсе часціцы маюць **антычасціцы**. Усе характарыстыкі часціц і антычасціц аднолькавыя, але зарады (магнітныя моманты) процілеглыя па знаку. Выключэнне — фатон, π^0-мезон, η^0-мезон — сапраўды нейтральныя часціцы, г. зн. цалкам супадаюць са сваімі антычасціцамі.

Існаванне першай антычасціцы — пазітрона (ад лац. positus — дадатны) прадказаў Поль Дзірак у 1928 г. У 1932 г. К. Андэрсан, даследуючы касмічнае выпраменьванне, выявіў пазітрон.

Пры сутыкненні электрона і пазітрона, якія павольна рухаюцца, яны анігіліруюць (знікаюць) (ад лац. nihil — нішто) і ўзнікаюць звычайна два фатоны (рыс. 168, *а*):

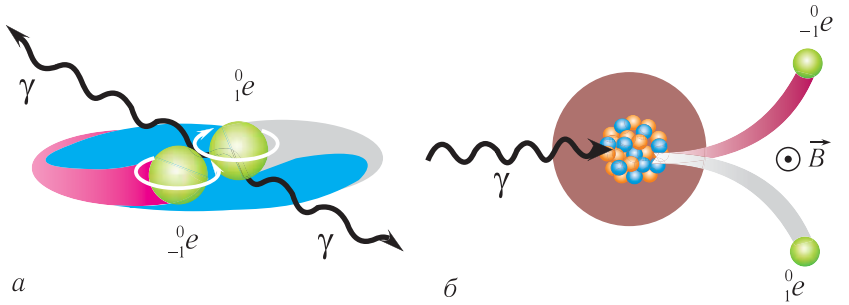
$$ {}_{-1}^{0}e + {}_{1}^{0}e \rightarrow 2\gamma. $$

Утварэнне пры анігіляцыі менавіта двух (зрэдку трох) фатонаў з'яўляецца вынікам закону захавання імпульсу. Фатоны валодаюць імпульсам, модуль якога $p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c}$. Пры электроне і пазітроне, якія павольна рухаюцца, фатоны, што ўтвараюцца, павінны разлятацца ў процілеглых напрамках так, каб іх сумарны імпульс быў роўным нулю, а энергія кожнага з фатонаў $E_\gamma = 0{,}511$ МэВ.

Магчымы і адваротны працэс нараджэння электронна-пазітроннай пары ў полі ядра за кошт энергіі фатонаў:

$$ \gamma \rightarrow {}_{-1}^{0}e + {}_{1}^{0}e. $$

Схематычны відарыс такога працэсу паказаны на рысунку 168, *б*.



Рыс. 168. Анігіляцыя электрона і пазітрона пры сутыкненні (*а*); нараджэнне электрон-пазітроннай пары з γ-кванту ў полі ядра (*б*)

Правообладатель Народная асвета

Для ўтварэння электронна-пазітроннай пары энергія фатона павінна быць не меншай за поўную энергію спакою электрона і пазітрона, г. зн.

$$E_\gamma \geqslant 2m_e c^2.$$

З улікам таго, што масы электрона і пазітрона аднолькавыя ($m_{-e} = m_{+e} = 0{,}00055$ а. адз. м.), для іх утварэння неабходна энергія $E = 2 \cdot 0{,}511$ МэВ.

Агульны лік элементарных часціц разам з антычасціцамі каля 500. З іх 30 — адносна стабільныя, з часам жыцця не меншым за 10^{-17} с, і больш за 400 — кароткажывучыя, час іх жыцця 10^{-23} с. Час жыцця элементарнай часціцы залежыць ад прыроды (інтэнсіўнасці) узаемадзеяння. Так, самы хуткі распад абумоўлены моцным узаемадзеяннем — час іх жыцця робіцца такім нязначным (10^{-22}—10^{-24} с), што для падобных часціц гістарычна склалася назва *рэзанансы*. А пры павольных распадах, абумоўленых слабым узаемадзеяннем, час жыцця часціц 10^{-10} с і большы. Пры распадах пад уздзеяннем электрамагнітных узаемадзеянняў час жыцця часціц займае прамежкавае становішча — 10^{-16}—10^{-19} с.

У цяперашні час склалася агульнапрынятая тэорыя найбольш агульных тыпаў элементарных часціц і іх узаемадзеянняў, якая называецца *стандартнай мадэллю* (рыс. 169).

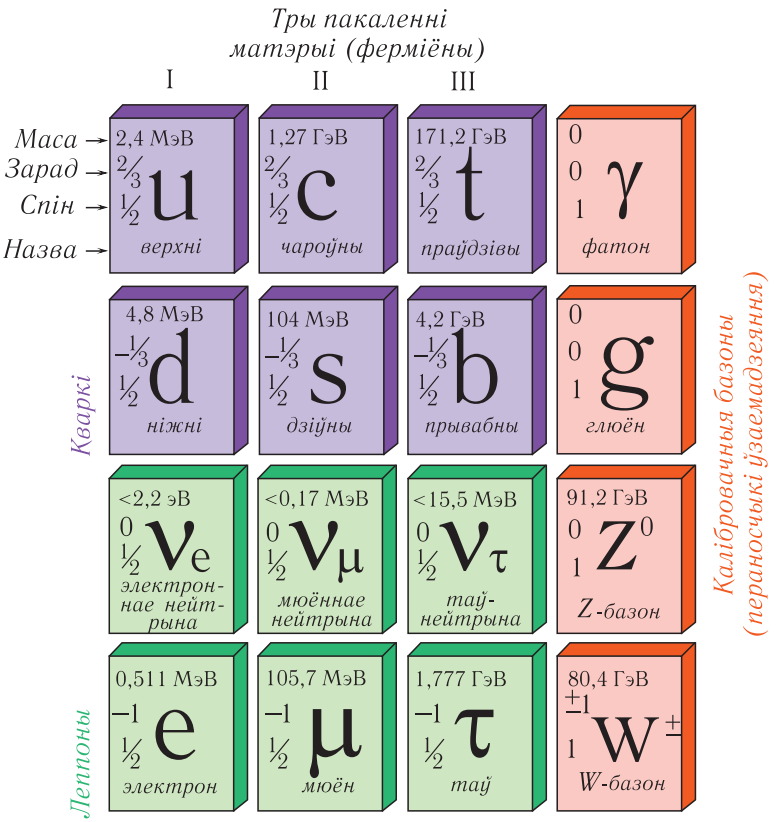
Стандартная мадэль элементарных часціц з'яўляецца тэарэтычнай канструкцыяй у фізіцы элементарных часціц і апісвае электрамагнітнае, слабае і моцнае ўзаемадзеянне ўсіх элементарных часціц. Эксперыментальным пацверджаннем існавання прамежкавых вектарных базонаў у сярэдзіне 80-х гадоў XX ст. і пацверджаннем існавання базона Хігса ў 2012 г. было закончана выяўленне элементарных часціц, якія прадказваліся стандартнай мадэллю.

П. В. Хігс (англійскі фізік-тэарэтык) стаў вядомым дзякуючы прапанаванаму ім у 1960-х гг. механізму спантаннага парушэння электраслабай сіметрыі, які тлумачыў паходжанне масы элементарных часціц, у прыватнасці мас вектарных *W*- і Z-базонаў.

Базон Хігса — элементарная часціца або элементарны базон, які валодае нулявым спінам. У рамках стандартнай мадэлі менавіта базон Хігса «адказвае» за наяўнасць масы ў элементарных часціц.

Базон Хігса першапачаткова быў прадказаны ў 1964 г. тэарэтычна, а 4 ліпеня 2012 г. было паведамлена, што на абодвух асноўных дэтэктарах Вялікага адроннага калайдара назіралася новая часціца. 14 сакавіка 2013 г. было пацверджана, што часціца, якая была знойдзена паўгодам раней, сапраўды з'яўляецца базонам Хігса.

Правообладатель Народная асвета



Рыс. 169. Табліца элементарных часціц

Згодна са стандартнай мадэллю існуюць два асноўныя віды фундаментальных элементарных часціц: ферміёны і базоны. Ферміёны з'яўляюцца элементарнымі «цаглінкамі» рэчыва, што нас акружае, а базоны — пераносчыкамі ўзаемадзеянняў паміж ферміёнамі.

Фундаментальная часціца — бесструктурная элементарная часціца, якую да цяперашняга часу не атрымоўвалася апісаць як састаўную. Але цяпер тэрмін «састаўны» прымяняецца для **6 лептонаў** (электрон, мюён, таў-лептон, электроннае нейтрына, мюённае нейтрына і таў-нейтрына) і **6 кваркаў** (u, d, s, c, b, t). Усе гэтыя часціцы з'яўляюцца ферміёнамі са спінам $\frac{1}{2}$ і натуральным чынам арганізоўваюцца ў тры пакаленні (гл. рыс. 169). Разам з антычасціцамі ферміёны складаюць набор з 24 фундаментальных часціц у сукупнасці з каліброваючымі базонамі (часціцамі-пераносчыкамі фундаментальных узаемадзеянняў).

Правообладатель Народная асвета

Паміж фундаментальнымі ферміёнамі дзейнічаюць **тры тыпы сіл — электрамагнітныя, слабыя** і **моцныя**. Кваркі ўдзельнічаюць у моцных, слабых і электрамагнітных узаемадзеяннях; зараджаныя лептоны (электрон, мюён, таў-лептон) — у слабых і электрамагнітных; нейтрына — толькі ў слабых узаемадзеяннях. Моцнае ўзаемадзеянне звязвае кваркі ў адроны — састаўныя часціцы, якія складаюцца з кваркаў у розных камбінацыях.

Узаемадзеянне часціц, якія маюць электрычны зарад, адбываецца шляхам абмену фатонамі — квантамі электрамагнітнага поля. Моцнае ўзаемадзеянне адбываецца за кошт абмену глюёнамі — пераносчыкамі моцнага ўзаемадзеяння. Пераносчыкамі слабага ўзаемадзеяння з'яўляюцца $W^{\pm}$-, Z^0-базоны.

Назва «кварк» была запазычана М. Гел-Манам з кнігі Джэймса Джойса «Поминки по Финнигану». Па-нямецку «кварк» — «тварог», але ў рамане гэта слова азначае нешта двухсэнсавае і таямнічае. Гэты тэрмін прымяняецца магчыма таму, што адпавядае «таямнічай» ролі кваркаў у фізіцы.

1. Якая часціца называецца элементарнай?
2. Якія часціцы ўдзельнічаюць у моцным узаемадзеянні?
3. Як называецца сучасная тэорыя моцнага ўзаемадзеяння?
4. Як называюцца часціцы, праз якія перадаецца моцнае ўзаемадзеянне?
5. У якім узаемадзеянні ўдзельнічаюць лептоны?
6. Якая антычасціца была адкрыта першай?
7. Пералічыце ўсе стабільныя элементарныя часціцы.
8. Ці ўсе элементарныя часціцы маюць антычасціцу?
9. Чым адрозніваецца антычасціца ад часціцы?
10. Колькі тыпаў кваркаў вядомы ў цяперашні час?
11. Што апісвае стандартная мадэль элементарных часціц?
12. Якія элементарныя часціцы лічацца фундаментальнымі?

§ 44. Паскаральнікі зараджаных часціц

Для атрымання пучкоў зараджаных часціц, энергіі якіх дастаткова для пранікнення ў любое атамнае ядро, створаны паскаральнікі зараджаных часціц. У паскаральніках ядры атамаў або электроны з дапамогай электрычных і магнітных палёў разганяюцца да энергій ад дзясяткаў мегаэлектронвольтаў да соцень гігаэлектронвольтаў.

