

Външен фотоелектричен ефект

Проф. П. Райчев

Кл. Тютюлков

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die „schwarze Strahlung“, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

Albert Einstein, 1905

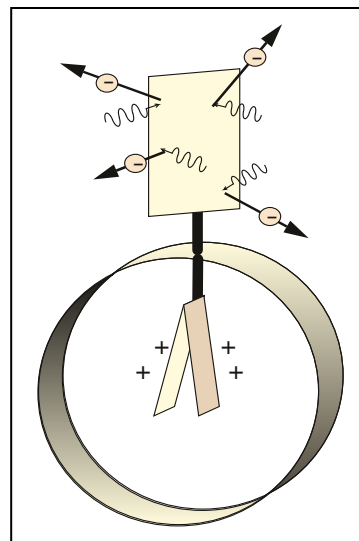
През 1921 г. А. Айнщайн получава нобелова награда за „приноси в теоретичната физика и специално за откриването на закона за фотоелектричния ефект“.

Още в края на 19 в. било установено, че *при осветяване на метални повърхности с ултравиолетова светлина от тях се отделят отрицателни електрични заряди -- електрони*. Това явление било наречено фотоелектричен ефект или по-кратко *фотоефект*.

Откриване на фотоефекта

Фотоелектричен ефект при металите.

Фотоефектът е открит със следния опит (фиг.1) Метална пластинка *N*, свързана с електроскоп *E* се осветява с ултравиолетова светлина. След осветяването се установява, че електроскопът е зареден положително. Този факт може да се обясни, ако се допусне, че под действие на светлината от пластинката се отделят електрони, така че положителните заряди в нея стават повече от отрицателните.

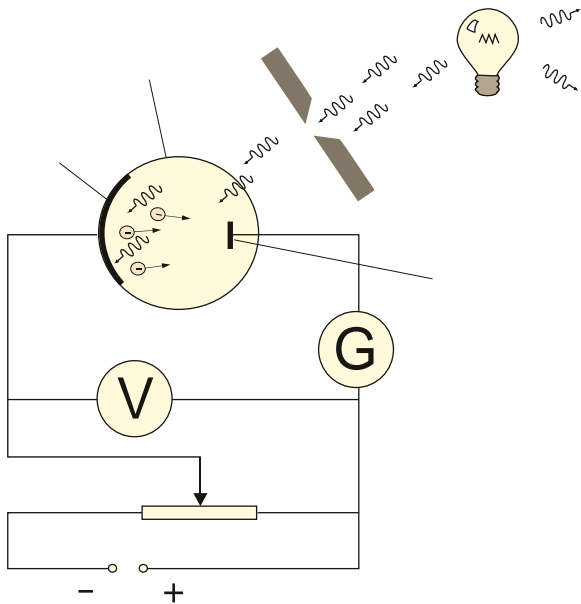


Фиг. 1

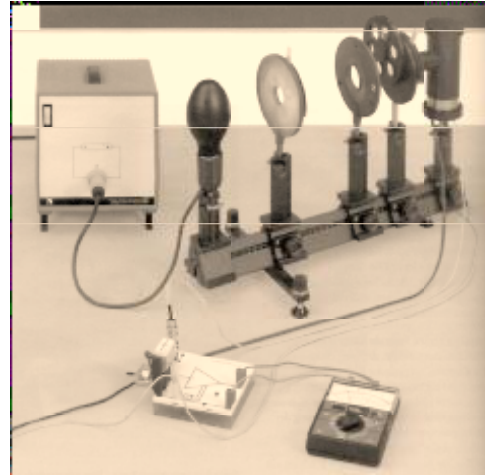
Изследване на фотоефекта

По-обстойно фотоефектът може да се изследва със следния опит (фиг.2а). Една част от вътрешната повърхност на сферичния стъклен балон *C* е метализирана и може да се служи като електрод *K*, наречен фотокатод. Той се свързва с отрицателния полюс на източника. Въздухът от балона се изпомпва, така че да не пречи на движението на електроните. В балона е запоеен малък електрод *A* (колектор), който се използва за втори електрод, свързан с положителния полюс. Повърхността *K* се облъчва с ултравиолетова светлина през кварцовото прозорче. Под действието на светлината от фотокатода се отделят електрони, които достигат до колектора *A*. С това токовата верига се затваря и през галванометъра *G* протича ток. Колкото повече електрони се избиват от фотокатода, толкова по-силен ще

бъде токът през галванометъра. Поради това отчетената от галванометъра **G** големина на тока е мярка за броя на избитите от катода фотоелектрони.



