

## § 27. Фотаэфект. Эксперыментальныя законы знешняга фотаэфекту. Квантавая гіпотэза Планка

- Вывучэнне ўзаемадзеяння святла з рэчывам прывяло да адкрыцця эфектаў, якія дазволілі зрабіць важны крок да разумення прыроды святла. У далейшым выкарыстанне гэтых эфектаў дазволіла стварыць новае пакаленне электронных прыбораў і прылад. Якія ж асноўныя заканамернасці ўзаемадзеяння святла з рэчывам?

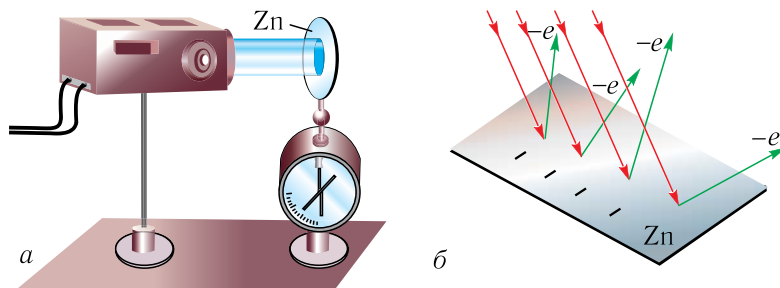


Сіла току  $I$  — скалярная фізічная велічыня, роўная адносіне зараду  $\Delta q$ , які прайшоў за прамежак часу  $\Delta t$  праз папярочнае сячэнне правадніка, да гэтага прамежку:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ .

У 1887 г. Генрых Герц выявіў, што прабой паветранага прамежку паміж электродамі іскравога разрадніка адбываецца пры меншым напружанні, калі адмоўна зараджаны электрод асвятляць ультрафіялетавым выпраменьваннем. Далейшыя эксперыменты паказалі, што адмоўна зараджаная цынкавая пласцінка пры апраменьванні ультрафіялетавым выпраменьваннем (мал. 171, *а*) разраджаецца. Абедзве гэтыя з’явы можна растлумачыць, мяркуючы, што пад дзеяннем падаючага выпраменьвання з металу вылятаюць адмоўна зараджаныя часціцы — электроны (мал. 171, *б*). Гэта з’ява атрымала назву *фотаэфекту*.

**Фотаэфектам (фотаэлектрычным эфектам)** называецца з’ява ўзаемадзеяння электрамагнітнага выпраменьвання з рэчывам, у выніку якога энергія выпраменьвання перадаецца электронам рэчыва.

Калі фотаэфект суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **знешнім фотаэфектам**, а электроны, што выля-



Мал. 171. Фотаэлектрычны эфект:

*а* — дзеянне ультрафіялетавага выпраменьвання на пласцінку; *б* — вылет электронаў з паверхні цынку пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання

таюць, — **фотаэлектронамі**. Калі фотаэфект не суправаджаецца вылетам электронаў з паверхні рэчыва, то яго называюць **унутраным фотаэфектам**. Пры ўнутраным фотаэфекце частка электронаў, што знаходзяцца ў рэчыве ў звязаным стане, пераходзіць у свабодны стан, павялічваючы канцэнтрацыю свабодных носьбітаў току. Гэта прыводзіць да змянення электрычных уласцівасцей рэчыва пад дзеяннем падаючага на яго святла. Унутраны фотаэфект уласцівы толькі паўправаднікам і дыэлектрыкам. Выпусканне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй (фотаэмісіяй)**.

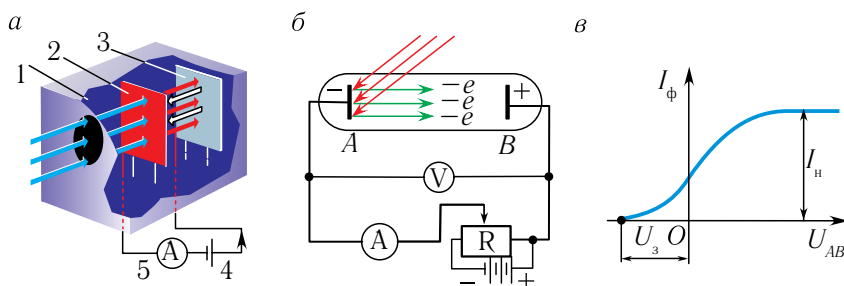
► «Фотоз» (фотас) па-грэчаску азначае «святло».

Сістэматычнае вывучэнне фотаэфекту было праведзена ў 1888—1889 гг. рускім фізікам Аляксандрам Рыгоравічам Сталетавым.

Схема ўстаноўкі для эксперыментальнага вывучэння знешняга фотаэфекту прадстаўлена на малюнку 172, *а*.