Часціцы высокіх энергій, г. зн. разагнаныя да скарасцей, блізкіх да скорасці святла, знаходзяць шырокае прымяненне ў фізічных даследаваннях і ў тэхніцы. Выкарыстанне такіх часціц у якасці «снарадаў» для вывучэння сутыкненняў ядзерных часціц дазволіла атрымаць багатую інфармацыю аб атамных ядрах і элементарных часціцах.

Правообладатель Народная асвета

Найпрасцейшы спосаб атрымання такіх высокаэнергетычных часціц заключаецца ў паскарэнні іх з дапамогай электрычных палёў высокіх і звышвысокіх напружанняў.

Па форме траекторый руху часціц паскаральнікі падзяляюцца на *лінейныя* і *цыклічныя*. У лінейных паскаральніках траекторыі руху часціц блізкія да прамых ліній, у цыклічных яны з'яўляюцца акружнасцямі або спіралямі.

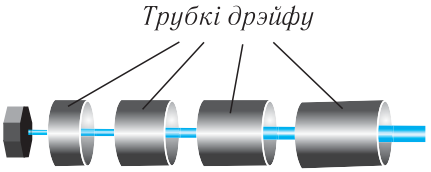
Па тыпе паскараемых часціц адрозніваюць *электронныя* паскаральнікі, *пратонныя* і паскаральнікі *іонаў*.

Розныя тыпы паскаральнікаў, што існуюць, можна падзяліць на чатыры групы: паскаральнікі прамога дзеяння, лінейныя паскаральнікі, цыклічныя паскаральнікі і паскаральнікі на сустрэчных пучках.

Найбольш простыя па прынцыпе работы *паскаральнікі прамога дзеяння*. У іх часціцы разганяюцца ў пастаянным электрычным полі. У дадзеным выпадку не атрымліваецца дасягнуць энергій, большых за 10 МэВ, паколькі пры далейшым павышэнні напружання паміж электродамі ўзнікае электрычны прабой.

У лінейным паскаральніку часціцы рухаюцца па прамой лініі, паслядоўна праходзячы праз сістэму трубчатых электродаў, так званых трубак дрэйфу, на якія падаецца пераменнае напружанне (рыс. 170). Унутры трубак поля няма, там часціца рухаецца раўнамерна.

Часціца паскараецца тады, калі яна трапляе ў прамежак паміж суседнімі трубкамі дрэйфу, які называюць паскараючым прамежкам. Для паскарэння часціцы неабходна, каб час пралёту часціцы ад аднаго прамежку да другога быў роўны палове перыяду T пераменнага напружання, г. зн. даўжыня n-трубкі павінна быць $l_n = \frac{v_n T}{2}$, дзе v_n — модуль скорасці часціцы ў трубцы. Для памяншэння даўжыні паскаральніка трубкі дрэйфу павінны быць як мага больш кароткімі, для гэтага прыходзіцца павялічваць частату паскараючага поля. У пратонных паскаральніках выкарыстоўваюць частоты 200—300 МГц, а ў электронных — яшчэ большыя. Большасць лінейных паскаральнікаў, якія існуюць, дазваляюць дасягаць энергіі электронаў да 10 ГэВ. У паскаральніку ў г. Стэнфардзе (ЗША), даўжыня якога 3 км, дасягнута энергія 20 ГэВ.



Рыс. 170. Лінейны паскаральнік

Правообладатель Народная асвета

Самы вялікі сярод пабудаваных пратонных лінейных паскаральнікаў працуе ў г. Лос-Аламасе (ЗША). Ён паскарае пратоны да энергіі 800 МэВ пры сіле току ў пучку каля 1 мА.

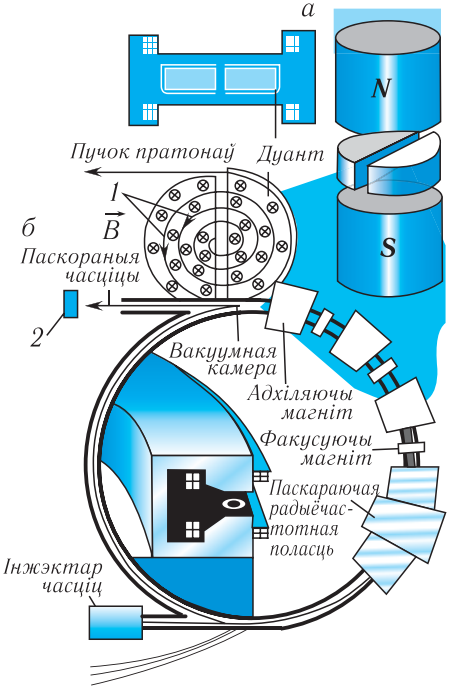
Найпрасцейшым прадстаўніком і роданачальнікам цыклічных паскаральнікаў з'яўляецца *цыклатрон* (рыс. 171, *а*).

У цыклатроне выкарыстоўваецца незалежнасць частаты абарачэння часціц у магнітным полі ад іх энергіі. Часціцы рухаюцца па траекторыях, якія ўяўляюць сабой спіралі, што раскручваюцца, шматкратна вяртаючыся да адных і тых жа паскараючых вузлоў. Для скрыўлення траекторыі часціцы прымяняюць аднароднае магнітнае поле $\vec{B}$, перпендыкулярнае да напрамку руху часціц. У зазор паміж полюсамі электрамагніта змяшчаюць вакуумную камеру, унутры якой знаходзяцца электроды *1* (дуанты), якія па форме нагадваюць палавінкі полага плоскага цыліндра (рыс. 171, *б*).

Пакуль часціца рухаецца ўнутры дуанта, модуль яе скорасці пастаянны. Калі часціца, маса якой m і зарад q, праходзіць прамежак паміж дуантамі, яна зведвае дзеянне электрычнага поля і паскараецца. Таму ў другі дуант часціца трапляе, маючы ўжо вялікую скорасць, і рухаецца па акружнасці большага радыуса $R = \frac{mv}{qB}$. Паколькі час руху часціцы $\Delta t = \frac{\pi m}{qB}$ унутры дуанта не залежыць ад радыуса траекторыі, то перыяд змянення высокачастотнага напружання, што падаецца на дуанты, зручна падабраць роўным

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

У гэтым выпадку часціцы будуць паскарацца кожны раз, трапляючы ў прамежак паміж дуантамі. Нарэшце яны трапляюць або на мішэнь, устаноўленую ўнутры цыклатрону, або выводзяцца з яго і накіроўваюцца на знешнюю мішэнь *2* (гл. рыс. 171, *б*).



Рыс. 171. Цыклатрон: *а* — агульны выгляд; *б* — функцыянальная схема

Правообладатель Народная асвета

Максімальную энергію часціц можна разлічыць па формуле:

$$W_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2 B^2 R_{max}^2}{m},$$

дзе R_{max} вызначаецца радыусам дуанта.

Першы цыклатрон быў пабудаваны ў 1932 г. у Каліфарнійскім універсітэце ў г. Берклі (ЗША) Э. Лоўрэнсам.

Цыклатроны прымяняюць для паскарэння пратонаў і іонаў. Яны дазваляюць дасягаць энергій у некалькі дзясяткаў мегаэлектронвольтаў.

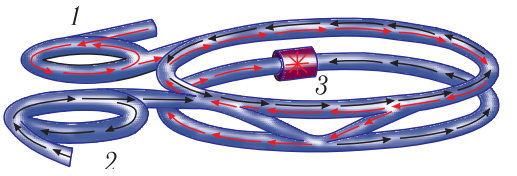
Тыповы цыклатрон сярэдняй велічыні ($B = 1{,}0$ Тл, $R = 0{,}50$ м) пры паскарэнні іонаў вадароду $\left(\frac{e}{m} = 0{,}96 \cdot 10^8 \ \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\right)$ дазваляе дасягаць іх максімальнай энергіі $W_{max} = 12$ МэВ.

Для паскарэння цяжкіх часціц да гранічна вялікіх скарасцей выкарыстоўваюць *сінхрафазатроны* — кольцавыя паскаральнікі, у якіх у працэсе паскарэння ў строгай адпаведнасці аднаго з адным змяняюцца адначасова і модуль індукцыі магнітнага поля, і частата паскараючага напружання. Гэта дазваляе пры павышэнні энергіі часціц захоўваць пастаянным радыус іх арбіты і дасягаць вялікіх энергій. Напрыклад, на сінхрафазатроне ў г. Серпухаў (Расія) энергіі пратонаў дасягаюць значэння 76 ГэВ.

У звычайных паскаральніках пучок паскораных часціц накіроўваюць на нерухомую мішэнь. Пры гэтым асноўная частка іх энергіі пераходзіць у кінетычную энергію руху часціц — мішэняў.

У *паскаральніках на сустрэчных пучках* выкарыстоўваюць узаемадзеянне часціц, якія рухаюцца насустрач адна адной у пучках *1* і *2* (рыс. 172). Гэта дазваляе ў вобласці перасячэння пучкоў *3* дасягнуць такой энергіі іх узаемадзеяння, якая эквівалентна энергіі некалькіх тысяч гігаэлектронвольтаў у звычайным паскаральніку. Дадзены факт дазваляе эфектыўна выкарыстоўваць падобныя паскаральнікі для даследавання ўнутранай структуры часціц і дынамікі іх ператварэнняў.

Развіццё паскаральнікаў адбываецца як па шляху павелічэння энергіі паскораных часціц, так і па шляху паляпшэння характарыстык паскоранага пучка.



Рыс. 172. Паскаральнік на сустрэчных пратонных пучках

Правообладатель Народная асвета

Рыс. 173. Вялікі адронны калайдар

Пробны запуск самага вялікага ў свеце паскаральніка элементарных часціц — ***вялікага адроннага калайдара*** (ВАК) — адбыўся 10 верасня 2008 г., афіцыйнае адкрыццё — 21 кастрычніка 2008 г. **Вялікі адронны калайдар** — гэта ўстройства для канцэнтрацыі энергіі ў вельмі малой вобласці прасторы (рыс. 173). Энергіі часціц у ВАКу вымяраюцца ў *тэраэлектронвольтах*.

ВАК, даўжыня акружнасці якога 27 км, устаноўлены ў тунелі, які знаходзіцца на глыбіні ад 50 да 150 м ад паверхні зямлі. Ён размешчаны паміж гарой Юра ў Францыі і Жэнеўскім возерам у Швейцарыі. Тунель быў пабудаваны ў 1980 г. для папярэдняга вялікага паскаральніка — вялікага электрон-пазітроннага калайдара.

У ВАКу сутыкаюцца пучкі аднолькавых часціц — пратонаў або іонаў свінцу. Пучкі ствараюцца ў існуючым цыклічным паскаральніку і ўводзяцца ў ВАК, дзе яны рухаюцца па акружнасці і могуць рабіць да мільёна абаротаў. На кожным крузе пучкі атрымліваюць дадатковую энергію. Два пратоны, што сутыкнуліся, будуць мець агульную энергію 14 ТэВ. Гэта энергія ў 10 разоў большая за энергію, якая дасягаецца ў цяперашні час у пратон-антыпратонным калайдары ў нацыянальнай лабараторыі Фермі ў ЗША.

Без паскаральнікаў не было б магчымасці вывучаць фундаментальныя ўласцівасці і ўзаемадзеянні элементарных часціц. Большасць элементарных часціц была адкрыта з дапамогай паскаральнікаў часціц высокіх энергій.

