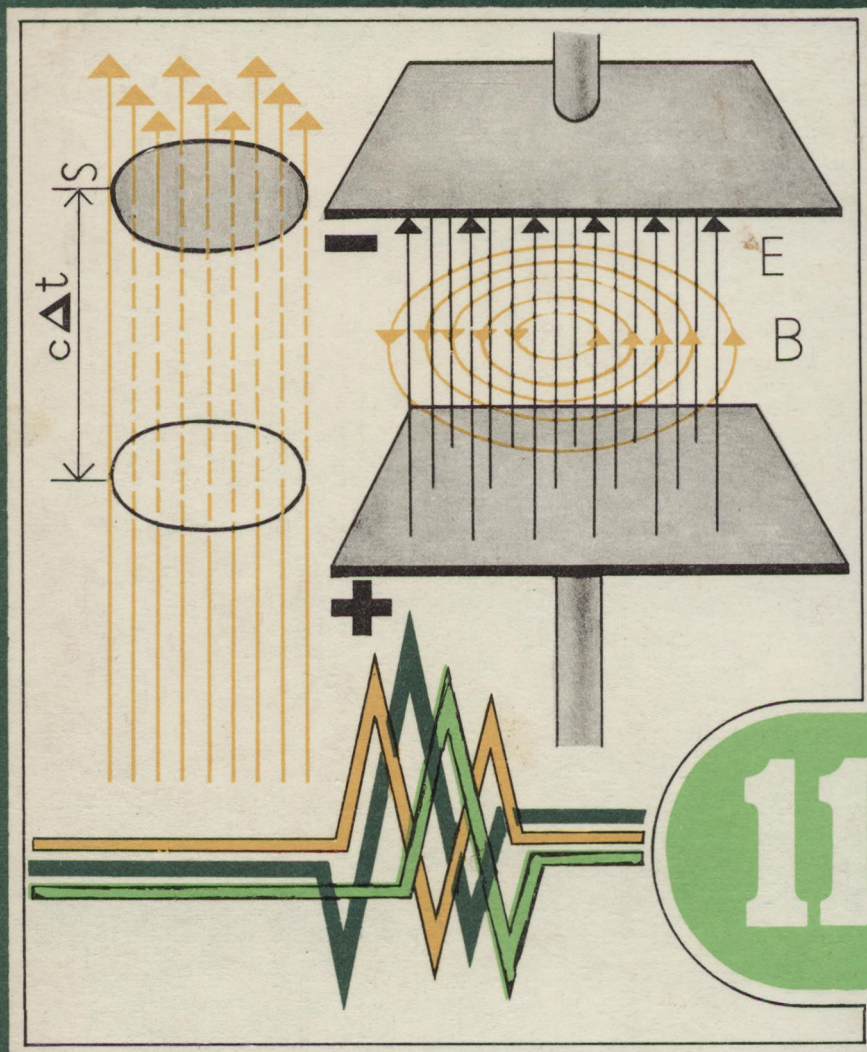


Г.Я.МЯКИШАЎ Б.Б.БУХАЎЦАЎ

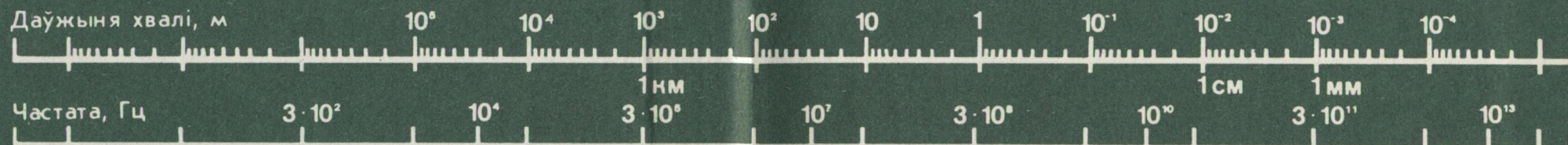
ФІЗІКА



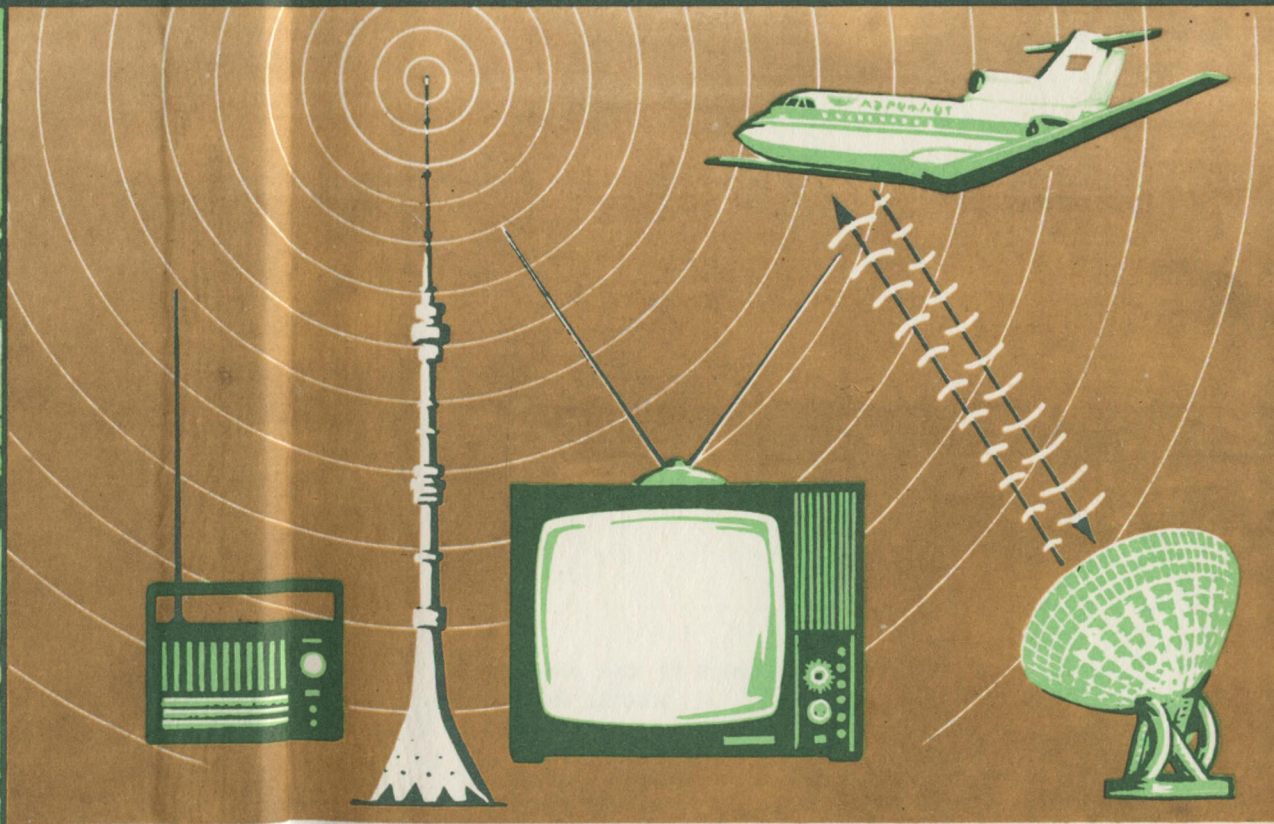
11

ШКАЛА ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ВЫПРАМЕНЬВАННЯЎ

ВЫПРАМЕНЬВАННІ ЭЛЕКТРЫЧНЫХ ВІБРАТАРАЎ



НІЗКАЧАСТОТНЫЯ ВАГАННІ



РАДЫЕХВАЛІ

Г.Я.МЯКИШАЎ, Б.Б.БУХАЎЦАЎ

ФІЗІКА



Электрадынаміка (працяг)



Ваганні і хвалі



Оптыка



Квантавая фізіка

Падручнік для 11 класа
сярэдняй школы

Зацверджаны Дзяржаўным камітэтам СССР
па народнай адукацыі

МІНСК «НАРОДНАЯ АСВЕТА» 1991

ББК 22.3я721
М99
УДК 53(075.3)

Падручнік атрымаў другую прэмію на Усесаюзным конкурсе падручнікаў для сярэдняй агульнаадукацыйнай школы

Пераклад зроблены па выданню:

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учеб. для 11-го кл. сред. шк.— М.: Просвещение, 1991.— 224 с.

Перакладчыкі: І. П. Крэнь, В. У. Амбражэвіч

4306021200— 052
М 121—91
М303(03) — 91

ISBN 5-341-00758-1

© Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., 1991
© Пераклад на беларускую мову, Г. П. Крэнь,
В. У. Амбражэвіч, 1991

НАКАЗ

У курсах фізікі IX і X класаў вывучалася пераважна класічная фізіка. Сучасныя праблемы мы закраналі толькі тады, калі размова ішла аб тэхнічных прымяненнях фізікі (паўправадніковыя прыборы, звышправоднасць і інш.).

Значная частка курса XI класа прысвечана сучаснай фізіцы, фізіцы XX стагоддзя. Тут даецца ўяўленне аб тэорыі адноснасці, квантавай тэорыі, фізіцы атамнага ядра і элементарных часціц. Найбольшыя цяжкасці, як вы, напэўна, лічыце, павінна выклікаць у вас вывучэнне менавіта гэтай часткі курса. У сапраўднасці ж самым складаным акажацца раздзел «Электрамагнітныя ваганні». Такі «перакос» вымушаны. Сучасная фізіка настолькі складаная матэматычна, што ў школе можна даць аб ёй толькі агульныя ўяўленні на якасных узроўні, амаль без матэматыкі.

А вось тэорыю ваганняў можна разгледзець дэтальна, выкарыстаўшы вашы веды матэматычнага аналізу. Гэта пытанне вельмі важнае для практыкі. Уся тэорыя пераменнага току — гэта тэорыя вымушаных электрамагнітных ваганняў. Акрамя таго, пры вывучэнні такой дакладнай колькаснай навукі, як фізіка, абмяжоўвацца толькі якаснымі апісаннямі з'яў нельга. Інакш вы не атрымаеце колькі-небудзь правільнага ўяўлення аб гэтай навуцы.

У IX класе разглядаліся механічныя ваганні з мінімальным прыцягненнем матэматыкі. Пачаўшы вывучаць электрамагнітныя ваганні, вы пераканаецеся, што механічныя і электрамагнітныя ваганні апісваюцца аднолькавымі матэматычнымі законамі і пазнаёміцеся з больш дэтальным апісаннем ваганняў.

Аб тым, як працаваць з падручнікам, гаварылася ва ўводзінах да падручніка для X класа. Гэтыя рэкамендацыі будуць карысныя для вас і ў XI класе.



ЭЛЕКТРАДЫНАМІКА

(працяг)

Раздзел 1. Электрамагнітная індукцыя

У X класе мы разглядалі электрычныя і магнітныя палі, якія не змяняюцца з цягам часу. Было высветлена, што электрasta- тычнае поле ствараецца нерухомымі зараджанымі часціцамі, а магнітнае поле — часціцамі, якія рухаюцца, г. зн. электрычным токам. Пяройдзем да знаёмства з электрычным і магнітным палямі, якія мяняюцца з часам.

Раздзел 1

ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ІНДУКЦЫЯ

Самы важны факт, які ўдалося выявіць, — гэта найцяснейшая ўзаемасувязь паміж электрычным і магнітным палямі. Магнітнае поле, якое змяняецца ў часе, параджае электрычнае поле, а электрычнае поле, якое змяняецца, параджае магнітнае. Без гэтай сувязі паміж палямі разнастайнасць праяўленняў электрамагнітных сіл не была б такой вялікай, якая яна ёсць на самай справе. Не існавала б ні радыёхваль, ні святла.

§ 1. АДКРЫЦЦЕ ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЙ ІНДУКЦЫІ

У 1821 г. Майкл Фарадэй запісаў у сваім дзённіку: «Пера- тварыць магнетызм у электрычнасць». Праз 10 гадоў гэта задача была ім вырашана.

Не выпадкова першы, рашаючы крок у адкрыцці новых уласці- васцей электрамагнітных узаемадзеянняў быў зроблены засна- вальнікам уяўленняў аб электрамагнітным полі — Фарадэем. Фарадэй быў упэўнены ў адзінай прыродзе электрычных і маг- нітных з'яў. Дзякуючы гэтаму ён зрабіў адкрыццё, якое ў далей- шым лягло ў аснову будовы генератараў усіх электрастанцый свету, што ператвараюць механічную энергію ў энергію электрыч- нага току. (Крыніцы, якія працуюць па іншых прынцыпах: галь- ванічныя элементы, акумулятары і інш. — даюць нязначную долю электрычнай энергіі, якая вырабляецца.)

Електричны ток, разважаў Фарадэй, здольны намагніціць кавалак жалеза. Ці не можа магніт, у сваю чаргу, выклікаць з'яўленне электрычнага току? Доўгі час гэту сувязь выявіць не ўдавалася. Цяжка было дадумацца да галоўнага, менавіта: толькі магніт, што рухаецца, або магнітнае поле, якое мяняецца ў часе, можа выклікаць электрычны ток у шпулі.

Якога характару выпадковасці маглі перашкоджаць адкрыццю, паказвае наступны факт. Амаль адначасова з Фарадэем атрымаць электрычны ток у шпулі з дапамогай магніта спрабаваў швейцарскі фізік Каладон. Пры рабоце ён карыстаўся гальванометрам, лёгкая магнітная стрэлка якога змяшчалася ўнутры шпулі прыбора. Каб магніт не аказваў непасрэднага ўплыву на стрэлку, канцы шпулі, у якую Каладон усоўваў магніт, спадзеючыся атрымаць у ёй ток, былі выведзены ў суседні пакой і там далучаны да гальванометра. Уставіўшы магніт у шпулю, Каладон ішоў у суседні пакой і з засмучэннем пераконваўся, што гальванометр не паказвае току. Варта было б яму ўвесь час назіраць за гальванометрам, а каго-небудзь папрасіць заняцца магнітам, выдатнае адкрыццё было б зроблена. Але гэтага не здарылася. Магніт, што знаходзіцца ў спакоі адносна шпулі, не выклікае ў ёй току.

З'ява электрамагнітнай індукцыі заключаецца ва ўзнікненні электрычнага току ў праводзячым контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў пераменным у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі такім чынам, што лік ліній магнітнай індукцыі, якія пранізваюць контур, мяняецца. Яна была адкрыта 29 жніўня 1831 года. Рэдкі выпадак, калі дата новага выдатнага адкрыцця вядома так дакладна.

Першапачаткова была адкрыта электрамагнітная індукцыя ў нерухомах адзін адносна аднаго правадніках пры замыканні і размыканні ланцуга. Затым, ясна разумеючы, што збліжэнне або аддаленне праваднікоў з токам павінна прыводзіць да таго ж выніку, што і замыканне і размыканне ланцуга, Фарадэй з дапамогай доследаў даказаў, што ток узнікае пры перамяшчэнні шпуль адна адносна адной. Знаёмы з працамі Ампера, Фарадэй разумеў, што магніт — гэта сукупнасць маленькіх токаў, якія цыркулююць у малекулах. 17 кастрычніка, як зарэгістравана ў яго лабараторным журнале, быў выяўлены індукцыйны ток у шпулі ў час усоўвання (або высоўвання) магніта.

На працягу аднаго месяца Фарадэй последным шляхам адкрыў усе істотныя асаблівасці з'яў электрамагнітнай індукцыі. У цяперашні час доследы Фарадэя можа паўтарыць кожны. Для гэтага трэба мець дзве шпулі, магніт, батарэю элементаў і дастаткова адчувальны гальванометр.

На ўстаноўцы, паказанай на рысунку 1, а, індукцыйны ток узнікае ў адной са шпуль у момант замыкання або размыкання электрычнага ланцуга другой шпулі, нерухомай адносна першай. У іншых доследах індукцыйны ток узнікае пры змяненні сілы току ў адной са шпуль з дапамогай рэзистара (рыс. 1, б); пры

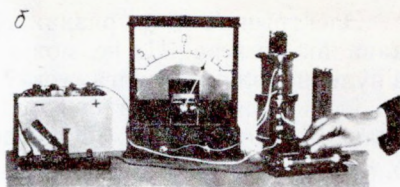
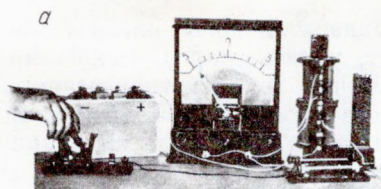


Рис. 1

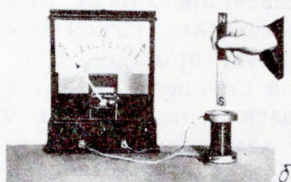
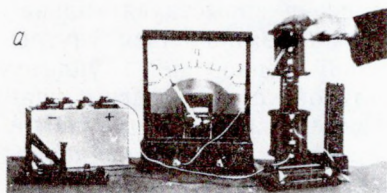


Рис. 2

руху шпуль одна адносна адной (рис. 2, а); пры руху пастаяннага магніта адносна шпулі (рис. 2, б).

Ужо сам Фарадэй улавіў тое агульнае, ад чаго залежыць з'яўленне індукцыйнага току ў доследах, якія знешне выглядаюць па-рознаму.

У замкнутым праводзячым контуры ўзнікае ток пры змяненні ліку ліній магнітнай індукцыі, якія пранізваюць паверхню, абмежаваную гэтым контурам. І чым хутчэй мяняецца лік ліній магнітнай індукцыі, тым большы індукцыйны ток, які ўзнікае. Пры гэтым прычына змянення ліку ліній магнітнай індукцыі ўсё роўна якая. Гэта можа быць і змяненне ліку ліній магнітнай індукцыі, што пранізваюць паверхню нерухомага праводзячага контуру ў выніку змянення сілы току ў суседняй шпулі (гл. рис. 1, б), і змяненне ліку ліній індукцыі з прычыны руху контуру ў неаднародным магнітным полі, частата ліній якога мяняецца ў прасторы (рис. 3).



Рис. 3

У праводзячым замкнутым контуры ўзнікае электрычны ток, калі контур знаходзіцца ў пераменным магнітным полі або рухаецца ў пастаянным у часе полі, так што лік ліній магнітнай індукцыі, якія пранізваюць контур, мяняецца.

1. У чым заключаецца галоўнае адрозненне пераменных электрычных і магнітных палёў ад пастаянных? 2. У чым заключаецца з'ява электрамагнітнай індукцыі? 3. Як павінен рухацца замкнуты праводзячы контур у аднародным магнітным полі, якое не залежыць ад часу, паступальна або вярчальна, каб у ім узнік індукцыйны ток?

§ 2. МАГНІТНИ ПАТОК

Для того каб даць дакладную колькасную фармулёўку закону электрамагнітнай індукцыі Фарадэя, трэба ўвесці новую велічыню — паток магнітнай індукцыі.

Вектар магнітнай індукцыі $\vec{B}$ характарызуе магнітнае поле ў кожным пункце прасторы. Можна ўвесці яшчэ адну велічыню, якая залежыць ад значэнняў вектара $\vec{B}$ не ў адным пункце, а ва ўсіх пунктах паверхні, абмежаванай плоскім замкнутым контурам.

Для гэтага разгледзім плоскі замкнуты праваднік (контур) з плошчай паверхні S , змешчаны ў аднароднае магнітнае поле. Нармаль $\vec{n}$ да плоскасці правадніка складае вугал α з напрамкам вектара магнітнай індукцыі $\vec{B}$ (рыс. 4). *Магнітным патокам Φ (патокам магнітнай індукцыі) праз паверхню плошчай S называюць велічыню, роўную здабытку модуля вектара магнітнай індукцыі $\vec{B}$ на плошчу S і косінус вугла α паміж вектарамі $\vec{B}$ і $\vec{n}$:*

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (1.1)$$

Здабытак $B \cos \alpha = B_n$ уяўляе сабой праекцыю вектара магнітнай індукцыі на нармаль да плоскасці контура. Таму

$\Phi = B_n S.$

(1.2)

Магнітны паток наглядна можна растлумачыць як велічыню, прапарцыянальную ліку ліній магнітнай індукцыі, якія праходзяць паверхню плошчай S .

Адзінкай магнітнага патоку з'яўляецца вебер. *Магнітны паток у 1 вебер (1 Вб) ствараецца аднародным магнітным полем з індукцыяй 1 Тл праз паверхню плошчай 1 м², размешчаную перпендыкулярна вектару магнітнай індукцыі.*

Паток магнітнай індукцыі характарызуе размеркаванне магнітнага поля па паверхні, абмежаванай замкнутым контурам.

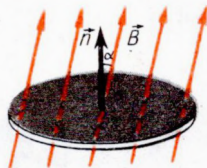


Рис. 4

§ 3. НАПРАМАК ІНДУКЦЫЙНАГА ТОКУ. ПРАВІЛА ЛЕНЦА

Высветлім важнае пытанне аб напрамку індукцыйнага току.

Далучыўшы шпулю, у якой узнікае індукцыйны ток, да гальванометра, можна выявіць, што напрамак гэтага току залежыць ад таго, ці набліжаецца магніт да шпулі (напрыклад, паўночным полюсам), ці аддаляецца ад яе (гл. рыс. 2, б).

Індукцыйны ток таго або іншага напрамку, які ўзнікае, нека ўзаемадзейнічае з магнітам (прыцягвае яго або адштурхвае). Шпуля з токам, які праходзіць па ёй, падобна да магніта з двума полюсамі — паўночным і паўднёвым. Напрамак індукцыйнага току вызначае, які канец шпулі адыгрывае ролю паўночнага полюса (лініі магнітнай індукцыі выходзяць з яго). Абапіраючыся на закон захавання энергіі, можна прадказаць, у якіх выпадках шпуля будзе прыцягваць магніт, а ў якіх — адштурхваць яго.

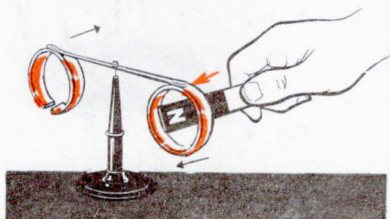
Узаемадзеянне індукцыйнага току з магнітам. Калі магніт набліжаецца да шпулі, то ў ёй з'яўляецца індукцыйны ток такога напрамку, што магніт абавязкова адштурхваецца. Для збліжэння магніта і шпулі трэба выканаць дадатную работу. Шпуля становіцца падобнай да магніта, звернутага аднайменным полюсам да магніта, які да яе набліжаецца. Аднайменныя ж полюсы адштурхваюцца.

Уявіце сабе, што ўсё было наадварот. Вы падсунулі магніт да шпулі, і ён сам сабой накіраваўся б унутр яе. Пры гэтым парушыўся б закон захавання энергіі. Бо кінетычная энергія магніта павялічвалася б і адначасова ўзнікаў бы ток, для чаго неабходна затрата энергіі. Кінетычная энергія магніта і энергія току ўзніклі б з нічога, без затраты энергіі. Пры аддаленні магніта, наадварот, у адпаведнасці з законам захавання энергіі патрабуецца, каб з'явілася сіла прыцяжэння.

Справядлівасць гэтага вываду можна прадэманстраваць пры дапамозе прыбора, паказанага на рысунку 5. На канцах стрыжня, які свабодна верціцца вакол вертыкальнай восі, замацаваны два праводзячыя алюмініевыя кольца. Адно з іх з разрэ-

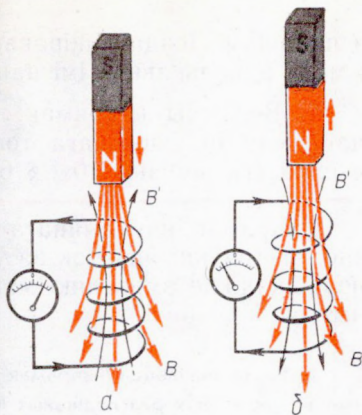
зам. Калі паднесці магніт да кольца без разрэзу, то ў ім узнікне індукцыйны ток і накіраваны ён будзе так, што кольца адштурхнецца ад магніта і стрыжань павярнецца. Калі аддаляць магніт ад кольца, то яно, наадварот, прыцягнецца да магніта. З разрэзаным кольцам магніт не ўзаемадзейнічае, таму што разрэз перашкаджае ўзнікненню ў кольцы індукцыйнага току. Адштурхвае

Рыс. 5



або прыцягвае шпуля магніт — гэта залежыць ад напрамку індукцыйнага току ў ёй. Таму закон захавання энергіі дазваляе сфармуляваць правіла, якое вызначае напрамак індукцыйнага току.

У чым заключаецца адрозненне двух доследаў: набліжэнне магніта да шпулі і яго аддаленне? У першым выпадку лік ліній магнітнай індукцыі, што пранізваюць віткі шпулі, або, што тое ж самае, магнітны паток, павялічваецца (рыс. 6, а), а ў другім выпадку — памяншаецца (рыс. 6, б). Прычым у першым выпадку лініі індукцыі B' магнітнага поля, створанага ўзніклым у шпулі індукцыйным токам, выходзяць з верхняга канца шпулі, паколькі шпуля адштурхвае магніт, а ў другім выпадку, наадварот, уваходзяць у гэты канец. Гэтыя лініі магнітнай індукцыі на рысунку 6 паказаны пункцірам.



Рыс. 6

Правіла Ленца. Цяпер мы падышлі да галоўнага: пры павелічэнні магнітнага патоку праз віткі шпулі індукцыйны ток мае такі напрамак, што ўтвараемае ім магнітнае поле перашкаджае нарастанню магнітнага патоку праз віткі шпулі, бо лініі індукцыі $\vec{B}'$ гэтага поля накіраваны супраць ліній індукцыі $\vec{B}$ поля, змяненне якога параджае электрычны ток. Калі ж магнітны паток праз шпулю слабее, то індукцыйны ток стварае магнітнае поле з індукцыяй $\vec{B}'$, якое павялічвае магнітны паток праз віткі шпулі.

У гэтым заключаецца сутнасць агульнага правіла вызначэння напрамку індукцыйнага току, якое прымяняецца ва ўсіх выпадках. Гэта правіла было ўстаноўлена рускім фізікам Э. Х. Ленцам.

Згодна з правіламі Ленца *індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым контуры, процідейнічае таму змяненню магнітнага патоку, якім ён выкліканы.*

Прымяняць правіла Ленца для знаходжання напрамку індукцыйнага току I_i ў контуры трэба так:

1. Вызначыць напрамак ліній магнітнай індукцыі $\vec{B}$ знешняга магнітнага поля.
2. Высветліць, ці павялічваецца паток магнітнай індукцыі гэтага поля праз паверхню, абмежаваную контурам ($\Delta\Phi > 0$), ці памяншаецца ($\Delta\Phi < 0$).
3. Вызначыць напрамак ліній магнітнай індукцыі $\vec{B}'$ магнітнага поля індукцыйнага току I_i . Гэтыя лініі павінны быць згодна

з правилами Ленца накіраны процілегла лініям $\vec{B}$ пры $\Delta\Phi > 0$ і мець аднолькавы з імі напрамак пры $\Delta\Phi < 0$.

4. Ведаючы напрамак ліній магнітнай індукцыі $\vec{B}'$, знайсці напрамак індукцыйнага току I_i , карыстаючыся правіламі свяр-дзелка (гл. «Фізіка-10», § 61).

Напрамак індукцыйнага току вызначаецца законам захавання энергіі. Індукцыйны ток ва ўсіх выпадках сваім магнітным полем перашкаджае змяненню магнітнага патоку, які выклікае дадзены ток.

1. Як вызначаецца напрамак індукцыйнага току? 2. Як накіраны індукцыйны ток ва ўсіх разгледжаных вышэй прыкладах?

§ 4. ЗАКОН ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЙ ІНДУКЦЫІ

Сфармулюем закон электрамагнітнай індукцыі колькасна. Доследы Фарадэя паказалі, што сіла індукцыйнага току I_i ў праводзячым контуры прапарцыянальная скорасці змянення ліку ліній магнітнай індукцыі B , якія пранізваюць паверхню, абмежаваную гэтым контурам. Больш дакладна гэта сцверджанне можна сфармуляваць, выкарыстаўшы паняцце «магнітны паток».

Магнітны паток наглядна вытлумачваецца як лік ліній магнітнай індукцыі, якія пранізваюць паверхню плошчай S . Таму скорасць змянення гэтага ліку ёсць не што іншае, як скорасць змянення магнітнага патоку.

Калі за кароткі час Δt магнітны паток мяняецца на $\Delta\Phi$, то скорасць змянення магнітнага патоку роўна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Таму сцверджанне, якое вынікае непасрэдна з доследу, можна сфармуляваць так: *сіла індукцыйнага току прапарцыянальная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам:*

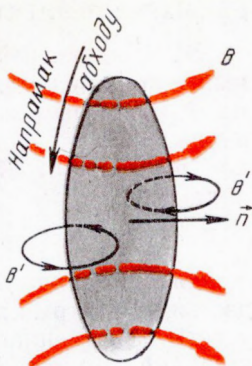
$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.3)$$

ЭРС індукцыі. Вядома, што ў ланцугу з'яўляецца электрычны ток у тым выпадку, калі на свабодныя зарады правадніка дзейнічаюць пабочныя сілы. Работу гэтых сіл пры перамяшчэнні адзінкавага дадатнага зараду ўздоўж замкнутага контуру называюць электрарухаючай сілай. Значыць, пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, у апошнім з'яўляюцца пабочныя сілы, дзеянне якіх характарызуецца ЭРС, названай *ЭРС індукцыі*. Абазначаюць яе літарай $\mathcal{E}_i$.

Згодна з законам Ома для замкнутага ланцуга $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$. Супраціўленне правадніка не залежыць ад змянення магнітнага

потоку. Значить, суадносіна (1.3) справяд-
лівая толькі таму, што ЭРС індукцыі пра-
парцыянальная $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Закон электрамагнітнай індукцыі. Закон электрамагнітнай індукцыі фармулюецца іменна для ЭРС, а не для сілы току. Пры такой фармулёўцы закон выражае сутнасць з'явы, не залежачай ад уласцівасцей праваднікоў, у якіх узнікае індукцыйны ток. Згодна з законам электрамагнітнай індукцыі **ЭРС індукцыі ў замкнутым контуры роўна па модулю скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам:**



Рыс. 7

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Як у законе электрамагнітнай індукцыі ўлічыць напрамак індукцыйнага току (або знак ЭРС індукцыі) ў адпаведнасці з правілам Ленца?

На рысунку 7 паказаны замкнуты контур. Будзем лічыць дадатным напрамак абходу контуру супраць гадзіннікавай стрэлкі. Нармаль да контуру $\vec{n}$ утварае правую шрубавую з напрамкам абходу.

Няхай магнітная індукцыя $\vec{B}$ знешняга магнітнага поля накіравана ўздоўж нармалі да контуру і ўзрастае з часам.

Тады $\Phi > 0$ і $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.

Згодна з правілам Ленца індукцыйны ток стварае магнітны паток $\Phi' < 0$. Лініі індукцыі B' магнітнага поля індукцыйнага току паказаны на рысунку 7 чорным колерам. Такім чынам, індукцыйны ток I_i згодна з правілам свядзёлка, накіраваны па гадзіннікавай стрэлцы (супраць напрамку дадатнага абходу) і ЭРС індукцыі адмоўная. Таму ў законе электрамагнітнай індукцыі павінен стаяць знак «мінус», які паказвае на тое, што $\mathcal{E}_i$ і $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ маюць розныя знакі:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

Трэба запомніць закон электрамагнітнай індукцыі (1.4), разумець, што такое ЭРС індукцыі і магнітны паток.

! 1. Што называецца магнітным патокам (патокам магнітнай індукцыі)? 2. Чаму закон электрамагнітнай індукцыі фармулюецца для ЭРС, а не для сілы току? 3. Як фармулюецца закон электрамагнітнай індукцыі? 4. Чаму ў законе электрамагнітнай індукцыі стаіць знак «мінус»?

§ 5. ВІХРАВОЕ ЭЛЕКТРЫЧНАЕ ПОЛЕ

ЭРС індукцыі ўзнікае або ў нерухомым правадніку, змешчаным у поле, якое мяняецца ў часе, або ў правадніку, што рухаецца ў магнітным полі, якое можа і не мяняцца з часам. Значэнне ЭРС у абодвух выпадках вызначаецца законам (1.4), але паходжанне ЭРС рознае. Разгледзім спачатку першы выпадак.

Няхай перад намі стаіць трансфарматар — дзве шпулі, надзетыя на стрыжань (рыс. 8). Уключыўшы адну з абмотак у сетку пераменнага току, мы атрымаем ток у другой абмотцы, калі яна замкнутая. Электроны ў правадах другаснай абмоткі прыйдуць у рух. Але якія сілы прымушаюць іх рухацца? Само магнітнае поле, якое пранізвае шпулю, гэтага зрабіць не можа, паколькі магнітнае поле дзейнічае выключна на зарады, якія рухаюцца (гэтым яно і адрозніваецца ад электрычнага), а праваднік з электронамі, што ў ім знаходзяцца, нерухомы.

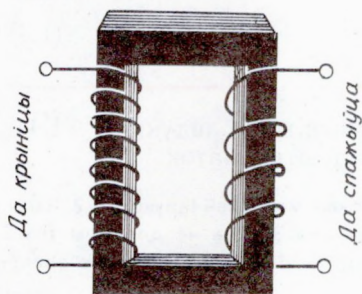
Акрамя магнітнага поля, на зарады, прычым як на тыя, што рухаюцца, так і на нерухомыя, дзейнічае яшчэ поле электрычнае. Але ж тыя палі, аб якіх пакуль ішла размова (электрастатычнае або стацыянарнае), ствараюцца электрычнымі зарадамі, а індукцыйны ток з'яўляецца ў выніку дзеяння пераменнага магнітнага поля. Гэта прымушае дапусціць, што электроны ў нерухомым правадніку прыводзяцца ў рух электрычным полем і гэта поле непасрэдна параджаецца пераменным магнітным полем. Тым самым сцвярджаецца новая фундаментальная ўласцівасць поля: **змяняючыся ў часе, магнітнае поле параджае электрычнае поле**. Да гэтага вываду ўпершыню прыйшоў Дж. Максвел.

Цяпер з'ява электрамагнітнай індукцыі паўстае перад намі ў новым святле. Галоўнае ў ёй — гэта працэс параджэння магнітным полем поля электрычнага. Пры гэтым наяўнасць праводзячага контуру, напрыклад шпулі, не мяняе сутнасці справы. Праваднік з запасам свабодных электронаў (або іншых часціц)

толькі дазваляе выявіць узнікаючае электрычнае поле. Поле прыводзіць у рух электроны ў правадніку і тым самым выяўляе сябе. Сутнасць з'явы электрамагнітнай індукцыі ў нерухомым правадніку заключаецца не столькі ў з'яўленні індукцыйнага току, колькі ва ўзнікненні электрычнага поля, якое прыводзіць у рух электрычныя зарады.

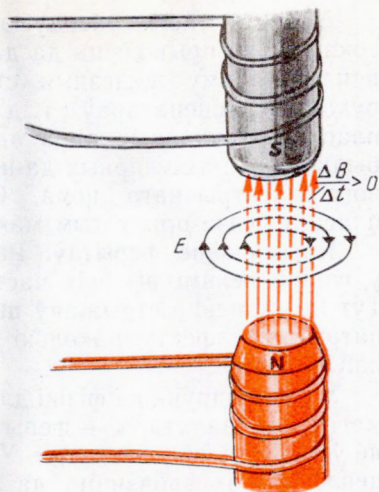
Электрычнае поле, якое ўзнікае пры змяненні магнітнага поля, мае зусім іншую структуру, чым элек-

Рыс. 8



трастатычнае. Яно не звязана непасрэдна з электрычнымі зарадамі, і яго лініі напружанасці не могуць на іх пачынацца і канчацца. Яны наогул нідзе не пачынаюцца і не канчаюцца, а ўяўляюць сабой замкнутыя лініі, падобныя да ліній індукцый магнітнага поля. Гэта так званае *віхравое электрычнае поле* (рыс. 9).

Чым хутчэй мяняецца магнітная індукцыя, тым большая напружанасць электрычнага поля. У адпаведнасці з правілам Ленца пры ўзрастанні магнітнай індукцыі ($\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$) напрамак вектара на-



Рыс. 9

пружання $\vec{E}$ электрычнага поля ўтварае левую шрубавую напрамку

$\vec{B}$. Гэта азначае, што пры вярчэнні шрубы з левай нарэзкай у напрамку ліній напружанасці электрычнага поля паступальнае перамяшчэнне шрубы супадае з напрамкам вектара магнітнай індукцыі (гл. рыс. 9). Наадварот, пры ўбыванні магнітнай індукцыі ($\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0$) напрамак вектара напружанасці $\vec{E}$ ўтварае правую шрубавую напрамку вектара $\vec{B}$.

Напрамак сілавых ліній напружанасці $\vec{E}$ супадае з напрамкам індукцыйнага току. Сіла, якая дзейнічае з боку віхравага электрычнага поля на зарад q (пабочная сіла) па-ранейшаму роўна: $\vec{F} = q\vec{E}$. Але ў адрозненне ад стацыянарнага электрычнага поля работа віхравага поля на замкнутым шляху не роўна нулю. Бо пры перамяшчэнні зараду ўздоўж замкнутай лініі напружанасці электрычнага поля (гл. рыс. 9) работа на ўсіх участках шляху мае адзін і той жа знак, паколькі сіла і перамяшчэнне супадаюць па напрамку. *Работа віхравага электрычнага поля пры перамяшчэнні адзінкавага дадатнага зараду ўздоўж замкнутага нерухомага правадніка колькасца роўна ЭРС індукцый ў гэтым правадніку.*

Індукцыйныя токі ў масіўных правадніках. Асабліва вялікай велічыні індукцыйныя токі дасягаюць у масіўных правадніках, з-за таго, што іх супраціўленне малое.

Гэтыя токі, якія называюцца *токамі Фуко* па імені даследаваўшага іх французскага фізіка, можна выкарыстаць для награвання праваднікоў. На гэтым прынцыпе заснавана будова індукцыйных печыў. Асабліва шырокае прымяненне гэтых печы атрымалі для плаўлення металаў у вакууме.

Аднак у многіх распаўсюджаных прыстасаваннях узнікненне токаў Фуко прыводзіць да дарэмных страт энергіі на вылучэнне цеплыні. Таму жалезныя стрыжні трансфарматараў, электрухавікоў, генератараў і г. д. робяць не суцэльнымі, а з асобных пласцін, ізаляваных адна ад адной. Паверхні пласцін павінны быць перпендыкулярныя да напрамку вектара напружання віхравога электрычнага поля. Супраціўленне электрычнаму току пласцін будзе пры гэтым максімальным.

Прымяненне ферытаў. Радыёэлектронная апаратура працуе ў галіне вельмі высокіх частот (мільёны ваганняў у секунду). Тут прымяненне стрыжняў шпуль з асобных пласцін ужо не дае патрэбнага эфекту, паколькі вялікія токі Фуко ўзнікаюць у кожнай пласціне.

У § 66 падручніка фізікі для X класа адзначалася, што існуюць магнітныя ізалятары — ферыты. Пры перамагнічванні ў ферытах не ўзнікаюць віхравыя токі. У выніку страты энергіі на вылучэнне цеплыні ў іх зводзяцца да мінімуму. Таму з ферытаў робяць стрыжні высокачастотных трансфарматараў, магнітныя антэны транзістараў і інш. Ферытавыя стрыжні вырабляюць з сумесі парашкоў зыходных рэчываў. Сумесь прасуюць і тэрмічна апрацоўваюць.

Вельмі істотна, акрамя таго, пры хуткім змяненні магнітнага поля ў звычайным ферамagnетыку ўзнікаюць індукцыйныя токі, магнітнае поле якіх па правілу Ленца перашкаджае змяненню магнітнага патоку ў стрыжні шпульі. З-за гэтага патак магнітнай індукцыі практычна не мяняецца і стрыжань не перамагнічваецца. У ферытах віхравыя токі вельмі малыя, і таму іх можна вельмі хутка перамагнічваць.

Разам з патэнцыяльным кулонаўскім электрычным полем існуе віхравое электрычнае поле. Лініі напружанасці гэтага поля замкнутыя. Віхравое поле параджаецца пераменным магнітным полем.

! 1. Якая прырода пабочнай сілы, што выклікае з'яўленне індукцыйнага току ў нерухомым правадніку? 2. У чым адрозненне віхравога электрычнага поля ад электростатычнага ці стацыянарнага? 3. Што такое токі Фуко? 4. У чым заключаюцца перавагі ферытаў у параўнанні са звычайнымі ферамagnетыкамі?

§ 6. ЭРС ІНДУКЦЫІ Ў ПРАВАДНІКАХ, ЯКІЯ РУХАЮЦА

Калі праваднік рухаецца ў пастаянным у часе магнітным полі, то ЭРС індукцыі ў правадніку абумоўлена не віхравым электрычным полем, якое ў гэтым выпадку не можа ўзнікнуць, а іншай прычынай.

Пры руху правадніка яго свабодныя зарады рухаюцца разам з ім. Таму на зарады з боку магнітнага поля дзейнічае сіла

Лоренца. Яна ж і выклікае перамяшчэнне зарадаў унутры правадніка. ЭРС індукцыі, такім чынам, мае «магнітнае паходжанне».

На многіх электрастанцыях зямнога шара менавіта сіла Лорэнца выклікае перамяшчэнне электронаў у правадніках, якія рухаюцца.

Вылічым ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў прамавугольным контуры, што рухаецца ў аднародным магнітным полі (рыс. 10). Няхай старана контуру MN даўжынёй l слізгаець з пастаяннай скорасцю $\vec{v}$ уздоўж старон NC і MD , застаючыся ўвесь час паралельнай старане CD . Вектар магнітнай індукцыі $\vec{B}$ аднароднага поля перпендыкулярны правадніку і складае вугал α з напрамкам яго скорасці.

Сіла, з якой магнітнае поле дзейнічае на зараджаную часціцу, што рухаецца (гл. § 65 «Фізіка-10»), роўна па модулю:

$$F_L = |q|vB \sin \alpha. \quad (1.5)$$

Накіравана гэта сіла ўздоўж правадніка MN . Работа сілы Лорэнца на шляху l дадатная і складае¹:

$$A = F_L l = |q|vBl \sin \alpha.$$

Электрарухаючая сіла індукцыі ў правадніку MN роўна па азначэнню адносіне работы па перамяшчэнню зараду q да гэтага зараду:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{|q|} = vBl \sin \alpha. \quad (1.6)$$

Гэта формула справядлівая для любога правадніка даўжынёй l , які рухаецца са скорасцю $\vec{v}$ у аднародным магнітным полі.

У іншых правадніках контуру ЭРС роўна нулю, паколькі праваднікі нерухомыя. Такім чынам, ЭРС ва ўсім контуры $MNCD$ роўна $\mathcal{E}_i$ і застаецца нязменнай, калі скорасць руху $\vec{v}$ пастаянная. Электрычны ток пры гэтым будзе павялічвацца, паколькі пры зрушэнні правадніка MN управа памяншаецца агульнае супраціўленне контуру.

З другога боку, ЭРС індукцыі можна вылічыць з дапамогай

¹ Гэта няпоўная работа сілы Лорэнца. Акрамя сілы Лорэнца (1.5), маецца састаўляючая сілы Лорэнца, накіраваная супраць скорасці правадніка $\vec{v}$. Гэта састаўляючая тармозіць праваднік і выконвае адмоўную работу. У рэзультате поўная работа сілы Лорэнца аказваецца роўнай нулю.

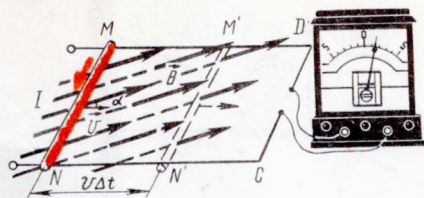


Рис. 10

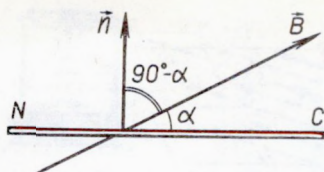


Рис. 11

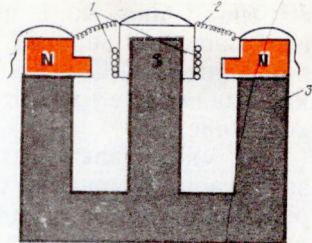


Рис. 12

закону електромагнітної індукції (1.4). Сапраўды, магнітны паток праз контур $MNCD$ роўны:

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \alpha) = BS \sin \alpha,$$

дзе вугал $90^\circ - \alpha$ ёсць вугал паміж вектарам $\vec{B}$ і нармаллю $\vec{n}$ да паверхні контуру (рыс. 11), а S — плошча контуру $MNCD$. Калі лічыць, што ў пачатковы момант часу ($t=0$) праваднік MN знаходзіцца на адлегласці NC ад правадніка CD (гл. рыс. 10), то пры перамяшчэнні правадніка плошча S змяняецца з часам наступным чынам:

$$S = l(NC - vt).$$

За час Δt плошча контуру мяняецца на $\Delta S = -lv\Delta t$. Знак «мінус» паказвае на тое, што яна памяншаецца. Змяненне магнітнага патоку за гэты час роўна: $\Delta\Phi = -Blv\Delta t \sin \alpha$.

Значыць,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \sin \alpha.$$

Калі ўвесь контур $MNCD$ рухаецца ў аднародным магнітным полі, захоўваючы сваю арыентацыю ў адносінах да вектара $\vec{B}$, то ЭРС індукцыі ў контуры будзе роўна нулю, паколькі паток Φ праз плошчу, абмежаваную контурам, не мяняецца. Вытлумачыць гэта можна так. Пры руху контуру ў правадніках MN і CD узнікаюць сілы (1.5), дзеючыя на электроны ў напрамках ад N да M і ад C да D . Сумарная работа гэтых сіл пры абходзе контуру па гадзіннікавай стрэлцы ці супраць яе роўна нулю.

ЭРС індукцыі ў правадніках, якія рухаюцца ў пастаянным магнітным полі, узнікае за кошт дзеяння на свабодныя зарады правадніка сілы Лорэнца.



1. Чаму роўна сіла Лорэнца і як яна накіравана? 2. Ад чаго залежыць ЭРС індукцыі, што ўзнікае ў правадніку, які рухаецца ў пераменным у часе магнітным полі?

§ 7. ЕЛЕКТРАДИНАМІЧНЫ МІКРАФОН

У X класе вы пазнаёміліся з электрадынамічным гучнагаварыцелем, які пераўтварае ваганні электрычнага току ў гукавыя ваганні. Адваротны працэс ператварэння гукавых ваганняў паветра ў ваганні электрычнага току ажыццяўляецца з дапамогай мікрафона¹.

Мікрафоны шырока прымяняюцца ў радыёвяшчанні, тэлебачанні, сістэмах узмацнення гуку і гуказапісу, для тэлефоннай сувязі.

Дзеянне аднаго з самых распаўсюджаных мікрафонаў — электрадынамічнага — заснавана на электрамагнітнай індукцыі. Гэты мікрафон зроблены наступным чынам. Дыяфрагма 2 з тонкай полістыролавай плёнкі ці алюмініевай фольгі, жорстка звязана з гукавой шпуляй 1 з тонкага дроту (рыс. 12). Шпуля змяшчаецца ў кольцавым зазоре моцнага пастаяннага магніта 3. Лініі магнітнай індукцыі перпендыкулярныя да плоскасці віткаў шпулі.

Гукавая хваля выклікае ваганні дыяфрагмы і звязанай з ёю шпулі. Віткі шпулі рухаюцца ў магнітным полі, і ў іх узнікае пераменная ЭРС індукцыі. У рэзультате на заціскачках шпулі з'яўляецца пераменнае напружанне, якое выклікае ваганні электрычнага току ў ланцугу мікрафона. Гэтыя ваганні пасля ўзмацнення могуць быць пададзены на гучнагаварыцель, запісаны на магнітнай стужцы і г. д.

Электрадынамічныя мікрафоны простыя па канструкцыі, маюць невялікія габарыты і надзейныя ў эксплуатацыі. Скажэнні ваганняў, якія пераўтвараюцца, у інтэрвале частот ад 50 да 10 000 Гц невялікія.

У тэлефонных апаратах прымяняюць менш дасканалыя, але больш танныя вугальныя мікрафоны. Дыяфрагма ў такіх мікрафонах дзейнічае на вугальны парашок і стварае ў ім перыядычныя сцісканні і разрэджванні. Ад гэтага мяняецца супраціўленне парашку і сіла току ў электрычным ланцугу мікрафона. Існуюць і іншыя тыпы мікрафонаў.

У гучнагаварыцелі сіла Ампера выклікае ваганні шпулі і звязанай з ёю дыяфрагмы.

У мікрафоне ваганні дыяфрагмы перадаюцца рухомай шпулі, і ў ёй узнікае індукцыйны ток.

? Ці можна выкарыстаць у якасці адчувальнага элемента мікрафона адну з абкладак кандэнсатара, што вагаецца пад дзеяннем гукавой хвалі?

¹ Ад грэчаскіх слоў: *мікрас* — малы, *фоне* — гук.

§ 8. САМАІНДУКЦЫЯ. ІНДУКТЫЎНАСЦЬ

Калі па шпулі ідзе пераменны ток, то магнітны паток, што пранізвае катушку, мяняецца. Таму ўзнікае ЭРС індукцыі ў тым жа самым правадніку, па якому ідзе пераменны ток. Гэту з'яву называюць самаіндукцыяй.

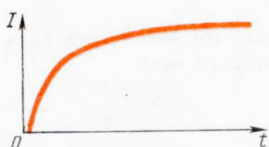
Самаіндукцыя. Пры самаіндукцыі праводзячы контур адыгрывае дваякую ролю: па ім праходзіць ток, які выклікае індукцыю, і ў ім жа з'яўляецца ЭРС індукцыі $\mathcal{E}_{is}$. Па правілу Ленца ў момант нарастання току напружанне віхравога электрычнага поля накіравана супраць току. Значыць, у той момант віхравое поле перашкаджае нарастанню току. Наадварот, у момант памяншэння току віхравое поле падтрымлівае яго.

Гэта прыводзіць да таго, што пры замыканні ланцуга, які змяшчае крыніцу пастаяннай ЭРС, пэўнае значэнне сілы току вызначаецца не адразу, а паступова, з цягам часу (рыс. 13). З другога боку, пры адключэнні крыніцы ток у замкнутых контурах спыняецца не імгненна. Узнікаючая пры гэтым ЭРС самаіндукцыі можа перавышаць ЭРС крыніцы, паколькі змяненне току і яго магнітнага поля пры адключэнні крыніцы адбываецца вельмі хутка.

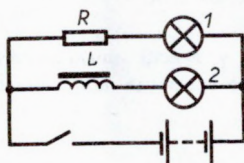
З'яву самаіндукцыі можна назіраць на простых доследах. На рысунку 14 паказана схема паралельнага злучэння дзвюх аднолькавых лямп. Адну з іх падключаюць да крыніцы праз рэзістар R , а другую — паслядоўна са шпуляй L з жалезным стрыжнем.

Пры замыканні ключа першая лямпа ўспыхвае практычна адразу, а другая — з прыметным спазненнем. ЭРС самаіндукцыі ў ланцугу гэтай лямпы вялікая, а сіла току не адразу дасягае свайго максімальнага значэння.

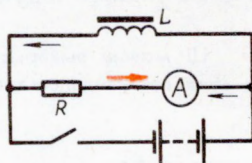
З'яўленне ЭРС самаіндукцыі пры размыканні можна назіраць на доследзе з ланцугом, што схематычна паказаны на рысунку 15. Пры размыканні ключа ў шпулі L узнікае ЭРС самаіндукцыі, якая падтрымлівае першапачатковы ток. У выніку ў момант размыкання праз гальванометр ідзе ток (каляровая стрэлка), накіраваны супраць пачатковага току да размыкання (чорная стрэлка). Сіла току пры размыканні ланцуга можа перавышаць сілу току, што праходзіць праз гальванометр пры замкнутым



Рыс. 13



Рыс. 14



Рыс. 15

ключи. Гэта азначае, што ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_{is}$ большая за ЭРС $\mathcal{E}$ батарэі элементаў.

Аналогія паміж індукцыяй і інерцыяй. З'ява самаіндукцыі падобна да з'явы інерцыі ў механіцы. Так, інерцыя прыводзіць да таго, што пад дзеяннем сілы цела не імгненна набывае пэўную скорасць, а паступова. Цела нельга імгненна затармазіць, якая б вялікая ні была тармазячая сіла. Дакладна таксама за кошт самаіндукцыі пры замыканні ланцуга сіла току не адразу набывае пэўнае значэнне, а нарастае паступова. Выключаючы крыніцу, мы не спыняем ток адразу. Самаіндукцыя яго падтрымлівае некаторы час, нягледзячы на супраціўленне ланцуга.

Далей, каб павялічыць скорасць цела, згодна з законамі механікі трэба выканаць работу. Пры тармажэнні цела само выконвае работу. Дакладна таксама для стварэння току трэба выканаць работу супраць віхравога электрычнага поля, а пры знікненні току гэта поле выконвае дадатную работу.

Індуктыўнасць. Модуль B вектара індукцыі магнітнага поля, якое ствараецца токам, прапарцыянальны сіле току. Паколькі магнітны паток Φ прапарцыянальны B , то $\Phi \sim B \sim I$. Можна, такім чынам, сцвярджаць, што

$$\Phi = LI, \quad (1.7)$$

дзе L — каэфіцыент прапарцыянальнасці паміж токам у праводзячым контуры і магнітным патокам, які пранізвае гэты контур. Велічыню L называюць *індуктыўнасцю контуру* або яго *каэфіцыентам самаіндукцыі*.

Скарыстоўваючы закон электрамагнітнай індукцыі і выраз (1.7), атрымаем роўнасць

$$\mathcal{E}_{is} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (1.8)$$

калі лічыць, што форма контуру застаецца нязменнай і паток мяняецца толькі за кошт змянення сілы току.

З формулы (1.8) вынікае, што *індуктыўнасць — гэта фізічная велічыня, лікава роўная ЭРС самаіндукцыі, узнікаючай у контуры пры змяненні сілы току на 1 А за 1 с*.

Індуктыўнасць, падобна да электраёмкасці, залежыць ад геаметрычных фактараў: ад размераў правадніка і яго формы, але не залежыць непасрэдна ад сілы току ў правадніку. Акрамя геаметрыі правадніка, індуктыўнасць залежыць ад магнітных уласцівасцей асяроддзя, у якім знаходзіцца праваднік.

Адзінку індуктыўнасці ў СІ называюць генры (абазначаецца Гн). *Індуктыўнасць правадніка роўна 1 Гн, калі ў ім пры змяненні сілы току на 1 А за 1 с узнікае ЭРС самаіндукцыі 1 В:*

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \frac{\text{А}}{\text{с}}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

З'ява самаіндукцыі адыгрывае вельмі важную ролю ў электратэхніцы і радыётэхніцы. Індуктыўнасць ланцуга аказвае істотны ўплыў на праходжанне па ланцугу пераменнага электрычнага току. Падрабязна аб гэтым будзе расказана ў раздзеле 2.

Пры змяненні сілы току ў правадніку ў апошнім узнікае віхравое электрычнае поле. Гэта поле тармозіць электроны пры ўзрастанні сілы току і паскарае пры ўбыванні.

1. Што называюць самаіндукцыяй? 2. Як накіраваны ў адносінах да току лініі напружання віхравага электрычнага поля ў правадніку пры павелічэнні і памяншэнні сілы току? 3. Што называюць індуктыўнасцю правадніка? 4. Што прымаюць за адзінку індукцыі СІ? 5. Чаму роўная ЭРС самаіндукцыі?

§ 9. ЭНЕРГІЯ МАГНІТНАГА ПОЛЯ ТОКУ

Знойдзем энергію, якой валодае электрычны ток у правадніку. Згодна з законам захавання энергіі энергія магнітнага поля, створанага токам, роўная той энергіі, якую павінна затраціць крыніца току (гальванічны элемент, генератар на электрастанцыі і інш.) на стварэнне току. Пры спыненні току гэта энергія вылучаецца ў той або іншай форме.

Высветлім, чаму ж для стварэння току неабходна затраціць энергію, г. зн. неабходна выканаць работу. Растлумачваецца гэта тым, што пры замыканні ланцуга, калі ток пачынае нарастаць, у правадніку з'яўляецца віхравое электрычнае поле, дзеючае супраць таго электрычнага поля, якое ствараецца ў правадніку дзякуючы крыніцы току. Для таго каб сіла току стала роўнай I , крыніца току павінна выканаць работу супраць сіл віхравага поля. Гэта работа ідзе на павелічэнне энергіі магнітнага поля току.

Пры размыканні ланцуга ток знікае і віхравое поле выконвае дадатную работу. Назапашаная токам энергія вылучаецца. Гэта выяўляецца па магутнай іскры, якая ўзнікае пры размыканні ланцуга з вялікай індуктыўнасцю.

Запісаць выраз для энергіі току I , які праходзіць па ланцугу з індуктыўнасцю L (г. зн. для энергіі магнітнага поля току), можна на аснове аналогіі паміж інерцыяй і самаіндукцыяй, аб якой гаварылася ў § 8.

Калі самаіндукцыя аналагічная інерцыі, то індуктыўнасць у працэсе стварэння току павінна адыгрываць тую ж ролю, што і маса пры павелічэнні цела ў механіцы. Ролю скорасці цела ў электрадынаміцы адыгрывае сіла току I як велічыня, што характарызуе рух электрычных зарадаў.

Калі гэта так, то энергію току W_m можна лічыць велічынёй,

падобнай да кінетычнай энергіі цела $\frac{mv^2}{2}$ у механіцы і запісаць у выглядзе

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (1.9)$$

Менавіта такі выраз для энергіі току і атрымліваецца ў выніку разлікаў.

Энергія току (1.9) выражана праз геаметрычную характарыстыку правадніка L і сілу току ў ім I . Але гэту ж энергію можна выразіць і праз характарыстыкі поля. Вылічэнні паказваюць, што шчыльнасць энергіі магнітнага поля (г. зн. энергія адзінкі аб'ёму) прапарцыянальная квадрату магнітнай індукцыі, падобна да таго як шчыльнасць энергіі электрычнага поля прапарцыянальная квадрату напружанасці электрычнага поля.

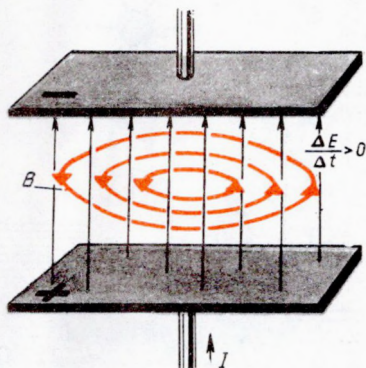
Магнітнае поле, створанае электрычным токам, валодае энергіяй, прама прапарцыянальнай квадрату сілы току.

? 1. Чаму для стварэння току крыніца павінна затраціць энергію? 2. Чаму роўна энергія электрычнага току?

§ 10. ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЕ ПОЛЕ

Вывучаючы ўласцівасці электрычнага поля, Максвел зацікавіўся пытаннем: калі пераменнае магнітнае поле параджае электрычнае поле, то ці не існуе ў прыродзе адваротнага працэсу? Ці не параджае пераменнае электрычнае поле ў сваю чаргу магнітнае? Гэта меркаванне, што ідзе ад разумення адзінства прыроды, унутранай стройнасці і гармоніі законаў прыроды, складае аснову гіпотэзы Максвела.

Узнікненне магнітнага поля пры змяненні электрычнага поля. Максвел дапусціў, што такога роду працэс рэальна адбываецца ў прыродзе. Ва ўсіх выпадках, калі электрычнае поле змяняецца часам, яно параджае магнітнае поле. Лініі магнітнай індукцыі гэтага поля ахопліваюць лініі напружанасці электрычнага поля (рыс. 16) падобна да таго, як лініі напружанасці электрычнага поля ахопліваюць лініі індукцыі пераменнага магнітнага поля. Але цяпер пры ўзрастанні напружанасці электрыч-



Рыс. 16

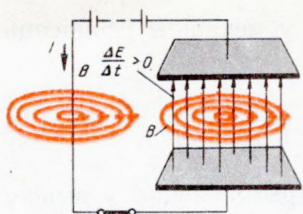


Рис. 17

нага поля ($\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$) напрамак вектора індукцыі $\vec{B}$ магнітнага поля, якое ўзнікае, утварае *правую шруб* з напрамак вектара $\vec{E}$.

Пры ўбыванні напружанасці электрычнага поля ($\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0$) напрамак вектара магнітнай індукцыі $\vec{B}$ утварае з напрамак вектара $\vec{E}$ *левую шруб*.

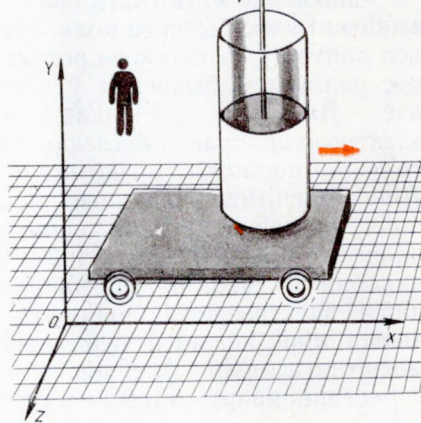
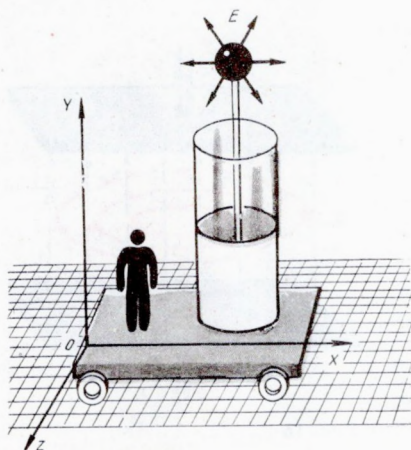
Згодна з гіпотэзай Максвела магнітнае поле, напрыклад, пры зарадцы кандэнсатара пасля замыкання ключа ствараецца не толькі токам у правадніку, але і электрычным полем, якое змяняецца і існуе ў прасторы паміж абкладкамі кандэнсатара (рис. 17). Прычым электрычнае поле, што змяняецца, стварае такое ж магнітнае поле, як калі б паміж абкладкамі існаваў электрычны ток, такі ж, як у правадніку. Справядлівасць гіпотэзы Максвела была даказана эксперыментальным выяўленнем электрамагнітных хваль. Электрамагнітныя хвалі існуюць толькі таму, што пераменнае магнітнае поле параджае пераменнае электрычнае поле, якое ў сваю чаргу параджае пераменнае магнітнае поле, і г. д.

Электрамагнітнае поле. Пасля адкрыцця ўзаемасувязі паміж электрычным і магнітным палямі, якія змяняюцца, стала зразумела, што гэтыя палі не існуюць адасоблена, незалежна адно ад аднаго.

Рис. 19



Рис. 18



Нельга ствараць пераменнае магнітнае поле без таго, каб адначасова ў прасторы не ўзнікла і электрычнае поле. І наадварот, пераменнае электрычнае поле не можа існаваць без магнітнага.

Не менш важна, што электрычнае поле без магнітнага або магнітнае без электрычнага могуць існаваць толькі ў адносінах да пэўнай сістэмы адліку. Так, зарад, які знаходзіцца ў спакоі, стварае толькі электрычнае поле (рыс. 18). Але ж зарад знаходзіцца ў спакоі толькі адносна пэўнай сістэмы адліку. Адносна іншых сістэм адліку ён можа рухацца і, значыць, ствараць і магнітнае поле (рыс. 19).

Зусім гэтак жа ў сістэме адліку, звязанай з магнітам, выяўляецца толькі магнітнае поле. Але назіральнік, які рухаецца адносна магніта, выявіць і электрычнае поле. Справа ў тым, што ў сістэме адліку, якая рухаецца адносна магніта, магнітнае поле будзе мяняцца з цягам часу па меры прыбліжэння назіральніка да магніта або аддалення ад яго. Пераменнае ж у часе магнітнае поле параджае віхравое электрычнае поле (з'ява электрамагнітнай індукцыі).

Значыць, *сцверджанне, што ў дадзеным пункце прасторы існуе толькі электрычнае або толькі магнітнае поле, не мае сэнсу, калі не паказаць, у адносінах да якой сістэмы адліку гэтыя палі разглядаюцца*. Адсутнасць электрычнага поля ў сістэме адліку, змяшчаючай магніт, які знаходзіцца ў спакоі, зусім не азначае, што электрычнага поля няма наогул. У адносінах да любой сістэмы адліку, якая рухаецца адносна магніта, гэта поле можа быць выяўлена.

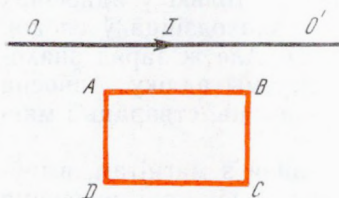
Электрычныя і магнітныя палі — праяўленне адзінага цэлага — *электрамагнітнага поля*. Электрамагнітнае поле — асобая форма матэрыі, якая ажыццяўляе ўзаемадзеянні паміж зараджанымі часціцамі. Яно існуе рэальна, г. зн. незалежна ад нас, ад нашых ведаў аб ім. Але ў залежнасці ад таго, у якой сістэме адліку разглядаюцца электрамагнітныя працэсы, праяўляюцца тыя ці іншыя бакі гэтага адзінага цэлага — электрамагнітнага поля. Усе інерцыяльныя сістэмы адліку раўнапраўныя. Таму ні аднаму з праяўленняў электрамагнітнага поля, што выяўляюцца, не можа быць аддадзена перавага.

Згодна з гіпотэзай Максвела пераменнае электрычнае поле параджае магнітнае поле. Электрамагнітнае поле — адзінае цэлае: у залежнасці ад сістэмы адліку праяўляюцца тыя ці іншыя ўласцівасці поля.

! 1. У выніку якіх працэсаў узнікае магнітнае поле? 2. Чаму сцверджанне аб тым, што ў дадзеным пункце прасторы існуе толькі электрычнае поле ці толькі магнітнае поле, не з'яўляецца цалкам бясспрэчным?

ПРЫКЛАДЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ

1. Прамавугольны контур $ABCD$ перамяшчаецца паступальна ў магнітным полі току, які працякае па прамалінейнаму доўгаму правадніку (рыс. 20). Вызначце напрамак току, індукцыраванага ў контуры, калі контур аддаляецца ад проваду. Якія сілы дзейнічаюць на контур?



Рыс. 20

Рашэнне. Вектар магнітнай

індукцыі $\vec{B}$ магнітнага поля току I накіраваны перпендыкулярна плоскасці контуру ад нас. Пры аддаленні контуру ад проваду магнітны паток праз пляцоўку $ABCD$ убывае ($\Delta\Phi < 0$). Значыць, вектар магніт-

най індукцыі $\vec{B}'$ магнітнага поля току I_i згодна з правілам Ленца

накіраваны ад нас, як і вектар $\vec{B}$. Прымяняючы правіла свярдзёлка, знойдзем, што індукцыйны ток у контуры накіраваны па гадзіннікавай стрэлцы.

Узаемадзеянне току ў контуры з прамалінейным токам прыводзіць да з'яўлення сіл, якія дзейнічаюць на праваднікі контуру. Прымяніўшы правіла левай рукі, можна высветліць, што гэтыя сілы, па-першае, расцягваюць рамку, імкнучыся павялічыць плошчу контуру, і, па-другое, ствараюць рэзультуючую сілу, накіраваную да прамалінейнага правадніка. Абодва дзеянні «імкнучца» перашкодзіць памяншэнню магнітнага патоку праз контур.

2. Кольца са звышправадніка змешчана ў аднароднае магнітнае поле, індукцыя якога нарастае ад нуля да B_0 . Плоскасць кольца перпендыкулярная да ліній індукцыі поля. Вызначце сілу індукцыйнага току, які ўзнікае ў кольцы. Радывус кольца роўны r , індуктывнасць L .

Рашэнне. Паколькі супраціўленне кольца роўна нулю, то сумарная электрарухаючая сіла ў ім павінна быць роўна нулю. Інакш сіла току згодна з законам Ома стане бесканечнай. Значыць, змяненне магнітнага патоку знешняга магнітнага поля роўнае па модулю і процілеглае па знаку змяненню магнітнага патоку, створанага індукцыйным токам: $\Delta\Phi = L\Delta I$. Улічваючы, што паток Φ_0 нарастае ад 0 да $\pi r^2 B_0$, а індукцыйны ток мяняецца пры гэтым ад 0 да I , атрымаем $\pi r^2 B_0 = LI$, адсюль

$$I = \frac{\pi r^2 B_0}{L}.$$

ПРАКТЫКАВАННЕ 1

1. Ключ (у схеме на рысунку 1, а) толькі што замкнулі. Ток у ніжняй шпулі накіраваны супраць гадзіннікавай стрэлкі, калі глядзець зверху. Які напрамак току ў верхняй шпулі пры ўмове, што яна нерухомая?

2. Магніт (рис. 2, б) висоювають са шпулі. Вызначце напрамак індукцыйнага току ў шпулі.

3. Вызначце напрамак індукцыйнага току ў суцэльным кольцы, да якога падносяць магніт (рис. 5).

4. Сіла току ў правадніку OO' (гл. рис. 20) убывае. Знайдзіце напрамак індукцыйнага току ў нерухомым контуры ABCD і напрамку сіл, якія дзейнічаюць на кожны з бакоў контуру.

5. Металічнае кольца можа свабодна рухацца па стрыжні шпулі, уключанай у ланцуг пастаяннага току (рис. 21). Што будзе адбывацца ў моманты замыкання і размыкання ланцуга?

6. Сіла току ў шпулі нарастае праме прапарцыянальна часу. Які характар залежнасці сілы току ад часу ў другой шпулі, індуктыўна звязанай з першай?

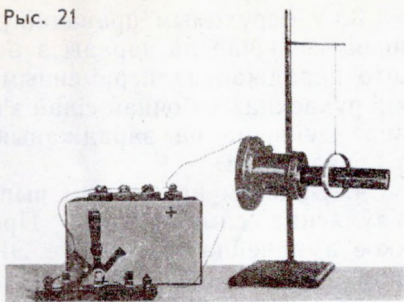
7. У якім выпадку ваганні стрэлкі магнітаэлектрычнага прыбора затухаюць хутчэй: калі клеммы прыбора замкнуты ці калі разамкнуты?

8. Магнітны патоk праз контур правадніка супраціўленнем $3 \cdot 10^{-2}$ Ом за 2 с змяніўся на $1,2 \cdot 10^{-2}$ Вб. Знайдзіце сілу току ў правадніку, калі змяненне патоку адбывалася раўнамерна.

9. Самалёт ляціць гарызантальна са скорасцю 900 км/г. Знайдзіце рознасць патэнцыялаў, што ўзнікае паміж канцамі яго крылаў, калі модуль вертыкальнай састаўляючай магнітнай індукцыі зямнога магнітнага поля $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а размах крылаў 12 м.

10. У шпулі індуктыўнасцю 0,15 Гн і вельмі малым супраціўленнем r сіла току роўна 4 А. Паралельна шпулі далучылі рэзістар супраціўленнем $R \gg r$. Якая колькасць цеплыні вылучыцца ў шпулі і ў рэзістары пасля хуткага адключэння крыніцы току?

Рис. 21



КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 1

Паспрабуйце спачатку самастойна вылучыць самае істотнае ў гэтым раздзеле. Запішыце яго вынікі. Вылучыце 6—8 пунктаў і параўнайце з тым, што напісана ніжэй. Вылучэнне галоўнага — неадназначная задача і таму разыходжанні непазбежныя.

1. З'ява электрамагнітнай індукцыі заключаецца ва ўзнікненні ЭРС індукцыі ў замкнутым контуры пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам. Гэта з'ява ляжыць у аснове работы генератараў усіх электрастанцый свету. Згодна з законам электрамагнітнай індукцыі ЭРС індукцыі ў замкнутым контуры роўна скорасці змянення магнітнага патоку, узятай са знакам «мінус»:

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

2. Згодна з правілам Ленца індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым контуры, сваім магнітным полем процідзейнічае таму змяненню магнітнага патоку, якім ён выкліканы.

3. У нерухомым правадніку пабочнай сілай з'яўляецца сіла, якая дзейнічае на зарады з боку віхравога электрычнага поля, што параджаецца пераменным магнітным полем. У правадніку, які рухаецца, пабочнай сілай з'яўляецца магнітная сіла Лорэнца; яна дзейнічае на зараджаныя часціцы, што рухаюцца разам з правадніком.

4. Важным прыватным выпадкам электрамагнітнай індукцыі з'яўляецца самаіндукцыя. Пры самаіндукцыі магнітнае поле, якое змяняецца, індцыруе ЭРС у тым самым правадніку, па якім ідзе ток, што стварае гэта поле. ЭРС самаіндукцыі прама прапарцыянальная скорасці змянення сілы току ў правадніку:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

5. Каэфіцыент прапарцыянальнасці L называюць індуктыўнасцю. Індуктыўнасць залежыць ад размераў і формы правадніка, а таксама ад уласцівасцей асяроддзя, у якім знаходзіцца праваднік. Выражаецца яна ў генры: $1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$

6. Энергія магнітнага поля току роўна той рабоце, якую павінна выканаць крыніца, каб стварыць дадзены ток:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

7. Пры аналізе з'явы электрамагнітнай індукцыі Максвелам быў зроблены вывад аб параджэнні віхравога электрычнага поля пераменным магнітным полем. Затым Максвел дапусціў, што аналагічным чынам пераменнае электрычнае поле параджае віхравое магнітнае поле.



ВАГАННІ І ХВАЛІ

Раздзел 2. Электрамагнітныя ваганні

Раздзел 3. Вытворчасць, перадача
і выкарыстанне электрычнай энергіі

Раздзел 4. Электрамагнітныя хвалі

Адкрыццё электрамагнітнай індукцыі паглыбіла нашы ўяўленні аб электрамагнітным полі. Але справа не толькі ў гэтым. Дзякуючы самаіндукцыі магчымы ваганні зараду, сілы току і іншых велічынь, якія характарызуюць электрычныя ланцугі. Гэтыя ваганні называюцца электрамагнітнымі і маюць многа агульнага з механічнымі ваганнямі, якія вы вывучалі ў IX класе.

Здавалася б, ваганні маятніка нічым не нагадваюць разрад кандэнсатара праз шпулю індуктывнасці. Аднак у сапраўднасці гэта не так. Механічныя і электрамагнітныя ваганні падпарадкоўваюцца зусім аднолькавым колькасным законам. Гэта выяўляецца, калі цікавіцца не тым, што вагаецца (груз на sprужыне ці электрычны ток у ланцугу), а тым, як адбываюцца ваганні. Аднолькавым законам падпарадкоўваюцца таксама хвалевыя працэсы рознай прыроды. У сучаснай фізіцы вылучыўся спецыяльны раздзел — фізіка ваганняў. У ім ваганні рознай прыроды разглядаюцца з адзінага пункту гледжання. Фізіка ваганняў мае вельмі вялікае практычнае значэнне. Яна займаецца даследаваннем вібрацый машын і механізмаў; яе вывады ляжаць у аснове электратэхнікі пераменных токаў і радыётэхнікі.

Раздзел 2

ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ВАГАННІ

У гэтым раздзеле мы ў асноўным будзем разглядаць электрамагнітныя ваганні. Прычым на больш высокім навуковым узроўні, чым механічныя ваганні ў IX класе. Неабходныя веды па матэматыцы цяпер у вас ёсць. Але давядзецца закрануць і ваганні механічныя з тым, каб падкрэсліць адзінства вагальных працэсаў рознай прыроды.

§ 11. СВАБОДНЫЯ І ВЫМУШАНЫЯ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ВАГАННІ

Атрымаць электрамагнітныя ваганні амаль гэтак жа проста, як і прымусіць цела вагацца, падвесіўшы яго на sprужыне.

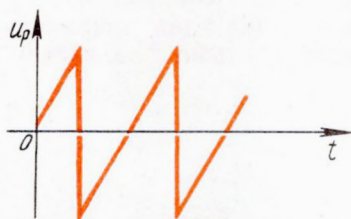
Але назіраць ваганні ўжо не так проста. Мы ж непасрэдна не бачым ні зараду кандэнсатара, ні току ў шпулі.

Электрамагнітныя ваганні былі адкрыты ў вядомай меры выпадкова. Пасля таго як вынайшлі лейдэнскую банку (першы кандэнсатар) і навучыліся надаваць ёй вялікі зарад з дапамогай электрастатычнай машыны, пачалі вывучаць электрычны разрад банкі. Замыкаючы абкладкі лейдэнскай банкі пры дапамозе драцяной шпулі, выявілі, што сталёныя спіцы ўсярэдзіне шпулі намагнічваюцца. У гэтым нічога дзіўнага не было: электрычны ток і павінен намагнічваць сталёны стрыжань шпулі. Надзвычайным было тое, што нельга было прадказаць, які канец стрыжня шпулі акажацца паўночным полюсам, а які — паўднёвым. Паўтараючы дослед прыкладна ў адных і тых жа ўмовах, атрымлівалі ў адных выпадках адзін вынік, а ў іншых — другі. Далёка не адразу зразумелі, што пры разраджэнні кандэнсатара праз шпулю ўзнікаюць ваганні. За час разрадкі кандэнсатар паспявае многа разоў перазарядзіцца, і ток мяняе напрамак многа разоў. З-за гэтага стрыжань можа намагнічвацца розным чынам.

Перыядычныя або амаль перыядычныя змяненні зараду, сілы току і напружання называюць *электрамагнітнымі ваганнямі*.

Звычайна гэтыя ваганні адбываюцца з вельмі вялікай частотой, якая значна перавышае частату механічных ваганняў. Таму для іх назірання і даследавання самым падыходзячым прыборам з'яўляецца электронны асцылограф.

У электронна-прамянёвай трубе асцылографа вузкі пучок электронаў трапляе на экран, здольны святніцца пры бамбардзіроўцы яго электронамі. На гарызантальна адхіляльныя пласціны трубки асцылографа падаецца пераменнае напружанне разгорткі u_p «пілападобнай» формы (рыс. 22). Параўнальна павольна напружанне нарастае, а потым вельмі рэзка памяншаецца. Электрычнае поле паміж пласцінамі прымушае электронны прамень прабягаць экран у гарызантальным напрамку з пастаяннай скорасцю і затым амаль імгненна вяртацца назад. Пасля гэтага ўвесь працэс паўтараецца. Калі цяпер далучыць вертыкальна адхіляльныя пласціны трубки да кандэнсатара, то ваганні напружання пры яго разраджэнні выклікаюць ваганні праменя ў вертыкальным напрамку. У выніку на экране ўзнікае часавая «разгортка» ваганняў (рыс. 23), падобная да той, якую вычэрчвае маятнік з карандашом на канцы на лісце паперы, што рухаецца. Ваганні затухаюць з цягам часу¹.



Рыс. 22

¹ Звычайна ваганні ў ланцугу затухаюць за малыя долі секунды. Таму для іх назірання зручна выкарыстоўваць асцылограф са спецыяльным экранам, здольным святніцца доўгі час пасля яго ўзбуджэння электронным праменем.

Гэтыя ваганні з'яўляюцца *свабоднымі*. Свабоднымі ваганнямі называюцца ваганні ў сістэме, якія ўзнікаюць пасля вывадзення яе са становішча раўнавагі. У нашым выпадку сістэма выводзіцца з раўнавагі пры наданні кандэнсатару зараду. Зарадка кандэнсатара эквівалентная адхіленню маятніка ад становішча раўнавагі.

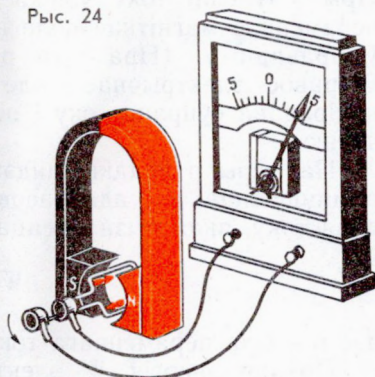
Няцяжка атрымаць у электрычным ланцугу таксама вымушаныя электрамагнітныя ваганні. *Вымушанымі ваганнямі* называюцца ваганні ў ланцугу пад дзеяннем знешняй перыядычнай электрарухаючай сілы.

Пераменная ЭРС узнікае, напрыклад, у драцяной рамцы з некалькіх віткоў пры вярчэнні яе ў аднародным магнітным полі (рыс. 24). Паходжанне ЭРС індукцыі ў гэтым выпадку такое: на электроны, якія рухаюцца разам з правадынікамі рамкі, дзейнічае сіла з боку магнітнага поля. Яна выклікае перамяшчэнне электронаў уздоўж правадыкоў. Паколькі магнітны паток, які пранізвае рамку, перыядычна змяняецца, то ў адпаведнасці з законам электрамагнітнай індукцыі перыядычна мяняецца і ЭРС індукцыі. Пры замыканні ланцуга пераменная ЭРС стварае пераменны ток і стрэлка гальванометра пачне вагацца каля становішча раўнавагі.



Рис. 23

Рис. 24



Свабодныя электрамагнітныя ваганні ўзнікаюць пры разрадка кандэнсатара праз шпулю індуктыўнасці. Вымушаныя ваганні ў ланцугу выклікаюцца перыядычнай ЭРС.

1. Што называюць электрамагнітнымі ваганнямі? 2. Чым адрозніваюцца свабодныя і вымушаныя электрамагнітныя ваганні?

§ 12. ВАГАЛЬНЫ КОНТУР. ПЕРАТВАРЭННЕ ЭНЕРГІІ ПРЫ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ВАГАННЯХ

Найпрасцейшая сістэма, у якой могуць адбывацца свабодныя электрамагнітныя ваганні, складаецца з кандэнсатара і шпулі, далучанай да яго абкладак (рыс. 25). Такая сістэма называецца вагальным контурам.

Разгледзім, чаму ў контуры ўзнікаюць ваганні. Зарадзім кандэнсатар, далучыўшы яго на некаторы час да батарэі з дапамогай пераключальніка (рыс. 26, а). Пры гэтым кандэнсатар атрымае энергію

$$W_p = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (2.1)$$

дзе q_m — зарад кандэнсатара, а C — яго электраёмкасць. Паміж абкладкамі кандэнсатара ўзнікае рознасць патэнцыялаў U_m .

Перавядзём пераключальнік у становішча 2 (рыс. 26, б). Кандэнсатар пачне разраджацца, і ў ланцугу з'явіцца электрычны ток. Сіла току не адразу дасягае максімальнага значэння, а павялічваецца паступова. Гэта абумоўлена з'явай самаіндукцыі. Пры з'яўленні току ўзнікае пераменнае магнітнае поле. Гэта пераменнае магнітнае поле выклікае віхравое электрычнае поле ў правадніку. (Пра гэта раскажваецца ў першым раздзеле.) Віхравое электрычнае поле пры нарастанні магнітнага поля накіравана супраць току і перашкаджае яго імгненнаму павелічэнню.

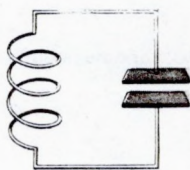
Па меры разрадкі кандэнсатара энергія электрычнага поля памяншаецца, але адначасова павялічваецца энергія магнітнага поля току, якая вызначаецца формулай

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (2.2)$$

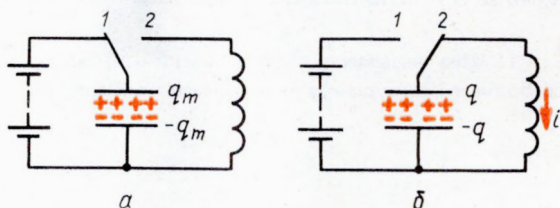
дзе i — сіла пераменнага току, L — індуктыўнасць шпулі.

Поўная энергія W электрамагнітнага поля контуру роўна суме энергій магнітнага і электрычнага палёў:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \quad (2.3)$$



Рыс. 25



Рыс. 26

У момант, калі кандэнсатар поўнаасцю разрадзіцца ($q = 0$), энергія электрычнага поля стане роўнай нулю. Энергія ж магнітнага поля току ў адпаведнасці з законам захавання энергіі будзе максімальнай. Значыць, у гэты момант сіла току таксама дасягне максімальнага значэння I_m .

Нягледзячы на тое што к гэтаму моманту рознасць патэнцыялаў на канцах шпулі становіцца роўнай нулю, электрычны ток не можа спыніцца адразу. Гэтаму перашкаджае з'ява самаіндукцыі. Як толькі сіла току і створанае ім магнітнае поле пачнуць памяншацца, узнікае віхравое электрычнае поле, якое падтрымлівае ток. У выніку кандэнсатар перазаряджаецца да таго часу, пакуль сіла току, паступова памяншаючыся, не стане роўнай нулю. Энергія магнітнага поля ў гэты момант таксама будзе роўнай нулю, а энергія электрычнага поля кандэнсатара зноў стане максімальнай.

Пасля гэтага кандэнсатар зноў пачне перазаряджацца і сістэма вернецца ў зыходны стан. Калі б не было страт энергіі, то гэты працэс працягваўся б неабмежавана доўга. Ваганні былі б незатухаючымі. Праз прамежкі часу, роўныя перыяду ваганняў, стан сістэмы з дакладнасцю паўтараўся б. Поўная энергія пры гэтым захоўвалася б і яе значэнне ў любы момант часу было б роўнае максімальнай энергіі электрычнага поля ці максімальнай энергіі магнітнага поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2.4)$$

Але ў сапраўднасці страты энергіі непазбежныя. Так, у прыватнасці, шпуля і злучальныя правады ўладаюць супраціўленнем R , і гэта вядзе да паступовага ператварэння энергіі электрамагнітнага поля ва ўнутраную энергію правадніка.

У вагальным контуры энергія электрычнага поля зараджанага кандэнсатара перыядычна ператвараецца ў энергію магнітнага поля току. Пры адсутнасці супраціўлення поўная энергія электрамагнітнага поля застаецца нязменнай.



1. Ці можаце вы зрабіць вагальны контур? 2. Чаму роўная энергія контуру ў адвольны момант часу?

§ 13. АНАЛОГІЯ ПАМІЖ МЕХАНІЧНЫМІ І ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫМІ ВАГАННЯМІ

Электрамагнітныя ваганні ў контуры маюць падабенства да свабодных механічных ваганняў, напрыклад да ваганняў цела, замацаванага на sprужыне. Падобнымі з'яўляюцца не велічыні, якія перыядычна змяняюцца, а працэсы, якія характарызуюцца перыядычным змяненнем розных велічынь.

Пры механічных ваганнях перыядычна змяняюцца каардыната цела x і праекцыя яго скорасці v_x , а пры электрамагнітных ваганнях змяняюцца зарад кандэнсатара q і сіла току i ў ланцугу. Аднолькавы характар змянення велічынь (механічных і электрычных) тлумачыцца тым, што ёсць аналогія ва ўмовах, якія выклікаюць механічныя і электрамагнітныя ваганні. Вяртанне да становішча раўнавагі шарыка на sprужыне выклікаецца сілай пругкасці F_x , прапарцыянальнай зрушэнню цела ад становішча раўнавагі. Каэфіцыентам прапарцыянальнасці з'яўляецца жорсткасць sprужыны k . Разрадка кандэнсатара (з'яўленне току) абумоўлена напружаннем u паміж пласцінамі кандэнсатара, якое прапарцыянальнае зараду q . Каэфіцыентам прапарцыянальнасці з'яўляецца велічыня $\frac{1}{C}$, адваротная ёмістасці, паколькі

$$u = \frac{1}{C} q.$$

Падобна да таго як у выніку інертнасці цела толькі паступова павялічвае скорасць пад дзеяннем сілы і гэта скорасць паля спынення дзеяння сілы не становіцца адразу роўнай нулю, электрычны ток у шпулі за кошт з'явы самаіндукцыі павялічваецца пад дзеяннем напружання паступова і не знікае адразу, калі гэта напружанне становіцца роўным нулю. Індуктыўнасць контуру L адыгрывае тую ж ролю, што і маса цела m у механіцы.

Адпаведна кінетычнай энергіі цела $\frac{mv_x^2}{2}$ адпавядае энергія магнітнага поля току $\frac{Li^2}{2}$.

Зарадцы кандэнсатара ад батарэі адпавядае наданне цела, змацаванаму са sprужынай, патэнцыяльнай энергіі $\frac{kx_m^2}{2}$ пры зрушэнні цела (напрыклад, рукой) на адлегласць x_m ад становішча раўнавагі¹ (рыс. 27, а). Параўноўваючы гэты выраз з энергіяй кандэнсатара $\frac{q_m^2}{2C}$, заўважаем, што жорсткасць k sprужыны адыгрывае пры механічным вагальным працэсе такую ж ролю, як велічыня $\frac{1}{C}$, адваротная ёмістасці пры электрамагнітных ваганнях, а пачатковая каардыната x_m адпавядае зараду q_m .

Узнікненне ў электрычным ланцугу току i за кошт рознасці патэнцыялаў адпавядае з'яўленню ў механічнай вагальнай сістэме скорасці v_x пад дзеяннем сілы пругкасці sprужыны (рыс. 27, б).

Моманту, калі кандэнсатар разрадзіцца, а сіла току дасягне максімуму, адпавядае праходжанне цела праз становішча раўнавагі з максімальнай скорасцю (рыс. 27, в).

¹ Становішча раўнавагі на рысунку 27, а, б, в, г, д адзначана вертыкальнымі каляровымі лініямі.

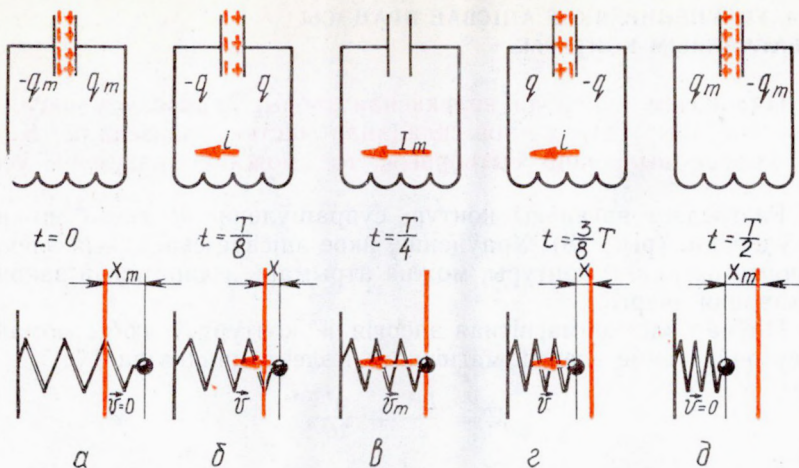


Рис. 27

Далей кандэнсатар пачне перазараджацца, а цела зрушвацца ўлева ад становішча раўнавагі (рыс. 27, г). Пасля таго як пройдзе палавіна перыяду T , кандэнсатар поўнасю перазарадзіцца і сіла току стане роўнай нулю. Гэтаму стану адпавядае адхіленне цела ў крайняе левае становішча, калі яго скорасць роўна нулю (рыс. 27, д).

Адпаведнасць паміж механічнымі і электрычнымі велічынямі пры вагальных працэсах можна звесці ў табліцу 1:

Табліца 1

Механічныя велічыні	Электрычныя велічыні
Каардыната x Скорасць $v(x)$ Маса m Жорсткасць sprужыны k	Заряд q Сіла току i Індуктыўнасць L Велічыня, адваротная ёмістасці $\frac{1}{C}$
Патэнцыяльная энергія $\frac{kx^2}{2}$	Энергія электрычнага поля $\frac{q^2}{2C}$
Кінетычная энергія $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергія магнітнага поля $\frac{Li^2}{2}$

1. У чым выяўляецца аналогія паміж электрамагнітнымі ваганнямі ў контуры і ваганнямі матэматычнага маятніка? 2. Чаму ролю жорсткасці sprужыны k у вагальным контуры адыгрывае велічыня $\frac{1}{C}$, а не C ?

§ 14. УРАЎНЕННЕ, ЯКОЕ АПІСВАЕ ПРАЦЭСЫ У ВАГАЛЬНЫМ КОНТУРЫ

Пяройдзем цяпер да колькаснай тэоры працэсаў у вагальным контуры. Гэта самая складаная частка раздзела 2. Калі вы ўмеете вылічваць вытворныя, то зможаце зразумець усё.

Разгледзім вагальны контур, супраціўленне R якога можна не ўлічваць (рыс. 28). Ураўненне, якое апісвае свабодныя электрычныя ваганні ў контуры, можна атрымаць з дапамогай закону захавання энергіі.

Поўная электрамагнітная энергія W контуру ў любы момант часу роўна суме энергій магнітнага і электрычнага палёў:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Гэта энергія не змяняецца з цягам часу, калі супраціўленне R контуру роўна нулю.

Вытворная поўнай энергіі па часу роўна нулю, таму што энергія пастаянная. Значыць, роўна нулю сума вытворных па часу ад энергій магнітнага і электрычнага палёў:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

або

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \quad (2.5)$$

Фізічны сэнс ураўнення (2.5) заключаецца ў тым, што скорасць змянення энергіі магнітнага поля па модулю роўна скорасці змянення энергіі электрычнага поля; знак «мінус» паказвае на тое, што, калі энергія электрычнага поля ўзрастае, энергія магнітнага поля ўбывае (і наадварот). Менавіта дзякуючы гэтаму поўная энергія не мяняецца.

Вылічваючы абедзве вытворныя ва ўраўненні (2.5), атрымаем¹

$$\frac{L}{2} 2ii' = -\frac{1}{2C} qq'. \quad (2.6)$$

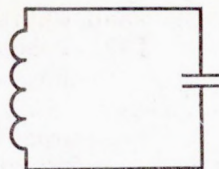
Але вытворная зараду па часу з'яўляецца сілай току ў дадзены момант часу:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'. \quad (2.7)$$

¹ Мы вылічваем вытворныя па часу. Таму вытворная $(i^2)'$ роўна не проста $2i$, як было б пры вылічэнні вытворнай па i . Трэба $2i$ памножыць яшчэ на вытворную i' сілы току па часу, паколькі вылічваецца вытворная ад складанай функцыі. Тое ж самае адносіцца да вытворнай $(q^2)'$.

Таму ўраўненне (2.6) можна перапісаць у наступным выглядзе:

$$Li'i = -\frac{qi}{C}. \quad (2.8)$$



Рыс. 28

Вытворная сілы току па часу ёсць не што іншае, як другая вытворная зараду па часу, падобна да таго як вытворная скорасці (паскарэнне) ёсць другая вытворная каардынаты па часу¹. Падставіўшы ва ўраўненне (2.8) $i' = q''$ і падзяліўшы левую і правую часткі гэтага ўраўнення на Li , атрымаем асноўнае ўраўненне, якое апісвае свабодныя электрычныя ваганні ў контуры:

$$q'' = -\frac{1}{LC} q. \quad (2.9)$$

Калі вы ўспомніце (або паўтарыце) раздзел «Механічныя ваганні» («Фізіка-9»), то выявіце надзвычайны факт. Ураўненне (2.9) нічым, акрамя абазначэнняў, не адрозніваецца ад ураўнення, якое апісвае ваганні цела, змацаванага са спружынай. Пры замене ва ўраўненні для механічных ваганняў x на q , паскарэння цела $a_x = x''$ на q'' , k на $\frac{1}{C}$ і m на L мы ў дакладнасці атрымаем ураўненне (2.9).

Зроблена галоўнае ў даследаванні свабодных электрамагнітных ваганняў: атрымана ўраўненне, якое апісвае гэтыя ваганні. Яно мае такую ж матэматычную форму, як і ўраўненне, і апісвае ваганні цела, змацаванага са спружынай, ці матэматычнага маятніка.



1. Чаму роўна скорасць змянення электрычнай энергіі ў контуры? 2. Чаму роўна скорасць змянення магнітнай энергіі ў контуры?

§ 15. ГАРМАНІЧНЫЯ ВАГАННІ. АМПЛІТУДА, ПЕРЫЯД І ЧАСТАТА ВАГАННЯЎ

У IX класе было атрымана ўраўненне руху (другі закон Ньютана) для цела, змацаванага са спружынай, і матэматычнага маятніка. Але вызначыць з дапамогай гэтага ўраўнення

¹ Паскарэнне ў механіцы ёсць вытворная скорасці па часу: $a_x = v'_x$ (гл. курс матэматыкі для X класа). Скорасць — вытворная каардынаты па часу: $v_x = x'$. Таму паскарэнне — другая вытворная каардынаты па часу: $a_x = x''$. Значыць, велічыня q'' цалкам аналагічная паскарэнню a_x . Гэту адпаведнасць можна было б адразу ўключыць у табліцу 1.

залежнасць каардынаты цела, якое вагаецца, ад часу мы і не спрабавалі. Гэта можна зрабіць толькі на аснове матэматычнага аналізу. Знайдзем цяпер залежнасць зараду ад часу па вядомай залежнасці q'' ад q (ураўненне (2.9)). Справа гэта не простая: ад нас патрабуюцца немалыя намаганні, але справіцца з гэтым можа амаль кожны.

Гарманічныя ваганні. Другая вытворная зараду па часу прамі прапарцыянальная згодна з ураўненнем (2.9) самому зараду і процілеглая яму па знаку. Як жа зарад залежыць ад часу?

Зразумела, што ён павінен мяняцца перыядычна. Вам знаёмы перыядычныя функцыі сінус і косінус. З курса матэматыкі XI класа вядома, што гэтыя функцыі валодаюць той уласцівасцю, што *другая вытворная сінуса ці косінуса прапарцыянальная самім функцыям, узятым з процілеглым знакам*. У матэматычным аналізе даказваецца, што ніякія іншыя функцыі гэтай уласцівасцю не валодаюць. Усё гэта дазваляе сцвярджаць з поўнай падставай, што *электрычны зарад (або ток) пры свабодных ваганнях мяняецца з цягам часу па закону сінуса або косінуса*.

Перыядычныя змяненні фізічнай велічыні ў залежнасці ад часу, якія адбываюцца па закону сінуса або косінуса, называюцца *гарманічнымі ваганнямі*.

Цела на sprужыне або маятнік таксама выконваюць гарманічныя ваганні, паколькі ўраўненне руху гэтых цел матэматычна эквівалентна ўраўненню (2.9). У курсе фізікі IX класа гарманічныя ваганні і вызначаліся як рухі, для якіх паскарэнне прапарцыянальнае зрушэнню, узятаму са знакам «мінус».

Амплітуда ваганняў. Важнай характарыстыкай любога вагальнага руху з'яўляецца амплітуда. *Амплітудай* гарманічных ваганняў называецца модуль найбольшага значэння велічыні, якая вагаецца. Гэта можа быць модуль электрычнага зараду або любой іншай велічыні, якая перыядычна мяняецца.

Амплітуда можа мець розныя значэнні ў залежнасці ад таго, які зарад быў нададзены кандэнсатару ў пачатковы момант часу. Інакш кажучы, амплітуда вызначаецца пачатковымі ўмовамі. Але максімальныя значэнні модуля сінуса і косінуса роўны адзінцы. Таму рашэнне ўраўнення (2.9) не можа выражацца проста косінусам або сінусам. Яно павінна мець выгляд здабытку амплітуды q_m на сінус або косінус.

Рашэнне ўраўнення, якое апісвае свабодныя ваганні. Якую ж форму мае рашэнне ўраўнення (2.9)? Нельга проста лічыць, што $q = q_m \cos t$ або $q = q_m \sin t$, паколькі ў гэтым выпадку замест

$$q'' = -\frac{1}{LC} q$$

атрымалася б роўнасць $q'' = -q_m \cos t = -q$.

Але невялікае ўскладненне формы рашэння адразу прывядзе нас да мэты. Каб у выразе другой вытворнай q'' быў множнік

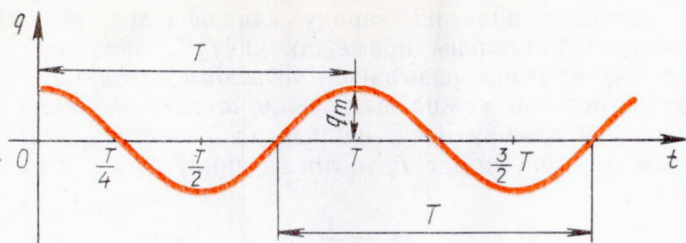


Рис. 29

$\frac{1}{LC}$, запишем рашэнне ўраўнення (2.9) у наступным выглядзе:

$$q = q_m \cos \sqrt{\frac{1}{LC}} t. \quad (2.10)$$

У гэтым выпадку першая вытворная прымае выгляд

$$q' = -\sqrt{\frac{1}{LC}} q_m \sin \sqrt{\frac{1}{LC}} t,$$

а другая вытворная будзе роўна:

$$q'' = -\frac{1}{LC} q_m \cos \sqrt{\frac{1}{LC}} t = -\frac{1}{LC} q.$$

Мы атрымалі дакладна ўраўненне (2.9). Значыць, функцыя (2.10) ёсць рашэнне зыходнага ўраўнення (2.9). Вядома, рашэннем зыходнага ўраўнення будзе таксама функцыя

$$q = q_m \sin \sqrt{\frac{1}{LC}} t. \quad (2.11)$$

Абазначым пастаянную велічыню $\sqrt{\frac{1}{LC}}$, якая залежыць ад уласцівасцей сістэмы, праз ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.12)$$

Тады рашэнне ўраўнення (2.10) можна запісаць у больш кампактнай форме:

$$q = q_m \cos \omega_0 t. \quad (2.13)$$

Само ж ураўненне (2.9), якое апісвае свабодныя электрамагнітныя ваганні, прымае выгляд

$$q'' = -\omega_0^2 q. \quad (2.14)$$

Графік залежнасці зараду ад часу згодна з (2.13) уяўляе сабой косінусоід (рис. 29).

Перыяд і частата гарманічных ваганняў. Высветлім фізічны сэнс велічыні ω_0 .

Пры ваганнях значэнні зараду кандэнсатара перыядычна паўтараюцца. Мінімальны прамежак часу T , праз які працэс поўнасьцю паўтараецца, называюць *перыядам ваганняў*.

Ведаючы перыяд, можна вызначыць *частату ваганняў*, г. зн. лік ваганняў у адзінку часу, напрыклад у секунду. Калі адно ваганне адбываецца за час T , то лік ваганняў за 1 с ν вызначаецца так:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (2.15)$$

Напомнім, што ў Міжнароднай сістэме адзінак (СИ) частата ваганняў роўна адзінцы, калі ў 1 с адбываецца адно ваганне. Адзінка частаты называецца герцам (скарочана: Гц) у гонар нямецкага фізіка Генрыха Герца.

Праз прамежак часу, роўны перыяду T , г. зн. пры павелічэнні аргумента косінуса на $\omega_0 T$, значэнне зараду паўтараецца і косінус прымае ранейшае значэнне. Але з курса матэматыкі вядома, што найменшы перыяд косінуса роўны 2π . Значыць,

$$\omega_0 T = 2\pi,$$

адкуль

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (2.16)$$

Такім чынам, велічыня ω_0 — гэта лік ваганняў, але не за 1 с, а за 2π с. Яна называецца *цыклічнай* або *кругавой частотой*¹.

Частату свабодных ваганняў называюць *уласнай частотой вагальнай сістэмы*.

Формула Томсана. Мы высветлілі, што каэфіцыент прапарцыянальнасці ва ўраўненні (2.9) з'яўляецца квадратам цыклічнай частаты ваганняў зараду:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}.$$

Перыяд свабодных ваганняў у контуры роўны:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.17)$$

Формула (2.17) называецца формулай Томсана ў гонар англійскага фізіка, які яе ўпершыню вывеў.

Павелічэнне перыяду ваганняў з ростам L і C наглядна можна растлумачыць так. Пры павелічэнні індуктыўнасці ток больш павольна нарастае з часам і больш павольна падае да нуля.

А чым большая ёмістасць, тым большы час патрабуецца для перазаładкі кандэнсатара.

¹ Часта ў далейшым каротка мы будзем называць цыклічную частату проста частотой. Адрозніць цыклічную частату ω_0 ад частаты ν можна па абазначэннях.

Затухаючыя ваганні. Свабодныя ваганні зараду і току з-за энергетычных страт у сапраўднасці ніколі не будуць строга гарманічнымі. Яны затухаюць. Часавую разгортку затухаючых ваганняў мы бачылі на экране асцылографа (гл. рыс. 23).

Чым большае супраціўленне R контуру, тым большы перыяд ваганняў. Пры дастаткова вялікім супраціўленні ваганні зусім не ўзнікаюць. Кандэнсатар разрадзіўся, але перазарадкі яго не адбудзецца.

Завершана цяжкая работа. Рэшана дыферэнцыяльнае ўраўненне, якое апісвае гарманічныя ваганні. Нічога больш складанага матэматычна да канца кнігі вам ужо не сустрэнецца.

Даказана, што свабодныя электрамагнітныя ваганні ў вагальным контуры адбываюцца па закону косінуса або сінуса. Знойдзены перыяд і ўласная частата ваганняў.