У эксперыментах Сталетава ў электрычны ланцуг былі ўключаны два электроды (2) і (3), адзін з якіх (2) быў выраблены з меднай сеткі, а (3) уяўляў сабой цынкавую пласцінку. Медная сетка была зараджана дадатна, а цынкавая пласцінка — адмоўна. Назіранні паказалі, што пад дзеяннем падаючага ультрафіялетавага выпраменьвання ў ланцугу ўзнікае электрычны ток. Гэты ток называецца **фотатокам**.

Змяняючы напружанне  $U$  паміж пласцінамі  $A$  і  $B$  пры дапамозе рэастата (мал. 172, *б*), Сталетаў даследаваў залежнасць сілы фотатоку  $I_{\Phi}$  ад напружання  $U$  (вольт-амперную характарыстыку). Як бачна з пака-



Мал. 172. Вывучэнне знешняга фотаэфекту: *а* — выгляд устаноўкі: 1 — герметычны корпус; 2 — медная сетка; 3 — цынкавая пласцінка; 4 — крыніца току; 5 — амперметр; *б* — электрычная схема зняцця вольт-ампернай характарыстыкі  $I(U)$ ; *в* — вольт-амперная характарыстыка

знай на малюнку 172, в залежнасці, нават пры адсутнасці рознасці патэнцыялаў паміж пласцінамі ў ланцугу адбываецца фотаток. Паколькі скорасці электронаў, выпускаемых катодам, адрозніваюцца як па модулі, так і па напрамку, то не ўсе яны пры малых значэннях напружання могуць дасягнуць анода.

Пры павелічэнні напружання паміж электродамі сіла фотатоку нарастае да некаторага максімальнага значэння  $I_n$  (гл. мал. 172, в), якое называецца **фотатокам насычэння**. Пры фотаток насычэння ўсе электроны, выпускаемыя катодам за адзінку часу, дасягаюць анода. Вось чаму далейшае павелічэнне напружання не прыводзіць да росту сілы фотаток. Змяненне палярнасці напружання прыводзіць да знікнення фотаток пры напружанні  $U_з$ , якое называецца **затрымліваючым напружаннем** (гл. мал. 172, в).

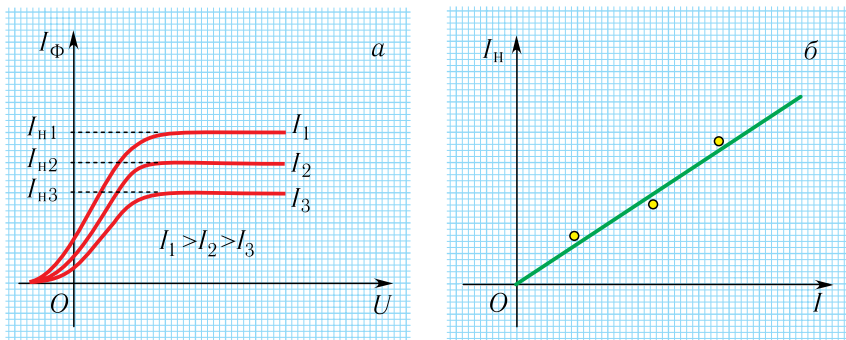
Для большасці рэчываў фотаэфект узнікае толькі пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання. Аднак некаторыя металы, напрыклад літый, натрый і калій, выпускаюць электроны і пры іх апраменьванні бачным святлом.

Эксперыментальна ўстаноўлены наступныя законы знешняга фотаэфекту:

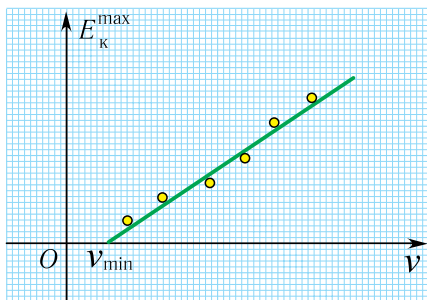
1. **Сіла фотаток насычэння  $I_n$  прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці  $I$  падаючага выпраменьвання (першы закон фотаэфекту).**

Вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту паказана на малюнках 172, в і 173, а.

Залежнасць фотаток насычэння  $I_n$  ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання  $I$  паказана на малюнку 173, б. Паколькі графік выходзіць з пачатку каардынат, то сіла фотаток насычэння роўна нулю ( $I = 0$ ) толькі



Мал. 173. а — вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры розных інтэнсіўнасцях падаючага выпраменьвання; б — залежнасць сілы фотаток насычэння ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання



Мал. 174. Графік залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі  $E_k^{\max}$  фотаэлектронаў ад частаты  $\nu$  падаючага выпраменьвання

фотаэлектронны частку сваёй энергіі, атрыманай ад падаючага выпраменьвання, перадаюць часціцам рэчыва да вылету з яго паверхні.