Паскаральнікі адносна невысокіх энергій шырока прымяняюцца ў медыцыне і тэхніцы — для лячэння анкалагічных захворванняў, вытворчасці радыеактыўных ізатопаў, паляпшэння ўласцівасцей палімерных матэрыялаў.

Удасканаленне паскаральнікаў пераўтворыць не толькі фізіку, але таксама тэхніку і тэхналогію. Сучасныя вытворчасці і медыцыну нельга ўявіць без такіх паскаральнікаў, як паскаральнікі для мадыфікацыі ўласцівасцей матэрыялаў (гума, поліэтылен і інш.); паскаральнікі для стэрылізацыі (харчовая прамысловасць, жывёлагадоўля, медыцына); паскаральнікі для нарыхтоўкі радыеактыўных ізатопаў і для апрамянення хворых (дыягностыка, тэрапія).

Для прыкладных мэт не трэба паскараць часціцы да звышвысокіх энергій. Энергіі электронаў звычайна не большыя за 10 МэВ. Для вытворчасці радые-

Правообладатель Народная асвета

нуклідаў патрэбны пратоны або дэйтроны, энергія якіх да 70 МэВ, а ў прамянёвай тэрапіі выкарыстоўваюцца электроны з энергіяй да 50 МэВ і пратоны, паскораныя да 200—250 МэВ.

Паскаральнікі шырока прымяняюцца для ўкаранення (імплантацыі) прымесевых іонаў у паўправадніковай мікраэлектроніцы, прычым глыбіня ўкаранення іонаў залежыць ад іх энергіі.

Актыўна выкарыстоўваюцца зараджаныя часціцы ў медыцыне. У кардыялогіі з іх дапамогай вызначаюць праходнасць крывяносных сасудаў, якія жывяць сардэчную мышцу. У анкалогіі ўздзеянне пучкоў зараджаных часціц прымяняюць для разрыву міжмалекулярных сувязей, у выніку чаго жывая ракавая клетка або разбураецца, або губляе здольнасць да ўзнаўлення. Таму прамянёвая тэрапія — адзін з важных метадаў барацьбы з анкалагічнымі захворваннямі.

1. Назавіце існуючыя паскаральнікі зараджаных часціц і ахарактарызуйце іх.
2. Выведзіце ўмову паскарэння часціц у цыклатроне.
3. У якіх галінах навукі, тэхнікі, медыцыны, прамысловасці прымяняюцца паскаральнікі зараджаных часціц?

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 $N = A - Z$.

Ядзерные сілы — кароткадзеючыя сілы прыцяжэння — дзейнічаюць толькі паміж дадзеным нуклонам і яго непасрэднымі суседзямі.

Пад **энергіяй сувязі** атамных ядзер разумеецца энергія, неабходная для раздзялення ядра на асобныя нуклоны:

$$E_{\text{сув}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2.$$

Дэфект мас — 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 служыць **удзельная энергія сувязі ε ядра**, г. зн. энергія сувязі, якая прыпадае на адзін нуклон:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{сув}}}{A}.$$

Правообладатель Народная асвета

Ядзернымі рэакцыямі называюць працэсы змянення атамных ядзер, якія выклікаюцца іх узаемадзеяннямі з элементарнымі часціцамі або аднаго з адным. Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, г. зн. рознасць энергій спакою ядзер і часціц да ўзаемадзеяння і пасля, называецца **энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі**.

Радыеактыўнасць — з'ява самаадвольнага ператварэння ядзер, якое суправаджаецца вылучэннем часціц або ядзер або кароткахвалевым электрамагнітным выпраменьваннем.

Радыеактыўны распад ядзер суправаджаецца вылучэннем α- і β-часціц і γ-выпраменьвання.

Пры α-распадзе прадуктамі распаду з'яўляюцца ізатопы з лікам пратонаў $Z - 2$ з вылучэннем α-часціц:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Пры β^--распадзе ўтвараюцца ізатопы з атамным нумарам $Z + 1$:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}.$$

Вылучэнне γ-выпраменьвання не прыводзіць да ператварэння элементаў:

$$({}^{A}_{Z}\mathrm{X})^* \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma.$$

Закон радыеактыўнага распаду:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Ланцуговай рэакцыяй называецца працэс, у якім прадукты пэўнай рэакцыі выклікаюць далейшыя рэакцыі такога ж тыпу.

Крытычнай масай называецца мінімальная маса ядзернага паліва, неабходная для падтрымання ланцуговай рэакцыі.

Ядзерным рэактарам называецца ўстройства, у якім можа адбывацца самападтрымліваючая ланцуговая ядзерная рэакцыя дзялення ядзер цяжкіх элементаў пад дзеяннем нейтронаў.

Адным з відаў ядзерных рэакцый з'яўляюцца рэакцыі сінтэзу лёгкіх ядзер, якія эфектыўна адбываюцца пры звышвысокіх тэмпературах парадку 10^9 К і самападтрымліваюцца за кошт значнага вылучэння ў іх энергіі. Такія рэакцыі названы **тэрмаядзернымі**.

Іанізуючымі называюць выпраменьванні, узаемадзеянне якіх з рэчывам прыводзіць да іанізацыі яго атамаў і малекул.

Колькасць энергіі, якая перададзена арганізму іанізуючым выпраменьваннем, называецца **дозай**.

Правообладатель Народная асвета

Прыборы для рэгістрацыі іанізуючых выпраменьванняў называюць **дэтэктарамі**.

Элементарныя часціцы — першасныя, нераскладальныя далей часціцы, якія нельга лічыць злучэннем іншых часціц і якія існуюць у свабодным стане. Асноўнымі характарыстыкамі элементарных часціц з'яўляюцца іх маса, электрычны зарад, час жыцця, спін.

Для ўсіх элементарных часціц характэрна здольнасць выпраменьвацца і паглынацца (нараджацца і знішчацца) пры ўзаемадзеянні з іншымі часціцамі. Адрозніваюць чатыры тыпы **фундаментальных** узаемадзеянняў: гравітацыйнае; электрамагнітнае; моцнае; слабае.

Механізм усіх узаемадзеянняў — *абменны*, г. зн. узаемадзеянне паміж дзвюма часціцамі адбываецца ў выніку іх абмену прамежкавай часціцай — пераносчыкам узаемадзеяння.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне з'яўляецца характэрным для ўсіх часціц, якія маюць электрычны зарад. Квант электрамагнітнага поля — **фатон**.

Моцнае ўзаемадзеянне (на адлегласцях парадку 10^{-15} м) уласціва **адронам**. Часціцы, якія пераносяць моцнае ўзаемадзеянне, атрымалі назву **глюёны.**

Слабае ўзаемадзеянне (на адлегласцях парадку 10^{-18} м) з'яўляецца характэрным для любых элементарных часціц. Пераносчыкі слабага ўзаемадзеяння паміж лептонамі і кваркамі — **цяжкія (вектарныя) базоны** $W^{\pm}$, Z^0.

Кожнай элементарнай часціцы адпавядае свая **антычасціца**.

Агульны лік элементарных часціц разам з антычасціцамі каля 500.

У цяперашні час вядома 36 кваркаў і антыкваркаў, 8 глюёнаў, 12 лептонаў, $W^{\pm}$-, Z^0-часціцы і фатон, г. зн. лік фундаментальных элементарных часціц атрымліваецца роўным 60.

У мікрасвеце выконваюцца фундаментальныя законы захавання энергіі, імпульсу і электрычнага, барыённага і лептоннага зарадаў.

Правообладатель Народная асвета

Раздзел 8
Асновы адзінай фізічнай карціны свету

§ 45. Сучасная прыродазнаўчанавуковая карціна свету

Главная цель естественных наук — раскрыть единство сил Природы.
Л. Больцман

Наиболее непознаваемым явлением природы является тот факт, что она познаваема.
А. Эйнштэйн

Фізіка, з'яўляючыся цэнтральнай навукай аб прыродзе, дае чалавеку веды аб навакольным асяроддзі, дазваляючы тым самым, з аднаго боку, вырашаць праблемы цывілізацыі, а з другога, — берагчы нашу планету для будучых пакаленняў. Як аб'яднаць назапашаныя веды? Што сягоння павінен ведаць кожны адукаваны чалавек аб фізічных з'явах?

Пры вывучэнні фізікі вы пазнаёміліся з рознымі відамі ўзаемадзеянняў цел і аб'ектаў у прыродзе, якія вызначаюць не толькі разнастайнасць фізічных з'яў у навакольным свеце, але і напрамак эвалюцыі Сусвету. Фізіка — навука аб прыродзе, аднак кожны яе раздзел падрабязна разглядае фізічныя з'явы толькі з аднаго боку, вылучаючы тыя або іншыя ўласцівасці матэрыі па пэўнай прымеце. Пазнанне законаў прыроды гістарычна таксама ішло ў асноўным на базе таго або іншага фізічнага падыходу.

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. У аснове пабудавання 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 целамі, 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. Най-

Правообладатель Народная асвета

важнейшую 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. У яе аснове былі ўяўленні аб свеце, у якім усе з'явы апісваюцца з дапамогай сіл (гравітацыйных і электрамагнітных). Асноўны ўклад у стварэнне электрадынамікі зрабілі Ш. Кулон (электрастатычныя ўзаемадзеянні), А. Вольта (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 выказаў думку аб неабходнасці замены дыскрэтных (карпускулярных) уяўленняў аб матэрыі неперарыўнымі (кантынуальнымі). Матэрыя па Фарадэю ўяўлялася як неперарыўнае бясконцае поле з сілавымі пунктавымі цэнтрамі. Д. Максвел стварыў матэматычную тэорыю электрамагнітнага поля. На аснове гэтай тэорыі ён зрабіў вывад, што распаўсюджванне электрамагнітнага поля адбываецца з канчатковай скорасцю ў выглядзе электрамагнітных хваль. Новая карціна свету змяніла і прынцыпы перадачы ўзаемадзеяння: яны перадаюцца праз поле неперарыўна 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 рубяжы XIX — XX стст. выявіўся рад 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 былі зроблены на пачатку XX ст.: квантаванне вылучэння святла ў працэсах выпраменьвання, паглынання і распаўсюджвання (М. Планк, А. Эйнштэйн); стацыянарныя станы электронаў у атаме (Н. Бор); зусім фантастычная для свайго

Правообладатель Народная асвета

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. Рэзерфард, П. Кюры і М. Складоўская-Кюры, Д. Чэдвік) прывяло да ўзнікнення 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. Тут, у адрозненне ад механічнай карціны свету, няма «жорсткай пэўнасці будучага». 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 другі прыводзіць да з'яўлення часціц.

Адзначым дзве заканамернасці, якія ўласцівы развіццю фізікі. Першая выражана прынцыпам адпаведнасці: прыватныя тэорыі, справядлівасць якіх эксперыментальна пацверджана, са з'яўленнем больш агульных тэорый захоўваюць сваё значэнне як прыватны або гранічны выпадак. Прыкладам можа служыць спецыяльная тэорыя адноснасці, вывады якой пры малых скарасцях адпавядаюць вывадам механікі Ньютана.

Другая заканамернасць — інтэграцыя, або ўзаемапранікненне раздзелаў фізікі. Напрыклад, развіццё фізікі элементарных часціц і яе зліццё з астраноміяй садзейнічалі станаўленню 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 веды аб навакольным свеце, назапашаныя прыродазнаўчымі навукамі: фізікай, матэматыкай, хіміяй, біялогіяй. Фізічная карціна свету з'яўляецца састаўной часткай прыродазнаўчай 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 радыусу дзеяння. Менавіта гэтыя фундаментальныя ўзаемадзеянні і з'яўляюцца галоўнымі «дзеючымі асобамі і выканаўцамі» ў пабудаванні сучаснай фізічнай карціны свету.