фиг. 2а



фиг. 2б – лабораторна опитна постановка

Изменяйки интензитета и честотата на светлината, ние можем да изследваме зависимостта между броя на избитите фотоелектрони и величините, които характеризират облъчващата светлина – нейния интензитет I и честота ω .

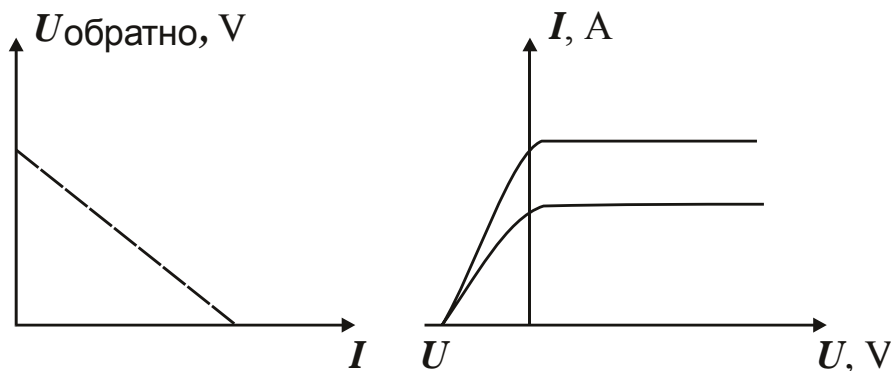
Описаният опит позволява да се измери и енергията на фотоелектроните. Ако сменим полярността на батерията и заредим колектора **A** отрицателно спрямо **K**, създаденото електрично поле ще се стреми да спре електроните и да ги върне в обратна посока. Нека означим разликата в потенциалите между **K** и **A** с U . Тогава, ако e е зарядът на електрона, eU ще бъде работата, която трябва да се извърши, за да се премести електронът от електрода **A** до електрода **K**. Очевидно електроните ще достигат до електрода и през галванометъра ще протича ток, само ако тяхната кинетична енергия е достатъчна за извършването на тази работа, т.е. ако кинетичната енергия е по-голяма или равна на eU :

$$\frac{mv^2}{2} \geq eU \quad (1)$$

Ако постепенно увеличаваме потенциалната разлика U , ще достигнем до една критична стойност U_c , от която нататък неравенството (1) вече няма да се изпълнява, т.е. няма да има електрони с достатъчно голяма кинетична енергия и токът през галванометъра ще стане равен на нула. Очевидно максималната кинетична енергия на електроните ще бъде:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU$$

С подобни опити може да се определи как максималната енергия на избитите фотоелектрони зависи от интензитета и честотата на светлината, осветяваща фотокатода.



- а. кинетична енергия на фотоелектроните – колкото е по-висока честотата на светлината, толкова по-голямо обратно напрежение трябва да се приложи, за да се спрат и най-бързите фотоелектрони
- б. волтамперна характеристика на фотоелемент

Закони при фотоефекта.

Многобройни опити доказали, че за фотоелектричен ефект предизвикан от монохроматична светлина са валидни следните закономерности:

1. Броят на избитите фотоелектрони зависи единствено от интензитета I на облъчващата светлина и въобще не зависи от нейната честота ω (припомняме, че $\omega = 2\pi\nu$).
2. Фотоефект се наблюдава само, ако честотата на светлината ω е по-голяма от една гранична честота ω_0 , т.е. ако е изпълнено условието $\omega \geq \omega_0$. Граничната честота е различна за различните метали.
3. Енергията на избитите електрони не зависи от интензитета на светлината, а се определя изключително от нейната честота. Енергията на фотоелектроните E_k е право пропорционална на честотата на светлината.
4. Отделянето на електроните започва веднага след облъчването на пластинката със светлина. Съвременните измервания показват, че дори и електроните да закъсняват спрямо началото на облъчването, това закъснение е не по-голямо от 10^{-8} s.

Тези закони показват, че енергията на електроните отделени под въздействието на прожектор, светещ с червена светлина ще бъде по-малка от енергията на електроните, отделени от светлината на едно джобно фенерче светещо със синя светлина. (Честотата на червената светлина е по-малка от тази на синята.) Съгласно първия закон за фотоефекта обаче, прожекторът ще предизвика отделянето на много по-голям брой електрони, отколкото фенерчето, понеже светлината му има по-голям интензитет.

Изброените по-горе закони не могат да се обяснят от гледна точка на схващането, че светлината е електромагнитна вълна и налагат една съществена корекция на нашите схващания за природата на светлината.