? 1. Якія ваганні называюцца гарманічнымі? 2. Як звязана цыклічная частата ваганняў з перыядам? 3. Як зменіцца перыяд свабодных ваганняў, калі кандэнсатар контуру замяніць іншым кандэнсатарам з у два разы меншай ёмістасцю? 4. Электрычны зарад, выражаны ў кулонах, змяняецца з цягам часу наступным чынам: $q = 3,5 \cdot 10^{-5} \cos 4\pi t$. Чаму роўныя амплітуды ваганняў і цыклічная частата? 5. Знайдзіце амплітуду і перыяд гарманічнага вагання, графік якога паказаны на рысунку 30? 6. Улічваючы, што ўраўненні, якія апісваюць ваганні цела на sprужыне і матэматычнага маятніка, матэматычна тоесныя ўраўненню (2.9) для ваганняў зараду, знайдзіце перыяды ваганняў цела на sprужыне і маятніка.

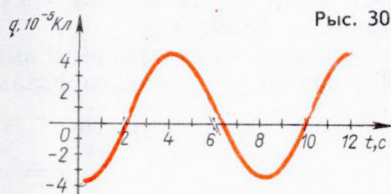


Рис. 30

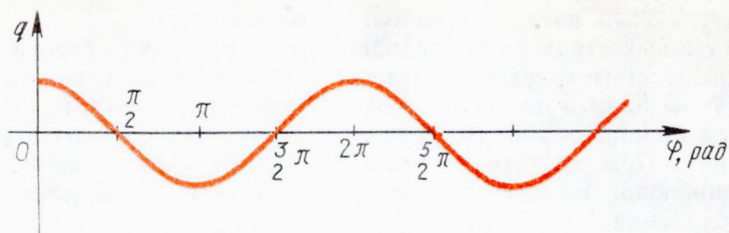
§ 16. ФАЗА ВАГАННЯЎ

Мы пазнаёміліся з асноўнымі велічынямі, якія характарызуюць гарманічныя ваганні: амплітудай ваганняў зараду q_m , перыядам T , частатой ваганняў ν і цыклічнай частатой ω_0 . Застаецца пазнаёміцца з яшчэ адной важнай велічыняй — фазай¹.

Пры зададзенай амплітудзе гарманічных ваганняў зарад кандэнсатара контуру ў любы момант часу адназначна вызначаецца аргументам косінуса (або сінуса): $\varphi = \omega_0 t$.

Велічыню φ , што стаіць пад знакам косінуса або сінуса, называюць *фазай ваганняў*, якія апісаны гэтымі функцыямі. Выражаецца фаза ў вуглавых адзінках — радыянах.

¹ Ад грэчаскага слова phasis — з'яўленне, ступень развіцця якой-небудзь з'явы.



Рыс. 31

Фаза вызначае значэнне не толькі зараду, але і іншых фізічных велічынь, напрыклад сілы току і напружання, якія змяняюцца таксама па гарманічнаму закону. Таму можна сказаць, што фаза вызначае пры зададзенай амплітудзе стан вагальнай сістэмы ў любы момант часу. У гэтым заключаецца значэнне паняцця фазы.

Ваганні з аднолькавымі амплітудамі і частотамі могуць адрознівацца адно ад аднаго фазамі.

Паколькі $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \quad (2.18)$$

Адносіна $\frac{t}{T}$ паказвае, якая частка перыяду прайшла ад моманту пачатку ваганняў. Любому значэнню часу, выражанаму ў долях перыяду, адпавядае значэнне фазы, выражанае ў радыянах. Так, пасля таго як прайшоў час $t = \frac{T}{4}$ (чвэрць перыяду), $\varphi = \frac{\pi}{2}$, пасля таго як прайшла палавіна перыяду, $\varphi = \pi$, пасля таго як прайшоў цэлы перыяд, $\varphi = 2\pi$ і г. д.

Можна паказаць на графіку залежнасць зараду не ад часу, а ад фазы. На рысунку 31 паказана тая ж касінусоіда, што і на рысунку 29, але на гарызантальнай восі адкладзены замест часу розныя значэнні фазы φ .

Запіс гарманічных ваганняў з дапамогай косінуса і сінуса. Вы ўжо ведаеце, што пры гарманічных ваганнях зарад змяняецца з часам па закону косінуса або сінуса. Пасля ўвядзення паняцця фазы трэба спыніцца на гэтым больш падрабозна.

Сінус адрозніваецца ад косінуса зрухам аргумента на чвэрць перыяду, г. зн. на $\frac{\pi}{2}$:

$$\cos \varphi = \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.19)$$

Таму замест формулы $q = q_m \cos \omega_0 t$ можна для апісання гарманічных ваганняў выкарыстаць формулу

$$q = q_m \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.20)$$

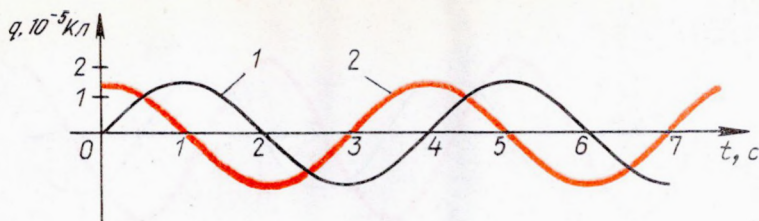


Рис. 32

Але пры гэтым *пачатковая фаза*, г. зн. значэнне фазы ў момант $t = 0$, роўна не нулю, а $\frac{\pi}{2}$.

Звычайна ваганні ў контуры мы ўзбуджаем, зараджаючы кандэнсатар. Зарад кандэнсатара максімальны ў пачатковы момант. Таму для апісання ваганняў больш зручна карыстацца формулай (2.13) з прымяненнем косінуса, чым формулай з прымяненнем сінуса.

Іншая справа, калі мы выклікаем ваганні контуру, змясціўшы яго шпулю ў пераменнае магнітнае поле. Тады зарад кандэнсатара ў пачатковы момант роўны нулю і ваганні зараду больш зручна апісаць з дапамогай сінуса, г. зн. формулай (2.11). Пры гэтым пачатковая фаза роўная нулю.

Зрух фаз. Ваганні, што апісаныя формуламі (2.10) і (2.11), адрозніваюцца адно ад аднаго толькі фазамі. Рознасць фаз, або, як часта гавораць, зрух фаз, гэтых ваганняў складае $\frac{\pi}{2}$. На рысунку 32 паказаны графікі залежнасці зараду ад часу

для двух гарманічных ваганняў, зрушаных па фазе на $\frac{\pi}{2}$. Графік 1 адпавядае ваганням, якія адбываюцца па сіносаідальнаму закону $q = q_m \sin \omega_0 t$, а графік 2 — ваганням, якія адбываюцца па косінусаідальнаму закону.

$$q = q_m \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right) = q_m \cos \omega_0 t.$$

Для вызначэння рознасці фаз двух ваганняў трэба велічыню, якая вагаецца, выразіць праз адну і тую ж трыганаметрычную функцыю — косінус або сінус.

Гарманічныя ваганні сілы току. Пры гарманічных ваганнях зараду сіла току таксама робіць гарманічныя ваганні:

$$i = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t = I_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.21)$$

дзе $I_m = q_m \omega_0$ — амплітуда ваганняў сілы току. Ваганні сілы току апераджаюць па фазе на $\frac{\pi}{2}$ ваганні зараду (рыс. 33).

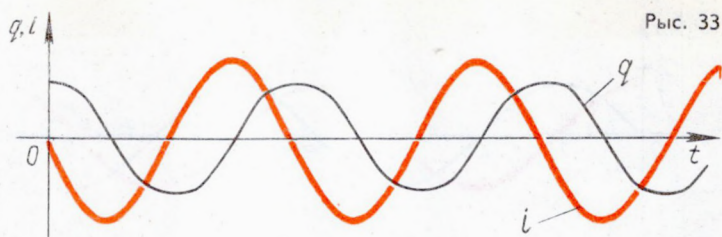


Рис. 33

Характарыстыкі вагальнага працэсу: амплітуда, перыяд і частата — простыя і наглядныя. Паняцце «фаза» такой нагляднасцю не валодае. Але вызначаецца фаза проста — гэта аргумент сіноса або косінуса. Найбольшую ролю адыгрывае не сама фаза, а зрух фаз паміж рознымі ваганнямі. Вы ў гэтым пераканаецеся пры вывучэнні пераменнага току.

1. Чаму роўна фаза ваганняў зараду праз 5 с пасля пачатку ваганняў, калі ваганні апісваюцца формулай $q = 3,5 \cdot 10^{-5} \cos 4\pi t$ (заряд выражаны ў кулонах)?
2. Як звязаны амплітуда ваганняў зараду і сілы току пры разрадцы кандэнсатараў?

§ 17. ПЕРАМЕННЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК

Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры хутка затухаюць, і таму яны практычна не выкарыстоўваюцца. Наадварот, незатухаючыя вымушаныя ваганні маюць вялікае практычнае значэнне.

Рис. 34



Пераменны ток у асвятляльнай сетцы кватэры, які прымяняецца на заводах і фабрыках, з'яўляецца не чым іншым, як вымушанымі электрамагнітнымі ваганнямі. Сіла току і напружанне мяняюцца з цягам часу па гарманічнаму закону.

Ваганні напружання лёгка выявіць пры дапамозе асцылографа. Калі на вертыкальна адхіляльныя пласціны асцылографа падаць напружанне ад сеткі, то часавая разгортка на экране будзе ўяўляць сабой сіносоід (рыс. 34). Ведаючы скорасць руху праменя па экране ў гарызантальным напрамку (яна вызначаецца частотой «пілападобнага» напружання), можна вызначыць частату ваганняў. Частата пераменнага току — гэта лік ваганняў у 1 с.

Стандартная частата прамысловага пераменнага току роўна 50 Гц. Гэта азначае, што на працягу 1 с ток 50 разоў ідзе ў адзін бок і 50 разоў у процілеглы. Частата 50 Гц прынята для прамысловага току ў многіх краінах свету. У ЗША прынята частата 60 Гц.

Калі напружанне на канцах ланцуга мяняецца па гарманічнаму закону, то напружанасць электрычнага поля ўнутры праваднікоў будзе таксама мяняцца гарманічна. Гэтыя гарманічныя змяненні напружанасці поля выклікаюць гарманічныя ваганні скорасці ўпарадкаванага руху зараджаных часціц і, значыць, гарманічныя ваганні сілы току.

Праўда, пры змяненні напружання на канцах ланцуга электрычнае поле не мяняецца імгненна ва ўсім ланцугу. Змяненні поля распаўсюджваюцца хоць з вельмі вялікай, але не з бесканечна вялікай скорасцю.

Аднак, калі час распаўсюджвання змяненняў поля ў ланцугу значна меншы за перыяд ваганняў напружання, можна лічыць, што электрычнае поле ва ўсім ланцугу адразу ж мяняецца пры змяненні напружання на канцах ланцуга. Пры гэтым сіла току ў дадзены момант часу мае практычна адно і тое ж значэнне ва ўсіх сячэннях неразгалінаванага ланцуга.

Пераменнае напружанне ў гнёздах разеткі асвятляльнай сеткі ствараецца генератарамі на электрастанцыях. Драцяную рамку, якая верціцца ў пастаянным аднародным магнітным полі (гл. § 11), можна разглядаць як найпрасцейшую мадэль генератара пераменнага току. Патак магнітнай індукцыі Φ , які пранізвае драцяную рамку плошчай S , прапарцыянальна косінусу вугла α паміж нармаллю да рамкі і вектарам магнітнай індукцыі (рыс. 35):

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

Пры раўнамерным вярчэнні рамкі вугал α павялічваецца прама прапарцыянальна часу:

$$\alpha = 2\pi nt,$$

дзе n — частата вярчэння. Таму паток магнітнай індукцыі мяняецца гарманічна:

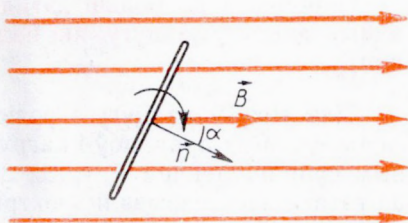
$$\Phi = BS \cos 2\pi nt.$$

Тут множнік $2\pi n$ — лік ваганняў магнітнага патоку за 2π с. Гэта не што іншае, як *цыклічная частата ваганняў* $\omega = 2\pi n$. Значыць,

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

У адпаведнасці з законам электрамагнітнай індукцыі ЭРС індукцыі ў рамцы роўна ўзятая са знакам «мінус» скорасці

Рыс. 35



зм'янення потоку магнітної індукції, г. зн. витворної потоку магнітної індукції па часу:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

дзе $\mathcal{E}_m = BS\omega$ — амплітуда ЭРС індукції.

Мы будзем вивучаць у далейшым вымушаныя электрычныя ваганні, што адбываюцца ў ланцугах пад дзеяннем напружання, якое мяняецца з частатой ω па сінусаідальнаму або косінусаідальнаму закону:

$$u = U_m \sin \omega t \quad (2.22)$$

або

$$u = U_m \cos \omega t,$$

дзе U_m — амплітуда напружання, г. зн. максімальнае па модулю значэнне напружання.

Калі напружанне мяняецца з частатой ω , то сіла току ў ланцугу будзе мяняцца з той жа частатой. Але ваганні сілы току не абавязкова павінны супадаць па фазе з ваганнямі напружання. Таму ў агульным выпадку сіла току ў любы момант часу (імяненнае значэнне сілы току) i вызначаецца па формуле

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_c). \quad (2.23)$$

Тут I_m — амплітуда сілы току, г. зн. максімальнае па модулю значэнне сілы току, а φ_c — рознасць (зрух) фаз паміж ваганнямі сілы току і напружання.

У прамысловых ланцугах пераменнага току сіла току і напружанне мяняюцца гарманічна з частатой 50 Гц. Пераменнае напружанне на канцах ланцуга ствараецца генератарамі на электрастанцыях.

1. Пры якіх умовах у электрычным ланцугу ўзнікаюць вымушаныя электрамагнітныя ваганні? 2. Ці будзе аднолькавым імяненнае значэнне сілы пераменнага току ў дадзены момант часу ва ўсіх участках неразгалінаванага электрычнага ланцуга?

§ 18. АКТЫЎНАЕ СУПРАЦІЎЛЕННЕ.

ДЗЕЮЧЫЯ ЗНАЧЭННІ СІЛЫ ТОКУ І НАПРУЖАННЯ

Пяройдзем да больш дэтальнага знаёмства з працэсамі, што адбываюцца ў ланцугу, які падключаны да крыніцы пераменнага напружання.

Сіла току ў ланцугу з рэзістарам. Няхай ланцуг складаецца са злучальных правадоў і нагрузкі з малой індуктыўнасцю і значным супраціўленнем R (рыс. 36). Дадзеную велічыню, якую мы да гэтага часу называлі электрычным супраціўленнем або проста

супраціўленнем, цяпер будзем называць *актыўным супраціўленнем*.

Справа ў тым, што ў ланцугу пераменнага току могуць быць і супраціўленні іншага характару. Супраціўленне ж R называецца актыўным, таму што пры наяўнасці нарузкі, якая валодае гэтым супраціўленнем, ланцуг паглынае энергію, што паступае ад генератара. Гэта энергія ператвараецца ва ўнутраную энергію праваднікоў — яны награвваюцца.

Будзем лічыць, што напружанне на заціскачках ланцуга мяняецца па гарманічнаму закону:

$$u = U_m \cos \omega t.$$

Як і ў выпадку пастаяннага току, імгненнае значэнне сілы току прама прапарцыянальнае імгненнаму значэнню напружання. Таму для знаходжання імгненнага значэння сілы току можна прымяніць закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \quad (2.24)$$

У правадніку з актыўным супраціўленнем ваганні сілы току па фазе супадаюць з ваганнямі напружання (рыс. 37), а амплітуда сілы току вызначаецца роўнасю

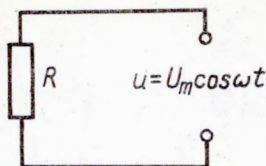
$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (2.25)$$

Магутнасць у ланцугу з рэзістарам. У ланцугу пераменнага току прамысловай частаты (50 Гц) сіла току і напружанне змяняюцца параўнальна хутка. Таму пры праходжанні току па правадніку, напрыклад па ніці электрычнай лампачкі, колькасць вылучанай энергіі таксама будзе хутка мяняцца з часам. Але гэтых хуткіх змяненняў мы не заўважаем.

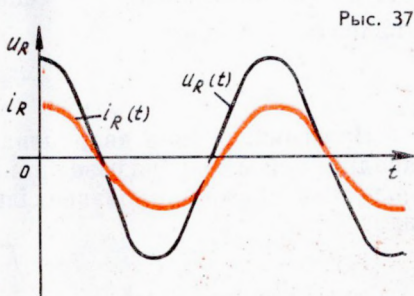
Як правіла, нам трэба ведаць *сярэдную магутнасць* току на ўчастку ланцуга за вялікі прамежак часу, які ўключае многа перыядаў. Для гэтага дастаткова знайсці сярэднюю магутнасць за адзін перыяд. Пад сярэдняй за перыяд магутнасцю пераменнага току разумеюць адносіну сумарнай энергіі, якая паступае ў ланцуг за перыяд, да перыяду.

Магутнасць у ланцугу пастаяннага току на ўчастку супраціўленнем R вызначаецца формулай

$$P = I^2 R. \quad (2.26)$$



Рыс. 36



Рыс. 37

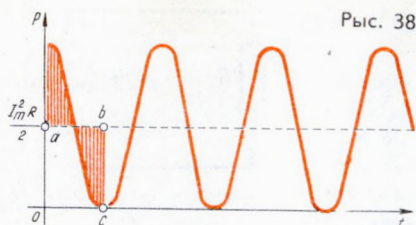


Рис. 38

На працягу вельмі малога інтэрвалу часу пераменны ток можна лічыць нязменным. Таму імгненная магутнасць у ланцугу пераменнага току на ўчастку, які мае актыўнае супраціўленне R , вызначаецца формулай

$$p = i^2 R. \quad (2.27)$$

Знойдзем сярэдняе значэнне магутнасці за перыяд. Для гэтага спачатку пераўтварым формулу (2.27), падстаўляючы ў яе выраз для сілы току (2.24) і выкарыстоўваючы вядомую з матэматыкі суадносіну $\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$:

$$p = \frac{I_m^2}{2} R (1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t. \quad (2.28)$$

Графік залежнасці імгненнай магутнасці ад часу паказаны на рысунку 38 сіняй лініяй. На працягу адной чвэрці перыяду, калі $\cos 2\omega t > 0$, магутнасць у любы момант часу большая за велічыню $\frac{I_m^2 R}{2}$. Затое на працягу наступнай чвэрці перыяду, калі $\cos 2\omega t < 0$, магутнасць у любы момант часу меншая за велічыню $\frac{I_m^2 R}{2}$. Сярэдняе за перыяд значэнне $\cos 2\omega t$ роўна нулю.

На працягу адной чвэрці перыяду гэта функцыя прабягае рад дадатных значэнняў, а на працягу наступнай чвэрці перыяду — такі ж рад адмоўных значэнняў. У выніку сярэдняя за перыяд магутнасць роўна $\frac{I_m^2 R}{2}$, а энергія, што вылучаецца за палавіну перыяду, лікава роўна плошчы прававугольнага $Oabc$.

Такім чынам, сярэдняя магутнасць $\bar{p}$ роўна першаму члену ў формуле (2.28):

$$\bar{p} = \bar{i}^2 R = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (2.29)$$

Дзеючыя значэнні сілы току і напружання. З формулы (2.29) відаць, што велічыня $\frac{I_m^2}{2}$ ёсць сярэдняе за перыяд значэнне квадрата сілы току:

$$\bar{i}^2 = \frac{I_m^2}{2}. \quad (2.30)$$

Велічыня, роўная квадратнаму караню з сярэдняга значэння квадрата сілы току, называецца *дзеючым значэннем сілы пераменнага току*. Дзеючае значэнне сілы пераменнага току абазначаецца праз I :

$$I = \sqrt{\bar{i}^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.31)$$

Заўсёды можна падабраць такое значэнне сілы пастаяннага току, каб энергія, якая вылучаецца за некаторы час гэтым токам на ўчастку супраціўленнем R , была роўна энергіі, што вылучаецца за той жа час пераменным токам. Для гэтага неабходна, каб сіла пастаяннага току была роўна дзеючаму значэнню сілы пераменнага току. *Дзеючае значэнне сілы пераменнага току роўна сіле пастаяннага току, што вылучае ў правадніку тую ж колькасць цеплыні, што і пераменны ток за той жа час.*

Дзеючае значэнне пераменнага напружання вызначаецца гэтак жа, як і дзеючае значэнне сілы току:

$$U = \sqrt{u^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.32)$$

Замяняючы ў формуле (2.25) амплітудныя значэнні сілы току і напружання праз дзеючыя значэнні, атрымліваем

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.33)$$

Гэта закон Ома для ўчастка ланцуга пераменнага току з рэзістарам.

Як і пры механічных ваганнях, у выпадку электрычных ваганняў звычайна нас не цікавяць значэнні сілы току, напружання і іншых велічынь у кожны момант часу. Важнымі з'яўляюцца агульныя характарыстыкі ваганняў, такія, як амплітуда, перыяд, частата, дзеючае значэнне сілы току і напружання і сярэднія магутнасць. Менавіта дзеючыя значэнні сілы току і напружання рэгіструюць амперметры і вальтметры пераменнага току.

Акрамя таго, дзеючыя значэнні больш зручныя і таму, што менавіта яны непасрэдна вызначаюць сярэдняе значэнне $\bar{P}$ магутнасці пераменнага току, або, як прынята гаварыць, магутнасць пераменнага току P на ўчастку ланцуга:

$$P = I^2 R = UI.$$

Ваганні сілы току ў ланцугу з рэзістарам супадаюць па фазе з ваганнямі напружання. Магутнасць у ланцугу пераменнага току вызначаецца дзеючымі значэннямі сілы току і напружання.



1. Як звязаны сіла пераменнага току і напружанне ў ланцугу з рэзістарам?
2. У асвятляльных сетках пераменнага току прымяняюцца напружання 220 і 127 В. Якія амплітуды напружання ў гэтых сетках?
3. Што называюць дзеючымі значэннямі сілы току і напружання?

§ 19. КАНДЭНСАТАР У ЛАНЦУГУ ПЕРАМЕННАГА ТОКУ

Пастаянны ток не можа існаваць у ланцугу, які змяшчае кандэнсатар. Фактычна ж пры гэтым ланцуг аказваецца разамкнутым, паколькі абкладкі кандэнсатара падзелены дыэлектрыкам.

Пераменны ж ток можа цячы па ланцугу, які змяшчае кандэнсатар. У гэтым можна пераканацца пры дапамозе простага доследу.

Няхай у нас ёсць крыніцы пастаяннага і пераменнага напружання, прычым пастаяннае напружанне на заціскачках крыніцы роўна дзеючаму значэнню пераменнага напружання. Ланцуг складаецца з кандэнсатара і лямпы напальвання (рыс. 39), злучаных паслядоўна. Пры ўключэнні пастаяннага напружання (пераключальнік павернуты ўлева) лямпа не свеціцца. Але пры ўключэнні пераменнага напружання (пераключальнік павернуты ўправа) лямпа загараецца, калі ёмістасць кандэнсатара дастаткова вялікая.

Як жа пераменны ток можа цячы па ланцугу, калі ён фактычна разамкнуты (паміж пласцінамі кандэнсатара зарады перамяшчацца не могуць)? Тут адбываецца перыядычная зарадка і разрядка кандэнсатара пад дзеяннем пераменнага напружання. Ток, што ідзе па ланцугу пры перазарадцы кандэнсатара, награвяе ніць лямпы.

Знойдзем, як мяняецца з часам сіла току ў ланцугу, які змяшчае толькі кандэнсатар, калі супраціўленне правадоў і абкладак кандэнсатара можна не ўлічваць (рыс. 40).

Напружанне на кандэнсатары

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

будзе роўна напружанню на канцах ланцуга. Значыць,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t. \quad (2.34)$$

Зарад кандэнсатара мяняецца па гарманічнаму закону:

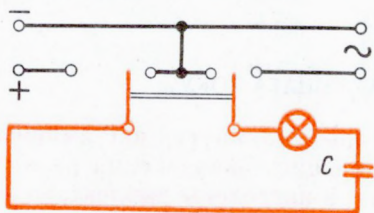
$$q = CU_m \cos \omega t. \quad (2.35)$$

Сіла току, якая з'яўляецца вытворнай зарады па часу, роўна

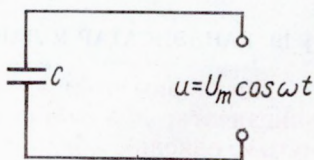
$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.36)$$

Значыць, ваганні сілы току апярэджваюць ваганні напру-

Рыс. 39



Рыс. 40



жання на кандэнсатары на $\frac{\pi}{2}$ (рыс. 41). Гэта значыць, што ў момант, калі кандэнсатар пачынае зараджацца, сіла току максімальная, а напружанне роўна нулю. Пасля таго як напружанне дасягае максімуму, сіла току становіцца роўнай нулю і г. д.

Амплітуда сілы току роўна

$$I_m = U_m C \omega. \quad (2.37)$$

Калі ўвесці абазначэнне

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \quad (2.38)$$

і замест амплітуд сілы току і напружання выкарыстаць іх дзеючыя значэнні, то атрымаем:

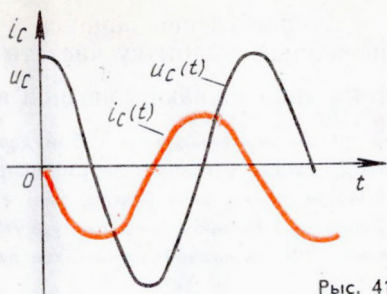
$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (2.39)$$

Велічыню X_C адваротную здабытку цыклічнай частаты на электрычную ёмістасць кандэнсатара, называюць *ёмістасным супраціўленнем*. Роля гэтай велічыні аналагічная ролі актыўнага супраціўлення R у законе Ома (2.25). Дзеючае значэнне сілы току звязана з дзеючым значэннем напружання на кандэнсатары зусім гэтак жа, як звязаны згодна з законам Ома сіла току і напружанне для ўчастка ланцуга пастаяннага току. Гэта і дазваляе разглядаць велічыню X_C як супраціўленне кандэнсатара пераменнаму току (ёмістаснае супраціўленне).

Чым большая ёмістасць кандэнсатара, тым большы згодна з формулай (2.37) ток перазарадкі. Гэта лёгка выявіць па павелічэнню напалу лямпы пры павелічэнні ёмістасці кандэнсатара. У той час як супраціўленне кандэнсатара пастаяннаму току бесканечна вялікае, яго супраціўленне пераменнаму току мае канечнае значэнне X_C . З ростам ёмістасці яно памяншаецца. Памяншаецца яно і з павелічэннем частаты.

Гэта можна ўбачыць, калі для жыўлення ланцуга, паказанага на рысунку 39, выкарыстаць генератар пераменнага току частаты, якая рэгулюецца. Плаўна павялічваючы частату пераменнага току, можна выявіць павелічэнне напалу лямпы. Яно выклікана павелічэннем сілы току за кошт памяншэння ёмістаснага супраціўлення X_C кандэнсатара.

У заключэнне адзначым, што на працягу чвэрці перыяду, калі кандэнсатар зараджаецца да максімальнага напружання, энергія паступае ў ланцуг і назапашваецца ў кандэнсатары ў форме энергіі электрычнага поля. У наступную чвэрць перыяду, пры разрадцы кандэнсатара, гэта энергія вяртаецца ў сетку.



Рыс. 41

Супраціўленне ланцуга з кандэнсатарам адваротна прапарцыянальна здабытку частаты на электраёмкасць. Ваганні сілы току апярэджваюць ваганні напружання на $\frac{\pi}{2}$.

1. Як звязаны паміж сабой дзеючыя значэнні сілы току і напружання на кандэнсатары ў ланцугу пераменнага току? 2. Ці вылучаецца энергія ў ланцугу, які мае толькі кандэнсатар, калі актыўнае супраціўленне ланцуга можна не ўлічваць? 3. Выключальнік ланцуга ўяўляе сабой свайго роду кандэнсатар. Чаму ж выключальнік надзейна размыкае ланцуг?

§ 20. ШПУЛЯ ІНДУКТЫЎНАСЦІ У ЛАНЦУГУ ПЕРАМЕННАГА ТОКУ

Індуктыўнасць у ланцугу ўплывае на сілу пераменнага току. Гэта можна даказаць з дапамогай простага доследу.

Складзём ланцуг са шпулі з вялікай індуктыўнасцю і электрычнай лямпы напалу (рыс. 42). З дапамогай пераключальніка можна падключыць гэты ланцуг або да крыніцы пастаяннага напружання, або да крыніцы пераменнага напружання. Пры гэтым пастаяннае напружанне і дзеючае значэнне пераменнага напружання павінны быць роўныя паміж сабой. Дослед паказвае, што лямпа гарыць ярчэй пры пастаянным напружанні. Значыць, дзеючае значэнне сілы пераменнага току ў ланцугу, які разглядаецца, меншае за сілу пастаяннага току.

Тлумачыцца гэта з'явай самаіндукцыі. З § 8 раздзела I вы ведаеце, што пры падключэнні шпулі да крыніцы пастаяннага напружання сіла току ў ланцугу нарастае паступова. Віхравое электрычнае поле, якое ўзнікае пры нарастанні сілы току, тармозіць рух электронаў. Толькі пасля некаторага часу сіла току дасягае найбольшага (што ўстанавілася) значэння, якое адпавядае дадзенаму пастаяннаму напружанню.

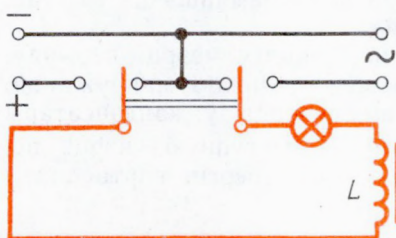
Калі напружанне хутка мяняецца, то сіла току не будзе паспываць дасягаць тых значэнняў, якія яна набыла б з цягам часу пры пастаянным напружанні.

Значыць, максімальнае значэнне сілы пераменнага току (яго

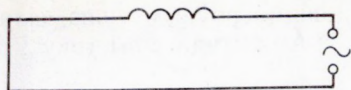
амплітуда) абмяжоўваецца індуктыўнасцю ланцуга і будзе тым меншае, чым большая індуктыўнасць і чым большая частата прыкладзенага напружання.

Вызначым сілу току ў ланцугу, што змяшчае шпулю, актыўнае супраціўленне якой можна не ўлічваць (рыс. 43). Для гэтага спачатку знойдзем сувязь паміж напружаннем на шпулі і ЭРС самаіндукцыі ў ёй.

Рыс. 42



Калі супраціўленне шпулі роўна нулю, то і напружанасць электрычнага поля ўнутры правадніка ў любы момант часу павінна быць роўна нулю. Інакш сіла току згодна з законам Ома была б бесканечна вялікай. Роўнасць нулю напружанасці поля аказваецца магчымай



Рыс. 43

таму, што напружанасць вярховага электрычнага поля $\vec{E}_i$, выкліканага пераменным магнітным полем, у кожным пункце роўная па модулю і процілеглая па напрамку напружанасці кулонаўскага поля $\vec{E}_k$, што ўтвараецца ў правадніку зарадамі, якія размешчаны на заціскачках крыніцы і правадах ланцуга.

З роўнасці $\vec{E}_i = -\vec{E}_k$ вынікае, што ўдзельная работа вярховага поля (г. зн. ЭРС самаіндукцыі e_i) роўная па модулю і процілеглая па знаку ўдзельнай рабоце кулонаўскага поля. Улічваючы, што ўдзельная работа кулонаўскага поля роўна напружанню на канцах шпулі, можна запісаць:

$$e_i = -u.$$

Пры змяненні сілы току па гарманічнаму закону

$$i = I_m \sin \omega t$$

ЭРС самаіндукцыі роўна:

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t. \quad (2.40)$$

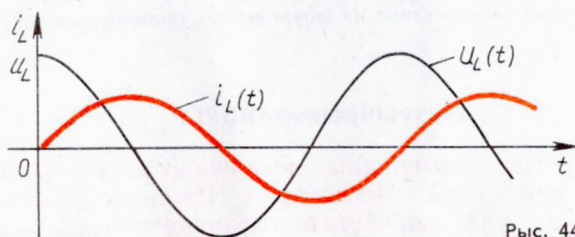
Паколькі $u = -e_i$, то напружанне на канцах шпулі аказваецца роўным:

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

дзе $U_m = L\omega I_m$ — амплітуда напружання.

Значыць, ваганні напружання на шпулі апыраджаюць ваганні сілы току на $\frac{\pi}{2}$ або, што тое ж самае, ваганні сілы току адстаюць ад ваганняў напружання на $\frac{\pi}{2}$.

У момант, калі напружанне на шпулі дасягае максімуму, сіла току роўна нулю (рыс. 44). У момант, калі напружанне ста-



Рыс. 44

новіцца роўным нулю, сіла току максімальная па модулю.

Амплітуда сілы току ў шпулі роўна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (2.41)$$

Калі ўвесці абазначэнне

$$\omega L = X_L \quad (2.42)$$

і замест амплітуд сілы току і напружання выкарыстаць іх дзеючыя значэнні, то атрымаем

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.43)$$

Велічыню X_L , роўную здабытку цыклічнай частаты на індуктыўнасць, называюць *індуктыўным супраціўленнем*.

Згодна з формулай (2.43) дзеючае значэнне сілы току звязана з дзеючым значэннем напружання і індуктыўным супраціўленнем суадноснай, падобнай да закону Ома для ланцуга пастаяннага току.

Індуктыўнае супраціўленне залежыць ад частаты. Пастаянны ток наогул «не заўважае» індуктыўнасці шпулі. Пры $\omega = 0$ індуктыўнае супраціўленне роўна нулю ($X_L = 0$).

Чым хутчэй змяняецца напружанне, тым большая ЭРС самаіндукцыі і тым меншая амплітуда сілы току.

Залежнасць індуктыўнага супраціўлення ад частаты няцяжка выявіць, калі для жыўлення ланцуга, паказанага на рысунку 42, узяць генератар пераменнага току частаты, якая рэгулюецца. Пры гэтым трэба таксама прадугледзець магчымасць змяняць індуктыўнасць шпулі (напрыклад, шляхам уключэння рознага ліку віткоў). Пры павелічэнні частаты або індуктыўнасці сіла току ў ланцугу памяншаецца і святэнне лампы слабее. Гэта сведчыць аб павелічэнні супраціўлення ланцуга з ростам L і ω .

Шпуля індуктыўнасці аказвае супраціўленне пераменнаму току. Гэта супраціўленне, названае індуктыўным, роўна здабытку частаты на індуктыўнасць. Ваганні сілы току ў ланцугу з індуктыўнасцю адстаюць па фазе ад ваганняў напружання па $\frac{\pi}{2}$.

? 1. Як звязаны паміж сабой дзеючыя значэнні сілы току і напружання на шпулі індуктыўнасці, актыўнае супраціўленне якой можна не ўлічваць? 2. Чаму ЭРС самаіндукцыі і напружанне на шпулі маюць процілеглыя знакі?

§ 21. РЕЗОНАНС У ЭЛЕКТРЫЧНЫМ ЛАНЦУГУ

Пры вывучэнні вымушаных механічных ваганняў мы пазнаёміліся з важнай з'явай — рэзанансам. Рэзананс назіраецца ў тым выпадку, калі ўласная частата ваганняў сістэмы супадае з ча-

статой змянення знешняй сілы. Калі трэнне малое, то амплітуда вымушаных ваганняў, што ўстанавіліся, рэзка павялічваецца. Супадзенне законаў механічных і электрамагнітных ваганняў адразу ж дазваляе зрабіць заключэнне аб магчымасці рэзанансу ў электрычным ланцугу, калі гэты ланцуг з'яўляецца вагальным контурам, які валодае пэўнай уласнай частатой ваганняў.

Пры механічных ваганнях рэзананс паказаны выразна пры малых значэннях каэфіцыента трэння μ . У электрычным ланцугу ролю каэфіцыента трэння адыгрывае актыўнае супраціўленне R . Менавіта ж наяўнасць гэтага супраціўлення ў ланцугу прыводзіць да ператварэння энергіі току ва ўнутраную энергію правадніка (праваднік награвецца). Таму рэзананс у электрычным вагальным контуры павінен быць выражаны выразна пры малым актыўным супраціўленні R .

Калі актыўнае супраціўленне малое, то ўласная частата ваганняў у контуры вызначаецца формулай

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Сіла току пры вымушаных ваганнях павінна дасягаць максімальных значэнняў, калі частата пераменнага напружання, прыкладзенага да контуру, роўна ўласнай частаце вагальнага контуру:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.44)$$

Рэзанансам у электрычным вагальным контуры называецца з'ява рэзкага ўзрастання амплітуды вымушаных ваганняў сілы току пры супадзенні частаты знешняга пераменнага напружання з уласнай частатой вагальнага контуру.

Амплітуда сілы току пры рэзанансе. Як і ў выпадку механічнага рэзанансу, пры рэзанансе ў вагальным контуры ствараюцца аптымальныя ўмовы для паступлення энергіі ад знешняй крыніцы ў контур. Магутнасць у контуры максімальная ў выпадку, калі сіла току супадае па фазе з напружаннем.

Не адразу пасля ўключэння знешняга пераменнага напружання ў ланцугу ўстанаўліваецца рэзананснае значэнне сілы току. Устанаўленне ваганняў адбываецца паступова. Амплітуда ваганняў сілы току нарастае да той пары, пакуль энергія, што вылучаецца за перыяд на рэзістары, не стане роўнай энергіі, якая паступае ў контур за гэты ж час:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m I_m}{2}.$$

Гэта ўраўненне пасля спрашчэння прыводзіцца да выгляду

$$I_m R = U_m. \quad (2.45)$$

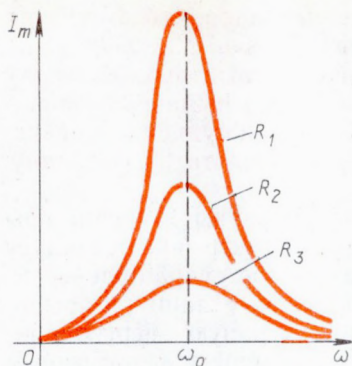


Рис. 45

Адсюль амплітуда ваганняў сілы току, што ўстанавіліся, пры рэзанансе вызначаецца ўраўненнем

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (2.46)$$

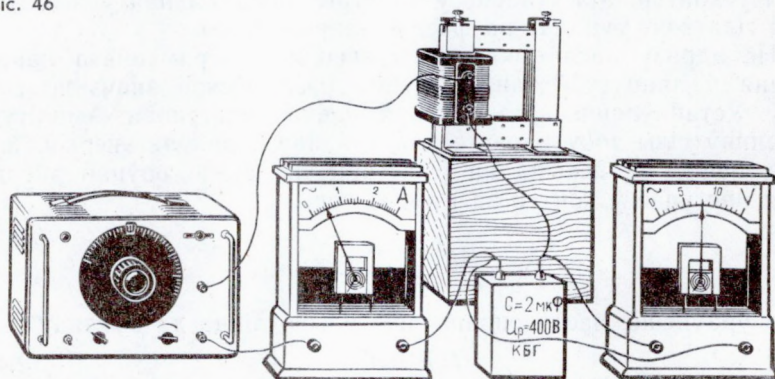
Пры $R \rightarrow 0$ рэзананснае значэнне сілы току неабмежавана ўзрастае: $(I_m)_{\text{рез}} \rightarrow \infty$. Наадварот, з павелічэннем R максімальнае значэнне сілы току памяншаецца, і пры вялікіх R гаварыць аб рэзанансе ўжо не мае сэнсу. Залежнасць амплітуды сілы току ад частаты пры розных супраціўленнях ($R_1 < R_2 < R_3$) паказана на рысунку 45.

Адначасова з ростам сілы току пры рэзанансе рэзка ўзрастаюць напружанні на кандэнсатары і шпулі індуктыўнасці. Гэтыя напружанні пры малым актыўным супраціўленні ў многа разоў перавышаюць знешняе напружанне. У гэтым можна пераканацца на наступным доследзе.

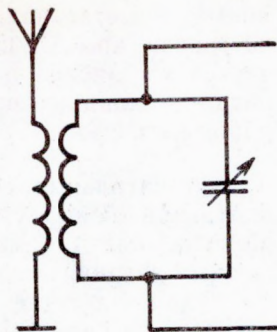
Для назірання рэзанансу ў электрычным ланцугу збіраюць устаноўку, паказаную на рысунку 46. У ёй выкарыстоўваецца знешняя крыніца пераменнага напружання рэгулюемай частаты. Павялічваючы паступова частату ваганняў знешняга напружання, можна назіраць, як змяняецца сіла току ў ланцугу, вымяраемая амперметрам, і напружанне на кандэнсатары або шпулі індуктыўнасці, якое вымяраецца вальтметрам. Гэтыя велічыні ўзрастаюць пры рэзанансе ў дзесяткі або нават сотні разоў.

Выкарыстанне рэзанансу ў радыёсувязі. З'ява электрычнага рэзанансу выкарыстоўваецца пры ажыццяўленні радыёсувязі. Радыёхвалі ад розных перадаючых станцый узбуджаюць у антэне радыёпрыёмніка пераменныя токі розных частот, паколькі кожная перадаючая радыёстанцыя працуе на сваёй частаце. З антэ-

Рис. 46



най індуктыўна звязаны вагальны контур (рыс. 47). У выніку электрамагнітнай індукцыі ў контурнай шпулі ўзнікаюць пераменныя ЭРС адпаведных частот і вымушаныя ваганні сілы току гэтых жа частот. Але толькі пры рэзанансе ваганні сілы току ў контуры і напружанні на контуры будуць значнымі. Маючы гэта на ўвазе, кажуць, што з ваганняў усіх частот, якія ўзбуджаны ў антэне, контур вылучае толькі ваганні, частата якіх роўна ўласнай частаце контуру. Настрой-ка контуру на патрэбную частату ω_0 звы-чайна ажыццяўляецца шляхам змянення ёмістасці кандэнсатара. У гэтым заключаецца настройка радыё-прыёмніка на пэўную радыёстанцыю.



Рыс. 47

Неабходнасць уліку магчымасці рэзанансу ў электрычным ланцугу. У некаторых выпадках рэзананс у электрычным лан-цугу можа прынесці вялікую шкоду. Калі ланцуг не разлічаны на работу ва ўмовах рэзанансу, то ўзнікненне рэзанансу пры-вядзе да аварыі. Празмерна вялікія токі могуць перагрэць пра-вады. Більшыя напружанні прывядуць да прабівання ізаляцыі. Аварыі такога характару нярэдка здараліся ў мінулым стагоддзі, калі дрэнна ўяўлялі сабе законы электрычных ваганняў і не ўмелі правільна разлічваць электрычныя ланцугі.

Пры вымушаных электрамагнітных ваганнях магчымы рэза-нанс — рэзкае ўзрастанне амплітуды ваганняў сілы току і на-пружання пры супадзенні частаты знешняга пераменнага напру-жання з уласнай частатой вагання. На з'яве рэзанансу засна-вана ўся радыёсвязь.

? 1. Ці можа амплітуда сілы току пры рэзанансе ў вагальным контуры з актыўным супраціўленнем R перавысіць сілу пастаяннага току ў ланцугу з такім жа актыўным супраціўленнем і пастаянным напружанням, роўным амплітудзе пераменнага напружання? 2. Чаму роўна рознасць фаз паміж ваган-нямі сілы току і напружання пры рэзанансе? 3. Пры якой умове рэзанансныя ўласцівасці контуру паказаны выразна?

§ 22. ГЕНЕРАТАР НА ТРАНЗІСТАРЫ. АЎТАВАГАННІ

Вымушаныя ваганні, якія мы разглядалі да гэтай пары, узні-каюць пад дзеяннем пераменнага напружання, якое выпрацоў-ваецца генератарамі на электрастанцыях. Такія генератары не могуць ствараць ваганні высокай частаты, неабходныя для радыё-связі. Спатрэбілася б незвычайна вялікая скорасць вярчэння ротара. Ваганні высокай частаты атрымліваюць з дапамогай

іншых прыстасаванняў, напрыклад з дапамогай генератара на транзістары. Ён названы так таму, што адной з асноўных яго частак з'яўляецца паўправадніковы прыбор — транзістар. Генератар — складаны прыбор і ўсведаміць для сябе прынцыпы яго работы нялёгка.

Аўтавагальныя сістэмы. Незатухаючыя вымушаныя ваганні падтрымліваюцца ў ланцугу дзеяннем знешняга перыядычнага напружання. Але магчымы іншыя спосабы атрымання незатухаючых ваганняў.

Няхай у сістэме, у якой моцць існаваць свабодныя электрамагнітныя ваганні, ёсць крыніца энергіі. Калі сама сістэма будзе рэгуляваць паступленне энергіі ў вагальны контур для кампенсацыі затрат энергіі на рэзістары, то ў ёй моцць узнікаць незатухаючыя ваганні.

Сістэмы, у якіх генерыруюцца незатухаючыя ваганні за кошт паступлення энергіі ад крыніцы ўнутры сістэмы, называюцца *аўтавагальнымі*. Незатухаючыя ваганні, якія існуюць у сістэме без уздзеяння на яе знешніх перыядычных сіл, называюцца *аўтаваганнямі*.

Генератар на транзістары — прыклад аўтавагальнай сістэмы. Ён змяшчае вагальны контур з кандэнсатарам ёмістасцю C і шпулю з індуктыўнасцю L , крыніцу энергіі і транзістар.

Як стварыць незатухаючыя ваганні ў контуры? Вядома, што калі кандэнсатар вагальнага контуру зараджаны, то ў контуры ўзнікнуць затухаючыя ваганні. У канцы кожнага перыяду ваганняў зарад на пласцінах кандэнсатара мае меншае значэнне, чым у пачатку перыяду. Сумарны зарад, вядома, захоўваецца, але адбываецца памяншэнне дадатнага зараду адной пласціны і адмоўнага — другой на роўныя па модулю значэнні. У выніку энергія ваганняў памяншаецца, паколькі яна згодна з формулай (2.1) прапарцыянальная квадрату зараду адной з пласцін кандэнсатара. Каб ваганні не затухалі, трэба кампенсаваць страты энергіі за кожны перыяд.

Папаўняць энергію ў контуры можна, падзараджваючы кандэнсатар. Для гэтага трэба перыядычна падключаць контур да крыніцы пастаяннага напружання. Кандэнсатар павінен падключацца да крыніцы толькі ў тыя інтэрвалы часу, калі далучаная да дадатнага полюса крыніцы пласціна зараджана дадатна, а далучаная да адмоўнага полюса — адмоўна (рыс. 48). Толькі ў гэтым выпадку крыніца падзараджае кандэнсатар і папаўняе яго энергію.

Калі ж ключ замкнецца ў момант, калі далучаная да дадатнага полюса крыніцы пласціна мае адмоўны зарад, а далучаная да адмоўнага полюса — дадатны, то кандэнсатар будзе разраджацца праз крыніцу (рыс. 49). Энергія кандэнсатара пры гэтым убывае.

Значыць, крыніца пастаяннага напружання, увесь час падключаемая да кандэнсатара контуру, не можа падтрымліваць

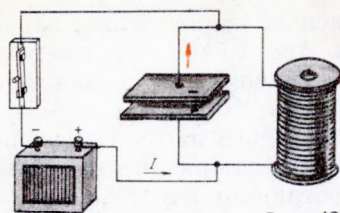


Рис. 48

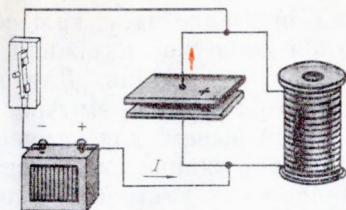


Рис. 49

у ім незатухаючых ваганні. Палавіну перыяду энергія паступае ў контур, а ў наступную палавіну перыяду вяртаецца ў крыніцу. У контуры незатухаючых ваганні ўстаноўяцца толькі пры ўмове, што крыніца будзе падключацца да контуру ў тыя інтэрвалы часу, калі магчыма перадача энергіі кандэсатару. Для гэтага неабходна забяспечыць аўтаматычную работу ключа (або *клапана*, як яго часта называюць). Пры высокай частаце ваганняў ключ павінен валодаць вялікім хуткадзеяннем. У якасці такога практычна безінерцыйнага ключа і выкарыстоўваецца транзістар.

Транзістар, напамнім, складаецца з трох розных паўправаднікоў: эмітэра, базы і калектара. Эмітэр і калектар маюць аднолькавыя асноўныя носьбіты зараду, напрыклад дзіркі (гэта паўправаднікі *p*-тыпу), а база мае асноўныя носьбіты процілеглага знака, напрыклад электроны (паўправаднік *n*-тыпу). Схематычная будова транзістара паказана на rysunku 50.

Работа генератара на транзістары. Спрошчаная схема генератара на транзістары паказана на rysunku 51. Вагальны контур злучаны паслядоўна з крыніцай напружання і транзістарам такім чынам, што на эмітэр пададзены дадатны патэнцыял, а на калектар — адмоўны. Пры гэтым пераход эмітэр — база (эмітэрны пераход) з'яўляецца прамым, але пераход база — калектар (калектарны пераход) аказваецца адваротным, і ток у ланцугу не ідзе. Гэта адпавядае разамкнутаму ключу на rysунках 48 і 49.

Каб у ланцугу контуру ўзнік ток і падзараджаў кандэсатар контуру пры ваганнях, трэба надаць базе адмоўны адносна эмітэра патэнцыял, прычым у тыя інтэрвалы часу, калі верхняя (гл. рис. 51) пласціна кандэсатара зараджана дадатна, а ніжняя — адмоўна. Гэта адпавядае замкнутаму ключу на rysунку 48.

Рис. 50

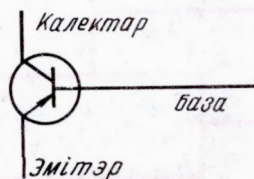
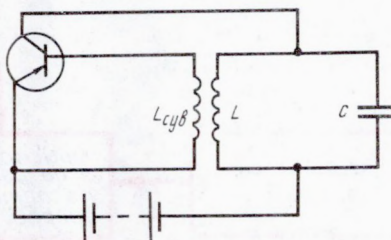


Рис. 51



У інтэрвале часу, калі верхняя пласціна кандэнсатара зараджана адмоўна, а ніжняя — дадатна, ток у ланцугу контуру павінен адсутнічаць. Для гэтага база павінна мець дадатны патэнцыял адносна эмітэра.

Такім чынам, для кампенсацыі страт энергіі ваганняў у контуры напружанне на эмітэрным пераходзе павінна перыядычна мяняць знак у строгім узгадненні з ваганнямі напружання на контуры. Неабходна, як гавораць, *адваротная сувязь*.

Адваротная сувязь у генератары, які разглядаецца, індуктыўная. Да эмітэрнага пераходу падключана шпуля індуктыўнасцю $L_{\text{сш}}$, індуктыўна звязаная са шпуляй індуктыўнасцю L контуру. Ваганні ў контуры ў выніку электрамагнітнай індукцыі ўзбуджаюць ваганні напружання на канцах першай шпулі і тым самым на эмітэрным пераходзе. Калі фаза ваганняў напружання на эмітэрным пераходзе падабрана правільна, то «штуршкі» току ў ланцугу контуру дзейнічаюць на контур у патрэбныя інтэрвалы часу і ваганні не затухаюць. Наадварот, амплітуда ваганняў у контуры ўзрастае да той пары, пакуль страты энергіі ў контуры не пачнуць дакладна кампенсавацца паступленнем энергіі ад крыніцы. Гэта амплітуда тым большая, чым большае напружанне крыніцы. Павелічэнне напружання вядзе да ўзмацнення «штуршкоў» току, што падзараджвае кандэнсатар.

Частата ваганняў у контуры вызначаецца індуктыўнасцю L шпулі контуру і ёмістасцю C кандэнсатара згодна з формулай Томсана:

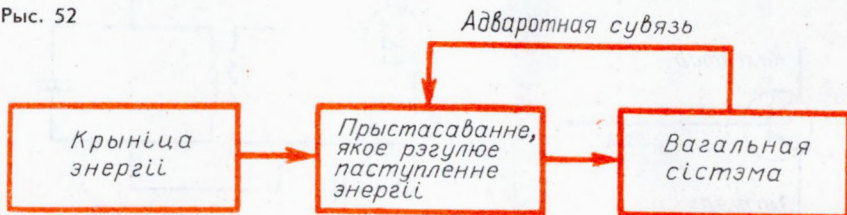
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Пры малых L і C частата ваганняў вялікая. Выявіць узнікненне ваганняў у генератары (узбуджэнне генератара) можна з дапамогай асцылографа, падаўшы на яго вертыкальна адхіляльныя пласціны напружанне з кандэнсатара.

Генератары на транзістарах шырока прымяняюцца ў мностве радыётэхнічных прыстасаванняў: у радыёпрыёмніках, перадаючых радыёстанцыях, узмацняльніках і г. д. Шырока прымяняюцца яны ў сучасных электронна-вылічальных машынах.

Асноўныя элементы аўтавагальнай сістэмы. На прыкладзе генератара на транзістары можна вылучыць асноўныя элементы, характэрныя для многіх аўтавагальных сістэм (рыс. 52):

Рыс. 52



1. Крыніца энергіі, за кошт якой падтрымліваюцца незатухаючыя ваганні (у генератары на транзістары гэта крыніца пастаяннага напружання).

2. Вагальная сістэма, г. зн. тая частка аўтавагальнай сістэмы, у якой непасрэдна адбываюцца ваганні (у генератары на транзістары гэта вагальны контур).

3. Прыстасаванне, якое рэгулюе паступленне энергіі ад крыніцы ў вагальную сістэму — «клапан» (у разгледжаным генератары ролю «клапана» адыгрывае транзістар).

4. Прыстасаванне, якое забяспечвае адваротную сувязь, з дапамогай якой вагальная сістэма кіруе «клапанам» (у генератары на транзістары гэта індуктыўная сувязь шпулі контуру са шпуляй у ланцугу эмітэр — база).

Прыклады іншых аўтавагальных сістэм. Аўтаваганні ўзбуджаюцца не толькі ў электрычных сістэмах, але і ў механічных. Да такіх сістэм належыць звычайны гадзіннік з маятнікам або балансірам (кольцам са спружынкай, якое выконвае вярчальныя ваганні). Крыніцай энергіі ў гадзінніку служыць патэнцыяльная энергія паднятай гіры або сціснутай спружыны.

Да аўтавагальных сістэм адносяцца электрычны званок з перарывальнікам, свісток, арганная труба і многае іншае. Наша сэрца і лёгкія таксама можна разглядаць як аўтавагальныя сістэмы.

Мы пазнаёміліся з найбольш складаным відам ваганняў — аўтаваганнямі. У аўтавагальных сістэмах выпрацоўваюцца незатухаючыя ваганні самых розных частот. Без такіх сістэм не было б ні сучаснай радыёсувязі, ні тэлебачання, ні ЭВМ.

? 1. Што такое аўтавагальная сістэма? 2. У чым адрозненне аўтаваганняў ад вымушаных ваганняў і ад свабодных? 3. Апішыце ўласцівасці p — n -пераходу ў паўправадніках. 4. Якая будова транзістара? 5. Якая роля транзістара ў генерацыі аўтаваганняў? 6. Як ажыццяўляецца адваротная сувязь у генератары на транзістары? 7. Назавіце асноўныя элементы аўтавагальнай сістэмы. 8. Прывядзіце прыклады аўтавагальных сістэм, якія не ўпамінаюцца ў тэксце.

* * *

На гэтым мы заканчваем вывучэнне электрамагнітных ваганняў. Звяртаем вашу ўвагу на адну рысу, агульную для ўсіх вагальных працэсаў. Пры вывучэнні перыядычных вагальных з'яў галоўную цікавасць уяўляюць агульныя прыметы, якія характарызуюць паўтаральнасць працэсаў, а не стан сістэмы, якая вагаецца ў кожны момант часу. Важна ведаць амплітуду, перыяд ваганняў, г. зн. велічыні, якія характарызуюць працэс цалкам. Пры вымушаных ваганнях трэба ведаць суадносіны частот знешняга напружання і свабодных ваганняў. Іменна яны вызначаюць характар ходу працэсу, яго інтэнсіўнасць.

Падкрэслім яшчэ раз цікавую тоеснасць агульнага характару працэсаў рознай прыроды, тоеснасць матэматычных ураўненняў, якія апісваюць электрамагнітныя і механічныя ваганні.

ПРЫКЛАДЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ

1. Максімальны зарад на абкладках кандэнсатара вагальнага контуру $q_m = 10^{-6}$ Кл. Амплітуднае значэнне сілы току ў контуры $I_m = 10^{-3}$ А. Вызначце перыяд ваганняў. Страты на награванне праваднікоў не ўлічваць.

Рашэнне. Згодна з законам захавання энергіі максімальнае значэнне энергіі электрычнага поля кандэнсатара роўна максімальнаму значэнню энергіі магнітнага поля шпулі:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Адсюль

$$LC = \frac{q_m^2}{I_m^2}, \text{ або } \sqrt{LC} = \frac{q_m}{I_m}.$$

Значыць,

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi \frac{q_m}{I_m} \approx 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

2. Рамка плошчай $S = 3000 \text{ см}^2$ мае $N = 200$ віткоў і верціцца ў аднародным магнітным полі з індукцыяй $B = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Максімальная ЭРС у рамцы $\mathcal{E}_m = 1,5$ В. Вызначце час аднаго абароту.

Рашэнне. Амплітуда ЭРС індукцыі ў адным вітку роўна $BS\omega$.

Паколькі ЭРС, якія ўзнікаюць у асобных вітках рамкі, складаюцца, то для амплітуды ЭРС у рамцы, якая мае N віткоў, атрымаем:

$$\mathcal{E}_m = NBS\omega.$$

Адсюль

$$\omega = \frac{\mathcal{E}_m}{NBS}.$$

Час аднаго абароту рамкі можна знайсці так:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi NBS}{\mathcal{E}_m} \approx 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

3. Шпуля з індуктыўным супраціўленнем $X_L = 500$ Ом далучана да крыніцы пераменнага напружання, частата якога $\nu = 1000$ Гц. Дзеючае значэнне напружання $U = 100$ В. Вызначце амплітуду сілы току I_m ў ланцугу і індуктыўнасць шпулі L . Актыўнае супраціўленне шпулі не ўлічваць.

Рашэнне. Індуктыўнае супраціўленне шпулі выражаецца формулай

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L.$$

Адсюль

$$L = \frac{X_L}{2\pi\nu} = 0,08 \text{ Гн.}$$

Паколькі амплітуда напружання звязана з яго дзеючым значэннем суадносінай $U_m = U\sqrt{2}$, то для амплітуды сілы току атрымаем:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L} = \frac{U\sqrt{2}}{X_L} = 0,28 \text{ А.}$$

4. У ланцуг пераменнага току з частотой $\nu = 500$ Гц уключана шпуля з індуктыўнасцю $L = 10$ мГн. Якой ёмістасці кандэнсатар трэба ўключыць у гэты ланцуг, каб надышоў рэзананс?

Рашэнне. Электрычны ланцуг, аб якім гаворыцца ва ўмове задачы, уяўляе сабой вагальны контур. Рэзананс у гэтым ланцугу надыдзе, калі частата пераменнага току будзе роўна ўласнай частаце вагальнага контуру ($\nu = \nu_0$). Але

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

таму і

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Адсюль

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L \nu^2} \approx 10^{-5} \text{ Ф} = 10 \text{ мкФ.}$$

ПРАКТЫКАВАННЕ 2

1. Пасля таго як кандэнсатару вагальнага контуру быў нададзены зарад $q = 10^{-5}$ Кл, у контуры ўзніклі затухаючыя ваганні. Якая колькасць цеплыні вылучыцца ў контуры на той час, калі ваганні ў ім поўнасьцю затухнуць? Ёмістасць кандэнсатара $C = 0,01$ мкФ.

2. Вагальны контур складаецца са шпулі з індуктыўнасцю $L = 0,003$ Гн і плоскага кандэнсатара ёмістасцю $C = 13,4$ пФ. Вызначце перыяд свабодных ваганняў у контуры. Які будзе перыяд, калі прастору паміж абкладкамі кандэнсатара запоўніць дыэлектрыкам з дыэлектрычнай пранікальнасцю $\epsilon = 4$?

3. У якіх межах павінна змяняцца індуктыўнасць шпулі вагальнага контуру, каб частата ваганняў змянялася ад 400 да 500 Гц? Ёмістасць кандэнсатара 10 мкФ.

4. Знайдзіце амплітуду ЭРС, якая наводзіцца ў рамцы, што верціцца ў аднародным магнітным полі, калі частата вярчэння складае 50 аб/с, плошча рамкі 100 см^2 і магнітная індукцыя 0,2 Тл.

5. У драцяной рамцы з плошчай $S = 100 \text{ см}^2$ узбуджаецца ЭРС індукцыі з амплітудай $\mathcal{E}_m = 1,4$ В. Лік віткаў у рамцы $N = 200$. Рамка верціцца з пастаянай вуглавой скорасцю ў аднародным магнітным полі, індукцыя якога $B = 0,15$ Тл.

У пачатковы момант плоскасць рамкі перпендыкулярная вектару $\vec{B}$. Вызначце ЭРС індукцыі ϵ ў рамцы праз час $t = 0,1$ с пасля пачатку яе вярчэння.

6. Шпуля з індуктыўнасцю $L = 0,08$ Гн далучана да крыніцы пераменнага напружання з частотой $\nu = 1000$ Гц. Дзеючае значэнне напружання $U = 100$ В. Вызначце амплітуду току I_m ў ланцугу.

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 2¹

1. Пры электрамагнітных ваганнях адбываюцца перыядычныя змяненні электрычнага зараду, сілы току і напружання. Электрамагнітныя ваганні падзяляюцца на свабодныя, вымушаныя і аўтаваганні.

2. Найпрасцейшай сістэмай, у якой назіраюцца свабодныя электрамагнітныя ваганні, з'яўляецца вагальны контур. Ён складаецца з драцяной шпулі і кандэнсатара. Ураўненне, якое апісвае электрамагнітныя ваганні, мае выгляд:

$$q'' = -\omega_0^2 q,$$

дзе q — зарад кандэнсатара, q'' — другая вытворная зараду па часу, а $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ — пастаянная велічыня, што залежыць ад параметраў вагальнага контуру: індуктыўнасці L і ёмістасці C . Дакладна такое ж па форме ўраўненне апісвае ваганні цела, змацаванага са sprужынай або матэматычнага маятніка.

3. Рашэнне ўраўнення, якое апісвае свабодныя ваганні, выражаецца або праз косінус, або праз сінус:

$$q = q_m \cos \omega_0 t \text{ або } q = q_m \sin \omega_0 t.$$

4. Ваганні, якія адбываюцца па закону косінуса або сінуса, называюцца гарманічнымі. Максімальнае значэнне зараду q_m называецца амплітудай ваганняў зараду. Велічыня ω_0 называецца цыклічнай частотой ваганняў і выражаецца праз лік ваганняў у секунду ν так: $\omega_0 = 2\pi\nu$.

Мінімальны прамежак часу, праз які вагальны працэс поўнасьцю паўтараецца, называецца перыядам ваганняў. Перыяд выражаецца праз цыклічную частату наступным чынам:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Велічыню, якая стаіць пад знакам косінуса або сінуса, называюць фазай ваганняў. Фаза вызначае стан вагальнай сістэмы ў адвольны момант часу пры зададзенай амплітудзе ваганняў.

5. З-за наяўнасці ў контуры супраціўлення ваганні з цягам часу затухаюць.

6. Вымушаныя ваганні, г. зн. пераменны электрычны ток,

¹ Парабіце тое ж самае, што было рэкамендавана перад кароткімі вынікамі раздзела 1. Колькасць істотных пунктаў каля дзесяці.

узнікаюць у ланцугу пад дзеяннем знешняга перыядычнага напружання. Паміж ваганнямі напружання і сілы току ў агульным выпадку ёсць зрух фаз ϕ .

7. Сярэдняя магутнасць у ланцугу пераменнага току вызначаецца дзеючымі значэннямі сілы току і напружання.

8. Пры супадзенні частаты знешняга пераменнага напружання з уласнай частатой вагальнага контуру надыходзіць рэзананс — рэзкае ўзрастанне амплітуды вымушаных ваганняў сілы току. Рэзананс паказаны выразна толькі пры малым актыўным супраціўленні контуру.

Адначасова з ўзрастаннем сілы току адбываецца рэзкае павелічэнне напружання на кандэнсатары і шпুলі. З'ява электрычнага рэзанансу выкарыстоўваецца пры радыёсувязі.

9. Аўтаваганні ўзбуджаюцца ў вагальным контуры генератара на транзістары за кошт энергіі і крыніцы пастаяннага напружання. У генератары выкарыстоўваецца транзістар, г. зн. паўправадніковае прыстасаванне, якое складаецца з эмітэра, базы і калектара і мае два $p-n$ -пераходы. Ваганні ў контуры выклікаюць ваганні напружання паміж эмітэрам і базай, якія ў сваю чаргу кіруюць сілай току ў ланцугу вагальнага контуру (адваротная сувязь). Ад крыніцы напружання ў контур паступае энергія, якая кампенсуе страты энергіі ў контуры на рэзістары.

Раздзел 3

ВЫТВОРЧАСЦЬ, ПЕРАДАЧА І ВЫКАРЫСТАННЕ ЭЛЕКТРЫЧНАЙ ЭНЕРГІІ

Электрычная энергія мае бясспрэчныя перавагі ў параўнанні з усімі іншымі відамі энергіі. Яе можна перадаваць па правадах на вялікія адлегласці з параўнальна малымі стратамі і зручна размяркоўваць паміж спажывцамі. Галоўнае ж у тым, што гэту энергію пры дапамозе дастаткова простых прыстасаванняў лёгка ператварыць у любыя іншыя формы: механічную, унутраную (нагрыванне цел), энергію святла і г. д.

Пераменны ток мае тую перавагу перад пастаянным, што напружанне і сілу току можна ў вельмі шырокіх межах пераўтвараць (трансфармаваць) амаль без страт энергіі. Такія пераўтварэнні неабходныя ў многіх электра- і радыётэхнічных прыстасаваннях. Але асабліва вялікая неабходнасць у трансфармацыі напружання і току ўзнікае пры перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці.

§ 23. ГЕНЕРАВААННЕ ЭЛЕКТРЫЧНАЙ ЭНЕРГІІ

Перш за ўсё пазнаёмімся з прыстасаваннямі, якія вырабляюць электрычны ток.

Электрычны ток выпрацоўваецца ў генераторах — прыстасаваннях, якія пераўтвараюць энергію таго ці іншага віду ў электрычную энергію. Да генератараў адносяцца гальванічныя элементы, электростатычныя машыны, тэрмабатарэі¹, сонечныя батарэі і да т. п. Даследуюцца магчымасці стварэння прыწყпова новых тыпаў генератараў. Напрыклад, распрацоўваюцца так званыя паліўныя элементы, у якіх энергія, што вызваляецца ў выніку рэакцыі вадароду з кіслародам, непасрэдна ператвараецца ў электрычную.

Вобласць прымянення кожнага з пералічаных відаў генератараў электраэнергіі вызначаецца іх характарыстыкамі. Так, электростатычныя машыны ствараюць высокую рознасць патэнцыялаў, але не здольныя стварыць у ланцугу колькі-небудзь значную сілу току. Гальванічныя элементы могуць даць вялікі ток, але працягласць іх дзеяння невялікая.

Пераважную ролю ў наш час адыгрываюць *электрамеханічныя індукцыйныя генератары пераменнага току*. У гэтых генераторах механічная энергія ператвараецца ў электрычную. Іх дзеянне заснавана на з'яве электрамагнітнай індукцыі. Такія генератары маюць параўнальна простую будову і дазваляюць атрымліваць вялікія токі пры дастаткова высокім напружанні.

У далейшым, гаворачы аб генераторах, мы будзем мець на ўвазе іменна індукцыйныя электрамеханічныя генератары.

Генератар пераменнага току. Прынцып дзеяння генератара пераменнага току ўжо быў разгледжаны ў § 17.

Цяпер ёсць многа розных тыпаў індукцыйных генератараў. Але ўсе яны складаюцца з адных і тых жа асноўных частак. Гэта, па-першае, электрамагніт або пастаянны магніт, які стварае магнітнае поле, і, па-другое, абмотка, у якой індукцыруецца пераменная ЭРС (у разгледжанай мадэлі генератара — гэта рамка, якая верціцца). Паколькі ЭРС, што наводзіцца ў паслядоўна злучаных вітках, складаюцца, то амплітуда ЭРС індукцыі ў рамцы прапарцыянальная ліку віткоў у ёй. Яна прапарцыянальная таксама амплітудзе пераменнага магнітнага патоку $\Phi_m = BS$ праз кожны віток (гл. § 17).

Для атрымання вялікага магнітнага патоку ў генераторах прымяняюць спецыяльную магнітную сістэму, якая складаецца з двух стрыжняў, зробленых з электратэхнічнай сталі. Абмоткі, якія ўтвараюць магнітнае поле, размешчаны ў пазах аднаго са стрыжняў, а абмоткі, у якіх індукцыруецца ЭРС, — у пазах другога. Адзін са стрыжняў (звычайна ўнутраны) разам са сваёй абмоткай верціцца вакол гарызантальнай або вертыкальнай восі. Таму ён называецца *ротарам*. Нерухомы стрыжань з яго абмоткай называюць *статарам*. Зазор паміж стрыжнямі статара і ротара робяць як мага меншым. Гэтым забяспечваецца найбольшае значэнне патоку магнітнай індукцыі.

¹ У тэрмабатарэях выкарыстоўваецца ўласцівасць двух кантактаў рознародных матэрыялаў ствараць ЭРС за кошт рознасці тэмператур кантактаў.

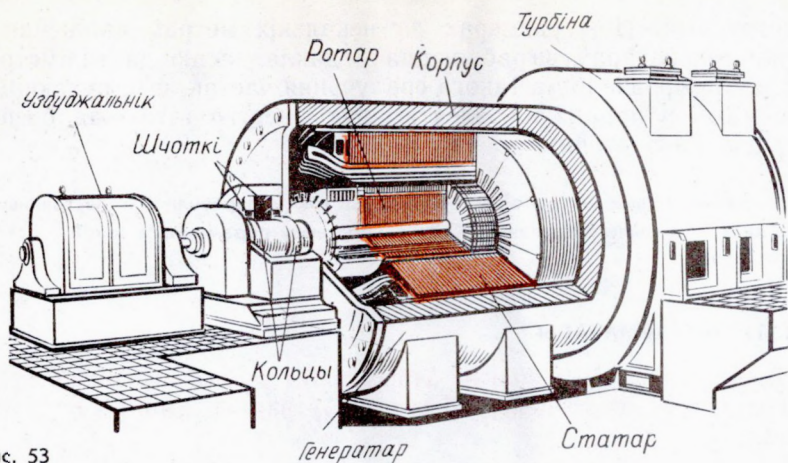


Рис. 53

У показанай на рысунку 24 мадэлі генератара верціцца драцяная рамка, якая з'яўляецца ротарам (праўда, без жалезнага стрыжня). Магнітнае поле стварае нерухомы пастаянны магніт. Зразумела, можна было б зрабіць і наадварот — вярцець магніт, а рамку пакінуць нерухомай.

У вялікіх прамысловых генератарах верціцца іменна электрамагніт, які з'яўляецца ротарам, у той час як абмоткі, у якіх наводзіцца ЭРС, укладзены ў пазы статора і застаюцца нерухомымі. Справа ў тым, што падводзіць ток да ротара або адводзіць яго з абмоткі ротара ў знешні ланцуг прыходзіцца пры дапамозе слізаючых кантактаў. Для гэтага ратар забяспечваецца кантактавымі кольцамі, далучанымі да канцоў яго абмоткі (рыс. 53). Нерухомыя пласціны — шчоткі — прыціснуты да кольцаў і ажыццяўляюць сувязь абмоткі ротара са знешнім ланцугом. Сіла току ў абмотках электрамагніта, які стварае магнітнае поле, значна меншая за сілу току, якую аддае генератар у знешні ланцуг. Таму ток, які генерыруецца, зручней здымаць з нерухомых абмотак, а праз слізаючыя кантакты падводзіць параўнальна слабы ток да электрамагніта, што верціцца. Гэты ток выпрацоўваецца асобным генератарам пастаяннага току (узбуджальнікам), які размешчаны на тым жа вале¹.

У маламагутных генератарах магнітнае поле ствараецца пастаянным магнітам, які верціцца. У такім выпадку кольцы і шчоткі наогул не патрэбныя.

З'яўленне ЭРС у нерухомах абмотках статора тлумачыцца ўзнікненнем у іх віхравога электрычнага поля, выкліканага змяненнем магнітнага патоку пры вярчэнні ротара.

Сучасны генератар электрычнага току — гэта буйное збудаванне з медных правадоў, ізаляцыйных матэрыялаў і сталёных

¹ Цяпер пастаянны ток у абмотку ротара ў многіх выпадках падаюць са старанай абмоткі гэтага ж генератара праз выпрамляльнік.

канструкцый. Пры размерах да некалькіх метраў важнейшыя дэталі генератараў вырабляюцца з дакладнасцю да міліметра. Нідзе ў прыродзе няма такога спалучэння частак, што рухаюцца, якія маглі б параджаць электрычную энергію гэтак жа бесперапынна і эканамічна.

1. Якімі перавагамі валодае пераменны ток у параўнанні з пастаянным?
2. На якім прынцыпе заснавана работа генератараў пераменнага току?

§ 24. ТРАНСФАРМАТАРЫ

Электрычны ток ніколі не атрымаў бы такога шырокага прымянення, калі б яго нельга было пераўтвараць амаль без страты энергіі.

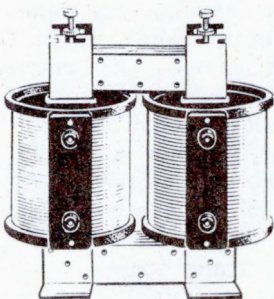
Прызначэнне трансфарматараў. ЭРС магутных генератараў электрастанцый звычайна даволі вялікая. Між тым у практыцы часцей за ўсё трэба не вельмі высокае напружанне.

Пераўтварэнне пераменнага току, пры якім напружанне павялічваецца або памяншаецца ў некалькі разоў практычна без страты магутнасці, ажыццяўляецца з дапамогай *трансфарматараў*.

Упершыню трансфарматыры былі выкарыстаны ў 1878 г. рускім вучоным П. М. Яблачкавым для жыўлення вынайздзеных ім «электрычных свечак».

Будова трансфарматара. Трансфарматар складаецца з замкнутага сталёнага стрыжня, сабранага з пласцін, на які надзеты дзве (часам і больш) шпулі з драцянымі абмоткамі (рыс. 54).

Рыс. 54



Рыс. 55



Адна з абмотак, якая называецца *першаснай*, падключаецца да крыніцы пераменнага напружання. Другая абмотка, да якой далучаюць «нагрузку», г. зн. прыборы і прыстасаванні, якія спажываюць электраэнергію, называецца *другаснай*. Умоўнае абазначэнне трансфарматара прыведзена на рыс. 55.

Трансфарматар на халастым хаду. Дзеянне трансфарматара заснавана на з'яве электрамагнітнай індукцыі. Пры праходжанні пераменнага току па першаснай абмотцы ў стрыжні з'яўляецца пераменны магнітны паток, які ўзбуджае ЭРС індукцыі ў кожнай абмотцы. Сстрыжань з трансфарматарнай сталі канцэнтруе магнітнае поле, так што магнітны паток існуе практычна толькі ўнутры стрыжня і аднолькавы ва ўсіх яго сячэннях.

Імгненнае значэнне ЭРС індукцыі e ў любым вітку першаснай або другаснай абмоткі аднолькавае. Згодна з законам Фарадэя яно вызначаецца формулай

$$e = -\Phi', \quad (3.1)$$

дзе Φ' — вытворная патоку магнітнай індукцыі па часу. Калі $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, то

$$\Phi' = -\omega \Phi_m \sin \omega t. \quad (3.2)$$

Значыць,

$$e = \omega \Phi_m \sin \omega t,$$

або

$$e = \mathcal{E}_m \sin \omega t, \quad (3.3)$$

дзе $\mathcal{E}_m = \omega \Phi_m$ — амплітуда ЭРС у адным вітку.

У першаснай абмотцы, якая мае N_1 віткоў, поўная ЭРС індукцыі e_1 роўна $N_1 e$. У другаснай абмотцы поўная ЭРС e_2 роўна $N_2 e$ (N_2 — лік віткоў гэтай абмоткі). Адсюль вынікае, што

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (3.4)$$

Звычайна актыўнае супраціўленне абмотак трансфарматара малое, і яго можна не ўлічваць. У гэтым выпадку модуль напружання на заціскачках шпулі прыблізна роўны модулю ЭДС індукцыі:

$$|u_1| \approx |e_1|. \quad (3.5)$$

Пры разамкнутай другаснай абмотцы трансфарматара ток у ёй не ідзе і мае месца суадносіна

$$|u_2| = |e_2|. \quad (3.6)$$

Імгненныя значэнні ЭРС e_1 і e_2 змяняюцца сінфазна (адначасова дасягаюць максімуму і адначасова праходзяць праз нуль). Таму іх адносіну ў формуле (3.4) можна замяніць адносінай дзеючых значэнняў $\mathcal{E}_1$ і $\mathcal{E}_2$ гэтых ЭРС або, улічваючы роўнасці (3.5) і (3.6), адносінай дзеючых значэнняў напружанняў U_1 і U_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = K. \quad (3.7)$$

Велічыня K называецца *каэфіцыентам трансфармацыі*. Пры $K > 1$ трансфарматар з'яўляецца паніжаючым, а пры $K < 1$ — павышаючым.

Работа нагружанага трансфарматара. Калі да канцоў другаснай абмоткі далучыць ланцуг, які спажывае электраэнергію, або, як кажуць, нагрузіць трансфарматар, то сіла току ў другаснай абмотцы ўжо не будзе роўна нулю. Ток, які з'явіўся, утварае ў стрыжні свой пераменны магнітны паток, які па правілу Ленца павінен паменшыць змяненні магнітнага патоку ў стрыжні.

Але памяншэнне амплітуды ваганняў рэзультуючага магнітнага патоку павінна, у сваю чаргу, паменшыць ЭРС індукцыі ў першаснай абмотцы. Аднак гэта немагчыма, таму што згодна з (3.5) $|u_1| \approx |e_1|$. Таму пры замыканні ланцуга другаснай абмоткі аўтаматычна павялічваецца сіла току ў першаснай абмотцы. Яго амплітуда ўзрастае такім чынам, каб аднавіць ранейшае значэнне амплітуды ваганняў рэзультуючага магнітнага патоку.

Павелічэнне сілы току ў ланцугу першаснай абмоткі адбываецца ў адпаведнасці з законам захавання энергіі: аддача электраэнергіі ў ланцуг, далучаны да другаснай абмоткі трансфарматара, суправаджаецца спажываннем ад сеткі такой жа энергіі першаснай абмоткай. Магутнасць у першасным ланцугу пры нарузцы трансфарматара, блізкай да намінальнай, прыблізна роўная магутнасці ў другасным ланцугу:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (3.8)$$

Адсюль

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.9)$$

Гэта азначае, што, павышаючы з дапамогай трансфарматара напружанне ў некалькі разоў, мы ў столькі ж разоў памяншаем сілу току (і наадварот).

У сучасных магутных трансфарматарах сумарныя страты энергіі не перавышаюць 2—3 %.

Трансфарматар пераўтварае пераменны электрычны ток такім чынам, што здабытак сілы току на напружанне прыблізна аднолькавы ў першаснай і другаснай абмотках.

? 1. Што такое каэфіцыент трансфармацыі? 2. Чаму ненагружаны трансфарматар спажывае вельмі мала энергіі?

§ 25. ВЫТВОРЧАСЦЬ І ВЫКАРЫСТАННЕ ЭЛЕКТРЫЧНАЙ ЭНЕРГІІ

У наш час узровень вытворчасці і спажывання энергіі¹ — адзін з найважнейшых паказчыкаў развіцця прадукцыйных сіл грамадства. Вядучую ролю пры гэтым адыгрывае электраэнергія — самая універсальная і зручная для выкарыстання форма энергіі. Калі падваенне спажывання энергіі ў свеце адбываецца прыкладна за 25 гадоў, то падваенне спажывання электраэнергіі адбываецца ў сярэднім за 10 гадоў. Гэта азначае, што ўсё

¹ Зразумела, пры гэтым сама энергія не знікае. Задача энергетыкі заключаецца толькі ў атрыманні энергіі ў форме, найбольш зручнай для спажывання. У працэсе спажывання энергія ў канечным выніку пераходзіць галоўным чынам ва ўнутраную энергію (у цеплыню).

больш і больш працэсаў, звязаных з расходаваннем энерга-рэсурсаў, пераводзіцца на электраэнергію.

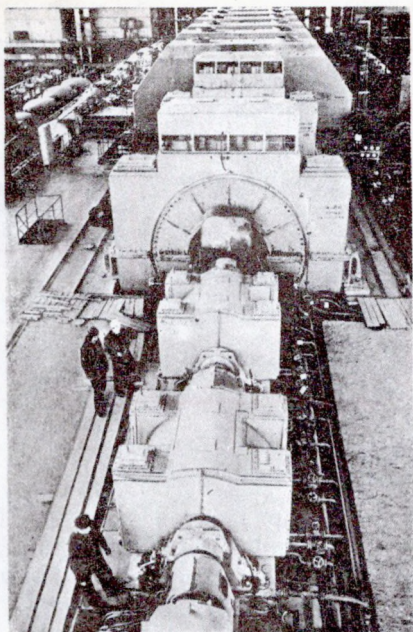
Вытворчасць электраэнергіі.

Вырабляецца электраэнергія на вялікіх і малых электрычных станцыях у асноўным пры дапамозе электрамеханічных індукцыйных генератараў. Існуе два асноўныя тыпы электрастанцый: цеплавыя і гідрэлектрычныя. Адрозніваюцца гэтыя электрастанцыі характарам рухавікоў, якія верцяць ротары генератараў.

На цеплавых электрастанцыях крыніцай энергіі служыць паліва: вугаль, газ, нафта, мазут, гаручыя сланцы. Ротары электрычных генератараў прыводзяцца ў вярчэнне паравымі і газавымі турбінамі або рухавікамі ўнутранага згарання. Найбольш эканамічнымі з'яўляюцца буйныя цеплавыя паратурбінныя электрастанцыі (скарочана ЦЭС). Большасць ЦЭС нашай краіны выкарыстоўваюць у якасці паліва вугальны пыл. Для вырапаўкі 1 кВт·г электраэнергіі затрачваецца некалькі соцень грамаў вугалю. У паравым катле звыш 90 % энергіі, якая вылучаецца палівам, перадаецца пары. У турбіне кінетычная энергія струменяў пары перадаецца ротару. Вал турбіны жорстка злучаны з валам генератара. Паравыя турбагенератары вельмі быстраходныя: лік абаротаў складае некалькі тысяч у мінуту.

З курса фізікі X класа вядома, што ККДз цеплавых рухавікоў павялічваецца з ростам пачатковай тэмпературы рабочага цела. Таму пару, што паступае ў турбіну, даводзяць да высокіх параметраў: тэмпературу — амаль да 550°C і ціск — да 25 МПа. Кэфіцыент карыснага дзеяння ЦЭС дасягае 40 %. Большая частка энергіі страчваецца разам з гарачай адпрацаванай парай. Пэратварэнні энергіі паказаны на схеме, якая прыведзена на рысунку 56.

Спецыяльныя цеплавыя электрастанцыі, так званыя цепла-электрацэнтралі (ЦЭЦ), дазваляюць значную частку энергіі адпрацаванай пары выкарыстаць на прамысловых прадпрыемствах і для бытавых патрэб (награванне вады для ацяплення і гарачага водазабеспячэння). У выніку ККДз ЦЭЦ дасягае 60—70 %. Цяпер ЦЭС у нашай краіне даюць каля 40 % усёй электраэнергіі, забяспечваюць электраэнергіяй і цеплынёй больш чым 800 гарадоў.



Энергаблок магутнасцю 1 млн 200 кВт
Кастрамской ДРЭС.

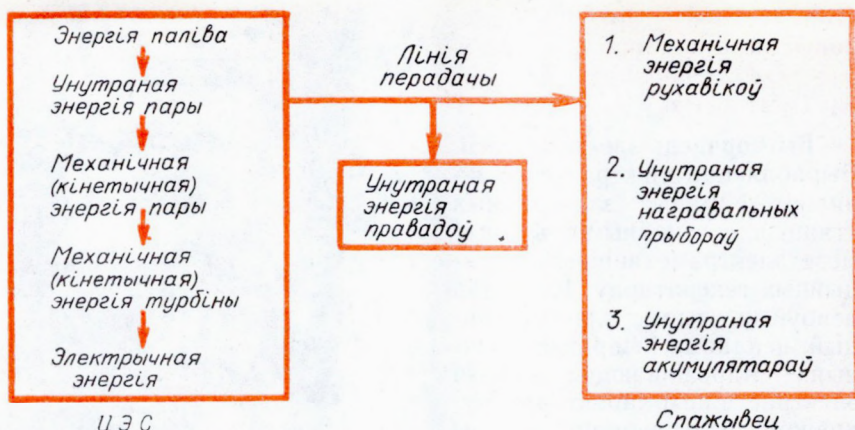


Рис. 56

На гідраэлектрастанцыях (ГЭС) выкарыстоўваецца для вярчэння ротараў генератараў патэнцыяльная энергія вады. Ротары электрычных генератараў прыводзяцца ў вярчэнне гідраўлічнымі турбінамі. Магутнасць станцыі залежыць ад рознасці ўзроўняў вады (напор), што ствараецца плацінай, і ад масы вады, якая праходзіць праз турбіну ў секунду (расход вады). Пераўтварэнні энергіі паказаны на схеме, якая прыведзена на рысунку 57.

Гідраэлектрастанцыі даюць каля 20 % усёй электраэнергіі, якая выпрацоўваецца ў нашай краіне.

Усё большую ролю ў энергетыцы пачынаюць адыгрываць атамныя электрастанцыі (АЭС). У цяперашні час АЭС нашай краіны даюць каля 15,7 % электраэнергіі, якая выпрацоўваецца.

Выкарыстанне электраэнергіі. Галоўным спажыўцом электра-

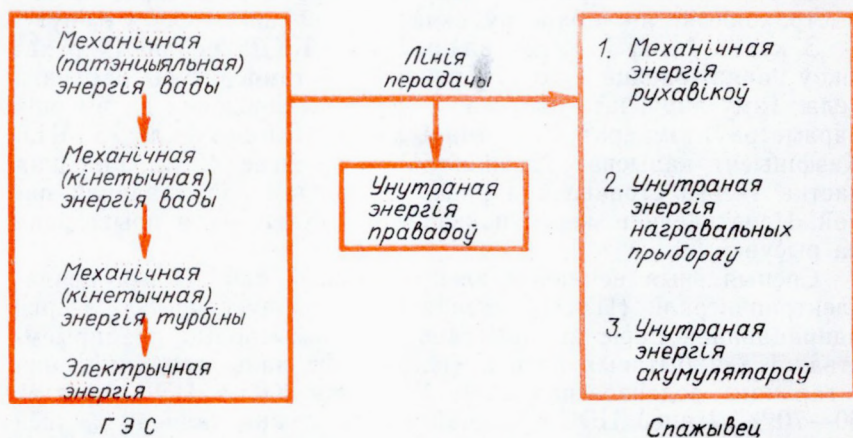


Рис. 57

енергіі з'яўляецца прамысловасць, на долю якой приходзіцца каля 70 % электраэнергіі, што вырабляецца. Буйным спажывателем з'яўляецца таксама транспарт. Усё большая колькасць чыгуначных ліній пераводзіцца на электрычную цягу. Амаль усе калгасы і саўгасы атрымліваюць электраэнергію ад дзяржаўных электрастанцый для прамысловых і бытавых патрэб. Аб прымяненні электраэнергіі для асвятлення жылля і ў бытавых электрапрыборах ведае кожны.

Большая частка электраэнергіі, што выкарыстоўваецца, цяпер ператвараецца ў механічную энергію. Амаль усе механізмы ў прамысловасці прыводзяцца ў рух электрычнымі рухавікамі. Яны зручныя, кампактныя, дапускаюць магчымасць аўтаматызацыі вытворчасці.

Каля трэці электраэнергіі, якая спажываецца прамысловасцю, выкарыстоўваецца для тэхналагічных мэт (электразварка, электрычны нагрэў і плаўленне металаў, электроліз і да т. п.).

Сучасная цывілізацыя не ўяўляецца без шырокага выкарыстання электраэнергіі. Парушэнне забеспячэння электраэнергіяй вялікага горада пры аварыі паралізуе яго жыццё.

1. Ці можаце вы прывесці прыклады машын і механізмаў, у якіх зусім не выкарыстоўваўся б электрычны ток? 2. Ці знаходзіліся вы сёння каля генератара электрычнага -току на адлегласці, якая не перавышае 100 м? 3. Чаго пазбавіліся б жыхары вялікага горада пры аварыі электрычнай сеткі?

§ 26. ПЕРАДАЧА ЭЛЕКТРАЭНЕРГІІ

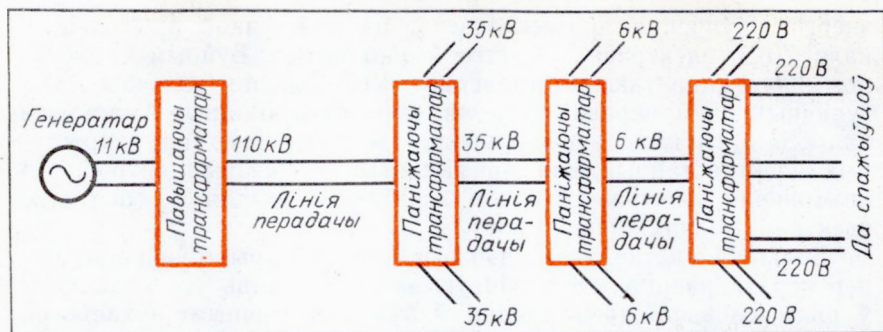
Спажываючы электраэнергію ёсць усюды. Вырабляецца ж яна ў параўнальна нямногіх месцах, блізкіх да крыніц паліўна- і гідрарэсурсаў. Электраэнергію не ўдаецца кансерваваць у вялікіх маштабах. Яна павінна быць выкарыстана адразу пасля атрымання. Таму ўзнікае неабходнасць у перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці.

Перадача энергіі звязана з прыметнымі стратамі. Справа ў тым, што электрычны ток награвяе праводы ліній перадачы. У адпаведнасці з законам Джоўля — Ленца энергія, якая расходуюцца на нагрэў правадоў ліній, вызначаецца формулай

$$Q = I^2 R t,$$

дзе R — супраціўленне ліній. Пры вельмі вялікай даўжыні ліній перадача энергіі можа зрабіцца эканамічна невыгаднай. Значна панізіць супраціўленне ліній практычна вельмі цяжка. Таму прыходзіцца памяншаць сілу току.

Паколькі магутнасць току прапарцыянальная здабытку сілы току на напружанне, то для захавання перадаваемай магутнасці



Рыс. 58

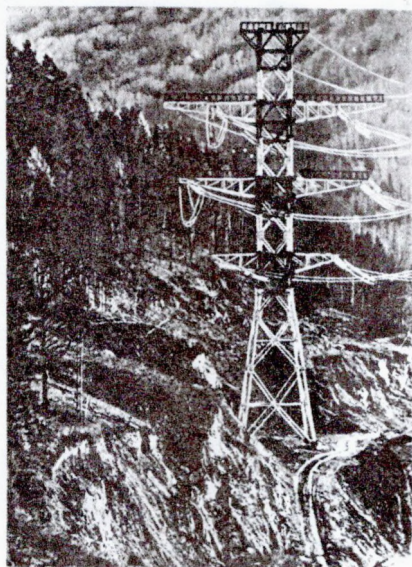
трэба павысіць напружанне ў лініі перадачы. Чым даўжэйшая лінія перадачы, тым больш выгадна выкарыстоўваць больш высокае напружанне. Так, у высакавольтнай лініі перадачы Волжская ГЭС імя ХХІІ з'езда КПСС — Масква выкарыстоўваюць напружанне ў 500 кВ. Між тым генератары пераменнага току будуць на напружаннях, якія не перавышаюць 16—20 кВ. Больш высокае напружанне патрабавала б прыняцця складаных спецыяльных мер для ізаляцыі абмотак і іншых частак генератараў.

Таму на буйных электрастанцыях ставяць павышаючыя трансфарматары. Трансфарматар павялічвае напружанне ў лініі ў столькі ж разоў, у колькі памяншае сілу току.

Для непасрэднага выкарыстання электраэнергіі ў рухавіках электрапрывода станкоў, у асвятляльнай сетцы і для іншых мэт напружанне на канцах лініі трэба панізіць. Гэта дасягаецца пры дапамозе паніжаючых трансфарматараў.

Звычайна паніжэнне напружання і адпаведна павелічэнне сілы току адбываецца ў некалькі этапаў. На кожным этапе напружанне становіцца ўсё меншым, а тэрыторыя, якая ахопліваецца электрычнай сеткай, — усё шырэйшай. Схема перадачы і размеркавання электраэнергіі прыведзена на рысунку 58.

Пры вельмі высокім напру-



Апора лініі перадачы электраэнергіі Саяна-Шушанскай ГЭС.

жанні паміж правадамі пачынаецца каронны разрад, які прыводзіць да страт энергіі. Дапушчальная амплітуда пераменнага напружання павінна быць такой, каб пры зададзенай плошчы папярочнага сячэння проваду страты энергіі ў выніку кароннага разраду былі нязначнымі.

Электрычныя станцыі рада раёнаў краіны аб'яднаны высакавольтнымі лініямі перадач, утвараючы агульную электрычную сетку, да якой далучаны спажыўцы. Такое аб'яднанне, якое называецца *энергасістэмай*, дае магчымасць згладзіць «пікавыя» нагрузкі спажывання энергіі ў ранішнія і вячэрнія гадзіны. Энергасістэма забяспечвае бесперабойнасць падачы энергіі спажыўцам незалежна ад месца іх размяшчэння. Цяпер амаль уся тэрыторыя Савецкага Саюза забяспечваецца электраэнергіяй аб'яднанымі энергетычнымі сістэмамі. Ужо дзейнічае Адзіная энергетычная сістэма еўрапейскай часткі СССР.

Страта 1 % электраэнергіі ў суткі для нашай краіны прыносіць страту каля палавіны мільёна рублёў.

Перадача энергіі на вялікія адлегласці з малымі стратамі — складаная задача. Цяпер найбольш паспяхова гэта задача вырашаецца з дапамогай электрычнага току высокага напружання.

1. Як ажыццяўляецца перадача энергіі на вялікія адлегласці? 2. Якія перавагі мае перадача энергіі на вялікія адлегласці з дапамогай пастаяннага току?

§ 27. ЭЛЕКТРЫФІКАЦЫЯ СССР

У 1920 г. быў прыняты першы ў гісторыі чалавецтва перспектыўны план развіцця народнай гаспадаркі краіны на аснове электрыфікацыі — план ГОЭЛРО (Дзяржаўны план электрыфікацыі Расіі). Ініцыятарам і натхніцелем распрацоўкі плана быў У. І. Ленін, які надаваў электрыфікацыі рашаючае значэнне ў перабудове эканомікі краіны.

У. І. Ленін гаварыў: «Толькі тады, калі краіна будзе электрыфікавана, калі пад прамысловасць, сельскую гаспадарку і транспарт будзе падведзена тэхнічная база сучаснай буйной прамысловасці, толькі тады мы пераможам канчаткова»¹.

Мінулыя гады — пераканаўчае сведчанне вялікай сілы ленінскіх ідэй. План ГОЭЛРО, які прадугледжваў падваенне прамысловай вытворчасці і павелічэнне ў 4 разы выпрацоўкі электраэнергіі ў параўнанні з 1913 г., быў у назначаны тэрмін (праз 10 гадоў) перавыкананы па ўсіх паказчыках.

Цяпер за адзін дзень вырабляецца электраэнергіі прыблізна ў 6 разоў больш, чым за ўвесь 1921 г. — першы год выканання плана ГОЭЛРО.

¹ Ленін У. І. Поўны збор твораў. Т. 42. С. 159.

У нашай краіне пабудаваны гідраўлічныя, цеплавыя і атамныя электрастанцыі велізарнай магутнасці. Буйнейшай ГЭС цяпер з'яўляецца Саяна-Шушанская. Агульная магутнасць гэтай станцыі дасягае 6400 млн Вт. Цяпер у Савецкім Саюзе эксплуатаецца вялікая колькасць электрастанцый магутнасцю звыш 3 млн Вт, а Экібастузская ДРЭС-1¹ мае магутнасць 4000 млн Вт і ў цяперашні час яна стала самай буйной цеплавой электрастанцыяй у нашай краіне.

Шляхам аб'яднання энергасістэм Сібіры і Сярэдняй Азіі з энергетычнай сістэмай еўрапейскай часткі краіны фарміруецца Адзіная энергетычная сістэма Савецкага Саюза. Гэта павысіць надзейнасць і манеўранасць электразабеспячэння велізарнай тэрыторыі краіны. Рашэнне гэтай задачы патрабуе збудавання магістральных ліній электраперадачы на 750 000, 1 150 000 і 1 500 000 В.

Распрацавана энергетычная праграма СССР на працяглую перспектыву.

ПРАКТЫКАВАННЕ 3

1. Як павінны быць размешчаны ізаляваныя адна ад адной сталёныя пласціны стрыжня ротара індукцыйнага генератара для памяншэння віхравых токаў?

2. Драцяная прамавугольная рамка верціцца ў аднародным магнітным полі. У якім выпадку наводзімая ў рамцы ЭРС максімальная: калі плоскасць рамкі перпендыкулярная лініям магнітнай індукцыі або калі яна паралельная ім?

3. Абмоткі трансфарматара зроблены з проваду рознай таўшчыні. Якая з абмотак змяшчае большы лік віткоў?

4. Прыдумайце спосаб вызначэння ліку віткоў абмоткі трансфарматара, не размотваючы шпулі.

5. Што можа здарыцца, калі выпадкова падключыць трансфарматар да крыніцы пастаяннага току?

6. Калі ў абмотцы трансфарматара замкнецца адзін віток, трансфарматар выходзіць са строю. Чаму?

7. Знайдзіце каэфіцыент трансфармацыі ўсіх паніжаючых трансфарматараў, якія павінны выкарыстоўвацца пры перадачы электраэнергіі ад генератара да спажывцоў у адпаведнасці са схемай, паказанай на rysunku 58. (Страты энергіі не ўлічваць.) Рашыце тую ж задачу для павышаючага трансфарматара.

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 3²

1. Электрычны ток пераважна вырабляецца электрамеханічнымі індукцыйнымі генератарамі. Гэтыя генератары ператва-

¹ У адрозненне ад ЦЭЦ у ДРЭС адпрацаваная пара не выкарыстоўваецца для прамысловых і бытавых патрэб, а паступае ў кандэнсатары, адкуль вада перапампоўваецца ў паравы кацёл.

² Прапрабіце тое ж самае, што было рэкамендавана перад кароткімі вынікамі папярэдніх раздзелаў. Колькасць істотных пунктаў 3—5.

раюць механічную энергію ў энергію электрычнага току. Іх дзеянне заснавана на з'яве электрамагнітнай індукцыі.

2. Пераменны электрычны ток пераўтвараецца з дапамогай трансфарматараў. Трансфарматар мае дзве абмоткі, надзетыя на сталны стрыжань. Яго прызначэнне — павелічэнне або памяншэнне напружання пры мінімальным стратах энергіі.

Змяненне напружання, якое атрымліваецца, вызначаецца адноснай ліку віткоў N_1 у першаснай абмотцы да ліку віткоў N_2 у другаснай абмотцы:

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

3. У колькі разоў павялічваецца (памяншаецца) напружанне, у столькі ж (прыблізна) разоў памяншаецца (павялічваецца) сіла току:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

4. Страты энергіі ў правадніках прапарцыянальныя квадрату сілы току. Магутнасць, якая перадаецца, прапарцыянальная здабытку сілы току на напружанне. Таму перадачу электрычнай энергіі па правадах выгадна ажыццяўляць пры высокім напружанні і малой сіле току. Трансфарматары на электрастанцыях павышаюць напружанне перад перадачай энергіі на вялікія адлегласці. На канцы лініі электраперадачы напружанне паніжаюць з дапамогай трансфарматараў, і электрычны ток паступае да спажывцоў.

Раздзел 4

ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ХВАЛІ

У IX класе вы пазнаёміліся з механічнымі хвалямі. Механічныя хвалі распаўсюджваюцца ў рэчыве: газе, вадкасці або цвёрдым рэчыве. Існуе, аднак, яшчэ адзін від хваль, якія не патрабуюць якога-небудзь рэчыва для свайго распаўсюджвання. Гэта электрамагнітныя хвалі, да якіх, у прыватнасці, адносяцца радыёхвалі і святло. Электрамагнітнае поле можа існаваць у вакууме, г. зн. у прасторы, якая не змяшчае атамаў. Нягледзячы на істотнае адрозненне электрамагнітных хваль ад механічных, электрамагнітныя хвалі пры сваім распаўсюджванні паводзяць сябе падобна да механічных.

Цяпер мы зоймемся электрамагнітнымі хвалямі. Але спачатку трэба каротка напамніць, што называецца хваляй і якія асноўныя асаблівасці хвалевага руху.

§ 28. ХВАЛЕВЫЯ З'ЯВЫ

Хвалевыя працэсы надзвычай шырока распаўсюджаны ў прыродзе. Розныя фізічныя прычыны, якія выклікаюць хвалевыя рухі. Але, падобна да ваганняў, усе віды хваль апісваюцца колькасна аднолькавымі або амаль аднолькавымі законамі. Многія цяжкія для разумення пытанні становяцца больш зразумелымі, калі параўноўваць розныя хвалевыя з'явы адну з адной.

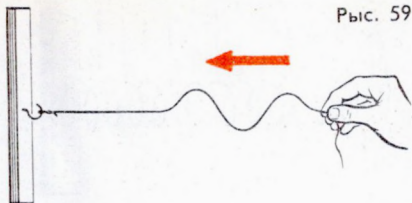
Што ж называюць хваляй? *Хваляй* называюць ваганні, якія распаўсюджваюцца ў прасторы з цягам часу.

У паветры, у цвёрдых целах і ўнутры вадкасці механічныя хвалі ўзнікаюць дзякуючы сілам пругкасці. Гэтыя сілы ажыццяўляюць сувязь паміж асобнымі часткамі цела. Ва ўтварэнні хваль на паверхні вады адыгрывае ролю сіла цяжару.

Найбольш наглядна галоўныя асаблівасці хвалевага руху можна ўбачыць, калі разглядаць хвалі на паверхні вады. Хвалі здаюцца бягучымі наперад круглявымі валамі. Адлегласці паміж валамі, або грабнямі, прыкладна аднолькавыя. Аднак калі кінуць у ваду лёгка прадмет, напрыклад запалкавы пачак, то яго не будзе несці ўперад хваляй, а ён пачне рабіць ваганні ўверх і ўніз, застаючыся амаль дакладна на адным месцы.

Пры распаўсюджванні хвалі адбываецца перамяшчэнне пэўнага стану асяроддзя, што вагаецца, але не пераносіць рэчыва. Узнікшыя ў адным месцы ваганні вады, напрыклад ад кінутага каменя, перадаюцца суседнім участкам і паступова распаўсюджваюцца ва ўсе бакі, уцягваючы ў вагальны рух усё новыя і новыя часцінкі асяроддзя. Цячэнне ж вады не ўзнікае: перамяшчаецца толькі форма яе паверхні.

Скорасць хвалі. Важнейшай характарыстыкай хвалі з'яўляецца яе скорасць. Хвалі любой прыроды не распаўсюджваюцца ў прасторы імгненна. Іх скорасць *канечная*. Можна сабе, напрыклад, уявіць, што над морам ляціць чайка так, што ўвесь час знаходзіцца над адным і тым жа грэбнем хвалі. Скорасць хвалі ў гэтым выпадку роўна скорасці чайкі. Хвалі на паверхні вады зручныя для назірання па той прычыне, што скорасць іх распаўсюджвання невялікая.