Правообладатель Народная асвета

Самае слабае з узаемадзеянняў — **гравітацыйнае ўзаемадзеянне.** Яно прыкладна ў 10^{38} разоў больш слабае, чым ядзернае. Гэта ўзаемадзеянне апісваецца законам сусветнага прыцягнення, які быў адкрыты І. Ньютанам у 1687 г. Гравітацыйныя сілы дзейнічаюць паміж любымі целамі, у тым ліку і паміж элементарнымі часціцамі, аднак вырашальную ролю яны адыгрываюць толькі ў астранамічных аб'ектаў, якія маюць велізарныя 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 ўзаемадзеянні 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 кароткадзеючым, паколькі яно праяўляецца на адлегласцях не большых за памеры ядра (парадку 10^{-15} м). Аднак на гэтых адлегласцях моцнае ўзаемадзеянне значна больш інтэсіўнае, чым электрамагнітнае і тым больш гравітацыйнае, за што і атрымала сваю назву. Вобразна моцнае ўзаемадзеянне можна назваць «асілкам з кароткімі рукамі». Моцныя ўзаемадзеянні паміж нуклонамі ў ядрах атамаў забяспечваюць устойлівасць ядзер розных атамаў. Згодна з сучаснымі ўяўленнямі моцнае ўзаемадзеянне пераносіцца квантамі новага тыпу — глюёнамі, якія падобна да фатонаў з'яўляюцца бязмасавымі часціцамі.

У **слабым узаемадзеянні** ўдзельнічаюць любыя элементарныя часціцы, акрамя фатонаў. Радыус дзеяння слабых сіл вызначаецца характэрным памерам элементарных часціц (парадку 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 другія элементарныя часціцы. Такім чынам, слабае ўзаемадзеянне вызначае стабільнасць элементарных часціц і адыгрывае рашаючую ролю пры іх узаемаператварэннях. Яно адбываецца праз абмен дастаткова масіўнымі часціцамі — вектарнымі базонамі (W^+, W^-, Z^0), масы якіх складаюць каля 80 мас пратона. Базоны былі эксперыментальна адкрыты ў 1983 г.

Уся разнастайнасць узаемадзеянняў навакольнага асяроддзя згодна з квантава-палявой карцінай свету зводзіцца да ўзаемадзеяння двух груп квантавых аб'ектаў, першую з якіх складаюць **удзельнікі** фундаментальных узаемадзеянняў, а другую — іх **пераносчыкі**.

Да ўдзельнікаў узаемадзеянняў адносяцца лептоны і кваркі, якія і з'яўляюцца першасным «будаўнічым матэрыялам» для стварэння ўсёй матэрыяльнай раз-

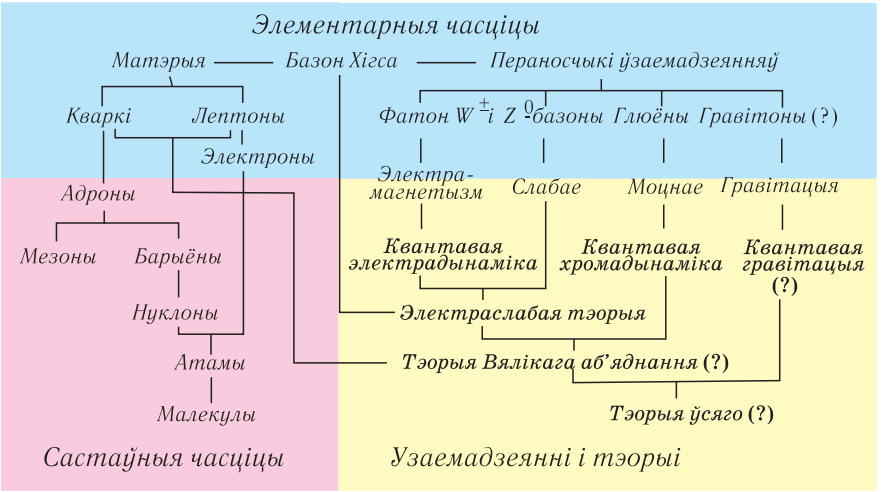
Правообладатель Народная асвета

настайнасці ў прыродзе. Абмен часціцамі-пераносчыкамі (гравітон, фатон, глюёны і вектарныя базоны) дазваляе часціцам-удзельнікам здзяйсняць чатыры тыпы фундаментальных узаемадзеянняў, да якіх зводзяцца ўсе назіраемыя ўзаемадзеянні ў прыродзе. Можна нават уявіць сабе навакольны свет як царства, якое «кішыць» узаемадзеючымі адна з адной фундаментальнымі часціцамі.

На наступным узроўні больш складанай арганізацыі матэрыі размяшчаюцца элементарныя часціцы, састаўленыя з фундаментальных, агульны лік якіх згодна з сучаснымі данымі больш за 500. Далей ідуць ядры, якія складаюцца з нуклонаў, агульны лік якіх адпавядае ліку хімічных элементаў і іх ізатопаў — 2000. На наступным паверсе арганізацыі матэрыі з'яўляюцца атамы, састаўленыя з ядзер і лептонаў, колькасць якіх адпавядае колькасці ядзер.

Атамы, узаемадзейнічаючы паміж сабой, утвараюць малекулы, агульны лік якіх ацэньваецца прыкладна ў 10 млн і пастаянна павялічваецца за кошт сінтэзу новых злучэнняў. Малекулы ўтвараюць розныя рэчывы, рэчывы — целы, целы — астранамічныя аб'екты, астранамічныя аб'екты — Сусвет.

У цяперашні час актуальнай з'яўляецца праблема **аб'яднання** розных тыпаў фундаментальных узаемадзеянняў у рамках адной тэорыі. Абнадзейваючым поспехам на гэтым шляху стала аб'яднанне электрамагнітнага і слабага ўзаемадзеянняў у адзінае **электраслабае ўзаемадзеянне** (рыс. 174). На павестцы дня — пабудаванне тэорыі вялікага аб'яднання, якое ўключае электрамагнітнае, слабае і моцнае ўзаемадзеянні.



Рыс. 174. Элементарныя часціцы і тэорыі ўзаемадзеянняў

Правообладатель Народная асвета

Яшчэ больш грандыёзная ідэя аб'яднання ўсіх чатырох фундаментальных узаемадзеянняў, уключаючы гравітацыю, у рамках тэорыі 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 пабудавання сучаснай фізічнай карціны свету, якая з'яўляецца саставной часткай сучаснай прыродазнаўчанавуковай карціны свету, фізіка сфармулявала рад прынцыпаў, якія з'яўляюцца агульнымі для любога навуковага даследавання, г. зн. яны могуць лічыцца філасофскімі прынцыпамі. Сюды трэба аднесці прынцып **прычыннасці**, прынцып **адноснасці**, прынцып **захавання**, прынцып **інварыянтнасці**, прынцып **дапаўняльнасці**, прынцып **адпаведнасці** і некаторыя іншыя.

Сучасная прыродазнаўчанавуковая карціна свету ў адпаведнасці з прынцыпам дапаўняльнасці грунтуецца на навейшых дасягненнях прыродазнаўчых навук. Адпаведна можна сказаць, што сучасная фізічная карціна свету з'яўляецца фрагментам прыродазнаўчанавуковай карціны свету.

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. Назавіце колькасць фундаментальных часціц згодна з сучаснымі ўяўленнямі.
8. Назавіце колькасць вядомых сягоння элементарных часціц; ядзер; атамаў; малекул.
9. У чым заключаецца сутнасць тэорыі вялікага аб'яднання? Супераб'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 цяперашні час актуальная праблема пабудавання тэорыі **вялікага аб'яднання**, якая магла б апісаць усе тыпы існуючых узаемадзеянняў.

Правообладатель Народная асвета

Лабараторны эксперымент

Лабараторная работа 1

Вывучэнне ваганняў матэматычнага маятніка

Мэта работы: даследаванне залежнасці характарыстык ніцяных маятнікаў ад даўжыні ніткі, масы грузаў, амплітуды ваганняў.

***Прыборы і прыналежнасці*:** два ніцяныя маятнікі з падвесамі для іх (шарыкі рознай масы), штатыў з заціскачкай, метровая лінейка з міліметровымі дзяленнямі, секундамер або гадзіннік з секундная стрэлкай, вагі, разнавагі.

Разліковая формула

$$T = \frac{t}{n}.$$

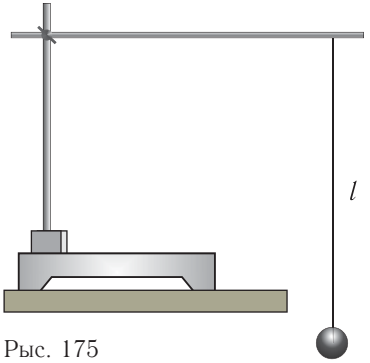
Парадак выканання работы

1. Пастаўце штатыў на край стала.

2. Замацуйце ў заціскачцы штатыва падвес для маятніка так, каб ён выступаў за край стала (рыс. 175), і зацісніце ў ім свабодны канец ніткі, даўжыня якой не меншая за 1 м. Адвядзіце шарык у бок і адпусціце яго: маятнік пачне вагацца.

3. Даследуйце, ці залежыць перыяд ваганняў матэматычнага маятніка ад амплітуды. Для гэтага адвядзіце шарык уздоўж стала ў бок на адлегласць ≈10 см і асцярожна адпусціце яго, стараючыся пазбегнуць штуршкоў з боку. Вымерайце час 40 поўных ваганняў маятніка. Вызначыце перыяд ваганняў. Паўтарыце вымярэнні не менш за 4 разы і вынікі запішыце ў табліцу. Вызначыце перыяд ваганняў гэтага ж маятніка, адхіляючы шарык на 20 см і 30 см. Вынікі вымярэнняў запішыце 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 (гл. пункт 3), вызначыце перыяд ваганняў маятніка з новым шарыкам. Параўнайце яго з перыядам, вызначаным у пункце 3, і зрабіце вывад: ці залежыць перыяд ваганняў ад масы шарыка $T(m)$.



Рыс. 175

5. Змяніце даўжыню маятніка, узяўшы яе роўнай 75 см і 50 см, і зноў вызначыце перыяд ваганняў маятніка так, як пададзена ў пункце 3. Па выніках вымярэнняў зрабіце вывад: ці залежыць перыяд ваганняў маятніка ад яго даўжыні $T(l)$.

Правообладатель Народная асвета

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	n	l, м	Δl, м	t, с	Δt, с	T, с
Не менш за 5 доследаў						
Сярэдняе значэнне						

Кантрольныя пытанні

1. Якую даўжыню мае матэматычны маятнік, перыяд ваганняў якога 1 с?

2. Вылічыце перыяд ваганняў матэматычнага маятніка даўжынёй 64 см.

3. Вызначыце эксперыментальна перыяд ваганняў маятніка даўжынёй 64 см і параўнайце са знойдзеным значэннем.

Вывады

Лабараторная работа 2

Вызначэнне даўжыні светлавой хвалі з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі

Мэта работы: вымярэнне даўжыні светлавой хвалі для чырвонай і фіялетавай мяжы спектра з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі з вядомым перыядам.

