

▶ 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.

Паводле гіпотэзы Эйнштэйна монахраматычнае электрамагнітнае выпраменьванне частатой  $\nu$  мае не толькі хвалевыя ўласцівасці, але і ўласцівасці, характэрныя для патоку часціц. Кожная такая часціца рухаецца са скорасцю святла  $c$  і нясе квант энергіі  $E = h\nu$ . Назваць гэтыя часціцы **фатонамі** прапанаваў у 1928 г. амерыканскі фізік Артур Комптан.

Энергія фатона можа быць выражана праз даўжыню хвалі  $\lambda$ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$



Маса фатона, які рухаецца са скорасцю святла ў вакууме, роўна нулю. Такім чынам, фатон — дзіўная часціца, якая мае энергію  $E = h\nu$ , імпульс  $\vec{p}$ . З прычыны таго што скорасць фатона роўна скорасці святла ў вакууме, яго маса роўна нулю ( $m = 0$ ). Такія часціцы называюць *бязмасавымі*.

Фатон з'яўляецца элементарнай часціцай, толькі ў адрозненне ад іншых элементарных часціц ён не мае масы, а таму «вымушаны» заўсёды рухацца са скорасцю распаўсюджвання святла.

Такім чынам, фатон мае наступныя ўласцівасці:

- існуе толькі ў руху;
- з'яўляецца бязмасавай часціцай ( $m = 0$ );
- электрычна нейтральны ( $q = 0$ );
- скорасць яго руху роўна скорасці распаўсюджвання святла ў вакууме ( $v = c$ ) ва ўсіх ІСА;
- энергія фатона прапарцыянальна частаце адпаведнага электрамагнітнага выпраменьвання ( $E = h\nu$ ).



Разгледзім тлумачэнне эксперыментальных законаў фотаэфекту, прапанаванае Эйнштэйнам на падставе квантавых уяўленняў. Пры асвятленні электрода электрамагнітным выпраменьваннем (гл. мал. 171) адбываецца ўзаемадзеянне фатонаў з электронамі рэчыва. Калі энергія фатона  $E = h\nu$  досыць вялікая, то які-небудзь з электронаў пасля паглынання фатона можа атрымаць энергію, дастатковую для таго, каб пакінуць апраменьваемы ўзор. Электроны, якія пакінулі ўзор, маюць некаторую скорасць, таму нават пры адсутнасці напружання паміж электродамі сіла фотатоку не роўна нулю. Менавіта таму вольт-амперная характарыстыка фотаэфекту пры напружанні, роўным нулю, не праходзіць праз нуль (гл. мал. 172, в).

Для таго каб пакінуць рэчыва, электрон павінен выканаць работу супраць сіл узаемадзеяння электрона з атамамі рэчыва. Такім чынам,

мінімальная энергія, неабходная для выбывання электрона з паверхні рэчыва, называецца **работай выхаду** і абазначаецца  $A_{\text{вых}}$  ( $A_{\text{вых}} > 0$ ). Для металаў гэта работа звязана з пераадоленнем сіл узаемадзеяння электронаў з дадатна зараджанымі іонамі крышталічнай рашоткі, якія ўтрымліваюць электрон у рэчыве. Работа выхаду для металаў звычайна складае некалькі электрон-вольт (табл. 9).

Табліца 9. Фотаэлектрычныя характарыстыкі некаторых рэчываў

Рэчыва	$A_{\text{вых}}$ , эВ	$\nu_{\text{мін}} \cdot 10^{-14}$ Гц	$\lambda_{\text{к}}$ , нм
Цэзій	1,9	4,6	650
Калій	2,2	5,3	560
Натрый	2,3	5,6	540
Кальцый	2,7	6,5	460
Цынк	3,7	8,9	340
Серабро	4,3	10	260
Вальфрам	4,5	11	280
Нікель	5,0	12	250
Плаціна	5,3	13	230

Астатняя частка энергіі паглынутага кванта складае кінетычную энергію электрона, які вызваліўся. Найбольшую кінетычную энергію  $\frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2}$  будуць мець тыя электроны, якія паглынуць кванты святла паблізу ад паверхні металу і выляцяць з яго, не паспеўшы згубіць энергію пры сутыкненнях з іншымі часціцамі ў метале.