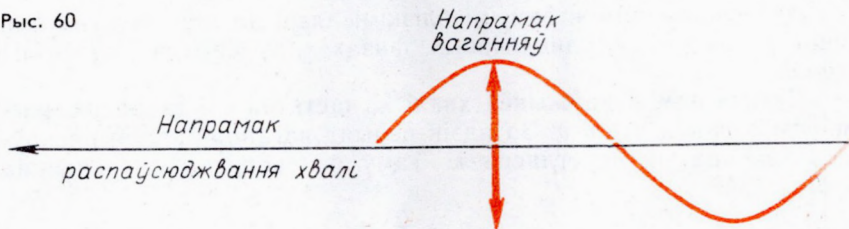


Рыс. 59

Папярочныя і падоўжныя хвалі. Няцяжка таксама назіраць хвалі, якія распаўсюджваюцца ўздоўж гумавага шнура. Калі адзін канец шнура замацаваць і, злёгка нацягнуўшы шнур рукою, прывесці другі яго канец у вагальны рух, то па шнуры пабяжыць хваля (рыс. 59). Скорасць хвалі будзе тым большай, чым мацней нацягнуты шнур. Хваля дабяжыць да пункта замацавання шнура, адаб'ецца і пабяжыць назад. Тут пры распаўсюджванні хвалі адбываюцца змены формы шнура. Кожны ж участак шнура вагаецца адносна свайго нязменнага становішча раўнавагі. Звярніце ўвагу на тое, што пры распаўсюджванні хвалі ўздоўж шнура асобныя ўчасткі шнура робяць ваганні ў напрамку, перпендыкулярным напрамку распаўсюджвання хвалі (рыс. 60). Такія хвалі называюцца *папярочнымі*.

Але не любая хваля з'яўляецца папярочнай. Ваганні могуць адбывацца і ўздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі (рыс. 61). Тады хваля называецца *падоўжнай*. Падоўжную хвалю зручна назіраць на доўгай мяккай спружыне вялікага дыяметра. Ударыўшы далонню па аднаму з канцоў спружыны (рыс. 62), можна заўважыць, як сцісканне (пружкі імпульс) бяжыць па спружыне. Пры дапамозе серыі паслядоўных удараў можна ўзбудзіць у спружыне хвалю, якая ўяўляе сабой паслядоўныя сцісканні і расцяжэнні спружыны, што бягуць адно за адным (рыс. 63). Ваганні

Рыс. 60



Рыс. 61



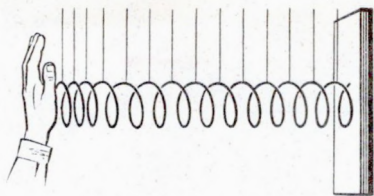


Рис. 62

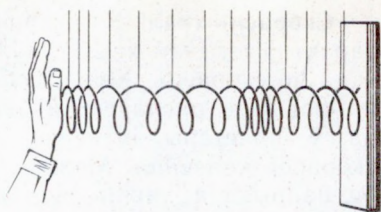


Рис. 63

любога вітка sprужины адбываюцца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі.

Энергія хвалі. Пры распаўсюджванні механічнай хвалі рух перадаецца ад аднаго ўчастка цела да другога. З перадачай руху звязана перадача энергіі. *Асноўная ўласцівасць усіх хваль, незалежна ад іх прыроды, заключаецца ў пераносе імі энергіі без пераносу рэчыва.* Энергія паступае ад крыніцы, якая ўзбуджае ваганні пачатку шнура, струны і г. д., і распаўсюджваецца разам з хваляй. Праз любое папярочнае сячэнне, напрыклад шнура, бесперапынна цячэ энергія. Гэта энергія складаецца з кінетычнай энергіі руху ўчасткаў шнура і патэнцыяльнай энергіі яго пругкай дэфармацыі. Паступовае памяншэнне амплітуды ваганняў пры распаўсюджванні хвалі звязана з ператварэннем часткі механічнай энергіі ва ўнутраную.

Даўжыня хвалі. Калі прымусіць канец расцягнутага гумавага шнура вагацца гарманічна з пэўнай частатой ν , то гэтыя ваганні пачнуць распаўсюджвацца ўздоўж шнура. Ваганні любога ўчастка шнура адбываюцца з той жа частатой і амплітудай, як і ваганні канца шнура. Але толькі гэтыя ваганні зрушаны па фазе адно адносна аднаго. Падобныя хвалі называюцца монахраматычнымі.

Калі зрух фаз паміж ваганнямі двух пунктаў шнура роўны 2π , то гэтыя пункты вагаюцца зусім аднолькава: бо $\cos(2\pi\nu t + 2\pi) = \cos 2\pi\nu t$. Такія ваганні называюцца сінфазнымі (адбываюцца ў аднолькавых фазах).

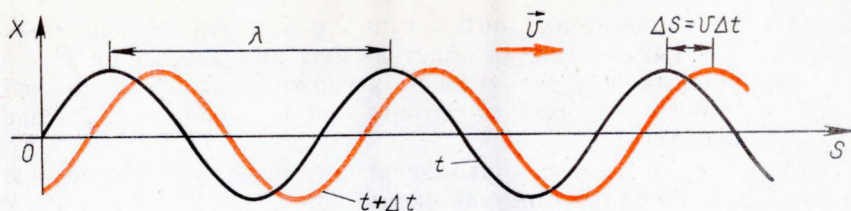
Адлегласць паміж самымі блізкімі адзін да аднаго пунктамі, якія вагаюцца ў аднолькавых фазах, называецца *даўжынёй хвалі*.

Сувязь паміж даўжынёй хвалі λ , частатой ν і скорасцю распаўсюджвання хвалі v . За адзін перыяд ваганняў хваля распаўсюджваецца на адлегласць λ . Таму яе скорасць вызначаецца формулай

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

Паколькі перыяд T і частата ν звязаны суадносінай

$$T = \frac{1}{\nu}, \text{ то } v = \lambda\nu.$$



Рыс. 64

Скорасць хвалі роўна здабытку даўжыні хвалі на частату ваганняў.

Пры распаўсюджванні хвалі ў шнуры мы маем справу з перыядычнасцю дзвюх родаў.

Па-першае, кожная часцінка шнура робіць перыядычныя ваганні ў часе. У выніку гарманічных ваганняў (гэтыя ваганні адбываюцца па сіносаідальнаму або косінусаідальнаму закону) частата і амплітуда ваганняў аднолькавыя ва ўсіх пунктах. Ваганні адрозніваюцца толькі фазамі.

Па-другое, у дадзены момант часу форма хвалі паўтараецца ў прасторы ўздоўж шнура праз адрэзкі даўжынёй λ . На рысунку 64 паказаны профіль хвалі ў пэўны момант часу (чорная лінія). З цягам часу ўся гэта карціна перамяшчаецца са скорасцю v злева направа.

Праз прамежак часу Δt хваля будзе мець выгляд, паказаны на тым жа рысунку каляровай лініяй.

Мы ўспомнілі, што называюць даўжынёй хвалі, частатой і амплітудай ваганняў хвалі. Запісалі важную суадносіну паміж даўжынёй хвалі, частатой ваганняў і скорасцю распаўсюджвання хвалі $v = \lambda \nu$. Усе гэтыя паняцці з'яўляюцца агульнымі для механічных і электрамагнітных хваль.

1. Што называецца хваляй? 2. У чым заключаецца адрозненне паміж папярочнымі і падоўжнымі хвалямі? Прывядзіце прыклады папярочных і падоўжных хваль. 3. Якія асноўныя асаблівасці хвалевага руху? 4. Што называюць даўжынёй хвалі? 5. Як звязана скорасць хвалі з яе даўжынёй? 6. Ці заўсёды памяншаецца амплітуда хвалі па меры яе распаўсюджвання?

§ 29. ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ХВАЛІ

Механічныя хвалі ўзнікаюць дзякуючы ўзаемадзеянню паміж часцінкамі рэчыва. Паглядзім, якім чынам утвараюцца хвалі электрамагнітнага поля.

Як распаўсюджваюцца электрамагнітныя ўзаемадзеянні? Фундаментальныя законы прыроды, да ліку якіх адносяцца адкрытыя Максвелам законы электрамагнетызму, выдатныя

ў наступных адносінах: яны могуць даць значна больш, чым змешчана ў тых фактах, на падставе якіх яны атрыманы.

Сярод незлічоных, вельмі цікавых і важных вынікаў з максвелаўскіх законаў электрамагнітнага поля адзін заслугоўвае асаблівай увагі.

Гэта вывад аб тым, што электрамагнітнае ўзаемадзеянне распаўсюджаецца з канечнай скорасцю.

Згодна з тэорыяй далёкадзеяння, кулонаўская сіла, якая дзейнічае на электрычны зарад, адразу ж зменіцца, калі суседні зарад зрушыць з месца. Дзеянне перадаецца імгненна. З пункту гледжання дзеяння на адлегласці інакш быць не можа: бо адзін зарад непасрэдна праз пустату «адчувае» прысутнасць другога.

Згодна ж з уяўленнем аб блізкадзеянні справа зусім іншая і больш складаная. Перамяшчэнне зараду мяняе электрычнае поле паблізу ад яго. Гэта пераменнае электрычнае поле параджае пераменнае магнітнае поле ў суседніх абласцях прасторы. Пераменнае ж магнітнае поле ў сваю чаргу параджае пераменнае электрычнае поле і г. д.

Перамяшчэнне зараду выклікае, такім чынам, «ўсплёск» электрамагнітнага поля, які, распаўсюджаючыся, ахоплівае ўсё большыя і большыя вобласці навакольнай прасторы, перабудоўваючы па дарозе тое поле, якое існавала да зрушэння зараду. Нарэшце гэты «ўсплёск» дасягае другога зараду, што і прыводзіць да змянення сілы, якая на яго дзейнічае. Але адбудзецца гэта не ў той момант часу, калі адбылося зрушэнне першага зараду. Працэс распаўсюджвання электрамагнітнага парушэння, механізм якога быў раскрыты Максвелам, адбываецца з канечнай, хаця і вельмі вялікай скорасцю. У гэтым заключаецца фундаментальная ўласцівасць поля, якая не пакідае сумненняў у яго рэальнасці. Максвел матэматычна даказаў, што скорасць распаўсюджвання гэтага працэсу роўна скорасці святла ў вакууме.

Электрамагнітная хваля. Уявіце сабе, што электрычны зарад не проста зрушыўся з аднаго пункта ў другі, а прыведзены ў хуткія ваганні ўздоўж некаторай прамой. Зарад рухаецца таксама як цела, падвешанае на спружыне, але толькі ваганні яго адбываюцца са значна большай частатой. Тады электрычнае поле ў непасрэднай блізкасці ад зараду пачне перыядычна змяняцца. Перыяд гэтых змяненняў, відавочна, будзе роўны перыяду ваганняў зараду. Пераменнае электрычнае поле будзе параджаць магнітнае поле, якое перыядычна мяняецца, а апошняе ў сваю чаргу выкліча з'яўленне пераменнага электрычнага поля ўжо на большай адлегласці ад зараду і г. д.

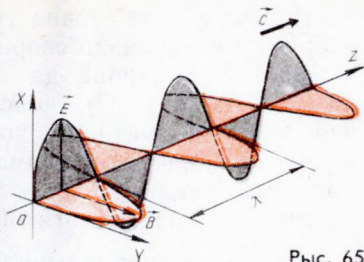
Мы не будзем у дэталях разглядаць складаны працэс утварэння электрамагнітнага поля, параджаемага зарадам, які вагаецца. Прывядзём толькі канечны рэзультат.

У прасторы, якая акружае зарад, захопліваючы ўсё большыя і большыя вобласці, узнікае сістэма электрычных і магнітных палёў, якія ўзаемна перпендыкулярныя і перыядычна змяняюцца.

На рисунку 65 показаны «імгненны здымак» такой сістэмы палёў на вялікай адлегласці ад зараду, які вагаецца.

Утвараецца так званая *электрамагнітная хваля*, якая бяжыць па ўсіх напрамках ад зараду, што вагаецца.

Не трэба думаць, што электрамагнітная хваля, паказаная на рисунку 65, таксама як і хваля на паверхні вады, з'яўляецца парушэннем якога-небудзь асяроддзя. На рисунку паказаны ў



Рыс. 65

некаторым маштабе значэнні вектараў $\vec{E}$ і $\vec{B}$ у розных пунктах прасторы, што ляжаць на восі OZ , у фіксаваны момант часу. Ніякіх грабянёў і ўпадзін асяроддзя, як у выпадку механічных хваль на паверхні зямлі, тут няма.

У кожным пункце прасторы электрычныя і магнітныя палі мяняюцца ў часе перыядычна. Чым далей размешчаны пункт ад зараду, тым пазней дасягнуць яго ваганні палёў. Значыць, на розных адлегласцях ад зараду ваганні адбываюцца з рознымі фазамі.

Ваганні вектараў $\vec{E}$ і $\vec{B}$ у любым пункце супадаюць па фазе. Адлегласць паміж двума бліжэйшымі пунктамі, у якіх ваганні адбываюцца ў аднолькавых фазах, ёсць даўжыня хвалі λ . У дадзены момант часу вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ мяняюцца перыядычна ў прасторы з перыядам λ .

Напрамкі вектараў напружанасці электрычнага поля, якія вагаюцца, і індукцыі магнітнага поля перпендыкулярныя да напрамку распаўсюджвання хвалі. *Электрамагнітная хваля з'яўляецца папярочнай*.

Такім чынам, вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ у электрамагнітнай хвалі перпендыкулярныя адзін аднаму і перпендыкулярныя напрамку распаўсюджвання хвалі. Калі вярцець свярдзёлак з правай нарэзкай ад вектара $\vec{E}$ да вектара $\vec{B}$, то паступальнае перамяшчэнне свярдзёлка будзе супадаць з вектарам скорасці хвалі $\vec{c}$ (гл. рыс. 65).

Выпраменьванне электрамагнітных хваль. Электрамагнітныя хвалі выпраменьваюцца зарадамі, якія вагаюцца. Пры гэтым істотна, што скорасць руху такіх зарадаў мяняецца з часам, г. зн. што яны рухаюцца з *паскарэннем*. *Наяўнасць паскарэння — галоўная ўмова выпраменьвання электрамагнітных хваль*. Электрамагнітнае поле выпраменьваецца прыметным чынам не толькі пры ваганнях зараду, але і пры любым хуткім змяненні яго скорасці. Інтэнсіўнасць выпрамененай хвалі тым большая, чым большае паскарэнне, з якім рухаецца зарад.

Наглядна гэта можна ўявіць сабе так. Пры руху зараджанай часціцы з пастаяннай скорасцю створаныя ёю электрычнае і магнітнае палі, падобна да шлейфа, што развяваецца, суправаджаюць часціцу. Пры паскарэнні часціцы выяўляецца ўласцівая электрамагнітнаму полю інертнасць. Поле «адрываецца» ад часціцы і пачынае самастойнае існаванне ў форме электрамагнітных хваль.

Энергія электрамагнітнага поля хвалі ў дадзены момант часу мяняецца перыядычна ў прасторы са змяненнем вектараў $\vec{E}$ і $\vec{B}$. Бягучая хваля нясе з сабой энергію, якая перамяшчаецца са скорасцю $\vec{c}$ уздоўж напрамку распаўсюджвання хвалі. Дзякуючы гэтаму энергія электрамагнітнай хвалі ў любой вобласці прасторы мяняецца перыядычна з часам.

Максвел быў глыбока перакананы ў рэальнасці электрамагнітных хваль. Але ён не дажыў да іх эксперыментальнага выяўлення. Толькі праз 10 гадоў пасля яго смерці электрамагнітныя хвалі былі эксперыментальна атрыманы Герцам.

Электрамагнітныя хвалі ўзнікаюць дзякуючы таму, што пераменнае электрычнае поле параджае пераменнае магнітнае поле. Гэта пераменнае магнітнае поле ў сваю чаргу параджае пераменнае электрычнае поле.



1. Як арыентаваны вектары $\vec{E}$, $\vec{B}$ і $\vec{C}$ адзін у адносінах да аднаго ў электрамагнітнай хвалі? 2. Як павінна рухацца часціца, каб яна выпраменьвала электрамагнітныя хвалі?

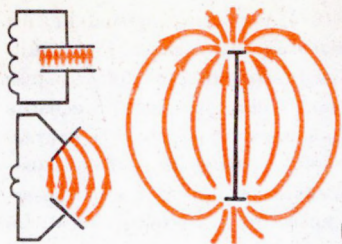
§ 30. ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНАЕ ВЫЯЎЛЕННЕ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ХВАЛЬ

Пазнаёмімся з тым, як упершыню былі атрыманы электрамагнітныя хвалі. Працэс утварэння гэтых хваль складаны і мы закранём яго ў самых агульных рысах.

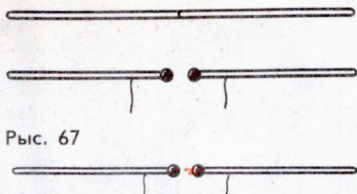
Электрамагнітная хваля ўтвараецца дзякуючы ўзаемнай сувязі пераменных электрычных і магнітных палёў. Змяненне аднаго поля прыводзіць да з'яўлення другога. У § 5 і 10 гаварылася, што, чым хутчэй мяняецца з часам магнітная індукцыя, тым большая напружанасць электрычнага поля, якое ўзнікае. І ў сваю чаргу, чым хутчэй мяняецца напружанасць электрычнага поля, тым большая магнітная індукцыя.

Значыць, для ўтварэння інтэнсіўных электрамагнітных хваль неабходна стварыць электрамагнітныя ваганні дастаткова высокай частаты. Менавіта пры гэтай умове напружанасць электрычнага поля $\vec{E}$ і індукцыя магнітнага поля $\vec{B}$ будуць мяняцца хутка.

Ваганні высокай частаты, якая значна перавышае частату



Рыс. 66



Рыс. 67



Рыс. 68

прамысловага току (50 Гц), можна атрымаць з дапамогай вагальнага контуру. Частата ваганняў:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

будзе тым большая, чым меншая індуктыўнасць і ёмістасць контуру.

Адкрыты вагальны контур. Аднак вялікая частата электрамагнітных ваганняў яшчэ не гарантуе інтэнсіўнага выпраменьвання электрамагнітных хваль. У звычайным контуры, які паказаны на рысунку 25 (яго можна назваць закрытым), амаль усё магнітнае поле засяроджана ўнутры шпулі, а электрычнае — унутры кандэнсатара. Удалечыні ад контуру электрамагнітнага поля практычна няма. Такі контур вельмі слаба выпраменьвае электрамагнітныя хвалі.

Для атрымання электрамагнітных хваль Г. Герц выкарыстаў простае прыстасаванне, якое называецца цяпер *вібратарам Герца*. Гэта прыстасаванне з'яўляецца *адкрытым вагальным контурам*.

Да адкрытага контуру можна перайсці ад закрытага, калі паступова рассоўваць пласціны кандэнсатара (рыс. 66), памяншаючы іх плошчу і адначасова памяншаючы лік віткоў у шпулі. Урэшце атрымаецца проста прамы провад. Гэта і ёсць адкрыты вагальны контур. Ёмістасць і індуктыўнасць вібратора Герца малыя. Таму частата ваганняў вельмі вялікая.

У адкрытым контуры зарады не сканцэнтраваны на канцах, а размеркаваны па ўсяму правадніку. Ток у дадзены момант часу ва ўсіх сячэннях правадніка накіраваны ў адзін і той жа бок, але сіла току не аднолькавая ў розных сячэннях правадніка. На канцах яна роўна нулю, а пасярэдзіне дасягае максімуму. (Напомнім, што ў звычайных ланцугах пераменнага току сіла току ва ўсіх сячэннях у дадзены момант часу аднолькавая.) Электрамагнітнае поле ахоплівае ўсю прастору побач з контурам.

Для ўзбуджэння ваганняў у такім контуры ў часы Герца рабілі наступнае. Провад разразалі пасярэдзіне так, каб застаўся невялікі паветраны прамежак, названы іскравым (рыс. 67). Абедзве часткі правадніка зараджалі да высокай рознасці патэнцыялаў. Калі рознасць патэнцыялаў перавышала некаторае гранічнае значэнне, праскоквала іскра (рыс. 68), ланцуг замыкаўся і ў адкрытым контуры ўзнікала ваганні.



Герц Генрых (1857—1894) — выдатны нямецкі фізік, які ўпершыню эксперыментальна даказаў у 1886 г. існаванне электрамагнітных хваль. Даследуючы электрамагнітныя хвалі, Герц устанавіў тоеснасць асноўных уласцівасцей электрамагнітных і светлавых хваль. Работы Герца паслужылі эксперыментальным доказам справядлівасці тэорыі электрамагнітнага поля і, у прыватнасці, электрамагнітнай тэорыі святла. Ураўненні Максвела ў сучаснай форме былі запісаны Герцам. У 1886 г. Герц упершыню назіраў фотаэфект.

Ваганні ў адкрытым контуры затухаюць па дзвюх прычынах: па-першае, з прычыны наяўнасці ў контуры актыўнага супраціўлення, па-другое, з-за таго, што вібратар выпраменьвае электрамагнітныя хвалі і траціць пры гэтым энергію. Пасля таго як ваганні спыняцца, абодва праваднікі зноў зараджаюцца ад крыніцы да надыходу прабою іскравага прамежку, і ўсё паўтараецца спачатку.

У цяперашні час для атрымання незатухаючых ваганняў у адкрытым вагальным контуры яго звязваюць індуктыўна з вагальным контурам генератара на транзістары або генератараў іншых тыпаў.

Доследы Герца. Герц атрымаў электрамагнітныя хвалі, узбуджаючы ў вібратары з дапамогай крыніцы высокага напружання серыю імпульсаў хуткапераменнага току. Ваганні электрычных зарадаў у вібратары ствараюць электрамагнітную хвалю. Толькі ваганні ў вібратары робіць не адна зараджаная часціца, а велізарная колькасць электронаў, якія рухаюцца ўзгоднена. У электрамагнітнай хвалі вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ перпендыкулярныя адзін аднаму.

Вектар $\vec{E}$ ляжыць у плоскасці, якая праходзіць праз вібратар, а вектар $\vec{B}$ перпендыкулярны гэтай плоскасці. Выпраменьванне хваль адбываецца з максімальнай інтэнсіўнасцю ў напрамку, перпендыкулярным да восі вібратара. Уздоўж восі выпраменьвання не адбываецца.

Электрамагнітныя хвалі рэгістраваліся Герцам з дапамогай прыёмнага вібратара (рэзанатара), які з'яўляецца такім жа прыстасаваннем, як і выпраменьваючы вібратар. Пад дзеяннем пераменнага электрычнага поля электрамагнітнай хвалі ў прыёмным вібратары ўзбуджаюцца ваганні току. Калі ўласная частата прыёмнага вібратара супадае з частотой электрамагнітнай хвалі, назіраецца рэзананс. Ваганні ў рэзанатары адбываюцца з вялікай амплітудай пры размяшчэнні яго паралельна выпраменьваючаму вібратару. Герц выявіў гэтыя ваганні, назіраючы іскаркі ў вельмі маленькім прамежку паміж праваднікамі прыёмнага вібратара.

Герц не толькі атрымаў электрамагнітныя хвалі, але і выявіў, што яны паводзяць сябе падобна да іншых відаў хваль. У прыватнасці, ён назіраў адбіццё электрамагнітных хваль ад металічнага ліста і складанне хваль. Пры складанні хвалі, якая ідзе ад вібратора, з хваляй, якая адбілася ад металічнага ліста, утвараюцца максімумы і мінімумы ваганняў. Перамяшчаючы рэзанатар, можна знайсці становішчы максімумаў і вызначыць даўжыню хвалі.

Скорасць электрамагнітных хваль. У доследах Герца даўжыня хвалі складала некалькі дзесяткаў сантыметраў. Вылічыўшы ўласную частату электрамагнітных ваганняў вібратора, Герц змог вызначыць скорасць электрамагнітнай хвалі па формуле $v = \lambda \nu$. Яна аказалася прыбліжана роўнай скорасці святла:

$$c \approx 300\,000 \text{ км/с.}$$

Доследы Герца бліскуча пацвердзілі тэарэтычныя прадказанні Максвела.

Для выпраменьвання электрамагнітных хваль трэба стварыць электрамагнітныя ваганні высокай частаты ў адкрытым вагальным контуры.

? 1. Чаму звычайны (закрыты) вагальны контур нельга выкарыстаць для выпраменьвання і рэгістрацыі электрамагнітных хваль? 2. Чаму роўная скорасць распаўсюджвання электрамагнітных узаемадзеянняў? 3. Перадаючы і прыёмныя выбратары размешчаны ўзаемна перпендыкулярна. Ці ўзнікнуць ваганні ў прыёмным выбратары?

§ 31. Шчыльнасць патоку ЭЛЕКТРАМАГНІТНАГА ВЫПРАМЕНЬВАННЯ

Выпраменьеныя электрамагнітныя хвалі нясуць з сабой энергію. Энергетычныя характарыстыкі выпраменьвання адыгрываюць важную ролю, таму што вызначаюць уздзеянні крыніц выпраменьвання на яго прыёмнікі. Мы азнаёмімся з адной з галоўных характарыстык выпраменьвання.

Шчыльнасць патоку выпраменьвання. Разгледзім паверхню плошчай S , праз якую электрамагнітныя хвалі пераносяць энергію. На рысунку 69 паказана такая пляцоўка; прамыя лініі паказваюць напрамкі распаўсюджвання электрамагнітных хваль. Гэта *прамені* — лініі, перпендыкулярныя паверхням, ва ўсіх пунктах якіх ваганні адбываюцца ў аднолькавых фазах. Такія паверхні называюцца *хвалевымі паверхнямі*.

Шчыльнасцю патоку электрамагнітнага выпраменьвання I называюць адносіну электрамагнітнай энергіі ΔW , якая прахо-

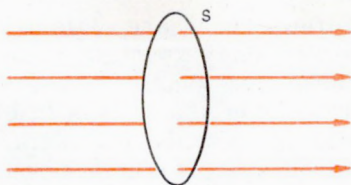


Рис. 69

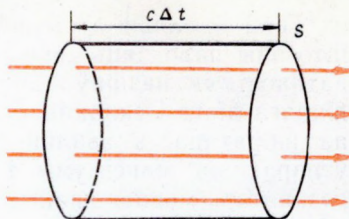


Рис. 70

дзіць за час Δt праз перпендыкулярную працягам паверхню плошчай S , да здабытку плошчы S на час Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (4.1)$$

Фактычна гэта магутнасць электрамагнітнага выпраменьвання (энергія ў адзінку часу), якая праходзіць праз адзінку плошчы паверхні. Шчыльнасць патоку выпраменьвання ў СІ выражаюць у ватах на квадратны метр (Вт/м^2). Часам гэту велічыню называюць *інтэнсіўнасцю хвалі*.

Выразім I праз шчыльнасць электрамагнітнай энергіі і скорасць яе распаўсюджвання c . Возьмем паверхню плошчай S , перпендыкулярную працягам, і пабудуем на ёй як на аснове цыліндр з утвараючай $c\Delta t$ (рис. 70). Аб'ём цыліндра $\Delta V = c\Delta t S$. Энергія электрамагнітнага поля ўнутры цыліндра роўная здабытку шчыльнасці энергіі на аб'ём: $\Delta W = w c \Delta t S$. Уся гэта энергія за час Δt пройдзе праз правую аснову цыліндра. Таму з (4.1) атрымліваем:

$$I = \frac{w c \Delta t S}{S \Delta t} = w c, \quad (4.2)$$

г. зн. *шчыльнасць патоку выпраменьвання роўна здабытку шчыльнасці электрамагнітнай энергіі на скорасць яе распаўсюджвання*.

Знойдзем залежнасць шчыльнасці патоку выпраменьвання ад адлегласці да крыніцы. Для гэтага трэба ўвесці яшчэ адно новае паняцце.

Пунктавая крыніца выпраменьвання. Крыніцы выпраменьвання электрамагнітных хваль могуць быць вельмі разнастайнымі. Найпрасцейшай з'яўляецца *пунктавая* крыніца.

Крыніца выпраменьвання лічыцца пунктавой, калі яе размеры многа меншыя за адлегласць, на якой ацэньваецца яе дзеянне. Акрамя таго, дапускаецца, што такая крыніца пасылае электрамагнітныя хвалі па ўсіх напрамках з аднолькавай інтэнсіўнасцю¹. Пунктавая крыніца — такая ж ідэалізацыя рэальных крыніц,

¹ Вібратар Герца такой крыніцай не з'яўляецца. Выпраменьваемая ім энергія залежыць ад напрамку адносна восі вібратара.

як і іншыя мадэлі, прынятыя ў фізіцы: матэрыяльны пункт, ідэальны газ і г. д.

Зоркі выпраменьваюць святло, г. зн. электрамагнітныя хвалі. Паколькі адлегласці да зорак у велізарную колькасць разоў перавышаюць іх размеры, то іменна зоркі ўяўляюць сабой лепшую мадэль пунктавых крыніц.

Залежнасць шчыльнасці патоку выпраменьвання ад адлегласці да крыніцы. Энергія, якую нясуць з сабой электрамагнітныя хвалі, з цягам часу размяркоўваецца па ўсё большай і большай паверхні. Таму энергія, якая пераносіцца праз адзінкавую пляцоўку за адзінку часу, г. зн. шчыльнасць патоку выпраменьвання, памяншаецца па меры аддалення ад крыніцы.

Высветліць залежнасць шчыльнасці патоку выпраменьвання ад адлегласці да крыніцы можна, памясціўшы пунктавую крыніцу ў цэнтр сферы радыусам R . Плошча паверхні сферы $S = 4\pi R^2$. Калі лічыць, што крыніца па ўсіх напрамках за час Δt выпраменьвае энергію ΔW , то

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (4.3)$$

Шчыльнасць патоку выпраменьвання ад пунктавой крыніцы ўбывае адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці да крыніцы¹.

Залежнасць шчыльнасці патоку выпраменьвання ад частаты. Выпраменьванне электрамагнітных хваль адбываецца пры паскораным руху зараджаных часціц (гл. § 29). Напружанасць электрычнага поля і магнітная індукцыя электрамагнітнай хвалі прапарцыянальныя паскарэнню a выпраменьваючых часціц. Паскарэнне пры гарманічных ваганнях прапарцыянальнае квадрату частаты. Таму напружанне электрычнага поля і магнітная індукцыя прапарцыянальныя квадрату частаты:

$$E \sim a \sim \omega^2, \quad B \sim a \sim \omega^2. \quad (4.4)$$

Шчыльнасць энергіі электрычнага поля прапарцыянальная квадрату напружання поля (гл. «Фізіка-10», § 51). Энергія магнітнага поля, як можна паказаць, прапарцыянальная квадрату магнітнай індукцыі. Поўная шчыльнасць энергіі электрамагнітнага поля роўна суме шчыльнасцей энергій электрычнага і магнітнага палёў. Таму шчыльнасць патоку выпраменьвання I з улікам (4.2) прапарцыянальная:

$$I \sim \omega \sim (E^2 + B^2). \quad (4.5)$$

$$\text{Паколькі згодна з (4.4) } E \sim \omega^2 \text{ і } B \sim \omega^2, \text{ то } I \sim \omega^4. \quad (4.6)$$

Шчыльнасць патоку выпраменьвання прапарцыянальная чацвёртай ступені частаты.

¹ Дакладна гэтак жа ўбывае з адлегласцю ў любым напрамку шчыльнасць патоку выпраменьвання ад вібратора Герца.

Пры павелічэнні частаты ваганняў зараджаных часціц у два разы энергія, якая выпраменьваецца, узрасце ў 16 разоў! У антэнах радыёстанцый таму ўзбуджаюцца ваганні вялікіх частот: ад дзесяткаў тысяч да дзесяткаў мільёнаў герц. Прамысловыя пераменныя токі частотой 50 Гц практычна не выпраменьваюць.

Электрамагнітныя хвалі пераносяць энергію. Шчыльнасць патоку выпраменьвання (інтэнсіўнасць хвалі) роўна здабытку шчыльнасці энергіі на скорасць яе распаўсюджвання. Інтэнсіўнасць хвалі прапарцыянальная чацвёртай ступені частаты і ўбывае адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці ад крыніцы.

? 1. Якую велічыню называюць шчыльнасцю патоку электрамагнітнага выпраменьвання? 2. Якая крыніца выпраменьвання называецца пунктавой? 3. Чаму пераменны ток у асвятляльнай сетцы практычна не выпраменьвае электрамагнітныя хвалі?

§ 32. ВЫНАХОДСТВА РАДЫЁ А. С. ПАПОВЫМ

Доследы Герца, апісанне якіх з'явілася ў 1888 г., зацікавілі фізікаў усяго свету. Вучоныя сталі шукаць шляхі ўдасканалення выпраменьвальніка і прыёмніка электрамагнітных хваль.

У Расіі адным з першых заняўся вывучэннем электрамагнітных хваль выкладчык афіцэрскіх курсаў у Кранштаце Аляксандр Сцяпанавіч Папоў. Пачаўшы з узнаўлення доследаў Герца, ён затым знайшоў больш надзейны і адчувальны спосаб рэгістрацыі электрамагнітных хваль.

У якасці дэталі, якая непасрэдна «адчувае» электрамагнітныя хвалі, А. С. Папоў прымяніў кагерэр. Гэты прыбор мае выгляд шкляной трубкі з двума электродамі. У трубцы змешчаны дробныя металічныя апілкі. Дзеянне прыбора грунтуецца на ўплыве электрычных разрадаў на металічныя парашкі. У звычайных умовах кагерэр валодае вялікім супраціўленнем, паколькі апілкі маюць дрэнны кантакт паміж сабой. Электрамагнітная хваля, што прыйшла, стварае ў кагерэры пераменны ток высокай частаты. Паміж апілкамі праскакваюць найдрабнейшыя іскаркі, якія звярваюць апілкі. У выніку супраціўленне кагерэра рэзка памяншаецца (у доследах А. С. Папова — з 100 000 Ом да 1000—500 Ом, г. зн. у 100—200 разоў). Зноў вярнуць прыбору вялікае супраціўленне можна, страсянуўшы яго. Каб забяспечыць аўтаматычнасць прыёму, неабходную для ажыццяўлення бяздротавай сувязі, А. С. Папоў выкарыстаў званковае прыстасаванне для ўстрэсвання кагерэра пасля прыёму сігнала. Ланцуг электрычнага званка замыкаўся з дапамогай адчувальнага рэле ў момант прыходу электрамагнітнай хвалі. З заканчэннем прыёму хвалі работа званка адразу спынялася, паколькі малаточак званка ўдараў не толькі па званковай чашцы, але і па кагерэру.

Папоў Аляксандр Сцяпанавіч (1859—1906) — рускі фізік, вынаходца радыё. Перакананы ў магчымасці сувязі без правадоў пры дапамозе электрамагнітных хваль, Папоў пабудаваў першы ў свеце радыёпрыёмнік, прымяніўшы ў яго схеме адчувальны элемент — кагерэр. У час доследаў па радыёсувязі з дапамогай прыбораў Папова было ўпершыню выяўлена адбіццё радыёхваль ад караблёў.



З апошнім устрэсваннем кагерэра апарат быў гатовы да прыёму новай хвалі. Схема прыёмніка А. С. Папова прыведзена на рысунку 71, узятым з яго артыкула ў «Часопісе фізіка-хімічнага таварыства».

Каб павысіць адчувальнасць апарата, А. С. Папоў адзін з вывадаў кагерэра зазямліў, а другі далучыў да высока паднятага куска дроту, стварыўшы першую прыёмную антэну для бяздротавай перадачы. Зазямленне ператварае праводзячую паверхню зямлі ў частку адкрытага вагальнага контуру, што павялічвае далёкасць прыёму.

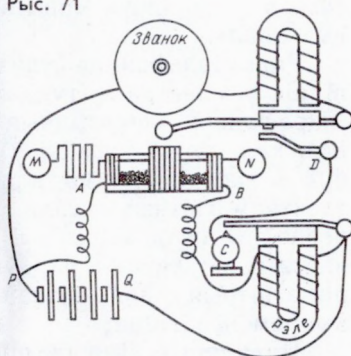
Хоць сучасныя радыёпрыёмнікі вельмі мала нагадваюць прыёмнік А. С. Папова, асноўныя прынцыпы іх дзеяння тыя ж, што і ў яго прыборы. Сучасны прыёмнік таксама мае антэну, у якой хваля, што прыходзіць, выклікае вельмі слабыя электрычныя ваганні. Як і ў прыёмніку Папова, энергія гэтых ваганняў не выкарыстоўваецца непасрэдна для прыёму. Слабыя сігналы толькі кіруюць крыніцамі энергіі, якія жывяць наступныя ланцугі. Цяпер такое кіраванне ажыццяўляецца з дапамогай паўправадніковых прыбораў.

7 мая 1895 г. на пасяджэнні Рускага фізіка-хімічнага таварыства ў Пецярбургу А. С. Папоў прадэманстраваў дзеянне свайго прыбора, які з'явіўся, па сутнасці справы, першым у свеце радыёпрыёмнікам. Дзень 7 мая стаў днём нараджэння радыё. Цяпер ён штогод адзначаецца ў нашай краіне.

А. С. Папоў працягваў настойліва ўдасканальваць прыёмную і перадаючую апаратуру. Ён ставіў сваёй непасрэднай задачай пабудаваць прыбор для перадачы сігналаў на вялікія адлегласці.

Спачатку радыёсвязь была ўстаноўлена на адлегласці 250 м. Нястомна працуючы над сваім вы-

Рыс. 71



находствам, Папоў неўзабаве дабіўся далёкасі сувязі, большай чым 600 м. Затым на манеўрах Чарнаморскага флоту ў 1899 г. вучоны ўстанавіў радыёсувязь на адлегласці звыш 20 км, а ў 1901 г. далёкасць радыёсувязі была ўжо 150 км. Важную ролю ў гэтым адыграла новая канструкцыя перадатчыка. Іскравы прамежак быў размешчаны ў вагальным контуры, індуктыўна звязаным з перадаючай антэнай і настроеным з ёю ў рэзананс. Істотна змяніліся і спосабы рэгістрацыі сігналу. Паралельна званку быў уключаны тэлеграфны апарат, які дазволіў весці аўтаматычны запіс сігналаў. У 1899 г. была выяўлена магчымасць прыёму сігналаў з дапамогай тэлефона. У пачатку 1900 г. радыёсувязь была паспяхова выкарыстана ў час выратавальных работ у Фінскім заліве. Пры ўдзеле А. С. Папова пачалося ўкараненне радыёсувязі на флоце і ў арміі Расіі.

За мяжой удасканаленне падобных прыбораў праводзілася фірмай, арганізаванай італьянскім інжынерам Г. Марконі. Доследы, пастаўленыя ў шырокім маштабе, дазволілі ажыццявіць радыётэлеграфную перадачу цераз Атлантычны акіян.

§ 33. ПРЫНЦЫПЫ РАДЫЁСУВЯЗІ

Прынцып радыёсувязі заключаецца ў наступным. Пераменны электрычны ток высокай частаты, створаны ў перадаючай антэне, выклікае ў навакольнай прасторы электрамагнітнае поле, якое хутка мяняецца і распаўсюджваецца ў выглядзе электрамагнітнай хвалі. Дасягаючы прыёмнай антэны, электрамагнітная хваля выклікае ў ёй пераменны ток той жа частаты, на якой працуе перадатчык.

Найважнейшым этапам у развіцці радыёсувязі было стварэнне ў 1913 г. генератара незатухаючых электрамагнітных ваганняў.

Акрамя перадачы тэлеграфных сігналаў, якія складаюцца з кароткіх і больш працяглых імпульсаў электрамагнітных хваль, стала магчымай надзейная і высакаякасная *радыётэлефонная сувязь* — перадача мовы або музыкі з дапамогай электрамагнітных хваль.

Радые́тэлефонная сувязь. Пры радыётэлефоннай сувязі ваганні ціску паветра ў гукавой хвалі ператвараюцца з дапамогай мікрафона ў электрычныя ваганні той жа формы. Здавалася б, што калі гэтыя ваганні ўзмацніць і падаць у антэну, то можна будзе перадаваць на адлегласць мову і музыку з дапамогай электрамагнітных хваль. Аднак у сапраўднасці такі спосаб перадачы неажыццявімы. Справа ў тым, што ваганні гукавой частаты з'яўляюцца параўнальна павольнымі ваганнямі, а электрамагнітныя хвалі нізкай (гукавой) частаты амаль зусім не выпраменьваюцца.

Мадуляцыя. Для ажыццяўлення радыётэлефоннай сувязі неаб-

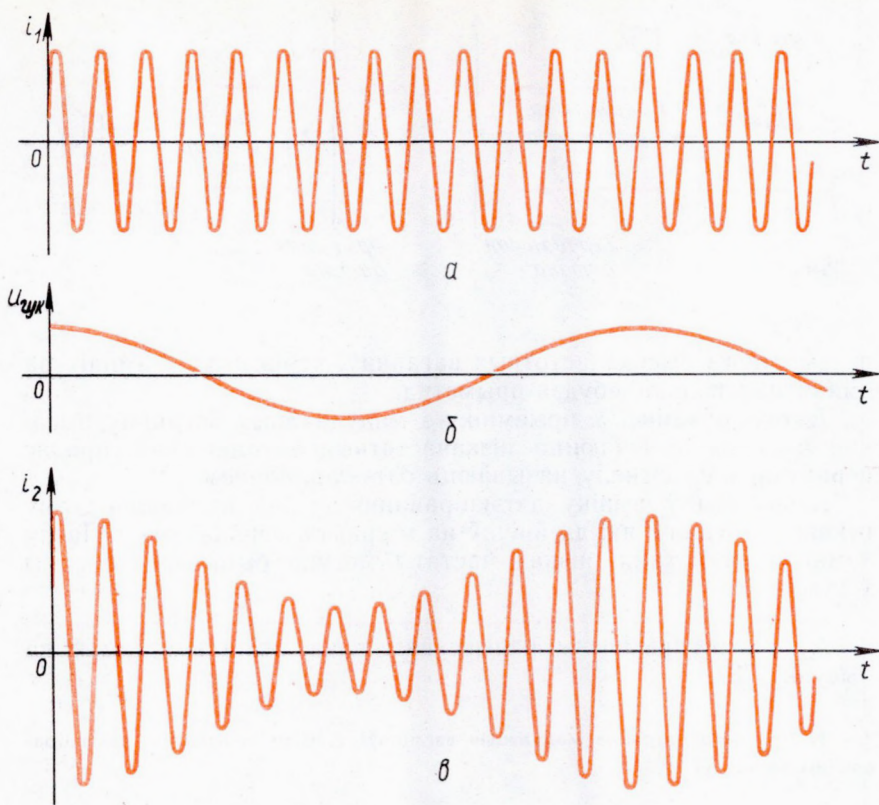
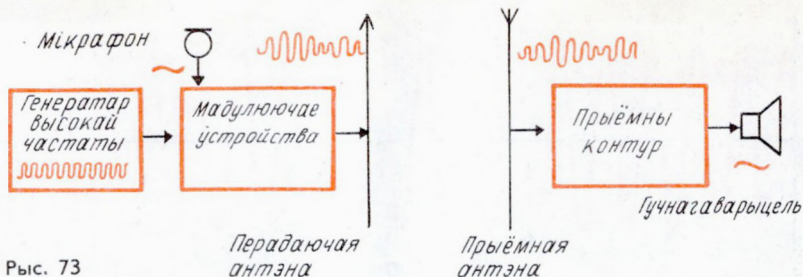


Рис. 72

ходна выкарыстаць высокачастотныя ваганні, якія інтэнсіўна выпраменьваюцца антэнай. Незатухаючыя гарманічныя ваганні высокай частаты выпрацоўвае генератар, напрыклад генератар на транзістары.

Для перадачы гуку гэтыя высокачастотныя ваганні змяняюць, або, як гавораць, *мадулююць*, з дапамогай электрычных ваганняў нізкай (гукавой) частаты. Можна, напрыклад, змяняць з гукавой частатой амплітуду высокачастотных ваганняў. Гэты спосаб называюць амплітуднай мадуляцыяй. На рысунку 72 паказаны тры графікі: а) графік ваганняў высокай частаты, якую называюць нясучай частатой, б) графік ваганняў гукавой частаты, г. зн. мадулюючых ваганняў, в) графік мадуляваных па амплітудзе ваганняў. Без мадуляцыі мы ў лепшым выпадку можам кантраляваць, працуе станцыя або маўчыць, але і толькі. Без мадуляцыі няма ніякай перадачы — ні тэлеграфнай, ні тэлефоннай, ні тэлевізійнай.

Мадуляцыя — павольны працэс. Гэта такія змяненні ў высокачастотнай вагальнай сістэме, пры якіх яна паспявае зрабіць



Рыс. 73

вельмі многа высокачастотных ваганняў, перш чым іх амплітуда змяняецца колькі-небудзь прыметна.

Дэтэктіраванне. У прыёмніку з мадуляваных ваганняў высокай частаты вылучаюцца нізкачастотныя ваганні. Такі працэс пераўтварэння сігнала называюць *дэтэктіраваннем*.

Атрыманы ў выніку дэтэктіравання сігнал адпавядае таму гукавому сігналу, які дзейнічаў на мікрафон перадатчыка. Пасля ўзмацнення ваганні нізкай частаты могуць быць ператвораны ў гук.

Асноўныя прынцыпы радыёсувязі паказаны блок-схмай на рысунку 73.

? 1. Для чаго патрэбна мадуляцыя ваганняў? 2. Што называюць дэтэктіраваннем ваганняў?

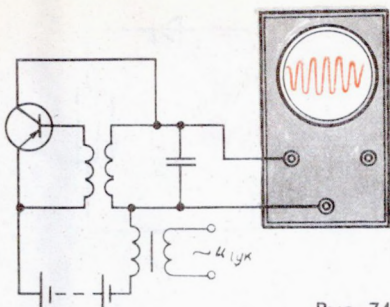
§ 34. ЯК АЖЫЦЦЯЎЛЯЕЦЦА МАДУЛЯЦЫЯ І ДЭТЭКЦІРАВАННЕ

Вы ведаеце, што такое мадуляцыя і дэтэктіраванне і навошта яны патрэбны. Цяпер паглядзім, як ажыццяўляюцца гэтыя працэсы.

Амплітудная мадуляцыя высокачастотных ваганняў дасягаецца спецыяльным уздзеяннем на генератар незатухаючых ваганняў. У прыватнасці, мадуляцыю можна ажыццявіць, змяняючы на вагальным контуры напружанне, якое ствараецца крыніцай (гл. § 22). Чым большае напружанне на контуры генератара, тым больш энергіі паступае за перыяд ад крыніцы ў контур. Гэта прыводзіць да павелічэння амплітуды ваганняў у контуры. Пры памяншэнні напружання энергія, якая паступае ў контур, таксама памяншаецца. Таму памяншаецца і амплітуда ваганняў у контуры.

Калі мяняць напружанне на контуры з частатой, многа меншай за частату ваганняў, якія вырабляюцца генератарам, то змяненні амплітуды гэтых ваганняў будуць прыблізна прама

парапарцыянальныя змяненням напружання. У самым простым прыстасаванні для ажыццяўлення амплітуднай мадуляцыі ўключаюць паслядоўна з крыніцай пастаяннага напружання дадатковую крыніцу пераменнага напружання нізкай частаты. Гэтай крыніцай можа быць, напрыклад, другая абмотка трансфарматара, калі па яго першаснай абмотцы праходзіць ток гукавой частаты (рыс. 74). У выніку амплітуда ваганняў у вагальным контуры генератара будзе змяняцца ў такт са змяненнямі напружання на транзістары. Гэта і азначае, што высокачастотныя ваганні мадулююцца па амплітудзе нізкачастотным сігналам.



Рыс. 74

Часавую разгортку мадуляваных ваганняў можна непасрэдна назіраць на экране асцылагафа, калі падаць на яго напружанне з вагальнага контуру.

Акрамя амплітуднай мадуляцыі, у некаторых выпадках прымяняюць частотную мадуляцыю — змяненне частаты ваганняў у адпаведнасці з кіруючым сігналам. Яе перавагай з'яўляецца вялікая ўстойлівасць у адносінах да перашкод.

Дэтэктіраванне. Прыняты прыёмнікам мадуляваны высокачастотны сігнал нават пасля ўзмацнення не здольны непасрэдна выклікаць ваганні мембраны тэлефона або рупара гучнагаварыцеля з гукавой частатой. Ён можа выклікаць толькі высокачастотныя ваганні, якія не ўспрымаюцца нашымі вухам. Таму ў прыёмніку неабходна спачатку з высокачастотных мадуляваных ваганняў вылучыць сігнал гукавой частаты.

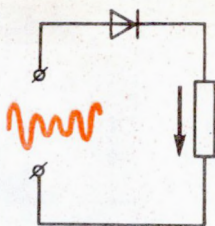
Дэтэктіраванне ажыццяўляецца прыстасаваннем, якое мае элемент з аднабаковай праводнасцю — *дэтэктар*. Такім элементам можа быць электронная лямпа (вакуумны дыёд) або паўправодніковы дыёд.

Разгледзім работу паўправодніковага дэтэктара. Няхай гэты прыбор уключаны ў ланцуг паслядоўна з крыніцай мадуляваных ваганняў і нагрузкай¹ (рыс. 75). Ток у ланцугу будзе праходзіць пераважна ў адным напрамку, абазначаным на рысунку стрэлкай, паколькі супраціўленне дыёда ў прамым напрамку многа меншае, чым у адваротным. Мы наогул можам не ўлічваць адваротны ток і лічыць, што дыёд мае аднабаковую праводнасць. Вольт-амперную характарыстыку дыёда прыбліжана можна ўявіць у выглядзе ломанай, якая складаецца з двух прамалінейных адрэзкаў (рыс. 76).

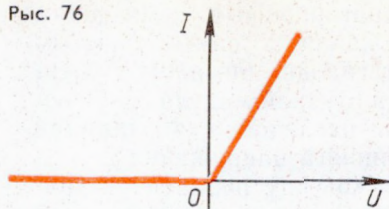
У ланцугу (гл. рыс. 75) будзе ісці пульсуючы ток, графік якога паказаны на рысунку 77. Гэты пульсуючы ток згладжваец-

¹ Нагрузкай дэтэктара называюць рэзістар, на які паступаюць ваганні гукавой частаты.

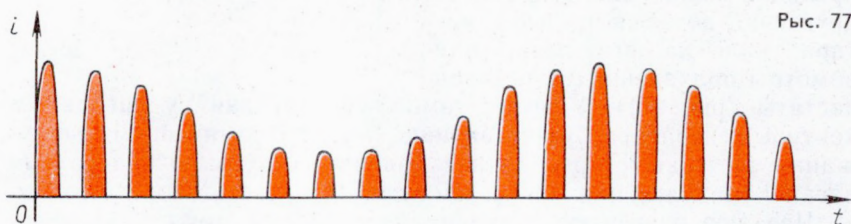
Рыс. 75



Рыс. 76



Рыс. 77



ца з дапамогай фільтра. Найпрасцейшы фільтр уяўляе сабой кандэнсатар, далучаны да нагрузкі (рыс. 78). Фільтр працуе так. У тыя моманты часу, калі дыёд прпускаяе ток, частка яго праходзіць праз нагрузку, а другая частка адгаліноўваецца ў кандэнсатар, зараджаючы яго (гл. суцэльныя стрэлкі на рысунку 78). Разгалінаванне току памяншае пульсаванне току, якія праходзяць праз нагрузку. Затое ў прамежку паміж імпульсамі, калі дыёд запёрты, кандэнсатар часткова разраджаецца праз нагрузку. Таму ў інтэрвале паміж імпульсамі ток праз нагрузку ідзе ў той жа бок (гл. пункцірную стрэлку на рысунку 78). Кожны новы імпульс падзараджае кандэнсатар. У выніку гэтага праз нагрузку праходзіць ток гукавой частаты, форма ваганняў якога амаль дакладна ўзнаўляе форму нізкачастотнага сігнала на перадаючай станцыі (рыс. 79).

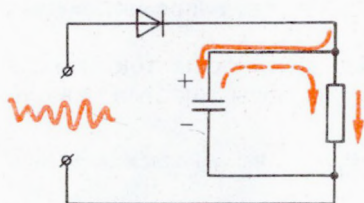
Больш складаныя фільтры згладжваюць невялікія высокачастотныя пульсаванні, і ваганні гукавой частаты адбываюцца больш плаўна, чым гэта паказана на рысунку 79.

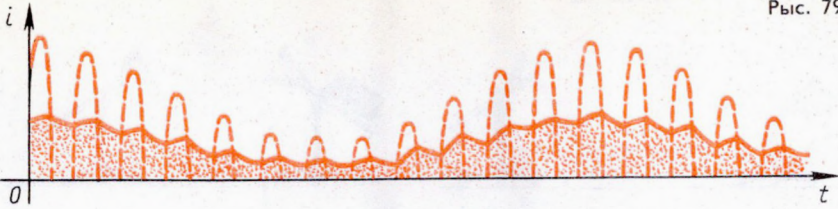
Найпрасцейшы радыёпрыёмнік. Ён складаецца з вагальнага контуру, звязанага з антэнай, і далучанага да контуру ланцуга,

які складаецца з дэтэктара, кандэнсатара і тэлефона (рыс. 80).

У вагальным контуры радыёхваляў узбуджаюцца мадуляваныя ваганні. Шпулі тэлефона адыгрываюць ролю нагрузкі. Праз іх ідзе ток гукавой частаты. Невялікія пульсаванні высокай частаты не ўплываюць прыметна на ваганні мембраны і не ўспрымаюцца на слых.

Рыс. 78





Мадуляваць можна амплітуду або частату ваганьняў. Прасцей за ўсё ажыццяўляецца амплітудная мадуляцыя.

Пры дэтэкціраванні пераменнага ток выпрамяляецца і высокачастотныя пульсаванні згладжваюцца фільтрам.

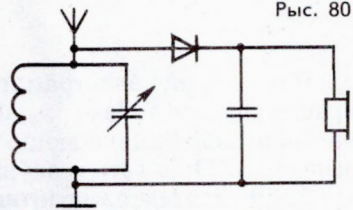


Рис. 80

1. Ад чаго залежыць амплітуда аўтаваганьняў у генератары на транзістары?
2. Якая будова найпрасцейшага дэтэктарнага прыёмніка?

§ 35. УЛАСЦІВАСЦІ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ХВАЛЬ

Электрамагнітныя хвалі паглынаюцца, адбіваюцца, праламляюцца, падобна да ўсіх іншых відаў хваль. Назіраць гэтыя з'явы няцяжка.

Сучасныя радыётэхнічныя прыстасаванні дазваляюць правесці вельмі наглядныя доследы па назіранню ўласцівасцей электрамагнітных хваль. Пры гэтым лепш за ўсё карыстацца хвалямі сантыметровага дыяпазону. Гэтыя хвалі выпраменьваюцца спецыяльным генератарам звышвысокай частаты (ЗВЧ). Электрычныя ваганні генератара мадулююць гукавой частатой. Прыняты сігнал пасля дэтэкціравання падаецца на гучнагаварыцель.

Электрамагнітныя хвалі выпраменьваюцца рупарнай антэнай у напрамку восі рупара. Прыёмная антэна ў выглядзе такога ж рупара ўлаўлівае хвалі, якія распаўсюджваюцца ўздоўж яго восі. Агульны выгляд устаноўкі паказаны на rysунку 81.

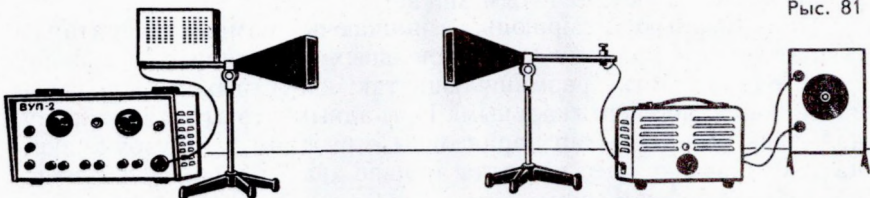


Рис. 81

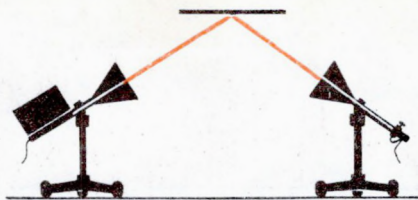


Рис. 82



Рис. 83

Паглыннанне электрамагнітных хваль. Размяшчаюць рупары адзін супраць аднаго і, дабіўшыся добрай чутнасці гуку ў гучнагаварыцелі, змяшчаюць паміж рупарамі розныя дыэлектрычныя целы. Пры гэтым заўважаюць памяншэнне гучнасці.

Адбіццё электрамагнітных хваль. Калі дыэлектрык замяніць металічнай пласцінкай, то гук перастане быць чутным. Хвалі не дасягаюць прыёмніка з прычыны адбіцця. Адбіццё адбываецца пад вуглом, роўным вуглу падзення, як і ў выпадку механічных хваль. Каб пераканацца ў гэтым, рупары размяшчаюць пад аднолькавымі вугламі да вялікага металічнага ліста (рис. 82). Гук знікае, калі прыняць ліст або павярнуць яго.

Праламленне электрамагнітных хваль. Электрамагнітныя хвалі змяняюць свой напрамак (праламляюцца) на мяжы дыэлектрыка. Гэта можна выявіць з дапамогай вялікай трохвугольнай прызмы з парафіну. Рупары размяшчаюць пад вуглом адзін да аднаго, як і пры дэманстрацыі адбіцця. Металічны ліст замяняюць прызмай (рис. 83). Прымаючы прызму або паварочваючы яе, назіраюць знікненне гуку.

Папярочнасць электрамагнітных хваль. Электрамагнітныя хвалі з'яўляюцца папярочнымі хвалямі. Гэта азначае, што вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ электрамагнітнага поля хвалі перпендыкулярныя да напрамку яе распаўсюджвання. Ваганні напружанасці электрамагнітнага поля хвалі, якая выходзіць з рупара, адбываюцца ў пэўнай плоскасці, а ваганні вектара магнітнай індукцыі ў плоскасці, ёй перпендыкулярнай. Хвалі з пэўным напрамкам ваганняў называюцца палярызаванымі.

На рысунку 84 паказана іменна палярызаваная хваля. Прыёмны рупар з дэтэктарам прымае толькі палярызаваную ў пэўным напрамку хвалю.

Гэта можна выявіць, павярнуўшы перадаючы або прыёмны рупар на 90° . Гук пры гэтым знікае.

Палярызуюць назіраюць, змяшчаючы паміж генератарам і прыёмнікам рашотку з паралельных металічных стрыжняў (рис. 84). Рашотку размяшчаюць так, каб стрыжні былі гарызантальнымі або вертыкальнымі. Пры адным з гэтых становішчаў, калі электрычны вектар паралельны стрыжням, у іх узбуджаюцца токі, у выніку чаго рашотка адбівае хвалі падобна да суцэльнай металічнай пласціны.

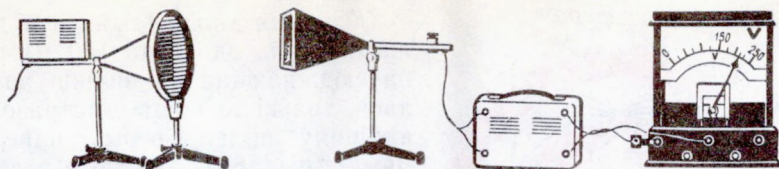


Рис. 84

Калі ж вектар $\vec{E}$ перпендыкулярны да стрыжняў, токі ў іх не ўзбуджаюцца і электрамагнітная хваля праходзіць.

Мы пакуль што пазнаёміліся не з усімі асноўнымі ўласцівасцямі электрамагнітных хваль. Поўнае знаёмства адкладзём да вывучэння опыці.

1. Пералічыце вядомыя Вам уласцівасці электрамагнітных хваль. 2. Якая хваля называецца палярызаванай?

§ 36. РАСПАЎСЮДЖАННЕ РАДЫЁХВАЛЬ

Пры выкарыстанні электрамагнітных хваль для радыёсувязі як крыніца, так і прыёмнік радыёхваль часцей за ўсё размяшчаюцца паблізу зямной паверхні. Форма і фізічныя ўласцівасці зямной паверхні, а таксама стан атмасферы моцна ўплываюць на распаўсюджванне радыёхваль.

Асабліва істотны ўплыў на распаўсюджванне радыёхваль робяць слаі іанізаванага газу ў верхніх частках атмасферы на вышыні 100—300 км над паверхняй Зямлі. Гэтыя слаі называюць *іанасферай*. Іанізацыя паветра верхніх слаёў атмасферы выклікаецца электрамагнітным выпраменьваннем Сонца і патокам зараджаных часціц, якія выпраменьваюцца Сонцам.

Праводзячая электрычны ток іанасфера адбівае радыёхвалі з даўжынёй хвалі $\lambda > 10$ м як звычайная металічная пласціна. Але здольнасць іанасферы адбіваць і паглынаць радыёхвалі істотна мяняецца ў залежнасці ад часу сутак і пораў года¹.

Устойлівая радыёсувязь паміж аддаленымі пунктамі на зямной паверхні па-за прамой бачнасцю аказваецца магчымай дзякуючы адбіццю хваль ад іанасферы і здольнасці радыёхваль *агібаць* выпуклую зямную паверхню.

Гэта агібанне выражана тым мацней, чым большая даўжыня хвалі. Таму радыёсувязь на вялікіх адлегласцях за кошт агібання хвалямі Зямлі аказваецца магчымай толькі пры даўжынях хваль, якія значна перавышаюць 100 м (*сярэдня і доўгія хвалі*).

¹ Менавіта таму радыёсувязь, асабліва ў дыяпазоне сярэдніх даўжын хваль (100—1000 м), больш надзейная ўначы і ў зімовы час.



Рыс. 85

Кароткія хвалі (дыяпазон даўжынь хваль ад 10 да 100 м) распаўсюджваюцца на вялікія адлегласці толькі за кошт шматразовых адбіццяў ад іанасферы і паверхні Зямлі (рыс. 85). Менавіта з дапамогай кароткіх хваль можна ажыццявіць радыёсувязь на любых адлегласцях паміж радыёстанцыямі на Зямлі.

Доўгія радыёхвалі для гэтай мэты менш прыгодныя з прычыны значнага паглынання паверхневымі слаямі Зямлі і іанасферай. Усё ж найбольш надзейная радыёсувязь на абмежаваных адлегласцях пры дастатковай магутнасці перадаючай радыёстанцыі забяспечваецца на доўгіх хвалях.

Ультракароткія радыёхвалі ($\lambda < 10$ м) пранікаюць скрозь іанасферу і амаль не агібаюць паверхню Зямлі. Таму яны выкарыстоўваюцца для радыёсувязі паміж пунктамі ў межах прамой бачнасці, а таксама для сувязі з касмічнымі караблямі.

Распаўсюджванне радыёхваль істотна залежыць ад іх даўжынь хваль. Кароткія хвалі ($\lambda \sim 10\text{—}100$ м) шматразова адбіваюцца ад іанасферы і паверхні Зямлі. Доўгія хвалі ($\lambda > 100$ м) «слізгаюць» уздоўж паверхні Зямлі. Ультракароткія радыёхвалі ($\lambda < 10$ м) пранікаюць праз іанасферу.

§ 37. РАДЫЁЛАКАЦЫЯ

У сучаснай тэхніцы з'ява адбіцця радыёхваль рознымі перашкодамі знаходзіць шырокае прымяненне. Высокаадчувальныя прыёмнікі ўлоўліваюць і ўзмацняюць адбіты сігнал з мэтай атрымаць інфармацыю аб тым, дзе знаходзіцца той прадмет, ад якога адбілася хваля.

Вывяўленне і дакладнае вызначэнне месцазнаходжання аб'ектаў з дапамогай радыёхваль называюць *радыёлакацыяй*. Радыёлакацыйная ўстаноўка — *радыёлакатар* (або радар) — складаецца з перадаючай і прыёмнай частак. У радыёлакацыі выкарыстоўваюць электрычныя ваганні звышвысокай частаты ($10^8\text{—}10^{11}$ Гц). Магутны генератар ЗВЧ звязаны з антэнай, якая выпраменьвае востранакіраваную хвалю. У радыёлакатарах, якія працуюць на даўжынях хваль парадку 10 см і менш, такая хваля ствараецца антэнамі ў выглядзе парабалічных люстраў. Для хваль метравага дыяпазону антэны маюць выгляд складаных сістэм вібратаў. Пры гэтым вострая накіраванасць выпраменьвання атрымліваецца ў выніку складання хваль. Антэна зроблена так, што хвалі, пасланыя кожным з вібратаў, пры скла-

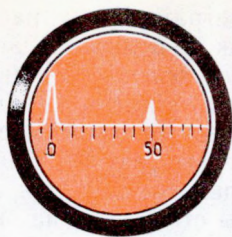


Рис. 86

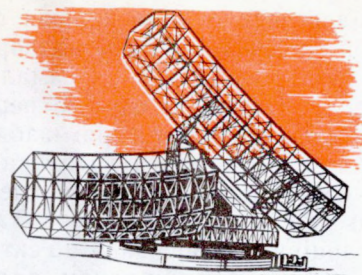


Рис. 87

данні ўзаємна ўзмацняюць адна адну толькі ў зададзеным напрамку. У астатніх напрамках пры складанні хваль адбываецца поўнае або частковае іх узаемнае гашэнне.

Адбітая хваля ўлоўліваецца той жа выпраменьваючай антэнай або другой, таксама востранакіраванай прыёмнай антэнай. Яркая выражаная накіраванасць выпраменьвання дазваляе гаварыць аб «прамені» радыёлакатара. Напрамак на аб'ект і вызначаецца як напрамак праменя ў момант прыёму адбітага сігнала.

Для вызначэння адлегласці да цэлі прымяняюць імпульсны рэжым выпраменьвання. Перадатчык выпраменьвае хвалі кароткачасовымі імпульсамі. Працягласць кожнага імпульсу складае мільённыя долі секунды, а прамежак паміж імпульсамі прыкладна ў 1000 разоў большы. У час паўз прымаюцца адбітыя хвалі.

Вызначэнне адлегласці R праводзіцца шляхам вымярэння агульнага часу t праходжання радыёхваль да цэлі і назад. Паколькі скорасць радыёхваль $c = 3 \cdot 10^8$ м/с у атмасферы практычна пастаянная, то

$$R = \frac{ct}{2}.$$

У выніку рассявання радыёхваль да прыёмніка даходзіць толькі мізэрная частка той энергіі, якую выпраменьвае перадатчык. Таму прыёмнікі радыёлакатараў узмацняюць прыняты сігнал у мільёны мільёнаў (10^{12}) разоў. Такі адчувальны прыёмнік, зразумела, павінен быць адключаны на час пасылкі імпульсу перадатчыкам.

Для фіксацыі пасланага і адбітага сігналаў выкарыстоўваюць электронна-прамянёвую трубку. У момант пасылкі імпульсу светлы пункт, які раўнамерна рухаецца па экране электронна-прамянёвай трубки, адхіляецца. На экране з'яўляецца ўсплёск каля нулявой адзнакі шкалы далёкасці (рыс. 86). Плямка, што свеціцца, на экране працягвае раўнамерна рухацца ўздоўж шкалы і ў момант прыёму слабага адбітага сігнала зноў адхіляецца. Адлегласць паміж усплёскамі на экране прапарцыянальная часу t праходжання сігнала і, значыць, прапарцыянальная адлегласці R да цэлі. Гэта дазваляе праградуіраваць шкалу непасрэдна ў кіламетрах.

Радыёлакацыйныя ўстаноўкі выяўляюць караблі і самалёты

на адлегласцях да некалькіх соцень кіламетраў. На іх работу слаба ўплываюць умовы надвор'я і час сутак. У вялікіх аэрапортах лакатары сочаць за самалётамі, якія ўзлятаюць і ідуць на пасадку. Наземная служба перадае па радыё пілотам неабходныя парады і такім чынам забяспечвае бяспеку палётаў. Знешні выгляд аэрадромнага лакатара паказаны на рысунку 87. Караблі і самалёты таксама забяспечаны радыёлакатарамі, якія служаць для навігацыйных мэт. Такія лакатары ствараюць на экране карціну размяшчэння аб'ектаў, якія расейваюць радыёхвалі. Аператар мае перад вачамі радыёлакацыйную карту мясцовасці.

У цяперашні час прымяненне радыёлакацыі становіцца ўсё больш разнастайным. З дапамогай лакатараў назіраюць метэоры ў верхніх слаях атмасферы. Лакатары выкарыстоўваюцца службай надвор'я для назірання за воблакамі. Нарэшце, лакатары выкарыстоўваюцца ў касмічных даследаваннях. Кожны касмічны карабель абавязкова мае на борце некалькі радыёлакатараў. У 1946 г. у ЗША і Венгрыі быў ажыццёўлены эксперымент па прыёму сігнала, адбітага ад паверхні Месяца. У 1961 г. савецкімі вучонымі праведзена радыёлакацыя планеты Венера, што дазволіла ацаніць перыяд вярчэння планеты вакол сваёй восі. У цяперашні час ажыццёўлена лакацыя і іншых планет Сонечнай сістэмы.

Радыёлакатары ўжываюцца для выяўлення самалётаў і караблёў, у службе надвор'я, для лакацыі планет і інш.

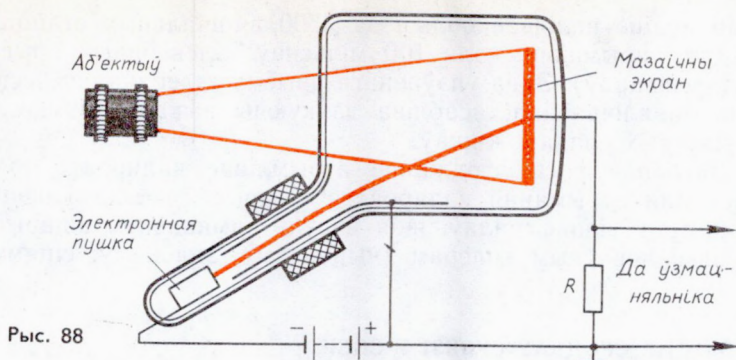
 На якіх прынцыпах заснавана работа радыёлакатара?

§ 38. ПАНЯЦЦЕ АБ ТЭЛЕБАЧАННІ

Радыёхвалі выкарыстоўваюцца не толькі для перадачы гуку, але і для перадачы відарыса (тэлебачанне).

Прынцып перадачы відарысаў на адлегласць заключаецца ў наступным. На перадаючай станцыі робіцца пераўтварэнне відарыса ў паслядоўнасць электрычных сігналаў. Гэтымі сігналамі мадулююць затым ваганні, якія вырабляюцца генератарам высокай частаты. Мадуляваная электрамагнітная хваля пераносіць інфармацыю на вялікія адлегласці. У прыёмніку адбываецца адваротнае пераўтварэнне. Высокачастотныя мадуляваныя ваганні дэтэкціруюцца, а атрыманы сігнал пераўтвараецца ў бачны відарыс. Для перадачы руху выкарыстоўваюцца прынцып кіно: відарысы рухомага аб'екта (кадры), якія крыху адрозніваюцца адзін ад аднаго, перадаюць дзесяткі разоў у секунду (у нашым телебачанні 50 разоў).

Відарыс кадра пераўтвараецца з дапамогай перадаючай вакуумнай электроннай трубка — *іканаскопа* (рыс. 88) у серыю электрычных сігналаў. Акрамя іканаскопа, існуюць і іншыя пера-



даючыя прыстасаванні. Унутры іканаскопа размешчаны мазаічны экран, на які з дапамогай аптычнай сістэмы праецуецца відарыс аб'екта. Кожная ячэйка мазаікі зараджаецца, прычым яе зарад залежыць ад інтэнсіўнасці святла, якое падае на ячэйку. Гэты зарад мяняецца пры пападанні на ячэйку электроннага пучка, які ствараецца электроннай пушкай. Электронны пучок паслядоўна пападае на ўсе элементы спачатку аднаго радка мазаікі, затым другога радка і г. д. (усяго 625 радкоў). Ад таго, наколькі моцна мяняецца зарад ячэйкі, залежыць сіла току ў рэзістары R . Таму напружанне на рэзістары змяняецца прапарцыянальна змяненню асветленасці ўздоўж радкоў кадра.

Такі ж сігнал атрымліваецца ў тэлевізійным прыёмніку пасля дэтэктіравання. Гэта *відэасігнал*. Ён пераўтвараецца ў бачны відарыс на экране прыёмнай вакуумнай электроннай трубкі — *кінескопа*. Электронная пушка такой трубкі забяспечана электродам, які кіруе колькасцю электронаў у пучку і, значыць, свячэннем экрана ў месцы пападання праменя. Сістэмы шпуль гарызантальнага і вертыкальнага адхілення прымушаюць электронны прамень аббягаць увесь экран зусім такім жа чынам, як электронны прамень аббягаў мазаічны экран у перадаючай трубцы. Сінхроннасць руху праменяў у перадаючай і прыёмнай трубках дасягаецца пасылкай спецыяльных сінхранізуючых сігналаў.

Тэлевізійныя радыёсігналы могуць быць перададзены толькі ў дыяпазоне ультракароткіх (метровых) хваль¹. Такія хвалі распаўсюджваюцца звычайна толькі ў межах прамой бачнасці антэны. Таму для ахопу тэлевізійным вяшчаннем вялікай тэрыторыі неабходна размяшчаць тэлеперадатчыкі часцей і падымач іх антэны вышэй. Вежа агульнасаюзнага тэлецэнтра імя 50-годдзя Кастрычніка ў Маскве вышыняй 540 м забяспечвае ўпэўнены прыём тэлеперадач у радыусе 120 км. Цяпер тэлевізійная сетка

¹ Відэасігнал нясе значна больш інфармацыі, чым гукавы сігнал. З-за гэтага ён займае значна больш шырокую паласу частот. На нізкіх частотах гэтыя палосы перакрываліся б і перадаючыя станцыі «перашкаджалі б» адна адной.

ў нашай краіне налічвае больш за 3500 вяшчальных станцый; іх перадачы прымаюць каля 100 мільёнаў тэлевізійных прыёмнікаў (тэлевізараў). Зона ўпэўненага прыёму тэлебачання бесперапынна павялічваецца, асабліва дзякуючы выкарыстанню рэтрансляцыйных спадарожнікаў.

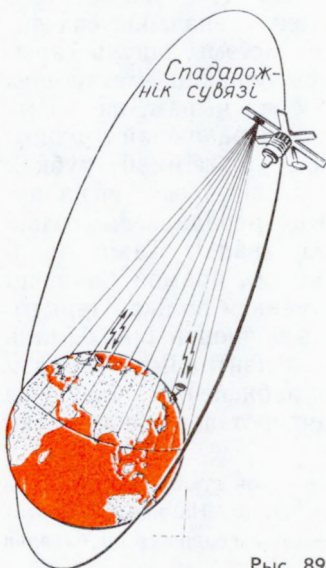
Усё большае распаўсюджанне атрымлівае каляровае тэлебачанне. Для атрымання каляровага відарыса ажыццяўляецца перадача трох відэасігналаў, якія нясуць кампаненты відарыса, адпаведныя асноўным колерам (чырвонаму, зялёнаму, сіняму).

§ 39. РАЗВІЦЦЕ СРОДКАЎ СУВЯЗІ Ў СССР

У нашай краіне ствараецца адзіная аўтаматызаваная сістэма сувязі. Для гэтага развіваюцца, удасканальваюцца і знаходзяць новыя галіны прымянення розныя тэхнічныя сродкі сувязі.

Яшчэ нядаўна міжгародная тэлефонная сувязь ажыццяўлялася выключна па паветраных лініях сувязі; пры гэтым на надзейнасць сувязі ўплывалі навальніцы і магчымасць абледзянення правадоў. У цяперашні час усё шырэй прымяняюцца кабельныя і радыёрэлейныя лініі, павышаецца ўзровень аўтаматызацыі сувязі.

Радыёрэлейныя лініі сувязі выкарыстоўваюць ультракароткія (дэцыметровыя і сантыметровыя) хвалі. Гэтыя хвалі распаўсюджваюцца ў межах прамой бачнасці. Таму лініі складаюцца з ланцужка маламагутных радыёстанцый, кожная з якіх перадае сігналы да суседняй як бы па эстафеце. Такія станцыі маюць мачты вышынёй 60—80 м, якія знаходзяцца на адлегласці 40—60 км адна ад адной.



Рыс. 89

Поспехі ў галіне касмічнай радыёсвязі дазволілі стварыць новую сістэму сувязі, названую «Арбіта». У гэтай сістэме выкарыстоўваюцца рэтрансляцыйныя спадарожнікі сувязі (рыс. 89). Спадарожнікі сувязі серыі «Маланка» запускаяцца на моцна выцягнутыя арбіты. Перыяд іх абарачэння складае каля 12 г. Створаны магутныя і надзейныя сістэмы, якія забяспечваюць тэлевізійнымі перадачамі раёны Сібіры і Далёкага Усходу і дазваляюць ажыццявіць тэлефонна-тэлеграфную сувязь з аддаленымі раёнамі нашай краіны.

Новыя спадарожнікі серыі «Радуга» запускаяцца на арбіту радыусам каля 36 000 км. На гэтай арбіце пе-

ряд абарачэння спадарожніка роўны 24 г і таму спадарожнік увесь час знаходзіцца над адным і тым жа пунктам паверхні Зямлі.

Удасканальваюцца і знаходзяць новыя прымяненні і такія параўнальна старыя сродкі сувязі, як тэлеграф і фотатэлеграф.

Аб размаху, які атрымала перадача нерухомых відарысаў па фотатэлеграфе, можна меркаваць па такіх лічбах: у год па фотатэлеграфе перадаецца да 70 тысяч газетных палос, з якіх друкуецца звыш 3 мільярдаў экзэмпляраў цэнтральных газет.

Тэлебачанне ахоплівае амаль усе населеныя пункты нашай краіны. Не далёка той час, калі тэлебачанне стане сусветным.

ПРАКТЫКАВАННЕ 4

1. У схеме радыёпрыёмніка, паказанай на рысунку 80, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ Гн, ёмістасць C пераменнага кандэнсатара можа мяняцца ад 12 да 450 пФ. На якія даўжыні хваль разлічаны гэтыя радыёпрыёмнікі?

2. На рысунку 90 паказана прыёмная антэна тэлевізара. Што можна сказаць аб арыентацыі ваганняў вектара магнітнай індукцыі хвалі, якая ідзе з тэлецэнтра?

3. Ці ёсць істотныя адрозненні паміж умовамі распаўсюджвання радыёхваль на Месяцы і на Зямлі?

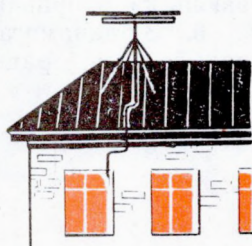


Рис. 90

КАРТОКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 4¹

1. У электрамагнітнай хвалі адбываюцца ваганні напружання $\vec{E}$ электрычнага поля і індукцыі $\vec{B}$ магнітнага поля. Вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ перпендыкулярныя адзін аднаму і перпендыкулярныя да напрамку распаўсюджвання хвалі. Электрамагнітныя хвалі з'яўляюцца папярочнымі.

2. Выпраменьванне электрамагнітных хваль адбываецца пры хуткіх ваганнях электрычных зарадаў, якія рухаюцца з паскарэннем. Энергетычнай характарыстыкай выпраменьвання служыць шчыльнасць патоку выпраменьвання.

3. Шчыльнасцю патоку электрамагнітнага выпраменьвання называюць адносіну электрамагнітнай энергіі ΔW , што прайшла за час Δt праз паверхню плошчай S , перпендыкулярную прамяням да здабытку плошчы S на час Δt :

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

¹ Прабіце тое ж самае, што было рэкамендавана перад кароткімі вынікамі папярэдніх раздзелаў. Лік істотных пунктаў 5—6.

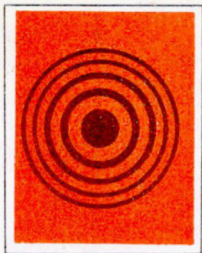
Шчыльнасць патоку электрамагнітнага выпраменьвання адваротна прапарцыянальная квадрату адлегласці ад крыніцы і прама прапарцыянальная чацвёртай ступені частаты ваганняў:

$$I \sim \frac{\omega^4}{R^2}.$$

4. Упершыню электрамагнітныя хвалі атрымаў Г. Герц. Грунтуючыся на доследах Герца, А. С. Папоў вынайшаў радыё.

5. Радыётэлефонная сувязь ажыццяўляецца наступным чынам. Высокачастотныя ваганні, што выпрацоўваюцца генератарам, мадулююцца ваганнямі нізкай (гукавой) частаты. Антэна перадаючай станцыі выпраменьвае мадуляваную электрамагнітную хвалю. У радыёпрыёмніку мадуляваныя высокачастотныя ваганні ператвараюцца ў ваганні нізкай частаты. Гэты працэс называюць дэтэктіраваннем.

6. З дапамогай электрамагнітных хваль ажыццяўляецца радыёсувязь, радыёперадача, радыёлакацыя, касмічная сувязь і інш.



ОПТЫКА

Раздзел 5. Светлавая хвалі

Раздзел 6. Элементы тэорыі адноснасці

Раздзел 7. Выпраменьванне і спектры

У гэтым раздзеле мы прадоўжым вывучэнне электрамагнітных хваль, але толькі больш кароткіх, чым дагэтуль. Такія хвалі называюць святлом.

РАЗВІЦЦЕ ПОГЛЯДУ НА ПРЫРОДУ СВЯТЛА¹

Першыя ўяўленні старажытных вучоных аб святле былі вельмі наіўнымі. Лічылася, што з вачэй выходзяць асаблівыя тонкія шчупальцы і зрокавыя ўражанні ўзнікаюць пры абмацванні імі прадметаў. Спыняцца падрабязна на падобных поглядах цяпер, зразумела, няма патрэбы. Мы прасочым каратка за развіццём навуковых уяўленняў аб тым, што такое святло.

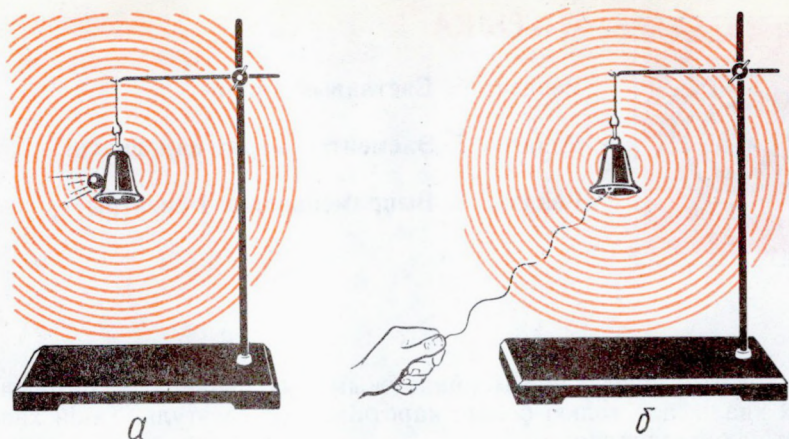
Два спосабы перадачы ўздзеянняў. Ад крыніцы святла, напрыклад лямпачкі, святло распаўсюджваецца ва ўсе бакі і падае на навакольныя прадметы, выклікаючы, у прыватнасці, іх награванне. Пападаючы ў вока, святло выклікае зрокавае адчуванне — мы бачым. Можна сказаць, што пры распаўсюджванні святла адбываецца перадача ўздзеянняў ад аднаго цела (крыніцы) да другога (прыёмніка).

Наогул жа дзеянне аднаго цела на другое можа адбывацца двума рознымі спосабамі: або пры дапамозе *пераносу рэчыва* ад крыніцы да прыёмніка, або пры дапамозе *змянення стану асяроддзя* паміж целамаі (без пераносу рэчыва).

Можна, напрыклад, прымусіць зазвінец званочак, які знаходзіцца на некаторай адлегласці, удала папаўшы ў яго шарыкам (рыс. 91, а). Тут мы маем справу з пераносам рэчыва. Але можна зрабіць інакш: прывязаць шнур да языка званочка і прымусіць званочак гучаць, пасылаючы па шнуры хвалі, што разгойдваюць яго язык (рыс. 91, б). У гэтым выпадку пераносу рэчыва не будзе. Па шнуры распаўсюджваецца хваля, г. зн. адбываецца змяненне стану (формы) шнура.

Такім чынам, перадача дзеяння ад аднаго цела да другога можа адбывацца з дапамогай хвалі.

¹ Гэтыя ўводзіны даюць уяўленне аб змесце і значэнні таго, што мы цяпер будзем вывучаць. Іх дастаткова прачытаць адзін раз.



Рыс. 91

Карпускулярная і хвалевае тэорыі святла. У адпаведнасці з двума магчымымі спосабамі перадачы дзеяння ад крыніцы да прыёмніка ўзніклі і пачалі развівацца дзве зусім розныя тэорыі аб тым, што такое святло, якая яго прырода. Прычым узніклі яны амаль адначасова ў XVII ст.

Адна з гэтых тэорый звязана з імем Ньютана, а другая — з імем Гюйгенса.

Ньютан прытрымліваўся так званай *карпускулярнай*¹ тэорыі святла, згодна з якой святло — гэта *паток часціц*, якія ідуць ад крыніцы ва ўсе бакі (перанос рэчыва).

Згодна ж з уяўленнямі Гюйгенса, святло — *гэта хвалі*, што распаўсюджваюцца ў асобым, гіпатэтычным асяроддзі — эфіры, які запаўняе ўсю прастору і пранікае ўнутр усіх цел.

Абедзве тэорыі доўгі час існавалі паралельна. Ні адна з іх не магла атрымаць рашаючай перамогі. Толькі аўтарытэт Ньютана прымушаў большасць вучоных аддаваць перавагу карпускулярнай тэорыі. Вядома ў той час з доследу законы распаўсюджвання святла больш ці менш паспяхова растлумачваліся абедзвюма тэорыямі.

На аснове карпускулярнай тэорыі было цяжка растлумачыць, чаму светлавя пучкі, перасякаючыся ў прастору, ніяк не дзейнічаюць адзін на аднаго. Светлавя ж часціцы павінны сутыкацца і рассеяцца.

Хвалевае ж тэорыя гэта лёгка растлумачвала. Хвалі, напрыклад на паверхні вады, свабодна праходзяць адна скрозь адну, не робячы ўзаемамога ўплыву.

Аднак прамалінейнае распаўсюджванне святла, якое прыводзіць да ўтварэння за прадметамі рэзкіх ценяў, цяжка растлу-

¹ Лацінскае слова *карпускула* ў перакладзе на беларускую мову азначае «часціца».

мачыць, зыходзячы з хвалевай тэорыі. Па карпускулярнай жа тэорыі прамалінейнае распаўсюджванне святла з'яўляецца проста вынікам закону інерцыі.

Такое няпэўнае становішча адносна прыроды святла працягвалася да пачатку XIX ст., калі была ўпершыню вивучана з'ява агібання святлом перашкод (дыфракцыя) і з'ява ўзмацнення ці аслаблення святла пры накладанні светлавых пучкоў адзін на аднаго (інтэрферэнцыя). Гэтыя з'явы ўласцівы выключна хвалеваму руху¹. Растлумачыць іх з дапамогай карпускулярнай тэорыі нельга. Таму здавалася, што хвалевая тэорыя атрымала канчатковую і поўную перамогу.

Такая ўпэўненасць асабліва ўзмацнілася, калі Максвел у другой палавіне XIX ст. паказаў, што святло ёсць прыватны выпадак электрамагнітных хваль. Работаў Максвела былі закладзены асновы *электрамагнітнай тэорыі святла*.

Пасля эксперыментальнага выяўлення электрамагнітных хваль Герцам ніякіх сумненняў у тым, што пры распаўсюджванні святло паводзіць сябе як хваля, не засталася. Няма іх і цяпер.

Аднак у пачатку XX ст. уяўленні аб прыродзе святла пачалі карэнным чынам змяняцца. Нечакана высветлілася, што адхіленая карпускулярная тэорыя ўсё ж мае адносіны да рэчаіснасці. Аказалася, што пры *выпраменьванні і паглыннанні святло паводзіць сябе падобна да патоку часціц*.

Былі выяўлены перарывістыя, або, як гавораць, квантавыя, уласцівасці святла. Узнікла незвычайная сітуацыя: з'явы інтэрферэнцыі і дыфракцыі па-ранейшаму можна было растлумачыць, лічачы святло хваляй, а з'явы выпраменьвання і паглынання — лічачы святло патокам часціц.

Мы спачатку пазнаёмімся з хвалевымі ўласцівасцямі святла. Аб карпускулярна-хвалевым дуалізме (дваістасці) уласцівасцей святла будзе расказана ў далейшым. Але перш за ўсё каратка напаміні, што гаварылася пра святло ў VIII класе.

Геаметрычная і хвалевая оптыка. Пры першапачатковым азнаямленні з аптычнымі з'явамі было ўведзена паняцце светлавога прамяня. Прамені паказваюць напрамак распаўсюджвання святла. Каб вызначыць гэты напрамак, мы *вылучаем вузкія светлавыя пучкі, дыяметр якіх значна перавышае даўжыню хвалі*. Затым мы *замяняем гэтыя пучкі лініямі, якія з'яўляюцца восьмі светлавых пучкоў*. Гэтыя *лініі і паказваюць светлавыя прамені*.

Асноўная карысць ад уяўлення паняцця светлавога прамяня заключаецца ў тым, што паводзіны праменяў у прасторы вызначаюцца простымі законамі — *законамі геаметрычнай оптыкі*.

Геаметрычнай оптыкай называецца раздзел оптыкі, у якім вивучаюцца законы распаўсюджвання светлавой энергіі ў празрыстых асяроддзях на аснове ўяўлення аб светлавым прамені.

Гэтыя законы былі ўстаноўлены эксперыментальна задоўга

¹ Аб дыфракцыі і інтэрферэнцыі падрабязна будзе расказана ў далейшым.

да высвятлення прыроды святла. Але яны вынікаюць з хвалевай тэорыі святла як прыбліжэнне, справядлівае, калі даўжыня хвалі многа меншая за размеры перашкод, якія размешчаны не вельмі далёка ад месца назірання.

У VIII класе былі сфармуляваны два законы геаметрычнай оптыкі: закон прамалінейнага распаўсюджвання святла ў аднародным асяроддзі і закон адбіцця. Аб праламленні святла гаварылася якасна. Закон праламлення не быў сфармуляваны. Мы атрымалі законы адбіцця і праламлення святла з дапамогай уяўлення аб святле як аб хвалевым працэсе.

Раздзел 5

СВЕТЛАВЫЯ ХВАЛІ

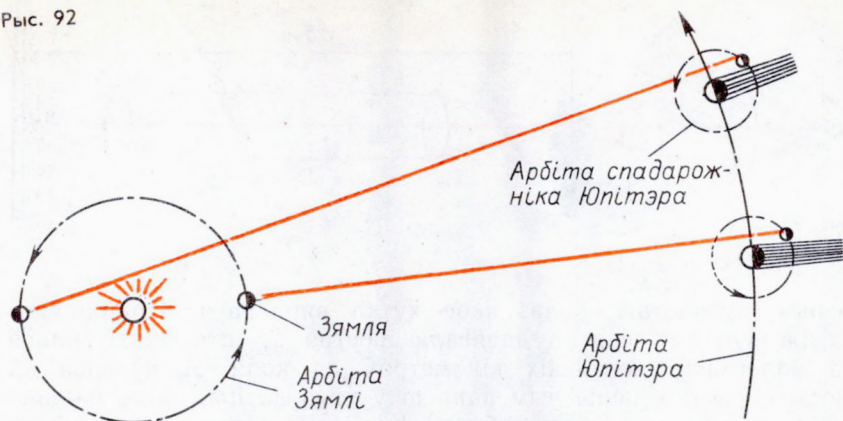
§ 40. СКОРАСЦЬ СВЯТЛА

У геаметрычнай оптыцы даследуецца толькі напрамак светлавых прамяняў. Пытанне аб тым, як адбываецца працэс распаўсюджвання святла ў часе, выходзіць за рамкі геаметрычнай оптыкі. Больш глыбока ўласцівасці святла і яго ўзаемадзеянне з рэчывам разглядаюцца ў фізічнай (хвалевай) оптыцы. Мы пачнём гэты раздзел з расказу аб тым, як была вымерана скорасць святла.

Калі мы паварочваем выключальнік, то ўвесь пакой адразу ж азараецца святлом. Здаецца, што святлу зусім не трэба часу, каб дасягнуць сцен. Рабіліся шматлікія спробы вызначыць скорасць святла. Для гэтага спрабавалі вымераць па дакладнаму гадзінніку час распаўсюджвання светлавога сігнала на вялікіх адлегласці (некалькі кіламетраў). Але гэтыя спробы не далі рэзультатаў. Пачалі думаць, што распаўсюджванне святла зусім не патрабуе часу, што святло любыя адлегласці пераадоляе імгненна. Аднак аказалася, што скорасць святла не бесканечна вялікая, і гэта скорасць была ўрэшце вызначана.

Астранамічны метад вымярэння скорасці святла. Скорасць святла ўпершыню ўдалося вымераць дацкаму вучонаму О. Рэмеру ў 1676 г. Рэмер быў астраномам, і яго поспех тлумачыцца іменна тым, што праходзімыя святлом адлегласці, якія ён выкарыстаў для вымярэнняў, былі вельмі вялікія. Гэта адлегласці паміж планетамі Сонечнай сістэмы.

Рэмер назіраў зацёмненні спадарожнікаў Юпітэра — самай вялікай планеты Сонечнай сістэмы. Юпітэр, у адрозненне ад Зямлі, мае чатырнаццаць спадарожнікаў. Найбліжэйшы яго спадарожнік — Іо — стаў прадметам назірання Рэмера. Ён бачыў, як спадарожнік праходзіў перад планетай, а затым уваходзіў у яе цень і знікаў з поля зроку. Затым ён зноў з'яўляўся, як імгненна ўспыхнуўшая лямпа. Прамежак часу паміж дзвюма ўспышкамі аказаўся роўным 42 г 28 мін. Такім чынам, гэты «месяц» уяўляў



велізарны нябесны гадзіннік, які праз роўныя прамежкі часу пасылаў свае сігналы на Зямлю.

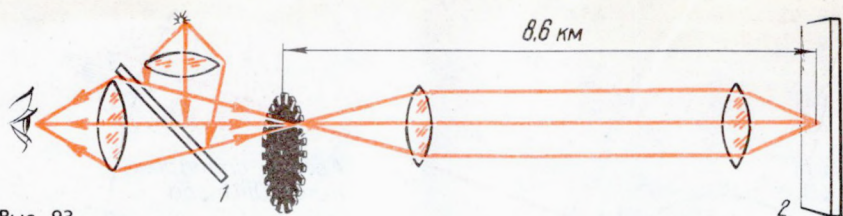
Спачатку вымярэнні рабіліся ў той час, калі Зямля пры сваім руху вакол Сонца бліжэй за ўсё падышла да Юпітэра (рыс. 92). Такія ж вымярэнні, праведзеныя праз некалькі месяцаў, калі Зямля аддалілася ад Юпітэра, нечакана паказалі, што спадарожнік спазніўся з'явіцца з ценю на цэлыя 22 мін у параўнанні з момантам часу, які можна было разлічыць на аснове ведання перыяду абарачэння Іо.

Рэмер растлумачваў гэта так: «Калі б я мог застацца на другім баку зямной арбіты, то спадарожнік усякі раз з'яўляўся б з ценю ў назначаны час; назіральнік, які знаходзіцца там, убачыў бы Іо на 22 мін раней. Спазненне ў гэтым выпадку адбываецца па той прычыне, што святло выкарыстоўвае 22 мін на праходжанне ад месца майго першага назірання да майго цяперашняга становішча». Ведаючы спазненне з'яўлення Іо і адлегласць, якой яно выклікана, можна вызначыць скорасць, падзяліўшы гэту адлегласць на час спазнення. Скорасць аказалася надзвычай вялікай, прыкладна $300\,000\text{ км/с}^1$. Вось таму вельмі цяжка заўважыць час распаўсюджвання святла паміж двума аддаленымі пунктамі на Зямлі, бо за адну секунду святло праходзіць адлегласць, большую за даўжыню зямнога экватара ў 7,5 раза.

Лабараторныя метады вымярэння скорасці святла. Упершыню скорасць святла лабараторным метадам удалося вымераць французскаму фізіку І. Фізо ў 1849 г.

У доследзе Фізо святло ад крыніцы факусіравалася лінзай і падала на паўпразрыстую пласцінку 1 (рыс. 93). Пасля адбіцця ад пласцінкі сфакусіраваны вузкі пучок накіроўваўся на перы-

¹ Сам Рэмер з прычыны малой дакладнасці вымярэнняў і недакладнага ведання радыуса арбіты Зямлі атрымаў для скорасці святла значэнне $215\,000\text{ км/с}$.



Рыс. 93

ферью зубчастага кола, якое хутка вярцелася. Прайшоўшы паміж зубцамі, святло дасягала люстра 2, што знаходзілася на адлегласці некалькіх кіламетраў ад кола. Адбіўшыся ад люстра, святло, перш чым папасці ў вока назіральніка, павінна было прайсці зноў паміж зубцамі. Калі кола вярцелася павольна, святло, адбітае ад люстра, было бачнае. Пры павелічэнні скорасці вярчэння яно паступова знікала. У чым жа тут справа? Пакуль святло, якое прайшло паміж двума зубцамі, ішло да люстра і назад, кола паспявала павярнуцца так, што на месца проразі становіўся зубец, і святло пераставала быць бачным.

Пры далейшым павелічэнні скорасці вярчэння святло зноў становілася бачным. Відавочна, што за час распаўсюджвання святла да люстра і назад кола паспела павярнуцца настолькі, што на месца ранейшай проразі стала ўжо новая проразь. Ведаючы гэты час і адлегласць паміж коламі і люстрам, можна вызначыць скорасць святла. У доследзе Фізо адлегласць роўна 8,6 км і для скорасці святла было атрымана значэнне 313 000 км/с.

Было распрацавана яшчэ многа іншых, больш дакладных лабараторных метадаў вымярэння скорасці святла. У прыватнасці, амерыканскі фізік А. Майкельсан распрацаваў дасканалы метад вымярэння скорасці святла з прымяненнем люстраў, якія верцяцца.

Была вымерана скорасць у розных празрыстых рэчывах. Скорасць святла ў вадзе была вымерана ў 1856 г. Яна аказалася ў 4/3 раза меншай, чым у вакууме. Ва ўсіх іншых рэчывах яна таксама меншая, чым у вакууме.

Па сучасных даных, скорасць святла ў вакууме роўна 299 792 458 м/с з дакладнасцю $\pm 1,2$ м/с¹. Прыбліжана скорасць святла можна лічыць роўнай $3 \cdot 10^8$ м/с. Гэта значэнне скорасці святла трэба абавязкова запомніць.

¹ У 1983 г. на паседжанні Генеральнай канферэнцыі па мерах і вагах было прынята новае азначэнне метра: «Метр ёсць даўжыня шляху, пройдзенага святлом у вакууме на працягу часовага інтэрвалу, роўнага $\frac{1}{299\,792\,458}$ с». З гэтага азначэння вынікае, што скорасць святла з гэтага часу прымаецца дакладна роўнай 299 792 458 м/с.

Гюйгенс Хрысціян (1629—1695) — галандскі фізік і матэматык, стваральнік першай хвалевай тэорыі святла. Асновы гэтай тэорыі Гюйгенс выклаў у «Трактаце аб святле» (1690). Гюйгенс упершыню выкарыстаў маятнік для дасягнення рэгулярнага ходу гадзінніка і вывёў формулу для перыяду ваганняў матэматычнага і фізічнага маятнікаў. Матэматычныя работы Гюйгенса датычыліся даследавання канічных сячэнняў, цыклоіды і іншых крывых. Яму належыць адна з першых работ па тэорыі імавернасці. З дапамогай удасканаленай ім астранамічнай трубы Гюйгенс адкрыў спадарожнік Сатурна Тытан.



Вывядзенне скорасці святла сыграла ў навуцы вельмі важную ролю. Яно ў значнай ступені садзейнічала выяўленню прыроды святла. Асобае значэнне скорасць святла мае таму, што ні адно цела ў свеце не можа рухацца са скорасцю, якая перавышае скорасць святла ў вакууме. Гэта стала ясным пасля стварэння тэорыі адноснасці, аб якой пойдзе гаворка ў наступным раздзеле.



Чаму прыбліжана роўна скорасць святла ў вакууме?

§ 41. ПРЫНЦЫП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОН АДБІЦЦЯ СВЯТЛА

Законы адбіцця і праламлення святла можна вывесці з аднаго агульнага прынцыпу, які апісвае паводзіны хваль. Гэты прынцып упершыню быў выказаны сучаснікам Ньютана Хрысціянам Гюйгенсам.

Прынцып Гюйгенса. Згодна з прынцыпам Гюйгенса *кожны пункт асяроддзя, да якога дайшло парушэнне, сам становіцца крыніцай другасных хваль*. Для таго каб, ведаючы становішча хвалевай паверхні ў момант часу t , знайсці яе становішча ў наступны момант часу $t + \Delta t$, трэба кожны пункт хвалевай паверхні разглядаць як крыніцу другасных хваль. Паверхня, датычная да ўсіх другасных хваль, з'яўляецца хвалевай паверхняй у наступны момант часу (рыс. 94). Гэты прынцып у роўнай меры прыгодны для апісання распаўсюджвання хваль любой прыроды: механічных, светлавых і г. д. Гюйгенс сфармуляваў яго першапачаткова менавіта для светлавых хваль.

Для механічных хваль прынцып Гюйгенса мае нагляднае вытлумачэнне: часцінкі асяроддзя, да якіх даходзяць ваганні, у сваю чаргу, вагаючыся, прыводзяць у рух суседнія часцінкі асяроддзя, з якімі яны ўзаемадзейнічаюць.

Закон адбіцця. З дапамогай прынцыпу Гюйгенса можна вы-

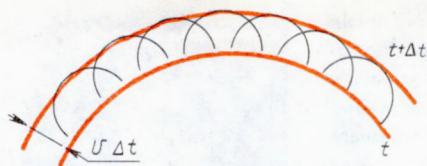


Рис. 94

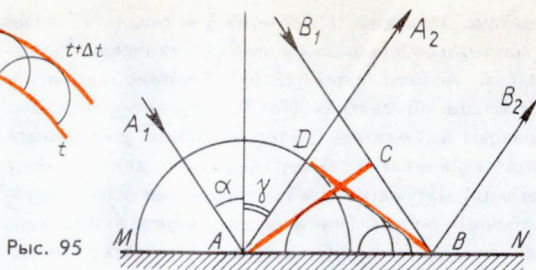


Рис. 95

весці закон, якому падпарадкоўваюцца хвалі пры адбіцці ад мяжы падзелу асяроддзяў.

Разгледзім адбіццё плоскай хвалі. Хваля называецца *плоскай*, калі паверхні роўнай фазы (хвалевае паверхні) з'яўляюцца плоскасцямі. На рысунку 95 MN — адбіваючая паверхня, прамыя A_1A і B_1B — два прамені плоскай хвалі, што падае (яны паралельныя адзін аднаму). Плоскасць AC — хвалевае паверхня гэтай хвалі.

Вугал α паміж падаючым праменем і перпендыкулярам да адбіваючай паверхні ў пункце падзення называюць *вуглом падзення*.

Хвалеваю паверхню адбітай хвалі можна атрымаць, калі правесці агібаючую другасных хваль, цэнтры якіх ляжаць на мяжы падзелу асяроддзяў. Розныя ўчасткі хвалевай паверхні AC дасягнуць адбіваючай мяжы неадначасова. Узбуджэнне ваганняў у пункце A пачнецца раней, чым у пункце B , на час $\Delta t = \frac{CB}{v}$ (v — скорасць хвалі).

У момант, калі хваля дасягне пункта B і ў гэтым пункце пачнецца ўзбуджэнне ваганняў, другасная хваля з цэнтрам у пункце A ўжо будзе ўяўляць сабой паўсферу з радыусам $r = AD = v\Delta t = CB$. Радыусы другасных хваль ад крыніц, размешчаных паміж пунктамі A і B , мяняюцца так, як паказана на рысунку 95. Агібаючай другасных хваль з'яўляецца плоскасць DB , датычная да сферычных паверхняў. Яна з'яўляецца хвалевай паверхняй адбітай хвалі. Адбітыя прамені AA_2 і BB_2 перпендыкулярныя хвалевай паверхні DB . Вугал γ паміж перпендыкулярам да адбіваючай паверхні і адбітым праменем называюць *вуглом адбіцця*.

Паколькі $AD = CB$ і трохвугольнікі ADB і ACB прамавугольныя, то $\angle DBA = \angle CAB$. Але $\alpha = \angle CAB$ і $\gamma = \angle DBA$ як вуглы з перпендыкулярнымі старанамі. Значыць, **вугал адбіцця роўны вуглу падзення**¹:

$$\alpha = \gamma. \quad (5.1)$$

¹ Тут і далей у алгебраічных суадносінах пад словам *вугал* падразумяваецца яго радыянная (або градусная) мера.