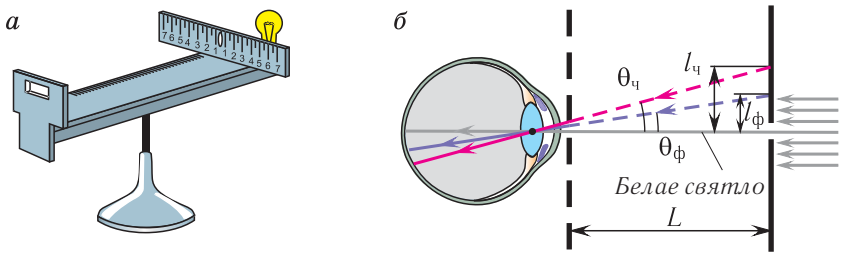
Прыборы і прыналежнасці: прыбор для вызначэння даўжыні светлавой хвалі (рыс. 176, *а*), лямпа напальвання, дыфракцыйная рашотка.

Разліковая формула

Даўжыня хвалі λ для дыфракцыйнага максімуму першага парадку вызначаецца па формуле:

$$\lambda = \frac{dl}{L}, \qquad (1)$$

дзе d — перыяд рашоткі, $\frac{l}{L} = \mathrm{tg}\,\theta \approx \sin\theta$ (з-за нязначнасці вугла θ) (рыс. 176, б).



Рыс. 176

Правообладатель Народная асвета

У рабоце крыніцай святла служыць вузкая шчыліна ў экране прыбора для вымярэння даўжыні светлавой хвалі.

Парадак выканання работы

1. Устанавіце экран на адлегласці 45—50 см ад дыфракцыйнай рашоткі.
2. Уключыце лямпу і размясціце яе за экранам са шчылінай. Дабіцеся найлепшых умоў бачнасці спектра, змяняючы ўзаемнае становішча экрана і лямпы.
3. Вымерайце L не менш за 5 разоў, разлічыце сярэдняе значэнне адлегласці $\langle L \rangle$ ад дыфракцыйнай рашоткі да экрана. Даныя запішыце ў табліцу.
4. Вымерайце адлегласці ад цэнтра шчыліны ў экране да чырвонага $l_ч$ і фіялетавага $l_ф$ краёў спектра. Гэтыя адлегласці вымерайце справа і злева ад шчыліны на экране і знайдзіце іх сярэднія значэнні $\langle l_ч \rangle$ і $\langle l_ф \rangle$.
5. Па вымеранай адлегласці $\langle l_ч \rangle$ ад цэнтра шчыліны ў экране да становішча чырвонага краю спектра і адлегласці $\langle L \rangle$ ад дыфракцыйнай рашоткі да экрана вылічыце $\sin\theta_ч$, пад якім назіраецца адпаведная паласа спектра:

$$\sin\theta_ч \approx \operatorname{tg}\theta_ч = \frac{l_ч}{L}.$$

6. Вылічыце па формуле (1) даўжыню хвалі $\lambda_ч$, якая адпавядае чырвонай мяжы ўспрымаемага вокам спектра.
7. Вызначыце даўжыню хвалі $\lambda_ф$ для фіялетавага краю спектра.
8. Разлічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэнняў даўжынь хваль:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\langle\lambda\rangle} = \frac{\Delta l}{\langle l\rangle} + \frac{\Delta L}{\langle L\rangle}; \quad \Delta\lambda = \varepsilon_\lambda \langle\lambda\rangle.$$

9. Запішыце значэнні даўжынь хваль і адноснай хібнасці іх вымярэння ў выглядзе:

$$\lambda = (\langle\lambda\rangle \pm \Delta\lambda)\ \text{м}; \quad \varepsilon_\lambda = \ldots\ \%.$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	L, м	$l_{ч1}$, м	$l_{ч2}$, м	$l_{ф1}$, м	$l_{ф2}$, м	$\langle l_ч \rangle$, м	$\langle l_ф \rangle$, м	d, м	$\lambda_ч \cdot 10^7$, м	$\lambda_ф \cdot 10^7$, м	ε_λ, %	$\Delta\lambda \cdot 10^7$, м
Сярэдняе значэнне												

Правообладатель Народная асвета

Кантрольныя пытанні

1. Сфармулюйце прынцып Гюйгенса — Фрэнеля.

2. У якім парадку чаргуюцца асноўныя колеры ў дыфракцыйным спектры?

3. Як зменіцца характар дыфракцыйнага спектра, калі выкарыстаць рашотку з перыядам, у два разы большым, чым у вашым доследзе? У два разы меншым?

Вывады

Лабараторная работа 3

Вызначэнне паказчыка праламлення шкла

Мэта работы: вывучэнне праламлення святла на мяжы падзелу асяроддзяў паветра — шкло, вымярэнне паказчыка праламлення шкла.

***Прыборы і прыналежнасці*:** лабараторны камплект па оптыцы, ліст белай паперы, лінейка, аловак, транспарцір.

Разліковая формула

У адпаведнасці з законам праламлення (рыс. 177)

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{\langle AE\rangle}{\langle DC\rangle} \approx n_2,$$

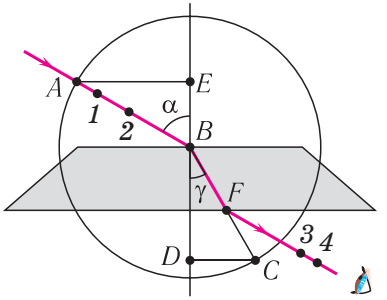
дзе α і γ — вуглы падзення і праламлення, n_2 — паказчык праламлення шкла.

Парадак выканання работы

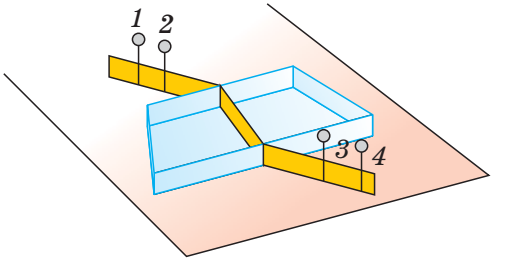
1. Устанавіце крыніцу святла на стале. У акно прыбора ўстаўце рамку са шчылінай. Шчыліна павінна быць размешчана вертыкальна.

2. Збярыце электрычны ланцуг, далучыўшы лямпачку да крыніцы пастаяннага току праз выключальнік. Замкніце ланцуг і атрымайце яркую, тонкую палоску святла на паперы (светлавы пучок).

3. Назірайце з'яву праламлення святла пры розных вуглах падзення. Зафіксуйце ход праменяў, выкарыстаўшы шпількі (рыс. 178).



Рыс. 177



Рыс. 178

Правообладатель Народная асвета

4. Выканайце пабудаванне ў адпаведнасці з рысункам 177. Вымерайце адрэзкі AE і DC. Вылічыце іх сярэднія значэнні $\langle AE \rangle$ і $\langle DC \rangle$. Вынікі вымярэнняў запішыце ў табліцу.

5. Вылічыце значэнне паказчыка праламлення шкла:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle AE \rangle}{\langle DC \rangle}.$$

6. Прарабіце дадзены эксперымент яшчэ не менш за два разы, змяняючы вугал падзення праменя на пласцінку. Вынікі запішыце ў табліцу.

7. Разлічыце абсалютныя хібнасці вымярэння адрэзкаў:

$$\Delta AE = \Delta_{\text{і}} AE + \Delta_{\text{а}} AE; \quad \Delta DC = \Delta_{\text{і}} DC + \Delta_{\text{а}} DC.$$

8. Вылічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэння паказчыка праламлення шкла:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta n}{\langle n \rangle} = \frac{\Delta AE}{\langle AE \rangle} + \frac{\Delta DC}{\langle DC \rangle}; \quad \Delta n = \varepsilon_n \langle n \rangle.$$

9. Запішыце значэнне паказчыка праламлення шкла і адноснай хібнасці яго вымярэння ў выглядзе:

$$n = (\langle n \rangle \pm \Delta n); \quad \varepsilon_n = \ldots \%.$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	AE, мм	DC, мм	$\langle n \rangle$	ΔAE, мм	ΔDC, мм	ε_n, %	Δn
Сярэдняе значэнне							

Кантрольныя пытанні

1. Запішыце формулу для вылічэння модуля скорасці распаўсюджвання святла ў рэчыве з паказчыкам праламлення n.

2. Ад чаго залежыць паказчык праламлення рэчыва?

3. У чым сутнасць з'явы поўнага адбіцця святла на мяжы падзелу двух асяроддзяў?

Вывады

Суперзаданне. Паспрабуйце, выкарыстаўшы шкляную пласцінку, назіраць з'яву поўнага адбіцця. Зарысуйце схему для назірання дадзенай з'явы.

Правообладатель Народная асвета

Лабараторная работа 4

Вызначэнне фокусных адлегласцей тонкіх лінз

Мэта работы: вызначэнне фокуснай адлегласці і аптычнай сілы збіральнай і рассейвальнай лінз.

Прыборы і прыналежнасці: лабараторны камплект па оптыцы, лінейка, крыніца току, электрычная лямпа, ключ, злучальныя правады, экран.

Разліковыя формулы

Фокусную адлегласць F збіральнай лінзы можна знайсці з формулы тонкай лінзы:

$$F = \frac{df}{d+f}, \qquad (1)$$

дзе d — адлегласць ад прадмета да лінзы, f — адлегласць ад лінзы да відарыса.

Аптычная сіла лінзы знаходзіцца з суадносіны:

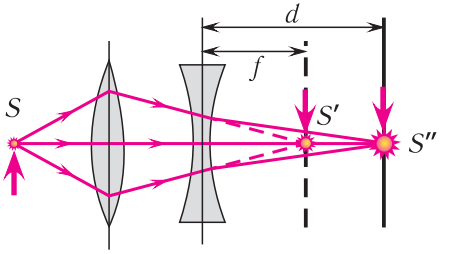
$$D = \frac{1}{F}. \qquad (2)$$

Фокусную адлегласць рассейвальнай лінзы можна вызначыць, калі выкарыстаць яе разам са збіральнай лінзай (рыс. 179). Для гэтага паставім паміж збіральнай лінзай і экранам рассейвальную лінзу. Сапраўдны відарыс крыніцы святла пры гэтым зрушваецца. Выкарыстоўваючы ўласцівасць абарачальнасці светлавых прамяняў, можна лічыць, што светлавыя прамені выходзяць з пункта S'', а ў пункце S' атрымліваецца відарыс пункта S''. Калі абазначым адлегласць ад пунктаў S'' і S' да рассейвальнай лінзы адпаведна праз d і f, то модуль фокуснай адлегласці лінзы вызначым па формуле:

$$F = \frac{fd}{d-f}. \qquad (3)$$

Парадак выканання работы

1. Для вызначэння фокуснай адлегласці збіральнай лінзы ўстанавіце на стале крыніцу святла, устаўце ў яе акно рамку з адтулінай у выглядзе стрэлкі. Устанавіце ўздоўж адной прамой акно з рамкай, збіральную лінзу і экран. Перамяшчаючы лінзу паміж крыніцай і экранам, дабіцеся выразнага відарыса стрэлкі на экране.



Рыс. 179

Правообладатель Народная асвета

2. Вымерайце адлегласць d ад акна прыбора да лінзы і адлегласць f ад лінзы да экрана не менш за пяць разоў. Вылічыце сярэднія значэнні $\langle d \rangle$ і $\langle f \rangle$. Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцу.