На падставе закону захавання энергіі можна запісаць наступнае ўраўненне для фотаэлектрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (2)$$

Гэту суадносіну называюць **ураўненнем Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту**.

Адзначым, што  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = E_{\text{к}}^{\max}$  — гэта максімальная кінетычная энергія электрона ( $v_{\max} \ll c$ ), якую ён можа мець, вылецеўшы з рэчыва. З-за розных страт кінетычная энергія электрона будзе меншай за разліковае значэнне.

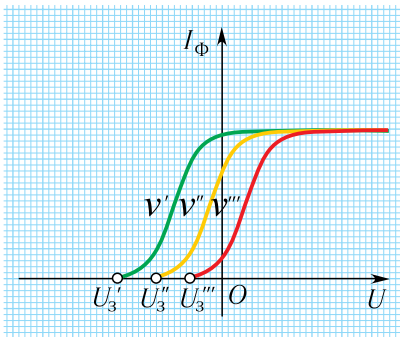


Выкарыстаўшы ўраўненне Эйнштэйна, можна растлумачыць эксперыментальныя законы фотаэфекту.

**Тлумачэнне першага закону фотаэфекту.** Сіла фотатоку насычэння прапарцыянальна агульнаму ліку фотаэлектронаў, якія пакідаюць паверхню металу за адзінку часу. Лік такіх фотаэлектронаў, у сваю чаргу, прапарцыянальны ліку фатонаў, якія падаюць на паверхню за гэты ж час. Менавіта прапарцыянальна, а не роўна, паколькі частка квантаў святла паглынаецца крышталічнай рашоткай, і іх энергія пераходзіць ва ўнутраную энергію металу. Такім чынам, павелічэнне інтэнсіўнасці падаючага святла прыводзіць да росту ліку фотаэлектронаў, якія пакідаюць паверхню металу.

**Тлумачэнне другога закону фотаэфекту.** Фотаэлектрон вырываецца з катода за кошт дзєяння аднаго кванта падаючага выпраменьвання. Таму кінетычная энергія фотаэлектрона залежыць не ад поўнай энергіі хвалі, а ад энергіі аднаго кванта, г. зн. частаты  $\nu$ . Пры павелічэнні частаты  $\nu$  падаючага святла максімальная кінетычная энергія  $E_{\text{к}}^{\max}$  фотаэлектронаў нарастае лінейна, як вынікае з ураўнення Эйнштэйна для фотаэфекту (2), згодна з суадносінай:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (3)$$



Мал. 176. Вольт-амперныя характарыстыкі знешняга фотаэфекту пры розных частотах падаючага выпраменьвання ( $\nu' > \nu'' > \nu'''$ )

Вядома, што фотатокам можна кіраваць, падаючы на металічныя пласціны розныя напружанні. Калі на сістэму падаць невялікае напружанне адваротнай палярнасці, якое «абцяжарвае» вылет электронаў, то сіла току паменшыцца, паколькі цяпер фотаэлектронам, акрамя работы выхаду, прыйдзеца выконваць дадатковую работу супраць сіл электрычнага поля.