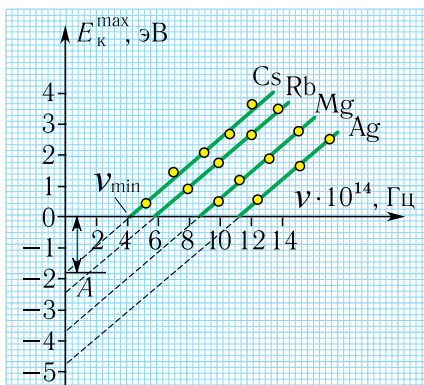
На малюнку 174 паказана залежнасць  $E_k^{\max}$  ад частаты падаючага выпраменьвання.

**3. Для кожнага рэчыва існуе гранічная частата  $\nu_{\min}$  такая, што выпраменьванне меншай частаты не можа вырываць электроны з яго паверхні (трэці закон фотаэфекту).**

Гэта мінімальна частата  $\nu_{\min}$  называецца **чырвонай мяжой** фотаэфекту. Такая назва звязана з тым, што мінімальную частату выпраменьвання ў бачным дыяпазоне мае выпраменьванне, якое адпавядае чырвонаму колеру.

Заўважым, што чырвоная мяжа фотаэфекту для розных рэчываў зусім не абавязкова адпавядае чырвонаму колеру. Напрыклад, для рубідыю яна адпавядае жоўтаму колеру, для кальцыю — сіняму, а для некаторых рэчываў можа наогул знаходзіцца як у інфрачырвонай, так і ў ультрафіялетавай абласцях спектра.

На малюнку 175 паказаны эксперыментальныя залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў  $E_k^{\max}$  ад частаты падаючага выпраменьвання для цэзію (Cs), рубідыю (Rb), маг-



Мал. 175. Графікі залежнасці максімальнай кінетычнай энергіі фотаэлектронаў  $E_k^{\max}$  ад частаты  $\nu$  падаючага выпраменьвання для Cs, Rb, Mg і Ag

нію (Mg) і серабра (Ag). Як бачна з малюнка 175, эксперыментальныя прамыя паралельны адна адной, прычым пункты перасячэння графікаў з воссю абсцыс (частот) вызначаюць чырвоныя межы фотаэфекту для кожнага з іх.

Пры частотах, большых за  $\nu_{\min}$ , выпраменьванне нават вельмі малой інтэнсіўнасці выклікае фотаэфект. Акрамя таго, паміж момантам уключэння крыніцы выпраменьвання і момантам вылету электронаў з узору фактычна няма затрымкі ў часе: электроны вылятаюць з рэчыва праз прамежак часу парадку  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  с пасля пачатку абпраменьвання, г. зн. практычна імгненна.

Трэба адзначыць, што падчас даследавання фотаэфекту Сталетавым яшчэ нічога не было вядома аб электроне, які будзе адкрыты Джозефам Джоном Томсанам толькі ў 1897 г.

Падкрэслім, што ўстаноўленыя эксперыментальныя законы фотаэфекту немагчыма растлумачыць на падставе ўяўленняў аб тым, што святло — гэта электрамагнітная хваля. На аснове гэтых уяўленняў можна растлумачыць толькі першы з прыведзеных эксперыментальных законаў фотаэфекту: чым большая энергія падаючага святла, тым больш электронаў вылятае з рэчыва. Растлумачыць жа 2-і і 3-і законы фотаэфекту ў рамках класічнай тэорыі выпраменьвання не ўяўляецца магчымым.

Так, напрыклад, незразумела, чаму максімальная кінетычная энергія фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці падаючага выпраменьвання. Немагчыма таксама растлумачыць існаванне чырвонай мяжы фотаэфекту. Сапраўды, нават пры малой частаце падаючага выпраменьвання, але пры працяглым уздзеянні электрамагнітнай хвалі на электрон яму можна перадаць энергію, неабходную для вылету з рэчыва. Такім чынам, зыходзячы з хвалевага ўяўленняў, чырвоная мяжа фотаэфекту не павінна існаваць. Усе гэтыя супярэчнасці былі зняты квантавай тэорыяй.

Квантавыя ўяўленні былі ўпершыню ўведзены нямецкім фізікам Максам Планкам. Ён зрабіў фундаментальную здагадку, што выпраменьванне і паглыннанне электрамагнітных хваль атамамі і малекуламі адбываецца не бесперапынна, а асобнымі порцыямі энергіі — квантамі. Адпаведна, пад квантам трэба разумець мінімальную порцыю энергіі, якая выпраменьваецца ці паглынаецца. Энергія кванта прама прапарцыянальна частаце выпраменьвання:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

дзе  $h$  — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які называюць **пастаяннай Планка**. Гэта — фундаментальная пастаянная.