3. Вылічыце сярэднія значэнні фокуснай адлегласці $\langle F \rangle$ па формуле (1) і аптычнай сілы $\langle D \rangle$ лінзы па формуле (2). Вынікі вылічэнняў запішыце ў табліцу.

4. Павярніце лінзу да акна і атрымайце на экране відарыс далёкіх прадметаў за акном. Вымерайце адлегласць ад лінзы да экрана і параўнайце яе з атрыманымі раней значэннямі фокуснай адлегласці лінзы.

5. Разлічыце абсалютныя хібнасці прамых вымярэнняў $\Delta d = \Delta_i d + \Delta_a d$ і $\Delta f = \Delta_i f + \Delta_a f$. Вынікі запішыце ў табліцу.

6. Вылічыце адносную і абсалютную хібнасці ўскосных вымярэнняў фокуснай адлегласці збіральнай лінзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle + \langle f \rangle}; \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

7. Зрабіце вывад аб тым, ці ўзгадняюцца паміж сабой вынікі трох эксперыментаў па вызначэнні фокуснай адлегласці лінзы.

8. Запішыце значэнні фокуснай адлегласці збіральнай лінзы і адноснай хібнасці яе вымярэння ў выглядзе:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}; \ \varepsilon_F = \ldots \%.$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	d, м	f, м	F, м	D, дптр	Δd, м	Δf, м	ε_F, %	ΔF, м
Не менш за 5 доследаў								
Сярэдняе значэнне								

9. Выкарыстоўваючы збіральную лінзу, атрымайце на экране сапраўдны відарыс ніці лямпы. Пастаўце паміж збіральнай лінзай і экранам рассейвальную лінзу. Вымерайце адлегласць f ад відарыса на экране да рассейвальнай лінзы не менш за пяць разоў. Вылічыце сярэдняе значэнне $\langle f \rangle$. Вынікі запішыце ў табліцу.

10. Адсоўваючы экран ад рассейвальнай лінзы, зноў атрымайце выразны відарыс ніці на экране. Вымерайце адлегласць d ад экрана да рассейвальнай лінзы не менш за пяць разоў. Вылічыце сярэдняе значэнне $\langle d \rangle$. Вынікі запішыце ў табліцу.

Правообладатель Народная асвета

11. Вылічыце сярэднія значэнні фокуснай адлегласці $\langle F \rangle$ і аптычнай сілы $\langle D \rangle$ рассейвальнай лінзы. Вынікі запішыце ў табліцу.

12. Вылічыце адносную і абсалютную хібнасці вымярэння фокуснай адлегласці рассейвальнай лінзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle - \langle f \rangle}; \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

13. Запішыце вынікі вымярэнняў у выглядзе:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}; \ \varepsilon_F = \ldots \%.$$

Табліца вымярэнняў і вылічэнняў

№ доследу	d, м	f, м	F, м	D, дптр	Δd, м	Δf, м	ε_F, %	ΔF, м
Не менш за 5 доследаў								
Сярэдняе значэнне								

Кантрольныя пытанні

1. У якім выпадку лінзу можна лічыць тонкай? Адказ абгрунтуйце.
2. Як адрозніць збіральную лінзу ад рассейвальнай?
3. Запішыце правіла знакаў для формулы тонкай лінзы.
4. Якім чынам вызначалася адлегласць да ўяўнага відарыса пры выкананні задання?

Вывады

Лабараторная работа 5

Назіранне суцэльнага і лінейчастага спектраў

Мэта работы: назіранне суцэльнага спектра выпраменьвання электрычнай лямпы і лінейчастых спектраў выпраменьвання іанізаваных газаў.

Прыборы і прыналежнасці: спектраскоп прамога зроку або спектраскоп двухтрубны, набор спектральных трубак, выпрамляльнік або акумулятарная батарэя напружаннем 6 В, прыбор для запальвання спектральных трубак, лямпа напальвання на падстаўцы, люмінесцэнтная лямпа, ключ, рэастат супраціўленнем 6—10 Ом, злучальныя правады, штатыў, набор каляровых алоўкаў (фламастараў), табліцы са спектрамі выпраменьвання газаў (у спектральных трубках).

Правообладатель Народная асвета

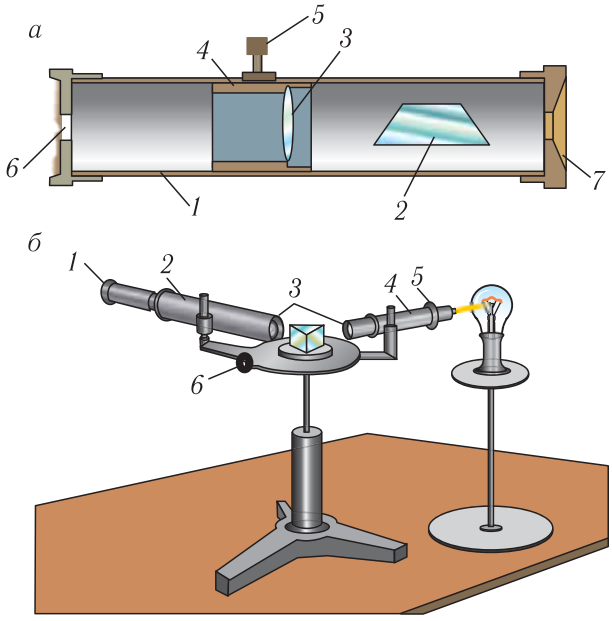
Парадак выканання работы

1. Азнаёмцеся з будовай спектраскопа прамога зроку (рыс. 180, *а*) або спектраскопа двухтрубнага (рыс. 180, *б*).

Спектраскоп прамога зроку складаецца з металічнай трубкі *1*, у якую змешчана прызма *2*, збіральная лінза *3*, замацаваная ў рухомым трымальніку *4* са шрубай *5*, каліматарнай шчыліны *6* і накрыўкі *7* з акулярнай адтулінай. Пры назіранні спектраў спектраскоп накіроўваюць каліматарнай шчылінай на крыніцу святла і глядзяць у акулярную адтуліну. Рэзкасць відарыса спектра рэгулююць перасоўваннем лінзы за плешку шрубы ўздоўж невялікага прарэзу ў трубцы.

Спектраскоп двухтрубны складаецца з акуляра *1*, зрокавай трубы *2*, аб'ектываў *3*, каліматара *4*, шчыліны *5* і мікраметрычнай шрубы *6*. Пры назіранні спектраў шчыліну накіроўваюць на крыніцу святла і з дапамогай аб'ектыва і акуляра дабіваюцца з'яўлення выразнага відарыса. Вярчэннем шрубы змяняюць дыяпазон бачнай часткі спектра.

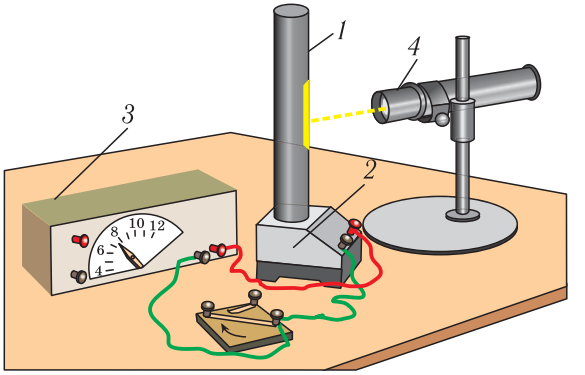
2. Замацуйце спектраскоп у штатыве такім чынам, каб шчыліна яго каліматара была размешчана вертыкальна. Перад шчылінай на адлегласці некалькіх сантыметраў устанавіце лямпачку на падстаўцы так, каб яе ніць была на вышыні шчыліны. Падключыце лямпу праз рэастат да крыніцы току.



Рыс. 180

Правообладатель Народная асвета

3. Уключыце лямпу і пры поўным напале назірайце суцэльны спектр выпраменьвання ніці. Памяншаючы напал ніці, назірайце аслабленне яркасці спектра і паступовае знікненне спектральных колераў, пачынаючы з фіялетавага. Зарысуйце каляровымі алоўкамі некалькі карцін спектраў, якія вы назіралі.



Рыс. 181

4. Накіруйце каліматар спектраскопа на люмінесцэнтную лямпу, якая свеціцца і ўстаноўлена на дэманстрацыйным стале (або вісіць на столі), і разгледзьце яе спектр. Зарысуйце назіраемую карціну спектра. Апішыце, чым спектр люмінесцэнтнай лямпы адрозніваецца ад спектра лямпы напальвання.

5. Устаўце трубку з геліем *1* у трымальнік *2* прыбора для запальвання спектральных трубак і падключыце прыбор да крыніцы напружання *3* (6 В). Запаліце спектральную трубку і разгледзьце ў спектраскоп *4* лінейчасты спектр выпраменьвання гелію (рыс. 181). Зарысуйце яго каляровымі алоўкамі і запішыце асноўныя колеры ў назіраемай паслядоўнасці.

6. Паўтарыце назіранне са спектральнай трубкай, напоўненай іншым газам (вадародам, неонам, аргонам, крыптонам). Зарысуйце спектр выпраменьвання дадзенага газу і запішыце асноўныя колеры ў назіраемай паслядоўнасці.

7. Параўнайце атрыманыя лінейчастыя спектры выпраменьвання з таблічнымі спектрамі выпраменьвання адпаведных газаў. Зрабіце вывады.

Вывады

Кантрольныя пытанні

1. Якія рэчывы даюць суцэльны спектр?

2. Якія рэчывы даюць лінейчасты спектр?

3. Растлумачце, чаму адрозніваюцца лінейчастыя спектры розных газаў.

4. Чаму адтуліна каліматара спектраскопа мае форму вузкай шчыліны? Ці зменіцца від назіраемага спектра (калі зменіцца, то як?), калі гэту адтуліну зрабіць, напрыклад, у форме квадрата?

Правообладатель Народная асвета

АДКАЗЫ ДА ПРАКТЫКАВАННЯЎ

Практ. 1. **1.** $T = 0{,}33$ с; $\nu = 3{,}0$ Гц; $\omega = 19\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. **2.** $v_{\max} = 0{,}10\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $a_{\max} = 0{,}22\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. **3.** $x_1 = 8{,}4$ см. **4.** $x(t) = 1{,}0 \sin(\pi t)$ (см); $x = 1{,}0$ см; $\varphi = 2{,}5\pi$. **5.** $x(t) = 10\sin\left(4\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$ (см).

Практ. 2. **1.** $T = 8{,}9$ с; $\nu = 0{,}11$ Гц. **2.** $l = 25$ см. **3.** Адначасова. **4.** $m = 1{,}05$ кг. **5.** Павялічыць. **6.** $T_1 = 1{,}6T = 0{,}99$ с. **7.** $l_2 = 56$ см. **8.** Павялічылася ў $n = \sqrt{2} = 1{,}4$. **9.** $n = \frac{\sqrt{k_1 k_2}}{k_1 + k_2}$.

Практ. 3. **1.** $W = 80$ мДж. **2.** $W = 2\pi^2\nu^2 A^2 m$. **3.** $x_1 = 2{,}4$ мм. **4.** $n = \frac{1}{8}$. **5.** $A = \frac{T}{\pi}\sqrt{\frac{(W_к)_{\max}}{2m}}$; $v_{\max} = \sqrt{\frac{2(W_к)_{\max}}{m}}$; $x(t) = \frac{T}{\pi}\sqrt{\frac{(W_к)_{\max}}{2m}}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$. **6.** $T = 9{,}1$ с.

Практ. 4. **1.** Для ўстаранення магчымага рэзанансу. **2.** $l = 14$ см. **3.** $l = 63$ см.