Пры некаторым адмоўным значэнні напружання  $U_3$  электроны затарможваюцца і, не дасягнуўшы паверхні анода, вяртаюцца на катод. Сіла току ў ланцугу

пры гэтым будзе роўна нулю (мал. 176). Велічыню  $U_3$ , пры якой сіла току ў ланцугу роўна нулю, называюць *затрымліваючым напружаннем*. Такім чынам, уся кінетычная энергія электронаў затрачваецца на работу супраць сіл электрычнага поля. Пры гэтым максімальная кінетычная энергія электронаў выражаецца праз затрымліваючае напружанне наступным чынам:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = eU_3. \quad (4)$$

**Тлумачэнне трэцяга закону фотаэфекту.** Калі частата  $\nu$  падаючага выпраменьвання меншая за гранічную частату  $\nu_{\text{min}}$  ( $\nu < \nu_{\text{min}}$ ), пры якой  $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$ , то выпусканне электронаў не адбываецца ( $\nu_{\text{max}} = 0$ ). Такім чынам, фотаэфект адсутнічае, калі частата выпраменьвання аказваецца меншай за некаторую характэрную для дадзенага рэчыва велічыню  $\nu_{\text{min}}$ .

Значыць, **чырвоную мяжу фотаэфекту** можна знайсці з умовы:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (5)$$

Яна залежыць толькі ад работы выхаду электронаў, г. зн. вызначаецца будовай металу і станам яго паверхні.

Даўжыня хвалі  $\lambda_{\text{ч}}$  выпраменьвання, якая адпавядае чырвонай мяжы фотаэфекту, можа быць вызначана з суадносіны:

$$\lambda_{\text{ч}} = \frac{c}{\nu_{\text{min}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}. \quad (6)$$



► Са з'яўленнем магутных монахраматычных крыніц святла (лазераў) стала магчымым назіраць працэсы шматфатоннага паглынання. У такіх працэсах, перш чым пакінуць рэчыва, электрон можа паглынуць не адзін, а некалькі фатонаў. Таму ўраўненне Эйнштэйна для шматфатоннага фотаэфекту запішацца ў выглядзе:

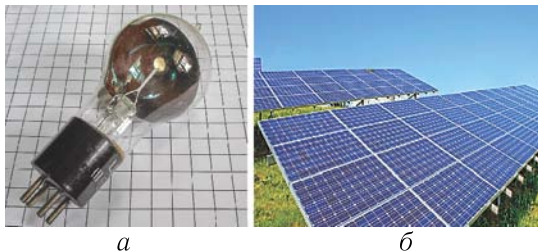
$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = Nh\nu - A_{\text{вых}},$$

дзе  $N$  — лік фатонаў, за кошт паглынання якіх вылецеў электрон.

Значыць, для шматфатоннага фотаэфекту частата чырвонай мяжы памяншаецца ў  $N$  разоў, а адпаведная ёй даўжыня хвалі ў  $N$  разоў павялічваецца:

$$(\nu_{\text{min}})_N = \frac{A}{Nh}.$$

У наш час цяжка ўявіць сабе сучасную навуку і тэхніку без выкарыстання прылад (прыёмнікаў выпраменьвання), якія пераўтвараюць



Мал. 177. Фотаэлемент: *а* — вакуумны (газанапоўнены); *б* — паўправадніковы

светлавых сігналаў ў электрычных прыладах называюцца *фотаэлементамі* (мал. 177).

Фотаэлементы выкарыстоўваюцца для кантролю пасажырапатоку ў метро, для ўключэння і выключэння асвятлення на вуліцах, для кіравання вытворчымі працэсамі, у ваеннай тэхніцы: у саманаводных снарадах, для сігналізацыі і лакацыі.

Інфрачырвоныя фотаэлементы шырока выкарыстоўваюцца ў пультах дыстанцыйнага кіравання рознымі бытавымі электроннымі прыборамі (тэлевізар, кандыцыянер і г. д.).

► У 1921 г. пры прысуджэнні Альберту Эйнштэйну Нобелеўскай прэміі па фізіцы ў рашэнні Нобелеўскага камітэта падкрэслівалася, што «прэміяй асабліва адзначаецца тлумачэнне законаў фотаэлектрычнага эфекту». Першы фотаэлемент на знешнім фотаэфекце быў створаны Сталетавым у 1888 г.



