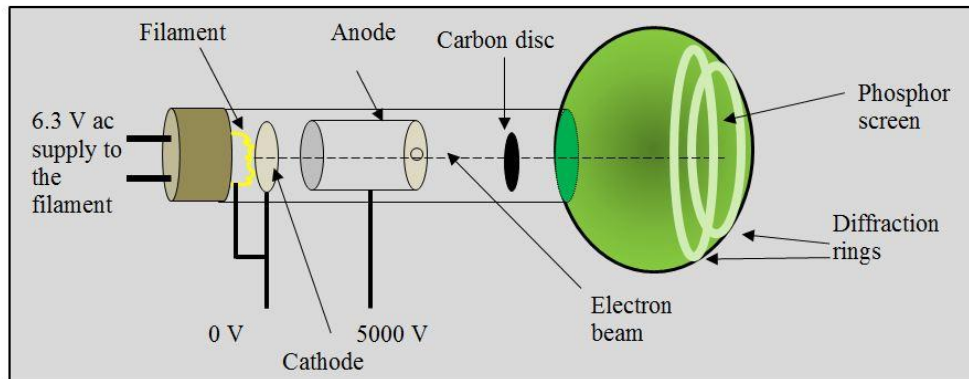


Вълнови свойства на микрообектите

Проф. П. Райчев

Кл. Тютюлков

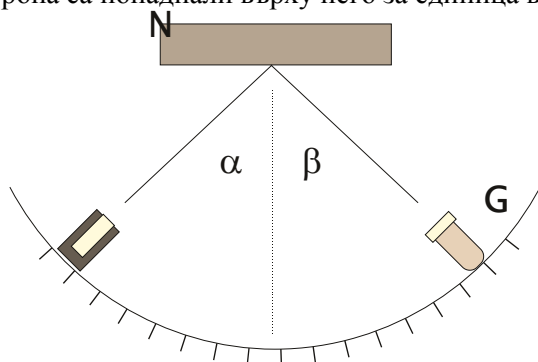


За да обясним фотоефекта и по специално мигновеното излъчване на фотоелектрони след началото на облъчването, ние приехме, че светлината представлява поток от частици. Тези частици обаче имат по специални свойства – те могат да дифрактират и интерферират когато преминават през дифракционни решетки. Това тяхно свойство даде възможност да им припишем величини, като честота и дължина на вълната, без самите те да са "истински" вълни.

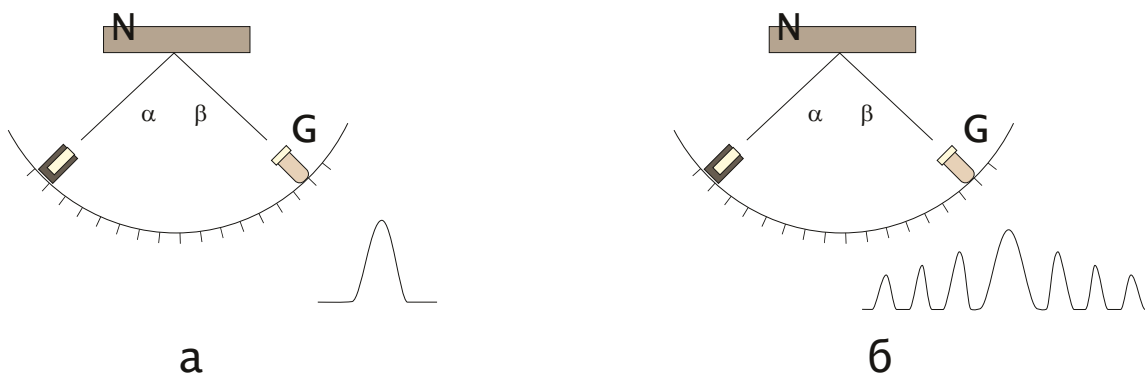
За разлика от фотоните макроскопичните тела не могат да бъдат характеризирани с подобни величини, понеже те не притежават свойството да интерферират. Какво обаче ще стане ако започнем да раздробяваме едно макроскопично тяло на все по-дребни и по-дребни части ?

При такова раздробяване ние ще стигнем до границата, от която нататък тялото ще бъде разложено на молекули и атоми, а атомите – на електрони, протони и неутрони. Изглежда естествено, частиците които изграждат тялото да имат същите свойства както и самото тяло. Поради това ние сме склонни да мислим, че електроните, протоните и другите микрочастици са някакви много малки "топчета", които се движат по същия начин, както и големите тела. Тази представа обаче се оказва невярна.

Опит на Дейвисън и Кунсман. През 1922 г. американските физици Дейвисън и Кунсман направили следния опит (фиг. 1). Сноп от електрони с точно определена енергия се насочва към повърхността на никелова пластинка **N**. Електроните се отразяват от повърхността на пластинката и попадат в брояча **G**. (Броячът е устройство, което може да преброи колко електрона са попаднали върху него за единица време.)



фиг. 1



фиг. 2

Резултати от опита на Дейвисън и Кунсман. Дейвисън и Кунсман установили, че когато броячът е разположен спрямо никеловата пластинка под ъгъл β , който е равен на ъгъла на падане α на електронния сноп, броят на регистрираните от него електрони е най-голям. (фиг. 2 а). Резултатите от този опит са напълно обясними, ако приемем, че електроните се движат по същия начин, както и обикновените веществени топчета - когато едно такова топче се удари във веществена среда, то отскача назад, като ъгълът на отражение е равен на ъгъла на падане.

