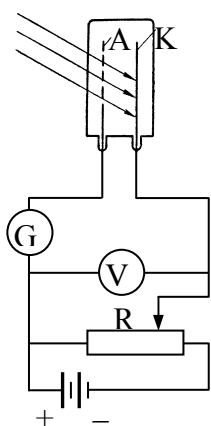


# Външен фотоелектричен ефект. Закони при фотоэффекта. Уравнение на Айнщайн и квантово обяснение на законите

## Външен фотоелектричен ефект. Закони при фотоэффекта

Явлението фотоелектричен ефект (фотоэффект) е наблюдавано за пръв път от немския физик Херц, който експериментално установява и съществуването на електромагнитните вълни, предсказани от Максвел. Опитите на физиците да се обясни това явление чрез електромагнитната теория на Максвел не дават резултат. Отново възниква необходимостта от развиване на нови идеи във физиката, които да допълнят съществуващите представи за електромагнитните вълни. На основата на квантовата хипотеза на Планк Айнщайн развива квантовата теория на фотоэффекта, с която блестящо обяснява това явление и получава Нобелова награда.

Фотоелектричният ефект е процес на взаимодействие между светлината (електромагнитните вълни) и веществото, при който енергията на светлинните кванти (фотони) се предава на електроните на веществото. Съществуват два вида фотоелектричен ефект в твърдите тела: външен фотоэффект, при който поглъщането на фотоните от веществото довежда до отделяне на електрони от повърхността му, и вътрешен фотоэффект, при който се наблюдава увеличаване броя на свободните електрони в облъчваното вещество.



фиг. 1

Руският физик А. Столетов изследва подробно външния фотоэффект и опитно установява основните закони, на които се подчинява това явление. На фиг. 1 е показана опитна постановка, позволяваща да бъдат установени основните закономерности. Върху полирана метална пластинка **К**, наречена фотокатод, пада тесен монохроматичен сноп светлинни лъчи с малка дължина на вълната  $\lambda$  ( $\lambda = \text{const}$ ). Срещу катода се поставя метална мрежа **А**, изпълняваща ролята на анод. Съдът, в който се намират двата електрода, се вакуумира добре и се свързва в електрична верига с източник на електродвижещо напрежение, потенциометър **Р**, волтметър **V** и галванометър **G**. При осветяване на катода **К** във веригата протича електричен ток, регистриран от галванометъра, дори и без да се подава напрежение от източника. Причината за появилия се електричен ток са електрони, които се отделят от повърхността на осветявания катод и се наричат фотоелектрони. Те достигат до анода и броят им (общият заряд, преминал за единица време) определя големината на тока (фототока).

Когато във веригата се приложи ускоряващо напрежение  $U > 0$ , големината на фототока започва да расте и достига определена максимална стойност при някаква стойност на напрежението  $U$ . Този ток се нарича фототок на насищане и съответства на състоянието, когато всички отделени електрони достигат анода. При по-нататъшно увеличаване на напрежението фототокът остава постоянен. Ако увеличаваме интензитета на светлината при постоянна дължина на вълната  $\lambda$ , пропорционално се увеличава както големината на първоначалния фототок, така и на наситения фототок. Този факт показва, че с нарастване на интензитета се увеличава броят на отделените от повърхността на катода електрони. Столетов изследвал волт-амперните характеристики и при приложено обратно напрежение ( $U < 0$ ). Неговата цел била да определи при каква стойност на напрежението фототокът във веригата ще стане равен на нула. При задаване отрицателни стойности на напрежението, електричната сила изпълнява ролята на задържаща (спираща) движението на електроните сила. В този случай електричните сили извършват отрицателна работа, която компенсира кинетичната енергия на електроните, движещи се към анода. Увеличавайки постепенно отрицателните стойности на  $U$ , се стига до някаква определена стойност, при която големината на фототока става равна на нула. Тази стойност на напрежението се нарича задържащо (спирачно) напрежение  $U_{\text{зад}}$ . Работата на електричните сили (25 въпрос, Физика 1) в този момент компенсира кинетичната енергия на най-бързите електрони, като не им позволява да достигнат до анода. Следователно

$$T_{\text{max}} = A_e$$

$$(1) \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = e\Delta\varphi = eU_{\text{зад}}$$