1. У чым сутнасць гіпотэзы Эйнштэйна?
2. Што называецца фатоном? Перапішыце асноўныя ўласцівасці фатона.
3. Па якой формуле можна вызначыць энергію фатона?
4. Запішыце ўраўненне Эйнштэйна для фотаэфекту і назаўважце ўсе фізічныя велічыні, якія ўваходзяць у яго.
5. Пакажыце, што ўраўненне Эйнштэйна для фотаэфекту з'яўляецца вынікам закону захавання і ператварэння энергіі.
6. Перапішыце ўмовы, неабходныя для ўзнікнення фотаэфекту.
7. Што такое затрымліваючае напружанне?
8. Што называецца чырвонай мяжой фотаэфекту? Ад чаго яна залежыць?
9. Як квантавая тэорыя тлумачыць існаванне гранічнай частаты фотаэфекту? Запішыце формулу для чырвонай мяжы фотаэфекту.
10. Растворыце законы фотаэфекту зыходзячы з квантавай тэорыі святла.
11. Чаму энергія фотаэлектронаў для дадзенага рэчыва вызначаецца толькі частатой падаючага святла?

### Прыклады рашэння задач

1. Монахраматычнае святло даўжынёй хвалі  $\lambda = 450$  нм падае на паверхню натрыю. Вызначыце: а) энергію  $E$  фатона гэтага святла; б) мо-

дзель імпульсу  $p$  фатона падаючага святла; в) чырвоную мяжу  $v_{\min}$  фотаэфекту для натрыю; г) максімальную кінетычную энергію  $E_{\text{к}}^{\max}$  фотаэлектронаў.

Дадзена:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

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

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

$$E \text{ — ? } p \text{ — ? } v_{\min} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{к}}^{\max} \text{ — ?}$$

Рашэнне

а) Энергія фатона:

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

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}}$$

$$= 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,8 \text{ эВ.}$$

б) Модуль імпульсу фатона:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Чырвоная мяжа звязана з работай выхаду суадноснай:

$$v_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad v_{\min} = \frac{3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

г) З ураўнення Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту знаходзім, што максімальная кінетычная энергія электрона, што вылецеў:

$$E_{\text{к}}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}, \quad E_{\text{к}}^{\max} = 2,8 \text{ эВ} - 2,3 \text{ эВ} = 0,50 \text{ эВ.}$$

Адказ: а)  $E = 2,8 \text{ эВ}$ ; б)  $p = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ; в)  $v_{\min} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ; г)  $E_{\text{к}}^{\max} = 0,50 \text{ эВ}$ .

2. Пад дзеяннем святла даўжынёй хвалі  $\lambda = 400 \text{ нм}$  з паверхні металу вылятаюць электроны, пры гэтым іх энергія роўна палове энергіі фатонаў, што выклікаюць фотаэфект. Вызначыце даўжыню хвалі  $\lambda_{\text{ч}}$ , якая адпавядае чырвонай мяжы фотаэфекту.

Дадзена:

$$\lambda = 400 \text{ нм} = 4,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

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

$$\lambda_{\text{ч}} \text{ — ?}$$

Рашэнне

Запішам ураўненне Эйнштэйна для фотаэфекту:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Чырвоную мяжу фотаэфекту вызначым з суадносiны:

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{min}}.$$

Па ўмове задачы:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{h\nu}{2}.$$

Тады  $h\nu = h\nu_{\text{min}} + \frac{h\nu}{2}$ , адкуль вынікае, што  $\nu_{\text{min}} = \frac{\nu}{2}$ .

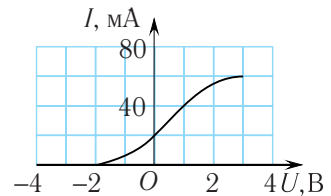
Паколькі даўжыня хвалі  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , то

$$\lambda_{\text{ч}} = 2\lambda, \quad \lambda_{\text{к}} = 2 \cdot 400 \text{ нм} = 800 \text{ нм}.$$

Адказ:  $\lambda_{\text{ч}} = 800 \text{ нм}$ .