Акрамя таго, як вынікае з пабудовы Гюйгенса, *падаючы прамень, прамень адбіты і перпендыкуляр, узведзены ў пункце падавання, ляжаць у адной плоскасці*. Гэтыя два сцверджанні ўяўляюць сабой закон адбіцця святла.

Калі змяніць напрамак распаўсюджвання светлавых праменяў, то адбіты прамень стане падаючым, а падаючы адбітым. Абарачальнасць ходу светлавых праменяў — іх важная ўласцівасць.

Правілы пабудавання відарысаў у плоскім люстэрку, заснаваныя на законе адбіцця, разглядаліся ў VIII класе.

Сфармуляваны агульны прынцып распаўсюджвання хваль любой прыроды — прынцып Гюйгенса. Гэты прынцып дазваляе з дапамогай простых геаметрычных пабудаванняў знаходзіць хвалевую паверхню ў любы момант часу па вядомай хвалевай паверхні ў папярэдні момант. З прынцыпу Гюйгенса выведзены закон адбіцця хваль.

1. Як з дапамогай закону адбіцця пабудаваць відарыс пунктавой крыніцы святла ў плоскім люстэрку? 2. Чаму нельга выкарыстаць плоскае люстэрка ў якасці кінаэкрана?

§ 42. ЗАКОН ПРАЛАМЛЕННЯ СВЯТЛА

Напомнім, у чым складаецца з'ява праламлення святла. Выведзем закон праламлення з дапамогай прынцыпу Гюйгенса.

Назіранне праламлення святла. На мяжы двух асяроддзяў святло змяняе напрамак свайго распаўсюджвання. Частка светлавой энергіі вяртаецца ў першае асяроддзе, г. зн. адбываецца адбіццё святла. Калі другое асяроддзе празрыстае, то святло часткова можа прайсці праз мяжу асяроддзяў, таксама мяняючы пры гэтым, як правіла, напрамак распаўсюджвання. Гэта з'ява называецца *праламленнем святла*.

З прычыны праламлення назіраецца ўяўнае змяненне формы прадметаў, іх размяшчэння і размераў. У гэтым нас могуць пераканаць простыя назіранні. Пакладзём на дно непразрыстай шклянкі манету або іншы непразрысты прадмет. Пасунем шклянку так, каб цэнтр манеты, край шклянкі і вока знаходзіліся на адной прамой. Не змяняючы становішча галавы, будзем наліваць у шклянку ваду. Разам з павышэннем узроўню вады дно шклянкі з манетай як бы прыпадае. Манета, якая раней была відаць толькі часткова, цяпер будзе відаць цалкам. Устаноўім нахілена карандаш у пасудзіне з вадой. Калі паглядзець на пасудзіну збоку, то можна заўважыць, што частка карандаша, якая знаходзіцца ў вадзе, здаецца зрушанай убок (рыс. 96).

Гэтыя з'явы тлумачацца змяненнем напрамку праменяў на мяжы двух асяроддзяў — праламленнем святла.

Закон праламлення святла вызначае ўзаемнае размяшчэнне



Рис. 96

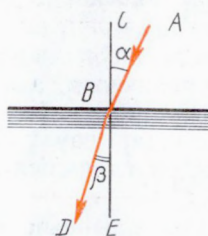


Рис. 97

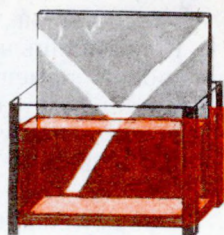


Рис. 98

падаючага праменя AB (рис. 97), праломленага DB і перпендыкуляра CE да паверхні падзелу асяроддзяў, які ўзведзены ў пункце падзення. Вугал α называецца *вуглом падзення*, а вугал β — *вуглом праламлення*.

Падаючы, адбіты і праломлены прамені няцяжка назіраць, зрабіўшы вузкі светлавы пучок бачным. Ход такога пучка ў паветры можна прасачыць, калі пусціць у паветра трохі дыму або ж паставіць экран пад невялікім вуглом да праменя. Праломлены пучок таксама бачны ў падфарбаванай флюарэсцэнцамавае акварыума (рис. 98).

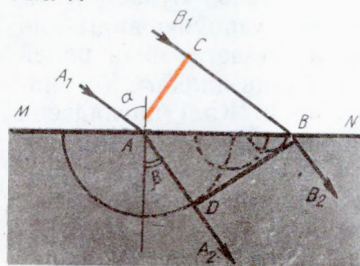
Вывад закону праламлення святла. Закон праламлення святла быў устаноўлены доследным шляхам у XVII ст. Мы яго выведзем з дапамогай прынцыпу Гюйгенса.

Праламленне святла пры пераходзе з аднаго асяроддзя ў другое выклікана адрозненнем у скорасцях распаўсюджвання святла ў тым і іншым асяроддзі. Абазначым скорасць хвалі ў першым асяроддзі праз v_1 , а ў другім — праз v_2 .

Няхай на плоскую мяжу падзелу двух асяроддзяў (напрыклад, з паветра ў ваду) падае плоская светлавая хваля (рис. 99). Хвалевае паверхня AC перпендыкулярная праменям A_1A і B_1B . Паверхні MN спачатку дасягне прамень A_1A . Прамень B_1B дасягне паверхні праз час

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

Рис. 99



Таму ў момант, калі другасная хваля ў пункце B толькі пачне ўзбуджацца, хваля ад пункта A ўжо мае выгляд паўсферы радыусам

$$AD = v_2 \Delta t.$$

Хвалеваю паверхню праломленай хвалі можна атрымаць, праўдзюшы паверхню, датычную да ўсіх

другасных хваль у другім асяроддзі, цэнтры якіх ляжаць на мяжы падзелу асяроддзяў. У дадзеным выпадку гэта плоскасць BD . Яна з'яўляецца агібаючай другасных хваль.

Вугал падзення α праменя роўны вуглу CAB у трохвугольніку ABC (стораны аднаго з гэтых вуглоў перпендыкулярныя старанам другога). Значыць,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (5.2)$$

Вугал праламлення β роўны вуглу ABD трохвугольніка ABD . Таму

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (5.3)$$

Падзяліўшы (5.2) на (5.3), атрымаем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (5.4)$$

дзе n — пастаянная велічыня, якая не залежыць ад вугла падзення.

З пабудовы (гл. рис. 99) відаць, што *падаючы прамень, прамень праломлены і перпендыкуляр, узведзены ў пункце падзення, ляжаць у адной плоскасці*. Дадзенае сцверджанне сумесна з ураўненнем (5.4), згодна з якім *адносіна сінуса вугла падзення да сінуса вугла праламлення ёсць велічыня пастаянная для двух асяроддзяў, з'яўляецца законам праламлення святла*.

Пераканацца ў справядлівасці закону праламлення можна эксперыментальна, вымяраючы вуглы падзення і праламлення і вылічваючы адносіны іх сінусаў пры розных вуглах падзення. Гэтыя адносіны застаюцца нязменнымі.

Паказчык праламлення. Пастаянная велічыня, якая ўваходзіць у закон праламлення святла, называецца *адносным паказчыкам праламлення* або паказчыкам праламлення другога асяроддзя адносна першага.

З прынцыпу Гюйгенса не толькі вынікае закон праламлення, але і з дапамогай гэтага прынцыпу раскрываецца фізічны сэнс паказчыка праламлення. Ён роўны адносіне скорасцей святла ў асяроддзях, на мяжы паміж якімі адбываецца праламненне:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5.5)$$

Калі вугал праламлення β меншы за вугал падзення α , то згодна з (5.4) скорасць святла ў другім асяроддзі меншая, чым у першым.

Паказчык праламлення асяроддзя адносна вакууму называюць *абсалютным паказчыкам праламлення гэтага асяроддзя*. Ён роўны адносіне сінуса вугла падзення да сінуса вугла праламлення пры пераходзе светлавога праменя з вакууму ў дадзенае асяроддзе.

Карыстаючыся формулай (5.5), можна выразіць адносны

паказчык праламлення праз абсалютны паказчыкі праламлення n_1 і n_2 першага і другога асяроддзяў.

Сапраўды, паколькі $n_1 = \frac{c}{v_1}$ і $n_2 = \frac{c}{v_2}$, дзе c — скорасць святла ў вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.6)$$

Асяроддзе з меншым абсалютным паказчыкам праламлення прынята называць *аптычна менш шчыльным асяроддзем*.

Абсалютны паказчык праламлення вызначаецца скорасцю распаўсюджвання святла ў дадзеным асяроддзі, якая залежыць ад фізічнага стану асяроддзя, г. зн. ад тэмпературы рэчыва, яго шчыльнасці, наяўнасці ў ім пругкіх напружанняў. Паказчык праламлення залежыць таксама і ад характарыстык самога святла. Для чырвонага святла ён меншы, чым для зялёнага, а для зялёнага меншы, чым для фіялетавага.

Таму ў табліцах значэнняў паказчыкаў праламлення для розных рэчываў звычайна ўказваецца, для якога святла прыведзена дадзенае значэнне n і ў якім стане знаходзіцца асяроддзе. Калі такіх указанняў няма, то гэта азначае, што залежнасць ад дадзеных фактараў можна не ўлічваць.

У большасці выпадкаў прыходзіцца разглядаць пераход святла праз мяжу паветра — цвёрдае цела або паветра — вадкасць, а не праз мяжу вакуум — асяроддзе. Аднак абсалютны паказчык праламлення n_2 цвёрдага або вадкага рэчыва адрозніваецца ад паказчыка праламлення таго ж рэчыва адносна паветра вельмі нязначна. Так, абсалютны паказчык праламлення паветра пры нармальных умовах для жоўтага святла роўны прыблізна $n_1 \approx 1,000292$. Значыць,

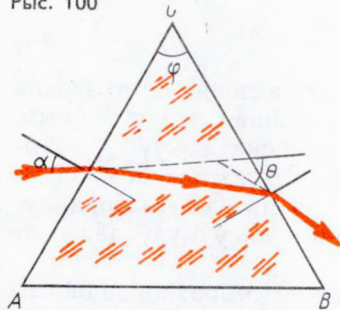
$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \quad (5.7)$$

Значэнні паказчыкаў праламлення для некаторых рэчываў адносна паветра прыведзены ў табліцы 2 (даныя адносяцца да жоўтага святла).

Ход праменяў у трохвугольнай прызме. Закон праламлення святла дазваляе разлічваць ход праменяў у розных аптычных прыстасаваннях, напрыклад у трохвугольнай прызме, зробленай са шкла або іншых празрыстых матэрыялаў.

На рысунку 100 паказана сячэнне шкляной прызмы плоскасцю, перпендыкулярнай да яе бакавых кантаў. Прамень у прызме адхіляецца да асновы, праламляючыся на гранях OA і OB . Вугал φ паміж гэтымі

Рыс. 100



гранямі називають праламляючым вуглом прызмы. Вугал θ адхілення праменя залежыць ад праламляючага вугла прызмы φ , паказчыка праламлення n матэрыялу прызмы і вугла падзення α . Ён можа быць вылічаны з дапамогай закону праламлення (5.4).

Закон праламлення трэба запомніць.

Якое яго значэнне? Формула (5.4) апісвае незлічонае мноства выпадкаў праламлення. Яна пазбаўляе нас ад неабходнасці рабіць у кожным асобным выпадку дослед і запамінаць або запісваць у табліцы для кожнага асобнага выпадку вугал падзення і адпаведны яму вугал праламлення праменя.

Табліца 2

Рэчыва	Паказчык праламлення адносна паветра
Вада (пры 20 °С)	1,33
Кедравы алей (пры 20 °С)	1,52
Серавуглярод (пры 20 °С)	1,63
Лёд	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Рубін	1,76
Алмаз	2,42
Розныя гатункі шкла	ад 1,47 да 2,04

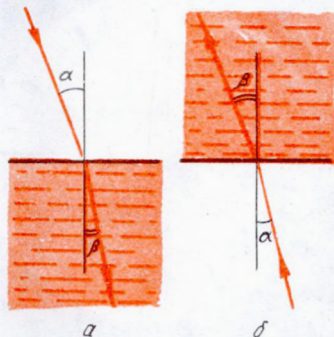
1. Які фізічны сэнс паказчыка праламлення? 2. Чым адрозніваецца адносны паказчык праламлення ад абсалютнага?

§ 43. ПОЎНАЕ АДБІЦЦЕ

Закон праламлення святла дазваляе растлумачыць цікавую і практычна важную з'яву — поўнае адбіццё святла.

Пры праходжанні святла з аптычна менш шчыльнага асяроддзя ў больш шчыльнае, напрыклад з паветра ў шкло або ваду, $v_1 > v_2$ і згодна з законам праламлення (5.4) паказчык праламлення $n > 1$. Таму $\alpha > \beta$ (рыс. 101, а): праломлены прамень набліжаецца да перпендыкуляра да мяжы падзелу асяроддзяў. Калі накіраваць прамень святла ў адваротным напрамку — з аптычна больш шчыльнага асяроддзя ў аптычна менш шчыльнае ўздоўж былога праломле-

Рыс. 101



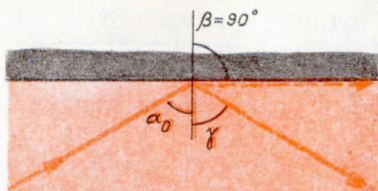


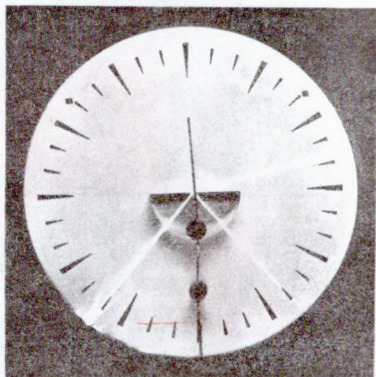
Рис. 102

адхіляецца ад перпендыкуляра. Па меры павелічэння вугла α вугал праламлення β расце, застаючыся ўвесь час большым за вугал α . Нарэшце пры некаторым вугле падзення значэнне вугла праламлення прыблізіцца да 90° і праломлены прамень пойдзе амаль па мяжы падзелу асяроддзяў (рис. 102). Найбольшаму магчымаму вуглу праламлення $\beta = 90^\circ$ адпавядае вугал падзення α_0 .

Паспрабуем зразумець, што адбудзецца пры $\alpha > \alpha_0$. Пры падзенні святла на мяжу двух асяроддзяў светлавы прамень, як аб гэтым ужо ўпаміналася, часткова праламляецца, а часткова адбіваецца ад яе. Пры $\alpha > \alpha_0$ праламленне святла немагчыма. Значыць, прамень павінен поўнасю адбіцца. Гэта з'ява называецца *поўным адбіццём святла*.

Для назірання поўнага адбіцця можна выкарыстаць шкляны паўцыліндр з матавай задняй паверхняй. Паўцыліндр замацоўваюць на дыску так, каб сярэдзіна плоскай паверхні паўцыліндра супадала з цэнтрам дыска (рис. 103). Вузкі пучок святла ад асвятляльніка накіроўваюць знізу на бакавую паверхню паўцыліндра перпендыкулярна да яго паверхні. На гэтай паверхні прамень не праламляецца. На плоскай паверхні прамень часткова праламляецца і часткова адбіваецца. Адбіццё адбываецца ў адпаведнасці з законам адбіцця, а праламленне — у адпаведнасці з законам праламлення (5.4).

Рис. 103

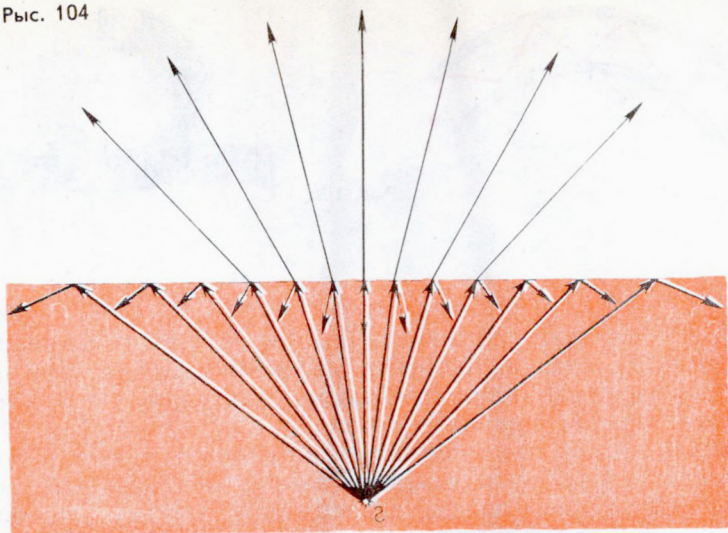


нага праменя (рис. 101, б), то закон праламлення запішацца так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}. \quad (5.8)$$

Праломлены прамень пасля выхаду з аптычна больш шчыльнага асяроддзя пойдзе па лініі былога падаючага праменя, таму $\alpha < \beta$, г. зн. праломлены прамень

Калі павялічваць вугал падзення, то можна заўважыць, што яркасць (і, значыць, энергія) адбітага пучка расце, у той час як яркасць (энергія) праломленага пучка падае. Асабліва хутка ўбывае энергія праломленага пучка, калі вугал праламлення набліжаецца да 90° . Нарэшце, калі вугал падзення становіцца такім, што праломлены пучок ідзе ўздоўж мяжы падзелу (гл. рис. 102), доля адбітай энергіі складае амаль 100 %. Павернем асвятляльнік, зрабіўшы вугал падзення α большым за α_0 . Мы ўбачым, што пра-



ломлены пучок знік і ўсё святло адбіваецца ад мяжы падзелу, г. зн. адбіваецца поўнае адбіццё святла.

На рысунку 104 паказаны пучок праменяў ад крыніцы, змешчанай у вадзе недалёка ад яе паверхні. Большая інтэнсіўнасць святла дадзена большай таўшчынёй лініі, якая паказвае адпаведны прамень.

Вугал падзення α_0 , які адпавядае вуглу праламлення 90° , называюць *гранічным вуглом поўнага адбіцця*. Пры $\sin \beta = 1$ формула (5.8) прымае выгляд

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (5.9)$$

З гэтай роўнасці і можа быць знойдзена значэнне гранічнага вугла поўнага адбіцця α_0 . Для вады ($n = 1,33$) ён аказваецца роўным $48^\circ 35'$, для шкла ($n = 1,5$) ён прымае значэнне $41^\circ 51'$, а для алмазу ($n = 2,42$) гэты вугал складае $24^\circ 40'$. Ва ўсіх выпадках другім асяроддзем з'яўляецца паветра.

З'яву поўнага адбіцця лёгка назіраць на простым доследзе. Нальём у шклянку ваду і падымем яе некалькі вышэй узроўню вачэй. Паверхня вады пры разгляданні яе знізу скрозь сценку здаецца бліскучай, нібы пасярэбранай, з прычыны поўнага адбіцця святла.

Поўнае адбіццё выкарыстоўваюць у так званай *валаконнай аптыцы* для перадачы святла і відарыса па пучках празрыстых гнуткіх валокнаў — светлаводаў. Светлавод уяўляе сабой шкляное валакно цыліндрычнай формы, пакрытае абалонкай з празрыстага матэрыялу з меншым, чым у валакна, паказчыкам праламлення. За кошт шматразовага поўнага адбіцця святло можа быць накіравана па любому (прамому або сагнутаму) шляху

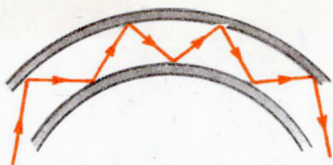


Рис. 105

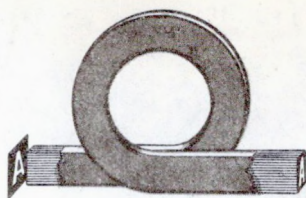


Рис. 106

(рис. 105). Валокны набіраюцца ў жгуты. Пры гэтым па кожнаму з валокнаў перадаецца які-небудзь элемент відарыса (рис. 106). Жгуты з валокнаў скарыстоўваюцца, напрыклад, у медыцыне для даследавання ўнутраных органаў.

Па меры паляпшэння тэхналогіі вырабу доўгіх пучкоў валокнаў — светлаводаў усё шырэй пачынае прымяняцца сувязь (у тым ліку і тэлевізійная) з дапамогай светлавых праменяў.

Поўнае адбіццё святла паказвае, якія багатыя магчымасці для тлумачэння з'яў распаўсюджвання святла заключаны ў законе праламлення. Спачатку поўнае адбіццё ўяўляла сабой толькі цікавую з'яву. Цяпер яно паступова прыводзіць да рэвалюцыі ў спосабах перадачы інфармацыі.

- ?
1. Чаму роўны гранічны вугал поўнага адбіцця на мяжы алмаз — паветра?
 2. Прывядзіце прыклады назірання поўнага ўнутранага адбіцця, якія не ўпаміналіся ў тэксце.

ПРЫКЛАДЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ

Будзем рашаць задачы на прамалінейнае распаўсюджванне святла, закон адбіцця і закон праламлення.

1. Будынак, асветлены сонечнымі праменьнямі, адкідвае цень даўжынёй $L = 36$ м. Вертыкальны шост вышынёй $h = 2,5$ м адкідвае цень даўжынёй $l = 3$ м (рис. 107). Знайдзіце вышыню H будынка.

Рашэнне. Сонечныя прамені падаюць на гарызантальную паверхню зямлі пад вуглом α . З рысунка відаць, што

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{H} \text{ і } \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h}.$$

Значыць,

$$\frac{L}{H} = \frac{l}{h}.$$

Адсюль

$$H = \frac{L}{l} h = 30 \text{ м.}$$

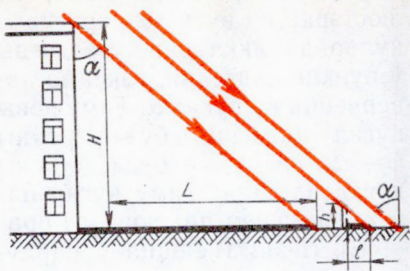


Рис. 107

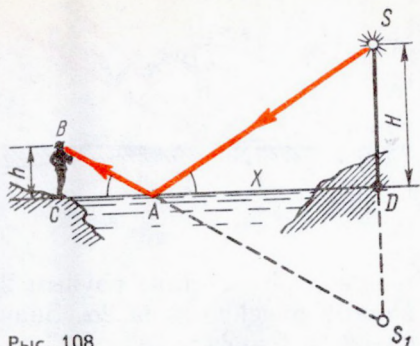


Рис. 108

2. На адным беразе невялікага вадаёма стаіць слуп з ліхтаром наверху, а на другім — чалавек. Прамень святла, які ідзе ад ліхтара, пасля адбіцця ад паверхні вады пападае ў вока чалавека. Знайдзіце пабудаваннем становішча пункта на паверхні вадаёма, у якім адбіваецца прамень, што пападае ў вока. Вылічыце адлегласць гэтага пункта ад слупа, калі яго вышыня H , вышыня чалавека h , а адлегласць паміж слупом і чалавекам l .

Рашэнне. Пабудуем відарыс S_1 ліхтара S , які дае паверхня CD вады (рис. 108). Для гэтага з пункта S апусцім перпендыкуляр на паверхню CD . Відарыс S_1 ляжыць на працягу гэтага перпендыкуляра сіметрычна пункту S адносна паверхні CD , г. зн. $S_1D = SD$. Адбіты ад паверхні вады прамень мае такі напрамак, што яго працяг, праведзены ў процілеглы бок, праходзіць праз пункт S_1 . Таму для вызначэння напрамку адбіцця праменя правядзём прамую з пункта S_1 да пункта B , які супадае з вокам чалавека. Гэта прамая перасякае паверхню вады ў шукаемым пункце A .

Трохвугольнікі ADS і ACB падобныя (як прававугольныя, якія маюць па роўнаму востраму вуглу). Значыць,

$$\frac{DA}{AC} = \frac{SD}{BC},$$

або

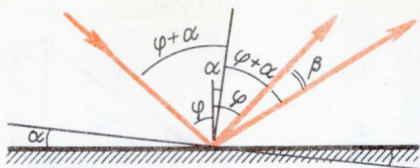
$$\frac{x}{l-x} = \frac{H}{h}.$$

Адсюль

$$x = \frac{lH}{H+h}.$$

3. Плоскае люстэрка павярнулі на вугал $\alpha = 17^\circ$ вакол восі, якая ляжыць у плоскасці люстэрка. На які вугал β павярнуўся адбіты прамень, калі напрамак падаючага праменя застаўся нязменным?

Рашэнне. Няхай φ — першапачатковы вугал падзення праменя (рис. 109). Па закону адбіцця вугал адбіцця таксама роўны φ , і, значыць, вугал паміж падаючым праменем і адбітым праменем



Рыс. 109

нем роўны 2φ . Пры павароце люстэрка на вугал α перпендыкуляр да люстэрка, узведзены ў пункце падзення, таксама павернецца на вугал α . Таму новы вугал падзення будзе роўны $\varphi + \alpha$. Такім жа будзе і новы вугал адбіцця. Таму вугал паміж праменем падаючым і пра-

менем адбітым стане роўным $2(\varphi + \alpha)$, г. зн. зменіцца ў параўнанні з ранейшым на 2α . Значыць, адбіты прамень павернецца на вугал $\beta = 2\alpha = 34^\circ$.

4. Вызначце, на які вугал θ адхіляецца светлавы прамень ад свайго першапачатковага напрамку пры пераходзе з паветра ў ваду, калі вугал падзення $\alpha = 75^\circ$.

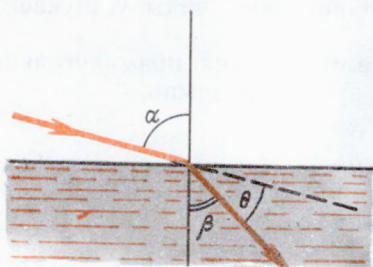
Рашэнне. З рысунка 110 відаць, што $\theta = \alpha - \beta$. Згодна з законам праламлення

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n,$$

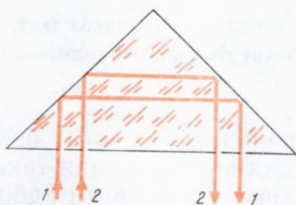
дзе n — паказчык праламлення вады. Адсюль

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0,727.$$

З табліцы сіносаў знаходзім для β : $\beta \approx 46^\circ 33'$. Значыць, $\theta \approx 75^\circ - 46^\circ 33' \approx 28^\circ 27'$.

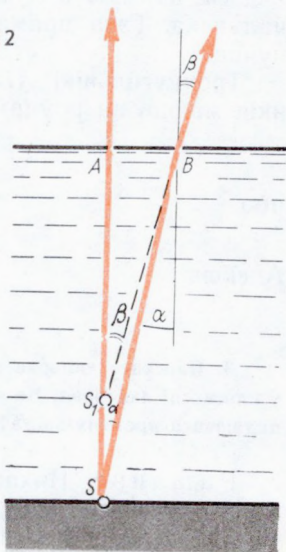


Рыс. 110



Рыс. 111

Рыс. 112



5. Начарціце ход праменяў скрозь трохвугольную шкляную прызму, асновай якой з'яўляецца раўнабедраны прамавугольны трохвугольнік. Прамені падаюць на шырокую грань перпендыкулярна гэтай грані.

Рашэнне. Праходзячы праз шырокую грань, прамені свайго напрамку не змяняюць, паколькі вугал падзення роўны нулю (рыс. 111). На вузкай грані прамені зведваюць поўнае адбіццё, таму што вугал падзення роўны 45° і, значыць, большы за гранічны вугал поўнага адбіцця для шкла. Пасля поўнага адбіцця ад левай грані прамені пападаюць на правую грань, у другі раз зведваюць поўнае адбіццё і выходзяць з прызмы па напрамку, перпендыкулярнаму да шырокай грані. Такім чынам, напрамак пучка святла змяняецца ў дадзеным выпадку на 180° . Такі ход праменяў выкарыстоўваецца, напрыклад, у прызматычных біноклах.

6. Вызначце, у колькі разоў сапраўдная глыбіня вадаёма большая, чым здаецца, калі глядзець па вертыкалі ўніз.

Рашэнне. Пабудуем ход праменяў, якія выйшлі з пункта S на дне вадаёма і папалі ў вока назіральніка (рыс. 112). Паколькі назіранне вядзецца па вертыкалі, адзін з праменяў SA накіруем перпендыкулярна да паверхні вады, другі SB — пад малым вуглом α да перпендыкуляра. (Пры вялікіх вуглах α прамені не пападаць у вока.) Пасля праламлення на паверхні вады прамені ідуць пучком, які разыходзіцца. Вяршыня гэтага пучка ўяўляе сабой уяўны відарыс S_1 пункта S .

Вугал ASB роўны вуглу падзення α (як унутраныя накрывляючыя вуглы), а вугал AS_1B роўны вуглу праламлення β (як адпаведныя пры паралельных). Прамавугольныя трохвугольнікі ASB і AS_1B маюць агульны катэт AB , які можна выразіць праз сапраўдную глыбіню вадаёма $SA = H$ або праз глыбіню, якая здаецца $S_1A = h$:

$$AB = H \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \beta.$$

Адсюль

$$\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Паколькі вуглы α і β малыя, то

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n.$$

Значыць,

$$\frac{H}{h} = n.$$

Сапраўдная глыбіня вадаёма большая за тую, што здаецца, у $n = 1,3$ раза.

ПРАКТЫКАВАННЕ 5

1. Пучок святла ўваходзіць у скрынку праз адтуліну ў бакавой сценцы і выходзіць праз адтуліну ў процілеглай сценцы. Ці ўбачыце вы светлавы пучок, заглянуўшы ў скрынку праз адтуліну ў пярэдняй сценцы, калі паветра ў скрынцы чыстае?

2. «Пакой, у які ўвайшоў Іван Іванавіч, быў зусім цёмны, таму што аканіцы былі зачынены, і сонечны прамень, праходзячы ў дзірку, зробленую ў аканіцы, прыняў вясёлкавы колер і, калі ўдараўся аб процілеглую сцяну, рысаваў на ёй стракаты ландшафт з дахаў, дрэў і развешанай на двары бялізны, усё толькі ў перавернутым выглядзе» (М. В. Гоголь. «Аповесць аб тым, як пасварыўся Іван Іванавіч з Іванам Нічыпаравічам»). Растлумачце паходжанне гэтай з'явы.

3. Чаму цень ног чалавека на зямлі ад ліхтара рэзка акрэслены, а цень галавы больш расплывісты?

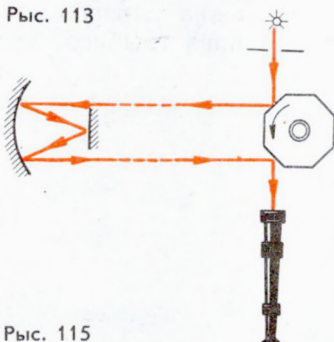
4. На рысунку 113 паказана схема доследу Майкельсана па вызначэнню скорасці святла. З якой частатой павінна вярцецца васьмівугольная люстраная прызма, каб крыніца была відаць у зрокавую трубу, калі светлавы прамень праходзіць адлегласць, роўную прыблізна 71 км?

5. Пучок паралельных праменяў ідзе з праекцыйнага ліхтара ў гарызантальным напрамку. Пад якім вуглом да гарызантальнай плоскасці трэба размясціць плоскае люстэрка, каб пасля адбіцця пучок ішоў вертыкальна? Ці застанеца пучок паралельным?

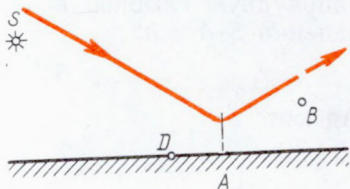
6. Невялікі прадмет размешчаны паміж двума плоскімі люстэрамі, якія ўтвараюць адно з адным вугал $\alpha = 30^\circ$. Прадмет знаходзіцца на адлегласці $l = 10$ см ад лініі перасячэння люстэраў і на аднолькавай адлегласці ад абодвух люстэраў. Якая адлегласць паміж уяўнымі відарысамі гэтага прадмета ў люстэрах?

7. Прамень ад пунктавой крыніцы 5 падае на плоскае люстэрка ў пункце А

Рыс. 113



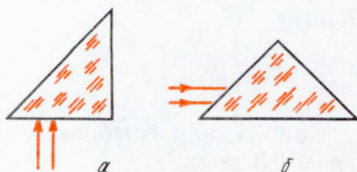
Рыс. 114



Рыс. 115



Рыс. 116



і, адбіваючыся, праходзіць праз пункт В (рыс. 114). Дакажыце, што калі б прамень ад той жа крыніцы прайшоў праз пункт В, адбіўшыся ад люстэрка ў пункце D, суседнім з А, то: 1) не быў бы выкананы закон адбіцця; 2) шлях SDB быў бы пройдзены святлом за большы час, чым шлях SAB.

8. Якой вышыні павінна быць плоскае люстэрка, што вісіць вертыкальна, каб чалавек вышыней H бачыў сябе ў ім ва ўвесь рост?

9. Вылічыце паказчык праламлення вады адносна алмаза і серавугляроду адносна лёду.

10. Вугал падзення паралельных праменяў на плоскапаралельную пласціну роўны 60° . Знайдзіце адлегласць паміж пунктамі, у якіх з пласціны выходзяць паралельныя прамені, калі адлегласць паміж праменьнямі, што прайшлі праз пласціну, роўна $0,7$ см.

11. Калі разглядаць які-небудзь прадмет праз трохвугольную призму, то відарыс здаецца зрушаным. У які бок?

12. Прамень святла, які ідзе з тоўшчы вады, зведвае поўнае адбіццё на яе паверхні. Ці выйдзе прамень у паветра, калі на паверхню вады наліць слой кедровага алею?

13. Сячэннем прызмы з'яўляецца роўнастаронні трохвугольнік. Прамень праходзіць скрозь призму, праламляючыся ў пунктах, якія роўнааддалены ад вяршыні (рыс. 115). Якое найбольшае дапушчальнае значэнне паказчыка праламлення n рэчыва прызмы?

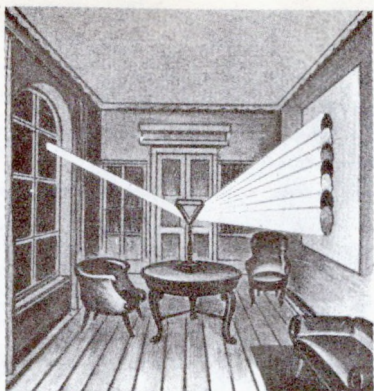
14. Начарціце ход праменяў праз трохвугольную шкляную призму, асновай якой з'яўляецца раўнабедраны прававугольны трохвугольнік. Прамені падаюць на призму, як паказана на рысунку 116, а, б. Ці застаецца ход праменяў такім жа, калі призму апусціць у ваду?

§ 44. ДЫСПЕРСІЯ СВЯТЛА

Паказчык праламлення не залежыць ад вугла падзення светлага пучка, але ён залежыць ад яго колеру¹. Гэта было адкрыта Ньютанам.

Займаючыся ўдасканаленнем тэлескопаў, Ньютан звярнуў увагу на тое, што відарыс, які даваў аб'ект, па краях афарбаваны. Ён зацікавіўся гэтым і першы «даследаваў разнастайнасць светлавых праменяў і вынікаючыя адсюль асаблівасці колераў, якіх да таго ніхто нават не падазраваў» (словы з надпісу на магіле Ньютана). Вясёлкавую афарбоўку відарысу, што дае лінза, назіралі, вразумела, і да яго. Было заўважана таксама, што вясёлкавыя краі маюць прадметы, якія разглядаюцца праз призму. Пучок светлавых праменяў, якія прайшлі праз призму, афарбоўваецца па краях.

¹ Усе маюць уяўленне аб тым, што такое колер. Колер — адна з уласцівасцей матэрыяльных аб'ектаў, што ўспрымаецца як усвядомленае зрокавае адчуванне. Той ці іншы колер «прысвойваецца» аб'екту чалавекам у працэсе зрокавага ўспрымання гэтага аб'екта.



Рыс. 117

Асноўны дослед Ньютана быў геніяльна прасты. Ньютан здагадаўся накіраваць на прызму светлавую пучок малога папярочнага сячэння. Прамень сонечнага святла праходзіў у зацёмнены пакой праз маленькую адтуліну ў акніцы. Падаючы на шкляную прызму, ён праламляўся і даваў на процілеглай сцяне падоўжаны відарыс з вясёлкавым чаргаваннем колераў. Стылізаваны паказ доследу Ньютана дадзены на рысунку 117. Прытрымліваючыся шматвяковай традыцыі, згодна з якой лічылася, што вясёлка складаецца з сямі асноўных колераў, Ньютан таксама вылучыў сем колераў: фіялетава, сіні, блакітны, зялёны, жоўты, аранжавы і чырвоны. Саму вясёлкавую палоску Ньютан назваў спектрам.

Закрыўшы адтуліну чырвоным шклом, Ньютан назіраў на сцяне толькі чырвоную пляму, закрыўшы сінім шклом, назіраў сінюю пляму і г. д. Адсюль вынікае, што не прызма афарбоўвае белае святло, як дапускалася раней. Прызма не змяняе святла, а толькі раскладае яго на састаўныя часткі (гл. рыс. I на каляровай уклейцы). Белае святло мае складаную структуру. З яго можна вылучыць пучкі розных колераў, і толькі сумеснае іх дзеянне выклікае ў нас уражанне белага колеру. На самай справе, калі з дапамогай другой прызмы, павернутай на 180° адносна першай, сабраць усе пучкі спектра, то зноў атрымаецца белае святло (гл. рыс. II на каляровай уклейцы). Вылучыўшы ж якую-небудзь частку спектра, напрыклад зялёную, і прымусіўшы святло прайсці яшчэ праз адну прызму, мы ўжо не атрымаем далейшага змянення афарбоўкі.

Другі важны вывад, да якога прыйшоў Ньютан, быў сфармуляваны ім у трактаце па «Опытцы» наступным чынам: «Светлавая пучкі, якія адрозніваюцца па колеру, адрозніваюцца па ступені праламляльнасці» (для іх шкло мае розныя паказчыкі праламлення). Найбольш моцна праламляюцца фіялетавае прамені, менш за іншыя — чырвоныя. Залежнасць паказчыка праламлення святла ад яго колеру Ньютан назваў дысперсіяй¹.

Паказчык праламлення залежыць ад скорасці святла v у рэчыве (гл. § 42). Абсалютны паказчык праламлення $n = \frac{c}{v}$.

Прамень чырвонага колеру праламляецца менш з-за таго, што чырвонае святло мае ў рэчыве найбольшую скорасць, а прамень фіялетавага колеру больш, паколькі скорасць фіялетавага святла

¹ Ад лацінскага слова *dispersio* — рассейваю.

найменшая. Менавіта таму прызма і раскладае святло. У пуштаце скорасці святла рознага колеру аднолькавыя. Калі б гэта было не так, то, напрыклад, спадарожнік Юпітэра Іо, які назіраў Рэмер, здаваўся б чырвоным у момант яго выхаду з ценю. Але гэтага не назіраецца.

У далейшым была высветлена залежнасць колеру ад фізічных характарыстык светлавой хвалі: частаты ваганняў або даўжыні хвалі. Таму можна даць больш глыбокае азначэнне дысперсіі, чым тое, да якога прыйшоў Ньютан. *Дысперсія* называецца залежнасць паказчыка праламлення святла ад частаты ваганняў (або даўжыні хвалі).

Ведаючы, што белое святло мае складаную структуру, можна растлумачыць надзвычайную разнастайнасць фарбаў у прыродзе. Калі прадмет, напрыклад ліст паперы, адбівае ўсе падаючыя на яго прамені розных колераў, то ён будзе здавацца белым. Пакрываючы паперу слоём чырвонай фарбы, мы не ствараем пры гэтым святла новага колеру, але затрымліваем на лісце некаторую частку таго, што ёсць. Адбівацца цяпер будуць толькі чырвоныя прамені, астатнія ж паглынуцца слоём фарбы. Трава і лісце дрэў здаюцца нам зялёнымі таму, што з усіх падаючых на іх сонечных прамяняў яны адбіваюць толькі зялёныя, паглынаючы астатнія. Калі паглядзець на траву праз чырвонае шкло, якое прапускае толькі чырвоныя прамені, то яна будзе здавацца амаль чорнай.

З'ява дысперсіі, якая адкрыта Ньютанам, — першы крок да разумення прыроды колеру. Глыбіня разумення дысперсіі прыйшла пасля таго, як была высветлена залежнасць колеру ад частаты (або даўжыні) светлавой хвалі.

1. На сшытку напісана чырвоным карандашом «выдатна» і зялёным «добра». Ёсць два шклы — зялёнае і чырвонае. Праз якое шкло трэба глядзець, каб убачыць адзнаку «выдатна»? 2. Чаму толькі дастаткова вузкі светлавы пучок дае спектр пасля праходжання праз прызму, а ў шырокага пучка афарбаванымі аказваюцца толькі краі? 3. Што такое дысперсія святла?

§ 45. ІНТЭРФЕРЭНЦЫЯ МЕХАНІЧНЫХ ХВАЛЬ

Мы разгледзелі метады вымярэння скорасці святла і доказы таго, што ў асяроддзі святло распаўсюджваецца павольней, чым у вакууме. Гэта пацвярджае справядлівасць хвалевага прынцыпу Гюйгенса, які з поспехам прымяняўся для тлумачэння адбіцця і праламлення святла.

Аднак неабходны больш важкія доказы таго, што святло пры распаўсюджванні паводзіць сябе як хваля. Любому хвалеваму руху ўласцівы з'явы інтэрферэнцыі і дыфракцыі. Для таго каб быць упэўненым у тым, што святло мае хвалевую прыроду, неаб-

ходна знайсці эксперыментальныя доказы інтэрферэнцыі і дыфракцыі святла.

Інтэрферэнцыя — дастаткова складаная з'ява. Каб лепш зразумець яе сутнасць, мы спачатку спынімся на інтэрферэнцыі механічных хваль.

Складанне хваль. Вельмі часта ў асяроддзі адначасова распаўсюджваецца некалькі розных хваль. Напрыклад, калі ў пакоі размаўляюць некалькі чалавек, то асобныя гукавыя хвалі накладваюцца адна на адну. Што пры гэтым адбываецца?

Прасцей за ўсё прасачыць за накладаннем механічных хваль, назіраючы хвалі на паверхні вады. Калі мы кінем у ваду два камяні, стварыўшы гэтым дзве кольцавыя хвалі, то няцяжка заўважыць, што кожная хваля праходзіць праз другую і паводзіць сябе далей так, як быццам бы другой хвалі зусім не існавала. Дакладна гэтак любы лік гукавых хваль можа адначасова распаўсюджвацца ў паветры, ніяк не перашкаджаючы адна адной. Мноства музычных інструментаў у аркестры або галасоў у хоры ствараюць гукавыя хвалі, якія адначасова ўлоўліваюцца нашымі вухам. Прычым вуха можа адрозніваць адзін гук ад другога.

Цяпер паглядзім больш уважліва, што адбываецца ў месцах, дзе хвалі накладваюцца адна на адну. Назіраючы хвалі на паверхні вады ад двух кінутых у ваду камянёў, можна заўважыць, што некаторыя ўчасткі паверхні не парушаны, у іншых жа месцах парушэнне стала больш моцным. Калі дзве хвалі сустракаюцца ў адным месцы грэбня, то ў гэтым месцы парушэнне паверхні ўзмацняецца.

Калі ж, наадварот, грэбень адной хвалі сустракаецца з упадзінай другой, то паверхня вады не будзе парушана.

Наогул жа ў кожным пункце асяроддзя ваганні, выкліканыя дзвюма хвалямі, проста складаюцца. Рэзультуючае зрушэнне любой часцінкі асяроддзя ўяўляе сабой алгебраічную (г. зн. з улікам іх знакаў) суму зрушэнняў, якія адбываліся б пры распаўсюджванні адной з хваль пры адсутнасці другой.

Інтэрферэнцыя. Складанне ў прастору хваль, пры якім утвараецца пастаяннае ў часе размеркаванне амплітуд рэзультуючых ваганняў, называецца *інтэрферэнцыяй*¹.

Высветлім, пры якіх умовах мае месца інтэрферэнцыя хваль. Для гэтага разгледзім больш падрабязна складанне хваль, якія ўтвараюцца на паверхні вады.

Можна адначасова выклікаць дзве кругавыя хвалі ў ванне пры дапамозе двух шарыкаў, умацаваных на стрыжні, які выконвае гарманічныя ваганні (рыс. 118). У любым пункце M на паверхні вады (рыс. 119) будуць складацца ваганні, выкліканыя дзвюма хвалямі (ад крыніц O_1 і O_2). Амплітуды ваганняў, выкліканых у пункце M абедзвюма хвалямі, будуць, наогул кажучы,

¹ Ад лацінскіх слоў *inter* — узаемна, паміж сабой і *ferio* — удараю, паражваю.

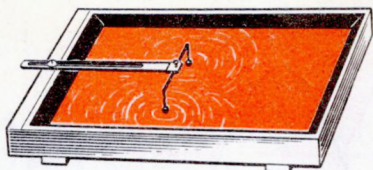


Рис. 118

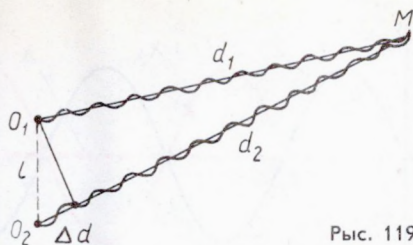


Рис. 119

адрознівацца, паколькі хвалі праходзяць розныя шляхі d_1 і d_2 . Але калі адлегласць l паміж крыніцамі многа меншая за гэтыя шляхі ($l \ll d_1$ і $l \ll d_2$), то абедзве амплітуды можна лічыць практычна аднолькавымі.

Вынік складання хваль, якія прыходзяць у пункт M , залежыць ад рознасці фаз паміж імі. Прайшоўшы розныя адлегласці d_1 і d_2 , хвалі маюць рознасць ходу $\Delta d = d_2 - d_1$. Калі рознасць ходу роўна даўжыні хвалі λ , то другая хваля спазняецца ў параўнанні з першай роўна на адзін перыяд (якраз за перыяд хваля праходзіць шлях, роўны даўжыні хвалі). Значыць, у гэтым выпадку грэбні (як і ўпадзіны) абедзвюх хваль супадаюць.

Умова максімуму. На рысунку 120 паказана залежнасць ад часу зрушэнняў x_1 і x_2 , выкліканых двума хвалямі пры $\Delta d = \lambda$. Рознасць фаз ваганняў роўна нулю (або, што тое ж самае, 2π , паколькі перыяд сіноса роўны 2π). У выніку складання гэтых ваганняў узнікае рэзультуючае ваганне з падвоенай амплітудай. Ваганні рэзультуючага зрушэння x на рысунку паказаны колерам (пункцір). Тое ж будзе адбывацца, калі на адрэзку Δd укладваецца не адна, а цэлы лік даўжынь хваль.

Амплітуда ваганняў асяроддзя ў дадзеным пункце масімаль-

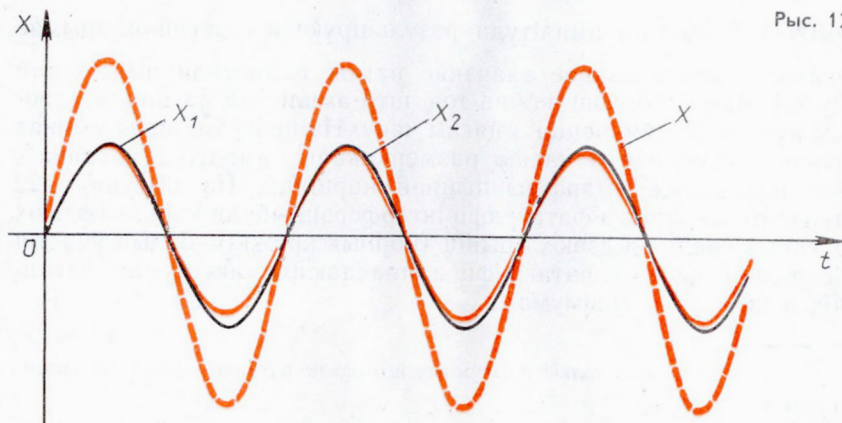
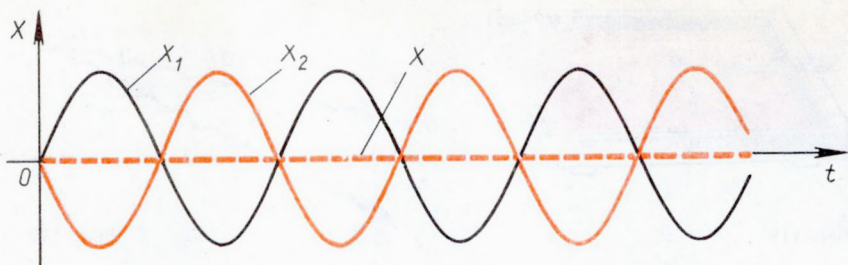


Рис. 120



Рыс. 121

ная, калі рознасць ходу дзвюх хваль, якія ўзбуджаюць ваганні ў гэтым пункце, роўна цэламу ліку даўжынь хваль¹:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (5.10)$$

дзе $k = 0, 1, 2, \dots$

Умова мінімумаў. Няхай цяпер на адрэзку Δd укладваецца палавіна даўжыні хвалі. Відавочна, што пры гэтым другая хваля адстае ад першай на палавіну перыяду. Рознасць фаз аказваецца роўнай π , г. зн. ваганні будуць адбывацца ў проціфазе. У выніку складання гэтых ваганняў амплітуда рэзультуючага вагання роўна нулю, г. зн. што ў пункце, які разглядаюць, ваганняў няма (рыс. 121). Тое ж адбудзецца, калі на адрэзку ўкладваецца любы няцотны лік паўхваль.

Амплітуда ваганняў асяроддзя ў дадзеным пункце мінімальная, калі рознасць ходу дзвюх хваль, што ўзбуджаюць ваганні ў гэтым пункце, роўна няцотнаму ліку паўхваль:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (5.11)$$

Калі рознасць ходу $d_2 - d_1$ прымае прамежкавае значэнне паміж λ і $\frac{\lambda}{2}$, то і амплітуда рэзультуючага вагання прымае некаторае прамежкавае значэнне паміж падвоенай амплітудай і нулём. Але найбольш важна тое, што амплітуда ваганняў у любым пункце не змяняецца з цягам часу. На паверхні вады ўзнікае пэўнае, нязменнае з часам размеркаванне амплітуд ваганняў, якое называюць інтэрферэнцыйнай карцінай. На рысунку 122 паказаны малюнак з фатаграфіі інтэрферэнцыйнай карціны дзвюх кругавых хваль ад дзвюх крыніц (чорныя кружкі). Белыя ўчасткі ў сярэдняй частцы фатаграфіі адпавядаюць максімумам ваганняў, а цёмныя — мінімумам.

¹ Гэта справядліва толькі пры ўмове, што фазы ваганняў абедзвюх крыніц супадаюць.

Кагерэнтныя хвалі. Для ўтварэння ўстойлівай інтэрферэнцыйнай карціны неабходна, каб крыніцы хваль мелі аднолькавую частату і рознасць фаз іх ваганняў была пастаяннай.

Крыніцы, што задавальняюць гэтым умовам, называюцца *кагерэнтнымі*¹. Кагерэнтнымі называюць і створаныя імі хвалі. Толькі пры складанні кагерэнтных хваль утвараецца ўстойлівая інтэрферэнцыйная карціна.

Калі ж рознасць фаз ваганняў крыніц не застаецца пастаяннай, то ў любым пункце асяроддзя рознасць фаз ваганняў, што ўзбуджаюцца дзвюма хвалямі, будзе мяняцца. Таму амплітуда рэзультируючых ваганняў з цягам часу змяняецца. У выніку максімумы і мінімумы перамяшчаюцца ў прасторы і інтэрферэнцыйная карціна размываецца.

Размеркаванне энергіі пры інтэрферэнцыі. Хвалі нясуць энергію. Што ж з гэтай энергіяй адбываецца пры гашэнні хваль адна адной? Можна, яна ператвараецца ў іншыя формы і ў мінімумах інтэрферэнцыйнай карціны вылучаецца цяпло? Нічога падобнага. Наяўнасць мінімуму ў дадзеным пункце інтэрферэнцыйнай карціны азначае, што энергія сюды не паступае зусім. У выніку інтэрферэнцыі адбываецца перамеркаванне энергіі ў прасторы. Яна не размяркоўваецца раўнамерна па ўсіх частках асяроддзя, а канцэнтруецца ў максімумам за кошт таго, што ў мінімумах не паступае зусім.



Рыс. 122

Выяўленне інтэрферэнцыйнай карціны даказвае, што мы маем справу з хвалевым працэсам. Хвалі могуць гасіць адна адну, а часцінкі, што сутыкаюцца, ніколі не знішчаюць адна адну цалкам. Інтэрферыруюць толькі кагерэнтныя (узгодненыя) хвалі.



1. Якія хвалі называюцца кагерэнтнымі? 2. Што называюць інтэрферэнцыяй?
2. Сфармулюйце ўмовы максіумаў і мініумаў інтэрферэнцыйнай карціны.

§ 46. ІНТЭРФЕРЭНЦЫЯ СВАТЛА

Калі святло ўяўляе сабой паток хваль, то павінна назірацца з'ява інтэрферэнцыі святла. Аднак атрымаць інтэрферэнцыйную карціну (чаргаванне максіумаў і мініумаў асветленасці) з дапамогай дзвюх незалежных крыніц святла, напрыклад дзвюх электрычных лямпачак, немагчыма. Уключэнне яшчэ адной лямпачкі толькі павялічвае асветленасць паверхні, але не стварае чаргавання мініумаў і максіумаў асветленасці.

¹ Ад лацінскага слова *cohaereus* — узаемазвязаны.

Высветлім, у чым прычына гэтага і пры якіх умовах можна назіраць інтэрферэнцыю святла.

Умова кагерэнтнасці светлавых хваль. Прычына заключаецца ў тым, што светлавая хвалі, якія выпраменьваюцца рознымі крыніцамі, не ўзгоднены адна з адной. Для атрымання ж устойлівай інтэрферэнцыйнай карціны патрэбны ўзгодненыя хвалі. Яны павінны мець аднолькавыя даўжыні хваль і пастаянную рознасць фаз у любым пункце прасторы. Напамнім, што такія ўзгодненыя хвалі з аднолькавымі даўжынямі хваль і пастаяннай рознасцю фаз называюцца кагерэнтнымі.

Амаль дакладнай роўнасці даўжынь хваль ад дзвюх крыніц дабіцца няцяжка. Для гэтага дастаткова выкарыстаць добрыя святлафільтры, якія прапускаюць святло ў вельмі вузкім інтэрвале даўжынь хваль. Але немагчыма ажыццявіць пастаянства рознасці фаз ад дзвюх незалежных крыніц. Атамы крыніц выпраменьваюць святло незалежна адна ад адной асобнымі «абрыўкамі» (цугамі) сінусаідаальных хваль, якія маюць даўжыню каля метра. І такія цугі хваль ад абедзвюх крыніц накладваюцца адна на адну. У выніку амплітуда ваганняў у любым пункце прасторы хаатычна мяняецца з часам у залежнасці ад таго, як у дадзены момант часу цугі хваль ад розных крыніц зрушаны адна адносна адной па фазе. Хвалі ад розных крыніц святла *некагерэнтныя* з-за таго, што рознасць фаз хваль не застаецца пастаяннай¹. Ніякай устойлівай карціны з пэўным размеркаваннем максімумаў і мінімумаў асветленасці ў прасторы не назіраецца.

Інтэрферэнцыя ў тонкіх плёнках. Тым не менш інтэрферэнцыю святла ўдаецца назіраць. Кур'ёз заключаецца ў тым, што яе назіралі вельмі даўно, але толькі не разумелі гэтага.

Вы таксама многа разоў бачылі інтэрферэнцыйную карціну, калі ў дзяцінстве забаўляліся пусканнем мыльных бурбалак або назіралі за радужным пералівам колераў тонкай плёнке карасіны або нафты на паверхні вады. «Мыльная бурбалка, лятаючы ў паветры... загараецца ўсімі адценнямі колераў, уласцівых навакольным прадметам. Мыльная бурбалка, бадай што, самае чароўнае цуда прыроды» (Марк Твэн). Іменна інтэрферэнцыя святла робіць мыльную бурбалку такой дастойнай захаплення.

Англійскі вучоны Томас Юнг першым прыйшоў да геніяльнай думкі аб магчымасці тлумачэння колераў тонкіх плёнак складаннем хваль 1 і 2 (рыс. 123)², адна з якіх (1) адбіваецца ад vonкавай паверхні плёнке, а другая (2) — ад унутранай. Пры гэтым адбываецца *інтэрферэнцыя светлавых хваль* — *складанне дзвюх хваль, у выніку якога назіраецца ўстойлівая*

¹ Выключэннем з'яўляюцца квантавыя крыніцы святла — лазеры, створаныя ў 1960 г.

² Вока зводзіць разам хвалі 1 і 2 на сятчатцы, калі разглядаць паверхню плёнке, г. зн. акамадзіраваць вока на яе.

Юнг Томас (1773—1829) — англійські вучоны з не-звычайнай шырынёй навуковых інтарэсаў і шмат-граннасцю талентаў. Юнг — адначасова вядомы ўрач і фізік з велізарнай інтуіцыяй, астраном і механік, металург і егіптолаг, фізіёлаг і паліглот, таленавіты музыкант і нават здольны гімнаст. Галоўнай заслугой Юнга з'яўляецца адкрыццё інтэр-ферэнцыі святла (тэрмін інтэр ферэнцыя на-лежыць Юнгу) і тлумачэнне з'явы дыфракцыі на аснове хвалевай тэорыі. Юнг першым вымераў даўжыню светлавой хвалі.



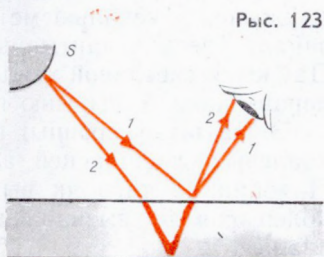
Ў часе карціна ўзмацнення або аслаблення рэзультуючых светлавых ваганняў у розных пунктах прасторы. Вынік інтэрфе-рэнцыі (узмацненне або аслабленне рэзультуючых ваганняў) залежыць ад вугла падзення святла на плёнку, яе таўшчыні і даўжыні хвалі. Узмацненне святла адбудзецца ў тым выпадку, калі праломленая хваля 2 адстане ад адбітай хвалі 1 на цэлы лік даўжынь хваль. Калі ж другая хваля адстане ад першай на палавіну даўжыні хвалі або на няцотны лік паўхваль, то адбу-дзецца аслабленне святла.

Кагерэнтнасць хваль, адбітых ад вонкавай і ўнутранай паверх-няў плёнкі, забяспечваецца тым, што яны з'яўляюцца часткамі аднаго і таго ж светлавога пучка. Цуг хваль ад кожнага атама, які выпраменьвае, падзяляецца плёнкай на два, а затым гэтыя часткі зводзяцца разам і інтэрферыруюць.

Юнг таксама зразумеў, што розніца ў колеры звязана з роз-ніцай у даўжыні хвалі (або частаце светлавых хваль). Светла-вым пучкам рознага колеру адпавядаюць хвалі рознай даўжыні. Для ўзаемнага ўзмацнення хваль, якія адрозніваюцца адна ад адной даўжынёй (вуглы падзення мяркуюцца аднолькавымі), патрабуецца розная таўшчыня плёнкі. Значыць, калі плёнка мае неаднолькавую таўшчыню, то пры асвятленні яе белым святлом павінны з'явіцца розныя колеры.

Кольцы Ньютана. Простая інтэрферэнцыйная карціна ўзнікае ў тонкай праслойцы паветра паміж шкляной пласцінай і пакла-дзенай на яе плоска-выпуклай лінзай, сферычная паверхня якой мае вялікі радыус крывізны. Гэта інтэрферэнцыйная карціна мае выгляд канцэнтрычных кольцаў, якія атрыма-лі назву *кольцаў Ньютана*.

Вазьміце плоска-выпуклую лінзу з малой крывізной сферычнай паверх-ні і пакладзіце яе на шкляную плас-ціну. Уважліва разглядаючы плоскую паверхню лінзы (лепш праз лупу), вы выявіце ў месцы судакранання



Рыс. 123

лінзы і пласціны цёмную пляму і вакол яе сукупнасць маленькіх вясёлкавых кольцаў. Адлегласці паміж суседнімі кольцамі хутка ўбываюць па меры павелічэння іх радыуса (рыс. III, 1 на каляровай уклейцы). Гэта і ёсць кольца Ньютана. Ньютан назіраў і даследаваў іх не толькі ў белым святле, але і пры асвятленні лінзы аднакаляровым (монахраматычным) пучком. Аказалася, што радыусы кольцаў аднаго і таго ж парадкавага нумара павялічваюцца пры пераходзе ад фіялетавага канца спектра да чырвонага; чырвоныя кольца маюць максімальны радыус (рыс. III, 2 і 3 на каляровай уклейцы). Усё гэта вы можаце праверыць з дапамогай самастойных назіранняў.

Здавальняюча растлумачыць, чаму ўзнікаюць кольца, Ньютан не змог. Удалося гэта Юнгу. Прасочым за ходам яго разважанняў. У іх аснове ляжыць дапушчэнне аб тым, што святло — гэта хвалі. Разгледзім выпадак, калі хваля пэўнай даўжыні падае амаль перпендыкулярна на плоска-выпуклую лінзу (рыс. 124). Хваля 1 з'яўляецца ў выніку адбіцця ад выпуклай паверхні лінзы на мяжы шкло — паветра, а хваля 2 — у выніку адбіцця ад пласціны на мяжы паветра — шкло. Гэтыя хвалі кагерэнтныя: яны маюць аднолькавую даўжыню і пастаянную рознасць фаз, якая ўзнікае з-за таго, што хваля 2 праходзіць большы шлях, чым хваля 1. Калі другая хваля адстане ад першай на цэлы лік даўжын хваль, то, складаючыся, хвалі ўзмацняюць адна адну. Ваганні, якія выклікаюцца імі, адбываюцца ў адной фазе.

Наадварот, калі другая хваля адстане ад першай на няцотны лік паўхваль, то ваганні, выкліканыя імі, будуць адбывацца ў процілеглых фазах і хвалі гасяць адна адну.

Калі вядомы радыус крывізны R паверхні лінзы, то можна вылічыць, на якіх адлегласцях ад пункта судакранання лінзы са шкляной пласцінай рознасці ходу такія, што хвалі пэўнай даўжыні λ гасяць адна адну. Гэтыя адлегласці і з'яўляюцца радыусамі цёмных кольцаў Ньютана. Лініі ж пастаяннай таўшчыні паветранай праслойкі з'яўляюцца акружнасцямі. Вымераўшы радыусы кольцаў, можна вылічыць даўжыні хваль.

Даўжыня светлавой хвалі. Для чырвонага колеру вымярэнні даюць $\lambda_{\text{ч}} = 8 \cdot 10^{-7}$ м, а для фіялетавага — $\lambda_{\text{ф}} = 4 \cdot 10^{-7}$ м. Даўжыні хваль, што адпавядаюць другім колерам спектра, прымаюць прамежкавыя значэнні. Для любога колеру даўжыня светлавой хвалі вельмі малая. Уявіце сабе сярэднюю марскую хвалю даўжынёй у некалькі метраў, якая павялічылася настолькі, што заняла ўвесь Атлантычны акіян ад берагоў Амерыкі да Еўропы. Даўжыня светлавой хвалі ў тым жа павелічэнні толькі ненамнога перавышала 6 шырыню гэтай старонкі.

З'ява інтэрферэнцыі не толькі даказвае наяўнасць у святла хвалевага ўласцівасцей, але і дазваляе вымераць даўжыню хвалі. Падобна да таго як вышыня гуку вызначаецца яго частатой, колер святла вызначаецца частатой ваганняў або даўжынёй хвалі.

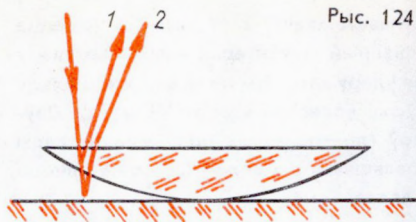


Рис. 124

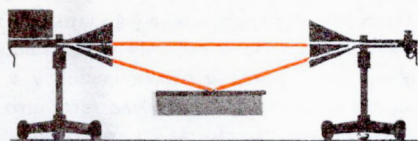


Рис. 125

Па-за намі ў прыродзе няма ніякіх фарбаў, ёсць толькі хвалі рознай даўжыні. Вока — складаны фізічны прыбор, здольны выяўляць адрозненне ў колеры, якому адпавядае вельмі нязначнае (каля 10^{-6} см) адрозненне ў даўжыні светлавых хваль. Цікава, што большасць жывёл не здольны адрозніваць колеры. Яны заўсёды бачаць чорна-белую карціну. Не адрозніваюць колеры таксама дальтонікі — людзі, якія маюць колеравую слепату.

Пры пераходзе святла з аднаго асяроддзя ў другое даўжыня хвалі змяняецца. Гэта можна выявіць так. Запоўнім вадой або іншай празрыстай вадкасцю з паказчыкам праламлення n паветраную праслойку паміж лінзай і пласцінай. радыусы інтэрферэнцыйных кольцаў паменшацца.

Чаму гэта адбываецца? Мы ведаем, што пры пераходзе святла з вакууму ў якое-небудзь асяроддзе скорасць святла памяншаецца ў n разоў. Паколькі $v = \lambda\nu$, то пры гэтым павінна паменшыцца ў n разоў або частата, або даўжыня хвалі. Але радыусы кольцаў залежаць ад даўжыні хвалі. Значыць, калі святло ўваходзіць у асяроддзе, змяняецца ў n разоў іменна даўжыня хвалі, а не частата.

Інтэрферэнцыя электрамагнітных хваль. На доследах з генератарам ЗВЧ можна назіраць інтэрферэнцыю электрамагнітных (радыё) хваль (гл. § 35).

Генератар і прыёмнік размяшчаюць адзін супраць аднаго (рис. 125). Затым падводзяць знізу металічную пласціну ў гарызантальным становішчы. Паступова падымаючы пласціну, выяўляюць пачарговае аслабленне і ўзмацненне гуку.

З'ява тлумачыцца наступным чынам. Частка хваль з рупара генератара непасрэдна пападае ў прыёмны рупар. Другая ж яе частка адбіваецца ад металічнай пласціны. Мяняючы размяшчэнне пласціны, мы змяняем рознасць ходу прамой і адбітай хваль. З прычыны гэтага хвалі або ўзмацняюць, або аслабляюць адна адну, у залежнасці ад таго, ці роўна рознасць ходу цэламу ліку даўжынь хваль або няцотнаму ліку паўхваль.

Назіранне інтэрферэнцыі святла даказвае, што святло пры распаўсюджванні выяўляе хвалевыя ўласцівасці. Інтэрферэнцыйныя доследы дазваляюць вымераць даўжыню светлавой хвалі: яна вельмі малая — ад $4 \cdot 10^{-7}$ да $8 \cdot 10^{-7}$ м.

1. Як атрымліваюць кагерэнтныя светлавя хвалі? 2. У чым складаецца з'ява інтэрферэнцыі святла? 3. З якой фізічнай характарыстыкай светлавых хваль звязана адрозненне ў колеры? 4. Пасля ўдару каменем па прызрыстаму льду з'яўляюцца трэшчыны, якія пераліваюцца ўсімі колерамі вясёлкі. Чаму? 5. Даўжыня хвалі ў вадзе памяншаецца ў n разоў (n — паказчык праламлення вады адносна паветра). Ці азначае гэта, што ныральшчык пад вадой не можа бачыць навакольныя прадметы ў натуральным выглядзе?

§ 47. НЕКАТОРЫЯ ПРЫМЯНЕННІ ІНТЭРФЕРЭНЦЫІ

Прымяненні інтэрферэнцыі вельмі важныя і шырокія.

Існуюць спецыяльныя прыборы — інтэрферометры, дзеянне якіх заснавана на з'яве інтэрферэнцыі. Прызначэнне іх можа быць розным: дакладнае вымярэнне даўжынь светлавых хваль, вымярэнне паказчыка праламлення газаў і іншых рэчываў. Ёсць інтэрферометры спецыяльнага прызначэння.

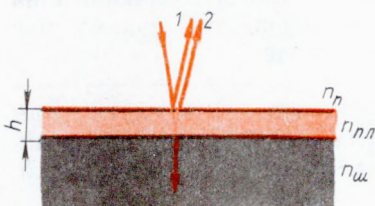
Мы спынімся толькі на двух прымяненнях інтэрферэнцыі.

Праверка якасці апрацоўкі паверхняў. З дапамогай інтэрферэнцыі можна ацаніць якасць апрацоўкі паверхні вырабу з дакладнасцю да $1/10$ даўжыні хвалі, г. зн. з дакладнасцю да 10^{-6} см. Для гэтага трэба стварыць тонкую клінападобную праслойку паветра паміж паверхняй узору і вельмі гладкай эталоннай пласцінай. Тады няроўнасці паверхні размераў да 10^{-6} см выклікаюць значныя скрыўленні інтэрферэнцыйных палос, што ўтвараюцца пры адбіцці святла ад правяраемай паверхні і ніжняй грані эталоннай пласціны.

Прасвятленне оптикі. Аб'ектывы сучасных фотаапаратаў і кінапраектараў, перыскопы падводных лодак і розныя іншыя аптычныя прыстасаванні складаюцца з вялікай колькасці аптычнага шкла — лінз, прызм і інш. Праходзячы праз такія прыстасаванні, святло адбіваецца ад многіх паверхняў. Лік адбіваючых паверхняў у сучасных фотааб'ектывах перавышае 10, а ў перыскопах падводных лодак даходзіць да 40. Пры падзенні святла перпендыкулярна паверхні доля адбітай ад яе энергіі складае 5—9 % ад усёй энергіі. Таму праз прыбор часта праходзіць усяго 10—20 % святла, якое ў яго паступае. У выніку гэтага асветленасць відарысу атрымліваецца малой. Акрамя таго,

пагаршаецца якасць відарыса. Частка светлага пучка пасля шматразовага адбіцця ад унутраных паверхняў усё ж праходзіць праз аптычны прыбор, але рассеіваецца і ўжо не ўдзельнічае ў стварэнні выразнага відарыса. На фатаграфічных відарысах, напрыклад, па гэтай прычыне ўтвараецца «вуаль».

Рыс. 126



Для ўстаранення гэтых непрыемных вынікаў адбіцця святла ад паверхняў аптычнага шкла трэба паменшыць долю энергіі святла, якая адбіваецца. Відарыс, які даецца прыборам, робіцца пры гэтым ярчэйшым, «прасвятляецца». Адсюль і паходзіць тэрмін *прасвятленне оптикі*.

Прасвятленне оптикі заснавана на інтэрферэнцыі. На паверхню аптычнага шкла, напрыклад лінзы, наносяць тонкую плёнку з паказчыкам праламлення $n_{пл}$, меншым за паказчык праламлення шкла $n_{ш}$. Для прастаты разгледзім выпадак нармальнага падзення святла на плёнку.

Рознасць ходу светлавых хваль 1 і 2 (рыс. 126), якія адбіваюцца ад верхняй і ніжняй паверхняў плёнкі, роўна падвоянай таўшчыні плёнкі $2h$. Даўжыня хвалі $\lambda_{пл}$ у плёнцы меншая за даўжыню хвалі λ у вакууме ў n разоў:

$$\lambda_{пл} = \frac{\lambda}{n_{пл}}.$$

Для таго каб хвалі 1 і 2 аслаблялі адна адну, рознасць ходу павінна быць роўна палавіне даўжыні хвалі ў плёнцы:

$$2h = \frac{\lambda_{пл}}{2} = \frac{\lambda}{2n_{пл}}. \quad (5.12)$$

Калі амплітуды абедзвюх адбітых хваль аднолькавыя або вельмі блізкія адна да адной, то гашэнне святла будзе поўным. Каб дабіцца гэтага, падбіраюць адпаведным чынам паказчык праламлення плёнкі, паколькі інтэнсіўнасць адбітага святла вызначаецца адносінай каэфіцыентаў праламлення двух мяжуючых асяроддзяў.

На лінзу пры звычайных умовах падае белае святло. Выраз (5.12) паказвае, што патрабуемая таўшчыня плёнкі залежыць ад даўжыні хвалі. Таму ажыццявіць гашэнне адбітых хваль усіх частот немагчыма. Таўшчыню плёнкі падбіраюць так, каб поўнае гашэнне пры нармальным падзенні мела месца для даўжынь хваль сярэдняй часткі спектра (зялёны колер, $\lambda_3 = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см); яна павінна быць роўна чвэрці даўжыні хвалі ў плёнцы¹:

$$h = \frac{\lambda_3}{4n_{пл}}.$$

Адбіццё святла крайніх участкаў спектра — чырвонага і фіялетавага — аслабляецца нязначна. Таму аб'екты з прасветленай оптыкай у адбітым святле мае бэзавае адценне. Цяпер нават простыя танныя фотаапараты маюць прасветленую оптыку.

¹ Практычна наносяць слой, таўшчыня якога на цэлы лік хваль большая. Гэта больш зручна. Прамысловы метад нанясення на паверхню аптычнага шкла тонкіх плёнак быў распрацаваны савецкімі вучонымі І. В. Грабеншчыкавым, А. М. Цярэніным і інш.

Гашэнне святла святлом не азначае ператварэння светлавой энергіі ў іншыя формы. Як і пры інтэрферэнцыі механічных хваль, гашэнне хваль адна адной у дадзеным участку прасторы азначае, што светлавая энергія сюды проста не паступае. Гашэнне адбітых хваль у аб'ектыве з прасветленай оптыкай азначае, што ўсё святло праходзіць скрозь аб'ектыў.

§ 48. ДЫФРАКЦЫЯ МЕХАНІЧНЫХ ХВАЛЬ

Часта хваля сустракае на сваім шляху невялікія (у параўнанні з яе даўжынёй) перашкоды. Суадносіна паміж даўжынёй хвалі і размерам перашкод вызначае, у асноўным, паводзіны хвалі.

Хвалі здольны агібаць краі перашкод. Калі размеры перашкод малыя, хвалі, агібаючы перашкоды па краях, змыкаюцца за імі. Так, марскія хвалі свабодна агібаюць камень, які выступае з вады, калі яго размеры меншыя за даўжыню хвалі або параўнальныя з ёй. За каменем хвалі распаўсюджваюцца так, як калі б яго не было зусім (маленькія камяні на рысунку 127). Зусім гэтак жа хваля ад кінутага ў сажалку каменя агібае пруток, які тырчыць з вады. Толькі за перашкодай вялікага ў параўнанні з даўжынёй хвалі размера (вялікі камень на рысунку 127) утвараецца «цень»: хвалі за яго не пранікаюць.

Здольнасцю агібаць перашкоды ўладаюць і гукавыя хвалі. Вы можаце чуць сігнал машыны за вуглом дома, калі самой машыны не відаць. У лесе дрэвы засланяюць вашых таварышаў. Каб іх не згубіць, вы пачынаеце крычаць. Гукавыя хвалі, у адрозненне ад святла, свабодна агібаюць ствалы дрэў і даносяць ваш голас да таварышаў.

Адхіленне ад прамалінейнага распаўсюджвання хваль, агібання хвалямі перашкод называецца *дыфракцыяй*¹. Дыфракцыя ўласціва любому хвалеваму працэсу ў той жа меры, як і інтэрферэнцыя. Пры дыфракцыі адбываецца скрыўленне хвалевых паверхняў каля краёў перашкод.

Дыфракцыя хваль праяўляецца асабліва выразна ў выпадках, калі размеры перашкод на шляху хваль меншыя за даўжыню хвалі або параўнальныя з ёй.

З'яву дыфракцыі хваль на паверхні вады можна назіраць, калі паставіць на шляху хваль экран з вузкай шчылінай, размеры якой меншыя за даўжыню хвалі (рыс.

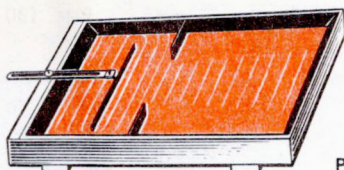
Рыс. 127



¹ Ад лацінскага слова diffractus — разломаны.



Рыс. 128



Рыс. 129

128). Добра будзе відаць, што за экранам распаўсюджваецца кругавая хваля, як быццам бы ў адтуліне экрана размяшчалася цела, якое вагаецца, — крыніца хваль. Згодна з прынцыпам Гюйгенса так і павінна быць. Другасныя крыніцы ў вузкай шчыліне размяшчаюцца настолькі блізка адна ад адной, што іх можна разглядаць як адну пунктавую крыніцу.

Калі размеры шчыліны вялікія ў параўнанні з даўжынёй хвалі, то карціна распаўсюджвання хваль за экранам зусім іншая (рыс. 129). Хваля праходзіць праз шчыліну, амаль не мяняючы сваёй формы. Толькі па краях можна заўважыць невялікія скрыўленні хвалевай паверхні, дзякуючы якім хваля часткова пранікае і ў прастору за экранам.

Прынцып Гюйгенса дазваляе зразумець, чаму адбываецца дыфракцыя. Другасныя хвалі, якія выпраменьваюцца ўчасткамі асяроддзя, пранікаюць за краі перашкоды, размешчанай на шляху распаўсюджвання хвалі.

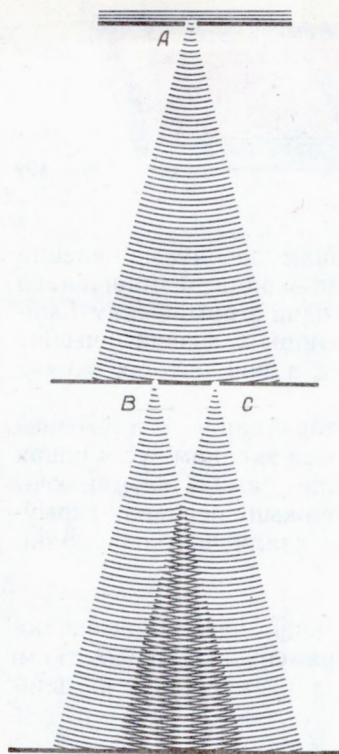
1. Прывядзіце прыклады дыфракцыі хваль, якія не ўпаміналіся ў тэксце?
2. Пры якіх умовах дыфракцыя хваль праяўляецца асабліва выразна?

§ 49. ДЫФРАКЦЫЯ СВЯТЛА

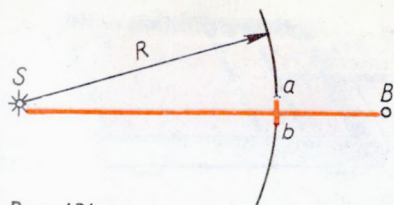
Калі святло з'яўляецца хвалевым працэсам, то побач з інтэрферэнцыяй павінна назірацца і дыфракцыя святла. Дыфракцыя ж — агібанне хвалямі перашкод — уласцівая любому хвалеваму руху. Але назіраць дыфракцыю святла нялёгка. Справа ў тым, што хвалі адхіляюцца ад прамалінейнага распаўсюджвання на значныя вуглы толькі на перашкодах, размеры якіх параўнальныя з даўжынёй светлавой хвалі, а даўжыня светлавой хвалі вельмі малая.

Прапускаючы тонкі пучок святла праз маленькую адтуліну, можна назіраць парушэнне закону прамалінейнага распаўсюджвання святла. Светлая пляма супраць адтуліны будзе большага размеру, чым гэтага трэба чакаць пры прамалінейным распаўсюджванні святла.

Дослед Юнга. У 1802 г. Юнг, які адкрыў інтэрферэнцыю святла, паставіў класічны дослед па дыфракцыі (рыс. 130). У непразрыстай шырма ён пракалоў шпількай дзве маленькія



Рыс. 130



Рыс. 131

адтуліны B і C на невялікай адлегласці адна ад адной. Гэтыя адтуліны асвятляліся вузкім светлавым пучком, прайшоўшым, у сваю чаргу, праз малую адтуліну A ў другой шырме. Менавіта гэта дэталі, да якой вельмі цяжка было дадумацца ў той час, рашыла поспех доследу. Інтэрферыруюць толькі кагерэнтныя хвалі. Узнікшая ў адпаведнасці з прынцыпам Гюйгенса сферычная хваля ад адтуліны A ўзбуджала ў адтулінах B і C кагерэнтныя ваганні. У выніку дыфракцыі з адтулін B і C выходзілі два светлавых конусы, якія часткова перакрываліся. У выніку інтэрферэнцыі светлавых хваль на экране з'яўляліся светлыя і цёмныя палосы, якія чаргаваліся.

Закрываючы адну з адтулін, Юнг выяўляў, што інтэрферэнцыйныя палосы знікалі. Менавіта з дапамогай гэтага доследу ўпершыню Юнгам былі вымераны даўжыні хваль, якія адпавядаюць светлавым прамяням рознага колеру, прычым вельмі дакладна.

Тэорыя Фрэнеля. Даследаванне дыфракцыі атрымала сваё завяршэнне ў працах О. Фрэнеля. Фрэнель не толькі больш дэталёва даследаваў розныя выпадкі дыфракцыі на доследзе, але і пабудоваў колькасную тэорыю дыфракцыі, якая дазваляла ў прынцыпе разлічыць дыфракцыйную карціну, што ўзнікала пры агібання святлом любых перашкод. Ім жа было ўпершыню растлумачана прамалінейнае распаўсюджванне святла ў аднародным асяроддзі на аснове хвалевай тэорыі.

Гэтых поспехаў Фрэнель дабіўся, аб'яднаўшы прынцып Гюйгенса з ідэяй інтэрферэнцыі другасных хваль. Згодна з ідэяй Фрэнеля, *хвалевае паверхня ў любы момант часу з'яўляецца не проста агібаючай другасных хваль, а вынікам іх інтэрферэнцыі (прынцып Гюйгенса — Фрэнеля).*

Для таго каб вылічыць амплітуду светлавой хвалі ў любым пункце прасторы, трэба мысленна акружыць крыніцу святла замкнутой паверхняй. Інтэрферэнцыйныя хвалі ад другасных кры-

Фрэнель Агюстен (1788—1827) — французскі фізік. Фрэнель заклаў асновы хвалевай оптыкі. Дапоўніўшы прынцып Гюйгенса ідэяй інтэрферэнцыі другасных хваль, ён пабудаваў колькасную тэорыю дыфракцыі. На аснове гэтага прынцыпу Фрэнель растлумачыў законы геаметрычнай оптыкі, у прыватнасці прамалінейны характар распаўсюджвання святла ў аднародным асяроддзі. Ён створаны прыбліжаны метады разліку дыфракцыйнай карціны, заснаваны на раздзяленні хвалевай паверхні на зоны. Папярочнасць светлавых хваль упершыню была даказана Фрэнелем.



ніц, якія размешчаны на гэтай паверхні, вызначае амплітуду ў разглядаемым пункце прасторы.

Такого роду разлікі дазволілі зразумець, якім чынам святло ад пунктавой крыніцы S , што выпраменьвае сферычныя хвалі, дасягае адвольнага пункта прасторы B (рыс. 131). Калі разгледзець другасныя крыніцы на сферычнай хвалевай паверхні радыуса R , то вынік інтэрферэнцыі другасных хваль ад гэтых крыніц у пункце B аказваецца такім, як калі б толькі другасныя крыніцы на малым сферычным сегменце ab пасылалі святло ў пункт B . Другасныя хвалі, выпрамененыя крыніцамі, якія размешчаны на астатняй частцы паверхні, гасяць адна адну ў выніку інтэрферэнцыі. Таму ўсё адбываецца так, як калі б святло распаўсюджвалася толькі ўздоўж прамой SB , г. зн. прамалінейна.

Адначасова Фрэнель разгледзеў колькасна дыфракцыю на рознага роду перашкодах.

Цікавы выпадак адбыўся на пасяджэнні Французскай Акадэміі навук у 1818 г. Адзін з вучоных, якія прысутнічалі на пасяджэнні, звярнуў увагу на тое, што з тэорыі Фрэнеля вынікаюць факты, якія яўна супярэчаць разумнаму сэнсу. Пры пэўных размерах адтуліны і пэўных адлегласцях ад адтуліны да крыніцы святла і экрана ў цэнтры светлай плямы павінна знаходзіцца цёмная плямка. За маленькім непразрыстым дыскам, наадварот, павінна знаходзіцца светлая пляма ў цэнтры ценю. Якім жа было здзіўленне вучоных, калі пастаўленыя эксперыменты даказалі, што так і ёсць на самай справе.

Дыфракцыйныя карціны ад розных перашкод. З-за таго што даўжыня светлавой хвалі вельмі малая, вугал адхілення святла ад напрамку прамалінейнага распаўсюджвання невялікі. Таму для выразнага назірання дыфракцыі трэба або выкарыстаць вельмі малыя перашкоды, або размяшчаць экран далёка ад перашкод. Пры адлегласці паміж перашкодай і экранам парадку метра размеры перашкод не павінны перавышаць сотых доляў міліметра. Калі ж адлегласць да экрана дасягае сотняў метраў або некалькіх кіламетраў, то дыфракцыю можна назіраць на

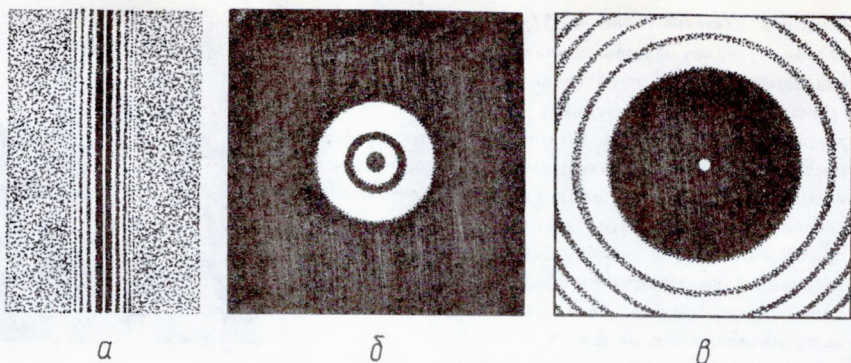


Рис. 132

перашкодах размерам у некалькі сантыметраў або нават метраў.

На рысунку 132 паказана, як выглядаюць на фатаграфіях дыфракцыйныя карціны ад розных перашкод: а) ад тонкага дроціка; б) ад круглай адтуліны; в) ад круглага экрана.

Замест ценю ад дроціка відаць група светлых і цёмных палос; у цэнтры дыфракцыйнай карціны ад адтуліны з'яўляецца цёмная пляма, абкружаная светлымі і цёмнымі кольцамі¹; у цэнтры ценю, утворанага круглым экранам, бачна светлая плямка, а сам цень абкружаны цёмнымі канцэнтрычнымі кольцамі.

Межы прыманімасці геаметрычнай оптыкі. Усе фізічныя тэорыі адлюстроўваюць працэсы, якія рэальна адбываюцца ў прыродзе, прыбліжана. Для любой тэорыі могуць быць указаны пэўныя межы яе прыманімасці. Ці можна прымяняць у канкрэтным выпадку дадзеную тэорыю або не, залежыць не толькі ад той дакладнасці, якую забяспечвае гэта тэорыя, але і ад таго, якая дакладнасць патрабуецца пры рашэнні той ці іншай практычнай задачы. Межы тэорыі можна ўстанавіць толькі пасля таго, як пабудавана больш агульная тэорыя, якая ахоплівае тыя ж з'явы.

Усе гэтыя агульныя палажэнні адносяцца і да геаметрычнай оптыкі. Гэта тэорыя з'яўляецца прыбліжанай. Яна не здольна растлумачыць з'явы інтэрферэнцыі і дыфракцыі святла. Больш агульнай і больш дакладнай тэорыяй з'яўляецца хвалевае аптыка. Закон прамалінейнага распаўсюджвання святла і іншыя законы геаметрычнай оптыкі выконваюцца дастаткова дакладна толькі ў тым выпадку, калі размеры перашкод на шляху распаўсюджвання святла многа большыя за даўжыню светлавой хвалі. Але зусім дакладна яны не выконваюцца ніколі.

Дзеянне аптычных прыбораў апісваецца законамі геаметрычнай оптыкі. Згодна з гэтымі законамі, мы можам адрозніваць з дапамогай мікраскопа неабмежавана малыя дэталі аб'екта;

¹ Мяняючы дыяметр адтуліны, можна ў цэнтры дыфракцыйнай карціны атрымаць і светлую пляму, абкружаную цёмнымі і светлымі кольцамі.

з дапамогай тэлескопа можна ўстанавіць існаванне дзвюх зорак пры любых, неабмежавана малых вуглавых адлегласцях паміж імі. Аднак у сапраўднасці гэта не так, і толькі хвалевае тэорыя святла дазваляе разабрацца ў прычынах мяжы адрознівальнай здольнасці аптычных прыбораў.

Адрознівальная здольнасць мікраскопа і тэлескопа. Хвалевае прырода святла накладвае мяжу на магчымасць адрознівання дэталяў прадмета або вельмі дробных прадметаў пры іх назіранні з дапамогай мікраскопа. Дыфракцыя не дазваляе атрымаць выразныя відарысы дробных прадметаў, таму што святло распаўсюджваецца не строга прамалінейна, а агібае прадметы. З-за гэтага відарысы атрымліваюцца «размытымі». Ніякае павелічэнне не дапаможа адрозніваць дэталі прадмета, калі іх «размытыя» відарысы зліваюцца. Гэта адбываецца, калі лінейныя размеры прадметаў меншыя за даўжыню светлавой хвалі.

Дыфракцыя накладвае таксама мяжу на адрознівальную здольнасць тэлескопа. У выніку дыфракцыі хвалі на краі аправы аб'ектыва відарысам зоркі будзе не пункт, а сістэма светлых і цёмных кольцаў. Калі дзве зоркі знаходзяцца на малой вуглавой адлегласці адна ад адной, то гэтыя кольцы накладоў адно на адно і вока не можа адрозніць, ці ёсць два пункты, якія свецяцца, ці адзін. Паміж пунктамі, якія свецяцца, гранічная вуглавая адлегласць, пры якой іх можна адрозніваць, вызначаецца адносінай даўжыні хвалі да дыяметра аб'ектыва.

Гэты прыклад паказвае, што дыфракцыя адбываецца заўсёды, на любых перашкодах. І пры вельмі тонкіх назіраннях яе нельга не ўлічваць і для перашкод, па размеру значна большых за даўжыню хвалі.

Дыфракцыя святла вызначае межы прымянімасці геаметрычнай оптыкі. Агібанне святлом перашкод накладвае мяжу на адрознівальную здольнасць найважнейшых аптычных інструментаў — тэлескопаў і мікраскопаў.

1. Чаму з дапамогай мікраскопа нельга ўбачыць атам? 2. Сфармулюйце прынцып Гюйгенса — Фрэнеля. 3. Паспрабуйце аднавіць дыфракцыйны дослед Юнга. 4. У якіх выпадках прыбліжана справядлівыя законы геаметрычнай оптыкі?

§ 50. ДЫФРАКЦЫЙНАЯ РАШОТКА

На з'яве дыфракцыі заснавана будова выдатнай аптычнай прылады — дыфракцыйнай рашоткі.

Дыфракцыйная рашотка з'яўляецца сукупнасцю вялікага ліку вельмі вузкіх шчылін, падзеленых непразрыстымі прамежкамі (рыс. 133). Добрую рашотку вырабляюць з дапамогай спецыяльнай дзялільнай машыны, якая наносіць на шкляной пласцінцы

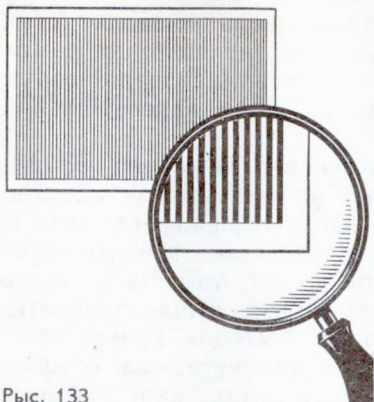


Рис. 133

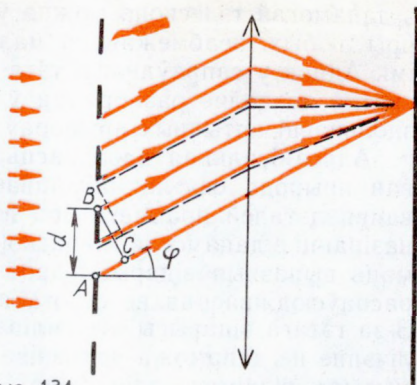


Рис. 134

паралельныя штрихі. Лік штрихоў даходзіць да некалькіх тысяч на 1 мм; агульны лік штрихоў перавышае 100 000. Простыя ў вырабе жэлацінавыя адбіткі з такой рашоткі, заціснутыя паміж двюма шклянымі пласцінамі. Найлепшымі якасцямі ўладаюць так званыя адбівальныя рашоткі. Яны з'яўляюцца ўчасткамі, якія чаргуюцца, адбіваюць святло і расейваюць яго. Штрихі, што расейваюць святло, наносзяцца разцом на адшліфаванай металічнай пласціне.

Калі шырыня празрыстых шчылін (або адбіваючых палос) роўна a , а шырыня непразрыстых прамежкаў (або расейваючых святло палос) b , то велічыня $d = a + b$ называецца *перыядам рашоткі*. Разгледзім элементарную тэорыю дыфракцыйнай рашоткі. Няхай на рашотку (рыс. 134) падае плоская манахраматычная хваля даўжынёй λ .

Другасныя крыніцы ў шчылінах ствараюць светлавую хвалі, якія распаўсюджваюцца па ўсіх напрамках. Знойдзем умову, пры якой хвалі, што ідуць ад шчылін, узмацняюць адна адну. Разгледзім для гэтага хвалі, якія распаўсюджваюцца ў напрамку, вызначаемым вуглом φ . Рознасць ходу паміж хвалямі ад краёў суседніх шчылін роўна даўжыні адрэзка AC . Калі на гэтым адрэзку ўкладваецца цэлы лік даўжын хваль, то хвалі ад усіх шчылін, складаючыся, будуць узмацняць адна адну. З трохвугольніка ABC можна знайсці даўжыню катэта AC :

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Максімумы будуць назірацца пад вуглом φ , вызначаемым умовай

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (5.13)$$

дзе $k = 0, 1, 2, \dots$

Трэба мець на ўвазе, што пры выкананні ўмовы (5.13) узмацняюцца не толькі хвалі, што ідуць ад ніжніх (па рысунку)

краёў шчылін, але і хвалі, што ідуць ад усіх іншых пунктаў шчылін. Кожнаму пункту ў першай шчыліне адпавядае пункт у другой шчыліне, якая знаходзіцца ад першага пункта на адлегласці d . Таму рознасць ходу выпрамененых гэтымі пунктамі другасных хваль роўна $k\lambda$, і гэтыя хвалі ўзаемна ўзмацняюцца.

За рашоткай змяшчаюць збірающую лінзу і за ёй экран на фокуснай адлегласці ад лінзы. Лінза факусіруе паралельныя прамені ў адным пункце. У гэтым пункце адбываецца складанне хваль і іх узаемнае ўзмацненне. Вуглы φ , якія задавальняюць умове (5,13), вызначаюць становішча максімумаў на экране.

Паколькі становішча максімумаў (акрамя цэнтральнага, якое адпавядае $k=0$) залежыць ад даўжыні хвалі, то рашотка раскладае святло ў спектр (рыс. IV, 1 на каляровай уклеіцы; спектры другога і трэцяга парадкаў перакрываюцца). Чым большае λ , тым далей размяшчаецца той ці іншы максімум, які адпавядае дадзенай даўжыні хвалі, ад цэнтральнага максімуму (рыс. IV, 2 і 3 на каляровай уклеіцы). Кожнаму значэнню k адпавядае свой спектр.

Паміж максімумамі размешчаны мінімумы асветленасці. Чым большы лік шчылін, тым больш рэзка акрэслены максімумы і тым больш шырокімі мінімумамі яны падзелены. Светлавая энергія, што падае на рашотку, пераразмяркоўваецца ёю так, што большая яе частка прыпадае на максімумы, а ў мінімумы трапляе нязначная частка энергіі.

З дапамогай дыфракцыйнай рашоткі можна рабіць вельмі дакладныя вымярэнні даўжыні хвалі. Калі перыяд рашоткі вядомы, то вызначэнне даўжыні хвалі зводзіцца да вымярэння вугла φ , які адпавядае напрамку на максімум.

Нашы вейкі з прамежкамі паміж імі ўяўляюць сабой дыфракцыйную рашотку. Таму калі паглядзець, прыжмурыўшыся, на яркую крыніцу святла, то можна выявіць радужныя колеры. Белае святло раскладаецца ў спектр пры дыфракцыі вакол вейкаў. Доўгаіграючая пласцінка з яе баразёнкамі, што праходзяць блізка адна ад адной, падобная да адбівальнай дыфракцыйнай рашоткі. Калі вы паглядзіце на адбітае ёю святло ад электрычнай лампачкі, то выявіце раскладанне святла ў спектр. Можна назіраць некалькі спектраў, адпавядаючых розным значэнням k . Карціна будзе вельмі выразнай, калі святло ад лампачкі падае на пласцінку пад вялікім вуглом.

Мноства вузкіх шчылін на невялікай адлегласці адна ад адной утварае цікавы аптычны прыбор — дыфракцыйную рашотку. Рашотка раскладае святло ў спектр і дазваляе вельмі дакладна вымяраць даўжыні светлавых хваль.

1. Ці залежыць становішча максімумаў асветленасці, якія ствараюцца дыфракцыйнай рашоткай, ад ліку шчылін? 2. Што вы ўбачыце, паглядзеўшы на электрычную лампачку скрозь пяро птушкі? 3. Чым адрозніваюцца спектры, якія дае прызма, ад дыфракцыйных спектраў?

§ 51. ПАПЯРОЧНАСЦЬ СВЕТАВЫХ ХВАЛЬ. ПАЛЯРЫЗАЦЫЯ СВЯТЛА

З'явы інтэрферэнцыі і дыфракцыі не пакідаюць сумненняў у тым, што святло, якое распаўсюджваецца, уладае ўласцівасцямі хваль. Але якіх хваль — падоўжных ці папярочных?

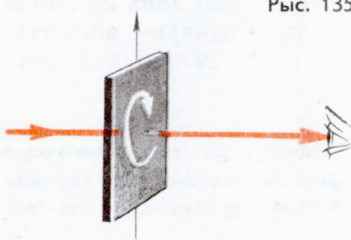
Доўгі час заснавальнікі хвалевай оптыкі Юнг і Фрэнель лічылі светлавая хвалі падоўжнымі, г. зн. падобнымі да гукавых хваль. У той час светлавая хвалі разглядаліся як пругкія хвалі ў эфіры, што запаўняе прастору і пранікае ўнутр усіх цел. Такія хвалі, здавалася, не маглі быць папярочнымі, паколькі папярочныя хвалі могуць існаваць толькі ў цвёрдым целе. Але як могуць цэлы рухацца ў цвёрдым эфіры, не сустракаючы супраціўлення? Эфір жа не павінен перашкаджаць руху цел. У процілеглым выпадку не выконваўся б закон інерцыі.

Аднак паступова набіралася ўсё больш і больш эксперыментальных фактаў, якія ніяк не ўдавалася растлумачыць, лічачы светлавая хвалі падоўжнымі.

Доследы з турмалінам. Разгледзім падрабязна толькі адзін з эксперыментаў, вельмі прасты і выключна эфектны. Гэта дослед з крышталямі турмаліну (празрыстымі крышталямі зялёнай афарбоўкі).

Крышталі турмаліну мае вось сіметрыі і належыць да ліку так званых аднавосевых крышталёў. Возьмем прамавугольную пласцінку турмаліну, выразаную такім чынам, каб адна з яе старон супала з воссю крышталю. Калі накіраваць нармальна на такую пласцінку пучок святла ад электрычнай лямпачкі або Сонца, то вярчэнне пласціны вакол пучка ніякага змянення інтэнсіўнасці святла, прайшоўшага праз яе, не выклікае (рыс. 135). Можна падумаць, што святло толькі часткова паглынулася ў турмаліне і набыло зеленаватую афарбоўку. Больш нічога не адбылося. Але гэта не так. Светлавая хваля набыла новыя ўласцівасці.

Гэтыя новыя ўласцівасці выяўляюцца, калі пучок прымусяць прайсці праз другі, зусім такі ж крышталі турмаліну (рыс. 136, а), паралельны першаму. Пры аднолькава накіраваных восях крышталёў зноў нічога цікавага не адбываецца: проста светлавая пучок яшчэ больш аслабляецца за кошт паглынання



Рыс. 135

ў другім крышталі. Але калі другі крышталі вярцець, пакідаючы першы нерухомым (рыс. 136, б), то выявіцца дзіўная з'ява — гашэнне святла. Па меры павелічэння вугла паміж восямі інтэнсіўнасць святла памяншаецца. І калі восі перпендыкулярныя адна адной, святло не праходзіць зусім (рыс. 136, в). Яно поўнасьцю

паглынаецца другім крышталём. Як гэта можна растлумачыць?

Папярочнасць светлавых хваль.

З апісаных вышэй доследаў вынікаюць два факты: *па-першае*, светлавая хваля, што ідзе ад крыніцы святла, поўнасю сіметрычная адносна напрамку распаўсюджвання (пры вярчэнні крышталя вакол праменя ў першым доследзе інтэнсіўнасць не мянялася), і, *па-другое*, што хваля, якая выйшла з першага крышталю, не ўладае восевай сіметрыяй (у залежнасці ад павароту другога крышталю адносна праменя атрымліваецца тая ці іншая інтэнсіўнасць прайшоўшага святла).

Падоўжныя хвалі ўладаюць поўнай сіметрыяй у адносінах да напрамку распаўсюджвання (ваганні адбываюцца ўздоўж гэтага напрамку, і ён з'яўляецца воссю сіметрыі хвалі). Таму растлумачыць дослед з вярчэннем другой пласцінкі, лічачы светлавую хвалю падоўжнай, немагчыма.

Поўнае тлумачэнне доследу можна атрымаць, зрабіўшы два дапушчэнні.

Першае дапушчэнне адносіцца да самога святла. Святло — папярочная хваля. Але ў падаючым ад звычайнай крыніцы пучку хваль прысутнічаюць ваганні розных напрамкаў, перпендыкулярных да напрамку распаўсюджвання хваль (рыс. 137).

Згодна з гэтым дапушчэннем светлавая хваля ўладае восевай сіметрыяй і з'яўляецца ў той жа час папярочнай. Хвалі, напрыклад, на паверхні вады такой сіметрыяй не ўладаюць, паколькі ваганні часцінак вады адбываюцца толькі ў вертыкальнай плоскасці.

Светлавая хваля з ваганнямі па ўсіх напрамках, перпендыкулярных да напрамку распаўсюджвання, называецца натуральнай. Такая назва апраўдана, паколькі ў звычайных умовах крыніцы святла ствараюць іменна такую хвалю. Дадзенае дапушчэнне тлумачыць вынік першага доследу. Вярчэнне крышталю турмаліну не мяняе інтэнсіўнасць прайшоўшага святла, паколькі падаючая хваля ўладае восевай сіметрыяй (нягледзячы на тое што яна папярочная).

Другое дапушчэнне, якое неабходна зрабіць, належыць да крышталю. Крышталю турмаліну ўладае здольнасцю прапускаць светлавую хвалі з ваганнямі, што ляжаць у адной пэўнай плоскасці (плоскасць *P* на рысунку 138). Такое святло называецца

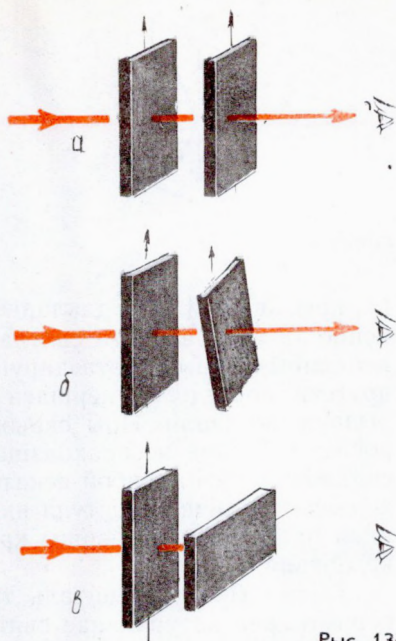


Рис. 136

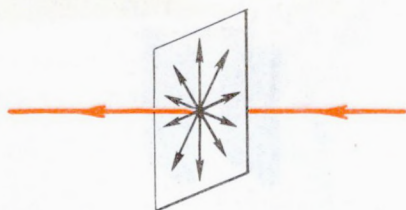


Рис. 137

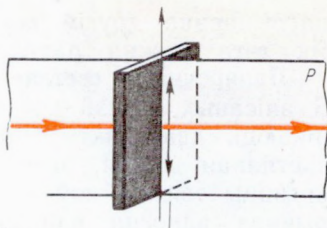


Рис. 138

палярызаваным або, дакладней, плоскапалярызаваным, у адрозненне ад натуральнага святла, якое можа быць названа таксама непаларызаваным. Гэта дапушчэнне поўнаасцю тлумачыць вынікі другога доследу. З першага крышталю выходзіць плоскапалярызаваная хваля. Пры скрыжаваных крышталюх (вугал паміж восямі 90°) яна не праходзіць скрозь другі крышталю. Калі восі складаюць паміж сабой некаторы вугал, адрозны ад 90° , то праходзяць ваганні, амплітуда якіх роўна праекцыі амплітуды хвалі, якая прайшла праз першы крышталю, на напрамак восі другога крышталю.