Горната формула показва, че измервайки стойността на приложеното задържащо напрежение във веригата, може да се определи максималната скорост на фотоелектроните (масата  $m$  и електричният заряд  $e$  на електроните са постоянни величини). Оказало се, че за различни стойности на интензитета максималната скорост, с която се отделят електроните от повърхността на катода, е една и съща ( $U_{\text{зад}} = \text{const}$ ). Това показва, че тази скорост не зависи от интензитета на лъчението. Столетов изследвал и

зависимостта между максималната кинетична енергия на фотоелектроните и честотата (дължината на вълната,  $f=c/\lambda$ ) на лъчението, с което се осветява катодът. При различни честоти във веригата били регистрирани различни стойности на първоначалния фототок, обусловен от електроните с максимална скорост. При някаква гранична честота  $f_0$  стойността на фототока ставала нула, т.е. от повърхността на съответния метал на катода не се отделяли електрони. Тази честота  $f_0$ , при която фотоэффект не се наблюдава, е наречена червена граница на фотоэффекта. Измерванията показали, че за различните метали граничната честота е различна (за повечето метали  $f_0$  лежи в областта на ултравиолетовите лъчи). Чрез задаване на различни отрицателни стойности на напрежението бил установен фактът, че максималните скорости на отделените електрони в този случай са различни. На всяка честота съответствала определена стойност на задържащото напрежение, при която фототокът ставал равен на нула. От (1) били определени максималните кинетични енергии за различните честоти. Резултатът бил, че с намаляването на честотата намалява и кинетичната енергия на фотоелектроните. За честоти  $f \leq f_0$  явлението фотоэффект не се наблюдава, т.е.  $T=0$ . При смяна на катода с друг метал се получава аналогичен резултат, но с друга червена граница  $f_0$ .

Обобщавайки данните от направените изследвания, Столетов формулирал следните основни закони при външния фотоэффект:

При монохроматично лъчение ( $f(\lambda)=\text{const}$ ) броят на отделените електрони от повърхността на даден метал за единица време е пропорционален на интензитета на лъчението;

– Кинетичната енергия на отделените електрони зависи линейно от честотата  $f$  на лъчението и не зависи от неговия интензитет;

– За всеки метал съществува т.нар. червена граница на фотоэффекта  $f_0$  ( $\lambda_0$ ) – минимална честота (максимална дължина на вълната) – под (над) която явлението фотоэффект не се наблюдава. Тази граница зависи от химичното естество на метала, който се осветява.

### Уравнение на Айнщайн и квантово обяснение на законите

Опитно установените закони на фотоэффекта не могли да бъдат обяснени с вълновите свойства на електромагнитните вълни. Енергията, която получават при осветяване електроните на метала, зависи от амплитудата на вектора  $\vec{E}$  на вълната. Следователно при всяка честота (или дължина на вълната), ако лъчението има достатъчен интензитет, може да се очаква отделяне на електрони от метала и червена граница не би трябвало да има. Освен това кинетичната енергия на фотоелектроните би трябвало да зависи от интензитета на лъчите, тъй като с неговото увеличаване на електроните се предава по-голяма енергия.