### Практыкаванне 19

1. Вызначыце энергію  $E$  фатона для выпраменьвання частотой  $\nu = 5,4 \cdot 10^{14}$  Гц.
2. Вылічыце энергію  $E_1$  фатона бачнага святла даўжынёй хвалі  $\lambda_1 = 0,60$  мкм і параўнайце яе з энергіямі фатонаў ультрафіялетавага выпраменьвання даўжынёй хвалі  $\lambda_2 = 0,252$  мкм, рэнтгенаўскага выпраменьвання  $\lambda_3 = 0,10$  нкм і  $\lambda$ -выпраменьвання  $\lambda_4 = 0,10$  пм.
3. Вызначыце чырвоную мяжу  $\nu_{\text{min}}$  фотаэфекту для некаторага металу, калі работа выхаду электрона з яго  $A_{\text{вых}} = 3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж.
4. Вызначыце даўжыню хвалі  $\lambda$  ультрафіялетавага выпраменьвання, падаючага на паверхню цынку, пры якой модуль максімальнай скорасці вылятаючых фотаэлектронаў складае  $v_{\text{max}} = 800 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .
5. Вызначыце работу выхаду  $A_{\text{вых}}$  электрона з катода, выкарыстаўшы вольт-амперную характарыстыку вакуумнага фотаэлемента (мал. 178). Катод асвятляецца святлом з даўжынёй хвалі  $\lambda = 200$  нм. Знайдзіце лік  $N$  электронаў, выбіваемых з фотакатода за адзінку часу.
6. Вызначыце колькасць  $N$  фатонаў з частотой  $\nu = 9,5 \cdot 10^{12}$  Гц, якая змяшчаецца ў імпульсе выпраменьвання з энергіяй  $E = 8,8 \cdot 10^{-18}$  Дж.
7. Вызначыце максімальную кінетычную энергію  $E_{\text{к}}^{\text{max}}$  і модуль максімальнай скорасці  $v_{\text{max}}$  фотаэлектрона, што вылецеў з натрыю пры



Мал. 178



апраменьванні яго ультрафіялетавым выпраменьваннем даўжынёй хвалі  $\lambda = 200$  нм.

8. На металічную пласціну падае монахраматычнае святло даўжынёй хвалі  $\lambda = 413$  нм. Вызначыце работу выхаду  $A_{\text{вых}}$  (эВ), калі затрымліваючае напружанне  $U_3 = 1,0$  В.



§28-1

## § 29. Ціск святла. Карпускулярна-хвалевы дуалізм

Слоўца гучнае заўсёды  
З цяжкасці вас выводзіць!

*І. Гётэ. Фауст*

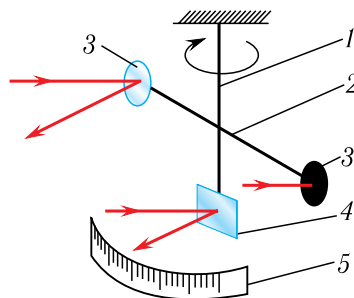
- Пасля адкрыцця фатона ў навуковым свеце з новай сілай «успыхнула» старая дыскусія: так што ж такое святло — хваля ці паток часціц? Як «пагадніць» адно з адным гэтыя супярэчлівыя ўяўленні? Якія з гэтага вынікаюць высновы?



Ціскам называецца скалярная фізічная велічыня, лікава роўная адносіне модуля сілы, якая дзейнічае па нармалі да плошчы, да яе плошчы  $p = \frac{F}{S}$ . У СІ адзінкай ціску з'яўляецца паскаль (Па):  $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$ .

З законаў механікі вынікае, што цела пры ўдары аб некаторую паверхню аказвае на яе механічны ціск, абумоўлены змяненнем імпульсу цела. Прычым ціск цела на паверхню аказваецца ў выпадку як пружкага, так і няпружкага ўдару. А ці будзе ўзнікаць падобны эффект пры адбіцці і паглыннанні святла некаторай паверхняй? Інакш кажучы, ці аказвае святло ціск на паверхню, з якой узаемадзейнічае? Пасля завяршэння пабудовы Максвелам хвалевай тэорыі святла адказы на гэтыя пытанні сталі відавочнымі. Святло як электрамагнітная хваля мае энергію і імпульс, таму аказвае ціск на паверхню, на якую яно падае.