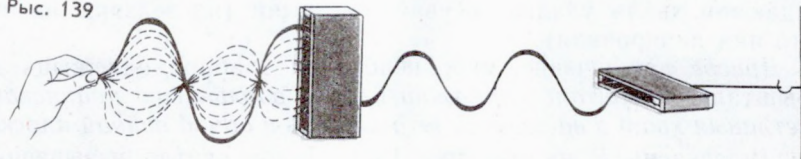
Такім чынам, крышталю турмаліну палярызуе святло, г. зн. пераўтварае натуральнае святло ў плоскапалярызаванае.

Механічная мадэль доследаў з турмалінам. Няцяжка пабудаваць простую наглядную механічную мадэль разглядаемай з'явы. Можна стварыць папярочную хвалю ў гумавым шнурку так, каб ваганні хутка мянялі свой напрамак у прасторы. Гэта аналаг натуральнай светлавой хвалі. Прапусцім цяпер шнур праз вузкую драўляную скрынку (рис. 139). З ваганняў розных напрамкаў скрынка «вылучае» ваганні ў адной пэўнай плоскасці. Таму са скрынкі выходзіць палярызаваная хваля.

Калі на яе шляху ёсць яшчэ адна зусім такая ж скрынка, але павернутая адносна першай на 90° , то ваганні праз яе не праходзяць. Хваля цалкам гасіцца.

Паляроіды. Не толькі крышталю турмаліну здольныя палярызаваць святло. Такой жа ўласцівасцю, напрыклад, уладаюць так званыя паляроіды. Паляроід уяўляе сабой тонкую ($0,1$ мм) плёнку крышталю герapatыту, нанесеную на цэлулоід або шкляную пласцінку. З паляроідам можна прарабіць тыя ж доследы, што і з крышталю турмаліну. Перавага паляроідаў у тым, што можна ствараць вялікія паверхні, якія палярызуюць святло.

Рис. 139



Да недахопаў паляроідаў належыць фіялетавае адценне, якое яны надаюць белаю святлу.

Прамымі доследамі даказана, што светлавая хваля з'яўляецца папярочнай. У палярызаванай светлавой хвалі ваганні адбываюцца ў пэўна вызначаным напрамку.

Чым адрозніваецца натуральнае святло ад палярызаванага?

§ 52. ПАПЯРОЧНАСЦЬ СВЕТАВЫХ ХВАЛЬ І ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ТЭОРЫЯ СВАТЛА

Электрамагнітная тэорыя сватла пачынаецца з работ Максвела. Максвел чыста тэарэтычна паказаў (гл. § 29) магчымасць існавання электрамагнітных хваль, а таксама знайшоў, што скорасць распаўсюджвання гэтых хваль у вакууме павінна быць роўна скорасці сватла, якая к таму часу ўжо была вядомая.

У аснове электрамагнітнай тэорыі сватла ляжыць факт супадзення скорасці сватла са скорасцю распаўсюджвання электрамагнітных хваль.

Акрамя таго, з тэорыі Максвела непасрэдна вынікае, што электрамагнітныя хвалі з'яўляюцца папярочнымі. К таму часу папярочнасць светлавых хваль ужо была даказана эксперыментальна. Таму Максвел абгрунтавана лічыў папярочнасць электрамагнітных хваль яшчэ адным важным доказам справядлівасці электрамагнітнай тэорыі сватла.

Пасля таго як Герц эксперыментальна атрымаў электрамагнітныя хвалі і вымераў іх скорасць, электрамагнітная тэорыя сватла атрымала першае эксперыментальнае пацверджанне. Было даказана, што электрамагнітныя хвалі пры сваім распаўсюджванні выяўляюць тыя ж уласцівасці, што і светлавая: адбіццё, праламленне, інтэрферэнцыю, палярызаванасць і інш. (гл. § 35). У канцы XIX ст. было канчаткова ўстаноўлена, што светлавая хвалі ўзбуджаюцца зараджанымі часціцамі, што рухаюцца ў атамах.

З прызнаннем электрамагнітнай тэорыі сватла паступова зніклі ўсе цяжкасці, звязаныя з неабходнасцю ўвядзення гіпатэтычнага асяроддзя — эфіру, які прыходзілася разглядаць як цвёрдае цела. Светлавая хвалі — гэта не механічныя хвалі ў асобым усёпранікальным асяроддзі — эфіры, а хвалі электрамагнітныя. Электрамагнітныя ж працэсы падпарадкоўваюцца не законам механікі, а сваім уласным законам. Гэтыя законы і былі ўстаноўлены ў канчатковай форме Максвелам.

У электрамагнітнай хвалі вектары $\vec{E}$ і $\vec{B}$ перпендыкулярныя адзін аднаму (гл. раздзел 4). У натуральным святле ваганні напружанасці электрычнага поля $\vec{E}$ і магнітнай індукцыі $\vec{B}$ адбы-

ваюцца па ўсіх напрамках, перпендыкулярных напрамку распаўсюджвання хвалі. Калі святло палярызавана, то ваганні як $\vec{E}$, так і $\vec{B}$ адбываюцца не па ўсіх напрамках, а ў дзвюх пэўных плоскасцях. Электрамагнітная хваля, паказаная на рысунку 65, з'яўляецца палярызаванай.

Узнікае натуральнае пытанне: калі ішла гаворка аб напрамку ваганняў у светлавой хвалі, то, уласна кажучы, ваганні якога вектара — $\vec{E}$ ці $\vec{B}$ — меліся на ўвазе? Спецыяльна пастаўленыя доследы даказалі, што на сятчатку вока або фотаэмульсію дзейнічае іменна электрычнае поле светлавой хвалі.

У сувязі з гэтым за напрамак ваганняў у светлавой хвалі прыняты напрамак вектара напружанасці $\vec{E}$ электрычнага поля.

Адкрыццё электрамагнітнай тэорыі святла — адно з нямногіх адкрыццяў, зробленых «на кончыку пярэ», г. зн. тэарэтычна. Але перакананасць у справядлівасці электрамагнітнай тэорыі стала ўсеагульнай пасля яе эксперыментальнага пацверджання.

ПРЫКЛАДЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ

1. У доследзе Юнга па дыфракцыі адлегласць паміж шчылінамі $d = 0,07$ мм, а адлегласць ад двойной шчыліны да экрана $D = 2$ м. Пры асвятленні прыбора зялёным святлом адлегласць паміж суседнімі светлымі дыфракцыйнымі палосамі аказалася роўнай $\Delta h = 16$ мм. Вызначце па гэтых даных даўжыню хвалі.

Рашэнне. У некаторым пункце C экрана (рыс. 140) будзе назірацца максімум асветленасці пры выкананні ўмовы

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

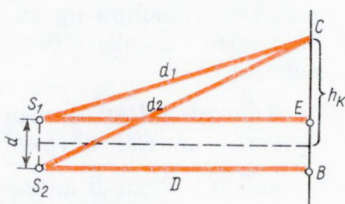
дзе $k = 0, 1, 2, \dots$ — цэлыя лікі.

Прыменім тэарэму Піфагора да трохвугольнікаў S_1CE і S_2CB :

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Рыс. 140



Аддымаючы пачленна з першай роўнасці другую, атрымаем:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d, \text{ або } (d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d.$$

Паколькі $d \ll D$, то $d_1 + d_2 \approx 2D$. Значыць,

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Улічваючы, што $d_2 - d_1 = k\lambda$, можам запісаць:

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Адсюль знаходзім адлегласць k -й светлавой паласы ад цэнтра экрану:

$$h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

Адлегласць паміж суседнімі палосамі роўна

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

Адсюль

$$\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

2. На дыфракцыйную рашотку, якая мае 500 штрыхоў на міліметр, падае плоская монахраматычная хваля ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см). Вызначце найбольшы парадок спектра k , які можна назіраць пры нармальным падзенні праменяў на рашотку.

Рашэнне. Максімальнаму k адпавядае $\sin \varphi = 1$ (гл. формулу 5.13). Значыць, $k = \frac{d}{\lambda} = 4$.

ПРАКТЫКАВАННЕ 6

1. Дзве кагерэнтныя крыніцы S_1 і S_2 выпраменьваюць святло з даўжынёй хвалі $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Крыніцы знаходзяцца адна ад адной на адлегласці $d = 0,3$ см. Экран размешчаны на адлегласці 9 м ад крыніцы. Што будзе назірацца ў пункце А экрана (рыс. 141): светлая пляма ці цёмная?

2. Нарысуйце прыкладную карціну інтэрферэнцыйных палос на мыльнай плёнцы, якая ўтварылася на трохвугольнай рамцы. Рамка з плёнкай размешчана вертыкальна (рыс. 142).

3. Павелічэнне адтуліны ў экране можа прывесці да памяншэння асветленасці на восі пучка. Як гэта ўзгадніць з законам захавання энергіі? Бо пры павелічэнні адтуліны за экран праходзіць больш энергіі.

4. На дыфракцыйную рашотку, якая мае перыяд $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ см, нармальна падае монахраматычная хваля. Ацаніце даўжыню хвалі λ , калі вугал паміж спектрамі другога і трэцяга парадку $\Delta \varphi = 2^\circ 30'$.

Рыс. 141



Рыс. 142



1. Скорасць святла ў вакууме вызначана эксперыментальна. Яна роўна прыблізна 300 000 км/с. Ва ўсіх асяроддзях скорасць святла меншая, чым у вакууме.

2. Праламленне святла на мяжы двух асяроддзяў абумоўлена змяненнем скорасці пры пераходзе святла з аднаго асяроддзя ў другое. Адносны паказчык праламлення двух асяроддзяў роўны адносіне скорасцей святла ў гэтых асяроддзях.

3. Паказчык праламлення святла, як упершыню ўстанавіў Ньютан, залежыць ад яго колеру. Колер жа святла вызначаецца частотой ваганняў (або даўжынёй светлавой хвалі). Залежнасць паказчыка праламлення святла ад частаты ваганняў называецца дысперсіяй. Дысперсія прыводзіць да таго, што прызма раскладае белае святло ў спектр. Скорасць святла і даўжыня хвалі памяншаюцца пры пераходзе з вакууму ў асяроддзе. Частата ваганняў застаецца нязменнай.

4. Светлавая хвалі аднолькавай даўжыні хвалі, якія маюць пастаянную рознасць фаз, называюцца кагерэнтнымі. Пры накладанні кагерэнтных хваль адна на адну назіраецца інтэрфэрэнцыя святла. Хвалі ўзмацняюць або аслабляюць адна адну ў залежнасці ад рознасці ходу паміж імі. Кагерэнтныя хвалі ўтвараюцца пры адбіцці светлавых хваль ад дзвюх паверхняў тонкай плёнкі. Паколькі рознасць фаз ваганняў інтэрфэруючых хваль залежыць не толькі ад таўшчыні плёнкі, але і ад даўжыні хвалі, то пры асвятленні плёнкі белым святлом утвараецца каляровая інтэрфэрэнцыйная карціна.

5. Светлавая хвалі агібаюць перашкоды, параўнальныя па размерах з даўжынёй светлавой хвалі. У гэтым заключаецца з'ява дыфракцыі святла. Паколькі даўжыня светлавой хвалі вельмі малая (парадку 10^{-5} см), то назіранне дыфракцыі святла становіцца цяжкім і патрабуе спецыяльных прыстасаванняў. Дыфракцыя святла накладвае мяжу на адрознівальную здольнасць мікраскопа і тэлескопа.

6. Законы геаметрычнай оптыкі выконваюцца прыбліжана пры ўмове, што размеры перашкод на шляху светлавых хваль многа большыя за даўжыню хвалі.

7. На з'яве дыфракцыі заснавана будова дыфракцыйнай рашоткі: сукупнасці вялікага ліку шчылін, падзеленых вузкімі прамежкамі. Значэнні вуглоў φ , якія вызначаюць напрамкі на дыфракцыйныя максімуы спектра, што атрымліваюцца пры дапамозе рашоткі, знаходзяць з роўнасці $d \sin \varphi = k\lambda$, дзе $k = 0, 1, 2, \dots$ — перыяд рашоткі.

Рашотка раскладае белае святло ў спектр, з яе дапамогай можна вымяраць даўжыні светлавых хваль.

8. Светлавая хвалі папярочныя. Гэта даказана эксперымен-

¹ Прапрабіце тое ж самае, што было рэкамендавана перад кароткімі вынікамі другіх раздзелаў. Лік істотных пунктаў вялікі, блізкі да 10.

тальна пры назіранні праходжання святла праз анізатропныя асяроддзі — крышталі. Светлавая хваля, у якой ваганні адбываюцца ў пэўнай плоскасці, называецца палярызаванай. Святло, ствараемае звычайнымі крыніцамі (натуральнае святло), не палярызавана. Ваганні ў светлавой хвалі адбываюцца па ўсіх напрамках у плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку яе распаўсюджвання.

9. Згодна з электрамагнітнай тэорыяй святла, прапанаванай Максвелам, святло ўяўляе сабой папярочную электрамагнітную хвалю. Доказ папярочнасці светлавых хваль з'явіўся важным этапам у прызнанні справядлівасці электрамагнітнай тэорыі святла.

Раздзел 6

ЭЛЕМЕНТЫ ТЭОРЫІ АДНОСНАСЦІ

Развіццё электрадынамікі прывяло да перагляду ўяўленняў аб прасторы і часе.

Згодна з класічнымі ўяўленнямі аб прасторы і часе, якія лічыліся непахіснымі на працягу стагоддзяў, рух не аказвае ніякага ўплыву на праходжанне часу (час абсалютны), а лінейныя размеры любога цела не залежаць ад таго, ці знаходзіцца цела ў стане спакою або рухаецца (даўжыня абсалютная).

Спецыяльная тэорыя адноснасці Эйнштэйна — гэта новае вучэнне аб прасторы і часе, якое прыйшло на змену старым (класічным) уяўленням.

§ 53. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРАДЫНАМІКІ І ПРЫНЦЫП АДНОСНАСЦІ

Пасля стварэння электрадынамікі ўзніклі сумненні ў справядлівасці прынцыпу адноснасці Галілея ў прымяненні да электрамагнітных з'яў.

Прынцып адноснасці ў механіцы і электрадынаміцы. Пасля таго як у другой палавіне XIX ст. Максвелам былі сфармуляваны асноўныя законы электрадынамікі, узнікла пытанне аб тым, ці распаўсюджваецца прынцып адноснасці, які правільны для механічных з'яў, і на электрамагнітныя з'явы. Іншымі словамі, ці праходзяць электрамагнітныя працэсы (узаемадзеянне зарадаў і токаў, распаўсюджванне электрамагнітных хваль і г. д.) аднолькава ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку? Ці, можа быць, раўнамерны прамалінейны рух, не ўплываючы на механічныя з'явы, аказвае некаторае ўздзеянне на электрамагнітныя працэсы?

Каб адказаць на гэта пытанне, трэба было высветліць, ці мяняюцца асноўныя законы электрадынамікі пры пераходзе ад

адной інерцыяльнай сістэмы да другой або, падобна да законаў Ньютана, яны застаюцца нязменнымі. Толькі ў апошнім выпадку можна адкінуць сумненні ў справядлівасці прынцыпу адноснасці прымяняльна да электрамагнітных працэсаў і разглядаць гэты прынцып як агульны закон прыроды.

Законы электрадынамікі складаныя, і строгае рашэнне гэтай задачы — нялёгкае справа. Аднак ужо простыя меркаванні, здавалася б, дазваляюць знайсці правільны адказ. Згодна з законам электрадынамікі скорасць распаўсюджвання электрамагнітных хваль у вакууме аднолькавая па ўсіх напрамках і роўна: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Але, з другога боку, у адпаведнасці з законам складання скорасцей механікі Ньютана скорасць можа быць роўна c толькі ў адной выбранай сістэме адліку. У любой іншай сістэме адліку, якая рухаецца ў адносінах да гэтай выбранай сістэмы

са скорасцю $\vec{v}$, скорасць святла будзе ўжо роўна $\vec{c} - \vec{v}$. Гэта азначае, што калі правільны звычайны закон складання скорасцей, то пры пераходзе ад адной інерцыяльнай сістэмы да другой законы электрадынамікі павінны мяняцца так, каб у гэтай новай сістэме адліку скорасць святла ўжо была роўна не $\vec{c}$, а $\vec{c} - \vec{v}$.

Такім чынам, выявіліся пэўныя супярэчнасці паміж электрадынамікай і механікай Ньютана, законы якой узгадняюцца з прынцыпам адноснасці. Узнікшыя цяжкасці спрабавалі пераадолець трыма рознымі спосабамі.

Першая магчымасць заключалася ў тым, каб аб'явіць неабгрунтаваным прынцып адноснасці ў прымяненні да электрамагнітных з'яў. На гэты пункт гледжання стаў вялікі галандскі фізік, заснавальнік электроннай тэорыі Г. Лорэнц. Электрамагнітныя з'явы яшчэ з часоў Фарадэя разглядаліся як працэсы ў асобым, усепранікальным асяроддзі, якое запаўняе ўсю прастору, — «сусветным эфіру». Інерцыяльная сістэма адліку, якая знаходзіцца ў спакоі адносна эфіру, — гэта, згодна з Лорэнцам, асобая пераважная сістэма. У ёй законы электрадынамікі Максвела справядлівыя і маюць найбольш простую форму. Толькі ў гэтай сістэме адліку скорасць святла ў вакууме аднолькавая па ўсіх напрамках.

Другая магчымасць заключаецца ў тым, каб лічыць няправільнымі ўраўненні Максвела і спрабаваць змяніць іх такім чынам, каб яны пры пераходзе ад адной інерцыяльнай сістэмы да другой (у адпаведнасці са звычайнымі, класічнымі ўяўленнямі аб прасторы і часе) не мяняліся. Такая спроба, у прыватнасці, была зроблена Г. Герцам. Згодна з Герцам, эфір поўнаасцю ўцягваецца цэламі, якія рухаюцца, і таму электрамагнітныя з'явы адбываюцца аднолькава, незалежна ад таго, знаходзіцца цэла ў спакоі ці рухаецца. Прынцып адноснасці справядлівы.

Нарэшце, *трэцяя магчымасць* вырашэння ўказаных цяжкасцей заключаецца ў адмаўленні ад класічных уяўленняў аб прастору і часе, з тым каб захаваць як прынцып адноснасці, так і законы Максвела. Гэта найбольш рэвалюцыйны шлях, бо ён азначае

перагляд самых глыбокіх, самых асноўных уяўленняў у фізіцы. З дадзенага пункту гледжання аказваюцца недакладнымі не ўраўненні электрамагнітнага поля, а законы механікі Ньютана, якія ўзгадняюцца са старымі ўяўленнямі аб прасторы і часе. Змяняць трэба законы механікі, а не законы электрадынамікі Максвела.

Адзіна правільнай аказалася іменна трэцяя магчымасць. Паслядоўна развіваючы яе, А. Эйнштэйн прыйшоў да новых уяўленняў аб прасторы і часе. Першыя два шляхі, як аказалася, абвяргаюцца эксперыментам.

Пры спробах Герца змяніць законы электрадынамікі Максвела высветлілася, што новыя ўраўненні не здольны растлумачыць рад фактаў, якія назіраюцца. Так, згодна з тэорыяй Герца, вада, што рухаецца, павінна поўнасцю ўцягваць за сабой святло, якое ў ёй распаўсюджваецца, паколькі яна ўцягвае эфір, у якім святло распаўсюджваецца. Дослед жа паказаў, што ў сапраўднасці гэта не так.

Пункт погляду Лорэнца, згодна з якім павінна існаваць выбраная сістэма адліку, звязаная з сусветным эфірам, што знаходзіцца ў абсалютным спакоі, таксама быў абвергнуты прамымі даследамі.

Калі б скорасць святла была роўна 300 000 км/с толькі ў сістэме адліку, звязанай з эфірам, то, вымяраючы скорасць святла ў адвольнай інерцыяльнай сістэме, можна было б выявіць рух гэтай сістэмы ў адносінах да эфіру і вызначыць скорасць гэтага руху. Падобна да таго як у сістэме адліку, якая рухаецца адносна паветра, узнікае вецер, пры руху ў адносінах да эфіру (калі, безумоўна, эфір існуе) павінен быць выяўлены «эфірны вецер». Дослед па выяўленню «эфірнага ветру» быў пастаўлены ў 1881 г. амерыканскімі вучонымі А. Майкельсанам і Э. Морлі па ідэі, выказанай за 12 год да гэтага Максвелем.

У гэтым даследзе параўноўвалася скорасць святла ў напрамку руху Зямлі і ў перпендыкулярным напрамку. Вымярэнні праводзіліся вельмі дакладна з дапамогай спецыяльнага прыбора — інтэрферометра Майкельсана. Эксперыменты ставіліся ў розны час сутак і розныя поры года. Але заўсёды атрымліваўся адмоўны вынік: рух Зямлі ў адносінах да эфіру выявіць не ўдавалася.

Усё гэта было падобна да таго, як калі б вы, высунуўшы галаву з акна машыны, пры скорасці 100 км/г не заўважылі сустрэчнага ветру.

Такім чынам, ідэя аб існаванні пераважнай сістэмы адліку не вытрымала доследнай праверкі. У сваю чаргу гэта азначала, што ніякага асобага асяроддзя — «святланоснага эфіру», — з якім можна было б звязаць такую пераважную сістэму адліку, не існуе.

Узгадніць прыныцп адноснасці з электрадынамікай Максвела аказалася магчымым, толькі адмовіўшыся ад класічных уяўленняў аб прасторы і часе.

У аснове тэорыі адноснасці ляжаць два пастулаты.

Для тлумачэння адмоўных вынікаў доследаў Майкельсана і іншых доследаў, якія павінны былі выявіць рух Зямлі адносна эфіру, уводзіліся розныя гіпотэзы. З дапамогай гэтых гіпотэз імкнуліся растлумачыць, чаму не ўдаецца выявіць пераважную сістэму адліку (лічылі, што такая сістэма ў сапраўднасці быццам бы ёсць).

Зусім па-іншаму падышоў да праблемы Эйнштэйн: не трэба вынаходзіць розныя гіпотэзы для тлумачэння адмоўных вынікаў усіх спроб выявіць адрозненне паміж інерцыяльнымі сістэмамі. Законам прыроды з'яўляецца поўнае раўнапраўе ўсіх інерцыяльных сістэм адліку ў адносінах не толькі да механічных, але і электрамагнітных працэсаў. Няма ніякай розніцы паміж станам спакою і раўнамернага прамалінейнага руху.

Прынцып адноснасці — галоўны пастулат тэорыі Эйнштэйна. Яго можна сфармуляваць так: **усе працэсы прыроды адбываюцца аднолькава ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку.**

Гэта азначае, што ва ўсіх інерцыяльных сістэмах фізічныя законы маюць аднолькавую форму. Такім чынам, прынцып адноснасці класічнай механікі абагульняецца на ўсе працэсы прыроды, у тым ліку і на электрамагнітныя.

Але тэорыя адноснасці грунтуецца не толькі на прынцыпе адноснасці. Ёсць яшчэ другі пастулат: **скорасць святла ў вакууме аднолькавая для ўсіх інерцыяльных сістэм адліку. Яна не залежыць ні ад скорасці крыніцы, ні ад скорасці прыёмніка светлагага сігнала.**

Скорасць святла займае, такім чынам, асобае становішча. Больш таго, як вынікае з пастулатаў тэорыі адноснасці, скорасць святла ў вакууме з'яўляецца максімальна магчымай скорасцю перадачы ўзаемадзеянняў у прыродзе.

Для таго каб адважыцца сфармуляваць пастулаты тэорыі адноснасці, патрэбна была вялікая навуковая смеласць, паколькі яны супярэчылі класічным уяўленням аб прастору і часе.

На самай справе, дапусцім, што ў момант часу, калі пачаткі каардынат інерцыяльных сістэм адліку K і K_1 , якія рухаюцца адна адносна адной са скорасцю $\vec{v}$, супадаюць, у пачатку каардынат адбываецца кароткачасовая ўспышка святла. За час t сістэмы зрушаюцца адна адносна адной на адлегласць vt , а сфэрычная хвалевае паверхня будзе мець радыус ct (рыс. 143). Сістэмы K і K_1 раўнапраўныя, і скорасць святла аднолькавая ў той і другой сістэме. Значыць, з пункту гледжання назіральні-

¹ Пастулат у фізічнай тэорыі адыгрывае тую ж ролю, што і аксіёма ў матэматыцы. Гэта — асноўнае палажэнне, якое не можа быць лагічна даказана. У фізіцы пастулат ёсць вынік абагульнення доследных фактаў.

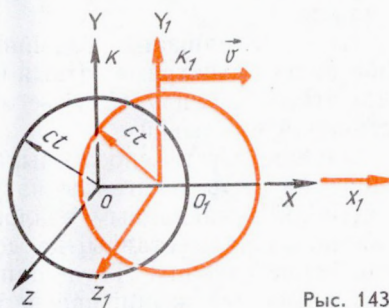
Эйнштэйн Альберт (1879—1955) — вялікі фізік XX ст. Ём створана новае вучэнне аб прасторы і часе — спецыяльная тэорыя адноснасці. Абагульняючы гэту тэорыю на выпадак неінэрцыяльных сістэм адліку, Эйнштэйн пабудаваў агульную тэорыю адноснасці, якая з'яўляецца сучаснай тэорыяй прыцягнення. Эйнштэйн упершыню ўвёў уяўленне аб часціцах святла — фатонах. Праца Эйнштэйна па тэорыі броўнаўскага руху прывяла да канчатковай перамогі малекулярна-кінетычнай тэорыі будовы рэчыва.



ка, які звязаны з сістэмай адліку K , цэнтр сферы будзе знаходзіцца ў пункце O , а з пункту гледжання назіральніка, які звязаны з сістэмай адліку K_1 , цэнтр сферы будзе знаходзіцца ў пункце O_1 . Але адна і тая ж сферычная паверхня не можа мець цэнтры ў O і O_1 . Гэта відавочная супярэчнасць вынікае з разважанняў, якія заснаваны на пастулатах тэорыі адноснасці.

Супярэчнасць тут сапраўды ёсць, але не ўнутры самой тэорыі адноснасці. Ёсць толькі супярэчнасць з класічнымі ўяўленнямі аб прасторы і часе, якія пры вялікіх скорасцях руху ўжо несправдлівыя.

Абодва пастулаты тэорыі адноснасці трэба запомніць. Не забывайце таксама азначэнне інэрцыяльнай сістэмы адліку: гэта такая сістэма, адносна якой свабодныя (г. зн. ні з чым не ўзаемадзейючыя) целы рухаюцца з пастаяннай скорасцю.



Рыс. 143

1. Якія сцверджанні ляжаць у аснове тэорыі адноснасці? 2. У чым адрозненне першага пастулата тэорыі адноснасці ад прынцыпу адноснасці ў механіцы?

§ 55. АДНОСНАСЦЬ АДНАЧАСОВАСЦІ

Да пачатку XX ст. ніхто не сумняваўся, што час абсалютны. Дзве падзеі, адначасовыя для жыхароў Зямлі, адначасовыя для жыхароў любой касмічнай цывілізацыі. Стварэнне тэорыі адноснасці паказала, што гэта не так.

Прычынай неабгрунтаванасці класічных уяўленняў аб прасторы і часе з'яўляецца няправільнае дапушчэнне аб магчымасці

імгненнай перадачы ўзаемадзеянняў і сігналаў з аднаго пункта прасторы ў другі. Існаванне межавай канечнай скорасці перадачы ўзаемадзеянняў выклікае неабходнасць глыбокага змянення звычайных уяўленняў аб прасторы і часе, якія заснаваны на штодзённым вопыце. Уяўленне аб абсалютным часе, які ідзе раз і назаўсёды зададзеным тэмпам, зусім незалежна ад матэрыі і яе руху, аказваецца няправільным.

Калі дапусціць імгненнае распаўсюджванне сігналаў, то сцверджанне, што падзеі ў двух прасторава падзеленых пунктах A і B адбыліся адначасова, будзе мець абсалютны сэнс. Можна змясціць у пункты A і B гадзіннікі і сінхранізаваць іх з дапамогай імгненнага сігналаў. Калі такі сігнал адпраўлены з A , напрыклад, у 0 г 45 мін і ён у гэты ж момант часу па гадзінніку B прыйшоў у пункт B , то, значыць, гадзіннікі паказваюць аднолькавы час, г. зн. ідуць сінхронна. Калі ж такога супадзення няма, то гадзіннікі можна сінхранізаваць, падвёўшы ўперад той гадзіннік, які паказвае меншы час у момант адпраўлення сігналаў.

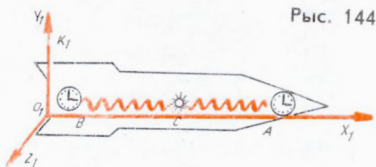
Любыя падзеі, напрыклад два ўдары маланкі, адначасовыя, калі яны адбываюцца пры аднолькавых паказаннях сінхранізаваных гадзіннікаў.

Толькі маючы сінхранізаваныя гадзіннікі ў пунктах A і B , можна меркаваць аб тым, ці адбыліся дзве якія-небудзь падзеі ў гэтых пунктах адначасова або не. Але як можна сінхранізаваць гадзіннікі, што знаходзяцца на некаторай адлегласці адзін ад аднаго, калі скорасць распаўсюджвання сігналаў не бесканечна вялікая?

Для сінхранізацыі гадзіннікаў натуральна ўжываць светлавую або наогул электрамагнітную сігналы, паколькі скорасць электрамагнітных хваль у вакууме з'яўляецца строга вызначанай, пастаяннай велічынёй.

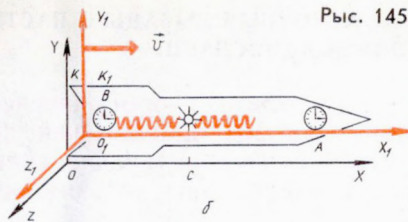
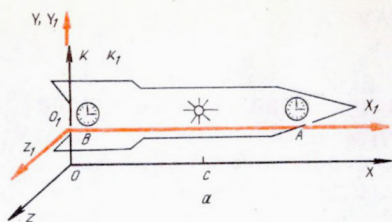
Менавіта гэты спосаб выкарыстоўваюць для праверкі гадзіннікаў па радыё. Сігналы часу дазваляюць сінхранізаваць ваш гадзіннік з дакладным эталонным гадзіннікам. Ведаючы адлегласць ад радыёстанцыі да дома, можна вылічыць папраўку на спазненне сігналаў. Гэта папраўка, зразумела, вельмі малая. У штодзённым жыцці яна не адыгрывае колькі-небудзь істотнай ролі. Але пры вялікіх касмічных адлегласцях яна можа аказацца вельмі істотнай.

Разгледзім больш падрабязна просты метад сінхранізацыі гадзіннікаў, які не патрабуе ніякіх вылічэнняў. Дапусцім, што касманаўт хоча даведацца, ці аднолькава ідуць гадзіннікі A і B ,



Рыс. 144

устаноўлены на процілеглых канцах касмічнага карабля (рыс. 144). Для гэтага з дапамогай крыніцы, нерухомай адносна карабля і размешчанай у яго сярэдзіне, касманаўт робіць успышку святла. Святло адначасова дасягае абодвух гадзіннікаў. Калі паказанні



гадзіннікаў у гэты момант аднолькавыя, то гадзіннікі ідуць сінхронна.

Але так будзе толькі адносна сістэмы адліку K_1 , звязанай з караблём. У сістэме ж адліку K , адносна якой карабель рухаецца, становішча іншае. Гадзіннік на носе карабля аддаляецца ад таго месца, дзе адбылася ўспышка святла крыніцы (пункт з каардынатай OC), і, каб дасягнуць гадзінніка A , святло павінна пераадолець адлегласць, большую за палавіну даўжыні карабля (рыс. 145, *а, б*). Наадварот, гадзіннік B на карме прыбліжаецца да месца ўспышкі, і шлях светлавога сігнала меншы за палавіну даўжыні карабля. (На рысунку 145, *а* каардынаты x і x_1 супадаюць у момант успышкі; на рысунку 145, *б* паказана становішча сістэм адліку, калі святло дасягае гадзінніка B .) Таму назіральнік у сістэме K прыйдзе да вываду, што сігналы дасягаюць абодвух гадзіннікаў неадначасова.

Дзве любыя падзеі ў пунктах A і B , адначасовыя ў сістэме K_1 , неадначасовыя ў сістэме K . Але з прычыны прынцыпу адноснасці сістэмы K_1 і K зусім раўнапраўныя. Ні адной з гэтых сістэм нельга аддаць перавагу. Таму мы вымушаны прыйсці да заключэння, што *адначасовасць прасторава падзеленых падзей адносная*. Прычынай адноснасці адначасовасці з'яўляецца, як мы бачым, канечнасць скорасці распаўсюджвання сігналаў.

Менавіта ў адноснасці адначасовасці заключаецца рашэнне парадокса са сферычнымі светлавымі сігналамі, аб якім ішла гаворка ў § 54. Святло адначасова дасягае пунктаў сферычнай паверхні з цэнтрам у пункце O толькі з пункту гледжання назіральніка, які знаходзіцца ў спакоі адносна сістэмы K . З пункту ж гледжання назіральніка, звязанага з сістэмай K_1 , святло дасягае гэтых пунктаў у розныя моманты часу.

Зразумела, справядліва і адваротнае: у сістэме K святло дасягае пунктаў паверхні сферы з цэнтрам у O_1 ў розныя моманты часу, а не адначасова, як гэта ўяўляецца назіральніку ў сістэме K_1 . Адсюль вынікае, што ніякага парадокса ў сапраўднасці няма.

Адначасовасць падзей адносная. Уявіць сабе гэта наглядна, «адчуць», мы не можам з-за таго, што скорасць святла ў многа разоў большая за тыя скорасці, з якімі рухаемся мы.



Якія падзеі называюцца адначасовымі?

З пастулатаў тэоры адноснасці вынікае рад важных вывадаў, якія датычаць уласцівасцей прасторы і часу. Мы не будзем спыняцца на параўнальна складаным абгрунтаванні гэтых вывадаў. Абмяжуемся толькі кароткім іх пералічэннем.

Адноснасць адлегласцей. Адлегласць не з'яўляецца абсалютнай велічынёй, а залежыць ад скорасці руху цела адносна дадзенай сістэмы адліку.

Абазначым праз l_0 даўжыню стрыжня ў сістэме адліку K , адносна якой стрыжань знаходзіцца ў стане спакою. Тады даўжыня l гэтага стрыжня ў сістэме адліку K_1 , адносна якой стрыжань рухаецца са скорасцю $\vec{v}$, вызначаецца формулай

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (6.1)$$

Як відаць з гэтай формулы, $l < l_0$. У гэтым заключаецца рэлятывісцкае скарачэнне размераў цел у сістэмах адліку, якія рухаюцца¹.

Адноснасць прамежкаў часу. Няхай інтэрвал часу паміж двума падзеямі, якія адбываюцца ў адным і тым жа пункце інерцыяльнай сістэмы K , роўны τ_0 . Гэтымі падзеямі, напрыклад, могуць быць два ўдары метранома, што адлічвае секунды.

Тады інтэрвал τ паміж гэтымі падзеямі ў сістэме адліку K_1 , якая рухаецца адносна сістэмы K са скорасцю $\vec{v}$, выражаецца так:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.2)$$

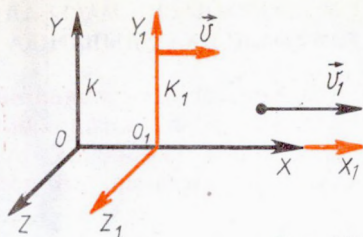
Відавочна, што $\tau > \tau_0$. У гэтым заключаецца рэлятывісцкі эффект запавольвання часу ў сістэмах адліку, якія рухаюцца.

Калі $v \ll c$, то ў формулах (6.1) і (6.2) можна не ўлічваць велічыню $\frac{v^2}{c^2}$. Тады $l \approx l_0$ і $\tau \approx \tau_0$, г. зн. рэлятывісцкае скарачэнне размераў цел і запавольванне часу ў сістэме адліку, якая рухаецца, можна не ўлічваць.

Рэлятывісцкі закон складання скорасцей. Новым рэлятывісцкім уяўленнем аб прасторы і часе адпавядае новы закон складання скорасцей. Відавочна, што класічны закон складання скорасцей не можа быць справядлівы, паколькі ён супярэчыць сцверджанню аб пастаянстве скорасці святла ў вакууме.

¹ Рэлятывісцкімі называюцца эфекты, што назіраюцца пры скорасцях руху, блізкіх да скорасці святла.

Калі поезд рухаецца са скорасцю $\vec{v}$ і ў вагоне ў напрамку руху поезда распаўсюджаецца светлавая хваля, то яе скорасць адносна Зямлі павінна быць роўна зноў жа c , а не $v + c$. Новы закон складання скорасцей і павінен прыводзіць да патрэбнага выніку.



Рыс. 146

Мы запішам закон складання скорасцей для прыватнага выпадку, калі цела рухаецца ўздоўж восі X_1 сістэмы адліку K_1 , якая ў сваю чаргу рухаецца са скорасцю $\vec{v}$ адносна сістэмы адліку K . Прычым у працэсе руху каардынатыныя восі X і X_1 увесь час супадаюць, а каардынатыныя восі Y і Y_1 , Z і Z_1 застаюцца паралельнымі (рыс. 146).

Абазначым скорасць цела адносна K_1 праз v_1 , а скорасць гэтага ж цела адносна K праз v_2 . Тады *рэлятывісцкі закон складання скорасцей* будзе мець выгляд:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \quad (6.3)$$

Калі $v \ll c$ і $v_1 \ll c$, то член $\frac{v_1 v}{c^2}$ у назоўніку можна не ўлічваць і замест (6.3) атрымаем класічны закон складання скорасцей: $v_2 = v_1 + v$.

Пры $v_1 = c$ скорасць v_2 таксама роўна c , як гэтага патрабуе другі пастулат тэорыі адноснасці. Сапраўды,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c.$$

Выдатнай уласцівасцю рэлятывісцкага закону складання скорасцей з'яўляецца тое, што пры любых скорасцях v_1 і v (вядома, не большых за c) рэзультуючая скорасць v_2 не перавышае c .

Рэлятывісцкі закон складання скорасцей справядлівы, але не наглядны. Уявіце сабе вялікую касмічную ракету, якая рухаецца адносна Зямлі са скорасцю, блізкай да скорасці святла c . З яе стартуе малая ракета і набывае скорасць, блізкую да c , адносна вялікай ракеты. Аднак скорасць малой ракеты адносна Зямлі акажацца амаль такой жа, як і вялікай.



1. Пры якіх скорасцях руху рэлятывісцкі закон складання скорасцей пераходзіць у класічны (закон Галілея)? 2. У чым заключаецца прынцыповае адрозненне скорасці святла ад скорасцей руху ўсіх цел?

§ 57. ЗАЛЕЖНАСЦЬ МАСЫ АД СКОРАСЦІ.
РЭЛЯТЫВІСЦКАЯ ДЫНАМІКА

З новымі прасторава-часавымі ўяўленнямі пры вялікіх скорасцях руху не ўзгадняюцца законы механікі Ньютана. Толькі пры малых скорасцях руху, калі справядлівымі з'яўляюцца класічныя ўяўленні аб прасторы і часе, другі закон Ньютана

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \quad (6.4)$$

не мяняе сваёй формы пры пераходзе ад адной інерцыяльнай сістэмы адліку да другой (выконваецца прынцып адноснасці). Але пры вялікіх скорасцях руху гэты закон у сваёй звычайнай (класічнай) форме несправядлівы.

Згодна з другім законам Ньютана (6.4) пастаянная сіла, якая дзейнічае на цела доўгі час, можа надаць цэлу неабмежавана вялікую скорасць. Але ў сапраўднасці скорасць святла ў вакууме з'яўляецца гранічнай, і ні пры якіх умовах цела не можа рухацца са скорасцю, якая перавышае скорасць святла ў вакууме. Патрабуецца зусім невялікае змяненне ўраўнення руху цел, каб гэта ўраўненне было правільным пры вялікіх скорасцях руху. Папярэдне прыйдзем да той формы запісу другога закону дынамікі, якой карыстаўся сам Ньютан:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \quad (6.5)$$

дзе $\vec{p} = m\vec{v}$ — імпульс цела. У гэтым ураўненні маса цела лічылася незалежнай ад скорасці.

Дзіўна, што пры вялікіх скорасцях руху ўраўненне (6.5) не мяняе сваёй формы. Змяненні датычацца толькі масы. *Пры павелічэнні скорасці цела яго маса не застаецца пастаяннай, а расце.*

Залежнасць масы ад скорасці можна знайсці, зыходзячы з меркавання, што закон захавання імпульсу справядлівы і пры новых уяўленнях аб прасторы і часе. Разлікі вельмі складаныя. Прывядзём толькі канечны рэзультат.

Калі праз m_0 абзначыць масу цела, якое знаходзіцца ў спакоі, то маса m таго ж цела, але якое рухаецца са скорасцю $\vec{v}$, вызначаецца формулай¹

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.6)$$

¹ У сучаснай тэарэтычнай фізіцы існуе тэндэнцыя называць масай толькі масу спакою m_0 , а паняцце рэлятывісцкай масы (6.6) не ўводзіць.

На рисунку 147 показана залежність маси ціла ад яго скорасці. З рисунка відаць, што ўзрастанне масы ціла тым большае, чым бліжэй скорасць руху ціла да скорасці святла c .

Пры скорасцях руху, многа меншых за скорасць святла, вы-

раз $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ надзвычай мала адрозніваецца ад адзінкі. Так, пры скорасці сучаснай касмічнай ракеты $v \approx 10$ км/с атрымліваем

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,99999999944.$$

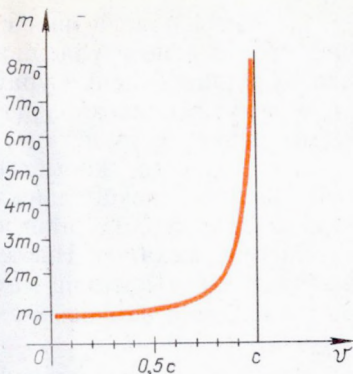


Рис. 147

Таму нядзіўна, што заўважыць павелічэнне масы з ростам скорасці пры такіх адносна невялікіх скорасцях руху немагчыма. Але элементарныя часціцы ў сучасных паскаральніках зараджаных часціц дасягаюць велізарных скорасцей. Калі скорасць часціцы толькі на 90 км/с меншая за скорасць святла, то яе маса павялічваецца ў 40 разоў. Магутныя паскаральнікі для электронаў здольны разганяць гэтыя часціцы да скорасцей, якія меншыя за скорасць святла толькі на 35—50 м/с. Пры гэтым маса электрона ўзрастае прыкладна ў 2000 разоў. Каб такі электрон утрымліваўся на кругавой арбіце, на яго з боку магнітнага поля павінна дзейнічаць сіла, у 2000 разоў большая, чым можна было б меркаваць, не ўлічваючы залежнасці масы ад скорасці. Для разліку траекторый хуткіх часціц карыстацца механікай Ньютана ўжо нельга.

З улікам суадносіны (6.6) імпульс ціла роўны

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.7)$$

Асноўны ж закон рэлятывісцкай дынамікі запісваецца ў рэальнай форме:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (6.8)$$

Аднак імпульс ціла тут вызначаецца формулай (6.7), а не проста здабыткам $m_0 v$.

Такім чынам, маса, якая лічылася з часоў Ньютана на працягу двух з палавінай стагоддзяў нязменнай, у сапраўднасці залежыць ад скорасці.

Па меры павелічэння скорасці руху маса цела, якая вызначае яго інертныя ўласцівасці, павялічваецца. Пры $v \rightarrow c$ маса цела ў адпаведнасці з ураўненнем (6.6) узрастае неабмежавана ($m \rightarrow \infty$); таму паскарэнне імкнецца да нуля і скорасць практычна перастае ўзрастаць, як бы доўга ні дзейнічала сіла.

Неабходнасць карыстацца рэлятывісцкім ураўненнем руху пры разліку паскаральнікаў зараджаных часціц азначае, што тэорыя адноснасці ў наш час стала інжынернай навукай.

Законы механікі Ньютана можна разглядаць як прыватны выпадак рэлятывісцкай механікі, які справядлівы пры скорасцях руху цёл, многа меншых за скорасць святла.

Рэлятывісцкае ўраўненне руху, якое ўлічвае залежнасць масы ад скорасці, ужываецца пры канструяванні паскаральнікаў элементарных часціц і іншых рэлятывісцкіх прыбораў.

?

1. Запішыце формулу залежнасці масы цела ад скорасці яго руху. 2. Пры якой умове можна масу цела лічыць не залежачай ад скорасці?

§ 58. СУВЯЗЬ ПАМІЖ МАСАЙ І ЭНЕРГІЯЙ

Пяройдзем цяпер да найважнейшага выніку тэорыі адноснасці, які адыгрывае адну з самых галоўных роляў у ядзернай фізіцы і фізіцы элементарных часціц. Размова пойдзе аб універсальнай сувязі паміж энергіяй і масай.

Сувязь паміж энергіяй і масай немінуча вынікае з закону захавання энергіі і таго факта, што маса цела залежыць ад скорасці яго руху. Гэта відаць на простым прыкладзе. Пры награванні газу ў сасудзе яму перадаецца пэўная энергія. Скорасць хаатычнага цеплавога руху малекул залежыць ад тэмпературы і павялічваецца з награваннем газу. Павелічэнне скорасці руху малекул згодна з формулай (6.6) азначае павелічэнне масы ўсіх малекул. Значыць, маса газу ў сасудзе павялічваецца пры павелічэнні яго ўнутранай энергіі. Паміж масай газу і яго энергіяй існуе сувязь.

Формула Эйнштэйна. З дапамогай тэорыі адноснасці Эйнштэйн устанавіў выдатную па сваёй прастаце і агульнасці формулу сувязі паміж энергіяй і масай:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.9)$$

Энергія цела або сістэмы цёл роўна масе, памножанай на квадрат скорасці святла.

Калі змяняецца энергія сістэмы, то змяняецца і яе маса:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (6.10)$$

Паколькі каэфіцыент $\frac{1}{c^2}$ вельмі малы, то прыметныя змяненні масы магчымы толькі пры вельмі вялікіх змяненнях энергіі. Пры хімічных рэакцыях або пры награванні цел у звычайных умовах змяненні энергіі настолькі малыя, што адпаведныя змяненні масы не ўдаецца выявіць на доследзе. Гарачы чайнік мае большую масу, чым халодны; але нават з дапамогай самых адчувальных вагаў гэта рознасць не будзе выяўлена. Толькі пры ператварэннях атамных ядзер і элементарных часціц змяненні энергіі аказваюцца настолькі вялікімі, што і звязанае з імі змяненне масы ўжо прыметнае.

Пры ўзрыве вадароднай бомбы вылучаецца вялікая энергія — каля 10^{17} Дж. Гэта энергія перавышае выпрацоўку электраэнергіі на ўсім зямным шары за некалькі дзён. Энергія, якая вылучаецца, уносіцца разам з выпраменьваннем.

Энергія спакою. Згодна з формулай (6.9) цела валодае энергіяй і пры скорасці, роўнай нулю. Гэта так званая *энергія спакою* E_0 :

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (6.11)$$

Гэта — выдатны вынік. *Любое цела ўжо толькі дзякуючы факту свайго існавання валодае энергіяй, якая прапарцыянальна масе спакою m_0 .*

Пры ператварэннях элементарных часціц, якія валодаюць масай спакою, у часціцы, у якіх $m_0 = 0$, энергія спакою цалкам ператвараецца ў кінетычную энергію часціц, што нанава ўтварыліся.

Гэты факт з'яўляецца найбольш відавочным эксперыментальным доказам існавання энергіі спакою.

У фізіцы вядомы толькі дзве «вялікія формулы», надзвычайна простыя і кароткія па форме і ўсёабдымныя па зместу. Адна з іх — формула Эйнштэйна $E = mc^2$. З другой формулай, формулай Планка, вы пазнаёміцеся ў квантавай фізіцы.

? 1. У чым заключаецца закон узаемасувязі масы і энергіі? 2. Што такое энергія спакою? 3. Чаму пры награванні цела не ўдаецца выявіць на доследзе павелічэнне яго масы?

ПРАКТЫКАВАННЕ 7

1. З пункту гледжання назіральніка, што знаходзіцца ў поездзе, які рухаецца, удары маланкі ў зямлю ў пункце А (перад поездам) і ў пункце В (за поездам) адбыліся адначасова. Якая маланка ўдарыла ў зямлю раней з пункту гледжання назіральніка, што знаходзіцца на зямлі?

2. Якая скорасць электрона, калі яго маса перавышае масу спакою ў 40 000 разоў?

3. Ваду масай 1 кг нагрэлі на 50 К. На колькі павялічваецца пры гэтым яе маса?

4. Ці можа электрон у якім-небудзь асяроддзі рухацца са скорасцю, якая перавышае скорасць святла ў дадзеным асяроддзі?

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 6¹

1. Спецыяльная тэорыя адноснасці Эйнштэйна засноўваецца на двух пастулатах.

Прынцып адноснасці — галоўны пастулат гэтай тэорыі. Ён гаворыць: усе працэсы прыроды працякаюць аднолькава ва ўсіх інерцыяльных сістэмах адліку.

2. Згодна з другім пастулатам скорасць святла ў вакууме аднолькавая для ўсіх інерцыяльных сістэм адліку. Яна не залежыць ні ад скорасці крыніцы, ні ад скорасці прыёмніка светлавога сігнала.

3. Тэорыя адноснасці ўяўляе сабой новае вучэнне аб прасторы і часе, якое прыйшло на змену старым, класічным уяўленням. Згодна з тэорыяй адноснасці адначасовасць падзей, адлегласці і прамежкі часу з'яўляюцца не абсалютнымі, а адноснымі. Яны залежаць ад сістэмы адліку.

4. З тэорыі адноснасці вынікае, што скорасць святла ў вакууме з'яўляецца максімальна магчымай скорасцю перадачы ўзаемадзеянняў у прыродзе.

5. Пры павелічэнні скорасці цела яго маса m не застаецца пастаяннай, а расце ў адпаведнасці з формулай

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

дзе m_0 — маса цела, якое знаходзіцца ў стане спакою. Рэлятывісцкі імпульс цела выражаецца формулай

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

З улікам гэтага выразу для імпульсу можна асноўны закон рэлятывісцкай дынамікі запісаць, як і другі закон Ньютана:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

6. Найважнейшым для ядзернай фізікі і фізікі элементарных часціц вынікам тэорыі адноснасці з'яўляецца вывад аб сувязі

¹ Прапрабце тое ж самае, што было рэкамендавана перад кароткімі вынікамі папярэдніх раздзелаў. Лік істотных пунктаў каля сямі.

паміж масай і энергіяй. Энергія E цела або сістэмы цел роўна масе, памножанай на квадрат скорасці святла:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Выраз $E_0 = m_0 c^2$ уяўляе сабой энергію спакою.

7. Пры скорасцях руху, якія намнога меншыя за скорасць святла, справядлівыя класічныя ўяўленні аб прасторы і часе і законы механікі Ньютана.

Раздзел 7

ВЫПРАМЕНЬВАННІ І СПЕКТРЫ

Да гэтага часу мы разглядалі распаўсюджванне светлавых хваль. Цяпер пазнаёмімся з выпраменьваннем святла целамі.

§ 59. ВІДЫ ВЫПРАМЕНЬВАННЯЎ. КРЫНІЦЫ СВЯТЛА

У VIII класе вас коратка пазнаёмілі з крыніцамі святла. Зараз мы можам не толькі пералічыць крыніцы, але і расказаць, на якіх фізічных прынцыпах грунтуецца іх дзеянне і якія віды выпраменьванняў яны ствараюць.

Крыніца святла павінна спажываць энергію. Святло — гэта электрамагнітныя хвалі з даўжынёй хвалі $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$ м. Электрамагнітныя хвалі выпраменьваюцца пры паскораным руху зараджаных часціц. Гэтыя зараджаныя часціцы ўваходзяць у склад атамаў, з якіх складаецца рэчыва. Але, не ведаючы, як пабудаваць атам, нічога пэўнага аб механізме выпраменьвання сказаць нельга. Зразумела толькі, што ўнутры атама няма святла, падобна да таго як у струне раяля няма гуку. Падобна да струны, якая пачынае гучаць толькі пасля ўдару малаточка, атамы нараджаюць святло толькі пасля іх узбуджэння.

Для таго каб атам пачаў выпраменьваць, яму неабходна перадаць пэўную энергію. Выпраменьваючы, атам траціць атрыманую энергію, і для бесперапыннага свячэння рэчыва неабходны прыток энергіі да яго атамаў звонку.

Цеплавое выпраменьванне. Найбольш просты і распаўсюджаны від выпраменьвання — гэта *цеплавое* выпраменьванне, пры якім страты атамамі энергіі на выпраменьванне святла кампенсуюцца за кошт энергіі цеплага руху атамаў (або малекул) цела, што выпраменьвае. Чым вышэйшая тэмпература цела, тым хутчэй рухаюцца атамы. Пры сутыкненні хуткіх атамаў (або малекул) адзін з адным частка іх кінетычнай энергіі ператвараецца ў энергію ўзбуджэння атамаў, якія потым спрамяняюць святло.



Вавілаў Сяргей Іванавіч (1891—1951) — савецкі фізік, дзяржаўны і грамадскі дзеяч, прэзідэнт АН СССР у 1945—1951 гг. Асноўныя навуковыя працы Вавілава прысвечаны фізічнай оптыцы, і ў першую чаргу фоталюмінесцэнцыі. Пад яго кіраўніцтвам была распрацавана тэхналогія вырабу лямп дзённага святла, развіт метада люмінесцэнтнага аналізу хімічнага саставу рэчываў. Пад кіраўніцтвам Вавілава П. А. Чаранкоў адкрыў у 1934 г. выпраменьванне святла электронамі, што рухаюцца ў асяроддзі са скорасцю, якая перавышае скорасць святла ў гэтым асяроддзі.

Цеплавой крыніцай выпраменьвання з’яўляецца Сонца, а таксама звычайная лямпачка напальвання. Лямпа вельмі зручная, але малаэканамічная крыніца. Толькі каля 12 % усёй энергіі, вылучаемай у ніці лямпачкі электрычным токам, пераўтвараецца ў светлавую энергію. Нарэшце, цеплавой крыніцай святла з’яўляецца полымя. Крупінікі сажы (часцінкі паліва, што не паспелі згарэць) напальваюцца за кошт энергіі, якая вылучылася пры згаранні паліва, і выпраменьваюць святло.

Электралюмінесцэнцыя. Энергія, неабходная атамам для выпраменьвання святла, можа запазычвацца і з нецеплавых крыніц. Пры разрадзе ў газах электрычнае поле надае электронам вялікую кінетычную энергію. Хуткія электроны зведваюць няпругкія саўдары з атамамі. Частка кінетычнай энергіі электронаў ідзе на ўзбуджэнне атамаў. Узбуджаныя атамы аддаюць энергію ў выглядзе светлавых хваль. Дзякуючы гэтаму разрад у газе суправаджаецца свячэннем. Гэта *электралюмінесцэнцыя*¹.

Паўночнае ззянне ёсць праяўленне электралюмінесцэнцыі. Патокі зараджаных часціц, якія выпраменьваюцца Сонцам, захопліваюцца магнітным полем Зямлі. Яны ўзбуджаюць у магнітных полюсах Зямлі атамы верхніх слаёў атмасферы, дзякуючы чаму гэтыя слаі свецяцца. Электралюмінесцэнцыя скарыстоўваецца ў трубках для рэкламных надпісаў.

Катодалюмінесцэнцыя. Свячэнне цвёрдых цел, якое выклікана бамбардзіроўкай іх электронамі, называюць *катодалюмінесцэнцыяй*. Дзякуючы катодалюмінесцэнцыі свецяцца экраны электронна-прамянёвых трубак тэлевізараў.

Хемілюмінесцэнцыя. Пры некаторых хімічных рэакцыях, якія адбываюцца з вылучэннем энергіі, частка гэтай энергіі непасрэдна трапіцца на выпраменьванне святла. Крыніца святла застаецца халоднай (яна мае тэмпературу навакольнага асяроддзя). Гэта з’ява называецца *хемілюмінесцэнцыяй*. Амаль кожны з вас, пэўна, знаёмы з ёй. Летам у лесе можна ноччу знайсці насякомае — светлячка. На целе ў яго «гарыць» маленькі зялёны «ліхтарык». Вы не апечаце пальцаў, злавіўшы светлячка.

¹ Лацінскае слова *люмінесцэнцыя* азначае «свачэнне».

Плямачка, якая свеціцца на спіncy светлячка, мае амаль тую ж тэмпературу, што і навакольнае паветра. Уласцівасць свяціцца маюць і іншыя жывыя арганізмы: бактэрыі, насякомыя, многія рыбы, якія жывуць на вялікай глыбіні. Часта свеціцца ў цемнаце кавалачкі гніючага дрэва.

Фоталюмінесцэнцыя. Светло, якое падае на рэчыва, часткова адбіваецца, а часткова паглынаецца. Энергія святла, якое паглынаецца, у большасці выпадкаў выклікае толькі награванне цел. Аднак некаторыя целы самі пачынаюць свяціцца непасрэдна пад дзеяннем выпраменьвання, якое падае на яго. Гэта і ёсць *фоталюмінесцэнцыя*. Светло ўзбуджае атамы рэчыва (павялічвае іх унутраную энергію), і пасля гэтага яны высвечваюцца самі. Напрыклад, фарбы, што свеціцца, якімі пакрываюць многія ёлачныя цацкі, выпраменьваюць светло пасля іх абпраменьвання.

Светло, якое выпраменьваецца пры фоталюмінесцэнцыі, мае, як правіла, большую даўжыню хвалі, чым светло, якое ўзбуджае свячэнне. Гэта можна назіраць эксперыментальна. Калі накіраваць на сасуд з флюарэсцэінам (арганічны фарбавальнік) светлавы пучок, які прапушчаны праз фіялетавае святлафільтр, то гэта вадкасць пачынае свяціцца зялёна-жоўтым святлом, г. зн. святлом большай даўжыні хвалі, чым у фіялетавага святла.

З'ява фоталюмінесцэнцыі шырока выкарыстоўваецца ў лямпах дзённага святла. Савецкі фізік С. І. Вавіла ў прапанаванай пакрываць унутраную паверхню разраднай трубкай рэчывамі, якія здольны ярка свяціцца пад дзеяннем караткахвалевага выпраменьвання газавага разраду. Лямпы дзённага святла прыкладна ў тры-чатыры разы больш эканамічныя, чым звычайныя лямпы напальвання.

Пералічаны асноўныя віды выпраменьванняў і крыніцы, якія іх ствараюць. Самыя распаўсюджаныя крыніцы выпраменьвання — цеплавыя.

? 1. Якія крыніцы святла вы ведаеце? 2. Якія віды выпраменьванняў дзейнічалі на вас за мінулыя суткі?

§ 60. СПЕКТРЫ І СПЕКТРАЛЬНЫЯ АПАРАТЫ

Раскажам аб тым, як даследуюцца выпраменьванні розных крыніц.

Размеркаванне энергіі ў спектры. Ні адна з крыніц не дае *монахраматычнага святла*, г. зн. святла строга пэўнай даўжыні хвалі. У гэтым нас пераконваюць доследы па раскладанні святла ў спектр з дапамогай прызмы, а таксама доследы па інтэрфэрэнцыі і дыфракцыі.

Тая энергія, якую нясе з сабой светло ад крыніцы, пэўным чынам размеркавана па хвалях усіх даўжынь, якія ўваходзяць

у састаў светлавога пучка. Можна таксама сказаць, што энергія размеркавана па частотах, паколькі паміж даўжынёй хвалі і частотой існуе простая сувязь:

$$\lambda\nu = c.$$

Шчыльнасць патоку электрамагнітнага выпраменьвання, або інтэнсіўнасць $I = \frac{\Delta W}{\Delta t}$, аб якой гаварылася ў § 31, вызначаецца энергіяй ΔW , якая прыходзіцца на ўсе частоты. Для характарыстыкі размеркавання выпраменьвання па частотах трэба ўвесці новую велічыню: *інтэнсіўнасць, якая прыпадае на адзінкавы інтэрвал частот*. Гэту велічыню называюць *спектральнай шчыльнасцю інтэнсіўнасці выпраменьвання*. Абазначым яе праз $I(\nu)$. Тады інтэнсіўнасць выпраменьвання, якое прыпадае на невялікі спектральны інтэрвал $\Delta\nu$, роўна $I(\nu)\Delta\nu$. Падсумаваўшы падобныя выразы па ўсіх частотах спектра, мы атрымаем шчыльнасць патоку выпраменьвання I .

Спектральную шчыльнасць патоку выпраменьвання можна знайсці эксперыментальна. Для гэтага трэба з дапамогай прызмы атрымаць спектр выпраменьвання, напрыклад электрычнай дугі, і вымераць шчыльнасць патоку выпраменьвання, які прыходзіцца на невялікія спектральныя інтэрвалы шырынёй $\Delta\nu$.

Давярацца вачам пры ацэнцы (нават прыблізнай) размеркавання энергіі нельга. Вока ўладае выбіральнай адчувальнасцю да святла: максімум яго адчувальнасці ляжыць у жоўта-зялёнай вобласці спектра. Лепш за ўсё выкарыстаць уласцівасць вельмі чорнага цела, якое амаль поўнасцю паглынае святло ўсіх даўжын хвалі. Пры гэтым энергія выпраменьвання (г. зн. святла) выклікае награванне цела. Таму дастаткова вымераць тэмпературу цела і па ёй меркаваць аб колькасці паглынутай за адзінку часу энергіі.

Звычайны тэрмометр мае вельмі малую адчувальнасць для таго, каб яго можна было з поспехам выкарыстоўваць у такіх доследах. Патрэбны больш адчувальныя прыборы для вымярэння тэмпературы. Можна ўзяць электрычны тэрмометр супраціўлення, у якім адчувальны элемент зроблены ў выглядзе тонкай металічнай пласціны (гл. падручнік фізікі для X класа). Гэту пласціну трэба пакрыць тонкім слоём сажа, якая амаль поўнасцю паглынае святло любой даўжыні хвалі.

Адчувальную да награвання пласціну прыбора трэба змясціць у тое ці іншае месца спектра (рыс. 148). Усяму бачнаму спектру даўжынёй l ад чырвоных праменяў да фіялетавых адпавядае інтэрвал частот ад ν_c да ν_ϕ . Шырыні ж Δl чорнай пласціны адпавядае малы інтэрвал $\Delta\nu$. Па награванню чорнай пласціны прыбора можна меркаваць аб шчыльнасці патоку выпраменьвання, які прыходзіцца на інтэрвал частот $\Delta\nu$. Перамяшчаючы пласціну ўздоўж спектра, мы заўважым, што большая частка энергіі прыпадае на чырвоную частку спектра, а не на жоўта-зялёную, як гэта здаецца на вока.

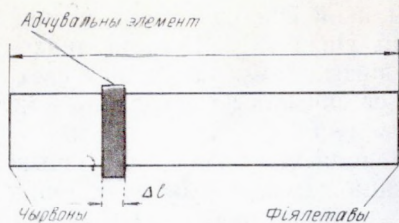


Рис. 148

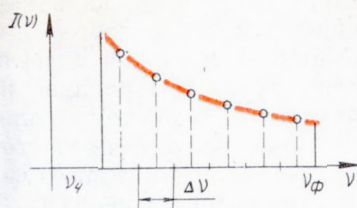


Рис. 149

Па выніках гэтых доследаў можна пабудавать кривую залежнасці спектральнай шчыльнасці выпраменьвання ад частаты. Спектральная шчыльнасць інтэнсіўнасці выпраменьвання вызначаецца па тэмпературы пласціны, а частату няцяжка знайсці, калі прыбор, які выкарыстоўваецца для раскладання святла, праградуіраваны, г. зн. калі вядома, якой частаце адпавядае дадзены ўчастак спектра.

Адкладваючы па восі абсцыс значэнні частот, адпавядаючых сярэдзінам інтэрвалаў $\Delta\nu$, а па восі ардынат спектральную шчыльнасць інтэнсіўнасці выпраменьвання, мы атрымаем рад пунктаў, праз якія можна правесці плаўную кривую (рис. 149). Гэта кривая дае нагляднае ўяўленне аб размеркаванні энергіі ў бачнай частцы электрычнай дугі.

Спектральныя апараты. Для дакладнага даследавання спектраў такія простыя прыстасаванні, як вузкая шчыліна, якая абмяжоўвае светлавы пучок, і прызма, ужо недастатковыя. Неабходны прыборы, што даюць выразны спектр, г. зн. прыборы, якія добра падзяляюць хвалі рознай даўжыні і не дапускаюць (або амаль не дапускаюць) перакрыцця асобных участкаў спектра. Такія прыборы носяць назву спектральных апаратаў. Часцей за ўсё асноўнай часткай спектральнага апарата з'яўляецца прызма або дыфракцыйная рашотка.

Разгледзім схему будовы прызеннага спектральнага апарата (рис. 150). Выпраменьванне, якое даследуецца, паступае спачатку ў частку прыбора, які называецца *каліматарам*. Каліма-

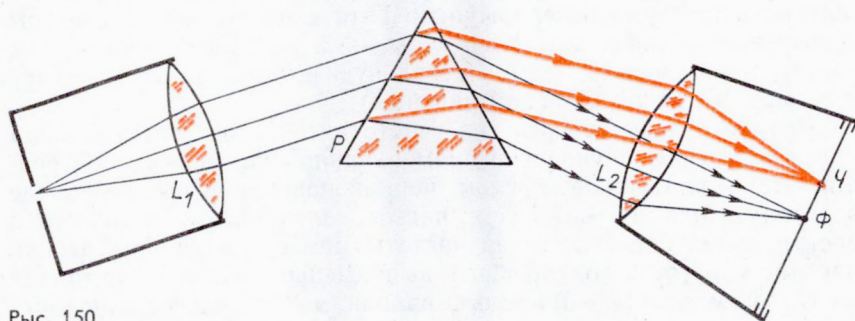


Рис. 150

тар — гэта труба, на адным канцы якой ёсць шырма з вузкай шчылінай, а на другім — збіраючая лінза L_1 . Шчыліна знаходзіцца на фокуснай адлегласці ад лінзы. Таму разыходны светлавы пучок, які пападае на лінзу са шчыліны, выходзіць з яе паралельным пучком і падае на прызму P .

Паколькі розным частотам адпавядаюць розныя паказчыкі праламлення, то з прызмы выходзяць паралельныя пучкі, якія не супадаюць па напрамку. Яны падаюць на лінзу L_2 . На фокуснай адлегласці гэтай лінзы знаходзіцца экран — матавае шкло або фотапласцінка. Лінза L_2 факсіруе паралельныя пучкі прамеяў на экране, і замест аднаго відарыса шчыліны атрымліваецца цэлы рад відарысаў. Кожнай частаце (дакладней, вузкаму спектральнаму інтэрвалу) адпавядае свой відарыс. Усе гэтыя відарысы разам і ўтвараюць спектр.

Апісаны прыбор называецца *спектрографам*. Калі замест другой лінзы і экрана выкарыстоўваецца глядзельная труба для візуальнага назірання спектраў, то прыбор называецца *спектраскопам*. Прызмы і іншыя дэталі спектральных апаратаў неабавязкова робяцца са шкла. Замест шкла выкарыстоўваюцца і такія празрыстыя матэрыялы, як кварц, каменная соль і інш.

Вы пазнаёміліся з новай велічынёй — спектральнай шчыльнасцю інтэнсіўнасці выпраменьвання. Даведаліся, што знаходзіцца ўнутры кожнага спектральнага апарата.

? 1. Апішыце, як павінен быць пабудаваны спектральны апарат, у якім замест прызмы прымяняецца дыфракцыйная рашотка. 2. Для чаго даследуецца спектральны састаў выпраменьванняў? (Калі не можаце здагадацца, то даведаецеся з наступных параграфіў.)

§ 61. ВИДЫ СПЕКТРАЎ

Спектральны састаў выпраменьвання рэчываў вельмі разнастайны. Але, нягледзячы на гэта, усе спектры, як паказвае практыка, можна падзяліць на тры тыпы.

Неперарыўныя спектры. Сонечны спектр або спектр дугаваго ліхтара з'яўляецца неперарыўным. Гэта азначае, што ў спектры ёсць усе даўжыні хваль. У спектры няма разрываў, і на экране спектрографа можна бачыць суцэльную рознакаляровую паласу (гл. рыс. V, 1 на каляровай уклеіцы).

Размеркаванне энергіі па частотах, г. зн. спектральная шчыльнасць інтэнсіўнасці выпраменьвання, для розных цел розная. Напрыклад, цела з вельмі чорнай паверхняй выпраменьвае электрамагнітныя хвалі ўсіх частот, але крывая залежнасці спектральнай шчыльнасці ад частаты мае максімум пры пэўнай частаце $\nu_{\max}$ (рыс. 151). Энергія выпраменьвання, якая прыпадае на вельмі малыя ($\nu \rightarrow 0$) і вельмі вялікія ($\nu \rightarrow \infty$) частоты, неабме-

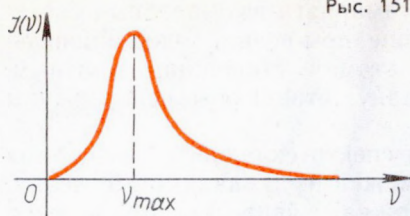


Рис. 151

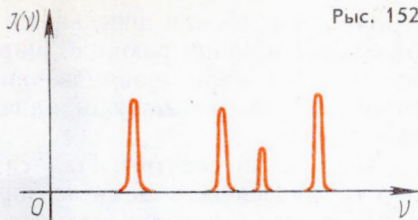


Рис. 152

жавана мала. При підвищенні температури максимум спектральної щільності випромінювання зрушає в бік коротких хвиль.

Неперарийні (або суцільні) спектри, як показує дослід, дають цілі, які знаходяться у твердому або рідкому стані, а також у щільних газах. Для отримання неперарийного спектра треба нагріти цілу до високої температури.

Характер неперарийного спектра і сам факт його існування визначаються не тільки властивостями особливих випромінюючих атомів, але і у вигляді ступені залежності від взаємодії атомів один з одним.

Неперарийний спектр дає також високотемпературна плазма. Електромагнітні хвилі випромінює плазма у атомів при стикненні електронів з іонами.

Лінійчасті спектри. Уявимо у блідому полум'язі газу гарячі кавалачки азбесту, змочаного розчином звичайної кухонної солі. При назіранні полум'язі у спектроскопі на фоні ледь розпознавального неперарийного спектра полум'язі утворюють ярку жовту лінію (рис. V, 2 на калієвій укладці). Цю жовту лінію дає пара натрію, яка утворюється при розщепленні молекул кухонної солі у полум'язі. На калієвій укладці показані також спектри вадороду і гелію. Кожна з них — це частота калієвих ліній різної яркості, поділених широкими темними смугами. Такі спектри називаються *лінійчастими*. Наявність лінійчастого спектра означає, що речовина випромінює світло тільки зусім певних довжин хвиль (дакладней, у певних вельми вузьких спектральних інтервалах). На рисунку 152 ви бачите прикладне розмірковання спектральної щільності інтенсивності випромінювання у лінійчастому спектрі. Кожна лінія має певну ширину.

Лінійчасті спектри дають усе речовини у газоподібному атомарному (але не молекулярному) стані. У цьому випадку світло випромінюють атоми, які практично не взаємодіють один з одним. Це самі фундаментальні, атомні типи спектрів.

Ізольовані атоми випромінюють строго певні довжини хвиль.

Звичайно для назірання лінійчастих спектрів використовують світіння пари речовини у полум'язі або світіння газу в разі розряду у трубці, що наповнена газом, які досліджують.

Пры павелічэнні шчыльнасці атамарнага газу асобныя спектральныя лініі пашыраюцца і, нарэшце, пры вельмі вялікай шчыльнасці газу, калі ўзаемадзеянне атамаў становіцца істотным, гэтыя лініі перакрываюць адна адну, утвараючы непарарыўны спектр.

Паласатыя спектры. Паласаты спектр складаецца з асобных палос, падзеленых цёмнымі прамежкамі. З дапамогай вельмі добрага спектральнага апарата можна заўважыць, што кожная паласа з'яўляецца сукупнасцю вялікага ліку вельмі цесна размешчаных ліній. У адрозненне ад лінейчастых спектраў паласатыя спектры ўтвараюцца не атамамі, а малекуламі, якія не звязаны або слаба звязаны адна з адной.

Для назірання малекулярных спектраў гэтак жа, як і для назірання лінейчастых спектраў, звычайна скарыстоўваюць свячэнне пары ў полымі або свячэнне газавага разраду.

Спектры паглынання. Усе рэчывы, атамы якіх знаходзяцца ва ўзбуджаным стане, выпраменьваюць светлавую хвалі, энергія якіх пэўным чынам размеркавана па даўжынях хваль. Паглыннанне святла рэчывам таксама залежыць ад даўжыні хвалі. Так, чырвонае шкло прапускае хвалі, якія адпавядаюць чырвонаму святлу ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), і паглынае ўсе астатнія.

Калі прапускаць белае святло скрозь халодны, невыпраменьваючы газ, то на фоне непарарыўнага спектра крыніцы з'яўляюцца цёмныя лініі (рыс. V, 5—8 на каляровай уклейцы). *Газ паглынае найбольш інтэнсіўна святло якраз тых даўжынь хваль, якія ён выпраменьвае ў моцна нагрэтым стане.* Цёмныя лініі на фоне непарарыўнага спектра — гэта лініі паглынання, якія ўтвараюць у сукупнасці *спектр паглынання*.

Існуюць непарарыўныя, лінейчастыя і паласатыя спектры выпраменьвання і столькі ж відаў спектраў паглынання.

❗ 1. Ці з'яўляецца спектр лампачкі паглынання непарарыўным? 2. У чым заключаецца галоўнае адрозненне лінейчастых спектраў ад непарарыўных і паласатых?

§ 62. СПЕКТРАЛЬНЫ АНАЛІЗ

Лінейчастыя спектры адыгрываюць асобна важную ролю, таму што іх структура праме звязана з будовай атама. Гэтыя ж спектры ўтвараюцца атамамі, якія не знаходзяцца пад знешнімі ўздзеяннямі. Таму, знаёмячыся з лінейчастымі спектрамі, мы тым самым робім першы крок да вывучэння будовы атамаў. Назіраючы гэтыя спектры, вучоныя атрымалі магчымасць «зазірнуць» унутр атама. Тут опытка ўшчыльную падыходзіць да атамнай фізікі.

Галоўная ўласцівасць лінейчастых спектраў заключаецца ў тым, што *даўжыні хваль (або частоты) лінейчастага спектра*

якога-небудзь рэчыва залежаць толькі ад уласцівасцей атамаў гэтага рэчыва, але зусім не залежаць ад спосабу ўзбуджэння свячэння атамаў. Атамы любога хімічнага элемента даюць спектр, не падобны на спектры ўсіх іншых элементаў: яны здольны спрамяняць строга пэўны набор даўжынь хваль.

На гэтым заснаваны *спектральны аналіз* — метада вызначэння хімічнага саставу рэчыва па яго спектру. Падобна да адбіткаў пальцаў у людзей, лінейчастыя спектры маюць непаўторную індывідуальнасць. Непаўторнасць узораў на скуры пальца дапамагае часта знайсці злачынца. Дакладна гэтак жа індывідуальнасць спектра дае магчымасць вызначыць хімічны састаў цела. З дапамогай спектральнага аналізу можна выявіць дадзены элемент у складаным рэчыве, калі нават яго маса не перавышае 10^{-10} г. Гэта вельмі адчувальны метада.

Колькасны аналіз саставу рэчыва па яго спектру цяжкаваты, паколькі яркасць спектральных ліній залежыць не толькі ад масы рэчыва, але і ад спосабу ўзбуджэння свячэння. Так, пры нізкіх тэмпературах многія спектральныя лініі наогул не з'яўляюцца. Аднак пры выконванні стандартных умоў узбуджэння свячэння можна праводзіць і колькасны спектральны аналіз.

У цяперашні час вызначаны спектры ўсіх атамаў і складзены табліцы спектраў. З дапамогай спектральнага аналізу былі адкрыты многія новыя элементы: рубідый, цэзій і інш. Элементам часта давалі назвы ў адпаведнасці з колерам найбольш інтэнсіўных ліній спектра. Рубідый дае цёмна-чырвоныя, рубінавыя лініі. Слова *цэзій* азначае «нябесна-блакітны». Гэта колер асноўных ліній спектра цэзію.

Іменна з дапамогай спектральнага аналізу даведаліся пра хімічны састаў Сонца і зорак. Іншыя метады аналізу тут зусім немагчымыя. Выявілася, што зоркі складаюцца з тых жа самых хімічных элементаў, якія ёсць і на Зямлі. Цікава, што гелій першапачаткова адкрылі на Сонцы і толькі затым знайшлі ў атмасферы Зямлі. Назва гэтага элемента напамінае аб гісторыі яго адкрыцця: слова *гелій* азначае ў перакладзе «сонечны».

Дзякуючы параўнальнай прастаце і універсальнасці спектральнага аналізу з'яўляецца асноўным метадам кантролю за саставам рэчыва ў металургіі, машынабудаванні, атамнай індустрыі. З дапамогай спектральнага аналізу вызначаюць хімічны састаў руд і мінералаў.

Састаў складаных, галоўным чынам арганічных, сумесей аналізуецца па іх малекулярных спектрах.

Спектральны аналіз можна рабіць не толькі па спектрах выпраменьвання, але і па спектрах паглынання. Іменна лініі паглынання ў спектры Сонца і зорак дазваляюць даследаваць хімічны састаў гэтых нябесных цел. Паверхня Сонца, якая ярка свеціцца — фотасфера — дае непарарывны спектр. Сонечная атмасфера паглынае выбіральна святло ад фотасферы, што прыводзіць да з'яўлення ліній паглынання на фоне непарарывнага спектра фотасферы.

Але і сама атмосфера Сонца выпраменьвае святло. У час сонечных зацьменняў, калі сонечны дыск закрыты Месяцам, адбываецца «абарачэнне» ліній спектра. На месцы ліній паглынання ў сонечным спектры ўспыхваюць лініі выпраменьвання.

У астрафізіцы пад спектральным аналізам разумеюць не толькі азначэнне хімічнага саставу зорак, газавых воблакаў і г. д., але і знаходжанне па спектрах многіх іншых фізічных характарыстык гэтых аб'ектаў: тэмпературы, ціску, скорасці руху, магнітнай індукцыі.

Важна ведаць, з чаго складаюцца навакольныя целы. Прыдумана многа спосабаў вызначаць іх састаў. Але састаў зорак і галактык можна пазнаць толькі з дапамогай спектральнага аналізу.

1. Якія аперацыі трэба прарабіць з крупінкай рэчыва, каб даведацца пра яе хімічны састаў пры дапамозе спектральнага аналізу? 2. Што вызначаецца па лініях паглынання ў сонечным спектры: састаў атмасферы Сонца або састаў яго глыбінных слаёў?

§ 63. ІНФРАЧЫРВОНАЕ І УЛЬТРАФІЯЛЕТАВАЕ ВЫПРАМЕНЬВАННІ

Бачнае выпраменьванне (святло) далёка не вычэрпвае магчымых відаў выпраменьванняў. З бачным выпраменьваннем суседнічае інфрачырвонае і ультрафіялетавае.

Інфрачырвонае выпраменьванне. Вернемся да доследу па даследаванню размеркавання энергіі ў спектры электрычнай дугі, які апісаны ў § 60. Пры перамяшчэнні чорнай пласціны — адчувальнага элемента прыбора — да чырвонага канца спектра выяўляецца павелічэнне тэмпературы. Калі зрушыць пласціну за чырвоны канец спектра, дзе вока ўжо не бачыць святла, то награванне пласціны акажацца яшчэ большым. Электрамагнітныя хвалі, якія выклікаюць гэта награванне, называюцца *інфрачырвонымі*. Іх выпраменьвае любое нагрэтае цела нават у тым выпадку, калі яно не свеціцца. Напрыклад, напаленая печ або батарэі ацяплення ў кватэры выпраменьваюць інфрачырвоныя хвалі, якія выклікаюць прыметнае награванне навакольных цел. Таму інфрачырвоныя хвалі часта называюць *цёплавымі*.

Не ўспрымальныя вачамі інфрачырвоныя хвалі маюць даўжыні, якія перавышаюць даўжыню хвалі чырвонага святла. Максімум энергіі выпраменьвання электрычнай дугі і лямпачкі напальвання прыпадае на інфрачырвоныя прамені.

Інфрачырвонае выпраменьванне прымяняюць для сушэння лакафарбавых пакрыццяў, агародніны, садавіны і г. д. Створаны прыборы, у якіх нябачны вокам інфрачырвоны відарыс аб'екта ператвараецца ў бачны. Вырабляюцца біноклі і аптычныя прыцэлы, якія дазваляюць бачыць у цемнаце.

Ультрафіялетавае выпраменьванне. За фіялетавым канцом спектра прыбор таксама выявіць павышэнне тэмпературы, але, праўда, вельмі нязначнае. Значыць, існуюць электрамагнітныя хвалі з даўжынёй хвалі меншай, чым у фіялетавага святла. Яны называюцца *ультрафіялетавамі*.

Выявіць ультрафіялетавае выпраменьванне можна з дапамогай экрана, які пакрыты люмінесцыруючым рэчывам. Экран пачынае святціцца ў той частцы, на якую прыходзяцца прамені, што ляжаць за фіялетавай вобласцю спектра.

Ультрафіялетавае выпраменьванне адрозніваецца высокай хімічнай актыўнасцю. Павышаную адчувальнасць да ультрафіялетавага выпраменьвання мае фотаэмульсія. У гэтым можна пераканацца, спраектаваўшы спектр у зацямнёным памяшканні на фотапаперу. Пасля праяўлення папера пачарнее за фіялетавым канцом спектра мацней, чым у вобласці бачнага спектра.

Ультрафіялетавыя прамені не выклікаюць зрокавых вобразаў: яны нябачныя. Але дзеянне іх на сятчатку вока і скуру вялікае і разбуральнае. Ультрафіялетавае выпраменьванне Сонца недастаткова паглынаецца верхнімі слаямі атмасферы. Таму высока ў гарах нельга заставацца доўгі час без адзення і без цёмных акулераў. Шкляныя акулеры, празрыстыя для бачнага спектра, ахоўваюць вочы ад ультрафіялетавага выпраменьвання, таму што шкло моцна паглынае ультрафіялетавыя прамені.

Аднак у малых дозах ультрафіялетавыя прамені аказваюць лекавае дзеянне. У меру знаходзіцца на сонцы карысна, асабліва ў юным узросце: ультрафіялетавыя прамені садзейнічаюць росту і ўмацаванню арганізма. Акрамя прамога ўздзеяння на тканкі скуры (утварэнне ахоўнага пігменту — загару, вітаміну D_2), яны робяць уплыў на цэнтральную нервовую сістэму, стымулюючы рад важных жыццёвых функцый у арганізме.

Ультрафіялетавыя прамені аказваюць таксама бактэрыцыднае дзеянне. Яны забіваюць хваробатворныя бактэрыі і выкарыстоўваюцца з гэтай мэтай у медыцыне.

Нагрэтае цела выпраменьвае пераважна інфрачырвонае выпраменьванне з даўжынямі хваль, якія перавышаюць даўжыні хваль бачнага выпраменьвання. Ультрафіялетавае выпраменьванне больш караткахвалевае і валодае высокай хімічнай актыўнасцю.

- ?
1. Чаму сонечнае святло, якое прайшло скрозь аконнае шкло, не выклікае загару?
 2. Ці вядома вам якая-небудзь крыніца ультрафіялетавага выпраменьвання?

Можа быць, і не ўсе чулі пра інфрачырвоныя і ультрафіялетавыя прамені, аднак аб існаванні рэнтгенаўскіх прамяняў, вядома, ведаюць усе. Гэтыя чудаўныя прамені праходзяць скрозь непразрыстыя для звычайнага святла целы.

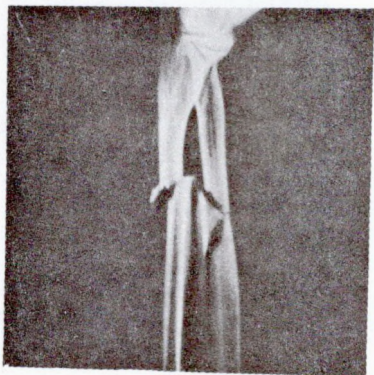
Паглыннанне рэнтгенаўскіх прамяняў прапарцыянальна шчыльнасці рэчыва. Таму з дапамогай рэнтгенаўскіх прамяняў можна атрымаць фатаграфіі ўнутраных органаў чалавека. На гэтых фотаздымках добра распазнаюцца косці шкелета (рыс. 153) і месцы розных перараджэнняў мяккіх тканак.

Адкрыццё рэнтгенаўскіх прамяняў. Рэнтгенаўскія прамені былі адкрыты ў 1895 г. нямецкім фізікам Вільгельмам Рэнтгенам. Рэнтген умеў назіраць, умеў заўважаць новае там, дзе многія вучоныя да яго не знаходзілі нічога надзвычайнага. Гэты асобы дар дапамог яму зрабіць выдатнае адкрыццё.

У канцы XIX ст. усеагульную ўвагу фізікаў прыцягнуў газавы разрад пры малым ціску. Пры гэтых умовах у газаразраднай трубцы ўтвараліся патокі вельмі хуткіх электронаў. У той час іх называлі катоднымі прамянямі. Прырода гэтых прамяняў яшчэ не была з дакладнасцю ўстаноўлена; вядома было толькі, што гэтыя прамені бяруць пачатак на катодзе трубкі.

Заняўшыся даследаваннем катодных прамяняў, Рэнтген хутка заўважыў, што фотопласцінка паблізу ад разраднай трубкі аказвалася засвечанай нават у тым выпадку, калі яна была загорнута ў чорную паперу. Пасля гэтага яму ўдалося назіраць яшчэ адну вельмі ўразіўшую яго з'яву. Папяровы экран, намочаны растворам плацінасіняродзістага барыю, пачынаў святніцца, калі ім абгортвалася разрадная трубка. Прычым калі Рэнтген трымаў руку паміж трубкай і экранам, то на экране былі бачны цёмныя цені кісцей на фоне больш светлых абрысаў усёй кісці рукі.

Рыс. 153



Вучоны зразумеў, што пры рабоце разраднай трубкі ўзнікае нейкае невядомое дасюль моцна пранікаючае выпраменьванне. Ён назваў яго X-прамянямі. Пасля за гэтым выпраменьваннем трывала замацаваўся тэрмін «рэнтгенаўскія прамені».

Рэнтген выявіў, што новае выпраменьванне ўзнікла ў тым месцы, дзе катодныя прамені (патокі хуткіх электронаў) сутыкаліся з шкляной сценкай трубкі. У гэтым месцы шкло святлілася зеленаватым святлом. Наступныя даследы паказалі, што X-прамені

Рэнтген Вільгельм (1845—1923) — нямецкі фізік, які адкрыў у 1895 г. караткахвалевае электрамагнітнае выпраменьванне — рэнтгенаўскія прамені. Адкрыццё рэнтгенаўскіх прамяняў зрабіла вялікі ўплыў на ўсё далейшае развіццё фізікі, у прыватнасці прывяло да адкрыцця радыеактыўнасці. Першая Нобелеўская прэмія па фізіцы была прысуджана Рэнтгену. Рэнтген садзейнічаў хуткаму распаўсюджванню практычнага прымянення свайго адкрыцця ў медыцыне. Канструкцыя створанай ім першай рэнтгенаўскай трубки для атрымання рэнтгенаўскіх прамяняў захавалася ў асноўных рысах да нашых дзён.



ўзнікаюць пры тармажэнні хуткіх электронаў любой перашкодай, у прыватнасці металічнымі электродамі.

Уласцівасці рэнтгенаўскіх прамяняў. Прамені, адкрытыя Рэнтгенам, дзейнічалі на фотапласцінку, выклікалі іанізацыю паветра, але прыметным чынам не адбіваліся ад якіх-небудзь рэчываў і не зведвалі праламлення. Электрамагнітнае поле не рабіла ніякага ўплыву на напрамак іх распаўсюджвання.

Адразу ж узнікла меркаванне, што рэнтгенаўскія прамені — гэта электрамагнітныя хвалі, якія выпраменьваюцца пры рэзкім тармажэнні электронаў. У адрозненне ад светлавых прамяняў бачнага ўчастка спектра і ультрафіялетавых прамяняў рэнтгенаўскія прамені маюць значна меншую даўжыню хвалі. Іх даўжыня хвалі тым меншая, чым большая энергія электронаў, якія сутыкаюцца з перашкодай. Вялікая пранікаючая здольнасць рэнтгенаўскіх прамяняў і іншыя іх асаблівасці звязваліся менавіта з малой даўжынёй хвалі. Але гэта гіпотэза патрабавала доказу, які быў атрыманы праз 15 гадоў пасля смерці Рэнтгена.

Дыфракцыя рэнтгенаўскіх прамяняў. Калі рэнтгенаўскае выпраменьванне ўяўляе сабой электрамагнітныя хвалі, то яно павінна выяўляць дыфракцыю — з'яву, уласцівую ўсім відам хваль. Спачатку прапускалі рэнтгенаўскія прамені праз вельмі вузкія шчыліны ў свінцовых пласцінках, але нічога падобнага на дыфракцыю выявіць не ўдавалася. Нямецкі фізік Макс Лауэ дапусціў, што даўжыня хвалі рэнтгенаўскіх прамяняў занадта малая для таго, каб можна было выявіць дыфракцыю гэтых хваль на штучна створаных перашкодах. Нельга ж зрабіць шчыліны размерам 10^{-8} см, паколькі такі размер саміх атамаў. А што, калі рэнтгенаўскія прамені маюць прыкладна такую ж даўжыню хвалі? Тады застаецца адзіная магчымасць — выкарыстаць крышталі. Яны ўяўляюць сабою ўпарадкаваныя структуры, у якіх адлегласці паміж асобнымі атамамі па парадку велічыні роўны размеру саміх атамаў, г. зн. 10^{-8} см. Крышталі з яго перыядычнай структурай і ёсць тая натуральная прылада,

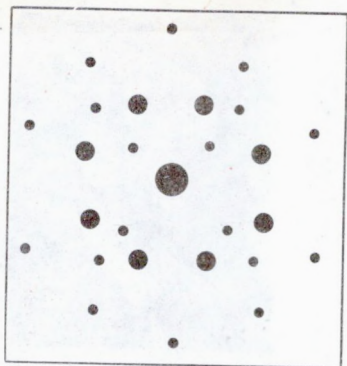


Рис. 154

якая непазбежна павінна выклікаць прыметную дыфракцыю хваль, калі даўжыня іх блізкая да размераў атамаў.

І вось вузкі пучок рэнтгенаўскіх прамяняў быў накіраваны на крыштал, за якім была размешчана фотопласцінка. Вынік поўнаасцю адпавядаў самым аптымістычным чаканням. Разам з вялікай цэнтральнай плямай, якую давалі прамені, што распаўсюджваліся на прамой, узніклі рэгулярна размешчаныя невялікія плямкі вакол цэнтральнай плямы (рыс. 154). З'яўленне гэтых плямак можна было растлумачыць

толькі дыфракцыяй рэнтгенаўскіх прамяняў на ўпарадкаванай структуры крышталю.

Даследаванне дыфракцыйнай карціны дазволіла вызначыць даўжыню хвалі рэнтгенаўскіх прамяняў. Яна аказалася меншай за даўжыню хвалі ультрафіялетавага выпраменьвання і па парадку велічыні была роўна размерам атама (10^{-8} см).

Прымяненне рэнтгенаўскіх прамяняў. Рэнтгенаўскія прамені знайшлі сабе многа вельмі важных практычных прымяненняў.

У медыцыне яны прымяняюцца для пастаноўкі правільнага дыягназу захворвання, лячэння ракавых захворванняў.

Вельмі шырокае прымяненне рэнтгенаўскіх прамяняў у навуковых даследаваннях. Па дыфракцыйнай карціне, якую даюць рэнтгенаўскія прамені пры іх праходжанні праз крышталі, удаецца ўстанавіць парадак размяшчэння атамаў у прасторы — структуру крышталю. Зрабіць гэта для неарганічных крышталічных рэчываў было не вельмі складана. Але з дапамогай рэнтгенаструктурнага аналізу ўдаецца расшыфраваць будову складанейшых арганічных злучэнняў, уключаючы бялкі. У прыватнасці, была вызначана структура малекул гемаглабіну, у састаў якой уваходзяць дзесяткі тысяч атамаў.

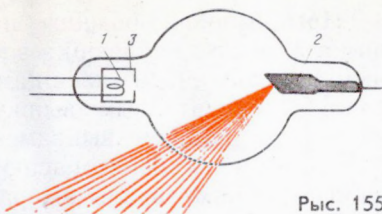
Гэтыя дасягненні сталі магчымыя дзякуючы таму, што даўжыня рэнтгенаўскіх прамяняў вельмі малая — іменна таму ўдалося «ўбачыць» малекулярныя структуры. Убачыць, вядома, не літаральна; гутарка ідзе аб атрыманні дыфракцыйнай карціны, з дапамогай якой пасля немалой затраты працы на яе расшыфроўку можна ўзнавіць характар прасторавага размяшчэння атамаў.

З іншых прымяненняў рэнтгенаўскіх прамяняў адзначым рэнтгенаўскую *дэфектаскапію* — метады выяўлення ракавін у адліўках, трэшчын у рэйках, праверкі якасці зварных швоў і г. д. Рэнтгенаўская дэфектаскапія заснавана на змяненні паглынання рэнтгенаўскіх прамяняў у вырабе пры наяўнасці ў ім поласці або іншародных уключэнняў.

Будова рентгенаўскай трубкі.

У наш час для атрымання рэнтгенаўскіх праменяў распрацаваны вельмі дасканалыя прыстасаванні, якія называюць рэнтгенаўскімі трубкамі.

На рысунку 155 паказана спрошчаная схема электроннай рэнтгенаўскай трубкі. Катод 1 з'яўляецца вальфрамавай спіраллю, якая выпраменьвае электроны за кошт тэрмаэлектроннай эмісіі. Цыліндр 3 фокусіруе патак электронаў, якія затым саўдараюцца з металічным электродам (анодам) 2. Пры гэтым нараджаюцца рэнтгенаўскія прамені. Напружанне паміж анодам і катодам дасягае некалькіх дзесяткаў кілавольтаў. У трубцы ствараецца глыбокі вакуум; ціск газу ў ёй не перавышае 10^{-5} мм рт. сл.



Рыс. 155

У магутных рэнтгенаўскіх трубках анод ахалоджваецца праточнай вадой, паколькі пры тармажэнні электронаў вылучаецца вялікая колькасць цеплыні. У карыснае выпраменьванне ператвараецца толькі каля 3 % энергіі электронаў.

Рэнтгенаўскія прамені маюць даўжыні хваль у дыяпазоне ад 10^{-9} да 10^{-10} м. Яны валодаюць вялікай пранікальнай здольнасцю і ўжываюцца ў медыцыне, а таксама для даследавання структуры крышталёў і складаных арганічных малекул.

! 1. Як зроблена рэнтгенаўская трубка? 2. Чаму не змайстраваны рэнтгенаўскія мікраскопы?

§ 65. ШКАЛА ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ВЫПРАМЕНЬВАННЯЎ

Мы ведаем, што даўжыня электрамагнітных хваль бывае самай разнастайнай: ад значэнняў парадку 10^3 м (радыёхвалі) да 10^{-10} м (рэнтгенаўскія прамені). Святло складае нязначную частку шырокага спектра электрамагнітных хваль. Тым не менш менавіта пры вывучэнні гэтай малой часткі спектра былі адкрыты іншыя выпраменьванні з незвычайнымі ўласцівасцямі.

На форзацы паказана поўная шкала электрамагнітных хваль з указаннем даўжынь хваль і частот розных выпраменьванняў, а таксама прыстасаванні, з дапамогай якіх атрымліваюць электрамагнітныя хвалі розных дыяпазонаў частаты. Прынята вылучаць нізкачастотнае выпраменьванне, радыевыпраменьванне, інфрачырвоныя прамені, бачнае святло, ультрафіялетавыя прамені, рэнтгенаўскія прамені і γ -выпраменьванне. З усімі гэтымі выпраменьваннямі, акрамя γ -выпраменьвання, вы ўжо знаёмы. Самае караткахвалевае γ -выпраменьванне выпраменьваюць атамныя ядры.

Прынцыповай розніцы паміж асобнымі выпраменьваннямі няма. Усе яны з'яўляюцца электрамагнітнымі хвалямі, пароджанымі зараджанымі часціцамі. Выяўляюцца электрамагнітныя хвалі ў канчатковым выніку па іх дзеянню на зараджаныя часціцы. У вакууме выпраменьванне любой даўжыні хвалі распаўсюджваецца са скорасцю 300 000 км/с. Межы паміж асобнымі абласцямі шкалы выпраменьванняў даволі ўмоўныя.

Выпраменьванні рознай даўжыні хвалі адрозніваюцца адно ад аднаго па спосабу іх атрымання (выпраменьванне антэны, цеплавое выпраменьванне, выпраменьванне пры тармажэнні хуткіх электронаў і інш.) і метадах рэгістрацыі.

Усе пералічаныя віды электрамагнітнага выпраменьвання параджаюцца таксама касмічнымі аб'ектамі і паспяхова даследуюцца з дапамогай ракет, штучных спадарожнікаў Зямлі і касмічных караблёў. У першую чаргу гэта адносіцца да рэнтгенаўскага і гама-выпраменьванняў, якія моцна паглынаюцца атмасферай.

Па меры памяншэння даўжыні хвалі *колькасныя адрозненні ў даўжынях хваль прыводзяць да істотных якасных адрозненняў.*

Выпраменьванні рознай даўжыні хвалі вельмі моцна адрозніваюцца адно ад аднаго па паглынання іх рэчывам. Караткахвалевыя выпраменьванні (рэнтгенаўскае і асабліва γ-прамені) паглынаюцца слаба. Непразрыстыя для хваль аптычнага дыяпазону рэчывы празрыстыя для гэтых выпраменьванняў. Каэфіцыент адбіцця электрамагнітных хваль таксама залежыць ад даўжыні хвалі. Але галоўнае адрозненне паміж даўгахвалевым і караткахвалевым выпраменьваннямі ў тым, што *караткахвалевае выпраменьванне выяўляе ўласцівасць часціц.* Аб гэтым пойдзе гаворка ў наступным раздзеле «Светлавая кванты».

 1. Якімі спосабамі рэгіструюцца радыёхвалі? выпраменьванні аптычнага дыяпазону? рэнтгенаўскія прамені? 2. Скарыстаўшы рысунак на форзацы, пакажыце дыяпазоны ўсіх відаў выпраменьванняў.

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 7¹

1. Святло выпраменьваецца зараджанымі часціцамі — электронамі, якія рухаюцца ў атамах. Для таго каб атам мог выпраменьваць, ён павінен атрымаць энергію звонку.

Найбольш распаўсюджаны цеплавая крыніца святла: Сонца, электрычныя лампы напальвання, полымя і інш.

2. Найважнейшая характарыстыка выпраменьвання — размеркаванне яго энергіі па частотах або даўжынях хваль. Гэта размеркаванне характарызуецца спектральнай шчыльнасцю інтэнсіўнасці выпраменьвання.

3. Спектры выпраменьвання даследуюцца з дапамогай спект-

¹ У кароткіх выніках гэтага раздзела 7—10 істотных пунктаў.

ральных апаратаў. Асноўным элементам спектральнага апарата з'яўляецца прызма або дыфракцыйная рашотка.

4. Выпраменьванне, выпраменьваемае цвёрдымі і вадкімі цэламі, а таксама высокатэмпературнай плазмай, мае непарарыўны спектр. У непарарыўным спектры паказаны з рознай інтэнсіўнасцю ўсе даўжыні хваль.

Выпраменьванне ж, выпраменьваемае рэчывам у газападобным атамарным стане, мае лінейчасты спектр. Даўжыні хваль лінейчастага спектра залежаць толькі ад уласцівасцей атамаў рэчыва і не залежаць ад спосабаў узбуджэння атамаў. На гэтым факце заснаваны спектральны аналіз.

Спектр выпраменьвання, які выпраменьваюць малекулы, складаецца з асобных палос, падзеленых цёмнымі прамежкамі. Такі спектр называецца паласатым.

5. Паглыннанне святла рэчывам залежыць ад даўжыні хвалі. Рэчыва найбольш інтэнсіўна паглынае святло якраз тых даўжынь хваль, на якіх яно інтэнсіўна выпраменьвае энергію ў моцна нагрэтым стане. Па лініях паглынання вызначаюць хімічны састаў Сонца і зорак.

6. Святло — гэта электрамагнітныя хвалі з даўжынямі хваль ад $4 \cdot 10^{-7}$ да $8 \cdot 10^{-7}$ м. Выпраменьванне з даўжынямі хваль, якія перавышаюць даўжыню хвалі чырвонага колеру ($8 \cdot 10^{-7}$ м), называюць інфрачырвоным. Інфрачырвоныя прамені выпраменьвае любое нагрэтае цела.

Электрамагнітныя хвалі з даўжынямі хваль, меншымі за $4 \cdot 10^{-7}$ м, называюць ультрафіялетавымі. Ультрафіялетавыя прамені адрозніваюцца вялікай хімічнай актыўнасцю.

7. Яшчэ меншую даўжыню хвалі маюць рэнтгенаўскія прамені. Рэнтгенаўскія прамені ўзнікаюць пры рэзкім тармажэнні электронаў, якія прайшлі паскараючае напружанне ў некалькі кілавольт. Гэтыя прамені слаба паглынаюцца рэчывам. Іх выкарыстоўваюць у медыцыне (рэнтгенадыягностыка і рэнтгенатэрапія), у тэхніцы (рэнтгенадэфектаскапія) і ў навуковых даследаваннях.

8. Шкала электрамагнітных хваль працягваецца ад доўгіх радыёхваль ($\lambda > 1$ км) да гама-прамяняў ($\lambda < 10^{-10}$ м). Электрамагнітныя хвалі рознай даўжыні ўмоўна дзеляць на дыяпазоны па розных прызнаках (спосабу атрымання, спосабу рэгістрацыі, характару ўзаемадзеяння з рэчывам). Колькасныя адрозненні ў даўжынях хваль прыводзяць да істотных якасных адрозненняў. Караткахвалевае выпраменьванне выяўляе ўласцівасці часціц.



КВАНТАВАЯ ФІЗІКА

Раздзел 8. Светлавая кванты

Раздзел 9. Атамная фізіка

Раздзел 10. Фізіка атамнага ядра

Раздзел 11. Элементарныя часціцы

ЗАРАДЖЭННЕ КВАНТАВАЙ ТЭОРЫІ

Найвялікшая рэвалюцыя ў фізіцы супала з пачаткам XX ст. Спробы растлумачыць назіраемыя на доследах (гл. рыс. 151) заканамернасці размеркавання энергіі ў спектрах цеплага выпраменьвання (электрамагнітнага выпраменьвання нагрэтага цела) аказаліся беспаспяховымі. Шматразова правяраныя законы электрамагнетызму Максвела нечакана «забаставалі», калі іх спрабавалі прымяніць да праблемы выпраменьвання рэчывам кароткіх электрамагнітных хваль. І гэта тым больш дзіўна, што гэтыя законы вельмі добра апісваюць выпраменьванне радыёхваль антэнай і што ў свой час само існаванне электрамагнітных хваль было прадказана на аснове гэтых законаў.

Электрадынаміка Максвела прыводзіла да бяссэнсавага вываду, згодна з якім нагрэтае цела, бесперапынна страчваючы энергію ў выніку выпраменьвання электрамагнітных хваль, павінна астыць да абсалютнага нуля. Згодна з класічнай тэорыяй цеплавая раўнавага паміж рэчывам і выпраменьваннем немагчыма. Аднак штодзённы вопыт паказвае, што нічога падобнага ў сапраўднасці няма. Нагрэтае цела не расходuje ўсю сваю энергію на выпраменьванне электрамагнітных хваль.