Въпроси и задачи:

1. Кои са закономерностите при фотоефекта?
2. От какво зависи енергията на избитите фотоелектрони? Върху какво оказва влияние интензитетът на облъчващата светлина?
3. Колко време след започване на облъчването, започва отделянето (емисията) на фотоелектрони?
4. Знаем, че фотоефект се наблюдава само тогава, когато честотата на лъчението е по-голяма от определена гранична честота. Използвайте връзката между честота и дължина на вълната и формулирайте вторият закон за фотоефекта по отношение на дължината на вълната. (Граничната дължина на вълната носи името *червена граница при фотоефекта*. Защо?)
5. Пресметнете максималната кинетична енергия на електрон, ускорен от напрежения 5, 10 и 20 kV.

Обяснение на фотоефекта. Фотони.

Вълновата теория за светлината и фотоефектът. Нека се опитаме да обясним фотоефекта и законите на които той се подчинява, като използваме представата, че светлината е електромагнитна вълна. На пръв поглед това изглежда просто – щом светлината представлява електромагнитна вълна, то нейното поле ще взаимодейства с електроните, ще ги „увлича“ със себе си и ще ги заставя да трептят със същата честота, с която се изменя електромагнитното поле на вълната. Когато електроните се разтрептят достатъчно силно, те набират енергията необходима за напускане на пластинката. Тогава именно се излъчват фотоелектроните.

Такова обяснение, обаче е в разрез с опитно установените закони за фотоефекта. Така например, колкото интензитетът на светлината е по-голям, толкова по-голяма ще бъде амплитудата на електричното поле на вълната и следователно толкова по-силно ще се разтрептят електроните. От тук следва, че енергията на електроните трябва да расте с увеличаване интензитета на светлината. Това обаче противоречи на третия закон за фотоефекта, който гласи, че енергията на фотоелектроните не зависи от интензитета на светлината, а се определя изключително от нейната честота.

Има и други, по-големи трудности, на които се натъква вълновата представа за светлината. Светлинната вълна, а следователно и нейната енергия, е разпростряна в една широка пространствена област, а размерите на електрона са нищожни спрямо нея. Поради това светлинната вълна може да предаде на електрона само една незначителна част от своята енергия. Необходимо е твърде дълго време, докато електронът натрупа енергия, достатъчна за да напусне пластинката. Пресмятанията водят до извода, че такава енергия може да се акумулира в електрона едва за няколко часа и то при положение, че облъчващата светлина е с голям интензитет. Същевременно опитите показват, че електроните напускат пластинката веднага след като започне облъчването, дори и светлината да е много слаба.

Обяснение на законите на фотоефекта. И тъй, вълновите представи са недостатъчни за да обясним фотоелектричния ефект. Ще напомним, че ние бяхме

принудени да разглеждаме светлината като вълна за да обясним нейната способност да дифрактира и интерферира. Нека сега за момент забравим тези ѝ способности. и се опитае да обясним фотоефекта с помощта на представата за светлината, като поток от някакви особени частици. Тази хипотеза бе изказана през 1905 г. от Айнщайн, който нарекъл частиците на светлината *фотони*.

Взаимодействието между една „частица на светлината“ (фотон) и един електрон ще бъде аналогично на удара между две билиардни топчета – частицата на светлината се удря в електрона и му предава цялата си енергия; електронът отнася енергията и моментално излита от пластинката. Приема се, че интензитетът на светлината е пропорционален на броя на фотоните, преминали за единица време през единица площ, поставена перпендикулярно на посоката на разпространение на светлината. Очевидно, колкото по-голям е интензитетът на светлинния сноп, толкова повече светлинни частици има в снопа, и следователно толкова по-голям ще бъде броя на избитите фотоелектрони. С това се обяснява напълно първият закон на фотоефекта, съгласно който броят на избитите фотоелектрони се определя изключително от интензитета на светлината.

Също така просто се обяснява и четвъртият закон, съгласно който отделянето на фотоелектроните започва веднага след осветяването на пластинката. И наистина, щом пластинката се освети, върху нея попадат фотони. При това винаги съществува вероятност някой от фотоните да се удари в електрон и да му отдаде енергията си.