Практ. 5. **1.** $v = 75\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **2.** $T = 2{,}5$ с. **3.** $v = 0{,}70\ \frac{\text{км}}{\text{с}}$; $v_{\max} = 3{,}1\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **4.** $L = 1{,}1 \cdot 10^2$ м. **5.** $v = 1{,}2\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **6.** $l = 2{,}7$ км.

Практ. 6. **1.** $\tau_1 = 24$ с; $\tau_2 = 1{,}6$ с. **2.** $\lambda_1 = 6{,}0$ мм; $\lambda_2 = 1{,}4$ мм. **3.** $H = 1{,}5 \cdot 10^2$ м. **4.** $l = 0{,}45$ км. **5.** Паменшыцца ў $k = 3$ разы. **6.** $t = 153$ с.

Практ. 7. **1.** $T = 1{,}2$ мс. **2.** $\nu = 36$ кГц. **3.** Перыяд павялічыцца (паменшыцца) у 4 разы. **4.** C змяняецца ад 1,2 пФ да 0,14 пФ. **5.** $W_C = 0{,}12$ мДж; $W_L = 40$ мкДж. **6.** $\varepsilon = 2{,}5$.

Практ. 8. **1.** $U_0 = 311$ В. **2.** $\nu = 25$ Гц; $U_{дз} = 141$ В; $U = 200$ В. **3.** $\nu = 50$ Гц; $I_{дз} = 2{,}1$ А. **4.** $U_0 = 6{,}2$ В. **5.** $\mathscr{E}(t) = 2\pi nBS\cos(2\pi nt)$; $\mathscr{E}_0 = 0{,}19$ В.

Практ. 9. **1.** Паніжаючы; $k = 2{,}8$. **2.** $k = 10$. **3.** $I_1 = 0{,}53$ А; $U_2 = 8{,}0$ В. **4.** Паніжыючы; $k = 2{,}3$. **5.** Страты паменшацца на 48 кВт. **6.** $N_{21} = 6$; $N_{22} = 60$.

Практ. 10. **1.** $T = 50$ нс; $\nu = 2{,}0 \cdot 10^7$ Гц. **2.** $N = 7{,}5 \cdot 10^3$. **3.** $\lambda = 30$ км. **4.** $\lambda = 7{,}5$ км; **5.** $d_2 = 5{,}6$ мм. **6.** $l = 4{,}5 \cdot 10^2$ м. **7.** $\tau = 50$ нс.

Практ. 11. **1.** $\Delta t = 493$ с. **2.** $l = 1{,}7$ км. **3.** $v = 1{,}95 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **4.** $k = 1{,}135$. **5.** $\Delta t = 2{,}00$ мс. **6.** $n = 1{,}52$.

Практ. 12. **1.** Аслабленне. **2.** Аслабленне. **3.** $N = 5$. **4.** Аслабленне. **6.** $\Delta x = 0{,}092$ мм. **7.** $\lambda = 5{,}6 \cdot 10^{-7}$ м.

Практ. 13. **1.** $\theta = 6{,}1°$. **2.** Максімумы звужваюцца, а адлегласць паміж імі павялічваецца. **3.** У чырвонай вобласці спектра $m_{\max} = 2$; у фіялетавай вобласці спектра $m_{\max} = 5$. **4.** $\Delta\theta = 15{,}4°$. **5.** $\lambda_2 = 455$ нм. **6.** $m_{\max} = 6$.

Практ. 14. **1.** $D_1 = 0{,}65$ м; $D_2 = 0{,}85$ м. **3.** $h = 5{,}3$ м. **4.** $n_{21} = 0{,}89$. **5.** $\alpha = 83°$. **6.** $\alpha_2 = 82°$.

Практ. 15. **1.** $h = 2{,}0$ мм. **2.** $l = 22$ мм. **3.** $\varphi = 40°$. **4.** $n = 1{,}5$.

Практ. 16. **4.** Збіральная; $F = 18{,}3$ см. **5.** $d = 24$ см. **6.** $d = 30$ см; $\Gamma = 1{,}5$. **7.** $d = 5{,}8$ см. **8.** $F = 15$ см. **9.** $\delta = 80°$; $l = 44$ см.

Практ. 17. **1.** $D = 6{,}8$ дптр. **2.** $d = 62{,}5$ см. **3.** $h = 2{,}7$ м. **4.** $F = 8{,}3$ см. **5.** $D = -2{,}7$ дптр. **6.** $D_1 = 5{,}3 \cdot 10^2$ дптр. **7.** $D = -3{,}5$ дптр. **8.** $t = 2{,}2$ мс.

Практ. 18. **1.** $l_0 = 0{,}15$ км. **2.** $v = 0{,}80c$. **3.** $\tau = 1{,}9$ мкс. **4.** $v = 0{,}80c$. **5.** $\tau = 1{,}4$ мкс. **6.** $P = 66$ см. **7.** $S = 0{,}60$ м^2. **8.** $v = 0{,}95c$.

Практ. 19. **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.** $\Delta m = 8{,}3 \cdot 10^{18}$ кг. **5.** $v = 0{,}82c$. **6.** $E_к = 6{,}0 \cdot 10^{19}$ Дж; $\varepsilon = 5{,}1$ %.

Правообладатель Народная асвета

Практ. 20. **1.** $E = 3{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж. **2.** $p = 1{,}11 \cdot 10^{-27}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$. **3.** $E_1 = 3{,}3 \cdot 10^{-19}$ Дж; $\frac{E_2}{E_1} = 2{,}4$; $\frac{E_3}{E_1} = 6{,}0 \cdot 10^3$; $\frac{E_4}{E_1} = 6{,}0 \cdot 10^6$. **4.** $\lambda = 3{,}0 \cdot 10^{-7}$ м. **5.** $v_{\max} = 4{,}0 \cdot 10^5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **6.** $\nu_{\min} = 5{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц. **7.** $\lambda = 3{,}2 \cdot 10^{-7}$ м. **8.** $E_{\text{к}}^{\max} = 6{,}3 \cdot 10^{-19}$ Дж; $v_{\max} = 1{,}2 \cdot 10^6\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. **9.** $A_{\text{вых}} = 2{,}0$ эВ. **10.** $\lambda = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ м.

Практ. 21. **1.** $N = 6$. **2.** Энергія атама паменшылася на $\Delta E \approx 2{,}5$ эВ $\approx 4{,}1 \cdot 10^{-19}$ Дж. **3.** Пераходы магчымы толькі пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання; на любы. **4.** $\frac{\Delta m}{m} = 1{,}1 \cdot 10^{-8}$. **5.** $\lambda = 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ м. **6.** $r_3 = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ м; $r_{300} = 4{,}8 \cdot 10^{-6}$ м. **7.** $E = 1{,}6 \cdot 10^{-18}$ Дж. **8.** $n = 4{,}3 \cdot 10^3$; $E_n = -7{,}2 \cdot 10^{-7}$ эВ.

Практ. 22. **1.** $\varepsilon_{\text{сув}} = 7{,}0$ МэВ на нуклон. **2.** $E = 32$ МэВ; $\varepsilon_{\text{сув}} = 5{,}33$ МэВ на нуклон.

Практ. 23. **1.** ${}^{11}_{5}\text{B} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}n$. **2.** α-Часціца. **3.** Вылучаецца $E = 1{,}3 \cdot 10^{-12}$ Дж. **4.** ${}^{2}_{1}\text{D}$; ${}^{54}_{25}\text{Mn} + {}^{2}_{1}\text{D} \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^{1}_{0}n$. **5.** Указанне: вылічыце дэфект мас. **6.** Указанне: вылічыце дэфект мас. **7.** Так, стабільнае, паколькі дэфект мас дадзенай сістэмы дадатны. **8.** ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^{1}_{0}n$; ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^{0}_{1}e$. **9.** ${}^{56}_{26}\text{Fe} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{56}_{25}\text{Mn} + {}^{1}_{1}p$; ${}^{56}_{25}\text{Mn} \rightarrow {}^{56}_{26}\text{Fe} + {}^{0}_{-1}e$. **10.** ${}^{14}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}\text{C} + {}^{1}_{1}p$; ${}^{14}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^{0}_{-1}e$.

Практ. 24. **1.** $k_2 = 4{,}0$. **2.** $k = 1{,}6$ %. **3.** $m = 0{,}93$ кг. **4.** $T_{1/2} = 2{,}5 \cdot 10^3$ с. **5.** $t = 41$ год.

Правообладатель Народная асвета

ПРАДМЕТНА-ІМЯННЫ ПАКАЗАЛЬНІК

Абертон 39
Адбіццё поўнае 106
Адлегласць найлепшага зроку 122
Адроны 251
Акустыка 36
Амплітуда 9, 32
Аналіз спектральны 127, 198
Антычасціца 253
Асцылятар гарманічны 9
Асяроддзе актыўнае 201

Базон Хігса 254
Базоны 252
Барыёны 250
Бінокль 125
Бор Н. А. 182
Бэр 246

Ваганні 6, 26
— вымушаныя 27
— затухачыя 27
— незатухаючыя 26
— свабодныя (уласныя) 26
— электрамагнітныя 48, 53
Вібратар Герца 73
Вугал адхілення 110
— зроку 120
— поўнага адбіцця гранічны 106
Выпраменьванне бачнае 76
— іанізуючае 243
— інфрачырвонае 76
— рэнтгенаўскае 76
— ультрафіялетавае 76
Выхад ядзернай рэакцыі энергетычны 219

***Г**алілей Г.* 15
Генератар пераменнага току 54
Герц Г. 73, 156
Глюёны 252
Грэй 245
Гуку вышыня 39
— гучнасць 39
Гюйгенс Х. 16, 94

Дазіметрыя 245
Даўжыня хвалі 32
Доза выпраменьвання паглынутага 245
— — — эквівалентная 246
Дуалізм карпускулярна-хвалевы 172
Дысперсія святла 128
— — анамальная 128
— — нармальная 128
Дыфракцыя 95
Дыяптрыя 113
Дэфект мас 213

Закон адбіцця 102
— знешняга фотаэфекту 158
— незалежнасці светлавых прамяняў 102
— праламлення 102, 105
— прамалінейнага распаўсюджвання святла 102
— радыеактыўнага распаду 227
— узаемасувязі масы і энергіі 151
Зіверт 246
Значэнне напружання (сілы току) амплітуднае 57
— — — — дзеючае 58
— — — — імгненнае 57

Інверсія населенасцей 201
Інтэнсіўнасць хвалі 36
— — светлавой 89
Інтэрферэнцыя 89

Кагерэнтнасць 87
Калайдар вялікі адронны 260
Карціна дыфракцыйная 98
— інтэрферэнцыйная 89
Каэфіцыент размнажэння нейтронаў 234
— трансфармацыі 62
Квант энергіі 160
Кваркі 252
Контур вагальны 46
— — ідэальны 46

Лазер 91, 203
Лебедзеў П. М. 170
Лептоны 250
Лінза 112
— збіральная 112, 113
— рассейвальная 112, 113
— тонкая 113
Лік зарадавы 208
— квантавы 192
— — арбітальны 192

Правообладатель Народная асвета

— — галоўны 192
— — магнітны 192
— — спінавы 192
— масавы 208
Лупа 122

Мадэль атама квантавая 182
— — ядзерная (Рэзерфарда) 180
— стандартная 254
— ядра 208
Майкельсан А. А. 82, 137
Максвел Д. 70, 265
Маса крытычная 233
Маятнік матэматычны 15
— спружынны 14
Мезоны 250
Механіка квантавая 190
Мікраскоп 123
— электронны 174
Мяжа фотаэфекту чырвоная 159, 165