У пошуках выхаду з гэтай супярэчнасці паміж тэорыяй і практыкай нямецкі фізік Макс Планк дапусціў, што атомы выпраменьваюць электрамагнітную энергію асобнымі порцыямі — квантамі. Энергія E кожнай порцыі прама прапарцыянальная частаце ν выпраменьвання¹:

$$E = h\nu.$$

Каэфіцыент прапарцыянальнасці h атрымаў назву *пастаяннай Планка*.

Дапушчэнне Планка фактычна азначала, што законы класічнай фізікі непрымянімыя да з'яў мікрасвету.

Пабудаваная Планкам тэорыя цеплага выпраменьвання вельмі добра ўзгаднялася з эксперыментам. Па вядомаму з досле-

¹ Гэта другая з простых «вялікіх» формул (першая — $E = mc^2$).

Планк Макс (1858—1947) — вялікі нямецкі фізік-тэарэтык, заснавальнік квантавай тэорыі — сучаснай тэорыі руху, узаемадзеяння і ўзаемных ператварэнняў мікраскапічных часціц. У 1900 г. у працы, прысвечанай раўнаважнаму цеплавому выпраменьванню, Планк упершыню ўвёў дапушчэнне аб тым, што энергія асцылятара (сістэмы, якая выконвае гарманічныя ваганні) прымае дыскрэтныя значэнні, прапарцыянальныя частаце ваганняў. Выпраменьваецца электрамагнітная энергія асцылятарам асобнымі порцыямі. Вялікі ўклад унёс Планк у развіццё тэрмадынамікі.



ду размеркаванню энергіі па частотах было вылічана значэнне пастаяннай Планка. Яно аказалася вельмі малым:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

У наступным параграфі мы разгледзім другую фізічную з'яву, з дапамогай якой таксама можна вызначыць пастаянную Планка, але больш простым спосабам.

Пасля адкрыцця Планка пачала развівацца новая, самая сучасная і глыбокая фізічная тэорыя — квантавая тэорыя. Развіццё яе не завершана і па сённяшні дзень.

Планк паказаў шлях выхаду з цяжкасцей, з якімі сутыкнулася тэорыя цеплага выпраменьвання. Але гэты поспех быў атрыманы цаной адказу ад законаў класічнай фізікі прымяняльна да мікраскапічных сістэм і выпраменьвання.

Раздзел 8

СВЕТЛАВЫЯ КВАНТЫ

Квантавым законам падпарадкоўваюцца паводзіны ўсіх мікраскапічных часціц. Але ўпершыню квантавыя ўласцівасці матэрыі былі выяўлены пры даследаванні выпраменьвання і паглынання святла.

§ 66. ФОТАЭФЕКТ

У развіцці ўяўленняў аб прыродзе святла важны крок быў зроблены пры вывучэнні адной надзвычайнай з'явы, адкрытай Г. Герцам і дасканала даследаванай выдатным рускім фізікам Аляксандрам Рыгоравічам Сталетавым. З'ява гэта атрымала назву фотаэфекту.

Фотаэфектам называюць вырыванне электронаў з рэчыва пад дзеяннем святла.



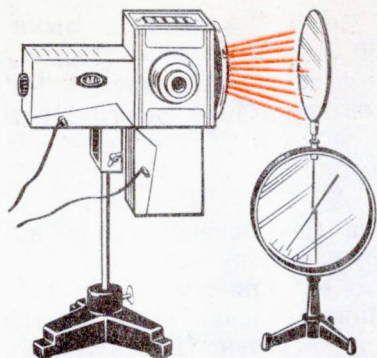
Сталетаў Аляксандр Рыгоровіч (1839—1896) — рускі фізік. Даследаванне фотаэфекту прынесла Сталетава сусветную вядомасць. Сталетаў паказаў таксама магчымасць прымянення фотаэфекту на практыцы. У доктарскай дысертацыі «Даследаванне аб функцыі намагнічання мяккага жалеза» ён распрацаваў метады даследавання ферамагнетыкаў і ўстаноўку від крывой намагнічання. Гэта работа шырока выкарыстоўвалася на практыцы пры канструаванні электрычных машын. Многа сіл аддаў Сталетаў развіццю фізікі ў Расіі. Ён з'явіўся ініцыятарам стварэння фізічнага інстытута пры Маскоўскім універсітэце.

Назіранне фотаэфекту. Для выяўлення фотаэфекту можна выкарыстаць электрометр з далучанай да яго цынкавай пласцінай (рыс. 156). Калі зарадзіць пласціну дадатна, то асвятленне пласціны, напрыклад электрычнай дугой, не ўплывае на хуткасць разрадкі электрометра. Але калі пласціну зарадзіць адмоўна, то светлавая пучок ад дузі разраджае электрометр вельмі хутка.

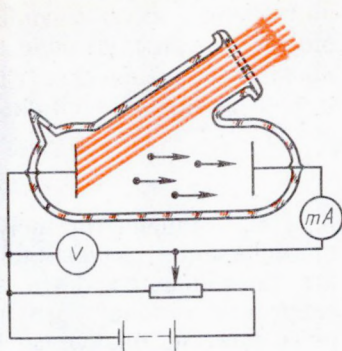
Растлумачыць гэта можна адзіным шляхам. Святло вырывае электроны з паверхні пласціны. Калі яна зараджана адмоўна, электроны адштурхваюцца ад яе і электрометр разраджаецца. Пры дадатным жа зарадзе пласціны вырваныя святлом электроны прыцягваюцца да пласціны і зноў асядаюць на ёй. Таму зарад электрометра не змяняецца.

Аднак, калі на шляху святла пастаўлена звычайнае шкло, адмоўна зараджаная пласціна ўжо не губляе электроны, якая б ні была інтэнсіўнасць выпраменьвання. Паколькі вядома, што шкло паглынае ультрафіялетавыя прамені, то з гэтага доследу можна зрабіць вывад, што іменна ультрафіялетавы ўчастак спектра выклікае фотаэфект. Гэты сам па сабе нескладаны факт нельга растлумачыць на аснове хвалевай тэорыі святла. Незразумела, чаму светлавая хваля малой частаты не могуць вырываць электроны, калі нават амплітуда хвалі вялікая і, значыць, вялікая сіла, што дзейнічае на электроны.

Законы фотаэфекту. Для таго каб атрымаць аб фотаэфекце больш поўнае ўяўленне, трэба высветліць, ад чаго залежыць лік вырваных святлом з паверхні рэчыва электронаў (фотаэлектронаў) і чым вызначаецца іх скорасць або кінетычная энергія. З гэтай мэтай былі праведзены эксперыментальныя даследаванні, якія заключаліся ў наступным. У шкляны балон, з якога выпампавана паветра, змяшчаюцца два электроды (рыс. 157). Унутр балона на адзін з электродаў паступае святло праз кварцавае «акенца», празрыстае не толькі для бачнага святла, але і для ультрафіялетавага выпраменьвання. На электроды падаецца напружанне, якое можна мяняць з дапамогай патэн-



Рыс. 156



Рыс. 157

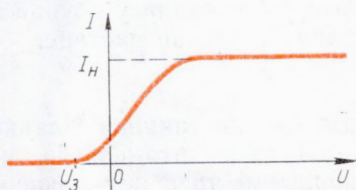
цыяметра і вымяраць вальтметрам. Да асвятляемага электрода далучаюць адмоўны полюс батарэі. Пад дзеяннем святла гэты электрод выпраменьвае электроны, якія пры руху ў электрычным полі ўтвараюць электрычны ток. Пры малых напружаннях не ўсе вырваныя святлом электроны дасягаюць другога электрода. Калі, не мяняючы інтэнсіўнасці выпраменьвання, павялічваць рознасць патэнцыялаў паміж электродамі, то сіла току нарастае. Пры некаторым напружання яна дасягае максімальнага значэння, пасля чаго перастае павялічвацца (рыс. 158). Максімальнае значэнне сілы току I_n называецца токам насычэння. Ток насычэння вызначаецца лікам электронаў, выпрамененых за 1 с асвятляемым электродам.

Змяняючы ў гэтым доследзе інтэнсіўнасць выпраменьвання, удалося ўстанавіць, што **колькасць электронаў, якія вырываюцца святлом з паверхні металу за 1 с, прама прапарцыянальная паглынаемай за гэты час энергіі светлавой хвалі**. У гэтым нічога нечаканага няма: чым большая энергія светлага пучка, тым больш эфектыўнае яго дзеянне.

Цяпер спынімся на вымярэнні кінетычнай энергіі (або скорасці) электронаў. З графіка, прыведзенага на рысунку 158, відаць, што сіла фотатоку адрозніваецца ад нуля і пры нулявым напружання. Гэта азначае, што частка вырваных святлом электронаў дасягае правага (гл. рыс. 157) электрода і пры адсутнасці напружання. Калі змяніць палярнасць батарэі, то сіла току паменшыцца і пры некаторым напружання яна стане роўнай нулю. Гэта значыць, што электрычнае поле тармозіць вырваныя электроны да поўнага спынення, а затым вяртае іх на электрод.

Затрымліваючае напружанне U_3 залежыць ад максімальнай кінетыч-

Рыс. 158



най енергії, якую маюць вярваныя святлом электроны. Вымяраючы затрымліваючае напружанне і прымяняючы тэарэму аб кінетычнай энергії (гл. падручнік фізікі для IX класа, § 44), можна знайсці максімальнае значэнне кінетычнай энергії электронаў:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

Пры змяненні інтэнсіўнасці святла (шчыльнасці патоку выпраменьвання) затрымліваючае напружанне, як паказалі даследы, не мяняецца. Гэта азначае, што не мяняецца кінетычная энергія электронаў. З пункту гледжання хвалевай тэорыі святла гэты факт незразумелы. Чым большая ж інтэнсіўнасць святла, тым большыя сілы дзейнічаюць на электроны з боку электрамагнітнага поля светлавой хвалі і тым большая энергія, здавалася б, павінна перадавацца электронам.

На даследах было выяўлена, што кінетычная энергія вырываемаых святлом электронаў залежыць толькі ад частаты святла. **Максімальная кінетычная энергія фотаэлектронаў лінейна ўзрастае з частатой святла і не залежыць ад інтэнсіўнасці святла.** Калі частата святла меншая за вызначаную для дадзенага рэчыва мінімальную частату $\nu_{\min}$, то фотаэфект не адбываецца.

Закон фотаэфекту прасты па форме. Але залежнасць кінетычнай энергії электронаў ад частаты выглядае загадкава.

1. Чаму роўна пастаянная Планка? 2. У чым заключаецца асноўны закон фотаэфекту?

§ 67. ТЭОРЫЯ ФОТАЭФЕКТУ

Усе спробы растлумачыць з'яву фотаэфекту на аснове законаў электрадынамікі Максвела, згодна з якімі святло — гэта электрамагнітная хваля, бесперапынна размеркаваная ў прастору, аказаліся безрэзультатнымі. Нельга было зразумець, чаму энергія фотаэлектронаў вызначаецца толькі частатой святла і чаму толькі пры малой даўжыні хвалі святло вырывае электроны.

Тлумачэнне фотаэфекту было дадзена ў 1905 г. Эйнштэйнам, які развіў ідэі Планка аб перарывістым выпраменьванні святла. У эксперыментальных законах фотаэфекту Эйнштэйн убачыў пераканаўчы доказ таго, што *святло мае перарывістую структуру і паглынаецца асобнымі порцыямі*. Энергія E кожнай порцыі выпраменьвання ў поўнай адпаведнасці з гіпотэзай Планка прапарцыянальная частаце:

$$E = h\nu, \quad (8.1)$$

дзе h — пастаянная Планка.

З таго што святло, як паказаў Планк, выпраменьваецца порцыямі, яшчэ не вынікае перарывістая структура самога святла.

І мінеральную ж ваду прадаюць у бутэльках, але адсюль зусім не вынікае, што вада мае перарывістую структуру і складаецца з непадзельных частак. Толькі з'ява фотаэфекту паказала, што *святло мае перарывістую структуру: порцыя светлавой энергіі $E = h\nu$, якая выпраменьваецца, захоўвае сваю індывідуальнасць і далей*. Паглынуцца можа толькі ўся порцыя цалкам.

Кінетычную энергію фотаэлектрона можна знайсці, прымяніўшы закон захавання энергіі. Энергія порцыі святла $h\nu$ ідзе на выкананне *работы выхода* A , г. зн. работы, якую трэба выканаць для таго, каб вырваць электрон з металу, і на наданне электрону кінетычнай энергіі. Значыць,

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (8.2)$$

Гэта ўраўненне тлумачыць асноўныя факты, якія датычацца фотаэфекту. Інтэнсіўнасць святла, па Эйнштэйну, прапарцыянальная ліку квантаў (порцый) энергіі ў светлавым пучку і таму вызначае лік электронаў, вырваных з металу. Скорасць жа электронаў згодна з (8.2) вызначаецца толькі частатой святла і работай выхода, якая залежыць ад роду металу і стану яго паверхні. Ад інтэнсіўнасці святла яна не залежыць.

Для кожнага рэчыва фотаэфект назіраецца толькі ў тым выпадку, калі частата ν святла большая, чым мінімальнае значэнне $\nu_{\min}$. Каб вырваць жа электрон з металу нават без надання яму кінетычнай энергіі, трэба зрабіць работу выхода A . Значыць, энергія кванта павінна быць большай за гэту работу:

$$h\nu > A.$$

Гранічную частату $\nu_{\min}$ называюць *чырвонай мяжой фотаэфекту*. Яна выражаецца так:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (8.3)$$

Работа выхода A залежыць ад роду рэчыва. Таму і межавая частата $\nu_{\min}$ фотаэфекту (чырвоная мяжа) для розных рэчываў розная.

Для цынку чырвонай мяжы адпавядае даўжыня хвалі $\lambda_{\max} = 3,7 \cdot 10^{-7}$ м (ультрафіялетавае выпраменьванне). Менавіта гэтым тлумачыцца дослед па спыненню фотаэфекту з дапамогай шкляной пласцінкі, якая затрымлівае ультрафіялетавыя прамені.

Работа выхода ў алюмінію або жалеза большая, чым у цынку. Таму ў доследзе, які апісаны ў § 65, скарыстоўвалася цынкавая пласціна. У шчолачных металаў работа выхода, наадварот, меншая, а даўжыня хвалі $\lambda_{\max}$, адпавядаючая чырвонай мяжы, — большая. Так, для натрыю $\lambda_{\max} = 6,8 \cdot 10^{-7}$ м.

Карыстаючыся ўраўненнем Эйнштэйна (8.2), можна знайсці пастаянную Планка h . Для гэтага трэба эксперыментальна вы-

значыць частату святла ν , работу выхаду A і вымераць кінетычную энергію фотаэлектронаў. Такого роду вымярэнні і разлікі даюць $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с. Дакладна такое ж значэнне было знойдзена Планкам пры тэарэтычным вывучэнні зусім іншай з'явы — цеплага выпраменьвання. Супадзенне значэнняў пастаяннай Планка, атрыманых рознымі метадамі, пацвярджае правільнасць дапушчэння аб перарывістым характары выпраменьвання і паглынання святла рэчывам.

Ураўненне Эйнштэйна (8.2), нягледзячы на сваю прастату, тлумачыць асноўныя заканамернасці фотаэфекту. Эйнштэйн быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй за працу па тэорыі фотаэфекту.

1. Якія факты гавораць аб наяўнасці ў святла карпускулярных уласцівасцей?
2. Што такое чырвоная мяжа фотаэфекту?

§ 68. ФАТОНЫ

У сучаснай фізіцы фатон разглядаецца як адна з элементарных часціц. Табліца элементарных часціц ужо многія дзесяткі гадоў пачынаецца з фатона.

Энергія і імпульс фатона. Пры выпраменьванні і паглынванні святло паводзіць сябе падобна да патоку часціц з энергіяй $E = h\nu$, якая залежыць ад частаты. Порцыя святла аказалася нечакана вельмі падобнай да той, што прынята называць часціцай. Уласцівасці святла, якія выяўляюцца пры выпраменьванні і паглынванні, называюць карпускулярнымі. Сама ж светлавая часціца была названа *фатоном* або *квантам электрамагнітнага выпраменьвання*.

Фатон, падобна да часціц, валодае пэўнай порцыяй энергіі $h\nu$. Энергію фатона часта выражаюць не праз частату ν , а праз цыклічную частату $\omega = 2\pi\nu$. Пры гэтым у якасці каэфіцыента прапарцыянальнасці замест велічыні h выкарыстоўваюць велічыню $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (чытаецца: аш з рыскай), роўную па сучасных даных,

$$\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

(апошнія два знакі вызначаны з дакладнасцю ± 57).

Тады энергія фатона выражаецца так:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \quad (8.4)$$

Згодна з тэорыяй адноснасці энергія заўсёды звязана з масай суадносінай $E = mc^2$. Паколькі энергія фатона роўна $h\nu$, то, значыць, яго маса m вызначаецца так:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (8.5)$$

Фатон не мае масы спакою m_0 , г. зн. ён не існуе ў стане спакою, і пры нараджэнні адразу атрымлівае скорасць c . Маса, якая вызначаецца формулай (8.5), — гэта маса фатона, што рухаецца. Па вядомай масе і скорасці фатона можна знайсці яго імпульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (8.6)$$

Накіраваны імпульс фатона па светлавому праменю.

Чым большая частата, тым большыя энергія і імпульс фатона і тым дакладней выражаны карпускулярныя ўласцівасці святла. З-за таго што пастаянная Планка малая, энергія фатонаў бачнага святла вельмі нязначная. Фатоны, якія адпавядаюць зялёнаму святлу, маюць энергію $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тым не менш у выдатных доследах С. І. Вавілава было ўстаноўлена, што чалавечае вока, гэты самы тонкі з «прыбораў», здольны рэагаваць на розніцу асветленасці, якая вымяраецца адзінкавымі квантамі.

Карпускулярна-хвалевы дуалізм. Такім чынам, вучоныя былі вымушаны ўвесці ўяўленне аб святле як аб патоку часціц. Можна паказаць, што гэта вяртанне да карпускулярнай тэорыі Ньютана. Аднак нельга забываць, што інтэрферэнцыя і дыфракцыя святла зусім дакладна гавораць аб наяўнасці ў святла хвалевых уласцівасцей. Святло ўладае своеасаблівым *дуалізмам* (дваістасцю) уласцівасцей. Пры распаўсюджванні святла праяўляюцца яго хвалевыя ўласцівасці, а пры ўзаемадзеянні з рэчывам (выпраменьванні і паглыннанні) — карпускулярныя. Усё гэта, вядома, здзіўна і непрывычна. Мы не маем магчымасці ўявіць сабе наглядна, як жа гэта можа быць. Але тым не менш гэта факт. Мы пазбаўлены магчымасці ўяўляць сабе наглядна ў поўнай меры працэсы ў мікрасвеце, таму што яны зусім адрозныя ад тых макраскапічных з'яў, якія людзі назіралі на працягу мільёнаў гадоў і асноўныя законы якіх былі сфармуляваны к канцу XIX ст.

З цягам часу дваістасць уласцівасцей была адкрыта ў электронаў і іншых элементарных часціц. Электрон, у прыватнасці, разам з карпускулярнымі ўласцівасцямі ўладае таксама і хвалевымі. Назіраецца дыфракцыя і інтэрферэнцыя электронаў.

Гэтыя незвычайныя ўласцівасці мікрааб'ектаў апісваюцца з дапамогай *квантавай механікі* — сучаснай тэорыі руху мікрасчасціц. Механіка Ньютана аказваецца тут непрымянімай. Але вывучэнне квантавай механікі выходзіць за межы школьнага курса фізікі.

Фатон — элементарная часціца, пазбаўленая масы спакою і электрычнага зараду, але якая ўладае энергіяй і імпульсам. Гэта квант электрамагнітнага поля, якое ажыццяўляе ўзаемадзеянне паміж зараджанымі часціцамі. Паглыннанне і выпраменьванне электрамагнітнай энергіі асобнымі порцыямі — праяўленне карпускулярных уласцівасцей электрамагнітнага поля.

Карпускулярна-хвалева дуалізм уласцівасцей ёсць агульная ўласцівасць матэрыі, якая праяўляецца на мікраскапічным узроўні.

? 1. Як вызначыць энергію, масу і імпульс фатона, ведаючы частату ваганняў святла ν ? 2. Што разумеецца пад словамі «карпускулярна-хвалева дуалізм»?

§ 69. ПРЫМЯНЕННЕ ФОТАЭФЕКТУ

Адкрыццё фотаэфекту мела вельмі вялікае значэнне для больш глыбокага разумення прыроды святла. Але каштоўнасць навукі заключаецца не толькі ў тым, што яна высвятляе складаную і разнастайную будову навакольнага свету, але і ў тым, што яна дае нам у рукі сродкі, выкарыстоўваючы якія можна ўдасканальваць вытворчасць, паляпшаць умовы матэрыяльнага і культурнага жыцця грамадства.

З дапамогай фотаэфекту «загаварыла» кіно і стала магчымай перадача рухомых відарысаў (тэлебачанне). Прымяненне фотаэлектронных прыбораў дазволіла стварыць станкі, якія без усялякага ўдзелу чалавека вырабляюць дэталі па зададзеных чарцяжах. Заснаваныя на фотаэфекце прыборы кантралююць размеры вырабаў лепш за любога чалавека, своечасова ўключаюць і выключаюць маякі і вулічнае асвятленне і да т. п.

Усё гэта аказалася магчымым дзякуючы вынаходству асобых прыстасаванняў — *фотаэлементаў*, у якіх энергія святла кіруе энергіяй электрычнага току або пераўтвараецца ў яе.

Вакуумныя фотаэлементы. Сучасны вакуумны фотаэлемент уяўляе сабой шкляную колбу, частка ўнутранай паверхні якой пакрыта тонкім слоём металу з малой работай выхаду (рыс. 159). Гэта катод 1. Праз празрыстае «акенца» святло пранікае ўнутр колбы. У яе цэнтры размешчана пятля з дроту або дыск — анод 2, які служыць для ўлоўлівання фотаэлектронаў. Анод далучаюць да дадатнага полюса батарэі. Фотаэлементы, якія прымяняюцца, рэагуюць на бачнае святло і нават на інфрачырвоныя прамяні.

Пры пападанні святла на катод фотаэлемента ў ланцугу ўзнікае электрычны ток, які ўключае або выключае тое ці іншае рэле. Камбінацыя фотаэлемента з рэле дазваляе канструяваць мноства розных аўтаматаў, якія «бачаць». Адным з іх з'яўляецца аўтамат у метро. Ён спрацоўвае пры перасячэнні светлага пучка, калі папярэдне не апушчана пятнацацікапеечная манета.

Падобнага роду аўтаматы могуць папярэджваць аварыі. На заводзе фотаэлемент амаль імгненна спыняе магутны прэс, калі рука чалавека акажацца ў небяспечнай зоне.

З дапамогай фотаэлементаў ажыццяўляецца ўзнаўленне гуку, запісанага на фотаплёнцы.

Паўправадніковыя фотаэлементы. Акрамя разгледжанага ў гэтым раздзеле фотаэфекту, які называецца знешнім фота-

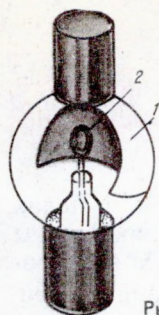


Рис. 159

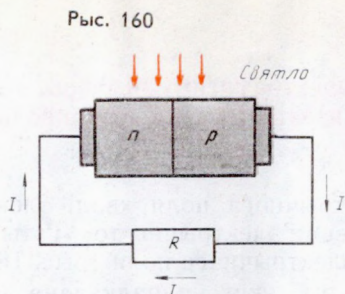


Рис. 160

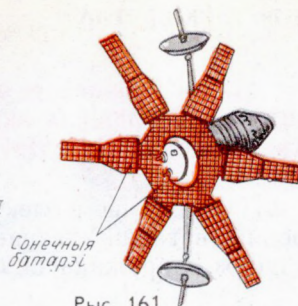


Рис. 161

ефектам, разнастайныя прымяненні знаходзіць унутраны фота-ефект у паўправадніках. Гэта з'ява выкарыстоўваецца у фотарэзістах — прыборах, супраціўленне якіх залежыць ад асветленасці (гл. § 76 падручніка фізікі для X класа). Акрамя таго, сканструяваны паўправадниковыя фотаэлементы, якія ствараюць ЭРС і непасрэдна пераўтвараюць энергію выпраменьвання ў энергію электрычнага току. ЭРС, якая называецца ў дадзеным выпадку фота-ЭРС, узнікае ў вобласці $p-n$ -пераходу двух паўправаднікоў (гл. § 73 падручніка фізікі для X класа) пры абпраменьванні гэтай вобласці святлом. Пад дзеяннем святла ўтвараюцца пары электрон — дзірка. У вобласці $p-n$ -пераходу існуе электрычнае поле. Гэта поле прымушае неасноўныя носьбіты паўправаднікоў перамяшчацца праз кантакт. Дзіркі з паўправадніка n -тыпу перамяшчаюцца ў паўправаднік p -тыпу, а электроны з паўправадніка p -тыпу — у вобласць n -тыпу, што прыводзіць да назапашвання асноўных носьбітаў у паўправадніках n - і p -тыпаў. У выніку патэнцыял паўправадніка p -тыпу павялічваецца, а n -тыпу памяншаецца. Гэта адбываецца да той пары, пакуль ток неасноўных носьбітаў праз $p-n$ -пераход зраўнуецца з токам асноўных носьбітаў праз гэты ж пераход. Паміж паўправаднікамі ўстанаўліваецца ў гэты момант рознасць патэнцыялаў, роўная фота-ЭРС.

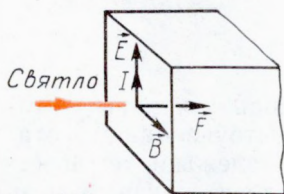
Калі замкнуць ланцуг праз знешнюю нагрузку, то ў ланцугу пойдзе ток, які вызначаецца рознасцю токаў неасноўных і асноўных носьбітаў праз $p-n$ -пераход (рыс. 160). Сіла току залежыць ад інтэнсіўнасці падаючага святла і супраціўлення нагрузкі R .

Фотаэлементы з $p-n$ -пераходам ствараюць ЭРС парадку 1—2 В. Іх выхадная магутнасць дасягае соцень ват пры каэфіцыенце карыснага дзеяння да 20 %. Фотаэлементы малой магутнасці выкарыстоўваюцца ў фотаэкспанометрах. Асабліва шырокае прымяненне яны атрымалі пры вырабе сонечных батарэй, якія ўстанаўліваюцца на касмічных караблях (рыс. 161). На жаль, пакуль такія батарэй даволі дарагія.

Шырока прымяняюцца вакуумныя і паўправадниковыя фотаэлементы. Апошнія ствараюць фота-ЭРС.

Максвел на аснове электрамагнітнай тэорыі святла прадказаў, што святло павінна аказваць ціск на перашкоды. Вымераў ціск святла П. М. Лебедзеў.

Пад дзеяннем электрычнага поля хвалі электроны ў целах робяць ваганні. Утвараецца электрычны ток. Гэты ток накіраваны ўздоўж напружанасці электрычнага поля (рыс. 162). На электроны, якія ўпарадкавана рухаюцца, дзей-



Рыс. 162

нічае сіла Лорэнца $\vec{F}$ з боку магнітнага поля, накіраваная ў бок распаўсюджвання хвалі. Гэта і ёсць *сіла светлавога ціску*.

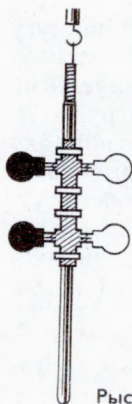
Для доказу справядлівасці тэорыі Максвела было важна вымераць ціск святла. Многія вучоныя спрабавалі гэта зрабіць, але не мелі поспеху, таму што светлавы ціск вельмі малы. У яркі, сонеч-

ны дзень на паверхню плошчай 1 м^2 дзейнічае сіла, роўная ўсяго толькі $4 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. Упершыню ціск святла вымераў вядомы рускі фізік Пётр Мікалаевіч Лебедзеў у 1900 г.

Прыбор Лебедзева складаўся з вельмі лёгкага стрыжанька на тонкай шкляной нітцы, па краях якой былі прыклеены лёгкія крыльцы (рыс. 163). Увесь прыбор змяшчаўся ў сасуд, з якога было выпамавана паветра. Святло падала на крыльцы, размешчаныя па адзін бок ад стрыжанька. Аб велічыні ціску можна было меркаваць па вуглу закручвання ніткі. Цяжкасці дакладнага вымярэння ціску святла былі звязаны з немагчымасцю выпамаваць з сасуда ўсё паветра (рух малекул паветра, выкліканы неаднолькавым награваннем крыльцаў і сценак сасуда, прыводзіць да ўзнікнення дадатковых вярчальных момантаў). Акрамя таго, на закручванне ніткі ўплывае неаднолькавае награванне бакоў крыльцаў (бок, звернуты да крыніцы святла, на-

грываецца больш за процілеглы бок). Малекулы, якія адбіваюцца ад больш нагрэтага боку, перадаюць крыльцу большы імпульс, чым малекулы, што адбіваюцца ад менш нагрэтага боку.

Лебедзеў змог пераадолець усе гэтыя цяжкасці, нягледзячы на нізкі ўзровень тагачаснай эксперыментальнай тэхнікі, узяўшы вельмі вялікі сасуд і вельмі тонкія крыльцы. У рэшце рэшт існаванне светлавога ціску на цвёрдыя целы было даказана і ён быў вымераны. Атрыманае значэнне супала з прадказаным Максвелам. Пазней пасля трох гадоў работы Лебедзеву ўдалося ажыццявіць яшчэ больш тонкі эксперымент: вымераць ціск святла на газы.



Рыс. 163

З'яўленне квантавай тэорыі святла дазволіла

Лебедзеў Пётр Мікалаевіч (1866—1912) — рускі фізік, які ўпершыню вымераў ціск святла на цвёрдыя целы і газы. Гэтыя працы Лебедзева колькасна пацвердзілі тэорыю Максвела. Імкнучыся знайсці новыя эксперыментальныя доказы электрамагнітнай тэорыі святла, Лебедзеў атрымаў электрамагнітныя хвалі міліметровай даўжыні і даследаваў усе іх уласцівасці.

Лебедзеў стварыў першую ў Расіі фізічную школу. Яго вучнямі з'яўляюцца многія выдатныя савецкія вучоныя. Імя Лебедзева носіць Фізічны інстытут АН СССР (ФІАН).



больш проста растлумачыць прычыну светлавога ціску. Фатоны, падобна да часцінак рэчыва, якія маюць масу спакою, валодаюць імпульсам. Пры паглыннанні іх цэлам яны перадаюць яму свой імпульс. Згодна з законам захавання імпульсу імпульс цэла роўны імпульсу паглынутых фатонаў. Таму цэла, якое знаходзіцца ў спакоі, прыходзіць у рух. Змяненне імпульсу цэла азначае, згодна з другім законам Ньютана, што на цэлы дзейнічае сіла.

Даследы Лебедзева можна раглядаць як эксперыментальны доказ таго, што фатоны валодаюць імпульсам.

Хаця ціск святла ў звычайных умовах вельмі малы, тым не менш яго дзеянне можа стаць істотным. Унутры зорак пры тэмпературы ў некалькі дзесяткаў мільёнаў кельвін ціск электрамагнітнага выпраменьвання павінен дасягаць велізарнай велічыні. Сілы ціску святла разам з гравітацыйнымі сіламі адыгрываюць істотную ролю ва ўнутрызоркавых працэсах.

Ціск святла згодна з электрадынамікай Максвела ўзнікае з-за дзеяння сілы Лорэнца на электроны асяроддзя, якія вагаюцца пад дзеяннем электрычнага поля электрамагнітнай хвалі. З пункту гледжання квантавай тэорыі ціск з'яўляецца дзякуючы перадачы цэлу імпульсаў фатонаў пры іх паглыннанні.

! У якім выпадку ціск святла большы: пры падзенні яго на люстраную паверхню або на чорную?

§ 71. ХІМІЧНАЕ ДЗЕЯННЕ СВЯТЛА. ФАТАГРАФІЯ

Асобныя малекулы паглынаюць светлавую энергію порцыямі — квантамі *hν*. У выпадку бачнага і ультрафіялетавага выпраменьванняў гэта энергія дастатковая для расшчаплення многіх малекул. У гэтым праяўляецца хімічнае дзеянне святла.

Любое ж ператварэнне малекул ёсць хімічны працэс. Часта пасля расшчаплення малекул святлом пачынаецца цэлы ланцу-

жок хімічных ператварэнняў. Выцвітанне тканін на сонцы і ўтварэнне загару — гэта прыклады хімічнага дзеяння святла.

Найважнейшыя хімічныя рэакцыі пад дзеяннем святла адбываюцца ў зялёных лістах дрэў і травы, у іголках хвой і ў многіх мікраарганізмах. У зялёным лісце пад дзеяннем сонца адбываюцца неабходныя для ўсяго жыцця на Зямлі працэсы. Яны даюць нам ежу, яны ж даюць нам кісларод для дыхання.

Лісце паглынае з паветра вуглякіслы газ і расшчапляе яго малекулы на састаўныя часткі: вуглярод і кісларод. Адбываецца гэта, як устанавіў рускі біёлаг Клімент Аркадзевіч Ціміразеў, у малекулах хларафілу пад дзеяннем чырвоных прамяняў сонечнага спектра. Прыбудоўваючы да вугляроднага ланцужка атамы іншых элементаў, якія здабываюцца каранямі з зямлі, расліны будуую малекулы бялкоў, тлушчаў і вугляводаў.

Усё гэта адбываецца за кошт энергіі сонечных прамяняў. Прычым тут асабліва важная не толькі сама энергія, а тая форма, у якой яна паступае. Фотасінтэз (так называюць гэты працэс) можа адбывацца толькі пад дзеяннем святла пэўнага спектральнага саставу.

Механізм фотасінтэзу яшчэ не высветлены да канца. Калі гэта здарыцца, для чалавецтва, магчыма, наступіць новая эра. Бялкі і іншыя складаныя арганічныя рэчывы можна будзе вырабляць на фабрыках пад блакітным небасхілам.

Хімічнае дзеянне святла ляжыць у аснове фатаграфіі.

Фатаграфія. Адчувальны слой фотапласцінкі складаецца з маленькіх крышталікаў броміду серабра (AgBr), украпаных у жэлацін. Пападанне светлавых квантаў у крышталік прыводзіць да адрыву электронаў ад асобных іонаў броду. Гэтыя электроны захопліваюцца іонамі серабра, і ў крышталіку ўтвараецца невялікая колькасць нейтральных атамаў серабра. Аднак колькасць металічнага серабра, якое вылучыцца за кошт гэтага працэсу, малая.

Сапраўды, можна заўважыць, што фотапласцінка (або фотоплёнка) з цягам часу на святле чарнее, але зусім нязначна. Гэта пачарненне выклікана ўтварэннем металічнага серабра. Атрыманы на фотапласцінцы пад дзеяннем святла відарыс аб'екта называюць *скрытым*.

Пры апрацоўцы пласцінкі першая аперацыя заключаецца ў *праяўленні*. Пласцінка апускаецца ў раствор гідрахінону, метолу або іншых рэчываў, пад дзеяннем якіх ва ўсім крышталіку броміду серабра, які падвяргаўся ўздзеянню святла, адбываецца вылучэнне металічнага серабра. На пласцінцы атрымліваецца негатыўны відарыс аб'екта, у якім месца светлых участкаў займаюць цёмныя, і наадварот (рыс. 164, а).

Наступная аперацыя — *замацаванне* — заключаецца ў тым, што крышталікі броміду серабра, якія засталіся, раствараюцца і вымываюцца. Дзякуючы гэтаму пласцінка робіцца неадчувальнай да святла. Для замацавання пласцінку апускаюць у раствор гіпасульфіту. Пасля прамывання ў вадзе негатыў гатовы.



Рис. 164

а



б

Накладваючы яго на фотапаперу, г. зн. на звычайную паперу з нанесеным на яе святлоадчувальным слоem, атрымліваюць пасля асвятлення і аналагічнай хімічнай апрацоўкі пазітыўны відарыс (рыс. 164, б). На пазітыве ўжо правільна (без пераварочвання) перадаецца размеркаванне светлых і цёмных тонаў.

Фатаграфія вельмі дакладна і на доўгі час здольна зафіксаваць падзеі, якія непазбежна адыходзяць усё далей і далей у мінулае. Вялікае значэнне мае фатаграфія для навукі. Такія хуткія працэсы, як, напрыклад, маланка, можна адлюстравіць на фатаграфіі, а потым дэтальна вывучыць.

Аб'екты, якія пасылаюць такое слабае святло, што іх не адрознівае вока, могуць быць зафіксаваны на фотопласцінцы пры дастаткова вялікай вытрымцы, г. зн. пры вялікім часе асвятлення пласцінкі. Іменна таму такія вельмі аддаленыя ад нас аб'екты, як галактыкі, вывучаюцца па фатаграфіях.

Сучасная тэхніка дазваляе фатаграфавіць не толькі пры бачным святле, але і ў цемнаце пры інфрачырвоных праменях. Фатаграфія выкарыстоўваецца для запісу гуку ў кіно.

ПРАКТЫКАВАННЕ 8

1. Нарысуйце графік залежнасці кінетычнай энергіі і фотаэлектронаў ад частаты святла. Як пры дапамозе такога графіка вызначыць пастаянную Планка?
2. Знайдзіце абсалютны паказчык праламлення асяроддзя, у якім святло з энергіяй фатона $E = 4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж мае даўжыню хвалі $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7}$ м.
3. Вызначце энергію фатона, які адпавядае даўжыні хвалі $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7}$ м.
4. Вызначце даўжыню хвалі λ святла, якім асвятляецца паверхня металу, калі фотаэлектронны маюць кінетычную энергію $W_k = 4,5 \cdot 10^{-20}$ Дж, а работа выхаду электрона з металу $A = 7,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.
5. Якая чырвоная мяжа $\nu_{\min}$ фотаэфекту, калі работа выхаду электрона з металу $A = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Дж?

6. Выпраменьванне з даўжынёй хвалі $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7}$ м пападае на рэчыва, для якога чырвоная мяжа фотаэфекту $\nu_{\min} = 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц. Чаму роўна кінетычная энергія фотаэлектронаў?

7. Які імпульс фатона, калі даўжыня светлавой хвалі $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7}$ м?

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 8¹

1. У пачатку XX ст. зарадзілася квантавая тэорыя — тэорыя руху і ўзаемадзеяння элементарных часціц і сістэм, якія з іх складаюцца.

2. Для тлумачэння заканамернасцей цеплага выпраменьвання М. Планк дапусціў, што атамы выпраменьваюць электрамагнітную энергію не бесперапынна, а асобнымі порцыямі — квантамі. Энергія кожнай порцыі вызначаецца формулай

$$E = h\nu,$$

дзе $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — пастаянная Планка; ν — частата святла.

3. Паглынаецца электрамагнітная энергія таксама асобнымі порцыямі. Гэта пацвярджаецца з'явай фотаэфекту (вырыванне электронаў з рэчыва пад дзеяннем святла). Лік вырваных электронаў прапарцыянальны інтэнсіўнасці выпраменьвання, а кінетычная энергія электронаў вызначаецца толькі частатай святла. Згодна з уяўленнямі Эйнштэйна, паглынутае порцыя энергіі $h\nu$ ідзе на выкананне работы выхаду A па вырыванню электрона з металу і наданне яму кінетычнай энергіі:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Калі частата святла $\nu < \nu_{\min} = \frac{A}{h}$, то фотаэфект не назіраецца.

4. Пры выпраменьванні і паглынванні святло выяўляе карпускулярныя ўласцівасці. Светлавая часціца называецца квантам святла або фатоном. Энергія фатона вызначаецца формулай:

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

дзе $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, а ω — цыклічная частата.

Імпульс p фатона вызначаецца формулай $p = \frac{h}{\lambda}$.

5. У працэсе свайго распаўсюджвання святло выяўляе хвалевыя ўласцівасці (з'явы інтэрферэнцыі і дыфракцыі).

6. Святло валодае дуалізмам (дваістасцю) уласцівасцей. Пазней было ўстаноўлена існаванне карпускулярна-хвалевага дуалізму ва ўсіх элементарных часціцах.

¹ Лік істотных пунктаў 7—9.

7. Фотаэфект шырока выкарыстоўваецца ў тэхніцы. З дапамогай спецыяльных прыбораў — фотаэлементаў — энергія святла кіруе энергіяй электрычнага току або ператвараецца ў яе. Фотаэлементы прымяняюцца ў розных «бачачых» аўтаматах. На з'яве фотаэфекту заснавана будова сонечных батарэй.

8. З тэорыі Максвела вынікала, што святло аказвае ціск на перашкоды. Ціск гэты вельмі малы. Ён быў упершыню выяўлены і вымераны П. М. Лебедзевым.

9. Паглыннанне святла рэчывам суправаджаецца хімічным дзеяннем святла. У зялёных лістах раслін і многіх мікраарганізмах найважнейшыя хімічныя рэакцыі адбываюцца пад дзеяннем святла. Вуглякіслы газ паглынаецца з атмасферы лістамі і расшчапляецца на вуглярод і кісларод. У гэтым заключаецца працэс фотасінтэзу.

Раздзел 9

АТАМНАЯ ФІЗІКА

Адкрыццё складанай будовы атама — найважнейшы этап становлення сучаснай фізікі, які зрабіў адбітак на ўсё яе далейшае развіццё. У працэсе стварэння колькаснай тэорыі будовы атама, якая дазволіла растлумачыць атамныя спектры, былі адкрыты новыя законы руху мікрачасціц — законы квантавай механікі.

§ 72. БУДОВА АТАМА. ДОСЛЕДЫ РЭЗЕРФОРДА

Англійскі фізік Эрнест Рэзерфорд даследаваў рассяйванне α -часціц рэчывам і адкрыў у 1911 г. атамнае ядро — масіўнае ўтварэнне, у дзесяць тысяч разоў меншае па размерах за атам.

Мадэль Томсана. Не адразу вучоныя прыйшлі да правільных уяўленняў аб будове атама. Першая мадэль атама была прапанавана англійскім фізікам Дж. Дж. Томсанам, які адкрыў электрон. На думку Томсана, дадатны зарад атама займае ўвесь аб'ём атама і размеркаваны ў гэтым аб'ёме з пастаяннай шчыльнасцю. Найпрасцейшы атам — атам вадароду — з'яўляецца дадатна зараджаным шарам радыусам каля 10^{-8} см, унутры якога знаходзіцца электрон. У больш складаных атамаў у дадатна зараджаным шары знаходзіцца некалькі электронаў, так што атам падобны да кекса, у якім ролю разынак адыгрываюць электроны.

Аднак мадэль атама Томсана аказалася ў поўнай супярэчнасці з даследамі па даследаванні размеркавання дадатнага зараду ў атаме. Гэтыя доследы, праведзеныя ўпершыню вялікім англійскім вучоным Э. Рэзерфордам, адыгралі вялікую ролю ў разуменні будовы атама.

Доследы Рэзерфорда. Маса электронаў у некалькі тысяч



Рэзерфорд Эрнест (1871—1937) — вялікі англійскі фізік, ураджэнец Новай Зеландыі. Сваімі эксперыментальнымі адкрыццямі Рэзерфорд заклаў асновы сучаснага вучэння аб будове атама і радыеактыўнасці. Ён першым даследаваў састаў выпраменьванняў радыеактыўных рэчываў. Рэзерфорд адкрыў існаванне атамнага ядра і ўпершыню ажыццявіў штучнае ператварэнне атамных ядзер. Усе пастаўлены ім доследы насілі фундаментальны характар, вызначаліся выключнай прастатой і яснасцю.

разоў меншая за масу атамаў. Паколькі атам у цэлым нейтральны, то, значыць, асноўная маса атама прыпадае на яго дадатна зараджаную частку.

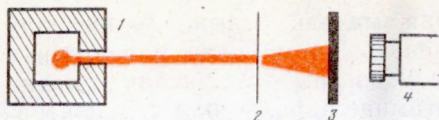
Для эксперыментальнага даследавання размеркавання дадатнага зараду, а значыць, і масы ўнутры атама Рэзерфорд прапанаваў у 1906 г. прымяніць заздзіраванне атама з дапамогай α -часціц. Гэтыя часціцы ўзнікаюць пры распадзе радыю і некаторых іншых элементаў. Іх маса прыкладна ў 8000 разоў большая за масу электрона, а дадатны зарад роўны па модулю падвоенаму зараду электрона. Гэта не што іншае, як поўнаасцю іанізаваныя атамы гелію. Скорасць α -часціц вельмі вялікая: яна складае $\frac{1}{15}$ скорасці святла.

Гэтымі часціцамі Рэзерфорд бамбардзіраваў атамы цяжкіх элементаў. Электроны з прычыны сваёй малой масы не могуць прыметна змяніць траекторыю α -часціцы, падобна да таго як каменьчык у некалькі дзесяткаў грамаў пры сутыкненні з аўтамабілем не можа прыметна змяніць яго скорасць.

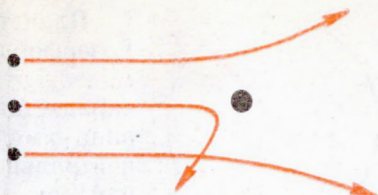
Рассейванне (змена напрамку руху) α -часціц можа выклікаць толькі дадатна зараджаная частка атама. Такім чынам, па расейванню α -часціц можна вызначыць характар размеркавання дадатнага зараду і масы ўнутры атама. Схема доследаў Рэзерфорда паказана на рысунку 165.

Радыеактыўны прэпарат, напрыклад радый, змяшчаўся ўнутр свінцовага цыліндра 1, уздоўж якога быў высвідраваны вузкі канал. Пучок α -часціц з канала падаў на тонкую фольгу 2 з да следуемага матэрыялу (золата, медзь і інш.). Пасля расейвання α -часціцы траплялі на паўпразрысты экран 3, пакрыты сульфідам цынку. Сутыкненне кожнай часціцы з экранам суправаджалася ўспышкай святла (сцынтыляцыяй), якую можна было назіраць у мікраскоп 4. Увесь прыбор змяшчаўся ў сасудзе, з якога выпавана паветра.

Пры добрым вакууме ўнутры прыбора ў адсутнасці фольгі на экране ўзнікаў светлы кружок, які складаўся са сцынтыляцый, выкліканых тонкім пучком α -часціц. Але калі на шляху пучка змяшчалі фольгу, то α -часціцы з-за расейвання размяркоўваліся на экране па кружку большай плошчы.



Рыс. 165



Рыс. 166

Мадфікуючы эксперыментальную ўстаноўку, Рэзерфорд паспрабаваў выявіць адхіленне α -часціц на вялікія вуглы. Зусім нечакана выявілася, што невялікі лік α -часціц (прыкладна адна з дзвюх тысяч) адхіліўся на вуглы, большыя за 90° . Пазней Рэзерфорд прызнаўся, што, прапанаваўшы сваім вучням эксперымент па назіранні рассейвання α -часціц на вялікія вуглы, ён сам не верыў у станючы вынік. «Гэта амаль гэтак жа неверагодна, — гаварыў Рэзерфорд, — як калі б вы выстралілі 15-цалёвым снарадам у кавалак тонкай паперы, а снарад вярнуўся б да вас і нанёс вам удар».

На самай справе, прадбачыць гэты вынік на аснове мадэлі Томсана было нельга. Пры размеркаванні па ўсяму атаму дадатны зарад не можа стварыць дастаткова інтэнсіўнае электрычнае поле, здольнае адкінуць α -часціцу назад. Максімальная сіла адштурхвання вызначаецца па закону Кулона:

$$F_{\max} = \frac{q_{\alpha}q}{4\pi\epsilon_0 R^2}, \quad (9.1)$$

дзе q_{α} — зарад α -часціцы, q — дадатны зарад атама, R — яго радыус, ϵ_0 — электрычная пастаянная. Напружанасць электрычнага поля раўнамерна зараджанага шара максімальная на яго паверхні і памяншаецца да нуля па меры прыбліжэння да цэнтара шара. Таму, чым меншы радыус R , тым большая сіла, якая адштурхвае α -часціцы.

Вызначэнне размераў атамнага ядра. Рэзерфорд зразумеў, што α -часціца магла быць адкінута назад толькі ў тым выпадку, калі дадатны зарад атама і яго маса сканцэнтраваны ў вельмі малой вобласці прасторы. Так Рэзерфорд прыйшоў да ідэі атамнага ядра — *цэла малых размераў, у якім сканцэнтраваны амаль уся маса і ўвесь дадатны зарад атама.*

На рысунку 166 паказаны траекторыі α -часціц, якія пралятаюць на розных адлегласцях ад ядра.

Падлічваючы лік α -часціц, рассейных на розныя вуглы, Рэзерфорд змог ацаніць размеры ядра. Аказалася, што ядро мае дыяметр парадку 10^{-12} — 10^{-13} см (у розных ядзер дыяметры розныя). Размер жа самога атама 10^{-8} см, г. зн. у 10—100 тыс. разоў перавышае размеры ядра. Пазней удалося вызначыць і зарад ядра. Пры ўмове, што зарад электрона прыняты за адзінку, зарад ядра дакладна роўны нумару дадзенага хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме Мендзялеева.

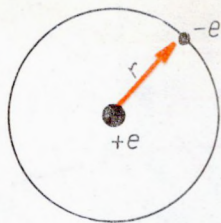


Рис. 167

Планетарная мадэль атама. З доследаў Рэзерфорда непасрэдна вынікае планетарная мадэль атама. У цэнтры размешчана дадатна зараджанае атамнае ядро, у якім сканцэнтравана амаль уся маса атама. У цэлым атам нейтральны. Таму лік унутрыатамных электронаў, як і зарад ядра, роўны парадкаваму нумару элемента ў перыядычнай сістэме. Зразумела, што знаходзіцца ў спакоі электроны ўнутры атама не могуць, паколькі яны ўпалі б

на ядро. Яны рухаюцца вакол ядра, падобна да таго як планеты абарачаюцца вакол Сонца. Такі характар руху электронаў вызначаецца дзеяннем кулонаўскіх сіл з боку ядра.

У атаме вадароду вакол ядра абарачаецца ўсяго толькі адзін электрон. Ядро атама вадароду мае дадатны зарад, роўны па модулю зараду электрона, і масу, прыкладна ў 1836,1 раза большую за масу электрона. Гэта ядро атрымала назву пратона і стала разглядацца як элементарная часціца. Размер атама — гэта радыус арбіты яго электрона (рис. 167).

Простая і наглядная планетарная мадэль атама мае прамое эксперыментальнае абгрунтаванне. Яна здаецца зусім неабходнай для тлумачэння доследаў па рассяванні α -часціц. Але на аснове гэтай мадэлі нельга растлумачыць факт існавання атама, яго ўстойлівасць. Рух жа электронаў па арбітах адбываецца з паскарэннем, прычым даволі не малым. Зарад, які рухаецца паскорана, па законах электрадынамікі Максвела павінен выпраменьваць электрамагнітныя хвалі з частатой, роўнай частаце яго абарачэння вакол ядра. Выпраменьванне суправаджаецца стратай энергіі. Трацянцы энергію, электроны павінны набліжацца да ядра, падобна да таго як спадарожнік набліжаецца да Зямлі пры тармажэнні ў верхніх слаях атмасферы. Як паказваюць строгія разлікі, заснаваныя на механіцы Ньютана і электрадынаміцы Максвела, электрон за мізэрна малы час (парадку 10^{-8} с) павінен упасці на ядро. Атам павінен спыніць сваё існаванне.

У сапраўднасці нічога падобнага не адбываецца. Атамы ўстойлівыя і ў няўзбуджаным стане могуць існаваць неабмежавана доўга, зусім не выпраменьваючы электрамагнітныя хвалі.

Не ўзгадняльны з доследам вывад аб непазбежнай гібелі атама з прычыны страты энергіі на выпраменьванне — гэта вынік прымянення законаў класічнай фізікі да з'яў, якія адбываюцца ўнутры атама. Адсюль вынікае, што да з'яў атамных маштабаў законы класічнай фізікі непряманыя.

Рэзерфорд стварыў планетарную мадэль атама: электроны абарачаюцца вакол ядра, падобна да таго як планеты абарачаюцца вакол Сонца. Гэта мадэль простая, абгрунтавана эксперыментальна, але не дазваляе растлумачыць устойлівасць атамаў.

Бор Нільс (1885—1962) — вялікі дацкі фізік. Стварыў першую квантавую тэорыю атама і затым прыняў самы актыўны ўдзел у распрацоўцы асноў квантавай механікі. Разам з гэтым Бор унёс вялікі ўклад у тэорыю атамнага ядра і ядзерных рэакцый. Ён, у прыватнасці, развіў тэорыю дзялення атамных ядзер, у працэсе якога вылучаецца велізарная энергія. У Капенгагене Бор стварыў вялікую інтэрнацыянальную школу фізікаў і многа зрабіў для развіцця супрацоўніцтва паміж фізікамі ўсяго свету. Бор актыўна ўдзельнічаў у барацьбе супраць атамнай пагрозы чалавецтву.



1. Чаму адмоўна зараджаныя часціцы атама не аказваюць прыметнага ўплыву на рассеяванне α -часціц? **2.** Чаму α -часціцы не маглі б рассеявацца на вялікіх вуглы, калі б дадатны зарад атама быў размеркаваны па ўсяму яго аб'ёму? **3.** Планетарная мадэль атама не ўгадняецца з законамі класічнай фізікі. Чаму?

§ 73. КВАНТАВЫЯ ПАСТУЛАТЫ БОРА. МАДЭЛЬ АТАМА ВАДАРОДУ ПА БОРУ

Выхад з вельмі цяжкага становішча быў знойдзены ў 1913 г. дацкім фізікам Нільсам Борам на шляху далейшага развіцця квантавых уяўленняў аб працэсах у прыродзе.

Эйнштэйн ацэньваў зробленую Борам работу «як вышэйшую музычнасць у галіне думкі», якая заўсёды яго здзіўляла. Абапіраючыся на разрозненыя доследныя факты, Бор з дапамогай геніяльнай інтуіцыі правільна ўгадаў сутнасць справы.

Пастулаты Бора. Паслядоўнай тэорыі атама Бор, аднак, не даў. Ён у выглядзе пастулатаў сфармуляваў асноўныя палажэнні новай тэорыі. Прычым і законы класічнай фізікі не адхіляліся ім безагаворачна. Новыя пастулаты хутчэй накладвалі толькі некаторыя абмежаванні на рухі, якія дапускаюцца класічнай фізікай руху.

Поспех тэорыі Бора быў тым не менш надзвычайным, і ўсім вучоным стала зразумела, што Бор знайшоў правільны шлях развіцця тэорыі. Гэты шлях прывёў пазней да стварэння стройнай тэорыі руху мікрачасціц — квантавай механікі.

Першы пастулат Бора гаворыць: атамная сістэма можа знаходзіцца толькі ў асобых стацыянарных, або квантавых, станах, кожнаму з якіх адпавядае пэўная энергія E_n ; у стацыянарным стане атам не выпраменьвае.

Гэты пастулат супярэчыць класічнай механіцы, згодна з якой энергія электронаў, якія рухаюцца, можа быць любой. Супярэчыць ён і электрадынаміцы Максвела, таму што дапускае маг-

чымасць паскоранага руху электронаў без выпраменьвання электрамагнітных хваль.

Згодна з *другім пастулатам* Бора **выпраменьванне святла адбываецца пры пераходзе атама са стацыянарнага стану з большай энергіяй E_k у стацыянарны стан з меншай энергіяй E_n . Энергія выпраменьванага фатона роўна рознасці энергій стацыянарных станаў:**

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \quad (9.2)$$

Адсюль частату выпраменьвання можна выразіць так:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \quad (9.3)$$

Пры паглыннанні святла атам пераходзіць са стацыянарнага стану з меншай энергіяй у стацыянарны стан з большай энергіяй.

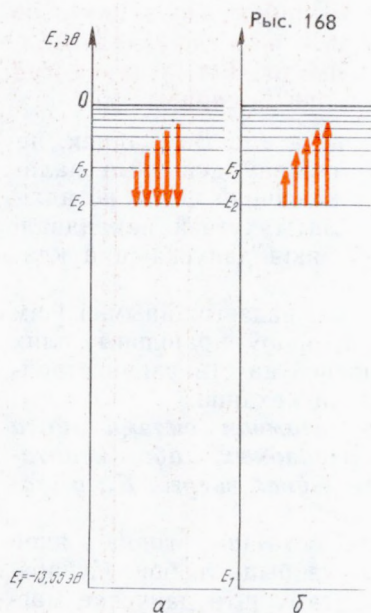
Другі пастулат таксама супярэчыць электрадынаміцы Максвела, паколькі згодна з гэтым пастулатам частата выпраменьвання святла сведчыць не аб асаблівасцях руху электрона, а толькі аб змяненні энергіі атама.

Свае пастулаты Бор прымяніў для пабудавання тэорыі найпрасцейшай атамнай сістэмы — атама вадароду. Асноўная задача заключалася ў знаходжанні частот электрамагнітных хваль, якія выпраменьваюцца вадародам. Гэтыя частоты можна знайсці на аснове другога пастулата, калі мець правіла вызначэння стацыянарных значэнняў энергіі атама. Гэта правіла (так званае правіла квантавання) Бору зноў-такі прыйшлося пастуліраваць.

Мадэль атама вадароду па

Бору. Выкарыстоўваючы законы механікі Ньютана і правіла квантавання, якое адбірае магчымыя стацыянарныя станы, Бор змог вылічыць дапушчальныя радыусы арбіт электрона і энергіі стацыянарных станаў. Мінімальны радыус арбіты вызначае размеры атама. На рысунку 168, *а, б* значэнні энергій стацыянарных станаў (у электронвольтах¹) адкладзены на вертыкальных восях.

Другі пастулат Бора дазваляе вылічыць па вядомых значэннях энергій стацыянарных станаў частоты выпраменьванняў атама



¹ У атамнай фізіцы энергію прынята выражаць у электронвольтах (скарочана: эВ). 1 эВ роўны энергіі, якую набывае электрон пры праходжанні рознасці патэнцыялаў 1 В; 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

вадароду. Тэорыя Бора прыводзіць да колькаснага пагаднення з эксперыментам для значэнняў гэтых частот. Усе частоты выпраменьванняў атама вадароду складаюць рад серый, кожная з якіх утвараецца пры пераходах атама ў адзін з энергетычных станаў з усіх верхніх энергетычных станаў (станаў з большай энергіяй).

Пераходы з першага ўзбуджанага стану (на другі энергетычны ўзровень) з верхніх узроўняў утвараюць *серыю Бальмера*. На рысунку 168, *а* гэтыя пераходы паказаны стрэлкамі. Чырвоная, зялёная і дзве сінія лініі ў бачнай частцы спектра вадароду (рыс. V, 3 на каляровай уклеіцы) адпавядаюць пераходам

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2 \text{ і } E_6 \rightarrow E_2.$$

Дадзеная серыя названа па імені швейцарскага настаўніка І. Бальмера, які яшчэ ў 1885 г. на аснове эксперымента ўстанавіў простую формулу для вызначэння частот бачнай часткі спектра вадароду.

Паглыннанне святла. Паглыннанне святла — працэс, адваротны выпраменьванню. Атам, паглынаючы святло, пераходзіць з ніжэйшых энергетычных станаў у вышэйшыя. Пры гэтым частоты святла, якое ён паглынае, такія ж, што і святла, якое ён выпраменьвае, пераходзячы з вышэйшых энергетычных станаў у ніжэйшыя. На рысунку 168, *б* стрэлкамі паказаны пераходы атама з адных станаў у другія з паглыннаннем святла.

На аснове двух пастулатаў і правіла квантавання Бор вызначыў радыус атама вадароду і энергіі стацыянарных станаў атама. Гэта дазволіла вылічыць частоты выпраменьваемых і паглынаемых атамаў электрамагнітных хваль.



1. У чым заключаюцца процілегласці паміж пастулатамі Бора і законамі класічнай фізікі? 2. Якое выпраменьванне назіраецца пры пераходзе электрона ў атаме вадароду на ніжэйшы энергетычны ўзровень? Пакажыце стрэлкамі гэтыя пераходы на схеме энергетычных узроўняў (гл. рыс. 168).

§ 74. ЦЯЖКАСЦІ ТЭОРЫІ БОРА. КВАНТАВАЯ МЕХАНІКА

Найбольшы поспех тэорыя Бора мела прымяняльна да атама вадароду, для якога аказалася магчымым пабудаваць колькасную тэорыю спектра.

Аднак пабудаваць колькасную тэорыю для наступнага за вадародам атама гелію на падставе бораўскіх уяўленняў не ўдалося. Адносна атама гелію і больш складаных атамаў тэорыя Бора дазваляла рабіць толькі якасныя (хоць і вельмі важныя) заключэнні.

Гэта і не дзіўна. Тэорыя Бора з'яўляецца палавінчатай, унутрана супярэчлівай. З аднаго боку, пры пабудаванні тэорыі атама

вадароду выкарыстоўваюцца звычайныя законы механікі Ньютана і даўно вядомы закон Кулона, а з другога — уводзяцца квантавыя пастулаты, ніяк не звязаныя з механікай Ньютана і электрадынамікай Максвела. Увядзенне ў фізіку квантавых уяўленняў патрабавала радыкальнай перабудовы як механікі, так і электрадынамікі. Гэта перабудова была ажыццёўлена ў пачатку другой чвэрці нашага стагоддзя, калі былі створаны новыя фізічныя тэорыі: квантавая механіка і квантавая электрадынаміка.

Пастулаты Бора аказаліся зусім правільнымі. Але яны выступалі ўжо не як пастулаты, а як вынікі асноўных прынцыпаў гэтых тэорый. Правіла ж квантавання Бора, як высветлілася, можна прымяніць далёка не заўсёды.

Уяўленне аб пэўных арбітах, па якіх рухаецца электрон у атаме Бора, аказалася вельмі ўмоўным. На самай справе рух электрона ў атаме мае вельмі мала агульнага з рухам планет па арбітах. Калі б атам вадароду ў найніжэйшым энергетычным стане можна было сфатаграфавать з вялікай вытрымкай, то мы ўбачылі б воблака з пераменнай шчыльнасцю. Большую частку часу электрон знаходзіцца на пэўнай адлегласці ад ядра. Гэту адлегласць можна прыняць за грубае падабенства радыуса арбіты. Фатаграфія атама зусім не была б падобнай на звычайны рысунак Сонечнай сістэмы, а хутчэй напамінала б распылівістую пляму, атрыманую пры фатаграфаванні матылька, які бязладна тоўкся каля ліхтара¹.

У цяперашні час з дапамогай квантавай механікі можна адказаць на любое пытанне, якое датычыцца будовы і ўласцівасцей электронных абалонак атамаў. Але колькасная тэорыя аказваецца вельмі складанай, і мы яе разглядаць не будзем. З якасным апісаннем электронных абалонак атамаў вы знаёміліся ў курсе хіміі.

§ 75. ЛАЗЕРЫ

На пытанне аб тым, што такое *лазер*², акадэмік М. Г. Басаў адказваў так: «Лазер — гэта ўстройства, у якім энергія, напрыклад цеплавая, хімічная, электрычная, пераўтвараецца ў энергію электрамагнітнага поля — лазерны прамень. Пры такім пераўтварэнні частка энергіі непазбежна губляецца, але важным з'яўляецца тое, што атрыманая ў выніку лазерная энергія ўладае больш высокай якасцю. Якасць лазернай энергіі вызначаецца яе высо-

¹ Тут трэба мець на ўвазе сходнасць карцін толькі ў сярэднім, за параўнальна вялікі час вытрымкі. Рух электрона ніяк нельга атаясамліваць з пыханнем матылька, роўна як і з рухам любога іншага макраскапічнага цела.

² Слова *лазер* утворана як спалучэнне першых літар слоў англійскага выразу "Light Amplification by stimulated Emission of Radiation", («узмацненне святла пры дапамозе індукіраванага выпраменьвання»).

кай канцэнтрацыяй і магчымасцю перадачы на значную адлегласць. Лазерны прамень можна сфакусіраваць у малюсенькую плямачку дыяметрам парадку даўжынні светлавой хвалі і атрымаць шчыльнасць энергіі, якая перавышае ўжо на сённяшні дзень шчыльнасць энергіі ядзернага выбуху. Пры дапамозе лазернага выпраменьвання ўжо ўдалося дасягнуць самых высокіх значэнняў тэмпературы, ціску, магнітнай індукцыі. Нарэшце лазерны прамень з'яўляецца самым ёмкім носьбітам інфармацыі і ў гэтай ролі — прынцыпова новым сродкам яе перадачы і апрацоўкі».

Індуцыраванае выпраменьванне. У 1917 г. Эйнштэйн прадказаў магчымасць так званага *індуцыраванага* (вымушанага) выпраменьвання святла атамамі. Пад *індуцыраваным выпраменьваннем* разумеецца выпраменьванне ўзбуджаных атамаў пад дзеяннем падаючага на іх святла. Выдатнай асаблівасцю гэтага выпраменьвання з'яўляецца тое, што *ўзнікшая пры індукцыраваным выпраменьванні светлавая хваля не адрозніваецца ад хвалі, якая падае на атам, ні частотой, ні фазай, ні палярызаванасцю*.

На мове квантавай тэорыі вымушанае выпраменьванне азначае пераход атама з вышэйшага энергетычнага стану ў ніжэйшы, але не самаадвольна, як пры звычайным выпраменьванні, а пад уплывам знешняга ўздзеяння.

Лазеры. Яшчэ ў 1940 г. савецкі фізік В. А. Фабрыкант указаў на магчымасць выкарыстання з'явы вымушанага выпраменьвання для ўзмацнення электрамагнітных хваль. У 1954 г. савецкія вучоныя М. Г. Басаў і А. М. Прохараў і незалежна ад іх амерыканскі фізік Ч. Таўнс выкарысталі з'яву індукцыраванага выпраменьвання для стварэння мікрахвалевага генератара радыёхваль з даўжынёй хвалі $\lambda = 1,27$ см. За распрацоўку новага прынцыпу генерацыі і ўзмацнення радыёхваль М. Г. Басаву і А. М. Прохарава была ў 1959 г. прысуджана Ленінская прэмія. У 1963 г. М. Г. Басаў, А. М. Прохараў і Ч. Таўнс былі ўдасцены Нобелеўскай прэміі.

У 1960 г. у ЗША быў створаны першы лазер — квантавы генератар электрамагнітных хваль у бачным дыяпазоне спектра.

Уласцівасці лазернага выпраменьвання. Лазерныя крыніцы святла маюць рад істотных пераваг у параўнанні з іншымі крыніцамі святла:

1. Лазеры здольны ствараць пучкі святла з вельмі малым вуглом разыходжання (каля 10^{-5} рад). На Месяцы такі пучок, выпушчаны з Зямлі, дае пляму дыяметрам 3 км.

2. Святло лазера валодае выключнай монахраматычнасцю. У адрозненне ад звычайных крыніц святла, атамы якіх выпраменьваюць святло незалежна адзін ад аднаго, у лазерах атамы выпраменьваюць святло ўзгоднена. Таму фаза хвалі не зведвае нерэгулярных змяненняў.

3. Лазеры з'яўляюцца самымі магутнымі крыніцамі святла. У вузкім інтэрвале спектра кароткачасова (на працягу прамежку

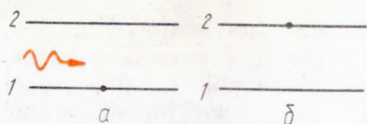


Рис. 169

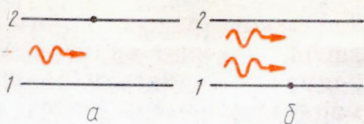


Рис. 170

часу працягласцю парадку 10^{-11} с) у некаторых тыпаў лазераў дасягаецца магутнасць выпраменьвання 10^{14} Вт/см², у той час як магутнасць выпраменьвання Сонца роўна толькі $7 \cdot 10^3$ Вт/см², прычым сумарна па ўсяму спектру. На вузкі ж інтэрвал $\Delta\lambda = 10^{-6}$ см (шырыня спектральнай лініі лазера) прыпадае ў Сонца ўсяго толькі 0,2 Вт/см². Напружанасць электрычнага поля ў электрамагнітнай хвалі, якую выпраменьвае лазер, перавышае напружанасць поля ўнутры атама.

Прынцып дзеяння лазераў. У звычайных умовах большасць атамаў знаходзіцца ў ніжэйшым энергетычным стане. Таму пры нізкіх тэмпературах рэчывы не свеціцца.

Пры праходжанні электрамагнітнай хвалі праз рэчыва яе энергія паглынаецца. За кошт паглынутае энергіі хвалі частка атамаў узбуджаецца, г. зн. пераходзіць у вышэйшы энергетычны стан. Пры гэтым ад светлавога пучка аднімаецца энергія

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

роўная рознасці энергій паміж узроўнямі 2 і 1. На рысунку 169, а схематычна паказаны няўзбуджаны атам і электрамагнітная хваля ў выглядзе адрэзка сінусоіды. Электрон знаходзіцца на ніжнім узроўні. На рысунку 169, б паказаны ўзбуджаны атам, які паглынуў энергію. Узбуджаны атам можа аддаць сваю энергію суседнім атамам пры сутыкненні або выпраменіць фатон у любым напрамку.

Цяпер уявім сабе, што якім-небудзь спосабам мы ўзбудзілі большую частку атамаў асяроддзя. Тады пры праходжанні праз рэчыва электрамагнітнай хвалі з частатой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

гэта хваля будзе не аслабляцца, а, наадварот, узмацняцца за кошт індукцыраванага выпраменьвання. Пад яе ўздзеяннем атамы ўзгоднена пераходзяць у ніжэйшыя энергетычныя станы, выпраменьваючы хвалі, якія супадаюць па частаце і фазе з падаючай хваляй. На рысунку 170, а паказаны ўзбуджаны атам і хваля, а на рысунку 170, б схематычна паказана, што атам перайшоў у асноўны стан, а хваля ўзмацнілася.

Трохузроўневая сістэма. Існуюць розныя метады атрымання асяроддзя з узбуджанымі станамі атамаў. У рубінавым лазеры для гэтага выкарыстоўваецца спецыяльная магутная лямпа. Атамы ўзбуджаюцца за кошт паглынання святла.

Але двух устроюў энергіі для работы лазера недастаткова. Якім бы магутным ні было святло лампы, лік узбуджаных атамаў не будзе большы за лік няўзбуджаных, бо святло адначасова і ўзбуджае атамы, і выклікае індукцыраваныя пераходы з верхняга ўстрою на ніжні.

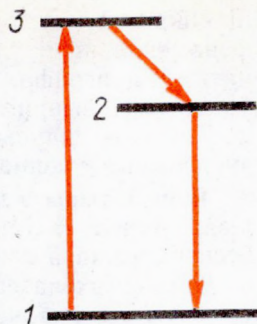
Выход быў знойдзены ў выкарыстанні трох энергетычных устроюў (агульны лік устроюў заўсёды вялікі, але гаворка ідзе аб «працуючых» устроюх). На рысунку 171 паказаны тры энергетычныя ўстроі. Істотна, што пры адсутнасці знешняга ўздзеяння час, на працягу якога атамная сістэма знаходзіцца ў розных энергетычных станах («час жыцця»), неаднолькавы. На ўстроі 3 сістэма жыве вельмі мала, парадку 10^{-8} с, пасля чаго самаадвольна пераходзіць у стан 2 без выпраменьвання святла. (Энергія пры гэтым перадаецца крышталічнай рашотцы.) «Час жыцця» ў стане 2 у 100 000 разоў большы, г. зн. складае каля 10^{-3} с. Пераход са стану 2 ў стан 1 пад дзеяннем знешняй электрамагнітнай хвалі суправаджаецца выпраменьваннем. Гэта выкарыстоўваецца ў лазерах. Пасля ўспышкі магутнай лампы сістэма пераходзіць у стан 3 і праз прамежак часу каля 10^{-8} с аказваецца ў стане 2, у якім жыве параўнальна доўга. Такім чынам і ствараецца «перанаселенасць» узбуджанага ўстрою 2 у параўнанні з няўзбуджаным устроём 1.

Неабходныя энергетычныя ўстроі ёсць у крышталях рубіну. Рубін — гэта ярка-чырвоны крышталі аксід алюминію Al_2O_3 з прымессю атамаў хрому (каля 0,05 %). Менавіта ўстроі іонаў хрому ў крышталі валодаюць патрабуемымі ўласцівасцямі.

Будова рубінавага лазера. З крышталі рубіну вырабляецца стрыжань з плоскапаралельнымі тарцамі. Газаразрадная лампа, якая мае форму спіралі (рыс. 172), дае сіне-зялёнае святло. Кароткачасовы імпульс току ад батарэі кандэнсатараў ёмістасцю ў некалькі тысяч мікрафарад выклікае яркую ўспышку лампы. Праз малы час энергетычны ўзровень 2 становіцца «перанаселеным».

У выніку самаадвольных пераходаў $2 \rightarrow 1$ пачынаюць выпраменьвацца хвалі разнастайных напрамкаў. Тыя з іх, якія ідуць пад вуглом да восі крышталі, выходзяць з яго і не адыгрываюць у далейшых працэсах ніякай ролі. Але хваля, якая ідзе ўздоўж восі крышталі, шматкратна адбіваецца ад яго тарцоў. Яна выклікае індукцыраванае выпраменьванне ўзбуджаных іонаў хрому і хутка ўзмацняецца.

Адзін з тарцоў рубінавага стрыжня робяць люстраным, а другі — паўпразрыстым. Праз яго выходзіць магутны кароткачасовы (працягласцю каля сот-



Рыс. 171



Рыс. 172

ні мікрасекунд) імпульс чырвонага святла, які валодае тымі фенаменальнымі ўласцівасцямі, пра якія было расказана ў пачатку параграфа. Хваля з'яўляецца кагерэнтнай, таму што ўсе атамы выпраменьваюць узгоднена, і вельмі магутнай, паколькі пры індукцыраваным выпраменьванні ўся назапашаная энергія вылучаецца за вельмі кароткі час.

Іншыя тыпы лазераў. Рубінавы лазер, з якім мы пазнаёміліся, працуе ў імпульсным рэжыме. Існуюць таксама лазеры бесперапыннага дзеяння.

У газавых лазерах гэтага тыпу рабочым рэчывам з'яўляецца газ. Атамы рабочага рэчыва ўзбуджаюцца электрычным разрадам.

Прымяняюцца і паўправадніковыя лазеры бесперапыннага дзеяння. Яны створаны ўпершыню ў нашай краіне. У іх энергія для выпраменьвання запазычваецца ад электрычнага току.

Створаны вельмі магутныя газадынамічныя лазеры бесперапыннага дзеяння на сотні кілават. У гэтых лазерах «перанаселенасць» верхніх энергетычных узроўняў ствараецца пры расшырэнні і адсягнутым ахаладжэнні звышгукавых газавых патокаў, нагрэтых да некалькіх тысяч кельвін.

Прыманенне лазераў. Вельмі перспектыўнае прыманенне лазернага праменя для сувязі, асабліва ў касмічнай прасторы, дзе няма паглынаючых святло воблакаў.

Велізарная магутнасць лазернага праменя выкарыстоўваецца для выпарэння матэрыялаў у вакууме, для зваркі і г. д. З дапамогай праменя лазера можна рабіць хірургічныя аперацыі, напрыклад «прыварваць» сятчатку, якая адслаілася ад вочнага дна; атрымліваць аб'ёмныя відарысы прадметаў, выкарыстоўваючы кагерэнтнасць лазернага праменя.

Лазеры дазволілі ажыццявіць святлолакатар, з дапамогай якога адлегласць да прадметаў вымяраецца з дакладнасцю да некалькіх міліметраў. Такая дакладнасць недаступна для радыёлакатараў.

Узбуджаючы лазерным выпраменьваннем атамы або малекулы, можна выклікаць паміж імі хімічныя рэакцыі, якія ў звычайных умовах не ідуць.

Перспектыўна выкарыстанне магутных лазерных праменяў для ажыццяўлення кіруемай тэрмаядзернай рэакцыі (гл. раздзел 10).

У цяперашні час лазеры атрымалі такія разнастайныя і шматлікія прыманенні, што і пералічыць іх тут немагчыма.

Стварэнне лазера — прыклад таго, як развіццё фундаментальнай навукі (квантавай тэорыі) прыводзіць да гіганцкага прагрэсу ў самых розных галінах тэхнікі і тэхналогіі.

?

1. Чым адрозніваецца выпраменьванне лазера ад выпраменьвання лампы напальвання? 2. Пералічыце асноўныя прыманенні лазераў.

ПРАКТЫКАВАННЕ 9

1. Якія скорасць v і паскарэнне a электронаў на першай бораўскай арбіце, радыус якой вызначаецца формулай $r_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2}$, дзе m і e — адпаведна маса і зарад электрона, $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(Н·м²) — электрычная пастаянная?

2. На якую мінімальную адлегласць зблізяцца пры цэнтральным удары α -часціцы і ядро волава? Скорасць α -часціцы роўна 10^9 см/с, яе маса — $6,7 \cdot 10^{-24}$ г. (Ядро волава лічыць нерухомым.)

3. Вызначце даўжыню хвалі святла, якое выпраменьваецца атамам вадароду пры яго пераходзе са стацыянарнага стану з энергіяй $E_4 = -1,7$ эВ ($k=4$) у стан з энергіяй $E_2 = -6,8$ эВ ($n=2$).

4. Вызначце па рысунку 168 энергію іанізацыі атама вадароду.

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 9¹

1. Рэзерфорд, даследуючы рассеіванне α -часціц рэчывам, устанавіў існаванне атамнага ядра. Дадатны зарад і амаль уся маса атама сканцэнтраваны ў атамным ядры, размеры якога складаюць $10^{-12} - 10^{-13}$ см. (Гэта ў $10-100$ тысяч разоў менш за размер атама.) Зарад атамнага ядра роўны парадкаваму нумару элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Д. І. Мендзялеева, памножанаму на модуль зараду электрона. Ядром атама вадароду з'яўляецца пратон.

2. На аснове сваіх доследаў Рэзерфорд прапанаваў планетарную мадэль атама. Электроны ў гэтай мадэлі абарачаюцца вакол ядра, падобна да таго як планеты абарачаюцца вакол Сонца. Аднак такія атам згодна з законамі класічнай фізікі не можа быць устойлівым. Электроны павінны выпраменьваць, трацячы энергію, і ўпасці на ядро. У сапраўднасці ж усе атамы ўстойлівыя.

3. Выхад з гэтых цяжкасцей быў знойдзены Борам на шляху далейшага развіцця квантавай тэорыі. Бор прапанаваў два пастулаты, якія ідуць уразрэз з класічнай механікай Ньютана і электрадынамікай Максвела.

Першы пастулат Бора гаворыць: атамная сістэма можа знаходзіцца толькі ў асобых стацыянарных, або квантавых, станах, кожнаму з якіх адпавядае пэўная энергія E_n ; у стацыянарным стане атам не выпраменьвае.

Згодна з другім пастулатам Бора, выпраменьванне або паглыннанне святла адбываецца пры пераходзе атама з аднаго стацыянарнага стану ў другі. Энергія выпраменьваемага або паглынаемага фатона роўна рознасці энергій стацыянарных станаў:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

4. Тэорыя Бора давала правільныя значэнні для ўсіх частот лінейчага спектра выпраменьвання вадароду. Акрамя таго,

¹ Лік істотных пунктаў каля пяці.

яна дазволіла тэарэтычна вызначыць радыус атама вадароду.

Аднак тэорыя Бора не была лагічна паслядоўнай. На яе аснове не ўдалося пабудаваць колькасную тэорыю больш складаных атамаў (атама гелію і інш.). Увядзенне квантавых уяўленняў патрабавала радыкальнай перабудовы механікі і электрадынамікі. Такая перабудова была ажыццёўлена ў 20-х гг. нашага стагоддзя. Былі створаны квантавая механіка і квантавая электрадынаміка.

5. На аснове квантавай тэорыі выпраменьвання былі пабудаваны квантавыя генератары радыёхваль і квантавыя генератары бачнага святла — лазеры. Лазеры ствараюць кагерэнтнае выпраменьванне вельмі вялікай магутнасці. Выпраменьванне лазераў знаходзіць вельмі шырокае прымяненне ў розных галінах навукі і тэхнікі.

Раздзел 10

ФІЗІКА АТАМНАГА ЯДРА

Словы *атамнае ядро і элементарныя часціцы* ўжо неаднаразова ўпаміналіся. Вы ведаеце, што атам складаецца з ядра і электронаў. Само атамнае ядро складаецца з элементарных часціц.

Раздзел фізікі, у якім даследуюцца будова і ператварэнне атамных ядзер, называецца ядзернай фізікай.

Першапачаткова падзелу на ядзерную фізіку і фізіку элементарных часціц не было. З разнастайнасцю свету элементарных часціц фізікі сутыкнуліся пры вывучэнні ядзерных працэсаў. Вылучэнне фізікі элементарных часціц у самастойную галіну даследавання адбылося параўнальна нядаўна, каля 1950 г. Цяпер мы маем два самастойныя раздзелы фізікі: змест аднаго з іх складае вывучэнне атамных ядзер, а змест другога — вывучэнне прыроды, уласцівасцей і ўзаемных ператварэнняў элементарных часціц. Аднак у адносінах да разглядаемых праблем і прымяняемых метадаў даследавання ў абодвух гэтых раздзелах захавалася многа агульнага.

Большую частку часу мы прысвечым асноўным пытанням ядзернай фізікі і толькі ў канцы каратка спынімся на ўласцівасцях элементарных часціц.

§ 76. МЕТАДЫ НАЗІРАННЯ І РЕГІСТРАЦЫІ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСЦІЦ

Спачатку пазнаёмімся з прыстасаваннямі, дзякуючы якім узнікла і пачала развівацца фізіка атамнага ядра і элементарных часціц. Гэта прыстасаванні для рэгістрацыі і вывучэння сутыкненняў і ўзаемных ператварэнняў ядзер і элементарных часціц. Іменна яны даюць інфармацыю аб падзеях у мікрасвеце.

Прынцыпы дзеяння прыбораў для рэгістрацыі элементарных часціц. Любое прыстасаванне, якое рэгіструе элементарныя часціцы або атамныя ядры, што рухаюцца, падобна да зараджанай стрэльбы з узведзеным курком. Невялікае намаганне пры націсканні на спускавы кручок стрэльбы выклікае эфект, непараўнальны з затрачаным намаганнем, — выстрал.

Рэгіструючы прыбор — гэта больш ці менш складаная ма-краскапічная сістэма, якая можа знаходзіцца ў няўстойлівым стане. Пры невялікім парушэнні, выкліканым праяцеўшай часціцай, пачынаецца працэс пераходу сістэмы ў новы, больш устойлівы стан. Гэты працэс і дазваляе рэгістраваць часціцу. У цяперашні час выкарыстоўваецца шмат розных метадаў рэгістрацыі часціц.

У залежнасці ад мэт эксперыменту і ўмоў, у якіх ён праводзіцца, прымяняюцца тыя ці іншыя рэгіструючыя прыстасаванні, якія адрозніваюцца адно ад аднаго па асноўных характарыстыках.

Газаразрадны лічыльнік Гейгера. Лічыльнік Гейгера — адзін з важнейшых прыбораў для аўтаматычнага лічэння часціц.

Лічыльнік (рис. 173) складаецца са шкляной трубка, пакрытай унутры металічным слоём (катод), і тонкай металічнай ніці, якая ідзе ўздоўж восі трубка (анод). Трубка запаўняецца газам, звычайна аргонам. Дзеянне лічыльніка заснавана на ўдарнай іанізацыі. Зараджаная часціца (электрон, α -часціца і г. д.), праятаючы ў газе, адрывае ад атамаў электроны і стварае дадатныя іоны і свабодныя электроны. Электрычнае поле паміж анодам і катодам (да іх падводзіцца высокае напружанне) паскарае электроны да энергій, пры якіх пачынаецца ўдарная іанізацыя. Узнікае лавіна іонаў, і ток праз лічыльнік рэзка ўзрастае. Пры гэтым на нагрузачным рэзістары R утвараецца імпульс напружання, які падаецца ў рэгіструючае прыстасаванне.

Для таго каб лічыльнік мог рэгістраваць наступную трапіўшую ў яго часціцу, лавінны разрад неабходна пагасіць. Гэта адбываецца аўтаматычна. Паколькі ў момант з'яўлення імпульсу току падзенне напружання на нагрузачным рэзістары R вялікае, то напружанне паміж анодам і катодам рэзка памяншаецца — настолькі, што разрад спыняецца.

Лічыльнік Гейгера прымяняецца ў асноўным для рэгістрацыі электронаў і γ -квантаў (фатонаў вялікай энергіі). Аднак непасрэдна γ -кванты ў выніку іх малой іанізуючай здольнасці не рэгіструюцца. Для іх выяўлення ўнутраную сценку трубка пакрываюць матэрыялам, з якога γ -кванты выбіваюць электроны.

Лічыльнік рэгіструе амаль усе

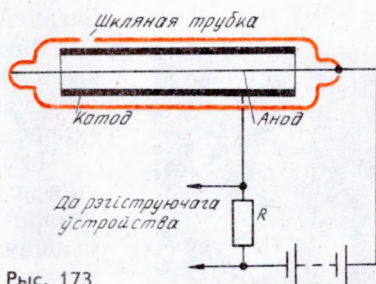


Рис. 173

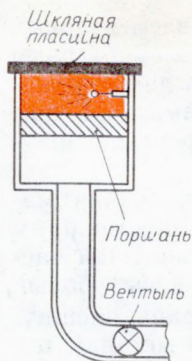


Рис. 174

електрони, які падають у яго; што ж датычыць γ -квантаў, то ён рэгіструе толькі прыблізна адзін са ста. Рэгістрацыя цяжкіх часціц (напрыклад, α -часціц) адбываецца з цяжкасцямі, таму што складана зрабіць у лічыльніку дастаткова тонкае «акенца», празрыстае для гэтых часціц.

У цяперашні час створаны лічыльнікі, якія працуюць на іншых прынцыпах, чым лічыльнік Гейгера.

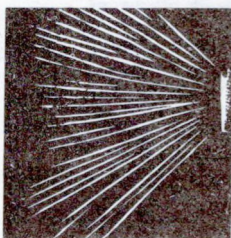
Камера Вільсана. Лічыльнікі дазваляюць толькі рэгістраваць факт праходжання праз іх часціцы і фіксаваць некаторыя яе характарыстыкі. У камеры ж Вільсана, створанай у 1912 г., хуткая зараджаная часціца пакідае след, які можна назіраць непасрэдна або фатаграфавальна. Гэты прыбор можна назваць «акном» у мікрасвет, г. зн. свет элементарных часціц і сістэм, што з іх складаюцца.

Дзеянне камеры Вільсана заснавана на кандэнсцыі перанасычанай пары на іонах з утварэннем кропелек вады. Гэтыя іоны стварае ўздоўж сваёй траекторыі зараджаная часціца, што рухаецца.

Камера Вільсана — гэта герметычна закрыты сасуд, запоўнены парай вады або спірту, блізкай да насычэння (рыс. 174). Пры рэзкім апусканні поршня, выкліканым памяншэннем ціску пад поршнем, пара ў камеры адсябае пашыраецца. У выніку гэтага адбываецца ахаладжэнне, і пара становіцца перанасычанай. Гэта няўстойлівы стан пары: пара лёгка кандэнсуецца. Цэнтрамі кандэнсцыі становяцца іоны, якія ўтварае ў рабочай прасторы камеры праляцеўшая часціца. Калі часціца пранікае ў камеру непасрэдна перад пашырэннем або адразу пасля яго, то на яе шляху ўзнікаюць кропелькі вады. Гэтыя кропелькі ўтвараюць бачны след праляцеўшай часціцы — *трэк* (рыс. 175). Затым камера вяртаецца ў зыходны стан і іоны выдаляюцца электрычным полем. У залежнасці ад размераў камеры час аднаўлення рабочага рэжыму вагаецца ад некалькіх секунд да дзесяткаў мінут.

Інфармацыя, якую даюць трэкі ў камеры Вільсана, значна

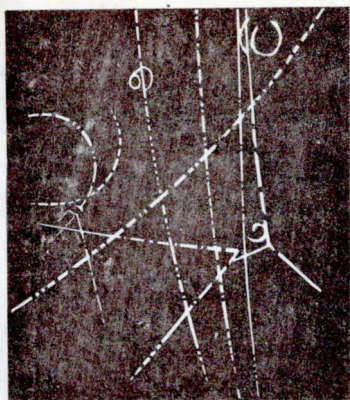
Рис. 175



багацейшая за тую, якую могуць даць лічыльнікі. Па даўжыні трэка можна вызначыць энергію часціцы, а па ліку кропелек на адзінку даўжыні трэка ацэньваецца яе скорасць.

Чым даўжэйшы трэк часціцы, тым большая яе энергія. А чым больш кропелек вады ўтвараецца на адзінку даўжыні трэка, тым меншая яе скорасць. Часціцы з вялікім зарадам пакідаюць трэк большай таўшчыні.

Савецкія фізікі П. Л. Капіца і Д. У. Скабляльцын прапанавалі змяшчаць камеру Вільсана ў аднароднае магнітнае поле. Магнітнае поле дзейнічае на зараджаную часціцу, што рухаецца, з пэўнай сілай (сілай Лорэнца). Гэта сіла скрыўляе траекторыю часціцы, не мяняючы модуля яе скорасці. Трэк мае тым большую крывізну, чым большы зарад часціцы і чым меншая яе маса. Па крывізне трэка можна вызначаць адносіну зараду часціцы да яе масы. Калі вядома адна з гэтых велічынь, то можна вылічыць другую. Напрыклад, па зараду часціцы і крывізне яе трэка можна вызначыць масу.



Рыс. 176

Пузырковая камера. У 1952 г. амерыканскім вучоным Д. Глейзерам было прапанавана выкарыстаць для выяўлення трэкаў часціц перагрэтую вадкасць. У такой вадкасці на іонах, якія ўтвараюцца пры руху хуткай зараджанай часціцы, узнікаюць пузыркі пары, якія даюць бачныя трэкі часціцы. Камеры такога тыпу былі названы *пузырковымі*.

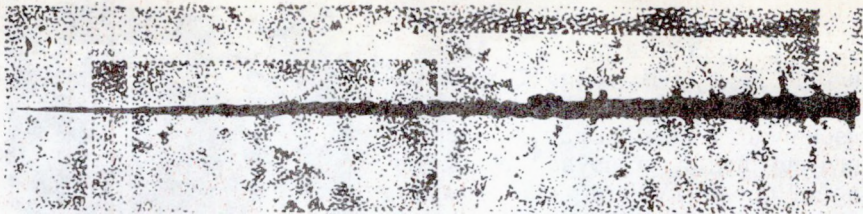
У зыходным стане вадкасць у камеры знаходзіцца пад высокім ціскам, які ахоўвае яе ад закіпання, нягледзячы на тое што тэмпература вадкасці вышэйшая за тэмпературу кіпення пры атмасферным ціску. Пры рэзкім паніжэнні ціску вадкасць аказваецца перагрэтай і на працягу невялікага часу яна будзе знаходзіцца ў няўстойлівым стане. Зараджаныя часціцы, якія пралятаюць іменна ў гэты час, выклікаюць з'яўленне трэкаў, якія складаюцца з пузыркоў пары (рыс. 176). У якасці вадкасцей выкарыстоўваюцца галоўным чынам вадкі вадарод і прапан. Працягласць рабочага цыкла пузырковай камеры невялікая — каля 0,1 с.

Перавага пузырковай камеры перад камерай Вільсана абумоўлена большай шчыльнасцю рабочага рэчыва. Прабегі часціц у выніку гэтага аказваюцца дастаткова кароткімі, і часціцы нават вялікіх энергій засядаюць у камеры. Гэта дазваляе назіраць серыю паслядоўных ператварэнняў часціцы і рэакцыі, якія ёю выклікаюцца.

Трэкі ў камеры Вільсана і пузырковай камеры — адна з галоўных крыніц інфармацыі аб паводзінах і ўласцівасцях часціц.

Назіранне слядоў элементарных часціц робіць моцнае ўражанне, стварае адчуванне непасрэднага судакранання з мікрасветам.

Метад таўстаслойных фотаэмульсій. Для рэгістрацыі часціц разам з камерамі Вільсана і пузырковымі камерамі прымяняюцца таўстаслойныя фотаэмульсіі. Іанізуючае дзеянне хуткіх зараджаных часціц на эмульсію фотопласцінкі дазволіла фран-



Рыс. 177

цузскаму фізіку А. Бекерэлю адкрыць у 1896 г. радыеактыўнасць. Метад фотаэмульсій быў развіты савецкімі фізікамі Л. В. Мысоўскім, А. П. Жданавым і інш.

Фотаэмульсія змяшчае вялікую колькасць мікраскапічных крышталікаў браміду серабра. Хуткая зараджаная часціца, пранізваючы крышталік, адрывае электроны ад асобных атамаў броду. Ланцужок такіх крышталікаў утварае скрыты відарыс. Пры праяўленні ў гэтых крышталіках узаўляецца металічнае серабро і ланцужок зёрнаў серабра ўтварае трэк часціцы (рыс. 177). Па даўжыні і таўшчыні трэка можна ацаніць энергію і масу часціцы.

З-за вялікай шчыльнасці фотаэмульсіі трэкі атрымліваюцца вельмі кароткія (парадку 10^{-3} см для α -часціц, выпраменьваемых радыеактыўнымі элементамі), але пры фатаграфаванні іх можна павялічыць.

Перавага фотаэмульсій заключаецца ў тым, што час экспазіцыі будзь неабмежавана вялікім. Гэта дазваляе рэгістраваць рэдкія з'явы. Важна і тое, што дзякуючы вялікай тармозячай здольнасці фотаэмульсій павялічваецца лік цікавых рэакцый, якія назіраюцца паміж часціцамі і ядрамі.

Мы расказалі далёка не аб усіх прыборах, што рэгіструюць элементарныя часціцы. Сучасныя прыборы для выяўлення часціц, якія рэдка сустракаюцца і вельмі мала жывуць, вельмі складаныя. У іх стварэнні прымаюць удзел сотні людзей.

? 1. Ці можна пры дапамозе камеры Вільсана рэгістраваць незараджаныя часціцы? 2. Якія перавагі мае пазырковая камера ў параўнанні з камерай Вільсана?

§ 77. АДКРЫЦЦЕ РАДЫЕАКТЫЎНАСЦІ

Нестабільнасць атамаў была адкрыта ў канцы XIX ст. Праз 46 гадоў быў пабудаваны першы атамны рэактар. Мы прасочым за хуткім развіццём фізікі атамнага ядра ў гістарычнай паслядоўнасці.

Адкрыццё радыеактыўнасці — з'явы, якая даказвае складаны састаў атамнага ядра, адбылося дзякуючы шчасливай выпадко-

Складоўская-Кюры Марыя (1867—1934) — фізік і хімік. Нарадзілася ў Польшчы ў сям'і настаўніка, працавала ў Францыі. Яна — першая жанчына-прафесар Парыжскага ўніверсітэта. Марыя Складоўская-Кюры сумесна з мужам П. Кюры адкрыла новыя радыеактыўныя элементы палоній і радый і даследавала іх уласцівасці. Яна распрацавала класічны метада апрацоўкі і аналізу уранавых руд, на працягу рада гадоў даследавала ўласцівасці радыеактыўных выпраменьванняў, іх дзеянне на жывыя клеткі і г. д. Марыя Складоўская-Кюры двойчы атрымлівала Нобелеўскую прэмію па фізіцы і хіміі.



васці. Рэнтгенаўскія прамені, як вы памятаеце, упершыню былі атрыманы пры сутыкненні хуткіх электронаў са шкляной сценкай разраднай трубка. Адначасова назіралася свячэнне сценак трубка. Бекерэль доўгі час даследаваў блізкую з'яву — свячэнне рэчываў, якія папярэдне абпраменьваліся сонечным святлом. Да такіх рэчываў належаць, у прыватнасці, солі урану, з якімі эксперыментаваў Бекерэль.

І вось у яго ўзнікла пытанне: ці не з'яўляюцца пасля абпраменьвання солей урану разам з бачным святлом і рэнтгенаўскія прамені? Бекерэль загарнуў фотапласцінку ў шчыльную чорную паперу, паклаў зверху крупінкі уранавай солі і выставіў на яркае сонечнае святло. Пасля праяўлення пласцінка пачарнела на тых участках, дзе ляжала соль. Значыць, уран ствараў нейкае выпраменьванне, якое, падобна да рэнтгенаўскага, пранізвае непразрыстыя целы і дзейнічае на фотапласцінку. Бекерэль думаў, што гэта выпраменьванне ўзнікае пад уплывам сонечных прамянёў. Але аднойчы, у лютым 1896 г., чарговы дослед правесці не ўдалося з-за хмарнага надвор'я. Бекерэль схваў пласцінку ў шуфляду стала і паклаў на яе зверху медны крыж, пакрыты соллю урану. Праявіўшы на ўсякі выпадак пласцінку праз два дні, ён знайшоў на ёй пачарненне ў форме выразнага ценю крыжа. Гэта азначала, што *солі урану самаадвольна, без уплыву знешніх фактараў, ствараюць нейкае выпраменьванне*. Пачаліся інтэнсіўныя даследаванні. Зразумела, каб і не было гэтай шчаслівай выпадковасці, радыеактыўныя з'явы ўсё роўна былі б адкрыты, але, відаць, значна пазней.

Неўзабаве Бекерэль выявіў, што выпраменьванне уранавых солей іанізуе паветра падобна да рэнтгенаўскіх прамянёў і разраджае электраскоп. Выпрабаваўшы розныя хімічныя злучэнні урану, ён устанавіў вельмі важны факт: інтэнсіўнасць выпраменьвання вызначаецца толькі колькасцю урану ў прэпараце і зусім не залежыць ад таго, у якія злучэнні ён уваходзіць. Значыць, гэта ўласцівасць характэрна не злучэнням, а хімічнаму элементу урану, яго атамам.

Натуральна было паспрабаваць выявіць, ці не валодаюць здольнасцю да самаадвольнага выпраменьвання іншыя хімічныя элементы, акрамя урану. У 1898 г. Марыя Складоўская-Кюры ў Францыі і іншыя вучоныя выявілі выпраменьванне *торыю*. У далейшым галоўныя намаганні ў пошуках новых элементаў былі зроблены Марыяй Складоўскай-Кюры і яе мужам П'ерам Кюры. Сістэматычнае даследаванне руд, якія змяшчаюць уран і торый, дазволіла ім вылучыць новы, невядомы раней хімічны элемент — *палоній*, названы так у гонар радзімы Марыі Складоўскай-Кюры — Польшчы.

Нарэшце быў адкрыты яшчэ адзін элемент, які даваў вельмі інтэнсіўнае выпраменьванне. Ён быў названы *радыем* (г. зн. прамяністым). Сама з'ява самаадвольнага выпраменьвання была названа жонкай і мужам Кюры *радыеактыўнасцю*.

Радый мае адносную атамную масу, роўную 226, і займае ў табліцы Д. І. Мендзялеева клетку пад нумарам 88. Да адкрыцця Кюры гэта клетка пуставала. Па сваіх хімічных уласцівасцях радый належыць да шчолачназемельных элементаў.

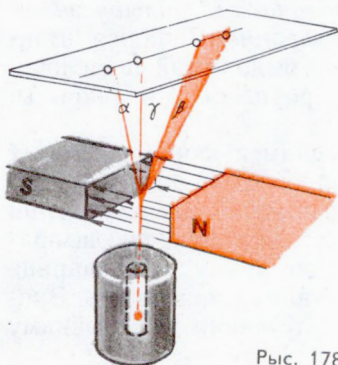
Пасля было ўстаноўлена, што ўсе хімічныя элементы з перадавым нумарам больш за 83 з'яўляюцца радыеактыўнымі.

У канцы XIX ст. была адкрыта радыеактыўнасць. Рад хімічных элементаў самаадвольна стварае розныя выпраменьванні.

§ 78. АЛЬФА-, БЭТА- І ГАМА-ВЫПРАМЕНЬВАННІ

Пасля адкрыцця радыеактыўных элементаў пачалося даследаванне фізічнай прыроды выпраменьвання. Акрамя Бекерэля, жонкі і мужа Кюры, гэтым заняўся Рэзерфорд.

Класічны дослед, які дазволіў выявіць складаны характар радыеактыўнага выпраменьвання, заключаўся ў наступным. Прэпарат радыеў змяшчалі на дно вузкага канала ў кавалку свінцу. Супраць канала знаходзілася фотопласцінка. На выпраменьванне, што выходзіла з канала, дзейнічала моцнае магнітнае поле, лініі індукцыі якога перпендыкулярныя да праменя (рыс. 178). Уся ўстаноўка размяшчалася ў вакууме.



Рыс. 178

Пры адсутнасці магнітнага поля на фотопласцінцы пасля праяўлення выяўлялася адна цёмная пляма, дакладна супраць канала. У магнітным жа полі пучок распадаўся на тры пучкі. Дзве састаўляючыя першаснага патоку адхіляліся ў процілеглыя бакі. Гэта ўказвала на наяўнасць у гэтых выпраменьван-

нях електричных зарадаў процілеглых знакаў. Пры гэтым адмоўны кампанент выпраменьвання адхіляўся магнітным полем значна мацней, чым дадатны. Трэцяя састаўляючая не адхілялася магнітным полем. Дадатна зараджаны кампанент атрымаў назву альфа-прамяняў, адмоўна зараджаны — бэта-прамяняў і нейтральны — гама-прамяняў (α -прамені, β -прамені, γ -прамені).

Гэтыя тры віды выпраменьвання вельмі моцна адрозніваюцца адзін ад аднаго па пранікальнай здольнасці, г. зн. па тым, наколькі інтэнсіўна яны паглынаюцца рознымі рэчывамі. Найменшай пранікальнай здольнасцю валодаюць α -прамені. Слой паперы таўшчынёю каля 0,1 мм для іх ужо непразрысты. Калі прыкрыць адтуліну ў сціскавай пласцінцы лістом паперы, то на фотапластынку не будзе плямы, адпавядаючай α -выпраменьванню.

Значна менш паглынаюцца пры праходжанні праз рэчыва β -прамені. Алюмініевая пласцінка поўнасцю іх затрымлівае толькі пры таўшчыні некалькі міліметраў. Найбольшай пранікальнай здольнасцю валодаюць γ -прамені.

Інтэнсіўнасць паглынання γ -прамяняў павялічваецца з ростам атамнага нумара рэчыва-паглынальніка. Але і слой свінцу таўшчынёю ў 1 см не з'яўляецца для іх перашкодай, якую нельга пераадолець. Пры праходжанні γ -прамяняў праз такі слой свінцу іх інтэнсіўнасць убывае толькі ў два разы.

Фізічная прырода α -, β - і γ -прамяняў, відавочна, розная.

Гама-прамені. Па сваіх уласцівасцях γ -прамені вельмі моцна нагадваюць рэнтгенаўскія, але толькі іх пранікальная здольнасць значна большая, чым у рэнтгенаўскіх прамяняў. Гэта наводзіць на думку, што γ -прамені ўяўляюць сабой электрамагнітныя хвалі. Усе сумненні ў гэтым адпалі пасля таго, як была выяўлена дыфракцыя γ -прамяняў на крышталах і вымерана даўжыня хвалі. Яна аказалася вельмі малой — ад 10^{-8} да 10^{-11} см.

На шкале электрамагнітных хваль γ -прамені непасрэдна ідуць за рэнтгенаўскімі. Скорасць распаўсюджвання ў γ -прамяняў такая ж, як і ва ўсіх электрамагнітных хваль — каля 300 000 км/с.

Бэта-прамені. З самага пачатку α - і β -прамені разглядаліся як патокі зараджаных часціц. Прасцей за ўсё было эксперыментавць з β -прамянямі, таму што яны моцна адхіляюцца як у магнітным, так і ў электрычным полі.

Асноўная задача заключалася ў вызначэнні зараду і масы часціцы. Пры даследаванні адхілення β -часціц у электрычных і магнітных палях было ўстаноўлена, што яны ўяўляюць сабой не што іншае, як электроны, якія рухаюцца са скорасцямі, вельмі блізкімі да скорасці святла. Істотна, што скорасці β -часціц, выпраменьных дадзеным радыеактыўным элементам, неаднолькавыя. Сустрэкаюцца часціцы з самымі рознымі скорасцямі. Гэта і прыводзіць да пашырэння пучка β -часціц у магнітным полі (гл. рыс. 178).