За да обясним третия закон на фотоефекта, трябва да допуснем, че *енергията, която пренася един фотон е пропорционална на честотата на светлинната вълна -- колкото честотата на светлинната вълна е по-голяма, толкова по-голяма е и енергията на фотоните*. В такъв случай енергията на избитите фотоелектрони ще бъде правопрпорционална на честотата на светлината, както се изисква от третия закон за фотоефекта. Този пункт от нашите разсъждения обаче предизвиква известни възражения. Тук ние говорим за честота на светлинната вълна, но за каква честота и за каква вълна може да става дума, след като ние приемаме, че светлината е поток от някакви частици? За да отговорим на този въпрос ще трябва да преразгледаме някои от досегашните ни представи за светлината, което ще сторим в следващия урок.

Уравнение на Айнщайн за фотоефекта

Айнщайн допуска, че енергията на един фотон е пропорционална на неговата честота ν , т. е.

$$\varepsilon = h\nu$$

Коефициентът на пропорционалност h и тук е константа на Планк.

С помощта на представата за фотоните вторият и третият закон за фотоефекта намират просто обяснение. Енергията на фотона се предава на електрона. Последният изразходва известна част от енергията си, за да преодолее силите, които го свързват с металната пластинка. За това той трябва да извърши известна работа, наречена отделителна работа, която се бележи с A . Останалата част от енергията се отнася от електрона като кинетична енергия E_k . Следователно трябва да е изпълнено равенството:

$$h\nu = A + E_k$$

Това уравнение е известно като уравнение на Айнщайн за фотоефекта. Очевидно отделителната работа е величина, която характеризира колко „здро“ е свързан електронът с метала. Тази величина е различна за различните метали.

Според третия закон на фотоефекта кинетичната енергия на електрона E_k трябва да е правопропорционална на честотата на светлината ν . Освен това кинетичната енергия на електрона е винаги положителна. Поради това трябва да е изпълнено неравенството:

$$h\nu > A$$

От тук следва, че фотоефект ще се наблюдава само, ако $\nu > A/h$ (втори закон за фотоефекта). Очевидно ν_0 е минималната честота на светлината, при която може да се наблюдава фотоефектът. Тя е пропорционална на отделителната работа A на електроните. Тук е уместно си спомним, че съгласно хипотезата на Планк електромагнитната енергия може да се излъчва не в произволно големи количества, а само на порции (кванти), които са целочислено кратни на едно най-малко количество енергия ε . Планк установи, че това най-малко количество енергия ε (кванта на енергията) е пропорционално на честотата на лъчението ν , т. е. $\varepsilon = h\nu$ и сполучи да определи числената стойност на константата h .

Логично е да се допусне, че енергията не само се изпуска, но и се разпространява на порции – фотони, като енергията на един фотон се дава с посочената по-горе формула. С други думи квантите на Планк и фотоните на Айнщайн са едно и също нещо. Важно е да се отбележи, че опитите върху фотоефекта също дават възможност да се определи числената стойност на константата h . Оказва се, че определената от тези опити стойност на константата h съвпада с получената от Планк стойност. Обстоятелството, че за тази константа се получава една и съща стойност, макар че тя се определя по два съвсем различни начина, е още едно потвърждение на верността на горните хипотези.

Трябва да обърнем внимание, че съгласно развитите по-горе представи при излъчването или поглъщането на фотон енергията на тялото намалява или се увеличава с $h\nu$ със „скак“, т.е. изведнъж. Фотонът не може да се излъчва или поглъща на части. В това отношение фотоните приличат на частиците. При разпространението си обаче те са способни да дифрактират и интерферират и това позволява да ги характеризираме и с вълнови свойства.

Въпроси и задачи:

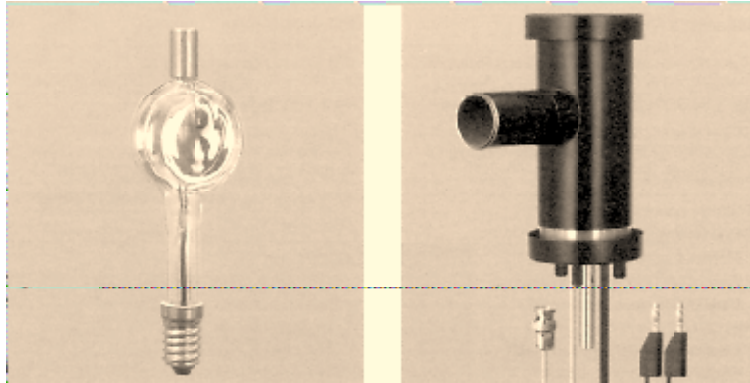
1. Може ли да се обясни фотоефекта, ако приемем, че светлината е електромагнитна вълна
2. С какво това обяснение противоречи на опитно установените закони?