Рускі фізік Пётр Мікалаевіч Лебедзеў у 1899 г. упершыню вымераў светлавы ціск. Ён падвесіў на тонкай нітцы каромысел з парай крыльцаў на канцах (мал. 179): паверхня ў аднаго з іх была зачэрненай, забяспечваючы амаль поўнае паглыннанне, а ў другога — лю-



Мал. 179. Схема доследу Лебедзева: 1 — падвес; 2 — каромысел; 3 — крыльцы; 4 — люстра; 5 — шкала



страной, забяспечваючы поўнае адбіццё. Падвес з крыльцамі ўтварыў адчувальныя круцільныя вагі, змешчаныя ў пасудзіну, паветра ў якой было адпампавана.

Святло практычна цалкам адбівалася ад люстраной паверхні, і яго ціск на люстраное крыльца быў удвая большы, чым на зачэрненае. З прычыны гэтага ствараўся момант сіл, які паварочваў каромысел (гл. мал. 179). Вымяраючы вугал павароту каромысла, можна было меркаваць аб сіле, якая дзейнічала на крылцы, а такім чынам, вызначыць светлавы ціск.



Факт існавання светлагага ціску мае вялікае значэнне, паколькі даказвае наяўнасць у святла не толькі энергіі, але і імпульсу. Гэта сведчыць аб матэрыяльнасці электрамагнітнага выпраменьвання, якое ўяўляе сабой яшчэ адну форму існавання матэрыі — у выглядзе электрамагнітнага поля.

Да таго ж з часоў І. Ньютана і Х. Гюйгенса (XVII ст.) уяўленні аб прыродзе святла былі супярэчлівыя. Адны вучоныя на чале з Ньютанам лічылі святло патокам часціц — карпускул (ад лац. *corpusculum* — маленькая часціца), іншыя следам за Гюйгенсам меркавалі, што святло ўяўляе сабой не што іншае, як хвалі.

Да пачатку XIX ст. абодва пункты гледжання адстойваліся са зменным поспехам. Так, зыходзячы з гіпотэзы аб карпускулах, можна было растлумачыць законы прамалінейнага распаўсюджвання і адбіцця святла, а такія з’явы, як інтэрферэнцыя, дыфракцыя святла, тлумачыліся толькі яго хвалевымі ўласцівасцямі.

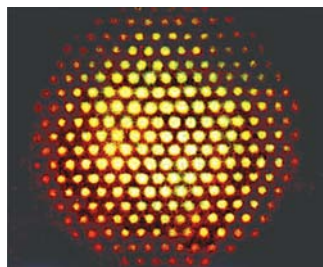
Аднак у XX ст. было вызначана, што ў цэлым шэрагу з’яў, такіх, напрыклад, як фотаэфект, святло паводзіць сябе як сукупнасць часціц з пэўнай энергіяй і імпульсам. Адначасовая наяўнасць у аб’екта хвалевых і карпускулярных уласцівасцей атрымала назву **карпускулярна-хвалевага дуалізму**.

У адных працэсах у большай меры праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла, у іншых — карпускулярныя. Доўгі час прырода гэтага дуалізму была зусім незразумелай, і ён здаваўся штучным аб’яднаннем супярэчлівых уласцівасцей матэрыі.

Толькі пасля стварэння квантавай механікі высветлілася, што «раздвойванне асобы» святла заканамерна і ўяўляе сабой праяву спецыфічных уласцівасцей, характэрных мікрасвету ў цэлым.

Французскі фізік Луі дэ Бройль у 1923 г. выказаў адважную здагадку, што карпускулярна-хвалевы дуалізм павінен мець месца для ўсіх мікрааб’ектаў.