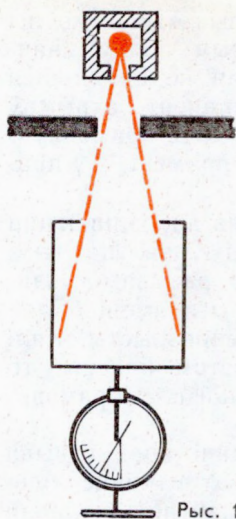


Рис. 179

Альфа-часціцы. Цяжэй было высветліць прыроду α -часціц, таму што яны слаба адхіляюцца магнітным і электрычным палямі.

Канчаткова гэту задачу ўдалося рашыць Рэзерфорду. Ён вымераў адносіну зараду q часціцы да яе масы m па адхіленню ў магнітным полі. Яна аказалася прыкладна ў два разы меншай, чым у пратона — ядра атама вадароду. Зарад пратона роўны элементарнаму, а яго маса вельмі блізкая да атамнай адзінкі масы¹. Значыць, у α -часціцы на адзін элементарны зарад прыходзіцца маса, роўная дзвюм атамным адзінкам масы.

Але зарад α -часціцы і яе маса заставаліся невядомымі. Трэба было вымераць або зарад, або масу α -часціцы. Са з'яўленнем лічыльніка Гейгера прасцей і больш надзейна было вымераць зарад. Праз вельмі тонкае акенца α -часціцы могуць пранікаць унутр лічыльніка і рэгістравацца ім.

Рэзерфорд змясціў на шляху α -часціц лічыльнік Гейгера, які вымераў лік часціц, што выпраменьваліся радыеактыўным прэпаратам за пэўны час. Затым ён паставіў замест лічыльніка металічны цыліндр, злучаны з адчувальным электрометрам (рыс. 179). Электрометрам Рэзерфорд вымераў зарад α -часціц, выпраменьных крыніцай унутр цыліндра за такі ж час (радыеактыўнасць многіх рэчываў амаль не мяняецца з часам). Ведаючы сумарны зарад α -часціц і іх колькасць, Рэзерфорд вызначыў адносіну гэтых велічынь, г. зн. зарад адной α -часціцы. Гэты зарад аказаўся роўным двум элементарным.

Такім чынам, Рэзерфорд устанавіў, што ў α -часціцы на кожны з двух элементарных зарадаў прыходзіцца дзве атамныя адзінкі масы. Значыць, на два элементарныя зарады прыходзіцца чатыры атамныя адзінкі масы. Такі ж зарад і такую ж адносную атамную масу мае ядро гелію. З гэтага вынікае, што α -часціца — ядро атама гелію².

Не задавальняючыся дасягнутым вынікам, Рэзерфорд потым яшчэ прамымі доследамі даказаў, што пры радыеактыўным α -распадзе ўтвараецца гелій. Збіраючы α -часціцы ўнутры спецыяльнага рэзервуара на працягу некалькіх дзён, Рэзерфорд з дапамогай спектральнага аналізу пераканаўся ў тым, што ў сасудзе назапашваецца гелій (кожная α -часціца захоплівала два электроны і ператваралася ў атам гелію).

¹ Атамная адзінка масы (а. а. м.) роўна $1/12$ масы атама вугляроду; 1 а. а. м. $\approx 1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг.

² У той час (першае дзесяцігоддзе XX ст.) атамнае ядро яшчэ не было адкрыта. Таму Рэзерфорд гаварыў аб іоне атама гелію.

Пры радыеактыўным распадзе нараджаюцца α -прамені (ядры атама гелію), β -прамені (электронны) і γ -прамені (кароткахвалевае электрамагнітнае выпраменьванне).

Чаму ўстанавіць прыроду α -праменяў аказалася больш складана, чым β -праменяў?

§ 79. РАДЫЕАКТЫЎНЫЯ ПЕРАТВАРЭННІ

Што ж адбываецца з рэчывам пры радыеактыўным выпраменьванні? Адказаць на гэта пытанне ў пачатку XX ст. было вельмі не проста. Ужо ў самым пачатку даследаванняў радыеактыўнасці выявілася многа дзіўнага і незвычайнага.

Па-першае, здзіўляючае пастаянства, з якім радыеактыўныя элементы уран, торый і радый выпраменьваюць выпраменьванні. На працягу сутак, месяцаў і гадоў інтэнсіўнасць выпраменьвання прыметна не змянялася. На яго не рабілі ніякага ўплыву такія звычайныя ўздзеянні, як награванне або павелічэнне ціску. Хімічныя рэакцыі, у якія ўступалі радыеактыўныя рэчывы, таксама не ўплывалі на інтэнсіўнасць выпраменьвання.

Па-другое, вельмі хутка пасля адкрыцця радыеактыўнасці высветлілася, што радыеактыўнасць суправаджаецца вылучэннем энергіі. Пер Кюры змясціў ампулу з хларыдам радыю ў каларыметр. У ім паглыналіся α -, β - і γ -прамені, і за кошт іх энергіі награвалася каларыметр. Кюры вызначыў, што 1 г радыю вылучае за 1 г каля 582 Дж энергіі. І такая энергія вылучаецца непарарывна на працягу рада гадоў.

Адкуль жа бярэцца энергія, на вылучэнне якой не робяць ніякага ўплыву ўсе вядомыя ўздзеянні? Відаць, пры радыеактыўнасці ў рэчыве адбываюцца нейкія глыбокія змяненні, зусім адрозныя ад звычайных хімічных ператварэнняў. Было зроблена дапушчэнне, што ператварэнні зведваюць самі атамы.

Цяпер гэта думка не можа выклікаць асаблівага здзіўлення, таму што аб ёй дзіця можа пачуць яшчэ раней, чым навучыцца чытаць. Але ў пачатку XX ст. яна здавалася фантастычнай і патрэбна была вялікая смеласць, каб рашыцца яе выказаць. У той час толькі што былі атрыманы бяспрэчныя доказы існавання атамаў. Ідэя Дэмакрыта шматвяковай даўнасці аб атамістычнай будове рэчыва нарэшце перамагла. І вось амаль адразу ж услед за гэтым нязменнасць атамаў ставіцца пад сумненне.

Не будзем расказваць падрабязна пра тыя эксперыменты, якія прывялі ўрэшце да поўнай упэўненасці ў тым, што пры радыеактыўным распадзе адбываецца ланцужок паслядоўных ператварэнняў атамаў. Спынімся толькі на самых першых даследах, пачатых Рэзерфордам і працягнутых ім сумесна з англійскім хімікам Ф. Содзі.

Рэзерфорд выявіў, што актыўнасць торыю, якая вызначаецца

як лік α -часціц, выпраменьваемых за адзінку часу, застаецца нязменнай у закрытай ампуле. Калі ж прэпарат абдуваецца нават вельмі слабымі патокамі паветра, то актыўнасць торыю значна памяншаецца. Рэзерфорд дапусціў, што адначасова з α -часціцамі торый выпраменьвае нейкі радыеактыўны газ.

Адпампоўваючы паветра з ампулы, якая змяшчала торый, Рэзерфорд вылучыў радыеактыўны газ і даследаваў яго іанізуючую здольнасць. Высветлілася, што актыўнасць гэтага газу (у адрозненне ад актыўнасці торыю, урану і радыю) вельмі хутка ўбывае з часам. Кожную мінуту актыўнасць убывае ў два разы, і праз дзесяць мінут яна практычна становіцца роўнай нулю. Содзі даследаваў хімічныя ўласцівасці гэтага газу і знайшоў, што ён не ўступае ні ў якія рэакцыі, г. зн. з'яўляецца інертным газам. Пасля газ быў названы радоном і змешчаны ў табліцу Д. І. Мендзялеева пад парадкавым нумарам 86.

Ператварэнні зведвалі і іншыя радыеактыўныя элементы: уран, актыій, радый. Агульны вывад, да якога прыйшлі вучоныя, быў дакладна сфармуляваны Рэзерфордам: «Атамы радыеактыўнага рэчыва спантанна¹ відазмяняюцца. У кожны момант невялікая частка агульнага ліку атамаў робіцца няўстойлівай і выбуховападобна распадаецца. У пераважнай большасці выпадкаў выкідваецца з велізарнай скорасцю асколак атама — α -часціца. У некаторых іншых выпадках выбух суправаджаецца выкідваннем хуткага электрона і з'яўленнем праменяў, якія валодаюць, падобна да рэнтгенаўскіх праменяў, вялікай пранікальнай здольнасцю і вядомыя пад назвай γ -выпраменьвання.

Было выяўлена, што ў выніку атамнага ператварэння ўтвараецца рэчыва зусім новага віду, якое поўнасцю адрозніваецца па сваіх фізічных і хімічных уласцівасцях ад першапачатковага рэчыва. Гэта новае рэчыва, аднак, само таксама няўстойлівае і зведвае ператварэнне з выпраменьваннем характэрнага радыеактыўнага выпраменьвання².

Такім чынам, дакладна ўстаноўлена, што атамы некаторых элементаў падвергнуты спантаннаму распаду, які суправаджаецца выпраменьваннем энергіі ў колькасцях, вялізных у параўнанні з энергіяй, што вызваляецца пры звычайных малекулярных відазмяненнях».

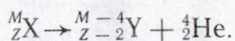
Пасля таго як было адкрыта атамнае ядро, адразу ж стала зразумела, што іменна яно зведвае змяненні пры радыеактыўных ператварэннях. α -часціц жа наогул няма ў электроннай абалонцы, а памяншэнне ліку электронаў абалонкі на адзінку ператварае атам у іон, а не ў новы хімічны элемент. Выкідванне ж электрона з ядра змяняе зарад ядра (павялічвае яго) на адзінку.

Такім чынам, *радыеактыўнасць уяўляе сабой самаадвольнае ператварэнне адных ядзер у другія, якое суправаджаецца выпраменьваннем розных часціц.*

¹ Ад лацінскага слова *spontaneus* — самаадвольны.

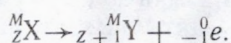
² У сапраўднасці могуць утварацца і стабільныя ядры.

Правіла зрушэння. Ператварэнні ядзер падпарадкоўваюцца так званаму правілу зрушэння, сфармуляванаму ўпершыню Содзі: пры α -распадзе ядро траціць дадатны зарад $2e$ і маса яго ўбывае прыблізна на чатыры атамныя адзінкі масы. У выніку элемент зрушваецца на дзве клеткі да пачатку перыядычнай сістэмы. Сімвалічна гэта можна запісаць так:



Тут элемент абазначаецца, як і ў хіміі, агульнапрынятымі сімваламі: зарад ядра запісваецца ў выглядзе індэкса знізу ад сімвала злева, а атамная маса — у выглядзе індэкса зверху ад сімвала злева. Напрыклад, вадарод абазначаецца сімвалам ${}^1_1\text{H}$. Для α -часціцы, якая з'яўляецца ядром атама гелію, прымяняецца абазначэнне ${}^4_2\text{He}$ і г. д.

Пры β -распадзе з ядра вылятае электрон. У выніку зарад ядра павялічваецца на адзінку, а маса застаецца амаль нязменнай:



Тут ${}^0_{-1}e$ абазначае электрон: індэкс «0» уверсе абазначае, што маса яго вельмі малая ў параўнанні з атамнай адзінкай масы. Пасля β -распаду элемент зрушваецца на адну клетку бліжэй да канца перыядычнай сістэмы. Гама-выпраменьванне не суправаджаецца змяненнем зараду; маса ж ядра змяняецца вельмі мала.

Правілы зрушэння паказваюць, што пры радыеактыўным распадзе захоўваецца электрычны зарад і прыбліжана захоўваецца адносная атамная маса ядзер.

Узнікшыя пры радыеактыўным распадзе новыя ядры ў сваю чаргу звычайна таксама радыеактыўныя.

Пры радыеактыўным распадзе адбываецца ператварэнне атамных ядзер.

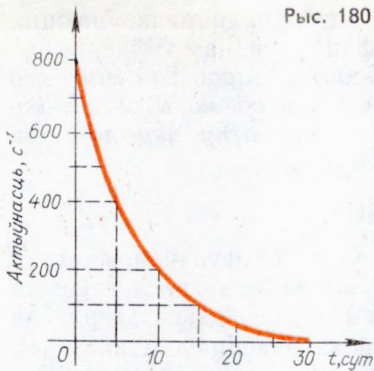
❗ Якія з вядомых вам законаў захавання выконваюцца пры радыеактыўным распадзе?

§ 80. ЗАКОНЫ РАДЫЕАКТЫЎНАГА РАСПАДУ. ПЕРЫЯД ПАЎРАСПАДУ

Радыеактыўны распад падпарадкоўваецца статыстычнаму закону.

Рэзерфорд, даследуючы ператварэнні радыеактыўных рэчываў, устанавіў доследным шляхам, што іх актыўнасць убывае з цягам часу. Аб гэтым гаварылася ў папярэднім параграфі. Так, актыўнасць радону ўбывае ў два разы ўжо праз 1 мін. Актыўнасць такіх элементаў, як уран, торый і радый, таксама ўбывае з часам, але значна павольней. Для кожнага радыеактыўнага

Рис. 180



рэчыва існуе пэўны інтэрвал часу, на працягу якога актыўнасць убывае ў два разы. Гэты інтэрвал носіць назву *перыяду паўраспаду*. *Перыяд паўраспаду T — гэта той час, на працягу якога распадаецца палавіна наяўнага ліку радыеактыўных атамаў*. Памяншэння ж актыўнасці прэпарата ў два разы можна дасягнуць простым дзяленнем яго на дзве роўныя часткі.

Спад актыўнасці, г. зн. ліку распадаў у секунду, у залежнасці ад часу для аднаго з радыеактыўных прэпаратаў паказаны на рысунку 180. Перыяд паўраспаду гэтага рэчыва роўны 5 сут.

Знойдзем цяпер матэматычную формулу закону радыеактыўнага распаду. Няхай лік радыеактыўных атамаў у пачатковы момант часу ($t=0$) роўны N_0 . Тады па сканчэнні перыяду паўраспаду гэты лік будзе роўны $\frac{N_0}{2}$. Пасля яшчэ аднаго такога ж інтэрвалу часу гэты лік стане роўным

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Па сканчэнні часу $t = nT$, г. зн. пасля n перыядаў паўраспаду T , радыеактыўных атамаў застанеца:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Паколькі

$$n = \frac{t}{T},$$

то

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (10.1)$$

Гэта і ёсць асноўны закон радыеактыўнага распаду. Па формуле (10.1) знаходзяць лік атамаў, што не распаліся, для любога моманту часу.

Перыяд паўраспаду — асноўная велічыня, якая характарызуе скорасць радыеактыўнага распаду. Чым меншы перыяд паўраспаду, тым менш часу жывуць атамы, тым хутчэй адбываецца распад. Для розных рэчываў перыяд паўраспаду мае значэнні, якія вельмі адрозніваюцца адно ад аднаго. Так, перыяд паўраспаду урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ роўны 4,5 млрд гадоў. Іменна таму актыўнасць урану на працягу адрэзка часу ў некалькі гадоў прыметна не мяняецца.

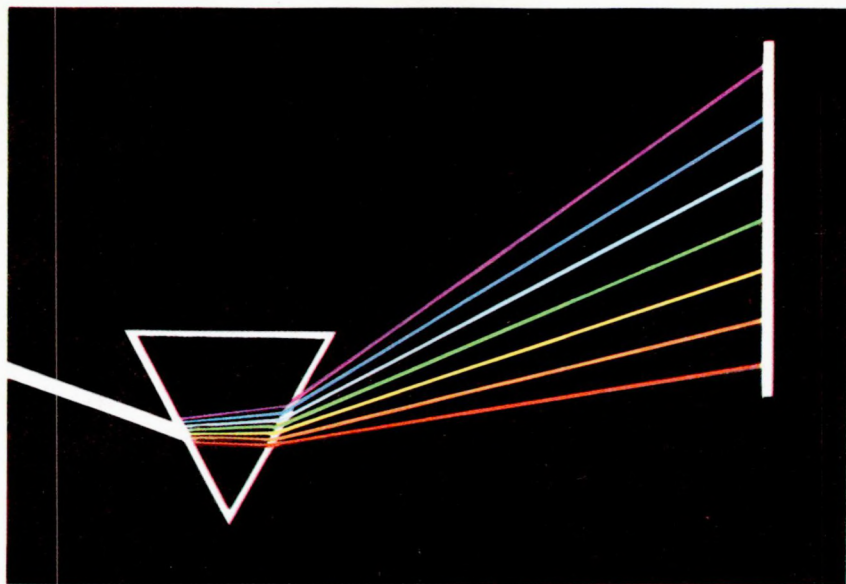


Рис. I. Схема розкладання білого світла з допомогою призми. Різним колерам відповідають хвилі різної довжини. Нізка повна довжина хвилі білому світлу не відповідає.

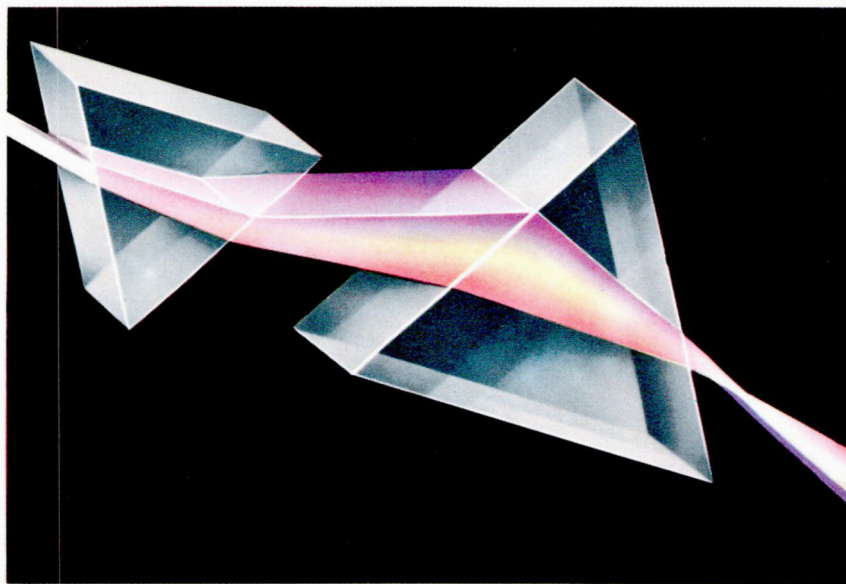


Рис. II. Розкладання і синтез білого світла з допомогою призми.

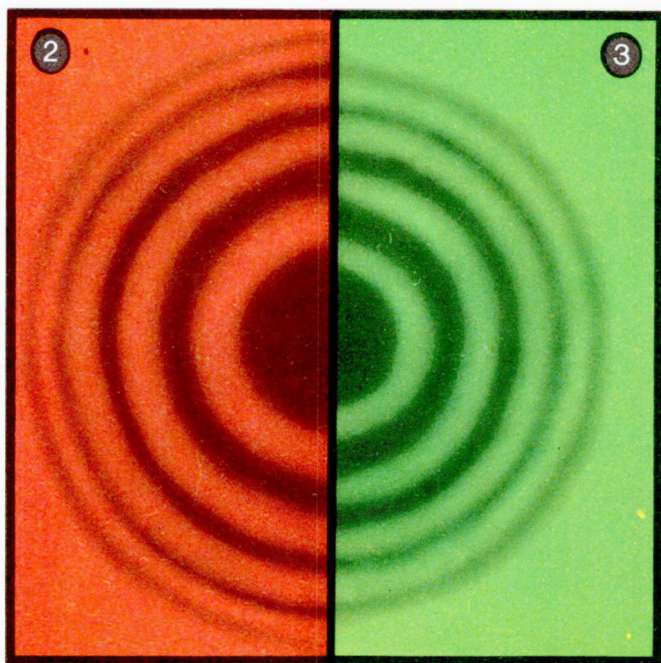
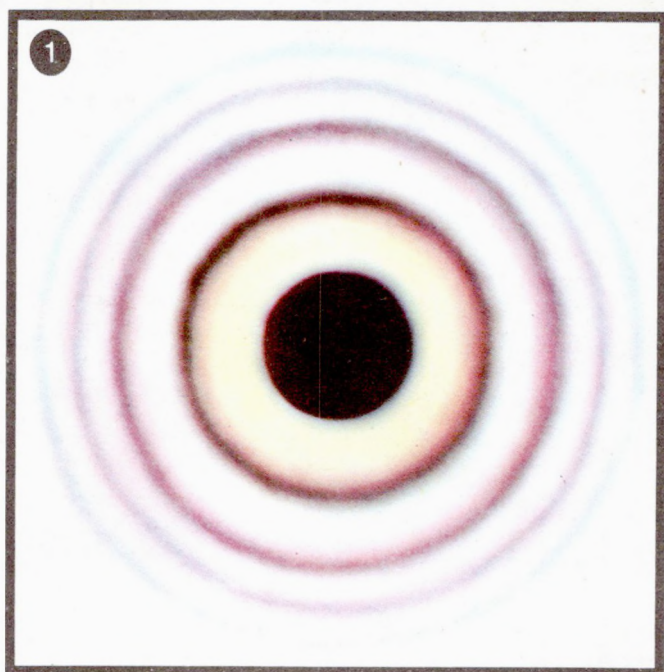


Рис. III. Кольцы Ньютона ў адбітым святле:
 1 — у белым; 2 — у чырвоным; 3 — у зялёным.

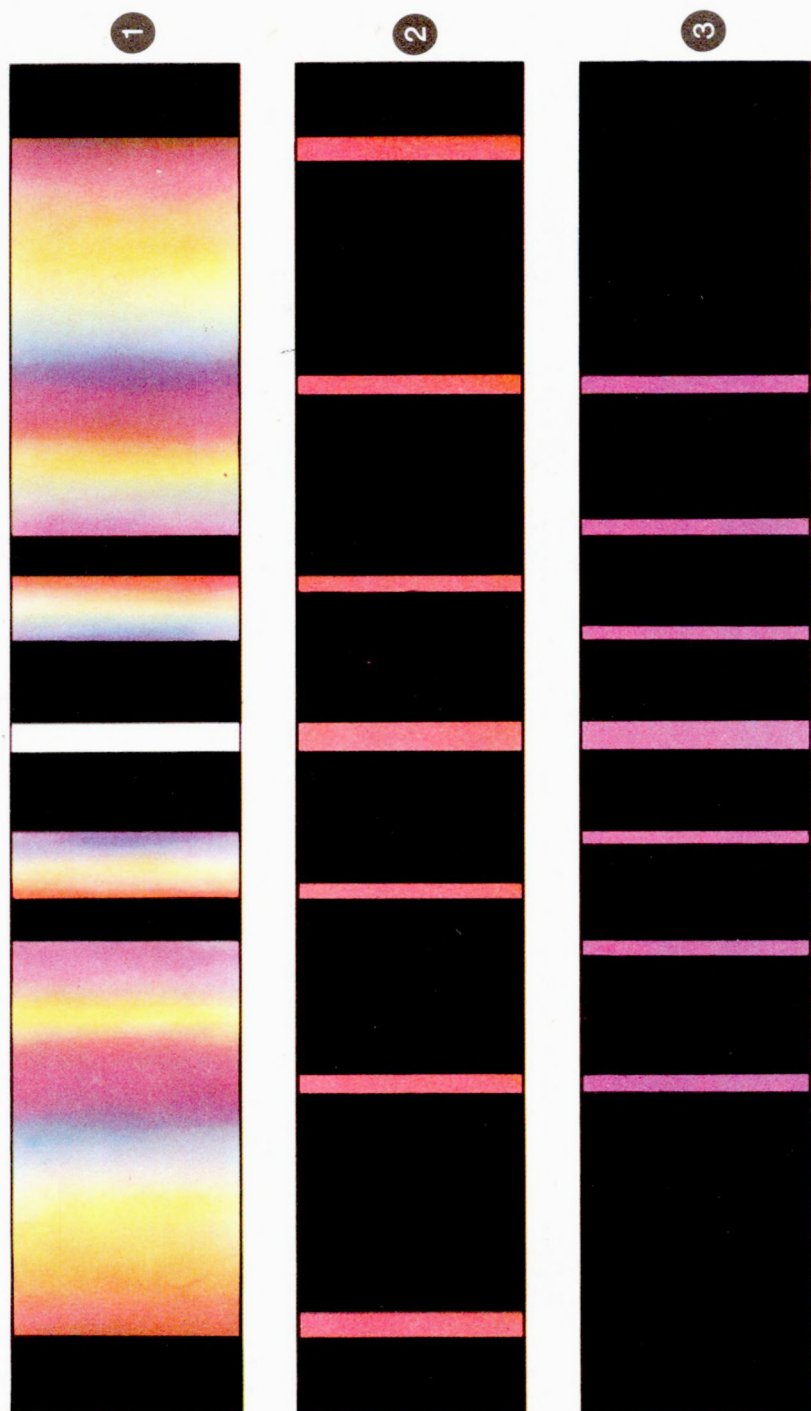


Рис. IV. Спектры, атриманыя з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі:
 1 — для белага святла; 2 — для монахраматычнага чырвонага святла; 3 — для монахраматычнага фіялетавага святла.

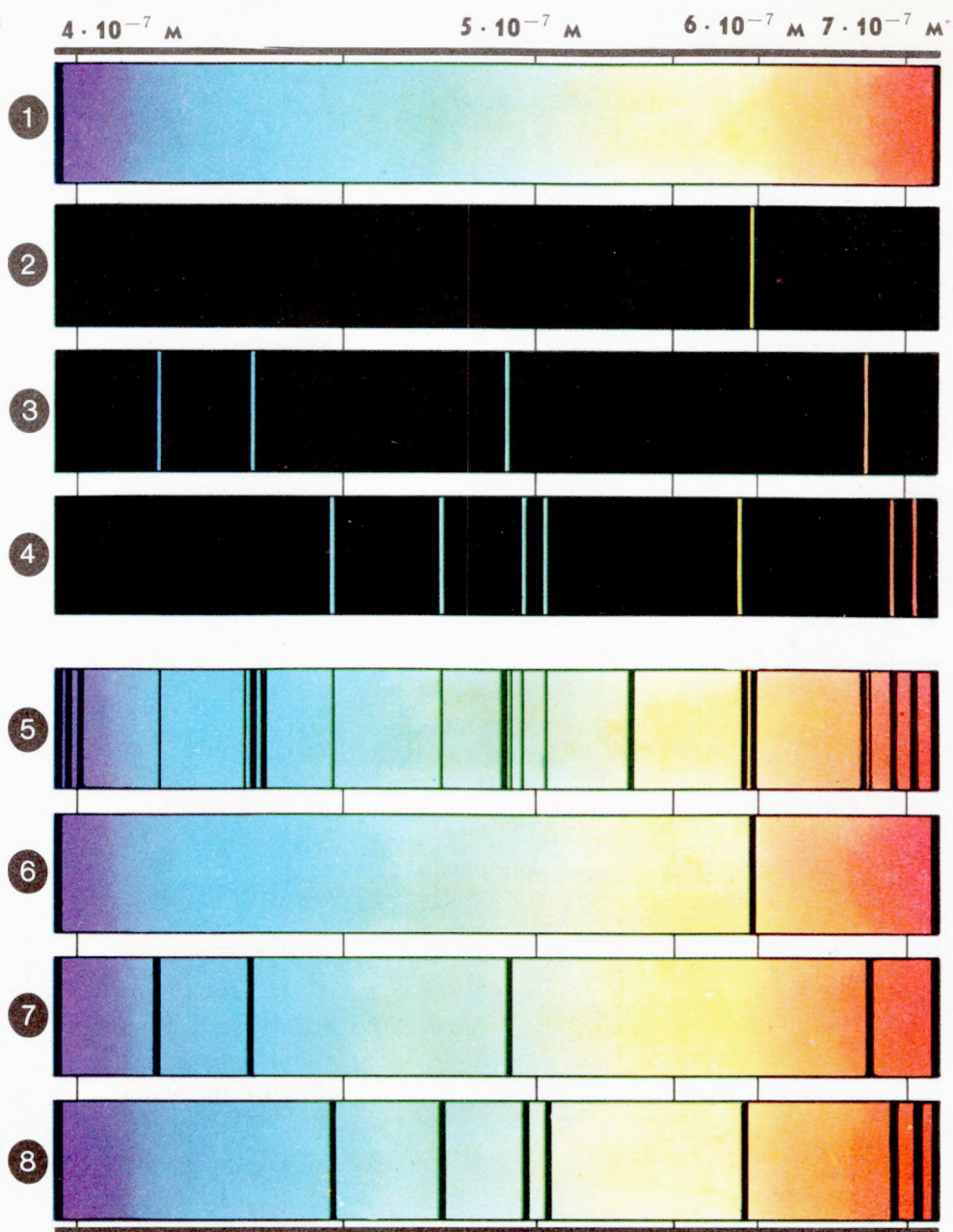


Рис. V. Спектры выпраменьвання: 1 — суцільні; 2 — натрію; 3 — вадороду; 4 — гелію. Спектри паглинання: 5 — сонечні; 6 — натрію; 7 — вадороду; 8 — гелію.

Перыяд паўраспаду радыю значна меншы — ён роўны 1600 гадоў. Таму актыўнасць радыю значна большая, чым актыўнасць урану. Ёсць радыеактыўныя элементы з перыядам паўраспаду ў мільённыя долі секунды.

Каб, карыстаючыся формулай (10.1), вызначыць перыяд паўраспаду, трэба ведаць лік атамаў N_0 у пачатковы момант часу і падлічыць лік атамаў N , якія не распаліся, праз пэўны інтэрвал часу t .

Сам закон радыеактыўнага распаду даволі просты. Але фізічны сэнс гэтага закону ўявіць сабе нялёгка. Сапраўды, у адпаведнасці з гэтым законам за любы інтэрвал часу распадаецца адна і тая ж частка наяўных атамаў (за перыяд паўраспаду — палавіна атамаў). Значыць, з цягам часу скорасць распаду ніколькі не мяняецца. *Радыеактыўныя атамы не «старэюць»*. Так, атамы радону, якія ўзніклі пры распадзе радыю, маюць аднолькавыя шансы зазнаць радыеактыўны распад як адразу ж пасля свайго ўтварэння, так і праз 10 мін пасля гэтага. Распад любога атамнага ядра — гэта, так сказаць, не «смерць ад старасці», а «няшчасны выпадак» у яго жыцці. Для радыеактыўных атамаў (дакладней, ядзер) не існуе паняцця ўзросту. Можна вызначыць толькі *сярэдні час жыцця τ* .

Час існавання асобных атамаў можа вагацца ад доляў секунды да мільярдаў гадоў. Атам урану, напрыклад, можа спакойна праяжаць у зямлі мільярды гадоў і раптоўна ўзарвацца, у той час як яго суседзі спакойна працягваюць заставацца ў ранейшым стане. Сярэдні час жыцця τ — гэта проста сярэдняе арыфметычнае часу жыцця дастаткова вялікай колькасці атамаў дадзенага сорту. Яно прама прапарцыянальна перыяду паўраспаду. Прадказаць, калі адбудзецца распад дадзенага атома, немагчыма. Пэўны сэнс маюць толькі сцверджанні аб паводзінах у сярэднім вялікай сукупнасці атамаў. Закон радыеактыўнага распаду вызначае *сярэдні лік атамаў*, якія распадаюцца за пэўны інтэрвал часу. Але заўсёды ёсць непазбежныя адхіленні ад сярэдняга значэння, і, чым меншая колькасць атамаў у прэпаратае, тым большыя гэтыя адхіленні. Закон радыеактыўнага распаду з'яўляецца *статыстычным законам*.

Гаварыць аб пэўным законе радыеактыўнага распаду для малага ліку атамаў не мае сэнсу. Гэты закон справядлівы ў сярэднім для вялікай колькасці часціц.



Лічальнік рэгіструе β -часціцы радыеактыўнага прэпарата вельмі малой інтэнсіўнасці. Ці спрацоўвае лічальнік праз аднолькавыя інтэрвалы часу?

§ 81. ІЗАТОПЫ

Вывучэнне з'явы радыеактыўнасці прывяло да важнага адкрыцця, якое мае дачыненне да прыроды атамных ядзер.

У выніку назірання вялікага ліку радыеактыўных ператварэнняў паступова высветлілася, што існуюць рэчывы, якія тоесныя па сваіх хімічных уласцівасцях, але маюць зусім розныя радыеактыўныя ўласцівасці (г. зн. якія распадаюцца рознымі спосабамі). Іх ніяк не ўдавалася падзяліць усімі вядомымі хімічнымі спосабамі. На гэтай аснове Содзі ў 1911 г. выказаў меркаванне аб магчымасці існавання элементаў з аднолькавымі хімічнымі ўласцівасцямі, але адрозных у іншых адносінах, у прыватнасці сваёй радыеактыўнасцю. Гэтыя элементы трэба змяшчаць у адну і тую ж клетку перыядычнай сістэмы Мендзялеева. Содзі назваў іх *ізатопамі* (г. зн. займаючымі аднолькавыя месцы).

Меркаванне Содзі атрымала бліскавае пацверджанне і глыбокае тлумачэнне праз год, калі Дж. Дж. Томсан зрабіў дакладныя вымярэнні масы іонаў неону метадам адхілення іх у электрычных і магнітных палях. Томсан выявіў, што неон з'яўляецца сумессю двух сартоў атамаў. Большая частка іх мае адносную масу, роўную 20. Але ёсць нязначная дабаўка атамаў з адноснай атамнай масай 22. У выніку адносная атамная маса сумесі роўна 20,2. Атамы, якія маюць адны і тыя ж хімічныя ўласцівасці, адрозніваліся масай. Абодва сарты неону, натуральна, займаюць адно і тое ж месца ў табліцы Мендзялеева і, значыць, з'яўляюцца ізатопамі. Такім чынам, ізатопы могуць адрознівацца не толькі сваімі радыеактыўнымі ўласцівасцямі, але і масай. Іменна апошняя акалічнасць і аказалася галоўнай. У ізатопаў зарады атамных ядзер аднолькавыя. Таму лік электронаў у абалонцы атамаў і, такім чынам, хімічныя ўласцівасці ізатопаў аднолькавыя. Але масы ядзер розныя. Прычым ядры могуць быць як радыеактыўнымі, так і стабільнымі. Адрозненне ўласцівасцей радыеактыўных ізатопаў звязана з тым, што іх ядры маюць розную масу.

У цяперашні час устаноўлена існаванне ізатопаў ва ўсіх хімічных элементаў. Некаторыя элементы маюць толькі нестабільныя (г. зн. радыеактыўныя) ізатопы. Ізатопы ёсць у самага цяжкага з існуючых у прыродзе элементаў — урану (адносная атамная масы 238, 235 і інш.) і ў самага лёгкага — вадароду (адносная атамная масы 1, 2, 3).

Асабліва надзвычайныя ізатопы вадароду, таму што яны адрозніваюцца адзін ад аднаго па масе ў два або тры разы. Ізатоп з адноснай атамнай масай 2 называецца *дэйтэрыем*. Ён стабільны (г. зн. нерадыеактыўны) і ўваходзіць у якасці невялікай прымесі (1:4500) у звычайны вадарод. Пры злучэнні дэйтэрыю з кіслародам утвараецца так званая *цяжкая вада*. Яе фізічныя ўласцівасці прыметна адрозніваюцца ад уласцівасцей звычайнай вады. Пры нармальным атмасферным ціску яна кіпіць пры 101,2 °C і замярзае пры 3,8 °C.

Ізатоп вадароду з атамнай масай 3 называецца *трытыем*. Ён β -радыеактыўны з перыядам паўраспаду каля 12 гадоў.

Існаванне ізатопаў даказвае, што зарад атамнага ядра вызначае не ўсе ўласцівасці атама, а толькі яго хімічныя ўласцівасці

і тья фізічныя ўласцівасці, якія залежаць ад перыферыі электроннай абалонкі, напрыклад размеры. Маса ж атама і яго радыеактыўныя ўласцівасці не вызначаюцца парадкавым нумарам у табліцы Мендзялеева.

Істотна, што пры дакладным вымярэнні адносных атамных мас ізатопаў высветлілася, што яны блізкія да цэлых лікаў. Атамныя масы хімічных элементаў часам моцна адрозніваюцца ад цэлых лікаў. Так, адносная атамная маса хлору роўна 35,5. Гэта значыць, што ў натуральным стане хімічна чыстае рэчыва з'яўляецца сумессю ізатопаў у розных прапарцыях. Цэлалікавасць (набліжаная) адносных атамных мас ізатопаў вельмі важная для высвятлення будовы атамнага ядра.

Усе хімічныя элементы маюць ізатопы. Зарады атамных ядзер ізатопаў аднолькавыя, але масы розныя.

! Ці існуюць ізатопы ў барыю, адносная атамная маса якога 137,34?

§ 82. АДКРЫЦЦЕ НЕЙТРОНА

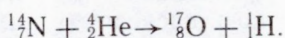
Найважнейшым этапам у развіцці фізікі атамнага ядра было адкрыццё нейтрона ў 1932 г.

Штучнае ператварэнне атамных ядзер. Упершыню ў гісторыі чалавецтва штучнае ператварэнне ядзер было зроблена Рэзерфордам у 1919 г. Гэта не было ўжо выпадковым адкрыццём.

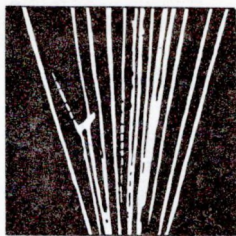
Паколькі ядро вельмі ўстойлівае і ні высокія тэмпературы, ні ціскі, ні электрамагнітныя палі не выклікаюць ператварэння элементаў і не ўплываюць на скорасць радыеактыўнага распаду, то Рэзерфорд дапусціў, што для разбурэння або пераўтварэння ядра патрэбна вельмі вялікая энергія. Найбольш падыходзячымі носьбітамі вялікай энергіі ў той час былі α -часціцы, якія вылятаюць з ядзер пры радыеактыўным распадзе.

Першым ядром, якое падверглася штучнаму пераўтварэнню, было ядро азоту ^{14}N . Бамбардзіруючы азот α -часціцамі вялікай энергіі, выпраменьваемымі радыем, Рэзерфорд выявіў з'яўленне пратонаў — ядзер атама вадароду.

У першых доследах рэгістрацыя пратонаў праводзілася метадам сцынтыляцый, і вынікі доследу не былі дастаткова перакананымі і надзейнымі. Але праз некалькі гадоў ператварэнне азоту ўдалося назіраць у камеры Вільсана. Прыкладна адна α -часціца на 50 000, выпраменьеных радыеактыўным прэпаратом у камеры, захопліваецца ядром азоту, што прыводзіць да выпраменьвання пратона. Пры гэтым ядро азоту ператвараецца ў ядро ізатопа кіслароду:



На рысунку 181 паказана адна з фатаграфій гэтага працэсу. Злева відаць характэрная «вілка» — разгалінаванне трэка. Тоў-



Рыс. 181

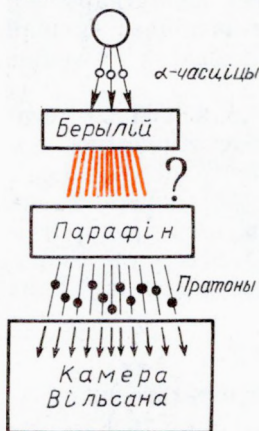
сты след належыць ядру кіслароду, а тонкі — пратону. Астатнія α -часціцы не сутыкаюцца з ядрамі, і іх трэкі прамалінейныя.

Іншымі даследчыкамі былі выяўлены ператварэнні пад уплывам α -часціц ядзер фтору, натрыю, алюмінію і інш., якія суправаджаліся выпраменьваннем пратонаў. Ядры цяжкіх элементаў канца перыядычнай сістэмы не зведвалі ператварэнняў. Відаць, што іх вялікі электрычны зарад не дазваляў α -часціцы наблізіцца да ядра ўшчыльную.

Адкрыццё нейтрона. У 1932 г. адбылася найважнейшая для ўсёй ядзернай фізікі падзея: вучнем Рэзерфорда англійскім фізікам Д. Чэдваікам быў адкрыты *нейтрон*.

Пры бамбардзіроўцы берылію α -часціцамі пратоны не з'яўляліся. Але выявілася нейкая вельмі пранікаючая выпраменьванне, здольнае пераадолець такую перашкоду, як свінцовая пласціна ў 10—20 см таўшчынёй. Было зроблена дапушчэнне, што гэта γ -прамені вялікай энергіі. Ірэн Жаліо-Кюры (дачка Марыі і П'ера Кюры) і яе муж Фрэдэрык Жаліо-Кюры выявілі, што калі на шляху выпраменьвання, што ўтвараецца пры бамбардзіроўцы берылію α -часціцамі, паставіць парафінавую пласцінку, то іанізуючая здольнасць гэтага выпраменьвання рэзка павялічваецца. Яны справядліва дапусцілі, што гэта выпраменьванне выбівае з парафінавай пласцінкі пратоны, якія ёсць у вялікай колькасці ў гэтым вадародзяшчальным рэчыве. З дапамогай камеры Вільсана (схема доследу паказана на рысунку 182) жонка і муж Жаліо-Кюры выявілі гэтыя пратоны і па даўжыні прабегу ацанілі іх энергію. Калі згодна са зробленым дапушчэннем пратоны паскараліся ў выніку сутыкнення з γ -квантамі, то энергія гэтых квантаў павінна была быць велізарнай — каля 55 МэВ.

Рыс. 182



Чэдвак назіраў у камеры Вільсана трэкі ядзер азоту, якія мелі сутыкненні з берыліевым выпраменьваннем. Па яго ацэнцы, энергія γ -квантаў, здольных надаваць ядрам азоту скорасць, якая выяўлялася ў гэтых назіраннях, павінна была складаць 90 МэВ. Аналагічныя ж назіранні ў камеры Вільсана трэкаў ядзер аргону прывялі да вываду, што энергія ўказаных гіпатэтычных γ -квантаў павінна складаць 150 МэВ. Такім чынам, лічачы, што ядры приходзяць у рух у выніку сутыкнення з часціцамі, якія пазбаўлены масы спакою, даследчыкі прыйшлі да яўнага супярэчання: адным і тым жа γ -квантам прыходзілася прыпісваць розную энергію.

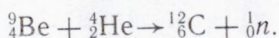
Стала відавочным, што дапушчэнне аб

Жаліо-Кюры Фрэдэрык (1900—1958) — французскі вучоны і прагрэсіўны грамадскі дзеяч. Жаліо-Кюры сумесна з жонкай Ірэн адкрыў у 1934 г. штучную радыеактыўнасць. Вялікае значэнне для адкрыцця нейтрона мелі работы мужа і жонкі Кюры па даследаванні выпраменьвання берылію пад дзеяннем α -часціц. Фрэдэрык Жаліо-Кюры з супрацоўнікамі ў 1939 г. упершыню вызначыў сярэдні лік нейтронаў, якія вылятаюць пры дзяленні ядра атама урану, і паказаў прынцыповую магчымасць ланцуговай ядзернай рэакцыі з вызваленнем энергіі.



выпраменьванні берыліем γ -квантаў, г. зн. часціц, пазбаўленых масы спакою, неабгрунтавана. З берылію пад дзеяннем α -часціц вылятаюць нейкія дастаткова цяжкія часціцы. Толькі пры сутыкненнях з цяжкімі часціцамі пратоны або ядры азоту і аргону маглі атрымаць тую вялікую энергію, якая назіралася. Паколькі гэтыя часціцы валодалі вялікай пранікальнай здольнасцю і непасрэдна не іанізавалі газ, то, значыць, яны былі электрычна нейтральнымі. Зараджаная ж часціца моцна ўзаемадзейнічае з рэчывам і таму хутка траціць сваю энергію.

Новая часціца была названа *нейтронам*. Існаванне прадказваў Рэзерфорд больш чым за 10 гадоў да доследаў Чэдвіка. Па энергіі і імпульсу ядзер, якія сутыкаюцца з нейтронамі, была вызначана іх маса. Яна аказалася крыху большай за масу пратона — 1838,6 электронных мас замест 1836,1 для пратона. Пры пападанні α -часціц у ядры берылію адбываецца рэакцыя:



Тут ${}^1_0\text{n}$ — сімвал нейтрона; зарад яго роўны нулю, а адносная маса — прыблізна адзінцы.

Нейтрон — нестабільная часціца: свабодны нейтрон за час каля 15 мін распадаецца на пратон, электрон і нейтрына — часціцу, якая пазбаўлена масы спакою.

Элементарная часціца — нейтрон не мае электрычнага зараду. Яго маса большая за масу пратона прыблізна на 2,5 электронныя масы.

! Растлумачце, чаму пры цэнтральным сутыкненні з пратонам нейтрон перадае яму ўсю энергію, а пры сутыкненні з ядром азоту — толькі яе частку.

§ 83. БУДОВА АТАМНАГА ЯДРА. ЯДЗЕРНЫЯ СІЛЫ

Адразу ж пасля таго, як у доследах Чэдвіка быў адкрыты нейтрон, савецкі фізік Д. Д. Іваненка і нямецкі вучоны В. Гейзенберг у 1932 г. прапанавалі пратонна-нейтронную

мадэль ядра. Яна была пацверджана наступнымі даследаваннямі ядзерных ператварэнняў і ў цяперашні час з'яўляецца бяспрэчнай.

Пратонна-нейтронная мадэль ядра. Згодна з пратонна-нейтроннай мадэллю ядры складаюцца з элементарных часціц двух сартоў: пратонаў і нейтронаў.

Паколькі цалкам атам электрычна нейтральны, а зарад пратона роўны модулю зараду электрона, то лік пратонаў у ядры роўны ліку электронаў у атамнай абалонцы. Значыць, лік пратонаў у ядры роўны атамнаму нумару элемента Z у перыядычнай сістэме элементаў Д. І. Мендзялеева.

Суму ліку пратонаў Z і ліку нейтронаў N у ядры называюць *масавым лікам* і абазначаюць літарай A :

$$A = Z + N. \quad (10.2)$$

Масы пратона і нейтрона блізкія адна да адной, і кожная з іх прыблізна роўна атамнай адзінцы масы. Маса электронаў у атаме многа меншая за масу ядра. Таму масавы лік ядра роўны акругленай да цэлага ліку адноснай атамнай масе элемента. Масавыя лікі могуць быць вызначаны шляхам грубага вымярэння масы ядзер прыладамі, якія не валодаюць асоба вялікай дакладнасцю.

Ізатопы — гэта ядры з адным і тым жа значэннем Z , але рознымі масавымі лікамі A , г. зн. з розным лікам нейтронаў N .

Ядзерныя сілы. Паколькі ядры вельмі ўстойлівыя, то пратоны і нейтроны павінны ўтрымлівацца ўнутры ядра нейкімі сіламі, прычым вельмі вялікімі. Што гэта за сілы? Заведама можна сказаць, што гэта не гравітацыйныя сілы, якія вельмі слабыя. Устойлівасць ядра не можа быць растлумачана таксама электрамагнітнымі сіламі па той прычыне, што паміж аднайменна зараджанымі пратонамі дзейнічае электрычнае адштурхванне, а нейтроны пазбаўлены электрычнага зараду.

Значыць, паміж ядзернымі часціцамі — пратонамі і нейтронамі (часта іх называюць *нуклонамі*) — дзейнічаюць асобыя сілы. Назва для іх знайшлася сама сабой — *ядзерныя сілы*. Якія асноўныя ўласцівасці ядзерных сіл?

Ядзерныя сілы прыкладна ў 100 разоў перавышаюць электрычныя (кулонаўскія) сілы. Гэта самыя магутныя сілы з усіх, якія ёсць у прыродзе. Таму ўзаемадзеянне ядзерных часціц часта называюць *моцнымі ўзаемадзеяннямі*.

Моцныя ўзаемадзеянні не зводзяцца толькі да ўзаемадзеянняў нуклонаў у ядры. Гэта асобы тып узаемадзеяння, які мае большасць элементарных часціц разам з электрамагнітнымі ўзаемадзеяннямі.

Другая важная асаблівасць ядзерных сіл — гэта іх караткадзеючы характар. Электрамагнітныя сілы параўнальна павольна ўбываюць з адлегласцю. Ядзерныя сілы прыметна праяўляюцца толькі на адлегласцях, роўных па парадку велічыні размерам ядра

($10^{-12} - 10^{-13}$ см), што паказалі ўжо доследы Рэзерфорда па расейванню α -часціц атамнымі ядрамі. Ядзерныя сілы — гэта, так сказаць, «багатыр з вельмі кароткімі рукамі». Закончаная колькасная тэорыя ядзерных сіл пакуль яшчэ не пабудавана. Значныя поспехі ў пабудаванні гэтай тэорыі былі дасягнуты зусім нядаўна — у апошнія 10—15 гадоў.

Ядры атамаў складаюцца з пратонаў і нейтронаў. Гэтыя часціцы ўтрымліваюцца ў ядры ядзернымі сіламі.



Якія галоўныя асаблівасці ядзерных сіл?

§ 84. ЭНЕРГІЯ СУВЯЗІ АТАМНЫХ ЯДЗЕР

Найважнейшую ролю ва ўсёй ядзернай фізіцы адыгрывае паняцце энергіі сувязі ядра. Энергія сувязі дазваляе растлумачыць устойлівасць ядзер, высветліць, якія працэсы вядуць да вылучэння ядзернай энергіі.

Нуклоны ў ядры моцна ўтрымліваюцца ядзернымі сіламі. Для таго каб выдаліць нуклон з ядра, трэба выканаць вялікую работу, г. зн. надаць ядру значную энергію.

Пад энергіяй сувязі ядра разумеюць тую энергію, якая неабходна для поўнага расшчаплення ядра на асобныя нуклоны. На аснове закону захавання энергіі можна таксама сцвярджаць, што энергія сувязі роўна той энергіі, якая вылучаецца пры ўтварэнні ядра з асобных часціц. Энергія сувязі атамных ядзер вельмі вялікая. Але як яе знайсці?

У цяперашні час разлічыць энергію сувязі тэарэтычна, падобна да таго як гэта можна зрабіць для электронаў у атаме, не ўдаецца. Выканаць адпаведныя разлікі можна, толькі прымяняючы суадносіну Эйнштэйна паміж масай і энергіяй:

$$E = mc^2. \quad (10.3)$$

Самыя дакладныя вымярэнні мас ядзер паказваюць, што маса спакою ядра $M_{\text{я}}$ заўсёды меншая за суму мас спакою складаючых яго пратонаў і нейтронаў:

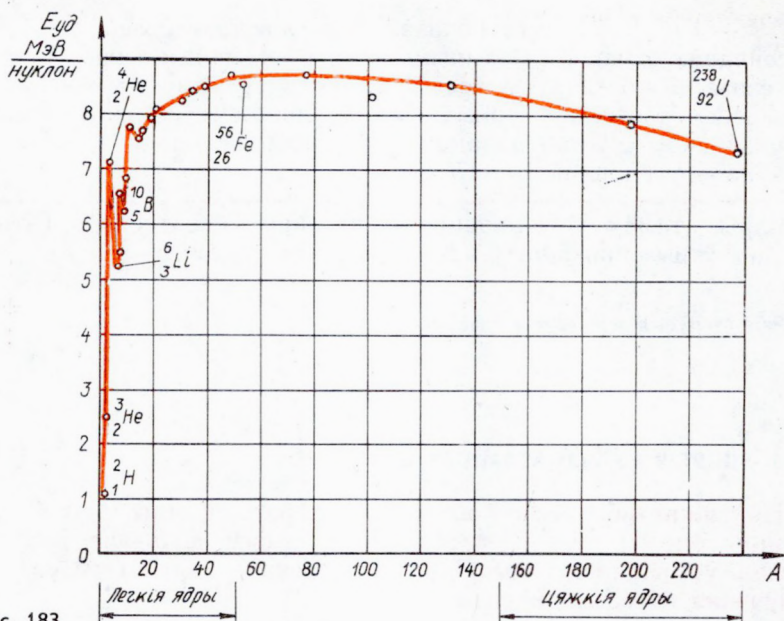
$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n. \quad (10.4)$$

Існуе, як кажуць, дэфект мас: рознасць мас

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$$

дадатная. У прыватнасці, для гелію маса ядра на 0,75 % меншая за суму мас двух пратонаў і двух нейтронаў. Адпаведна для аднаго моля гелію $\Delta M = 0,03$ г.

Памяншэнне масы пры ўтварэнні ядра з нуклонаў азначае,



што пры гэтым памяншаецца энергія дадзенай сістэмы нуклонаў на велічыню энергіі сувязі $E_{\text{сyв}}$:

$$E_{\text{сyв}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2. \quad (10.5)$$

Але куды пры гэтым дзяваецца энергія $E_{\text{сyв}}$ і маса ΔM ?

Пры ўтварэнні ядра з часціц апошнія за кошт дзеянняў ядзерных сіл на малых адлегласцях накіроўваюцца з велізарным паскарэннем адна да адной. γ -кванты, якія пры гэтым выпраменьваюцца, валодаюць энергіяй $E_{\text{сyв}}$ і масай

$$\Delta M = \frac{E_{\text{сyв}}}{c^2}.$$

Аб велічыні энергіі сувязі можна меркаваць па такому прыкладу: утварэнне 4 г гелію суправаджаецца вылучэннем такой жа энергіі, як і згаранне 1,5–2 вагонаў каменнага вугалю.

Важную інфармацыю аб уласцівасцях ядзер змяшчае залежнасць *удзельнай энергіі сувязі* ад масавага ліку A .

Удзельнай энергіяй сувязі называюць энергію сувязі, якая прыходзіцца на адзін нуклон ядра. Яе вызначаюць эксперыментальна.

З рысунка 183 добра відаць, што, не лічачы самых лёгкіх ядзер, удзельная энергія сувязі прыкладна пастаянная і роўна $8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

Адзначым, што энергія сувязі электрона з ядром у атаме вадароду, роўная энергіі іанізацыі, амаль у мільён разоў меншая за гэту велічыню.

Кривая на рысунку 183 мае слаба выражаны максімум. Мак-

сімальную ўдзельную энергію сувязі ($8,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$) маюць элементы з масавымі лікамі ад 50 да 60, г. зн. жалеза і блізкія да яго па парадкаваму нумару элементы. Ядры гэтых элементаў найбольш устойлівыя.

У цяжкіх ядрах удзельная энергія сувязі памяншаецца за кошт кулонаўскай энергіі адштурхвання пратонаў, якая расце з павелічэннем Z . Кулонаўскія сілы імкнуцца разарваць ядро.

Часціцы ў ядры моцна звязаны адна з адной. Энергія сувязі часціц вызначаецца па дэфекту масы.

? 1. Што называюць энергіяй сувязі ядра? 2. Чаму ядро медзі ўстойлівае, а ядро урану няўстойлівае?

§ 85. ЯДЗЕРНЫЯ РЭАКЦЫІ

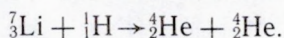
Атамныя ядры пры ўзаемадзеяннях зведваюць ператварэнні. Гэтыя ператварэнні суправаджаюцца павелічэннем або памяншэннем кінетычнай энергіі часціц, якія ўдзельнічаюць у ператварэннях.

Ядзернымі рэакцыямі называюць змяненні атамных ядзер пры ўзаемадзеянні іх з элементарнымі часціцамі або адно з адным. З прыкладамі ядзерных рэакцый вы пазнаёміліся ўжо ў § 82.

Ядзерныя рэакцыі адбываюцца, калі часціцы ўшчыльную прыбліжаюцца да ядра і пападаюць у сферу дзеяння ядзерных сіл. Аднайменна зараджаныя часціцы адштурхваюцца адна ад адной. Таму збліжэнне дадатна зараджаных часціц з ядрамі (або ядзер адно з адным) магчыма, калі гэтым часціцам (або ядрам) нададзена вялікая кінетычная энергія. Гэта энергія надаецца пратонам, ядрам дэйтэрыю — дэйтронам, α -часціцам і іншым больш цяжкім ядрам з дапамогай паскаральнікаў элементарных часціц і іонаў.

Для ажыццяўлення ядзерных рэакцый такія метады значна больш эфектыўны, чым выкарыстанне ядзер гелію, выпраменьваемых радыеактыўнымі элементамі. *Па-першае*, з дапамогай паскаральнікаў часціцам можа быць нададзена энергія парадку 10^5 МэВ, г. зн. значна большая за тую, якую маюць α -часціцы (максімальна 9 МэВ). *Па-другое*, можна выкарыстаць пратоны, якія ў працэсе радыеактыўнага распаду не з'яўляюцца (гэта мэтазгодна таму, што іх зарад у два разы меншы за зарад α -часціц, і таму сіла адштурхвання, якая дзейнічае на іх з боку ядзер, таксама ў два разы меншая). *Па-трэцяе*, можна паскорыць ядры больш цяжкія, чым ядры гелію.

Першая ядзерная рэакцыя на хуткіх пратонах была ажыццёўлена ў 1932 г. Удалося расшчапіць літый на дзве α -часціцы:



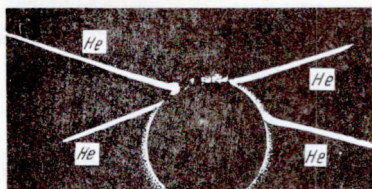


Рис. 184

Як відаць з фатаграфії трэкаў у камеры Вільсана (рис. 184), ядры гелію разлятаюцца ў розныя бакі ўздоўж адной прамой у адпаведнасці з патрабаваннямі закону захавання імпульсу (імпульс пратона многа меншы за імпульс α -часціц, якія ўзнікаюць; на фатаграфії трэкі пратонаў не бачныя).

Энергетычны выхад ядзерных рэакцый. У апісанай вышэй ядзернай рэакцыі кінетычная энергія двух ядраў гелію, што ўтвараюцца, аказалася большая за кінетычную энергію пратона, які ўступаў у рэакцыю, на 7,3 МэВ. Ператварэнне ядзер суправаджаецца змяненнем унутранай энергіі (энергія сувязі). У разгледжанай рэакцыі ўдзельная энергія сувязі ў ядрах гелію большая за ўдзельную энергію сувязі ў ядрах літыю. Таму частка ўнутранай энергіі ядра літыю ператвараецца ў кінетычную энергію α -часціц, якія разлятаюцца.

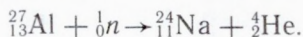
Змяненне энергіі сувязі ядзер азначае, што сумарная энергія спакою часціц і ядзер, што ўдзельнічаюць у рэакцыі, не застаецца нязменнай. Энергія ж спакою ядра $M_{\text{я}}c^2$ згодна з формулай (10.5) непасрэдна выражаецца праз энергію сувязі. У адпаведнасці з законам захавання энергіі змяненне кінетычнай энергіі ў працэсе ядзернай рэакцыі роўна змяненню энергіі спакою ядзер і часціц, якія ўдзельнічаюць у рэакцыі.

Энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі называецца рознасць энергіі спакою ядзер і часціц да рэакцыі і пасля рэакцыі. Згодна са сказаным раней энергетычны выхад ядзернай рэакцыі роўны таксама змяненню кінетычнай энергіі часціц — удзельнікаў рэакцыі.

Калі кінетычная энергія ядзер і часціц пасля рэакцыі большая, чым да рэакцыі, то гавораць аб вылучэнні энергіі. У процілеглым выпадку рэакцыя ідзе з паглынанням энергіі. Іменна такога роду рэакцыя адбываецца пры бамбардзіроўцы азоту α -часціцамі (гл. § 82). Частка кінетычнай энергіі (прыкладна $1,2 \cdot 10^6$ эВ) пераходзіць у працэсе гэтай рэакцыі ва ўнутраную энергію зноў утворанага ядра.

Энергія, што вылучаецца пры ядзерных рэакцыях, можа быць велізарнай. Але выкарыстаць яе шляхам ажыццяўлення сутыкненняў паскораных часціц (або ядзер) з нерухомымі ядрамі мішэні практычна нельга. Бо большая частка паскораных часціц пралятае міма ядзер мішэні, не выклікаючы рэакцыі.

Ядзерныя рэакцыі на нейтронах. Адкрыццё нейтрона было паваротным пунктам у даследаванні ядзерных рэакцый. Паколькі нейтроны не маюць зараду, то яны без перашкод пранікаюць у атамныя ядры і выклікаюць іх змяненні. Напрыклад, назіраецца наступная рэакцыя:



Вялікі італьянскі фізік Энрыка Фермі першым пачаў вывучаць рэакцыі, выклікаемыя нейтронамі. Ён выявіў, што ядзерныя ператварэнні выклікаюцца не толькі хуткімі, але і павольнымі нейтронамі. Прычым гэтыя павольныя нейтроны аказваюцца ў большасці выпадкаў нават значна больш эфектыўнымі, чым хуткія. Таму хуткія нейтроны мэтазгодна папярэдне запавольваецца. Запавольванне нейтронаў да цеплавых скорасцей адбываецца ў звычайнай вадзе. Гэты эфект тлумачыцца тым, што ў вадзе змяшчаецца вялікая колькасць ядзер вадароду — пратонаў, маса якіх амаль роўна масе нейтронаў. Пры сутыкненнях жа шароў аднолькавай масы адбываецца найбольш інтэнсіўная перадача кінетычнай энергіі. Пры цэнтральным саўдары нейтрона з пратоном, які знаходзіцца ў спакоі, ён цалкам перадае пратону сваю кінетычную энергію.

Рэакцыі, у якія ўступаюць атамныя ядры, вельмі разнастайныя. Нейтроны не адштурхваюцца ядрамі і таму асабліва эфектыўна выклікаюць ператварэнні ядзер.

! 1. Растлумачце, скарыстоўваючы рысунак 183, чаму пры ядзернай рэакцыі ${}^7_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ энергія не паглынаецца, а вылучаецца. 2. Што называюць энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі? 3. У чым галоўнае адрозненне ядзерных рэакцый на нейтронах ад ядзерных рэакцый, вызваных зараджанымі часціцамі?

§ 86. ДЗЯЛЕННЕ ЯДЗЕР УРАНУ

Дзяліцца на часткі могуць толькі ядры некаторых цяжкіх элементаў. Пры дзяленні ядзер выпраменьваюцца два-тры нейтроны і γ -прамені. Адначасова вылучаецца вялікая энергія.

Адкрыццё дзялення урану. Дзяленне ядзер урану было адкрыта ў 1938 г. нямецкімі вучонымі О. Ганам і Ф. Штрасманам. Яны ўстанавілі, што пры бамбардзіроўцы урану нейтронамі ўзнікаюць элементы сярэдняй часткі перыядычнай сістэмы: барый, кrypton і інш. Аднак правільнае тлумачэнне гэтага факта, менавіта як дзялення ядра урану, якое захапіла нейтрон, было дадзена ў пачатку 1939 г. англійскім фізікам О. Фрышам сумесна з аўстрыйскім фізікам Л. Мейтнер.

Дзяленне ядра магчыма дзякуючы таму, што маса спакою цяжкага ядра большая за суму мас спакою асколкаў, якія ўзнікаюць пры дзяленні. З-за гэтага адбываецца вылучэнне энергіі, эквівалентнай памяншэнню масы спакою, якое суправаджае дзяленне. Але поўная маса захоўваецца, паколькі маса асколкаў, што рухаюцца з вялікай скорасцю, перавышае іх масу спакою.

Магчымасць дзялення цяжкіх ядзер можна таксама растлумачыць з дапамогай графіка залежнасці ўдзельнай энергіі сувязі ад масавага ліку A (гл. рыс. 183). Удзельная энергія сувязі

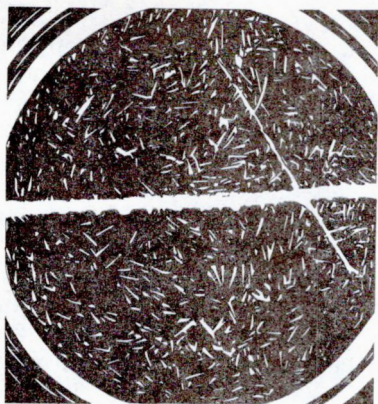


Рис. 185

ўтварэнні ядра і, значыць, тым меншая ўнутраная энергія сістэмы, якая ўтварылася зноў.

Пры дзяленні ядра энергія сувязі, якая прыпадае на кожны нуклон, павялічваецца на 1 МэВ і агульная энергія, якая вылучаецца, павінна быць велізарнай — парадку 200 МэВ. Ні пры якой іншай ядзернай рэакцыі (не звязанай з дзяленнем) такія вялікія энергіі не вылучаюцца.

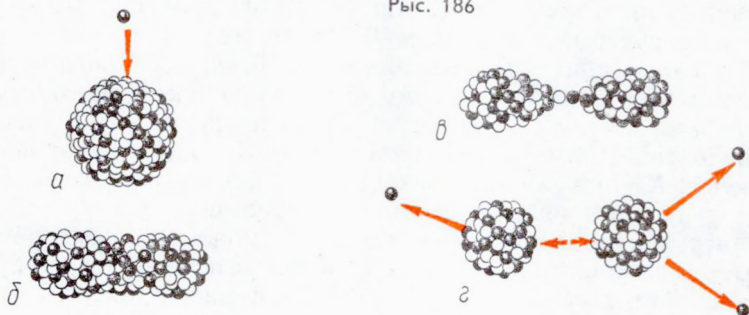
Непасрэдныя вымярэнні энергіі, якая вылучаецца пры дзяленні ядра урану $^{235}_{92}\text{U}$, пацвердзілі прыведзеныя меркаванні і далі велічыню ≈ 200 МэВ. Прычым большая частка гэтай энергіі (168 МэВ) прыпадае на кінетычную энергію асколкаў. На рысунку 185 вы бачыце трэкі асколкаў урану, які дзеліцца ў камеры Вільсана.

Энергія, якая вылучаецца пры дзяленні ядзер, мае электростатычнае, а не ядзернае паходжанне. Вялікая кінетычная энергія, якую маюць асколкі, узнікае ў выніку іх кулонаўскага адштурхвання.

Механізм дзялення ядра. Працэс дзялення атамнага ядра можна растлумачыць на аснове кропельнай мадэлі ядра. Згодна з гэтай мадэллю згустак нуклонаў нагадвае кропельку зараджа-

ядзер атамаў, якія займаюць у перыядычнай сістэме апошнія месцы ($A \approx 200$), прыкладна на 1 МэВ меншая за ўдзельную энергію сувязі ў ядрах элементаў, што знаходзяцца ў сярэдзіне перыядычнай сістэмы ($A \approx 100$). Таму працэс дзялення цяжкіх ядзер на ядры элементаў сярэдняй часткі перыядычнай сістэмы з'яўляецца «энергетычна выгадным». Сістэма пасля дзялення пераходзіць у стан з мінімальнай унутранай энергіяй. Чым большая энергія сувязі ядра, тым большая энергія павінна вылучацца пры

Рис. 186



най вадкасці (рыс. 186, а). Ядзерныя сілы паміж нуклонамi з'яўляюцца караткадзеючымі, падобна да сіл, што дзейнічаюць паміж малекуламі вадкасці. Побач з вялікімі сіламі электрasta-тычнага адштурхвання паміж пратонамі, якія імкнуцца разарваць ядро на часткі, дзейнічаюць яшчэ большыя ядзерныя сілы прыцяжэння. Гэтыя сілы ўтрымліваюць ядро ад распаду.

Ядро урану-235 мае форму шара. Паглынуўшы лішні нейтрон, ядро ўзбуджаецца і пачынае дэфармавацца, набываючы выцягнутую форму (рыс. 186, б). Ядро расцягваецца да таго часу, пакуль сілы адштурхвання паміж палавінкамі выцягнутага ядра не пачынаюць пераважаць над сіламі прыцяжэння, якія дзейнічаюць у перашыйку (рыс. 186, в). Пасля гэтага ядро разрываецца на дзве часткі (рыс. 186, г). Пад дзеяннем кулонаўскіх сіл адштурхвання гэтыя асколкі разлятаюцца са скорасцю, роўнай $1/30$ скорасці святла.

Выпраменьванне нейтронаў у працэсе дзялення. Фундаментальным фактам ядзернага дзялення з'яўляецца выпраменьванне ў працэсе дзялення двух-трох нейтронаў. Іменна дзякуючы гэтаму стала магчымым практычнае выкарыстанне ўнутрыядзернай энергіі.

Зразумець, чаму адбываецца выпраменьванне свабодных нейтронаў, можна, зыходзячы з наступных меркаванняў. Вядома, што адносіна ліку нейтронаў да ліку пратонаў у стабільных ядрах узрастае з павышэннем атамнага нумара. Таму ў асколкаў, што ўзнікаюць пры дзяленні, адносны лік нейтронаў аказваецца большым, чым гэта дапушчальна для ядзер атамаў, якія знаходзяцца ў сярэдзіне табліцы Мендзялеева. У выніку некалькі нейтронаў вызваляецца ў працэсе дзялення. Іх энергія мае розныя значэнні — ад некалькіх мільёнаў электрон-вольт да зусім малых, блізкіх да нуля.

Дзяленне звычайна адбываецца на асколкі няроўнай масы. Асколкі гэтыя моцна радыеактыўныя, паколькі змяшчаюць лішнюю колькасць нейтронаў. У выніку серыі паслядоўных β -распадаў урэшце атрымліваюцца стабільныя ізатопы.

У заключэнне адзначым, што існуе спантаннае дзяленне ядзер урану. Яно было адкрыта савецкімі фізікамі Г. М. Флѣравым і К. А. Петражакам у 1940 г. Перыяд паўраспаду для спантаннага дзялення роўны 10^{16} гадоў. Гэта ў два мільёны разоў больш за перыяд паўраспаду пры α -распадзе урану.

Дзяленне атамных ядзер цяжкіх элементаў магчыма дзякуючы таму, што ўдзельная энергія сувязі гэтых ядзер меншая за ўдзельную энергію сувязі ядзер элементаў сярэдзіны перыядычнай сістэмы Мендзялеева.

§ 87. ЛАНЦУГОВЫЯ ЯДЗЕРНЫЯ РЭАКЦЫІ

Пры дзяленні ядра урану вызваляюцца два-тры нейтроны. Гэта дазваляе ажыццявіць ланцуговую рэакцыю дзялення урану.

Любы з нейтронаў, якія вылятаюць з ядра ў працэсе дзялення, можа ў сваю чаргу выклікаць дзяленне суседняга ядра, якое таксама выпраменьвае нейтроны, здольныя выклікаць далейшае дзяленне. У выніку лік ядзер, якія дзеляцца, вельмі хутка павялічваецца. Узнікае ланцуговая рэакцыя. *Ядзернай ланцуговай рэакцыяй* называецца рэакцыя, у якой часціцы, што яе выклікаюць (нейтроны), утвараюцца як прадукты гэтай рэакцыі.

Ланцуговая рэакцыя суправаджаецца вылучэннем велізарнай энергіі. Пры дзяленні кожнага ядра вылучаецца каля 200 МэВ. Пры поўным жа дзяленні ўсіх ядзер, якія ёсць у 1 г урану, вылучаецца энергія $2,3 \cdot 10^4$ кВт·г. Гэта эквівалентна энергіі, атрымаемай пры згаранні 3 т вугалю або 2,5 т нафты.

Але для ажыццяўлення ланцуговай рэакцыі нельга выкарыстаць любыя ядры, якія дзеляцца пад уплывам нейтронаў. Параду прычын з ядзер, якія сустракаюцца ў прыродзе, прыгодныя толькі ядры ізатопу урану з масавым лікам 235, г. зн. $^{235}_{92}\text{U}$.

Ізотопы урану. Прыродны уран складаецца ў асноўным з двух ізатопаў: $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{238}_{92}\text{U}$. Але ізатоп $^{235}_{92}\text{U}$ складае ўсяго $1/140$ долю ад больш распаўсюджанага ізатопа $^{238}_{92}\text{U}$.

Ядры $^{235}_{92}\text{U}$ дзеляцца пад уплывам як хуткіх, так і павольных нейтронаў. Ядры ж $^{238}_{92}\text{U}$ могуць дзяліцца толькі пад уплывам нейтронаў з энергіяй большай за 1 МэВ. Такую энергію маюць прыкладна 60 % нейтронаў, якія з'яўляюцца пры дзяленні. Аднак прыкладна толькі адзін нейтрон з пяці выклікае дзяленне $^{238}_{92}\text{U}$. Астатнія нейтроны захопліваюцца гэтым ізатопам, не робячы дзялення. У выніку ланцуговая рэакцыя з выкарыстаннем чыстага ізатопа $^{238}_{92}\text{U}$ немагчыма.

Каэфіцыент размнажэння нейтронаў. Для праходжання ланцуговай рэакцыі няма неабходнасці, каб кожны нейтрон абавязкова выклікаў дзяленне ядра. Неабходна толькі, каб сярэдні лік вызваленых нейтронаў у дадзенай масе урану не памяншаўся з цягам часу.

Гэта ўмова будзе выканана, калі *каэфіцыент размнажэння нейтронаў* k большы або роўны адзінцы. *Каэфіцыентам размнажэння нейтронаў* называюць адносіну ліку нейтронаў у якім-небудзь «пакаленні» да ліку нейтронаў папярэдняга «пакалення». Пад зменай пакаленняў разумеюць дзяленне ядзер, пры якім паглынаюцца нейтроны старога «пакалення» і нараджаюцца новыя нейтроны.

Калі $k \geq 1$, то лік нейтронаў павялічваецца з цягам часу або застаецца пастаянным і ланцуговая рэакцыя адбываецца. Пры $k < 1$ лік нейтронаў памяншаецца і ланцуговая рэакцыя немагчыма.

Каэфіцыент размнажэння вызначаецца наступнымі чатырма фактарамі:

1) захопам павольных нейтронаў ядрамі $^{235}_{92}\text{U}$ з наступным дзяленнем і захопам хуткіх нейтронаў ядрамі $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{238}_{92}\text{U}$ таксама з наступным дзяленнем;

2) захопам нейтронаў ядрамі урану без дзялення;

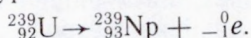
3) захопам нейтронаў прадуктамі дзялення, запавольнікам (аб ім сказана далей) і канструктыўнымі элементамі ўстаноўкі;

4) вылетам нейтронаў з рэчыва, якое дзеліцца, вонкі.

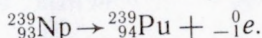
Толькі першы працэс суправаджаецца павелічэннем ліку нейтронаў (у асноўным за кошт дзялення $^{235}_{92}\text{U}$). Усе астатнія прыводзяць да іх памяншэння. Ланцуговая рэакцыя ў чыстым ізатопе $^{238}_{92}\text{U}$ немагчыма, таму што ў гэтым выпадку $k < 1$ (лік нейтронаў, якія паглынаюцца ядрамі без дзялення, большы за лік нейтронаў, што зноў утварыліся за кошт дзялення ядзер).

Для стацыянарнага праходжання ланцуговай рэакцыі каэфіцыент размнажэння нейтронаў павінен быць роўны адзінцы. Гэту роўнасць неабходна падтрымліваць з вялікай дакладнасцю. Ужо пры $k = 1,01$ амаль імгненна адбудзецца выбух.

Утварэнне плутонію. Важнае значэнне мае захоп, які не выклікае дзялення, нейтронаў ядрамі ізатопу урану $^{238}_{92}\text{U}$. Пасля захопу ўтвараецца радыеактыўны ізатоп $^{239}_{92}\text{U}$ з перыядам паўраспаду 23 мін. Распад адбываецца з выпраменьваннем электрона і ўзнікненнем першага трансуранавага элемента — *нептунію*:



Нептуній у сваю чаргу β -радыеактыўны з перыядам паўраспаду каля двух дзён. У працэсе распаду нептунію ўтвараецца наступны трансуранава элемент — *плутоній*:



Плутоній адносна стабільны, паколькі яго перыяд паўраспаду вялікі — парадку 24 000 гадоў. Найважнейшая ўласцівасць плутонію заключаецца ў тым, што ён дзеліцца пад уплывам павольных нейтронаў гэтак жа, як і ізатоп $^{235}_{92}\text{U}$. Таму з дапамогай плутонію таксама можа быць ажыццёўлена ланцуговая рэакцыя, якая суправаджаецца вылучэннем велізарнай энергіі.

Пры ланцуговых ядзерных рэакцыях вылучаецца велізарная энергія. Гэта рэакцыя магчыма таму, што пры дзяленні ядзер выпраменьваецца два-тры нейтроны. Большая частка энергіі, якая вылучаецца, прыходзіцца на кінетычную энергію асколкаў ядзер, якія дзеляцца.

1. Ад чаго залежыць каэфіцыент размнажэння нейтронаў? 2. Якія ізатопы урану выкарыстоўваюцца для ажыццяўлення ланцуговай ядзернай рэакцыі?

Ядзерным (або атамным) рэактарам называецца ўстройства, у якім ажыццяўляецца кіруемая рэакцыя дзялення ядзер.

Ядры урану, асабліва ядры ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$, найбольш эфектыўна захопліваюць павольныя нейтроны. Імавернасць захопу павольных нейтронаў з наступным дзяленнем ядзер у сотні разоў большая, чым хуткіх. Таму ў ядзерных рэактарах, якія працуюць на натуральным уране, выкарыстоўваюцца запавольнікі нейтронаў для павышэння каэфіцыента размнажэння нейтронаў. Працэсы ў ядзерным рэактары схематычна паказаны на рысунку 187.

Асноўныя элементы ядзернага рэактара. На рысунку 188 прыведзена схема энергетычнай устаноўкі з ядзерным рэактарам.

Асноўнымі элементамі ядзернага рэактара з'яўляюцца: ядзернае гаручае ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{238}_{92}\text{U}$ і інш.), запавольнік нейтронаў (цяжкая або звычайная вада, графіт і г. д.), цепланосбіт для вываду энергіі, якая ўтвараецца пры рабоце рэактара (вада, вадкі натрый і інш.), і прыстасаванне для рэгулявання скорасці рэакцыі (уводзімыя ў рабочую прастору рэактара стрыжні, што змяшчаюць кадмій або бор, — рэчывы, якія добра паглынаюць нейтроны).

Зонку рэактар абкружаюць ахоўнай абалонкай, якая затрымлівае γ -выпраменьванні і нейтроны. Абалонку робяць з бетону з жалезным запаўняльнікам.

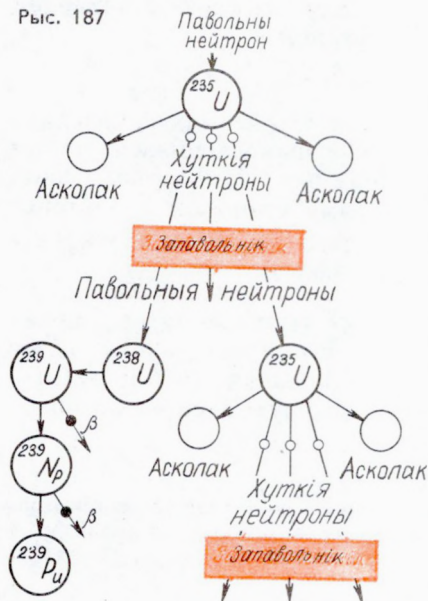
Лепшым запавольнікам з'яўляецца *цяжкая вада* (гл. § 80). Звычайна вада сама захоплівае нейтроны і ператвараецца ў цяжкую ваду. Добрым запавольнікам лічыцца таксама графіт, ядры якога не паглынаюць нейтронаў.

Крытычная маса. Каэфіцыент размнажэння k можа стаць роўным адзінцы толькі пры ўмове, што размеры рэактара і адпаведна маса урану перавышаюць некаторыя крытычныя значэнні. *Крытычная маса* называюць найменшую масу рэчыва, што дзеліцца, пры якой можа адбывацца ланцуговая ядзерная рэакцыя.

Пры малых размерах вельмі вялікая ўцечка нейтронаў праз паверхню актыўнай зоны рэактара (аб'ём, у якім размяшчаюцца стрыжні з уранам).

З павелічэннем размераў сістэмы лік ядзер, якія ўдзельнічаюць у дзяленні, расце пра-

Рыс. 187



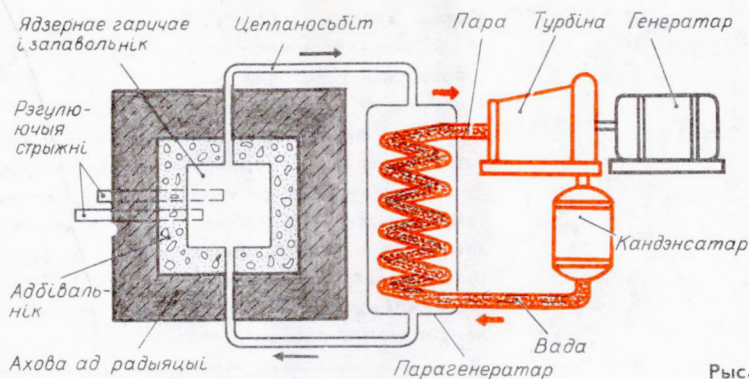


Рис. 188

парцыянальна аб'ёму, а лік нейтронаў, што страчваюцца ў выніку ўцечкі, павялічваецца прапарцыянальна плошчы паверхні. Таму, павялічваючы размеры сістэм, можна дасягнуць значэнняў каэфіцыента размнажэння $k \approx 1$. Сістэма будзе мець крытычныя размеры, калі лік нейтронаў, якія былі страчаны ў выніку захопу і ўцечкі, роўны ліку нейтронаў, атрыманых у працэсе дзялення. Крытычныя размеры і адпаведна крытычная маса вызначаюцца тыпам ядзернага гаручага, запавольнікам і канструктыўнымі асаблівасцямі рэактара.

Для чыстага (без запавольніка) урану $^{235}_{92}\text{U}$, які мае форму шара, крытычная маса прыблізна роўна 50 кг. Пры гэтым радыус шара роўны прыкладна 9 см (уран вельмі цяжкае рэчыва). Прымяняючы запавольнікі нейтронаў і абалонку з берылію, якая адбівае нейтроны, удалося знізіць крытычную масу да 250 г.

Кіраванне рэактарам ажыццяўляецца пры дапамозе стрыжняў, якія змяшчаюць кадмій або бор. Пры вынутых з актыўнай зоны рэактара стрыжняў $k > 1$, а пры поўнасцю ўсунутых стрыжняў $k < 1$. Усоўваючы стрыжні ўнутр актыўнай зоны, можна ў любы момант часу прыпыніць развіццё ланцуговай рэакцыі. Кіраванне ядзернымі рэактарамі ажыццяўляецца дыстанцыйна з дапамогай ЭВМ.

Рэактары на хуткіх нейтронах. Пабудаваны рэактары, якія працуюць без запавольніка на хуткіх нейтронах. Паколькі імавернасць дзялення, выкліканага хуткімі нейтронамі, малая, то такія рэактары не могуць працаваць на натуральным уране.

Рэакцыю можна падтрымліваць толькі ў абагачанай сумесі, якая ўтрымлівае не менш чым 15 % ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$. Перавага рэактараў на хуткіх нейтронах у тым, што пры іх рабоце ўтвараецца значная колькасць плутонію, які затым можна выкарыстаць у якасці ядзернага паліва. Гэтыя рэактары называюць *рэактарамі-размнажальнікамі*, таму што яны ўзнаўляюць матэрыял, які дзеліцца. Будуюцца рэактары з каэфіцыентам узнаўлення да 1,5. Гэта значыць, што ў рэактары пры дзяленні 1 кг ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$ атрымліваецца да 1,5 кг плутонію. У звычайных рэактарах каэфіцыент узнаўлення дасягае 0,6—0,7.



Фермі Энрыка (1901—1954) — выдатны італьянскі фізік, які ўнёс вялікі ўклад у развіццё сучаснай тэарэтычнай і эксперыментальнай фізікі. У 1938 г. эмігрыраваў у ЗША. Адначасова з Дзіракам Фермі стварыў квантавую статыстычную тэорыю электронаў і іншых часціц (статыстыка Фермі — Дзірака). Ён пабудаваў колькасную тэорыю β -распаду — прататып сучаснай квантавай тэорыі ўзаемадзеяння элементарных часціц. Фермі зрабіў рад фундаментальных адкрыццяў у нейтроннай фізіцы. Пад кіраўніцтвам Фермі ў 1942 г. упершыню была ажыццёўлена кіруемая ядзерная рэакцыя.

Першыя ядзерныя рэактары. Упершыню ланцуговая ядзерная рэакцыя дзялення урану была ажыццёўлена ў ЗША калектывам вучоных пад кіраўніцтвам Энрыка Фермі ў снежні 1942 г.

У Савецкім Саюзе першы ядзерны рэактар быў запушчаны 25 снежня 1946 г. калектывам фізікаў, які ўзначальваў наш выдатны вучоны Ігар Васільевіч Курчатаў.

У цяперашні час створаны розныя тыпы рэактараў, якія адрозніваюцца адзін ад аднаго як па магутнасцях, так і па свайму прызначэнню.

У ядзерных рэактарах, акрамя ядзернага гаручага, ёсць запавольнік нейтронаў і стрыжні, што кіруюць. Энергія, што вылучаецца, адводзіцца цепланосбітам.

? 1. Што такое крытычная маса? 2. Для чаго ў атамным рэактары скарыстоўваецца запавольнік нейтронаў?

§ 89. ТЭРМАЯДЗЕРНЫЯ РЭАКЦЫІ

Лёгкія ядры могуць злівацца з вылучэннем энергіі.

Маса спакою ядра урану большая за суму мас спакою асколкаў, на якія дзеліцца ядро. Для лёгкіх ядзер справа выглядае якраз наадварот. Так, маса спакою ядра гелію значна меншая за суму мас спакою двух ядзер цяжкага вадароду, на якія можна падзяліць ядро гелію.

Гэта азначае, што пры зліцці лёгкіх ядзер маса спакою памяншаецца і, значыць, павінна вылучацца вялікая энергія. Падобнага роду рэакцыі зліцця лёгкіх ядзер могуць адбывацца толькі пры вельмі высокіх тэмпературах. Таму яны называюцца тэрмаядзернымі.

Тэрмаядзерныя рэакцыі — гэта рэакцыі зліцця лёгкіх ядзер пры вельмі высокай тэмпературы.

Курчатаў Ігар Васільевіч (1903—1960) — савецкі фізік і арганізатар навукі, тройчы Герой Сацыялістычнай Працы. З 1943 г. Курчатаў узначальваў навуковыя работы, звязаныя з атамнай праблемай. Пад яго кіраўніцтвам былі створаны першы ў Еўропе атамны рэактар (1946) і першая савецкая атамная бомба (1949). Раннія працы Курчатава адносяцца да даследавання сегнетаэлектрыкаў, ядзерных рэакцый, што выклікаюцца нейтронамі, штучнай радыеактыўнасці. Курчатаў адкрыў існаванне ўзбуджаных станаў ядзер з адносна вялікім часам жыцця.



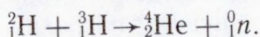
Для зліцця ядзер неабходна, каб яны зблізіліся на адлегласць каля 10^{-12} см, г. зн. каб яны папалі ў сферу дзеяння ядзерных сіл. Гэтаму збліжэнню перашкаджае кулонаўскае адштурхванне ядзер, якое можа быць пераадолена толькі за кошт вялікай кінетычнай энергіі цеплавога руху ядзер.

Энергія, што вылучаецца пры тэрмаядзерных рэакцыях у разліку на адзін нуклон, перавышае ўдзельную энергію, што вылучаецца пры ланцуговых рэакцыях дзялення ядзер. Так, пры зліцці цяжкага вадароду — *дэйтэрыю* — са звышсяжкім ізатопа вадароду — *трытэем* — вылучаецца каля 3,5 МэВ на адзін нуклон. Пры дзяленні ж урану вылучаецца прыкладна 1 МэВ энергіі на адзін нуклон.

Тэрмаядзерныя рэакцыі адыгрываюць рашаючую ролю ў эвалюцыі Сусвету. Энергія выпраменьвання Сонца і зорак мае тэрмаядзернае паходжанне. Па сучасных уяўленнях, на ранняй стадыі развіцця зорка ў асноўным складаецца з вадароду. Тэмпература ўнутры зоркі такая вялікая, што ў ёй адбываюцца рэакцыі зліцця ядраў вадароду з утварэннем гелію. Затым пры зліцці ядзер гелію ўтвараюцца і больш цяжкія элементы.

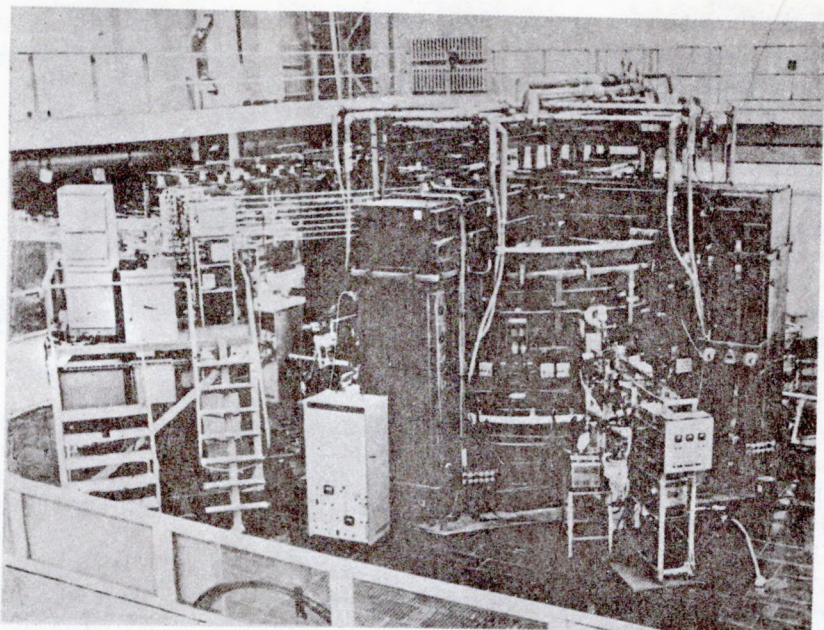
Тэрмаядзерныя рэакцыі адыгрываюць рашаючую ролю ў эвалюцыі хімічнага саставу рэчыва ў Сусвеце. Усе гэтыя рэакцыі суправаджаюцца вылучэннем энергіі, якая забяспечвае выпраменьванне святла зоркамі на працягу мільярдаў гадоў.

Ажыццяўленне кіруемых тэрмаядзерных рэакцый на Зямлі абяцае чалавецтву новую, практычна невычэрпную крыніцу энергіі. Найбольш перспектыўнай у гэтых адносінах рэакцыяй з'яўляецца рэакцыя зліцця дэйтэрыю з трытэем:



У гэтай рэакцыі вылучаецца энергія 17,6 МэВ. Паколькі трытэю ў прыродзе няма, ён павінен выпрацоўвацца ў самім тэрмаядзерным рэактары з літыю.

Эканамічна выгадная рэакцыя, як паказваюць разлікі, можа адбывацца толькі пры награванні рэагуючых рэчываў да тэмпе-



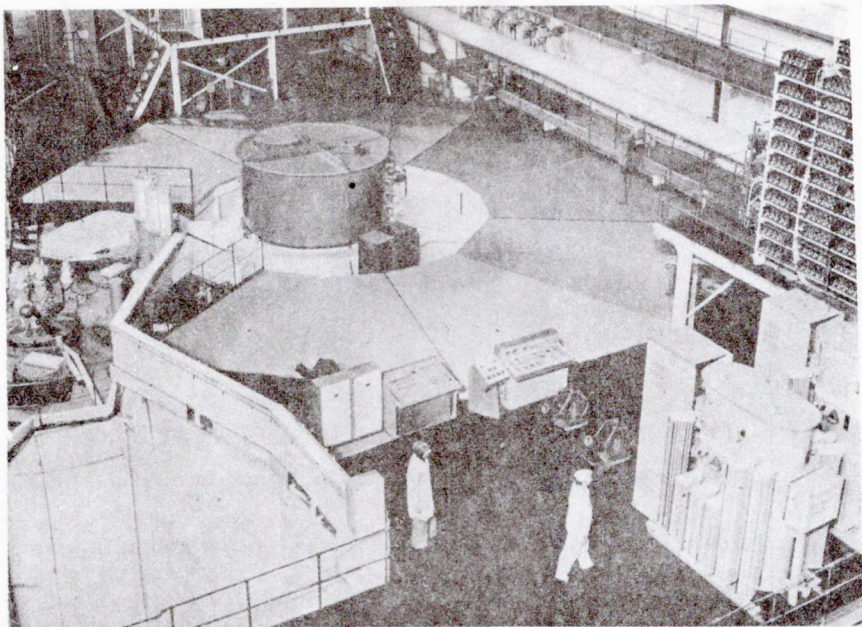
Экспериментальная ўстаноўка «Такамак-10», прызначаная для вывучэння ўмоў існавання кіруемых тэрмаядзерных рэакцый

ратуры парадку соцень мільёнаў кельвін пры вялікай шчыльнасці рэчыва (10^{14} — 10^{15} часціц у 1 см^3). Такія тэмпературы могуць быць у прынцыпе дасягнуты шляхам стварэння ў плазме магутных электрычных разрадаў. Асноўная цяжкасць на гэтым шляху заключаецца ў тым, каб утрымаць плазму такой высокай тэмпературы ўнутры ўстаноўкі на працягу 0,1—1 с.

Ніякія сценкі з рэчыва тут не падыходзяць, таму што пры такой высокай тэмпературы яны адразу ж ператворацца ў пару. Адзіна магчымым з'яўляецца метад утрымання высокатэмпературнай плазмы ў абмежаваным аб'ёме з дапамогай вельмі моцных магнітных палёў. Аднак да цяперашняга часу рашыць гэту задачу не ўдалося з-за няўстойлівасці плазмы. Няўстойлівасць прыводзіць да дыфузіі часткі зараджаных часціц скрозь магнітныя «сценкі».

У цяперашні час існуе ўпэўненасць у тым, што рана ці позна тэрмаядзерныя рэактары будуць створаны. Вучоныя нашай краіны дасягнулі найвялікшых поспехаў у стварэнні кіруемых тэрмаядзерных рэакцый. Гэтыя работы былі пачаты пад кіраўніцтвам акадэмікаў Л. А. Арцымовіча і М. А. Леантовіча і працягваюцца іх вучнямі.

Пакуль жа ўдалося ажыццявіць толькі *некіруемую рэакцыю сінтэзу* выбуховага тыпу ў вадароднай (або тэрмаядзернай) бомбе.



Атамны рэактар на хуткіх нейтронах магутнасцю 600 МВт, які ўстаноўлены на Беларускай АЭС

Ажыццяўленне кіруемых тэрмаядзерных рэакцый здольнае рашыць энергетычную праблему чалавецтва. Некіруемыя тэрма-ядзерныя рэакцыі ў вадародных бомбах здольныя чалавецтва знішчыць.

❓ 1. Чаму рэакцыя зліцця лёгкіх ядзер адбываецца толькі пры вельмі высокіх тэмпературах? 2. Як растлумачыць з пункту гледжання закону захавання энергіі, што энергія вылучаецца як пры дзяленні цяжкіх ядзер, так і пры зліцці лёгкіх ядзер?

§ 90. ПРЫМЯНЕННЕ ЯДЗЕРНАЙ ЭНЕРГІІ

Развіццё ядзернай энергіі ў СССР. Прымяненне ядзернай энергіі для пераўтварэння яе ў электрычную ўпершыню было ажыццёўлена ў нашай краіне ў 1954 г. У г. Обнінску была ўведзена ў дзеянне першая атамная электрастанцыя (АЭС) магутнасцю 5000 кВт. Энергія, што вылучалася ў ядзерным рэактары, выкарыстоўвалася для ператварэння вады ў пару, якая вярцела затым звязаную з генератарам турбіну.

Па такому ж прынцыпу дзейнічаюць уведзеныя ў эксплуатацыю за прайшоўшыя два дзесяцігоддзі Новаваронежская, Ленінградская, Курская і Кольская АЭС. Рэактары гэтых станцый маюць магутнасць 500—1000 МВт.



Першы ў свеце атамны ледакол «Ленін» сярод ільдоў Паўночнага Ледавітага акіяна

Атамныя электрастанцыі будуюцца перш за ўсё ў еўрапейскай частцы краіны. Гэта звязана з перавагамі АЭС у параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі, якія працуюць на арганічным паліве. Ядзерныя рэактары не спажываюць дэфіцытнага арганічнага паліва і не загрузаюць перавозкамі вугалю чыгуначны транспарт. Атамныя электрастанцыі не спажываюць атмасферны кісларод і не забруджваюць асяроддзе попелам і прадуктамі згарання. Аднак размяшчэнне АЭС у густанаселеных абласцях нясе ў сабе патэнцыяльную пагрозу.

У рэактарах на цеплавых (г. зн. павольных) нейтронах уран выкарыстоўваецца толькі на 1—2 %. Поўнае выкарыстанне урану дасягаецца ў рэактарах на хуткіх нейтронах, у якіх забяспечваецца таксама ўзнаўленне новага ядзернага паліва ў выглядзе плутонію. У 1980 г. на Белаўскай АЭС адбыўся пуск першага ў свеце рэактара на хуткіх нейтронах магутнасцю 600 МВт.

Ядзернай энергетыцы, як і многім іншым галінам прамысловасці, уласцівы шкодныя або небяспечныя фактары ўздзеяння на навакольнае асяроддзе. Найбольшую патэнцыяльную небяспеку ўяўляе радыеактыўнае забруджванне. Складаныя праблемы ўзнікаюць з пахаваннем радыеактыўных адходаў і дэмантажом атамных электрастанцый, якія адслужылі свой тэрмін. Тэрмін іх службы каля 20 гадоў, пасля чаго аднаўленне станцый з-за шматгадовага ўздзеяння радыяцыі на матэрыялы канструкцый немагчыма.

АЭС праектуецца з разлікам на максімальную бяспечнасць персаналу станцыі і насельніцтва. Вопыт эксплуатацыі АЭС ва ўсім свеце паказвае, што біясфера надзейна захавана ад радыяцыйнага ўздзеяння прадпрыемстваў ядзернай энергетыкі ў нармальным рэжыме эксплуатацыі. Аднак выбух чацвёртага рэак-

тара на Чарнобыльскай АЭС паказаў, што рызыка разбурэння актыўнай зоны рэактара з-за памылак персаналу і пралікаў у канструкцыі рэактараў застаецца рэальнаю, таму прымаюцца жорсткія меры для памяншэння гэтай рызыкі.

Ядзерныя рэактары ўстанаўліваюцца на атамных падводных лодках і ледаколах.

Ядзерная зброя. Некіруемая ланцуговая рэакцыя з вялікім каэфіцыентам размнажэння нейтронаў ажыццяўляецца ў атамнай бомбе.

Для таго каб адбывалася амаль імгненнае вылучэнне энергіі (выбух), рэакцыя павінна ісці на хуткіх нейтронах (без прымянення запавольнікаў). У якасці выбуховага рэчыва выкарыстоўваецца чысты уран $^{235}_{92}\text{U}$ або плутоній $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Каб мог адбыцца выбух, размеры матэрыялу, што дзеліцца, павінны перавышаць крытычныя. Гэта дасягаецца або хуткім злучэннем двух кавалкаў матэрыялу, што дзеліцца, з дакрытычнымі размерамі, або за кошт рэзкага сціскання аднаго кавалка да размераў, пры якіх уцечка нейтронаў праз паверхню падае настолькі, што размеры кавалка становяцца надкрытычнымі. Адно і другое ажыццяўляецца з дапамогай звычайных выбуховых рэчываў.

Пры выбуху бомбы тэмпература дасягае дзесяткаў мільёнаў кельвін. Пры такой тэмпературы рэзка павышаецца ціск і ўтвараецца магутная выбуховая хваля. Адначасова ўзнікае магутнае выпраменьванне. Прадукты ланцуговай рэакцыі пры выбуху бомбы моцна радыеактыўныя і небяспечныя.

Атамныя бомбы былі прыменены ЗША ў канцы другой сусветнай вайны супраць Японіі. У 1945 г. былі скінуты атамныя бомбы на японскія гарады Хірасіма і Нагасакі. Гэтыя акты масавага знішчэння людзей не былі выкліканы ваеннай неабходнасцю, паколькі ў той час капітуляцыя Японіі ўжо была прадвызначана.

У тэрмаядзернай (вадароднай) бомбе крыніцай высокай тэмпературы, якая неабходна для тэрмаядзернага сінтэзу, служыць выбух атамнай бомбы (уранавай або плутоніевай), змешчанай унутры тэрмаядзернай. Тэхнічныя магчымасці павелічэння энергіі выбуху гэтых бомбаў нічым не абмежаваныя.

Са стварэннем ядзернай зброі перамога ў вайне стала немагчымай. Ядзерная вайна здольная прывесці чалавецтва да гібелі, таму народы ўсяго свету настойліва змагаюцца за забарону ядзернай зброі.

§ 91. АТРЫМАННЕ РАДЫЕАКТЫЎНЫХ ІЗАТОПАУ І ІХ ПРЫМЯНЕННЕ

У атамнай індустрыі ўсё ўзрастаючую каштоўнасць для чалавецтва ўяўляюць радыеактыўныя ізатопы

Элементы, якія не існуюць у прыродзе. З дапамогай ядзерных рэакцый можна атрымаць радыеактыўныя ізатопы ўсіх хіміч-

них елементаў, якія сустракаюцца ў прыродзе толькі ў стабільным стане. Элементы пад нумарамі 43, 61, 85 і 87 наогул не маюць стабільных ізатопаў і ўпершыню былі атрыманы штучна. Так, напрыклад, элемент з парадкавым нумарам $Z = 43$, які атрымаў назву тэхнецый, мае самы доўгаіснуючы ізатоп з перыядам паўраспаду каля мільёна гадоў.

З дапамогай ядзерных рэакцый атрыманы таксама *трансуранавыя элементы*. Аб нептуніі і плутоніі вы ўжо ведаеце. Акрамя іх, атрыманы яшчэ наступныя элементы: *амерыцый* ($Z = 95$), *кюрый* ($Z = 96$), *берклій* ($Z = 97$), *каліфорній* ($Z = 98$), *эйнштэйній* ($Z = 99$), *фермій* ($Z = 100$), *мендзялевій* ($Z = 101$), *нобелій* ($Z = 102$), *лайрэнсій* ($Z = 103$), *курчатовій* ($Z = 104$), *нільсборый* ($Z = 105$). Курчатовіі, нільсборый, а таксама элементы 106, 107 і 108, якія пакуль не маюць агульнапрынятых назваў, упершыню сінтэзаваны ў СССР у Дубне. (Элемент 108 адначасова сінтэзаваны ў ФРГ, там жа сінтэзаваны элемент 109.)

Мечаныя атамы. У цяперашні час як у навуцы, так і ў прамысловасці шырока пачынаюць прымяняцца радыеактыўныя ізатопы розных хімічных элементаў. Найбольшае значэнне мае метад *мечаных атамаў*. Метад заснаваны на тым, што хімічныя ўласцівасці радыеактыўных ізатопаў не адрозніваюцца ад уласцівасцей нерадыеактыўных ізатопаў тых жа элементаў.

Выявіць радыеактыўныя ізатопы можна вельмі проста па іх выпраменьванню. Радыеактыўнасць з'яўляецца своеасаблівай адзнакай, з дапамогай якой можна прасачыць за паводзінамі элемента пры розных хімічных рэакцыях і фізічных ператварэннях рэчываў. Метад «мечаных атамаў» стаў адным з найбольш дзейсных метадаў пры рашэнні шматлікіх праблем біялогіі, фізіялогіі, медыцыны і г. д.

Радыеактыўныя ізатопы — крыніцы выпраменьванняў. Радыеактыўныя ізатопы шырока прымяняюцца ў навуцы, медыцыне і тэхніцы як кампактныя крыніцы выпраменьванняў γ -прамяняў. Галоўным чынам выкарыстоўваецца радыеактыўны кобальт $^{60}_{27}\text{Co}$.

Атрыманне радыеактыўных ізатопаў. Атрымліваюць радыеактыўныя ізатопы ў атамных рэактарах і на паскаральніках элементарных часціц. У цяперашні час вытворчасцю ізатопаў занята вялікая галіна прамысловасці.

Радыеактыўныя ізатопы ў біялогіі і медыцыне. Адным з найбольш выдатных даследаванняў, праведзеных з дапамогай «мечаных атамаў», з'явілася даследаванне абмену рэчываў у арганізмах. Было даказана, што за параўнальна невялікі час арганізм амаль поўнасцю абнаўляецца. Складаючыя яго атамы замяняюцца новымі.

Толькі жалеза, як паказалі доследы па ізатопнаму даследаванню крыві, з'яўляецца выключэннем з гэтага правіла. Жалеза ўваходзіць у састаў гемаглабіну чырвоных крывяных шарыкаў. Пры ўвядзенні ў ежу радыеактыўных атамаў жалеза $^{59}_{26}\text{Fe}$ было выяўлена, што яны амаль не паступаюць у кроў. Толькі ў тым

выпадку, калі запасы жалеза ў арганізме вычэрпваюцца, жалеза пачынае засвойвацца арганізмам.

Калі не існуе дастаткова доўгажывучых радыеактыўных ізатопаў, як, напрыклад, у кіслароду і азоту, мяняюць ізатопны састаў стабільных элементаў. Так, дабаўленнем да кіслароду лішку ізотопу ^{18}O было ўстаноўлена, што свабодны кісларод, які вылучаецца пры фотасінтэзе, першапачаткова ўваходзіў у састаў вады, а не вуглякіслага газу.