Накачка 201
Напружанне затрымкі 158
Нейтрон 207
Нуклід 209
Нуклон 208

Оптыка 80
— геаметрычная 102

Павелічэнне лінейнае (папярочнае) 115
Паказчык праламлення абсалютны 83
— — адносны 105
Папоў А. С. 73
Пастаянная Планка 161
Пастулат адноснасці 139
— Бора 182
— пастаянства скорасці святла 139
Парадак максімумаў дыфракцыі 98
Парог болевага адчування 38
— чутнасці 37
Пераўтварэнні Галілея 147
— Лорэнца 148
Пераходы вымушаныя 200
— спантанныя 199
Перыяд паўраспаду 227
Планк М. 160
Поле электрамагнітнае 71
Правіла адбору 194
— знакаў 115
— зруху (зрушэння) 223
Праектар мультымедыйны 118
Прамені святла разыходныя 103
— — сыходныя 103
Прамень святла 95, 102
Прызмы праламляльная грань 110
— праламляльны вугал 110
Прынцып адноснасці Галілея 135
— Гюйгенса 94
— Гюйгенса — Фрэнеля 96
— дадатковасці 175
— забароны Паўлі 193
— няпэўнасці Гейзенберга 191

Работа выхаду 163
Рад 246
Радыеактыўнасць 221
— натуральная 226
— штучная 226
Рашотка дыфракцыйная 96
Рознасць ходу 87
— — аптычная 89
Ромер О. 81
Рух вагальны 6
Рэакцыя тэрмаядзерная 239
— ядзерная 216
— — ланцуговая 232
— — экзатэрмічная 218
— — эндатэрмічная 218
Рэзананс 28
Рэзерфард Э. 179

Святло 80
Серада актыўная 201
Сіла вымушаючая 27
Сілы ядзерныя 211
Сістэма адліку інерцыяльная 135
Скарачэнне даўжыні 145
Скорасць святла ў вакууме 82, 83
— — у рэчыве 83, 84
Спектр 38, 128
— выпраменьвання 195, 196
— дыскрэтны 38, 200

Правообладатель Народная асвета

— лінейчасты 195, 196
— паглынання 195, 197
— паласаты 196
— суцэльны 38, 196, 197
Спектраскоп 129
Спектрафатометр 129
Спектрограф 129
Спектрометр 129
Сталетаў А. Г. 157
Стан атама асноўны 183
— — узбуджаны 183
Супраціўленне актыўнае 59

Ток электрычны віхравы 63
— — пераменны 53
Томсан Д. 160
Тон музыкальны 38
Трансфарматар 60
— павышаючы 60
— паніжаючы 60
Трансфарматара абмотка другасная 61
— — першасная 61
— рэжым кароткага замыкання 63
— — рабочага ходу 62
— — халастога ходу 62
Тэлескоп 124
Тэмбр 39

Узаемадзеянне гравітацыйнае 251, 267
— моцнае 210, 251, 267
— слабае 224, 251, 267
— электрамагнітнае 251, 267
Умова квантавання 184
— максімума дыфракцыі 98
— максімума інтэрферэнцыі 90
— мінімума інтэрферэнцыі 90
Ураўненне гарманічных ваганняў (гарманічнага асцылятара) 9
— Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту 164

Фаза 10
— пачатковая 10
Фарадэй М. 60, 265
Фатон 162, 251
Ферміёны 252, 255
Формула Гюйгенса 16
— Томсана 50
— тонкай лінзы 114, 115
Фотаапарат 119
Фотаток 157
— насычэння 158
Фотаэфект знешні 157
— унутраны 157
Фронт хвалевы 32

Хваля бягучая 33
— гукавая 36
— кагерэнтная 87
— манахраматычная 84
— механічная 31
— падоўжная 33
— папярочная 33
— электрамагнітная 72

Частата ўласных ваганняў 26
— цыклічная 10
Часціца элементарная 250
— фундаментальная 255

Шкала электрамагнітных хваль 75
Шум 38

***Э**йнштэйн А.* 139, 162, 265
Электрастанцыя атамная (АЭС) 65
— гідра (ГЭС) 65
— цеплавая (ЦЭС) 65
Электронвольт 162, 265
Эмісія 157
Энергетыка вадародная 69
— ветравая 68
— геатэрмальная 69
— геліа 69
— прыліўная 69
Энергія іанізацыі 187
— спакою 150
— сувязі ядра 187, 212

***Я**блачкаў П. М.* 60

Правообладатель Народная асвета

ЗМЕСТ

Ад аўтараў 3

Раздзел 1. Механічныя ваганні і хвалі

§ 1. Вагальны рух. Гарманічныя ваганні. Амплітуда, перыяд, частата, фаза ваганняў. Ураўненне гарманічных ваганняў 5
Практыкаванне 1 13
§ 2. Спружынны і матэматычны маятнікі . . . . . —
Практыкаванне 2 19
§ 3. Ператварэнні энергіі пры гарманічных ваганнях 20
Практыкаванне 3 25
§ 4. Свабодныя і вымушаныя ваганні. Рэзананс 26
Практыкаванне 4 30
§ 5. Распаўсюджванне ваганняў у пругкім асяроддзі. Падоўжныя і папярочныя хвалі . . . . . —
Практыкаванне 5 35
§ 6. Гук . . . . . —
Практыкаванне 6 42
Самае важнае ў раздзеле 1 . . . . . —

Раздзел 2. Электрамагнітныя ваганні і хвалі

§ 7. Вагальны контур. Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры. Формула Томсана. Ператварэнні энергіі ў вагальным контуры 46
Практыкаванне 7 52
§ 8. Вымушаныя электрамагнітныя ваганні. Пераменны электрычны ток. Дзеючыя значэнні сілы току і напружання 53
Практыкаванне 8 59
§ 9. Пераўтварэнне пераменнага току. Трансфарматар 60
Практыкаванне 9 64
§ 10. Вытворчасць, перадача і спажыванне электрычнай энергіі. Экалагічныя праблемы вытворчасці і перадачы электрычнай энергіі 65
§ 11. Электрамагнітныя хвалі і іх уласцівасці. Шкала электрамагнітных хваль 70
Практыкаванне 10 78
Самае важнае ў раздзеле 2 . . . . . —

Раздзел 3. Оптыка

§ 12. Электрамагнітная прырода святла. Скорасць сятла 80
Практыкаванне 11 86
§ 13. Інтэрферэнцыя святла . . . . . —
Практыкаванне 12 93
§ 14. Прынцып Гюйгенса — Фрэнеля. Дыфракцыя святла. Дыфракцыйная рашотка 94
Практыкаванне 13 101
§ 15. Закон праламлення святла. Паказчык праламлення. Поўнае адбіццё 102
Практыкаванне 14 108
§ 16. Праходжанне святла праз плоскапаралельныя пласцінкі і прызмы . . . . . —
Практыкаванне 15 112
§ 17. Формула тонкай лінзы . . . . . —
Практыкаванне 16 116

Правообладатель Народная асвета

§ 18. Аптычныя прыборы для атрымання сапраўдных відарысаў 118
§ 19. Аптычныя прыборы для павелічэння вугла зроку 120
Практыкаванне 17 126
§ 20. Дысперсія святла. Спектр. Спектральныя прыборы 127
Самае важнае ў раздзеле 3 131

Раздзел 4. Асновы спецыяльнай тэорыі адноснасці

§ 21. Прынцып адноснасці Галілея і электрамагнітныя з'явы. Эксперымантальныя прадпасылкі спецыяльнай тэорыі адноснасці 135
§ 22. Пастулаты спецыяльнай тэорыі адноснасці. Адноснасць адначасовасці 139
§ 23. Прастора і час у спецыяльнай тэорыі адноснасці 142
Практыкаванне 18 146
§ 24. Пераўтварэнні Галілея. Пераўтварэнні Лорэнца. Рэлятывісцкі закон складання скарасцей 147
§ 25. Элементы рэлятывісцкай дынамікі. Узаемасувязь масы і энергіі 149
Практыкаванне 19 153
Самае важнае ў раздзеле 4 154

Раздзел 5. Фатоны. Дзеянні святла

§ 26. Фотаэфект. Эксперыментальныя законы знешняга фотаэфекту. Квантавая гіпотэза Планка 155
§ 27. Фатон. Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту 162
Практыкаванне 20 167
§ 28. Ціск святла. Карпускулярна-хвалевы дуалізм 168
Самае важнае ў раздзеле 5 176

Раздзел 6. Фізіка атама

§ 29. З'явы, якія пацвярджаюць складаную будову атама. Доследы Рэзерфарда. Ядзерная мадэль атама 178
§ 30. Квантавыя пастулаты Бора 182
Практыкаванне 21 189
§ 31. Квантава-механічная мадэль атама . . . . . —
§ 32. Выпраменьванне і паглынанне святла атамам. Спектры выпраменьвання і паглынання 195
§ 33. Спантаннае і індуцыраванае выпраменьванне 199
§ 34. Лазеры 203
Самае важнае ў раздзеле 6 205

Раздзел 7. Ядзерная фізіка і элементарныя часціцы

§ 35. Пратонна-нейтронная мадэль будовы ядра атама. Энергія сувязі ядра атама 207
Практыкаванне 22 216
§ 36. Ядзерныя рэакцыі. Законы захавання ў ядзерных рэакцыях. Энергетычны выхад ядзерных рэакцый . . . . . —
Практыкаванне 23 220
§ 37. Радыеактыўнасць 221
§ 38. Закон радыеактыўнага распаду 227
Практыкаванне 24 229

Правообладатель Народная асвета

§ 39. Дзяленне цяжкіх ядзер. Ланцуговыя ядзерныя рэакцыі 229
§ 40. Ядзерны рэактар 235
§ 41. Рэакцыі ядзернага сінтэзу 239
§ 42. Іанізуючыя выпраменьванні. Элементы дазіметрыі 243
§ 43. Элементарныя часціцы і іх узаемадзеянні 250
§ 44. Паскаральнікі зараджаных часціц 256
Самае важнае ў раздзеле 7 261

Раздзел 8. Асновы адзінай фізічнай карціны свету

§ 45. Сучасная прыродазнаўчанавуковая карціна свету 264
Самае важнае ў раздзеле 8 269
Дадатак. Лабараторны эксперымент 270
Адказы да практыкаванняў 280
Прадметна-імянны паказальнік 282

Правообладатель Народная асвета

(Назва і нумар установы 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

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання

2-е выданне, перагледжанае і дапоўненае

Заг. рэдакцыі *В. Г. Бехціна*. Рэдактар *Л. В. Грынкевіч*. Мастацкі рэдактар *Л. У. Паўленка*. Тэхнічны рэдактар *Г. А. Дудко*. Кампьютарная вёрстка *Г. А. Дудко, Л. І. Шаўко*. Карэктары *В. С. Бабеня, А. П. Тхір, Г. В. Алешка*.

Падпісана ў друк 15.05.2014. Фармат $70 \times 90^1/_{16}$. Бумага афсетная. Гарнітура літаратурная. Друк афсетны. Умоўн. друк. арк. 21,06 + 0,29 форз. Ул.-выд. арк. 15,78 + 0,22 форз. Тыраж 16 000 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.

ААТ«Паліграфкамбінат імя Я. Коласа».
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/3 ад 04.10.2013.
Вул. Каржанеўскага, 20, 220024, Мінск.

Правообладатель Народная асвета