Айнщайн предлага теория за обяснение на фотоэффекта, на базата на предложената по-рано от Планк квантова хипотеза за топлинното излъчване (23 въпрос). Той предполага, че светлината не само се излъчва, но се и поглъща и разпространява във вид на кванти, наречени фотони. В такъв случай интензитетът на светлината може да се разглежда като брой фотони, попадащи върху единица площ за единица време. Енергията на всеки фотон се определя от формулата на Планк  $E=hf$ . Падащите върху повърхността на катода фотони взаимодействат с електроните на метала като частици с частици и им отдават енергията си. Всеки фотон се поглъща от един електрон и ако енергията му е равна или по-голяма от енергията на свързване на електроните в атома за съответния метал, от който е направен катодът, може да предизвика отделяне на електрона от атома. Неговата скорост е различна и зависи от взаимодействията му с други електрони. Ако е отделен от горната повърхност на катода, той ще има определена максимална енергия (тъй като не взаимодейства с други електрони), а ако е отделен от вътрешните слоеве на катода, вследствие на взаимодействие с други електрони от атомите във вътрешността на метала той ще намали скоростта си. В такъв случай, ако енергията, получена от електрона, е  $hf$ , част от нея се изразходва за отделяне на електрона от атома и се нарича отделителна работа ( $A$ ). (Енергията на свързване на електроните в атомите за даден метал се нарича отделителна работа и е различна за различните метали.) Друга част от енергията се губи при удари с други електрони ( $A_1$ ), а останалата част представлява кинетичната енергия на отделения от повърхността на метала електрон. Съгласно закона за запазване на енергията

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = A + A_1 + \frac{mv^2}{2}.$$

Ако електронът не е претърпял удари във вътрешността на метала, е изпълнено  $A_1=0$  и тогава

$$(2) \quad E = hf = \frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Горната формула (2) е предложена от Айнщайн и се нарича уравнение на Айнщайн за външния фотоефект. Съгласно това уравнение енергията на всеки падащ фотон се изразходва за отделяне на един електрон от повърхността на даден метал и за придаването на някаква максимална скорост на този електрон. Колкото повече фотони попадат върху метала, толкова повече фотоелектрони се отделят и толкова по-голяма стойност на фототока във веригата се регистрира, което е в съгласие с първия закон на фотоефекта. Останалите два закона следват непосредствено от уравнението на Айнщайн (2). Тъй като отделителната работа е постоянна величина за всеки метал, с нарастването на честотата  $f$  на падащото лъчение ще расте линейно и максималната кинетичната енергия на фотоелектроните. Обратно, ако честотата на лъчението намалява, при някаква гранична стойност  $f_0$  ( $\lambda_0$ ) енергията на фотона ще бъде по-малка от отделителната работа  $A$  за даденото вещество и  $T_{\max} = 0$  Тогава

$$(3) E = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = A; \quad f_0 = \frac{A}{h}; \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A}.$$

При тази честота (дължина на вълната) няма да има движещи се към анода електрони, т.е. фототок не протича и явлението фотоефект не се наблюдава. Това е червената граница на фотоефекта. В този случай енергията на падащия фотон е равна на отделителната работа и е достатъчна само за отделяне на електрона от повърхността, т.е. придадената скорост е  $v_{\max} = 0$ . Следователно, за да се наблюдава фотоефект за даден метал, е необходимо да бъде изпълнено условието  $E > hf_0$ . От (3) следва още, че червената граница зависи от химичната природа на веществото, от което е направен катодът (отделителната работа е характерна величина за всяко вещество).

Уравнението на Айнщайн може да се запише и в следния вид, като се използва (1):

$$hf = A + eU_{\text{зад}} = hf_0 + eU_{\text{зад}}$$

$$h(f - f_0) = eU_{\text{зад}}.$$

Последният израз дава възможност да се определи експериментално константата на Планк, като се облъчи даден метал с лъчения с известни честоти  $f_0$  и  $f$  и се измери задържащото напрежение във веригата. Получената стойност се съгласува добре с тази, определена от Планк от законите на топлинното излъчване. Този факт е още едно потвърждение за верността на хипотезата на Планк и квантовата теория на Айнщайн.

Външният фотоефект намира многобройни приложения в науката и техниката. В основата им е възможността даден светлинен сигнал да се преобразува в електричен чрез специални фотоелектронни прибори, наречени фотоклетки. Получените електрични сигнали лесно могат да бъдат усилвани чрез други прибори, наречени фотоелектронни умножители, в които заедно с фотоефекта се използва и явлението вторична емисия на електроните.