Приложения на фотоефекта

Фотоклетки и фотоприемници. Откриването на фотоефекта, наричан още *външен фотоефект* и обяснението му дава голям тласък в развитието на физичната наука. Много скоро след откриването му това физично явление започва да се прилага и в различни области на техниката. Създават се различни устройства -- фотоприемници, които превръщат интензитета на светлината в електричен ток. С тяхна помощ става възможно да се автоматизира включването и изключването на осветителни тела и машини. Може да се контролират размерите на детайли и да се отчита броят им, когато те се движат по поточна линия. Благодарение на фотоефекта, "нямото" кино "проговаря". На фиг. () е показано как изглежда т.нар. вакуумен фотоелемент} и някои негови приложения.

възпроизвеждане на звук и фотореле

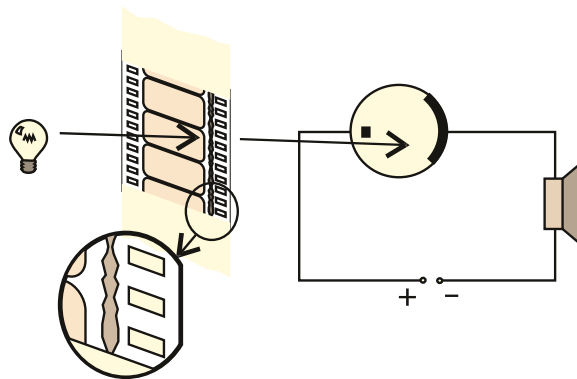
Устройството на вакуумния фотоелемент е следното: стъклен балон (а), от който въздухът е изтеглен и една част от повърхността му е покрита с тънък метален слой. Металът, който се използва обикновено е с малка отделителна работа. Анодът е пръстеновиден. Такива фотоелементи са били използвани нашироко до създаването на по-съвременни прибори



Вакуумни фотоелементи

(Освен разглеждания външен фотоефект, съществува т.нар. *вътрешен фотоефект*. При него, под действието на лъчението се променят някои характеристики на полупроводниците, например електрическото им съпротивление. Намира приложение при полупроводниковите фотоприемници, слънчевите фотоелементи и др.).

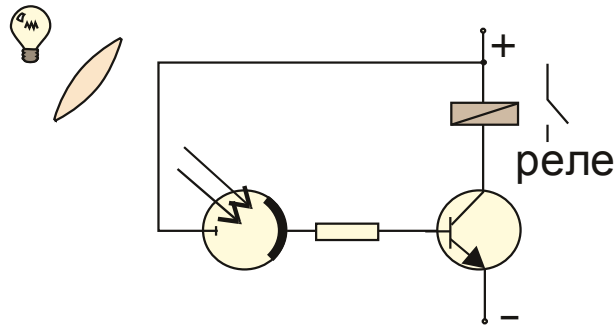
1. Интензитетът на светлината, „управляван“ от *звуковата пътечка* на кинолента се превръща в звук с помощта на фотоелемент по следния начин. Източник светлина осветява звуковата пътечка, а след това светлината попада върху фотоелемента. Там светлинният сигнал се превръща в променлив електричен сигнал. Токът във веригата се променя, в зависимост от интензитета на светлината. Протичайки през веригата на говорителя, токът се превръща в звук с интензитет, който съответства на интензитета на светлината.



Възпроизвеждане на звук при филмите

2. *Фоторелето* действа по следния начин. Схемата се състои от фотоелемент F , транзистор T и електромагнитно реле. Когато фотоелементът не е осветен през нито един от клоновете на веригата не тече ток. При осветяването му протича ток през тази част, където той е свързан (всъщност фотоелемента управлява

тока през базата и емитера на транзистора). Това от своя страна води до протичане на ток през колектора на транзистора и през намотката на релето, което изключва управляваната верига. Много често комбинацията от осветител и фотореле, се нарича *фотоклетка*.



Въпроси и задачи:

1. Защо не е възможно закономерностите при фотоефекта да бъдат обяснени, ако се основаваме само на електромагнитната теория за същността на светлината?
2. Как Айнщайн нарича частиците на светлината? Как си представяте взаимодействието между частиците на светлината и електроните? Каква е връзката между интензитета на светлината и броя на фотоните?
3. Окончателни и абсолютно верни теории не съществуват. Поне засега, те се нуждаят от допълнения и уточнения. Макс Планк казва "Фотоефектът показва, че нещо трябва да се измени в аксиомите на електромагнитната теория на светлината, без обаче да се отхвърля необходимото в нея". Как ще коментирате това твърдение?
4. Потърсете самостоятелно материали за приложенията на фотоефекта в различни области