У 1927 г. гіпотэза дэ Бройля аб наяўнасці хвалевых уласцівасцей у электрона і іншых мікрачасціц была правярана эксперыментальна, калі амерыканскія фізікі Клінтан Дэвісан і Люстэр Джэрмер упершыню назіралі дыфракцыю электронаў на крышталі нікелю. На малюнку 180 прадстаўлена сучасная фатаграфія дыфракцыі электронаў на слюдзе.



Мал. 180. Карціна дыфракцыі электронаў на слюдзе

Сучасныя эксперыменты дазваляюць паслядоўна назіраць працэс утварэння дыфракцыйнай карціны пры павелічэнні ліку электронаў, якія праходзяць праз шчыліну. Камп'ютарнае мадэляванне гэтага працэсу прадстаўлена на малюнку 181. З яго відаць, што пры павелічэнні ліку электронаў усё больш выразна фарміруюцца дыфракцыйныя максімумы (гл. мал. 181, в).



Мал. 181. Вынікі камп'ютарнага мадэлявання з'явы дыфракцыі  $N$  электронаў на дзвюх шчылінах:  $a - N = 27$ ;  $b - N = 70$ ;  $v - N = 735$

Здольнасць да інтэрферэнцыі і дыфракцыі была выяўлена не толькі ў электронаў, але і ў іншых часціц — пратонаў, нейтронаў і альфа-часціц.

Хвалевыя ўласцівасці часціц знайшлі сваё прымяненне ў электроннай оптыцы, якая займаецца даследаваннем, пабудовай і выкарыстаннем электронных пучкоў для атрымання відаарысаў.

Так выкарыстанне хвалевых уласцівасцей пучка электронаў дазволіла стварыць новае пакаленне мікраскопаў — электронныя мікраскопы (мал. 182), якія значна перавышаюць па ступені павелічэння аптычныя мікраскопы.

Такім чынам, карпускулярна-хвалевы дуалізм уласцівы не толькі святлу, але і любым часціцам. У адпаведнасці з ім выкарыстоўваюцца як хвалевыя, так і карпускулярныя ўяўленні, у залежнасці ад пэўнай сітуацыі.



Мал. 182. Электронны мікраскоп

► Нягледзячы на параўнальна малое значэнне светлавога ціску пры звычайных умовах, ён адыгрывае істотную ролю ў прыродзе. У 1604 г. нямецкі астраном Іаган Кеплер растлумачыў выгнутую форму хваста каметы (мал. 183) дзеяннем сіл светлавога ціску з боку Сонца (мал. 184). Акрамя таго, менавіта ціск святла «знутры» перашкоджвае гравітацыйнаму сцісканню зорак, ён скарачае тэрмін службы штучных спадарожнікаў Зямлі з прычыны паступовага памяншэння радыусу іх арбіты.



Мал. 183. Камета Галей



Мал. 184. Рух каметы вакол Сонца (хвост каметы заўсёды накіраваны ад Сонца)

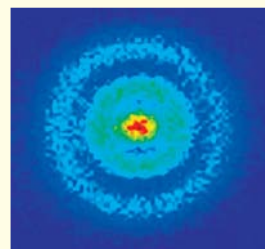
У наш час актыўна абмяркоўваюцца і рэалізуюцца праекты касмічных караблёў — «паруснікаў», якія рухаюцца дзякуючы «сонечнаму ветру». Ужо першы электронны прасвечваючы мікраскоп (Э. Руска, 1933 г.) дазваляў вывучаць дэталі, у дзесяць разоў драбнейшыя, чым тыя, якія можна было адрозніваць праз самыя «магутныя» аптычныя мікраскопы. Далейшыя даследаванні дазволілі супрацоўнікам лабараторыі фірмы ІВМ у Цурыху (Швейцарыя) Г. Бінінгу і Г. Рорэру ў 1981 г. стварыць электронны сканіруючы тунельны мікраскоп, які дазваляе разгледзець нават «асобны» атам.