16 лістапада 2018 г. на пасяджэнні Генеральнай асамблеі мер і вагаў значэнне пастаяннай Планка было прынята роўным:

$$h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка, якое выкарыстоўваецца пры рашэнні задач:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Энергія любой вагальнай сістэмы (атама, малекулы), якая выконвае ваганні з частатой  $\nu$ , можа прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, якія адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**:

$$E_n = nE = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

дзе  $n$  — цэлы дадатны лік.

Значыць, атам (малекула) можа мець не любую энергію, а толькі энергію, кратную  $\Delta E = h\nu$ . Такім чынам, упершыню ў фізіцы з'явілася ідэя аб квантаванні энергіі.

14 снежня 1900 г. Планк далажыў свае вынікі на пасяджэнні Нямецкага фізічнага грамадства. Гэты дзень лічаць днём нараджэння квантавых уяўленняў. З'явіўся квант энергіі як дыскрэтная порцыя энергіі. Планк адносіў дыскрэтнасць энергіі да ўласцівасцей рэчыва, а выпраменьванне разглядалася як электрамагнітныя хвалі.

Пасля з'яўлення гіпотэзы Планка (1900 г.) пачалося інтэнсіўнае развіццё квантавых уяўленняў у фізіцы, якія да 1925—1928 гг. ператварыліся ў стройную і лагічную квантавую тэорыю, што адкрыла «новую эру» ў развіцці фізікі.

► У 1898 г. нямецкі фізік Філіп Ленард і англійскі фізік Джозеф Джон Томсан вызначылі адносіну зараду  $q$  часціцы, якая вылятае з паверхні металу пры фотаэфекце, да яе масы  $m$  (так званы ўдзельны зарад —  $\frac{q}{m}$ ) па яе адхіленні ў электрычным і магнітным палях. Гэтыя вымярэнні далі тое ж значэнне, што і адносіна зараду электрона да яго масы  $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ . Такім чынам, было даказана, што выбіваемыя святлом зараджаныя часціцы — электроны.

Слова «квант» паходзіць ад лац. *quantum* — колькі або як многа. Наогул, гэта слова азначае частку, долю ці непадзельную порцыю. Планк паэтычна назваў новую фундаментальную пастаянную  $h$  — «таямнічым амбасадарам з рэальнага свету».

▶ За працы па вызначэнні ўдзельнага зараду электрона  $\frac{e}{m}$ , якія прывялі да адкрыцця першай элементарнай часціцы — электрона, Дж. Томсан у 1906 г. быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы.

У 1918 г. Макс Планк быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы «...у знак прызнання паслуг, якія ён аказаў фізіцы сваім адкрыццём квантаў энергіі».



1. У чым заключаецца сутнасць з'явы знешняга фотаэфекту? Унутранага фотаэфекту?
2. Калі і кім была адкрыта з'ява знешняга фотаэфекту?
3. Намалюйце схему эксперыментальнай устаноўкі Сталетава і растлумачце сутнасць зробленых ім эксперыментаў.
4. Растлумачце асаблівасці вольт-ампернай характарыстыкі фотаэфекту.
5. Сфармулюйце эксперыментальныя законы фотаэфекту. Якія з іх немагчыма растлумачыць з пункту гледжання хвалевай тэорыі святла?
6. У чым заключаецца гіпотэза Планка?
7. Запішыце прыбліжанае значэнне пастаяннай Планка.



## § 28. Фатон. Ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту

- Вывучэнне законаў фотаэфекту прывяло вучоных да нечаканай высновы: пры ўзаемадзеянні з рэчывам (паглынаны ці выпраменьваны) святло паводзіць сябе падобна часціцам, якія рухаюцца (квантам). Што гэта за часціцы? Якія іх уласцівасці і як яны звязаны з хвалевымі характарыстыкамі святла?



Электрон-вольт — энергія, якую набывае часціца з зарадам, роўным элементарнаму, пры перамяшчэнні паміж двума пунктамі з паскараючай рознасцю патэнцыялаў 1 В ( $1,0 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Развіваючы ідэі М. Планка, А. Эйнштэйн у 1905 г. для тлумачэння эксперыментальных законаў знешняга фотаэфекту прапанаваў гіпотэзу аб дыскрэтнасці самога электрамагнітнага выпраменьвання — святло выпраменьваецца, паглынаецца і распаўсюджваецца ў выглядзе асобных порцый (квантаў). Ён разгледзеў элементарныя працэсы паглынання і выпускання гэтых квантаў.