Радыеактыўныя ізатопы прымяняюцца ў медыцыне як для пастаноўкі дыягназаў, так і для тэрапеўтычных мэт.

Радыеактыўны натрый, які ўводзіцца ў невялікіх колькасцях у кроў, выкарыстоўваецца для даследавання кровазвароту.

Ёд інтэнсіўна адкладваецца ў шчытападобнай залозе, асабліва пры базадавай хваробе. Назіраючы з дапамогай лічыльніка за адкладаннем радыеактыўнага ёду, можна хутка паставіць дыягназ. Вялікія дозы радыеактыўнага ёду выклікаюць частковае разбурэнне тканак, што развіваюцца анамальна, і таму радыеактыўны ёд выкарыстоўваюць для лячэння базадавай хваробы.

Інтэнсіўнае γ -выпраменьванне кобальту выкарыстоўваецца пры лячэнні ракавых захворванняў (кобальтавая пушка).

Радыеактыўныя ізатопы ў прамысловасці. Не менш шырокія прымяненні радыеактыўных ізатопаў у прамысловасці. Адным з прыкладаў гэтага можа служыць наступны спосаб кантролю зносу поршневых кольцаў у рухавіках унутранага згарання. Абпраменьваючы поршневае кольца нейтронамі, выклікаюць у ім ядзерныя рэакцыі і робяць яго радыеактыўным. Пры рабоце рухавіка часціцы матэрыялу кольца пападаюць у змазачнае масла. Даследуючы ўзровень радыеактыўнасці масла пасля пэўнага часу работы рухавіка, знаходзяць знос кольца.

Радыеактыўныя ізатопы дазваляюць меркаваць аб дыфузіі металаў, працэсах у доменных печах і г. д. Магутнае γ -выпраменьванне радыеактыўных прэпаратаў выкарыстоўваюць для даследавання ўнутранай структуры металічных адлівак з мэтай выяўлення ў іх дэфектаў.

Радыеактыўныя ізатопы ў сельскай гаспадарцы. Усё больш шырокае прымяненне атрымліваюць радыеактыўныя ізатопы ў сельскай гаспадарцы. Абпраменьванне насення раслін (бавоўны, капусты і інш.) невялікімі дозамі γ -прамяняў ад радыеактыўных прэпаратаў прыводзіць да павелічэння ўраджайнасці.

Вялікія дозы радыяцыі выклікаюць мутацыі ў раслін і мікраарганізмаў, што ў асобных выпадках прыводзіць да з'яўлення мутантаў з новымі каштоўнымі ўласцівасцямі (радыеселекцыя). Так створаны каштоўныя гатункі пшаніцы, фасолі і іншых культур, а таксама атрыманы высокапрадукцыйныя мікраарганізмы, якія прымяняюцца ў вытворчасці антыбіётыкаў. Гама-выпраменьванне радыеактыўных ізатопаў выкарыстоўваецца таксама для барацьбы са шкоднымі насякомымі і для кансервацыі харчовых прадуктаў.

Шырокае прымяненне атрымалі «мечаныя атамы» ў агра-тэхніцы. Напрыклад, каб высветліць, якое з фосфарных угнаенняў лепш засвойваецца раслінай, памячаюць розныя ўгнаенні радыеактыўным фосфарам ^{32}P . Даследуючы затым расліны на радыеактыўнасць, можна вызначыць колькасць засвоенага імі фосфару з розных гатункаў угнаення.

Радыеактыўныя ізатопы ў археалогіі. Цікавае прымяненне для вызначэння ўзросту старажытных прадметаў арганічнага паходжання (дрэва, драўніннага вугалю, тканін і г. д.) атрымаў метаад радыеактыўнага вугляроду. У раслінах заўсёды ёсць β -радыеактыўны ізатоп вугляроду ^{14}C з перыядам паўраспаду $T = 5700$ гадоў. Ён утвараецца ў атмасферы Зямлі ў невялікай колькасці з азоту пад дзеяннем нейтронаў. Апошнія ж узнікаюць за кошт ядзерных рэакцый, выкліканых хуткімі часціцамі, якія паступаюць у атмасферу з космасу (касмічныя прамені). Злучаючыся з кіслародам, гэты вуглярод утварае вуглякіслы газ, які паглынаецца раслінамі, а праз іх і жывёламі. Адзін грам вугляроду з узораў маладога лесу выпраменьвае каля пятнаццаці β -часціц у секунду.

Пасля гібелі арганізма папаўненне яго радыеактыўным вугляродам спыняецца. Наяўная ж колькасць гэтага ізатопу ўбывае за кошт радыеактыўнасці. Вызначаючы працэнтную змяшчальнасць радыеактыўнага вугляроду ў арганічных рэштках, можна вызначыць іх узрост, калі ён знаходзіцца ў межах ад 1000 да 50 000 і нават да 100 000 гадоў. Такім метадам даведваюцца аб узросце егіпецкіх мумій, рэшткаў дагістарычных вогнішчаў і г. д.

Радыеактыўныя ізатопы шырока прымяняюцца ў біялогіі, медыцыне, прамысловасці, сельскай гаспадарцы і нават у археалогіі.



Што такое радыеактыўныя ізатопы і як іх выкарыстоўваюць?

§ 92. БІЯЛАГІЧНАЕ ДЗЕЯННЕ РАДЫЕАКТЫЎНЫХ ВЫПРАМЕНЬВАННЯЎ

Выпраменьванні радыеактыўных рэчываў аказваюць вельмі моцнае ўздзеянне на ўсе жывыя арганізмы. Нават слабае выпраменьванне, якое пры поўным паглыннанні павышае тэмпературу цела толькі на $0,001^\circ\text{C}$, парушае жыццядзейнасць клетак.

Жывая клетка — гэта складаны механізм, не здольны працягваць нармальную дзейнасць нават пры малых пашкоджаннях асобных яго ўчасткаў. Між тым нават слабыя выпраменьванні здольныя нанесці клеткам істотныя пашкоджанні і выклікаць небяспечныя захворванні (прамянёвая хвароба). Пры вялікай інтэнсіўнасці выпраменьвання жывыя арганізмы гінуць. Небяпека выпраменьванняў павялічваецца ад таго, што яны не выклікаюць ніякіх адчуванняў болю нават пры смяротных дозах.

Механізм паражаючага біялагічнага аб'екта дзеяння выпра-

меньвання яшчэ недастаткова вывучаны. Але зразумела, што яно зводзіцца да іанізацыі атамаў і малекул і гэта прыводзіць да змянення іх хімічнай актыўнасці. Найбольш адчувальныя да выпраменьванняў ядры клетак, асабліва клетак, якія хутка дзеляцца. Таму ў першую чаргу выпраменьванні пашкоджваюць касцявы мозг, з-за чаго парушаецца працэс утварэння крыві. Далей наступае паражэнне клетак стрававальнага тракта і іншых органаў.

Моцна ўплывае абпраменьванне на спадчыннасць, пашкоджваючы гены ў храмасомах. У большасці выпадкаў гэты ўплыў з'яўляецца неспрыяльным.

Абпраменьванне жывых арганізмаў можа аказваць і пэўную карысць. Клеткі, якія хутка размнажаюцца ў злаякасных (ракавых) пухлінах, больш адчувальныя да абпраменьвання, чым нармальныя. На гэтым заснавана падаўленне ракавай пухліны γ-прамянямі радыеактыўных прэпаратаў, якія для гэтай мэты больш эфектыўныя, чым рэнтгенаўскія прамені.

Доза выпраменьвання. Уздзеянне выпраменьванняў на жывыя арганізмы характарызуецца *дозай выпраменьвання*. Паглынутай дозой *выпраменьвання* D называецца адносіна паглынутай энергіі E іанізуючага выпраменьвання да масы m рэчыва, якое абпраменьваецца:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (10.6)$$

У СІ паглынутую дозу выпраменьвання выражаюць у *грэях* (скарочана: Гр). 1 Гр *роўны паглынутай дозе выпраменьвання, пры якой абпрамененаму рэчыву масай 1 кг перадаецца энергія іанізуючага выпраменьвання 1 Дж*:

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Натуральны фон радыяцыі (касмічныя прамені; радыеактыўнасць навакольнага асяроддзя і цела чалавека) складае за год дозу выпраменьвання каля $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на чалавека. Міжнародная камісія па радыяцыйнай ахове ўстанавіла для асоб, што працуюць з выпраменьваннем, гранічна дапушчальную за год дозу 0,05 Гр. Доза выпраменьвання ў 3—10 Гр, атрыманая за кароткі час, смяротная.

Рэнтген. На практыцы шырока выкарыстоўваецца пазасістэмная адзінка экспазіцыйнай дозы выпраменьвання — *рэнтген* (скарочана: Р). Гэта адзінка з'яўляецца мерай іанізуючай здольнасці рэнтгенаўскага і гама-выпраменьванняў. Доза выпраменьвання роўна аднаму рэнтгену (1 Р), калі ў 1 см^2 сухога паветра пры тэмпературы 0°С і ціску 760 мм рт. сл. утвараецца столькі іонаў, што іх сумарны зарад кожнага знака паасобку роўны $3 \cdot 10^{-10}$ Кл. Пры гэтым атрымліваецца прыкладна $2 \cdot 10^9$ пар іонаў. Лік іонаў, што ўтвараюцца, звязаны з энергіяй, якая паглынаецца рэчывам. У практычнай дазіметрыі можна лічыць

1 Р прыблізна эквівалентным паглынутаю дозе выпраменьвання 0,01 Гр.

Ахова арганізмаў ад выпраменьвання. Пры рабоце з любой крыніцай радыяцыі (радыеактыўныя ізатопы, рэактары і інш.) неабходна прымаць меры па радыяцыйнай ахове ўсіх людзей, якія могуць трапіць у зону дзеяння выпраменьвання.

Самы прасты метада аховы — гэта вывад персаналу з крыніцы выпраменьвання на дастаткова вялікую адлегласць. Нават без уліку паглынання ў паветры інтэнсіўнасць радыяцыі ўбывае адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці ад крыніцы. Таму ампулы з радыеактыўнымі прэпаратамі не рэкамендуецца браць рукамі. Трэба карыстацца спецыяльнымі шчыпцамі з доўгім дзяржаннем.

У тых выпадках, калі аддаленне ад крыніцы выпраменьвання на дастаткова вялікую адлегласць немагчыма, выкарыстоўваюць для аховы ад выпраменьвання перашкоды з паглынаючых матэрыялаў.

Найбольш складаная ахова ад γ -прамяняў і нейтронаў з-за іх вялікай пранікальнай здольнасці. Лепшым паглынальнікам γ -прамяняў з'яўляецца свінец. Павольныя нейтроны добра паглынаюцца бора і кадміем. Хуткія нейтроны папярэдне запавольваюцца з дапамогай графіту.

Пасля аварыі на Чарнобыльскай АЭС Міжнародным агенцтвам па атамнай энергіі (МАГАТЭ) па прапанове нашай краіны прыняты рэкамендацыі па дадатковых мерах бяспекі энергетычных рэактараў. Гэтыя дадатковыя меры прывядуць да некаторага павышэння расходаў на атрыманне адной кілават-гадзіны электраэнергіі. Устаноўлены больш жорсткія рэгламенты працы персанала АЭС.

Аварыя на Чарнобыльскай АЭС паказала вялікую небяспеку радыеактыўных выпраменьванняў. Усе людзі павінны мець уяўленне аб гэтай небяспецы і мерах аховы ад яе.



1. Што такое доза выпраменьвання? 2. Чаму (у рэнтгенах) роўны натуральны фон радыяцыі? 3. Чаму (у рэнтгенах) роўна гранічная дапушчальная за год доза выпраменьвання для асоб, якія працуюць з радыеактыўнымі прэпаратамі?

ПРАКТЫКАВАННЕ 10

1. У выніку паслядоўнай серыі радыеактыўных распадаў уран $^{238}_{92}\text{U}$ ператвараецца ў свінец $^{206}_{82}\text{Pb}$. Колькі α - і β -ператварэнняў ён пры гэтым зведае?

2. Пэрыяд паўраспаду радыю $T = 1600$ гадоў. Праз які час лік атамаў паменшыцца ў 4 разы?

3. У колькі разоў паменшыцца лік атамаў аднаго з ізатопаў радону за 1,91 сут? Пэрыяд паўраспаду гэтага ізатопу роўны $T = 3,82$ сут.

4. Карыстаючыся перыядычнай сістэмай элементаў Д. І. Мендзялеева, вызначце лік пратонаў і лік нейтронаў у ядрах атамаў фтору, аргону, брома, цэзію і золата.

5. Чаму роўна энергія сувязі ядра цяжкага вадароду — дэйтрона? Адносная атамная маса дэйтрона $m_D = 2,01355$, пратона $m_p = 1,00728$, нейтрона $m_n = 1,00866$; маса атама вугляроду $m_C = 1,995 \cdot 10^{-26}$ кг.

6. Пры бамбардзіроўцы ядзер бору $^{11}_5\text{B}$ пратонамі атрымліваецца берылій ^8_4Be . Якое яшчэ ядро атрымліваецца пры гэтай рэакцыі?

7. У выніку дзялення ядра урану $^{235}_{92}\text{U}$, які захапіў нейтрон, утвараюцца ядры барыю $^{142}_{56}\text{Ba}$ і крыпталу $^{91}_{36}\text{Kr}$, а таксама тры свабодныя нейтроны. Удзельная энергія сувязі ядзер барыю 8,38 МэВ/нуклон, крыпталу — 8,55 МэВ/нуклон і урану — 7,59 МэВ/нуклон. Чаму роўна энергія, якая вылучаецца пры дзяленні аднаго ядра урану?

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 10¹

1. У ядзернай фізіцы вывучаюцца структура і ператварэнні ядзер. Для рэгістравання і вывучэння сутыкненняў і ўзаемных ператварэнняў атамных ядзер і элементарных часціц выкарыстоўваюць спецыяльныя прыстасаванні. Да іх ліку адносяцца лічылнік Гейгера, камера Вільсана, пузырковая камера, фотаэмульсіі.

2. У канцы мінулага стагоддзя А. Бекерэль адкрыў з'яву радыеактыўнасці. Такія хімічныя элементы, як уран, торый і іншыя, самаадвольна (без знешніх уздзеянняў) выпраменьваюць α -, β - і γ -прамені. Прырода гэтых праменяў розная: γ -прамені — гэта электрамагнітныя хвалі малой даўжыні (10^{-10} — 10^{-13} м); β -прамені — гэта паток электронаў, а α -прамені ўяўляюць сабой паток ядзер атамаў гелію.

3. Рэзерфорд устанавіў, што радыеактыўны распад ёсць самаадвольнае ператварэнне атамных ядзер, якое суправаджаецца выпраменьваннем розных часціц. Згодна з законам радыеактыўнага распаду для кожнага радыеактыўнага рэчыва існуе пэўны інтэрвал часу, на працягу якога яго актыўнасць убывае ў два разы. Гэты інтэрвал часу называюць перыядам паўраспаду. У залежнасці ад рэчыва перыяд паўраспаду мяняецца ў шырокіх межах: ад мільярдаў гадоў да доляў секунды.

4. Рэзерфорд упершыню выканаў штучнае ператварэнне атамных ядзер, бамбардзіруючы іх α -часціцамі, выпраменьваемымі радыеактыўнымі рэчывамі. Д. Чэдвік з дапамогай падобных доследаў адкрыў новую элементарную часціцу — нейтрон. Зарад нейтрона роўны нулю, а маса прыблізна роўна масе пратона (толькі нязначна перавышае яе).

5. В. Гінзбург і Д. Д. Іваненка прапанавалі пратонна-нейтронную мадэль атамага ядра. Згодна з гэтай мадэллю ядро складаецца з пратонаў і нейтронаў. Масавы лік ядра A роўны суме ліку пратонаў Z і ліку нейтронаў N :

$$A = Z + N.$$

¹ Лік істотных пунктаў большы за 10.

Ядры з адным і тым жа лікам пратонаў Z , але з розным лікам нейтронаў N называюцца ізатопамі. Іх хімічныя ўласцівасці тоесныя.

6. Пратоны і нейтроны ўтрымліваюцца ўнутры ядра магутнымі караткадзеючымі сіламі. Гэтыя сілы называюцца ядзернымі.

7. Найважнейшым для ўсёй ядзернай фізікі з'яўляецца паняцце энергіі сувязі. Энергія сувязі $E_{\text{св}}$ роўна той энергіі, якую неабходна затраціць, каб расшчапіць ядро на асобныя нуклоны. Энергія сувязі ядзер у мільёны разоў перавышае энергію іанізацыі атамаў.

8. Змяненні ядзер пры іх узаемадзеянні адно з адным (або з элементарнымі часціцамі) называюць ядзернымі рэакцыямі. Пры ядзерных рэакцыях адбываецца вылучэнне або паглыннанне энергіі.

Большасць ядзерных рэакцый назіраецца пры сутыкненні ядзер з зараджанымі элементарнымі часціцамі або лёгкімі ядрамі вялікай энергіі. Такую энергію яны набываюць у паскаральніках элементарных часціц або іонаў. Нейтроны не адштурхваюцца ядрамі і таму могуць выклікаць ядзерныя рэакцыі пры невялікіх энергіях.

9. Ядры урану, торыю і іншых цяжкіх элементаў здольныя дзяліцца пад уплывам нейтронаў. Пры гэтым вылучаецца ў кожным акце дзялення энергія парадку 200 МэВ. Пры дзяленні ядра выпраменьваюцца два-тры нейтроны. Гэта дазваляе ажыццявіць кіруемую ланцуговую рэакцыю ў ядзерных рэактарах. Некіруемая рэакцыя дзялення ядзер выкарыстоўваецца ў атамных бомбах.

10. Пры сутыкненнях лёгкіх ядзер яны могуць злівацца з вылучэннем энергіі. Такія ядзерныя рэакцыі могуць праходзіць толькі пры высокіх тэмпературах і таму называюцца тэрмаядзернымі. За кошт тэрмаядзерных рэакцый Сонца і зоркі вылучаюць энергію на працягу мільярдаў гадоў. Некіруемая тэрмаядзерная рэакцыя ажыццяўляюцца ў вадароднай бомбе. Ажыццявіць кіруемую тэрмаядзерную рэакцыю пакуль што не ўдаецца.

11. У нашай краіне была пабудавана першая ў свеце атамная электрастанцыя. Развіваецца будаўніцтва магутных атамных электрастанцый. Пасля аварыі на Чарнобыльскай АЭС прыняты дадатковыя меры па бяспецы атамных рэактараў.

12. Радыеактыўныя ізатопы, якія атрымліваюцца пры дапамозе ядзерных рэактараў і паскаральнікаў элементарных часціц, знаходзяць прымяненне ў навуцы, медыцыне, сельскай гаспадарцы і прамысловасці.

13. Радыеактыўныя выпраменьванні з'яўляюцца вельмі небяспечнымі для жывых арганізмаў. Пры рабоце з імі неабходна выкарыстоўваць спецыяльныя меры аховы.

Раздзел 11

ЭЛЕМЕНТАРНЫЯ ЧАСЦІЦЫ

§ 93. ТРЫ ЭТАПЫ Ў РАЗВІЦЦІ ФІЗІКІ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСЦІЦ

Этап першы. Ад электрона да пазітрона: 1897—1932 гг. (*Элементарныя часціцы — «атамы Дэмакрыта» на больш глыбокім узроўні.*) Вы ўжо больш ці менш знаёмы з электронам, фатонам, пратонам і нейтронам. Але што ж такое элементарная часціца?

Калі грэчаскі філосаф Дэмакрыт назваў найпрасцейшыя, нерасчлянныя далей часціцы атамамі (слова *атам*, напомним, азначае «непадзельны»), то яму, мабыць, усё ўяўлялася ў прынцыпе не вельмі складаным. Розныя прадметы, расліны, жывёлы пабудаваны з непадзельных, нязменных часціц. Ператварэнні, якія назіраюцца ў свеце, — гэта простая перастаноўка атамаў. Усё ў свеце цячэ, усё змяняецца, акрамя саміх атамаў, якія застаюцца нязменнымі.

Але ў канцы XIX ст. была адкрыта складаная будова атамаў і быў вылучаны электрон як састаўная частка атама. Затым, ужо ў XX ст., былі адкрыты пратон і нейтрон — часціцы, якія ўваходзяць у склад атамнага ядра. Спачатку на ўсе гэтыя часціцы глядзелі зусім гэтак жа, як Дэмакрыт глядзеў на атамы: іх лічылі непадзельнымі і нязменнымі першапачатковымі сутнасцямі, асноўнымі цаглінкамі светабудовы.

Этап другі. Ад пазітрона да кваркаў: 1932—1964 гг. (*Усе элементарныя часціцы ператвараюцца адна ў адну.*) Сітуацыя прывабнай яснасці цягнулася нядоўга. Усё аказалася больш складаным: як высветлілася, нязменных часціц няма зусім. У самім слове *элементарная* заключаецца дваякі сэнс. З аднаго боку, элементарны — гэта само сабой зразумелы, найпрасцейшы. З другога боку, пад элементарным разумеецца нешта фундаментальнае, што ляжыць у аснове рэчаў (менавіта у гэтым сэнсе цяпер і называюць *субатамныя часціцы*¹ элементарнымі).

Лічыць вядомыя цяпер элементарныя часціцы падобнымі да нязменных атамаў Дэмакрыта перашкаджае наступны просты факт. Ні адна з часціц не бессмяротная. Большасць часціц, якія называюцца цяпер элементарнымі, не могуць пражыць больш за дзве мільённыя долі секунды нават пры адсутнасці якога-небудзь уздзеяння звонку. Свабодны нейтрон (нейтрон, які знаходзіцца па-за атамным ядром) жыве ў сярэднім 15 мін.

Толькі *фатон, электрон, пратон і нейтрына* захоўвалі б сваю нязменнасць, калі б кожная з іх была адна ў цэлым свеце.

Але ў электронаў і пратонаў ёсць вельмі небяспечныя сабраты — *позітроны і антыпратоны*, пры сутыкненні з якімі адбываецца ўзаемнае знішчэнне гэтых часціц і ўтварэнне новых.

Фатон, выпраменены настольнай лямпай, жыве не больш чым

¹ *Субатамныя часціцы* — часціцы, з якіх складаюцца атамы.

10⁻⁸ с. Гэта той час, які яму патрэбны, каб дасягнуць старонкі кнігі і паглынуцца паперай.

Толькі нейтрына амаль бессмяротнае з-за таго, што яно надзвычай слаба ўзаемадзейнічае з іншымі часціцамі. Але і нейтрына гінуць пры сутыкненнях з іншымі часціцамі, хоць такія сутыкненні здараюцца вельмі рэдка.

Такім чынам, у спрадвечным імкненні адшукаць нязменнае ў нашым зменлівым свеце вучоныя аказаліся не на «гранітнай аснове», а на «зыбкім пяску».

Усе элементарныя часціцы ператвараюцца адна ў адну, і гэты ўзаемны ператварэнні — галоўны факт іх існавання.

Уяўленні аб нязменнасці элементарных часціц аказаліся негрунтоўнымі. Але ідэя аб іх нераскладальнасці захавалася.

Элементарныя часціцы ўжо далей непадзельныя, але яны невычарпальныя па сваіх уласцівасцях. На невычарпальнасць уласцівасцей электрона адразу ж пасля яго адкрыцця ўказваў У. І. Ленін.

Вось што прымушае так думаць. Няхай у нас узнікла натуральнае жаданне даследаваць, ці складаецца, напрыклад, электрон з якіх-небудзь іншых *субэлементарных часціц*¹. Што трэба зрабіць для таго, каб паспрабаваць расчляніць электрон? Можна прыдумаць толькі адзін спосаб. Гэта той жа спосаб, да якога звяртаецца дзіця, калі яно хоча даведацца, што знаходзіцца ўнутры пластмасавай цацкі, — моцны ўдар.

Зразумела, па электрону нельга ўдарыць малатком. Для гэтага можна скарыстаць другі электрон, які ляціць з велізарнай скорасцю, або якую-небудзь іншую элементарную часціцу, што рухаецца з вялікай скорасцю.

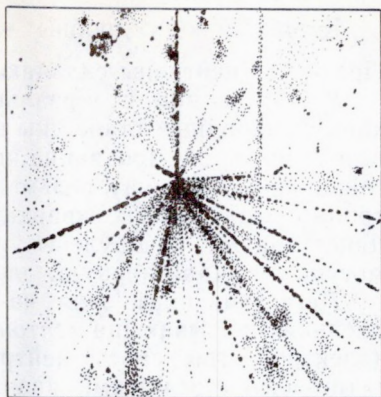
Сучасныя паскаральнікі надаюць зараджаным часціцам скорасці, вельмі блізкія да скорасці святла.

Што ж адбываецца пры сутыкненні часціц звышвысокай энергіі? Яны ні ў якім разе не дробяцца на нешта такое, што можна было б назваць іх састаўнымі часткамі. Не, яны нараджаюць новыя часціцы з ліку тых, якія ўжо фігуруюць у спіску элементарных часціц. Чым большая энергія часціц, што сутыкаюцца, тым большая колькасць, і прытым больш цяжкіх, часціц нараджаецца. Гэта магчыма дзякуючы таму, што пры павелічэнні скорасці маса часціц расце. Усяго толькі з адной пары любых часціц з узросшай масай можна ў прыныце атрымаць усе вядомыя на сённяшні дзень часціцы.

На рысунку 189 вы бачыце вынік сутыкнення ядра вугляроду, які меў энергію 60 млрд эВ (тлустая верхняя лінія) з ядром серабра фотаэмульсіі. Ядро расколваецца на асколкі, якія разлятаюцца ў розныя бакі. Адначасова нараджаецца многа новых элементарных часціц — піёнаў. Падобныя рэакцыі пры сутыкненнях рэлятывісцкіх ядзер, атрыманых у паскаральніку, упершыню

¹ Падразумяваюцца часціцы, з якіх бы складаліся вядомыя цяпер элементарныя часціцы.

ў свеце ажыццёўлены ў лабараторыі высокіх энергій Аб'яднанага інстытута ядзерных даследаванняў у г. Дубне пад кіраўніцтвам акадэміка А. М. Балдзіна. Пазбаўленыя электроннай абалонкі ядры былі атрыманы шляхам іанізацыі атамаў вугляроду лазерным праменем.



Рыс. 189

Магчыма, безумоўна, што пры сутыкненнях часціц з недаступнай пакуль што нам энергіяй будучы нараджацца і нейкія новыя, яшчэ невядомыя часціцы. Але сутнасці справы гэта не зменіць. Новыя часціцы, якія нараджаюцца ў сутыкненнях, ніяк нельга разглядаць як састаўныя часткі часціц — «бацькоў». «Даччыныя» ж часціцы, калі іх паскорыць, могуць, не змяніўшы сваёй прыроды, а толькі павялічыўшы масу, нарадзіць у сваю чаргу пры сутыкненнях адразу некалькі такіх жа часціц, якімі былі іх «бацькі», ды яшчэ і мноства іншых часціц.

Такім чынам, па сучасных уяўленнях элементарныя часціцы — гэта першасныя, нераскладальныя далей часціцы, з якіх пабудавана ўся матэрыя. Аднак недзялімасць элементарных часціц не азначае, што ў іх адсутнічае ўнутраная структура.

Этап трэці. Ад гіпотэзы аб кварках (1964 г.) да нашых дзён. (*Большасць элементарных часціц мае складаную структуру.*) У 60-я гг. узніклі сумненні ў тым, што ўсе часціцы, якія называюцца цяпер элементарнымі, поўнасю апраўдваюць гэту назву. Аснова для сумненняў простая: гэтых часціц вельмі многа.

Адкрыццё новай элементарнай часціцы заўсёды складала і раз складае выдатны трыумф навукі. Але ўжо даволі даўно да кожнага наступнага трыумфу пачало прымешвацца хваляванне. Трыумфы сталі надыходзіць адзін за адным.

Была адкрыта група так званых «*дзіўных*» часціц: *K*-мезонаў і гіперонаў з масамі, вышэйшымі за масу нуклонаў. У 70-я гг. да іх далучылася вялікая група часціц з яшчэ большымі масамі, названых «зачараванымі». Акрамя таго, былі адкрыты кароткажывучыя часціцы з часам жыцця парадку 10^{-22} — 10^{-23} с. Гэтыя часціцы былі названы *рэзанансамі*, і іх лік перавысіў здвесце.

Вось тады (у 1964 г.) М. Гел-Манонам і Дж. Цвейгам была прапанавана мадэль, згодна з якой усе часціцы, якія ўдзельнічаюць у моцных (ядзерных) узаемадзеяннях, — *адроны*¹, пабудаваны з больш фундаментальных (або першасных) часціц — *кваркаў*.

¹ Слова *адрон* утворана ад грэчаскага *hadros*, што азначае «вялікі», «моцны».

Кваркі маюць дробны электрычны зарад $+\frac{2}{3}e$ і $-\frac{1}{3}e$.

Пратоны і нейтроны складаюцца з трох кваркаў.

У сучасны момант у рэальнасці кваркаў ніхто не сумняваецца, хоць у свабодным стане яны не выяўлены і, верагодна, не будуць выяўлены ніколі. Існаванне кваркаў даказваюць доследы па рассяйванню электронаў вельмі высокай энергіі на пратонах і нейтронах. Лік розных кваркаў роўны шасці. Кваркі, наколькі цяпер вядома, пазбаўлены ўнутранай структуры і ў гэтым сэнсе могуць лічыцца сапраўды элементарнымі.

Лёгкія часціцы, якія не ўздзельнічаюць у моцных узаемадзеяннях, называюцца *лептонамі*. Іх таксама шэсць, як і кваркаў (электрон, тры сарты нейтрына і яшчэ дзве часціцы — мяён і тау-лептон з масамі, значна большымі за масу электрона). Кваркі і лептоны — сапраўды элементарныя часціцы.

§ 94. АДКРЫЦЦЕ ПАЗІТРОНА. АНТЫЧАСЦІЦЫ

Існаванне двойніка электрона — пазітрона — было прадказана тэарэтычна англійскім фізікам П. Дзіракам у 1931 г. Адначасова Дзірак прадказаў, што пры сустрэчы пазітрона з электронам абедзве часціцы павінны *знікнуць*, нарадзіўшы фатоны вялікай энергіі. Можна адбывацца і адваротны працэс — *нараджэнне электронна-пазітроннай пары*, напрыклад, пры сутыкненні фатона дастаткова вялікай энергіі (яго маса павінна быць большай за суму мас спакою часціц, якія нараджаюцца) з ядром.

Праз два гады пазітрон быў выяўлены з дапамогай камеры Вільсана, змешчанай у магнітнае поле. Напрамак скрыўлення трэка часціцы паказваў знак яе зараду, а па радыусу крывізны і энергіі часціцы была вызначана адносіна яе зараду да масы. Яна аказалася па модулю такой жа, як і ў электрона. На рысунку 190 вы бачыце першую фатаграфію, якая даказала існаванне пазітрона. Часціца рухалася знізу ўверх і, прайшоўшы свінцовую пласцінку, згубіла частку сваёй энергіі. З-за гэтага крывізна траекторыі павялічылася.

Працэс нараджэння пары электрон — пазітрон γ -квантам у свінцовай пласцінцы бачны на фатаграфіі, прыведзенай на рысунку 191. У камеры Вільсана, якая знаходзіцца ў магнітным полі, пара пакідае характэрны след у выглядзе двухрогай вілкі.

Знікненне (*анігіляцыя*) адных часціц і з'яўленне другіх пры рэакцыях паміж элементарнымі часціцамі з'яўляецца іменна ператварэннем, а не проста ўзнікненнем новай камбінацыі састаўных частак старых часціц. Асабліва наглядна выяўляецца гэта пры анігіляцыі пары электрон — пазітрон. Абедзве часціцы валодаюць пэўнай масай у стане спакою і электрычнымі зарадамі. Фатоны ж, якія пры гэтым нараджаюцца, не маюць зарадаў і не валодаюць масай спакою, паколькі не могуць існаваць у стане спакою.

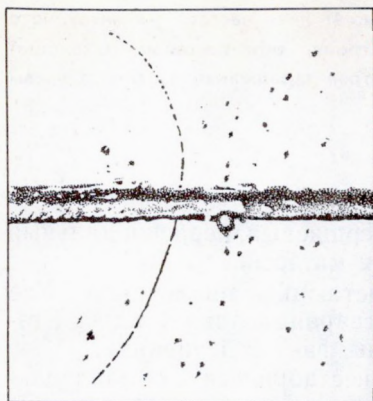


Рис. 190

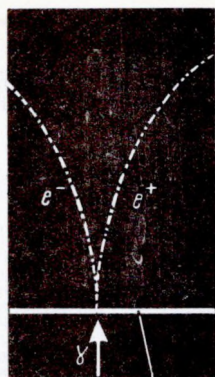


Рис. 191

Свинцовая
пластинка

У свой час адкрыццё нараджэння і анігіляцыі электронна-позитронных пар выклікала сапраўдную сенсацыю ў навуцы. Да гэтага ніхто не думаў, што электрон, найстарэйшая з часціц, найважнейшы будаўнічы матэрыял атамаў, можа аказацца нявечным. Пазней двойнікі — антычасціцы — былі знойдзены ва ўсіх часціц. Антычасціцы проціпастаўляюцца часціцам іменна таму, што пры сустрэчы любой часціцы з адпаведнай антычасціцай адбываецца іх анігіляцыя. Абедзве часціцы знікаюць, ператвараючыся ў кванты выпраменьвання або іншыя часціцы.

Выяўлены параўнальна нядаўна *антыпратон* і *антынейтрон*. Электрычны зарад антыпратона адмоўны. Цяпер добра вядома, што нараджэнне пар *часціца — антычасціца* і іх анігіляцыя не складаюць манаполіі электронаў і пазитронаў.

Атамы, ядры якіх складаюцца з антынуклонаў, а абалонка — з пазитронаў, утвараюць *антырэчыва*. У 1969 г. у СССР быў упершыню атрыманы *антыгелій*.

Пры анігіляцыі антырэчыва з рэчывам энергія спакою ператвараецца ў кінетычную энергію γ -квантаў, якія ўтвараюцца.

Энергія спакою — самы грандыёзны і канцэнтраваны рэзервуар энергіі ў Сусвеце. І толькі пры анігіляцыі яна поўнасцю вызваляецца, ператвараючыся ў іншыя віды энергіі. Таму антырэчыва — самая дасканалая крыніца энергіі, каларыйнае «паліва».

Можна спадзявацца, што недалёка той час, калі будзе рэшана асноўная задача фізікі элементарных часціц і ўсёй фізікі наогул. Будзе атрыманы спектр мас элементарных часціц і будзе высветлена, чым вызначаюцца значэнні электрычнага зараду і іншых канстант узаемадзеянняў.

1. У чым адрозненне трох этапаў развіцця фізікі элементарных часціц?
2. Электрон — самая лёгкая з зараджаных часціц. Які з вядомых вам законаў захавання забараняе ператварэнне электрона ў фатоны або нейтрына?
3. Пера-

лічыце ўсе стабільныя элементарныя часціцы. 4. Якая частата γ -квантаў, што ўзнікаюць пры анігіляцыі электрона і пазітрона, якія павольна рухаюцца? 5. Ці можна ў пазітронавай камеры назіраць трэк зараджанай часціцы з часам жыцця 10^{-23} с? 6. Што такое кварк?

КАРОТКІЯ ВЫНІКІ РАЗДЗЕЛА 11¹

1. Элементарныя часціцы — гэта першасныя, нераскладальныя далей часціцы, з якіх пабудавана ўся матэрыя.

2. Элементарныя часціцы не застаюцца нязменнымі. Усе элементарныя часціцы здольны ператварацца адна ў адну, і гэтыя ўзаемныя ператварэнні — галоўны факт іх існавання.

Большасць элементарных часціц нестабільныя і самаадвольна ператвараюцца з цягам часу ў іншыя часціцы; выключэнне складаюць фатон, электрон, пратон і нейтрына.

3. Усе часціцы маюць двойнікоў — антычасціцы. Напрыклад, у адносінах да электрона антычасціцай з'яўляецца пазітрон. Часціца і антычасціца маюць аднолькавыя масы, а іх зарады процілеглыя па знаку. Пры сутыкненнях часціцы з антычасціцай яны знікаюць (анігіліруюць), ператвараючыся ў іншыя часціцы. Анігіляцыя пазітрона і электрона суправаджаецца нараджэннем двух (або трох) гама-квантаў.

4. Лік адкрытых элементарных часціц у 70-я гг. склаў некалькі дзесяткаў. Акрамя таго, было выяўлена больш за дзвесце кароткажывучых часціц — рэзанансаў (з часам жыцця парадку 10^{-23} с). У сувязі з гэтым была выказана гіпотэза, згодна з якой усе элементарныя часціцы, што моцна ўзаемадзейнічаюць, пабудаваны з больш фундаментальных часціц — кваркаў. Кваркі былі выяўлены ўнутры пратонаў і нейтронаў пры назіранні рассявання электронаў і нейтрына вялікіх энергій на нуклонах. Аднак у свабодным стане кваркі не знойдзены, і, відаць, расшчапіць нуклоны і іншыя часціцы на кваркі немагчыма.

¹ Лік істотных пунктаў каля 4.

ЗНАЧЭННЕ ФІЗІКІ ДЛЯ ТЛУМАЧЭННЯ СВЕТУ І РАЗВІЦЦА ВЫТВОРЧЫХ СІЛ ГРАМАДСТВА

§ 95. АДЗІНАЯ ФІЗІЧНАЯ КАРЦІНА СВЕТУ

Такім чынам, вывучэнне школьнага курса фізікі вамі закончана. У большай ці меншай ступені кожны з вас далучыўся да вынікаў той велізарнай работы па вывучэнню розных форм руху матэрыі, будовы і ўласцівасцей матэрыяльных цел, якая была прароблена на працягу многіх вякоў вучонымі ўсяго свету.

Фізіка знаёміць нас з найбольш агульнымі законамі прыроды, якія кіруюць ходам працэсаў у навакольным жыцці і ў Сусвеце цалкам.

Мэта фізікі заключаецца ў адшуканні агульных законаў прыроды і ў растлумачэнні канкрэтных працэсаў на іх падставе. Па меры набліжэння да гэтай мэты перад вучонымі паступова вырысоўвалася велічная і складаная карціна адзінства прыроды. Свет уяўляе сабой не сукупнасць разрозненых, незалежных адна ад адной падзей, а розныя і шматлікія праявы аднаго цэлага.

Механічная карціна свету. Многія пакаленні вучоных здзіўляла і цяпер здзіўляе велічная і цэласная карціна свету, якая была створана на аснове механікі Ньютана. Паводле Ньютана, увесь Сусвет складаецца з «цвёрдых, важкіх, непранікальных, рухомых часцінак». Гэтыя «першасныя часцінкі абсалютна цвёрдыя: яны нязмерна больш цвёрдыя, чым целы, якія з іх складаюцца, настолькі цвёрдыя, што яны ніколі не зношваюцца і не разбіваюцца ўшчэнт». Адрозніваюцца яны адна ад адной галоўным чынам колькасца сваімі масамі. Усё багацце, уся якасная шматграннасць свету — гэта вынік адрозненняў у руху часцінак. Унутраная сутнасць часцінак застаецца на другім плане.

Асновай для такой адзінай карціны свету паслужыў усеабыдны характар адкрытых Ньютанам законаў руху цел. Гэтым законам са здзіўляючай дакладнасцю падпарадкоўваюцца як велізарныя нябесныя целы, так і найдрабнейшыя пясчынкі, якія гоняцца ветрам. І нават вецер — рух нябачных вокам часцінак паветра — падпарадкоўваецца тым жа законам. На працягу доўгага часу вучоныя былі ўпэўнены, што адзінымі фундаментальнымі законамі прыроды з'яўляюцца законы механікі Ньютана. Французскі вучоны Лагранж лічыў, што «няма чалавека, шчаслівейшага за Ньютана: толькі ж аднойчы аднаму чалавеку суджана пабудаваць карціну свету».

Аднак простая механічная карціна свету аказалася негрунтаўнай. Пры даследаванні электрамагнітных працэсаў высветлілася, што яны не падпарадкоўваюцца механіцы Ньютана. Дж. Максвел адкрыў новы тып фундаментальных законаў, якія не зводзяцца да механікі Ньютана,— гэта законы паводзін электрамагнітнага поля.

Электрамагнітная карціна свету. У механіцы Ньютана дапускалася, што целы непасрэдна праз пустату ўздзейнічаюць адно на адно і гэтыя ўзаемадзеянні ажыццяўляюцца імгненна (тэорыя далёкадзеяння). Пасля стварэння электрадынамікі ўяўленні аб сілах істотна змяніліся. Кожнае з узаемадзеючых цел стварае электрамагнітнае поле, якое з канечнай скорасцю распаўсюджваецца ў прастору. Узаемадзеянне ажыццяўляецца з дапамогай гэтага поля (тэорыя блізкадзеяння).

Электрамагнітныя сілы надзвычай шырока распаўсюджаны ў прыродзе. Яны дзейнічаюць у атамным ядры, атаме, малекуле, паміж асобнымі малекуламі ў макраскапічных целах. Гэта адбываецца таму, што ў склад усіх атамаў уваходзяць электрычна зараджаныя часціцы. Дзеянне электрамагнітных сіл выяўляецца і на вельмі малых адлегласцях (ядро), і на касмічных (электрамагнітнае выпраменьванне зорак).

Развіццё электрадынамікі прывяло да спробы пабудаваць *адзіную электрамагнітную карціну свету*. Усе падзеі ў свеце згодна з гэтай карцінай кіруюцца законамі электрамагнітных узаемадзеянняў.

Кульмінацыі электрамагнітная карціна свету дасягнула пасля стварэння спецыяльнай тэорыі адноснасці. Было зразумета фундаментальнае значэнне канечнасці скорасці распаўсюджвання электрамагнітных узаемадзеянняў, створана новае вучэнне аб прастору і часе, знойдзены рэлятывісцкія ўраўненні руху, якія замяняюць ураўненні Ньютана пры вялікіх скорасцях.

Калі ў часы росквіту механічнай карціны свету рабіліся спробы звесці электрамагнітныя з'явы да механічных працэсаў у асобым асяроддзі (сусветным эфіры), то цяпер ужо імкнуліся, наадварот, вывесці законы руху часціц з электрамагнітнай тэорыі. Часціцы рэчыва спрабавалі разглядаць як «згусткі» электрамагнітнага поля. Аднак звесці ўсе працэсы ў прыродзе да электрамагнітных не ўдалося. Ураўненні руху часціц і закон гравітацыйнага ўзаемадзеяння не могуць быць выведзены з тэорыі электрамагнітнага поля. Акрамя таго, былі адкрыты электрычна нейтральныя часціцы і новыя тыпы ўзаемадзеяння. Прырода аказалася больш складанай, чым меркавалі спачатку: ні адзіны закон руху, ні адзіная сіла не здольны ахапіць усёй разнастайнасці працэсаў у свеце.

Адзінства будовы матэрыі. Свет надзвычай разнастайны. Але як гэта ні dziўна, рэчыва зорак дакладна такое ж, як і рэчыва, з якога складаецца Зямля. Атамы, якія складаюць усе целы Сусвету, зусім аднолькавыя. Жывыя арганізмы складаюцца з тых жа атамаў, што і нежывыя.

Усе атамы маюць аднолькавую структуру і пабудаваны з элементарных часціц трох сартоў. У іх ёсць ядры з пратонаў і нейтронаў, абкружаныя электронамі. Ядры і электроны ўзаемадзейнічаюць адно з адным з дапамогай электрамагнітнага поля, квантамі якога з'яўляюцца фатоны.

Узаемадзеянне ж паміж пратонамі і нейтронамі ў ядры ажыццяўляюць у асноўным π -мезоны, якія ўяўляюць сабой кванты ядзернага поля. Пры распадзе нейтронаў з'яўляюцца нейтрына. Акрамя таго, адкрыта многа іншых элементарных часціц. Але толькі пры ўзаемадзеянні часціц вельмі вялікіх энергій яны пачынаюць адыгрываць прыметную ролю.

У першай палавіне XX ст. быў адкрыты фундаментальны факт: *усе элементарныя часціцы здольны ператварацца адна ў адну.*

У 70-я гг. было ўстаноўлена, што ўсе моцна ўзаемадзейныя часціцы складаюцца з субэлементарных часціц — кваркаў шасці відаў. Сапраўды элементарнымі часціцамі з'яўляюцца лептоны і кваркі.

Пасля адкрыцця элементарных часціц і іх ператварэнняў на першы план адзінай карціны выступіла *адзінства ў будове матэрыі*. У аснове гэтага адзінства ляжыць матэрыяльнасць усіх элементарных часціц. *Розныя элементарныя часціцы — гэта розныя канкрэтныя формы існавання матэрыі.*

Сучасная фізічная карціна свету. Адзінства свету не вычэрпваецца адзінствам будовы матэрыі. Яно праяўляецца і ў законах руху часціц, і ў законах іх узаемадзеяння.

Нягледзячы на дзівосную разнастайнасць узаемадзеянняў цел аднаго з адным, у прыродзе, па сучасных даных, ёсць толькі чатыры тыпы сіл. Гэта *гравітацыйныя сілы, электрамагнітныя, ядзерныя і слабыя ўзаемадзеянні*. Апошнія праяўляюцца галоўным чынам пры ператварэннях элементарных часціц адна ў адну. З праяўленнем усіх чатырох тыпаў сіл мы сустракаемся ў бязмежных прасторах Сусвету, у любых целах на Зямлі (у тым ліку і ў жывых арганізмах), у атамах і атамных ядрах, пры ўсіх ператварэннях элементарных часціц.

Рэвалюцыйнае змяненне класічных уяўленняў аб фізічнай карціне свету адбылося пасля адкрыцця квантавых уласцівасцей матэрыі. Са з'яўленнем квантавай фізікі, якая апісвае рух мікрачасціц, пачалі вырысоўвацца новыя элементы адзінай фізічнай карціны свету.

Падзел матэрыі на рэчыва, якое мае перарывістую будову і непарывістае поле, страціў абсалютны сэнс. Кожнаму полю адпавядаюць кванты гэтага поля: электрамагнітнаму полю — фатоны, ядзернаму — π -мезоны, а на больш глыбокім узроўні — глюёны, якія ажыццяўляюць узаемадзеянне кваркаў.

У сваю чаргу ўсе часціцы валодаюць хвалевымі ўласцівасцямі. Карпускулярна-хвалевы дуалізм уласцівы ўсім формам матэрыі.

Апісанне, здавалася б, узаемавыключаючых карпускулярных

і хвалевых уласцівасцей у рамках адной тэорыі аказалася магчымым дзякуючы таму, што законы руху ўсіх без выключэння мікрачасціц носяць статыстычны (імавернасны) характар. Гэты факт робіць немагчымым адназначнае прадказанне тых ці іншых паводзін мікрааб'ектаў.

Прынцыпы квантавай тэорыі з'яўляюцца зусім агульнымі, якія можна прымяніць для апісання руху ўсіх часціц, узаемадзеянняў паміж імі і іх узаемных ператварэнняў.

Такім чынам, сучасная фізіка з несумненнасцю дэманструе нам рысы адзінства прыроды. Аднак усё ж многае, можа, нават саму фізічную сутнасць адзінства свету, улавіць пакуль яшчэ не ўдалося. Невядома, чаму існуе так многа розных элементарных часціц, чаму яны маюць тых ці іншых значэнні масы, зараду і іншых характарыстык. Да гэтага часу ўсе гэтыя велічыні вызначаюцца эксперыментальна.

Аднак усё выразней вырысоўваецца сувязь паміж рознымі тыпамі ўзаемадзеянняў. Электрамагнітныя і слабыя ўзаемадзеянні ўжо аб'яднаны ў рамках адной тэорыі. Высветлена структура большасці элементарных часціц.

«Тут схаваны такія глыбокія таямніцы і такія ўзвышаныя думкі, што, нягледзячы на старанні соцень вельмі дасціпных мысліцеляў, якія працавалі на працягу тысяч гадоў, яшчэ не ўдалося пранікнуць у іх, і радасць творчых пошукаў і адкрыццяў усё яшчэ працягвае існаваць». Гэтыя словы, сказаныя Галілеем тры з палавінай стагоддзі назад, ніколі не ўстарэлі.

Навуковы светапогляд. Фундаментальныя законы, якія ўстанаўліваюцца ў фізіцы, па сваёй складанасці і агульнасці намнога пераўзыходзяць тых факты, з якіх пачынаецца даследаванне любых з'яў. Але яны такія ж дакладныя і такія ж аб'ектыўныя, як і веды аб простых з'явах, назіраемых непасрэдна. Гэтыя законы не парушаюцца ніколі, ні пры якіх умовах.

Усё большы і большы лік людзей усведамляюць, што аб'ектыўныя законы, якіх прытрымліваецца прырода, выключаюць чуды, а пазнанне гэтых законаў дапаможа чалавецтву выжыць.

§ 96. ФІЗІКА І НАВУКОВА-ТЭХНІЧНАЯ РЭВАЛЮЦЫЯ¹

У цяперашні час адбываецца найвялікшая навукова-тэхнічная рэвалюцыя (НТР), якая пачалася больш за чвэрць стагоддзя назад. Яна выклікала глыбокія якасныя змяненні ў многіх галінах навукі і тэхнікі. Адна з самых старажытных навук — астраномія — перажывае рэвалюцыю, звязаную з выходам чалавека ў касмічную прастору. Нараджэнне кібернетыкі і электронных вылічальных машын рэвалюцыйна змяніла выгляд матэматыкі, праклала шлях да новай галіны дзейнасці чалавека, якая атрымала назву *інфарматыкі*. Узнікненне малекулярнай біялогіі і генетыкі выклі-

¹ Гэты параграф напісаны В. А. Ляшкоўцавым.

кала рэвалюцыю ў біялогіі, а стварэнне так званай вялікай хіміі стала магчымым дзякуючы рэвалюцыі ў хімічнай навучы. Аналагічныя працэсы адбываюцца таксама ў геалогіі, метэаралогіі, акіяналогіі і многіх іншых сучасных навук.

Ва ўсім свеце назіраюцца глыбокія якасныя перамены ў асноўных галінах тэхнікі. Рэвалюцыя ў энергетыцы звязана з пераходам ад цеплавых электрастанцый, якія працуюць на арганічным паліве, да атамных электрастанцый. Стварэнне індустрыі штучных матэрыялаў з незвычайнымі, але вельмі важнымі для практыкі ўласцівасцямі выклікала рэвалюцыю ў матэрыялазнаўстве. Комплексная механізацыя і аўтаматызацыя вядуць нас да рэвалюцыі ў прамысловасці і сельскай гаспадарцы. Транспарт, будаўніцтва, сувязь становяцца прынцыпова новымі, значна больш прадукцыйнымі і ўдасканаленымі галінамі сучаснай тэхнікі. Падсумоўваючы ўсё гэта, можна сцвярджаць, што НТР рыхтуе рэвалюцыю ў вытворчых сілах грамадства, якая патрабуе больш кваліфікаваных работнікаў.

НТР карэнным чынам змяніла ролю навукі ў жыцці грамадства. *Навука стала непасрэднай вытворчай сілай.* Цяпер і ў будучым лёс вытворчасці неабходных людзям матэрыяльных даброт непасрэдна будзе залежаць ад дасягненняў навукі. НТР непазбежна вядзе чалавецтва да грандыёзнай перабудовы і ўдасканалення ўсіх сфер вытворчасці.

Адначасова НТР робіць незвычайна актуальнай праблему аховы навакольнага асяроддзя.

Фізіка і астраномія. У сучасным прыродазнаўстве фізіка з'яўляецца адной з лідзіруючых навук. Яна аказвае велізарны ўплыў на розныя галіны навукі, тэхнікі і вытворчасці. Разгледзім на некалькіх прыкладах, як фізіка ўплывае на іншыя галіны сучаснай навукі і тэхнікі.

На працягу тысячагоддзяў астраномы атрымлівалі толькі тую інфармацыю аб нябесных з'явах, якую ім прыносіла святло. Можна сказаць, што яны вывучалі гэтыя з'явы праз вузенькую шчыліну ў шырокім спектры электрамагнітных выпраменьванняў. Тры дзесяцігоддзі таму назад дзякуючы развіццю радыёфізікі ўзнікла радыёастраномія, якая незвычайна пашырыла нашы ўяўленні аб Сусвеце. Яна дапамагла даведацца аб існаванні многіх касмічных аб'ектаў, аб якіх раней не было вядома. Дадатковай крыніцай астранамічных ведаў стаў участак электрамагнітнай шкалы, які ляжаў у дыяпазоне дэцыметровых і сантыметровых радыёхваль.

Велізарны паток навуковай інфармацыі прыносяць з космасу іншыя віды электрамагнітнага выпраменьвання, якія не дасягаюць паверхні Зямлі, паглынаючыся ў яе атмасферы. З выхадам чалавека ў касмічную прастору нарадзіліся новыя раздзелы астраноміі: ультрафіялетавая і ультрачырвоная астраномія, рэнтгенаўская і гама-астраномія. Незвычайна пашырылася магчымасць даследавання першасных касмічных часціц, якія падаюць на мяжу зямной атмасферы: астраномы могуць даследаваць усе віды

часці і выпраменьванняў, якія прыходзяць з касмічнай прасторы. Аб'ём навукавай інфармацыі, атрыманай астраномамі за апошнія дзесяцігоддзі, намнога перавысіў аб'ём інфармацыі, здабытай за ўсю мінулую гісторыю астраноміі. Метады даследавання, якія пры гэтым выкарыстоўваюцца, і рэгіструючая апаратура запазычваюцца з арсенала сучаснай фізікі; старажытная астраномія ператвараецца ў маладую астрафізіку, якая бурна развіваецца.

Цяпер ствараюцца асновы нейтрэннай астраноміі, якая будзе дастаўляць вучоным звесткі аб працэсах, што адбываюцца ў нетрах касмічных цел, напрыклад у глыбінях нашага Сонца. Стварэнне нейтрэннай астраноміі стала магчымым толькі дзякуючы поспехам фізікі атамных ядзер і элементарных часціц.

Фізіка і біялогія. Рэвалюцыю ў біялогіі звычайна звязваюць з узнікненнем малекулярнай біялогіі і генетыкі, якія вывучаюць жыццёвыя працэсы на малекулярным узроўні. Асноўныя сродкі і метады, якія выкарыстоўваюцца малекулярнай біялогіяй для выяўлення, вылучэння і вывучэння сваіх аб'ектаў (электронныя і пратонныя мікраскопы, рэнтгенаструктурны аналіз, электронграфія, нейтронны аналіз, мечаныя атамы, ультрацэнтрыфугі і да т. п.), запазычаны ў фізікі. Не маючы гэтых сродкаў, якія нарадзіліся ў фізічных лабараторыях, біёлагі не змаглі б ажыццявіць прарыў на якасна новы ўзровень даследавання працэсаў, што адбываюцца ў жывых арганізмах.

Важную ролю сучасная фізіка адыгрывае ў рэвалюцыйнай перабудове хіміі, геалогіі, акіяналогіі і іншых навук.

Фізіка і тэхніка. Фізіка стаіць таксама ў вытоках рэвалюцыйных ператварэнняў ва ўсіх галінах тэхнікі. На аснове яе дасягненняў перабудоўваюцца энергетыка, сувязь, транспарт, будаўніцтва, прамысловая і сельскагаспадарчая вытворчасць.

Энергетыка. Рэвалюцыя ў энергетыцы выклікана ўзнікненнем атамнай энергетыкі. Запасы энергіі, якія захоўваюцца ў атамным паліве, намнога перавышаюць запасы энергіі ў яшчэ не зрасходаваным звычайным паліве. Вугаль, нафта і прыродны газ у нашы дні ператварыліся ва унікальную сыравіну для вялікай хіміі. Спальваць іх у вялікіх колькасцях — значыць наносіць неппраўную шкоду гэтай важнай галіне сучаснай вытворчасці. Таму вельмі важна выкарыстоўваць для энергетычных мэт атамнае паліва (уран, торый). Цеплавая электрастанцыя аказваюць небяспечнае ўздзеянне на навакольнае асяроддзе, выкідаючы вуглякіслы газ. У той жа час атамныя электрастанцыі пры належным узроўні кантролю могуць быць бяспечнымі.

Тэрмаядзерныя электрастанцыі ў будучым назаўсёды пазбавяць чалавецтва ад клопатаў аб крыніцах энергіі. Як мы ўжо ведаем, навуковыя асновы атамнай і тэрмаядзернай энергетыкі цалкам абапіраюцца на дасягненні фізікі атамных ядзер.

Стварэнне матэрыялаў з зададзенымі ўласцівасцямі. Тэхніка будучыні будзе ствараць ў значнай ступені не з гатовых прыродных матэрыялаў, якія ўжо ў нашы дні не могуць зрабіць яе дастат-

кова надзейнай і даўгавечнай, а з сінтэтычных матэрыялаў з наперад зададзенымі ўласцівасцямі. У стварэнні такіх матэрыялаў разам з вялікай хіміяй усё ўзрастаючую ролю будуць адыгрываць фізічныя метады ўздзеяння на рэчыва (электронныя, іонныя і лазерныя пучкі; звышмоцныя магнітныя палі; звышвысокія ціскі і тэмпературы; ультрагук і да т. п.). У іх закладзена магчымасць атрымання матэрыялаў з гранічнымі характарыстыкамі і стварэння прынцыпова новых метадаў апрацоўкі рэчыва, якія карэнным чынам змяняюць сучасную тэхналогію.

Аўтаматызацыя вытворчасці. Чакаецца вялікая работа па стварэнню комплексна-аўтаматызаваных прадпрыемстваў, якія ўключаюць у сябе гібкія аўтаматычныя лініі, прамысловыя робаты, кіруемыя мікракамп'ютэрамі, а таксама разнастайную электронную кантрольна-вымяральную апаратуру. Навуковыя асновы гэтай тэхнікі арганічна звязаны з радыёэлектронікай, фізікай цвёрдага цела, фізікай атамнага ядра і радам іншых раздзелаў сучаснай фізікі.

Фізіка і інфарматыка. Фізіка ўносіць рашаючы ўклад у стварэнне сучаснай вылічальнай тэхнікі, якая ўяўляе сабой матэрыяльную аснову інфарматыкі. Усе пакаленні электронных вылічальных машын (на вакуумных лямпах, паўправадніках і інтэгральных схемах¹), створаныя да нашых дзён, нарадзіліся ў фізічных лабараторыях. Сучасная фізіка адкрывае новыя перспектывы для далейшай мініяцюрызацыі, павелічэння хуткадзеяння і надзейнасці электронных вылічальных машын. Прымяненне лазераў і галаграфіі, якая развіваецца на іх аснове, змяшчае ў сабе велізарныя рэзервы для ўдасканалення вылічальнай тэхнікі.

Мы расказалі тут далёка не аб усіх баках рэвалюцыянізуючага ўплыву фізікі на розныя галіны сучаснай навукі і тэхнікі. Але і прыведзеных намі прыкладаў дастаткова, каб пераканацца ў тым, што сучасная фізіка ўносіць рашаючы ўклад у навукова-тэхнічную рэвалюцыю.

Наша краіна ўступіла на шлях перабудовы. Перабудова звязана з развіццём навукова-тэхнічнага прагрэсу, усебаковай інтэнсіфікацыі народнай гаспадаркі. Чакаецца карэнная перабудова ўсіх асноўных галін прамысловасці і сельскай гаспадаркі, усёй нашай эканомікі. Вялікі ўклад у рашэнне гэтых праблем павінны ўнесці фізіка-матэматычныя навукі. У сувязі з гэтым прадагледжана развіццё тэарэтычную і прыкладную матэматыку, інфарматыку і кібернетыку, фізіку элементарных часціц, атамнага ядра і цвёрдага цела, мікра- і квантавую электроніку і оптыку, радыёфізіку, а таксама даследаванні ў галіне атамнай і тэрма-ядзернай энергетыкі, асваенні нетрадыцыйных крыніц энергіі.

¹ У інтэгральных схемах замест звычайных радыёдэталяў і правадоў, якія іх злучаюць, выкарыстоўваюцца тонкія слаі малекул пэўнага сорту, што ўвядзены ўнутр крышталіка правадніка або напыляюць на яго паверхню. Дзякуючы гэтаму можна на паверхні паўправадніковага крышталю плошчай 1 см² размясціць сотні тысяч транзістараў і іншых элементаў схемы.

ЛАБАРАТОРНЫЯ РАБОТЫ¹

1. ВЫВУЧЭННЕ З'ЯВЫ ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЙ ІНДУКЦЫІ

Абсталяванне

Міліамперметр, крыніца жыўлення, шпулі са стрыжнямі, дугападобны магніт, выключальнік кнопкавы, злучальныя правады, магнітная стрэлка (компас), рээстат.

Падрыхтоўка да правядзення работы

1. Уставіць у адну са шпуль жалезны стрыжань, замацаваўшы яго гайкай. Падключыць гэту шпулю праз міліамперметр, рээстат і ключ да крыніцы жыўлення. Замкнуць ключ і з дапамогай магнітнай стрэлкі (комаса) вызначыць размяшчэнне магнітных полюсаў шпулі з токам. Зафіксаваць, у які бок адхіляецца пры гэтым стрэлка міліамперметра. Далей пры выкананні работы можна будзе меркаваць аб размяшчэнні магнітных полюсаў шпулі з токам па напрамку адхілення стрэлкі міліамперметра.

2. Адключыць ад ланцуга рээстат і ключ, замкнуць міліамперметр на шпулю, захаваўшы парадак злучэння іх клем.

Правядзенне эксперымента

1. Прыставіць стрыжань да аднаго з полюсаў дугападобнага магніта і ўсунуць унутр шпулі, назіраючы адначасова за стрэлкай міліамперметра.

2. Паўтарыць назіранне, высоўваючы стрыжань са шпулі, а таксама мяняючы полюсы магніта.

3. Зарысаваць схему доследу і праверыць выкананне правіла Ленца ў кожным выпадку.

4. Размясціць другую шпулю побач з першай так, каб іх восі супадалі.

5. Уставіць у абедзве шпулі жалезныя стрыжні і далучыць другую шпулю праз выключальнік да крыніцы жыўлення.

6. Замыкаючы і размыкаючы ключ, назіраць адхіленне стрэлкі міліамперметра.

7. Зарысаваць схему доследу і праверыць выкананне правіла Ленца.

¹ Інструкцыі да лабараторных работ складзены А. Б. Даліцкім і А. З. Сіняковым пры ўдзеле Ю. І. Дзіка і Г. Р. Нікіфарава.

2. ВЫМЯРЭННЕ ПАКАЗЧЫКА ПРАЛАМЛЕННЯ ШКЛА

Абсталяванне, неабходныя вымярэнні, сродкі вымярэння

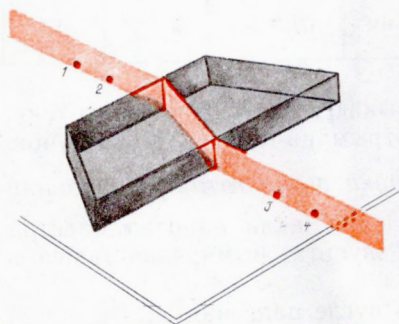
У рабоце вымяраецца паказчык праламлення шкляной пласціны, якая мае форму трапецыі. На адну з паралельных граней пласціны нахільна да яе накіроўваюць вузкі светлавы пучок. Праходзячы праз пласціну, гэты пучок святла зведвае двухкратнае праламленне. Крыніцай святла служыць электрычная лямпачка, падключаная праз ключ да якой-небудзь крыніцы току. Светлавы пучок ствараецца пры дапамозе металічнага экрана са шчылінай. Пры гэтым шырыня пучка можа мяняцца за кошт змянення адлегласці паміж экранам і лямпачкай. Паказчык праламлення шкла адносна паветра вызначаецца па формуле

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

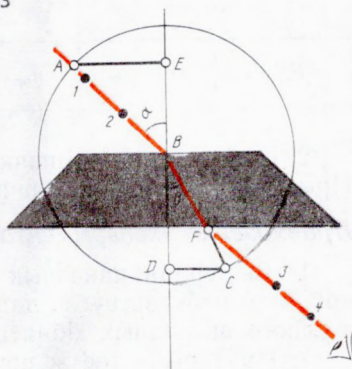
дзе α — вугал падзення пучка на грань пласціны з паветра ў шкло; β — вугал праламлення светлага пучка ў шкле.

Для вызначэння адносіны, якая стаіць у правай частцы формулы, паступаюць наступным чынам. Перад тым як накіраваць на пласціну светлавы пучок, яе размяшчаюць на сталі на лісце міліметровай паперы (або лісце паперы ў клетку) так, каб адна з яе паралельных граней супала з папярэдне адзначанай лініяй на паперы. Гэта лінія пакажа мяжу падзелу асяроддзяў паветра — шкло. Тонка заостраным карандашом праводзяць лінію ўздоўж другой паралельнай грані. Гэта лінія паказвае мяжу падзелу асяроддзяў шкло — паветра. Пасля гэтага, не зрушваючы пласціны, на яе першую паралельную грань накіроўваюць вузкі светлавы пучок пад якім-небудзь вуглом да грані. Уздоўж светлага пучка, які падае на пласціну і выходзіць з яе, тонка заостраным карандашом ставяць кропкі 1, 2, 3 і 4 (рыс. 192). Пасля гэтага лямпачку выключаюць, пласціну здымаюць і з дапамогай лінейкі працэрчваюць прамені, якія ўваходзяць, выходзяць і праламляюцца (рыс. 193). Праз пункт В мяжы падзелу асяроддзяў

Рыс. 192



Рыс. 193



паветра — шкло праводзяць да мяжы перпендыкуляр, адзначаюць вуглы падзення α і праламлення β . Далей пры дапамозе цыркуля праводзяць акружнасць з цэнтрам у пункце B і будуць прамавугольныя трохвугольнікі ABE і CBD .

Паколькі $\sin \alpha = \frac{AE}{AB}$; $\sin \beta = \frac{CD}{BC}$ і $AB = BC$, то формула для вызначэння паказчыка праламлення шкла прыме выгляд:

$$n = \frac{AE}{DC}. \quad (1)$$

Даўжыню адрэзкаў AE і DC вымяраюць па міліметровай паперы або пры дапамозе лінейкі. Пры гэтым у абодвух выпадках хібнасць інструментаў можна лічыць роўнай 1 мм. Хібнасць адліку трэба ўзяць таксама роўнай 1 мм, каб улічыць недакладнасць размяшчэння лінейкі адносна краю светлага пучка.

Максімальную адносную хібнасць ϵ вымярэння паказчыка праламлення вызначаюць па формуле

$$\epsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}.$$

Максімальная абсалютная хібнасць вызначаецца па формуле

$$\Delta n = n_{\text{пр}} \epsilon.$$

(Тут $n_{\text{пр}}$ — прыбліжанае значэнне паказчыка праламлення, які вызначаецца па формуле (1).)

Канчатковы рэзультат вымярэння паказчыка праламлення запісваецца так:

$$n = n_{\text{пр}} \pm \Delta n.$$

Падрыхтоўка да правядзення работы

1. Падрыхтаваць бланк справаздачы з табліцай для запісу рэзультатаў вымярэнняў і вылічэнняў.

Вымерана		Вылічана				
AE , мм	DC , мм	$n_{\text{пр}}$	ΔAE , мм	ΔDC , мм	ϵ , %	Δn

2. Падключыць лямпачку праз выключальнік да крыніцы току. Пры дапамозе экрана са шчылінай атрымаць тонкі светлавы пучок.

Правядзенне эксперымента, апрацоўка рэзультатаў вымярэнняў

1. Вымераць паказчык праламлення шкла адносна паветра пры якім-небудзь вугле падзення. Рэзультат вымярэння запісаць з улікам вылічаных хібнасцей.

2. Паўтарыць тое ж пры другім вугле падзення.

3. Параўнаць рэзультаты, атрыманыя па формулах

$$\begin{aligned} n_{1\text{пр}} - \Delta n_1 < n_1 < n_{1\text{пр}} + \Delta n_1, \\ n_{2\text{пр}} - \Delta n_2 < n_2 < n_{2\text{пр}} + \Delta n_2. \end{aligned}$$

4. Зрабіць вывад аб залежнасці (ці незалежнасці) паказчыка праламлення ад вугла падзення. (Метад параўнання рэзультатаў вымярэнняў ёсць ва ўводзінах да лабараторных работ у падручніку фізікі для X класа.)

Кантрольнае пытанне

Каб вызначыць паказчык праламлення шкла, дастаткова вымераць транспарцірам вуглы α і β і вылічыць адносіну іх сіносаў. Які з метадаў вызначэння паказчыка праламлення з'яўляецца лепшым: гэты ці выкарыстаны ў рабоце?

3. ВЫМЯРЭННЕ ДАЎЖЫНІ СВЕТАВОЙ ХВАЛІ

Абсталяванне, неабходныя вымярэнні, сродкі вымярэння

У рабоце для вызначэння даўжыні светлавой хвалі выкарыстоўваецца дыфракцыйная рашотка з перыядам $\frac{1}{100}$ мм або $\frac{1}{50}$ мм (перыяд указаны на рашотцы). Яна з'яўляецца асноўнай часткай вымяральнай устаноўкі, паказанай на rysunku 194. Рашотка 1 устаўляецца ў дзяржанні 2, якое прымацавана да канца лінейкі 3. На лінейцы размяшчаецца чорны экран 4 з вузкай вертыкальнай шчылінай 5 пасярэдзіне. Экран можа перамяшчацца ўздоўж лінейкі, што дазваляе змяняць адлегласць паміж ім і дыфракцыйнай рашоткай. На экране і лінейцы ёсць міліметровыя шкалы. Уся ўстаноўка мацуецца на штатыве 6.

Калі глядзець скрозь рашотку і прораз на крыніцу святла (лямпу напальвання ці свечку), то на чорным фоне экрана можна назіраць па абодва бакі ад шчыліны дыфракцыйныя спектры 1-га, 2-га і г. д. парадкаў.

Даўжыня хвалі λ вызначаецца па формуле

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k},$$

дзе d — перыяд рашоткі, k — парадак спектра, φ — вугал, пад якім назіраецца максімум святла адпаведнага колеру.

Паколькі вуглы, пад якімі

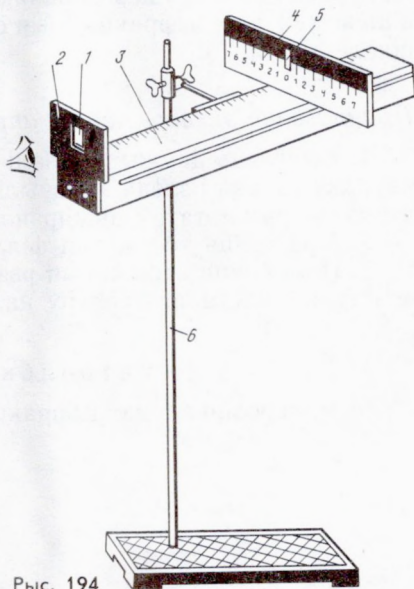


Рис. 194



Рис. 195

назіраюцца максімумы 1-га і 2-га парадкаў, не перавышаюць 5° , можна замест сінусаў вуглоў скарыстаць іх тангенсы. З рысунка 195 відаць, што

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}.$$

Адлегласць a адлічваець па лінейцы ад рашоткі да экрана, адлегласць b — па шкале экрана ад шчыліны да выбранай лініі спектра.

Канчатковая формула для вызначэння даўжыні хвалі мае выгляд:

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

У гэтай рабоце хібнасць вымярэнняў для хваль не ацэньваецца з-за некаторай няпэўнасці выбару сярэдзіны часткі спектра дадзенага колеру.

Падрыхтоўка да правядзення работы

1. Падрыхтаваць бланк справаздачы з табліцай для запісу рэзультатаў вымярэнняў і вылічэнняў.

2. Сабраць вымяральную ўстаноўку, устанавіць экран на адлегласці 50 см ад рашоткі.

3. Гледзячы праз дыфракцыйную рашотку і шчыліну ў экране на крыніцу святла і перамяшчаючы рашотку ў дзяржанні, устанавіць яе так, каб дыфракцыйныя спектры размяшчаліся паралельна шкале экрана.

Правядзенне эксперымента, апрацоўка рэзультатаў вымярэнняў

1. Вылічыць даўжыню хвалі чырвонага святла ў спектры 1-га парадку справа і злева ад шчыліны ў экране, вызначыць сярэдняе значэнне рэзультатаў вымярэння.

2. Прарабіць тое ж для фіялетавага святла.

3. Параўнаць атрыманыя рэзультаты з даўжынямі хваль чырвонага і фіялетавага колеру на каляровай уклейцы V, 1.

Кантрольнае пытанне

Чым адрозніваецца дыфракцыйны спектр ад дысперсійнага?

4. НАЗІРАННЕ ІНТЭРФЕРЭНЦЫІ І ДЫФРАКЦЫІ СВЯТЛА

Абсталяванне

Пласціны шкляныя — 2 шт., абрэзкі капронавыя або батыставыя, засвечаная фотаплёнка з прораззю, зробленай лязом брытвы, грампласцінка (або асколак грампласцінкі), штангенцыркуль, лампа з прамой ніццю напалу (адна на ўвесь клас).

Назіранне інтэрферэнцыі

1. Шкляныя пласціны акуратна працерці, скласці разам і сціснуць пальцамі.

2. Разглядваць пласціны ў адбітым святле на цёмным фоне (размяшчаць іх трэба так, каб на паверхні шкла не ўтвараліся вельмі яркія блікі ад вокан або ад белых сцен).

3. У асобных месцах судакранання пласцін назіраць яркія вясёлкавыя кольцападобныя або няправільнай формы палосы.

4. Заўважыць змяненні формы і размяшчэння атрыманых інтэрферэнцыйных палос са змяненнем націску.

5. Паспрабаваць убачыць інтэрферэнцыйную карціну ў праходзячым святле.

Назіранне дыфракцыі

1. Устаноўце паміж губкамі штангенцыркуля шчыліну шырынёй 0,5 мм.

2. Прыставіць шчыліну ўшчыльную да вока, размясціўшы яе вертыкальна.

3. Гледзячы скрозь шчыліну на вертыкальна размешчаную ніць лампы, якая свеціцца, назіраць па абодва бакі ніці вясёлкавыя палосы (дыфракцыйныя спектры).

4. Змяняючы шырыню шчыліны ад 0,5 да 0,8 мм, заўважыць, як гэта змяненне ўздзейнічае на дыфракцыйныя спектры.

5. Назіраць дыфракцыйныя спектры ў праходзячым святле пры дапамозе абрэзкаў капрону або батысту, засвечанай фотаплёнкай з прораззю.

6. Правесці назіранне дыфракцыйнага спектра ў адбітым святле пры дапамозе грампласцінкі, размясціўшы яе гарызантальна на ўзроўні вачэй.

5. НАЗІРАННЕ СУЦЭЛЬНАГА І ЛІНЕЙЧАСТАГА СПЕКТРАЎ

Абсталяванне

Праекцыйны апарат, спектральныя трубка з вадародам, неонам ці геліем, высакавольтны індуктар, крыніца жыўлення, штатыў, злучальныя правады (гэтыя прыборы з'яўляюцца агульнымі для ўсяго класа), шкляная пласціна са скошанымі гранямі (выдаецца кожнаму).

Правядзенне эксперымента

1. Размясціць пласціну гарызантальна перад вокам. Скрозь грані, якія складаюць вугал 45° , назіраць светлую вертыкальную палоску на экране — відарыс рассоўнай шчыліны праекцыйнага апарата.

2. Вылучыць асноўныя колеры атрыманага суцэльнага спектра і запісаць іх у назіраемай паслядоўнасці.

3. Паўтарыць дослед, разглядаючы палоску праз грані, якія ўтвараюць вугал 60° . Запісаць адрозненне ў выглядзе спектраў.

4. Назіраць лінейчастыя спектры вадароду, гелію або неону, разглядаючы спектральныя трубка, якія свецяцца, праз грані шкляной пласціны. Запісаць найбольш яркія лініі спектраў.

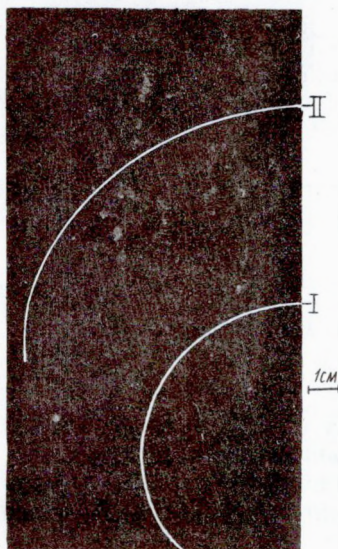
6. Вывучэнне трэкаў зараджаных часціц

У рабоце патрабуецца правесці ідэнтыфікацыю¹ зараджанай часціцы па выніках параўнання яе трэкаў з трэкам пратона ў камеры Вільсана, змешчанай у магнітнае поле.

Абсталяванне, неабходныя вымярэнні, сродкі вымярэння

Робота праводзіцца з гатовай фатаграфіяй трэкаў дзвюх зараджаных часціц (рыс. 196). Трэк І належыць пратону, трэк II — часціцы, якую трэба ідэнтыфікаваць. Лініі індукцыі магнітнага поля перпендыкулярныя да плоскасці фатаграфіі. Пачатковыя скорасці абедзвюх часціц аднолькавыя і перпендыкулярныя да краю фатаграфіі.

Рыс. 196



Ідэнтыфікацыя вядомай часціцы ажыццяўляецца шляхам параўнання яе ўдзельнага зараду $\frac{q}{m}$ з удзельным зарадам пратона. Гэта можна зрабіць, вымераўшы і параўнаўшы радыусы трэкаў часціц на пачатковых участках трэкаў. Сапраўды для зараджанай часціцы, якая рухаецца перпендыкулярна вектару індукцыі магнітнага поля, можна запісаць (гл. формулу (9.6) падручніка фізікі X класа):

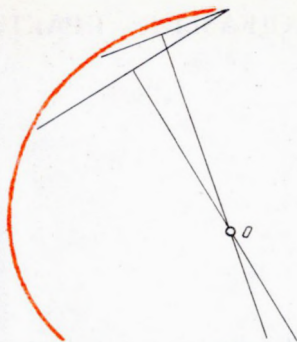
$$qBv = \frac{mv^2}{R} \quad \text{або} \quad \frac{q}{m} = \frac{v}{BR}.$$

З гэтай формулы відаць, што адносіна ўдзельных зарадаў час-

¹ Пад ідэнтыфікацыяй часціцы разумеецца ўстанаўленне яе тоеснасці з вядомай вам часціцай.

ціц роўна адваротнай адносіне радыусаў іх траекторый.

Радыус крывізны трэка часціцы вызначаюць наступным чынам. Накладаваюць на фатаграфію ліст празрыстай паперы і пераводзяць на яе трэк (гэта трэба рабіць асцярожна, каб не пашкодзіць фатаграфію). Вычэрчваюць, як паказана на rysunku 197, дзве хорды і ўзводзяць да гэтых хорд у іх сярэдзінах перпендыкуляры. На перасячэнні перпендыкуляраў ляжыць цэнтр акружнасці; яе радыус вымяраюць лінейкай.



Рыс. 197

Падрыхтоўка да правядзення работы

1. Падрыхтаваць бланк справаздачы з табліцай для запісу рэзультатаў вымярэнняў і вылічэнняў.
2. Перавесці на кальку трэкі часціц з фатаграфіі.

Правядзенне эксперыменту, апрацоўка рэзультатаў вымярэнняў

1. Вымераць радыусы крывізны трэкаў часціц, пераведзеных на кальку, на іх пачатковых участках.
2. Параўнаць удзельныя зарады невядомай часціцы і пратона. Ідэнтыфікаваць часціцу па рэзультатах вымярэнняў.

Кантрольныя пытанні

1. Як накіраваны вектар магнітнай індукцыі адносна плоскасці фатаграфіі трэкаў часціц?
2. Чаму радыусы крывізны на розных участках трэка адной і той жа часціцы розныя?

АДКАЗЫ ДА ПРАКТЫКАВАННЯЎ

Практыкаванне 1. 6. У другой шпулі праз некаторы час устаноўіцца пастаянны ток. 8. 0,2 А. 9. 0,15 В. 10. 1,2 Дж.

Практыкаванне 2. 1. $5 \cdot 10^{-3}$ Дж. 2. $\approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ с; $\approx 2,51 \cdot 10^{-6}$ с. 3. Ад 16 да 10 мГн. 4. $\approx 0,63$ В. 5. $\approx 0,63$ В. 6. $\approx 0,28$ А.

Практыкаванне 3. 1. Праслойкі паміж пласцінамі павінны быць перпендыкулярныя да восі вала. 2. ЭРС максімальная, калі плоскасць рамкі паралельная лініям магнітнай індукцыі. 4. Можна, напрыклад, намотаць зверху адной з абмотак дадатковую абмотку з вядомым лікам віткаў і вымераць напружанне на яе канцах пры падачы на другую абмотку вядомага напружання. 5. Трансфарматар можа згарэць, паколькі супраціўленне абмоткі пастаяннаму току намнога меншае, чым пераменнаму. 6. Супраціўленне аднаго вітка вельмі малое. У вітку ўзнікае вялікі індукцыйны ток. Таму вылучаецца значная колькасць цеплыні, што прыводзіць да разбурэння трансфарматара. 7. 1/10; 22/7; 35/6; 300/11.

Практыкаванне 4. 1. Ад $\lambda_1 \approx 92$ м да $\lambda_2 \approx 565$ м. 2. Паколькі антэна гарызантальная, вектар напружанасці электрычнага поля таксама размешчаны гарызантальна. Значыць, вектар магнітнай індукцыі вертыкальны. 3. На Месяцы адсутнічае іанасфера.

Практыкаванне 5. 1. Светлавы пучок не будзе бачны. 2. З'ява абумоўлена прамалінейнасцю распаўсюджвання святла скрозь малую адтуліну ў аканіцы. 3. Размеры паўценю залежаць ад адлегласці ад непразрыстай перашкоды да экрана. Пры малой адлегласці (ногі) паўцень малы, а пры вялікай (галава) вялікі. Калі б ліхтар быў кропкавай крыніцай, цені ад галавы і ног былі б аднолькава рэзкімі. 4. $\approx k \cdot 528$ аб/с (дзе $k = 1, 2, 3, \dots$). 6. $x = 2l \sin \alpha = 10$ см. 8. $H/2$. Ніжні край люстэрка павінен знаходзіцца на адлегласці ад падлогі, роўнай палавіне адлегласці ад вачэй да падлогі. Верхні край люстэрка павінен знаходзіцца на вышыні, меншай за рост чалавека на велічыню, роўную палавіне адлегласці ад вачэй да макушкі. 9. 0,55; 1,24. 10. 1,4 см. 11. У бок вяршыні праламляючага вугла прызмы. 12. Не выйдзе. 13. $n = 2$.

Практыкаванне 6. 1. Светлая пляма. 4. $5,2 \cdot 10^{-7}$ м.

Практыкаванне 7. 1. З пункту гледжання назіральніка на зямлі удар маланкі ў пункце В (ззаду поезда) адбыўся раней. 2. Скорасць электрона меншая за скорасць святла прыблізна на 10 см/с. 3. Прыблізна на $2,3 \cdot 10^{-12}$ кг.

Практыкаванне 8. 2. $\approx 1,5$. 3. $4 \cdot 10^{-19}$ Дж. 4. $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$ м. 5. $\approx 5 \cdot 10^{14}$ Гц. 6. $\approx 3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж. 7. $\approx 1,325 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.

Практыкаванне 9. 1. $v \approx 2 \cdot 10^6$ м/с; $a \approx 10^{23}$ м/с². 2. $\approx 6,9 \cdot 10^{-14}$ м. 3. $\approx 4,9 \times 10^{-7}$ м. 4. $E_i = 13,55$ эВ.

Практыкаванне 10. 1. Восем α -ператварэнняў, шэсць β -ператварэнняў. 2. Праз 3200 гадоў. 3. У 1,41 раза. 5. $\approx 2,2$ МэВ. 7. ≈ 200 МэВ.

- Адбіццё** поўнае 118
 — святла 112
Адваротная сувязь 58
Адноснасць адлегласці 160
 — адначасовасці 55
 — прамежкаў часу 160
Адроны 257
Альфа-прамені 219
Альфа-часціцы 219
Амплітуда 36
Анігіляцыя 258
Антэна 55, 89
Антынейтрон 259
Антырэчыва 259
Антыпратон 259
Арцымовіч А. А. 244
Атам 255
Атамная фізіка 199
Атамнае ядро 201
Атамы мечаныя 248
Аўтаваганні 56
Аўтавагальная сістэма 56

Балдзін А. М. 257
Бальмер І. Я. 205
Басай М. Г. 207
Бекерэль А. Э. 217
Бор Н. 203, 204
Бэта-прамені 219

Вавілаў С. І. 169, 191

Ваганні вымушаныя 26
 — гарманічныя 36
 — затухаючыя 36
 — свабодныя 26
 — электрамагнітныя 28
Вагальны контур 30
 — — адкрыты 83
 — — закрыты 83
Вібратар Герца 83
Відэасігнал 101
Вугал адбіцця 112
 — падзення 112
 — поўнага адбіцця граніч-
 ны 119
 — праламлення 114
**Выпраменьванне індукцырава-
 нае** 207
 — інфрачырвонае 176
 — цеплавое 167
 — ультрафіялетавае 177

Гама-прамені 219
Ган О. 235
Гейзенберг В. 229
Гел-Манон М. 257
Генератар індукцыйны 64
 — на транзістары 57
**Генры (адзінка індуктыўнас-
 ці)** 79
Герц Г. 38, 82, 83, 84, 149, 185
Герц (адзінка частаты) 38
Гіпотэза Максвела 22

— Планка 184
Глейзер Д. 215
Грей (адзінка паглынутай дозы
выпраменьвання) 251
Гюйгенс Х. 111

Даўжыня хвалі 78
— — светлавой 134
Дзірак П. 258
Дзяленне ядзер 206
Доза выпраменьвання 251
— — паглынутая 251
Дослед Майкельсана і Мар-
лі 155
— Фізо 109
— Юнга 139
Доследы Герца 84
— Рэзерфорда 199, 200
Дысперсія святла 125, 126
Дыфракцыйная карціна 141
— рашотка 143
Дыфракцыя хваль 138
— рэнтгенаўскіх праме-
няў 179
— святла 139
Дэйтэрый 226
Дэмакрыт 221, 255
Дэтэктар 93
Дэтэктираванне 92, 93
Дэфект мас 231
Дэфектаскапія 180

Жаліо-Кюры І. 228
Жаліо-Кюры Ф. 228, 229
Жданаў А. П. 216

Закон адбіцця святла 111, 112,
113
— Ома 49
— праламлення святла 114,
115

— радыеактыўнага распа-
ду 224
— складання скорасцей рэ-
лятывісцкі 160, 161
Законы геаметрычнай оптыкі
107
— фотаэфекту 186, 187
Затрымліваючае напружан-
не 187
Зрух фаз 41
Іанасфера 36
Іваненка Д. Д. 229
Ізотопы 226
— радыеактыўныя 248
Іканаскоп 100
Індуктыўнасць (каэфіцыент са-
маіндукцыі) 19
Інтэнсіўнасць хвалі 86
Інтэрферэнцыйная карціна 128
Інтэрферэнцыя святла 131
— хваль 128, 129
Інтэрферометр 155
Камера Вільсана 214
— пузырковая 215
Капіца П. Л. 215
Карпускулярна-хвалевы дуа-
лізм 191
Каэфіцыент размнажэння ней-
тронаў 238
— трансфармацыі 67
— узнаўлення 241
Квант 184, 190
Квантавая механіка 190
Кваркі 257
Кінескоп 101
Кольцы Ньютана 133
Крыніца выпраменьвання пунк-
тавая 86
Курчатаў І. В. 242, 243
Кюры П. 218

Лазер 206

Лайэ М. 179

Леантовіч М. А. 244

Лебедзей П. М. 194

Ленін У. І. 73, 256

Лептоны 258

Лічыльнік Гейгера 213

Лорэнц Х. 154

Магнітны паток (паток магніт-
най індукцыі) 7

Магутнасць 45

— імгненная 45

— сярэдняя 45

Мадуляцыя 90, 91

— амплітудная 91

Мадэль атама планетарная 202

— — па Бору 204

— — пратонна-нейтронная
230

— — Томсана 199

— ядра кропельная 236

Майкельсан А. 110, 155

Максвел Д. К. 12, 21, 79, 107,
149, 154, 192

Марконі Г. 90

Маса крытычная 240

— спакою 162, 165

Масавы лік 230

Мейтнер Л. 235

Метад мечаных атамаў 248
— таўстаслойных фотаэмуль-
сій 215, 216

Мікрафон 17

Морлі Э. 155

Мысойскі Л. В. 216

Нейтрон 228, 229

Нейтрына 255

Нуклон 230

Ньютан І. 106, 125

Оптыка 105

— валаконная 119

— геаметрычная 107

— фізічная 107

Пазітрон 255, 258

Паказчык праламлення абса-
лютны 115

— — адносны 115

Паляроіды 148

Палярызацыя святла 146

Папоў А. С. 88, 89, 90

Пара электронна-позітронная
258

Пастаянная Планка 184

Пастулаты Бора 203

— тэорыі адноснасці 156

Перыяд дыфракцыйнай рашот-
кі 144

— ваганняў 37, 38

— паўраспаду 224

Петржак К. А. 237

Планк М. 184, 185

Поле віхравое электрычнае 13
— электрамагнітнае 22, 23

Правіла зрушэння 223

— квантавання 204

— Ленца 9

Праламленне святла 113

Прамень 85, 107

Прасвятленне оптыкі 136

Пратон 202

Прохараў А. М. 207

Прынцып Гюйгенса 111

— Гюйгенса — Фрэнеля 140

— адноснасці 156

Работа выхаду 189

— удзельная віхраваго по-
ля 51

Радыеактыўнасць 216, 217

- Радыёлакатар 98
 Радыёлакацыя 98
 Радыёсувязь 90
 Радыян 39
Ромер О. 108
 Ротар 64
 Рэактар ядзерны 240
 — на хуткіх нейтронах 241
 Рэакцыі тэрмаядзерныя 242
 — ядзерныя 233
 — — ланцуговыя 238
 — — ,энергетычны выхад 234
 Рэзананс 53
 Рэзанансы 257
Рэзерфорд Э. 199, 200, 218, 220, 223, 227
Рэнтген В. 178, 179
 Рэнтген (адзінка экспазіцыйнай дозы выпраменьвання) 251
 Рэнтгенаўская дэфектаскапія 180
 — трубка 181
 Рэнтгенаўскія прамені 178
 Самаіндукцыя 18
 Светлавод 120
 Святло монахраматычнае 169
 — натуральнае 148
 — плоскапалярызаванае 148
 Серыя Бальмера 204
 Сіла току 34
 — —, амплітуда 45, 48, 52
 — —, дзеючае значэнне 46
 — —, імгненнае значэнне 45
 Сілы ядзерныя 230
 Сістэма аўтавагальная 56
Скабэльцын Д. В. 215
Складойская-Кюры М. 218
 Скорасць святла 108
 — хвалі 77
 — электрамагнітных хваль 85
Содзі Ф. 221, 226
 Спектр 126
 — лінейчасты 173
 — неперарыўны (суцэльны) 173
 — паглынання 174
 — паласаты 174
 Спектральная шчыльнасць інтэнсіўнасці выпраменьвання 170
 Спектральны аналіз 174
 — апарат 171
 Спектраскоп 172
 Спектрограф 172
 Статар 64
Сталетаў А. Р. 185
 Супраціўленне электрычнае актыўнае 44
 — — ёмістаснае 49
 — — індуктыўнае 52
Тайнс Ч. 207
Томсан Дж. Дж. 199, 226
 Ток насычэння 187
 Токі Фуко 13
 Трансфарматар 66
 Трытый 226
 Трэк 214
 Тэлебачанне 100
 Тэорыя адноснасці 153
 — святла хвалевае 106
 — — карпускулярная 106
 — — электрамагнітная 107
 — фотаэфекту 188
 Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту 189
Фабрыкант В. А. 207
 Фаза ваганняў 39
 — пачатковая 41

Фарадэй М. 4
Фермі Э. 235, 242
Ферыты 14
Фізіка элементарных часціц 212
Фізо І. 109
Флёраў Г. М. 237
Фатаграфія 195
Фатон 255, 256
Формула Томсана 38
— *Эйнштэйна* 164
Фоталюмінесценцыя 169
Фотасінтэз 196
Фотасфера 175
Фотаэфект 185, 186
—, *чырвоная мяжа* 189
Фрэнель А. 140
Фрыш О. 235

Хваля 76
— *плоская* 112
— *папярочная* 77
— *падоўжная* 77
—, *скорасць* 77
— *электрамагнітная* 79, 80
Хэмілюмінесценцыя 168

Цвейг Дж. 257
Ціміразеў К. А. 195
Ціск святла 194

Чаранкоў П. А. 168
Частата ваганняў 38

— — *уласная* 38
— *нясучая* 38
— *цыклічная (кругавая)* 38
— *пераменнага току* 43
Часціцы «дзіўныя» 257
— *субатамныя* 255
— *субэлементарныя* 256
— *элементарныя* 255
Чэдвік Д. 228

Штрасман Ф. 235
Шчыльнасць патоку электрамагнітнага выпраменьвання 85

Эйнштэйн А. 155
Электралюмінесценцыя 168
Электрамагнітная індукцыя 5, 6
Электрон 225
Электронвольт 204
Энергасістэма 72
Энергія магнітнага поля 20
— *спакою* 165
— *сувязі* 231
— *удзельная* 232

Юнг 132, 133, 139, 146

Яблчкаў П. М. 66
Ядро атамнае 201

Наказ	3
-----------------	---

ЭЛЕКТРАДЫНАМІКА (працяг)

Раздзел 1.

Электрамагнітная індукцыя	4
§ 1. Адкрыццё электрамагнітнай індукцыі	—
§ 2. Магнітны паток	7
§ 3. Напрамак індукцыйнага току. Правіла Ленца	8
§ 4. Закон электрамагнітнай індукцыі	10
§ 5. Віхравое электрычнае поле	12
§ 6. ЭРС індукцыі ў правадніках, якія рухаюцца	14
§ 7. Электрадынамічны мікрафон	17
§ 8. Самаіндукцыя. Індуктыўнасць	18
§ 9. Энергія магнітнага поля току	20
§ 10. Электрамагнітнае поле	21
Прыклады рашэння задач	24
Практыкаванне 1	—
Кароткія вынікі раздзела 1	25

ВАГАННІ І ХВАЛІ

Раздзел 2.

Электрамагнітныя ваганні	27
§ 11. Свабодныя і вымушаныя электрамагнітныя ваганні	—
§ 12. Вагальны контур. Ператварэнне энергіі пры электрамагнітных ваганнях	30
§ 13. Аналогія паміж механічнымі і электрамагнітнымі ваганнямі	31
§ 14. Ураўненне, якое апісвае працэсы ў вагальным контуры	34
§ 15. Гарманічныя ваганні. Амплітуда, перыяд і частата ваганняў	35
§ 16. Фаза ваганняў	39
§ 17. Пераменны электрычны ток	42
§ 18. Актыўнае супраціўленне. Дзеючыя значэнні сілы току і напружання	44
§ 19. Кандэнсатар у ланцугу пераменнага току	47

§ 20. Шпуля індуктыўнасці ў ланцугу пераменнага току	50
§ 21. Рэзананс у электрычным ланцугу	52
§ 22. Генератар на транзістары. Аўтаваганні	55
Прыклады рашэння задач	60
Практыкаванне 2.	61
Кароткія вынікі раздзела 2	62

Раздзел 3.

Вытворчасць, перадача і выкарыстанне электрычнай энергіі	63
§ 23. Генерыраванне электрычнай энергіі	—
§ 24. Трансфарматыры	66
§ 25. Вытворчасць і выкарыстанне электрычнай энергіі	68
§ 26. Перадача электраэнергіі	71
§ 27. Электрыфікацыя СССР	73
Практыкаванне 3	74
Кароткія вынікі раздзела 3	—

Раздзел 4.

Электрамагнітныя хвалі	76
§ 28. Хвалевыя з'явы	—
§ 29. Электрамагнітныя хвалі	79
§ 30. Эксперыментальнае выяўленне электрамагнітных хваль	82
§ 31. Шчыльнасць патоку электрамагнітнага выпраменьвання	85
§ 32. Вынаходства радыё А. С. Паповым	88
§ 33. Прынцыпы радыёсувязі	90
§ 34. Як ажыццяўляецца мадуляцыя і дэтэктіраванне	92
§ 35. Уласцівасці электрамагнітных хваль	95
§ 36. Распаўсюджванне радыёхваль	97
§ 37. Радыёлакацыя	98
§ 38. Паняцце аб тэлебачанні	100
§ 39. Развіццё сродкаў сувязі ў СССР	102
Практыкаванне 4	103
Кароткія вынікі раздзела 4	—

ОПТЫКА

Развіццё поглядаў на прыроду святла	105
---	-----

Раздзел 5.

Светлавая хвалі	108
§ 40. Скорасць святла	—
§ 41. Прынцып Гюйгенса. Закон адбіцця святла	111
§ 42. Закон праламлення святла	113
§ 43. Поўнае адбіццё	117

Прыклады рашэння задач	120
Практыкаванне 5	124
§ 44. Дысперсія святла	125
§ 45. Інтэрферэнцыя механічных хваль	127
§ 46. Інтэрферэнцыя святла	131
§ 47. Некаторыя прымяненні інтэрферэнцыі	136
§ 48. Дыфракцыя механічных хваль	138
§ 49. Дыфракцыя святла	139
§ 50. Дыфракцыйная рашотка	143
§ 51. Папярочнасць светлавых хваль. Палярызацыя святла	146
§ 52. Папярочнасць светлавых хваль і электрамагнітная тэорыя святла	149
Прыклады рашэння задач	150
Практыкаванне 6	151
Кароткія вынікі раздзела 5	152

Раздзел 6.

Элементы тэорыі адноснасці	153
§ 53. Законы электрадынамікі і прынцып адноснасці	—
§ 54. Пастулаты тэорыі адноснасці	156
§ 55. Адноснасць адначасовасці	157
§ 56. Асноўныя вывады з пастулатаў тэорыі адноснасці	160
§ 57. Залежнасць масы ад скорасці. Рэлятывісцкая дынаміка	162
§ 58. Сувяз паміж масай і энергіяй	164
Практыкаванне 7	165
Кароткія вынікі раздзела 6	166

Раздзел 7.

Выпраменьванні і спектры	167
§ 59. Віды выпраменьванняў. Крыніцы святла	—
§ 60. Спектры і спектральныя апараты	169
§ 61. Віды спектраў	172
§ 62. Спектральны аналіз	174
§ 63. Інфрачырвоное і ультрафіялетавае выпраменьванні	176
§ 64. Рэнтгенаўскія прамені	178
§ 65. Шкала электрамагнітных выпраменьванняў	181
Кароткія вынікі раздзела 7	182

КВАНТАВАЯ ФІЗІКА

Зараджэнне квантавай тэорыі	184
---------------------------------------	-----

Раздзел 8.

Светлавая кванты	185
§ 66. Фотаэфект	—
§ 67. Тэорыя фотаэфекту	188

§ 68. Фатоны	190
§ 69. Прымяненне фотаэфекту	192
§ 70. Ціск святла	194
§ 71. Хімічнае дзеянне святла. Фатаграфія	195
Практыкаванне 8	197
Кароткія вынікі раздзела 8	198

Раздзел 9.

Атамная фізіка	199
---------------------------------	-----

§ 72. Будова атама. Доследы Рэзерфорда	—
§ 73. Квантавыя пастулаты Бора. Мадэль атама вадароду па Бору	203
§ 74. Цяжжасці тэорыі Бора. Квантавая механіка	205
§ 75. Лазеры	206
Практыкаванне 9	211
Кароткія вынікі раздзела 9	—

Раздзел 10.

Фізіка атамнага ядра	212
---------------------------------------	-----

§ 76. Метады назірання і рэгістрацыі элементарных часціц	—
§ 77. Адкрыццё радыеактыўнасці	216
§ 78. Альфа-, бэта- і гама-выпраменьванні	218
§ 79. Радыеактыўныя ператварэнні	221
§ 80. Законы радыеактыўнага распаду. Перыяд паўраспаду	223
§ 81. Ізатопы	225
§ 82. Адкрыццё нейтрона	227
§ 83. Будова атамнага ядра. Ядзерныя сілы	229
§ 84. Энергія сувязі атамных ядзер	231
§ 85. Ядзерныя рэакцыі	233
§ 86. Дзяленне ядзер урану	235
§ 87. Ланцуговыя ядзерныя рэакцыі	238
§ 88. Ядзерны рэактар	240
§ 89. Тэрмаядзерныя рэакцыі	242
§ 90. Прымяненне ядзернай энергіі	245
§ 91. Атрыманне радыеактыўных ізатопаў і іх прымяненне	247
§ 92. Біялагічнае дзеянне радыеактыўных выпраменьванняў	250
Практыкаванне 10	252
Кароткія вынікі раздзела 10	253

Раздзел 11.

Элементарныя часціцы	255
---------------------------------------	-----

§ 93. Тры этапы ў развіцці фізікі элементарных часціц	—
§ 94. Адкрыццё пазітрона. Антычасціцы	258
Кароткія вынікі раздзела 11	260

Значення фізики для тлумачення свету і развіцця вытворчых сіл грамадства . 261

§ 95. Адзіная фізічная карціна свету —

§ 96. Фізіка і навукова-тэхнічная рэвалюцыя 264

Лабараторныя работы 268

1. Вывучэнне з'явы электрамагнітнай індукцыі —

2. Вымярэнне паказчыка праламлення шкла 269

3. Вымярэнне даўжыні светлавой хвалі 271

4. Назіранне інтэрферэнцыі і дыфракцыі святла 273

5. Назіранне суцэльнага і лінейчага спектраў —

6. Вывучэнне трэкаў зараджаных часціц 274

Адказы да практыкаванняў 276

Прадметна-імяны паказальнік 277

Учебное издание

МЯКИШЕВ Геннадий Яковлевич

БУХОВЦЕВ Борис Борисович

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса средней школы

Минск, издательство «Народная асвета»

На белорусском языке

Вучэбнае выданне

МЯКІШАЎ Генадзь Якаўлевіч

БУХАЎЦАЎ Барыс Барысавіч

ФІЗІКА

Падручнік для 11 класа сярэдняй школы

Загладчык рэдакцыі *Б. А. Кімбар*. Рэдактар *Н. Г. Ляўчук*. Вокладка мастака *І. М. Берава*. Мастацкі рэдактар *Р. І. Красінскі*. Тэхнічныя рэдактары *М. І. Чаплавоцкая, С. І. Ліцкевіч*. Карэктары *Т. М. Вядзернікава, Г. М. Булат*.

ИБ № 3217

Зладзена ў набор 24.10.90. Падпісана ў друк 04.07.91. Фармат 60×90¹/₁₆. Папера афсетная № 1. Гарнітура літаратурная. Афсетны друк. Умоўн. друк. арк. 18+0,25 укл.+0,25 форз. Умоўн. фарба-адбіт. 74,5. Ул.-выд. арк. 18,15+0,25 укл.+0,44 форз. Тыраж 31 000 экз. Заказ 819. Цана 4 р. 40 к.

Выдавецтва «Народная асвета» Дзяржаўнага камітэта БССР па друку. 220600, Мінск, праспект Машэрава, 11.

Мінскі ордэна Працоўнага Чырвонага Сцяга паліграфкампінат МВПА імя Я. Коласа. 220005, Мінск, Чырвоная, 23.

ШКАЛА ЕЛЕКТРАМАГНІТНИХ ВИПРАМЕНЬВАННЯЇ

ВИПРАМЕНЬВАННІ МАЛЕКУЛ, АТАМАЇ І ЯДЗЕР



ІНФРАЧЫРВОНАЕ ВИПРАМЕНЬВАННЕ

БАЧНАЕ ВИПРАМЕНЬВАННЕ



УЛЬТРАФІЯЛЕТАВАЕ
ВИПРАМЕНЬВАННЕ



РЭНТГЕНАЎСКАЕ ВИПРАМЕНЬВАННЕ



ГАМА-
ВИПРАМЕНЬВАННЕ

Мякішаў Г. Я., Бухаўцаў Б. Б.

М99 Фізіка: Падруч. для 11-га кл. сярэд. шк.— Мн.:
Нар. асвета, 1991.— 286 с.: іл.

ISBN 5-341-00758-1.

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учеб.
для 11-го кл. сред. шк.

4306021200—052

М—121—91

М303(03)—91

ББК 22.3я721

4 р. 40 к.

11

QUIZKA

(1991)