Група спецыялістаў Такійскага ўніверсітэта 4 лістапада 2010 г. упершыню ў гісторыі пры дапамозе электроннага мікраскопа здолела «сфатаграфваць» самы лёгкі і самы маленькі атам — атам вадароду (мал. 185).



У 1929 г. Луі дэ Бройль за адкрыццё хвалевай прыроды электрона быў узнагароджаны Нобелеўскай прэміяй па фізіцы.

У 1986 г. Герду Бінінгу і Генрыху Рорэру разам з Эрнстам Руска была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за стварэнне электроннага мікраскопа.



Мал. 185. «Фатаграфія» атама вадароду



1. Як электрамагнітная тэорыя тлумачыць ціск святла?
2. Апішыце сутнасць эксперыменту Лебедзева па вымярэнні светлагага ціску.
3. У чым заключаецца карпускулярна-хвалевы дуалізм святла? Пералічыце з'явы, у якіх праяўляюцца хвалевыя ўласцівасці святла; карпускулярныя (квантавыя) уласцівасці святла.



## САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 5

Энергія вагальнай сістэмы, якая выконвае гарманічныя ваганні з частатой  $\nu$ , можа, згодна з гіпотэзай Планка, прымаць толькі пэўныя дыскрэтныя значэнні, якія адрозніваюцца на цэлы лік элементарных порцый — **квантаў энергіі**.

Эйнштэйн развіў гіпотэзу Планка, мяркуючы, што святло выпраменьваецца, паглынаецца і распаўсюджваецца ў выглядзе асобных порцый (квантаў).

Найменшая порцыя (**квант**) энергіі, якую нясе выпраменьванне частатой  $\nu$ , вызначаецца па формуле:

$$E = h\nu,$$

дзе пастаянная  $h$  — фундаментальная пастаянная — **пастаянная Планка**. Яе прыбліжанае значэнне:

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

З'ява выпускання электронаў рэчывам пад дзеяннем падаючага на яго святла атрымала назву **знешняга фотаэфекту**. Выпусканне рэчывам якіх-небудзь часціц называецца **эмісіяй**. Таму знешні фотаэфект называюць таксама **фотаэлектроннай эмісіяй (фотаэмісіяй)**, а вылятаючыя электроны — **фотаэлектронамі**.

Эксперыментальна ўстаноўлены наступныя законы **знешняга фотаэфекту**:

1. Сіла фотатоку насычэння  $I_n$  прама прапарцыянальна інтэнсіўнасці  $I$  падаючага выпраменьвання.

2. Максімальная кінетычная энергія  $E_k^{\max}$  фотаэлектронаў не залежыць ад інтэнсіўнасці  $I$  падаючага выпраменьвання і лінейна нарастае з павелічэннем частаты  $\nu$  падаючага выпраменьвання.

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

**Формула Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту:**

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

**Чырвоная мяжа** фотаэфекту — найменшая частата выпраменьвання, пры якой назіраецца фотаэфект:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h},$$

залежыць толькі ад работы выхаду электронаў для дадзенага рэчыва ( $A_{\text{вых}} > 0$ ), г. зн. вызначаецца хімічнай прыродай рэчыва і станам яго паверхні.



Пад **карпускулярна-хвалевым дуалізмам** разумеюць той факт, што ўсе аб'екты ў прыродзе маюць як хвалевыя, так і карпускулярныя ўласцівасці. У адных умовах у большай меры праяўляюцца хвалевыя, у іншых — карпускулярныя ўласцівасці аб'ектаў.

### **Заданні для самастойных даследаванняў**

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (Г. Герц, А. Г. Сталетаў, М. Планк, П. М. Лебедзеў, Луі дэ Бройль).

2. Падрыхтуйце рэфераты на тэмы: «Выкарыстанне фотаэлементаў у сонечных батарэях, для сігналацыі і лакацыі, для кіравання вытворчымі працэсамі».