По време на експериментите станала авария – апаратурата се разхерметизирала и никеловата пластинка се окислила. За да я възстановят експериментаторите трябвало да я нагреят и с учудване констатирали, че резултатите от опита се изменили коренно. Те стигнали до извода, че в резултат на нагряването пластинката прекристализирала и в нея се образували множество малки никелови кристалчета. Именно това довело до изменението на резултатите от опита¹.

И така, Дейвисън и Кунсман установили, че ако никеловата пластинка се замени с никелов кристал, зависимостта между ъгъла на отражение и броя на регистрираните електрони става съвсем друга (фиг. 2б) – в броя на регистрираните електрони се забелязват редица минимума и максимуми. Картината е такава, като че ли някаква вълна се е отразила от дифракционна решетка. Всъщност кристалът представлява дифракционна решетка -- атомите в кристала са подредени правилно, на еднакви разстояния d един от друг. Ако върху него попадне вълна с подходяща дължина, ще да се получи именно дифракционната картина изобразена на фигурата. Очевидно резултатите от този опит са напълно необясними, ако се предположи, че електроните се движат като макроскопични топчета (т.е. съгласно законите на класическата механика). И обратно, резултатите от опита са лесно обясними, ако допуснем, че електроните са способни да дифрактират при преминаването им през дифракционна решетка. Тези опити били повторени и от други изследователи и било установено, че не само електроните, но и останалите микрочастици, напр., протоните, неутроните и даже атомите като цяло имат способността да дифрактират и интерферира, когато преминават през кристали. И така, опитите показват, че подобно на фотоните, електроните и останалите микрочастици дифрактират и интерферира при преминаването си през дифракционна решетка. Това тяхно свойство позволява да им бъде приписана

¹ Това е един пример за *случайно откритие*. В миналото случайно и непреднамерено са били направени изключително важни открития – например така са били открити рентгеновите лъчи, радиоактивното разпадане и пр. Твърде вероятно е случайни открития да се правят и в бъдеще. Това трябва да се има предвид от всички, които в качеството си на обществени лица имат претенциите да ръководят науката и до поставят пред нея разни изисквания.

дължина на вълната, без те да са „истински“ вълни. Те притежават само някои от свойствата на вълните, например могат да дифрактират, интерферират и изобщо да се разпространяват така както се разпространяват вълните. Поради това често се казва, че движението на микрочастиците се описва от една вълна.

Вълни на дьо Бройл. През 1924 г. френският учен Луи дьо Бройл намери връзката между дължината на вълната λ , която се приписва на електрона и неговата скорост v :

$$\lambda = h/(mv),$$

където h е планковата константа, m е масата на електрона. Както се вижда, колкото по-бързо се движи електронът, толкова по-малка е дължината на вълната, която описва неговото движение. Горното съотношение може да бъде проверено опитно. За тази цел сноп от електрони с точно определена скорост се пропуска през дифракционна решетка, разстоянието между отворите на която е d . На разстояние L от решетката се поставя фотоплака. На местата, където попадат повече електрони фотоплаката ще почернее по-силно и върху нея ще могат да се видят последователни максимуми и минимуми.

За да се определи опитно дължината на вълната λ (нарича се още *вълна на дьо Бройл*) която описва движението на електрона трябва още да се знае скоростта на електроните v . Тя може да се определи като се знае ускоряващото напрежение, което създава електронния сноп.

По късно бе показано, че не само електроните, но също и протоните, неутроните и даже атомите имат способността да дифрактират и интерферират. При всички случаи те се движат така, като че ли се разпространява една вълна. чиято дължина се определя от съотношението на де Бройл.

Въпроси и задачи

1. Опишете опита на Дейвисън и Кунсман. Има ли нещо "необичайно" в наблюдаваното от тях?
2. Какво представляват вълните на дьо Бройл?
3. В описаният опит по дифракция са използвани електрони, с енергия 54,0 eV. Намерете дължината на вълната на тези електрони
4. Ускоряващото напрежение в електроннолъчева тръба се променя от 10 до 22 kV. Как се променя дължината на вълната на ускоряваните електрони, в зависимост от напрежението? При взаимодействието на електроните със стъклото на тръбата възниква електромагнитно лъчение в ултравиолетовата и рентгеновата област на спектъра. Направете преценка каква е дължината на вълната на излъчените при взаимодействието фотони. Как се променя тя като функция на скоростта на електроните?
5. Лазер, който излъчва светлина с дължина на вълната 647 nm, притежава мощност на излъчване 100 mW. Колко фотона за секунда излъчва той?
6. Каква е дължината на вълната на дьо Бройл на неутрон с енергия $\varepsilon = 25 \text{ meV}$? Масата на неутрона е $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
7. Куршум с маса $m = 40 \text{ g}$ лети със скорост 1000 m/s. Каква дължина на вълната на дьо Бройл може да му се припише? Защо не се наблюдават дифракционни ефекти?

Вероятностен характер на квантовите закономерности

Интерференция от слаби снопове. Наблюдаването на интерференчна картина при преминаване на електрони през дифракционна решетка е неочаквано и се нуждае от някакво обяснение. Можем да останем с впечатлението, че възникването на дифракционната картина се дължи на обстоятелството, че в електронния сноп възниква някаква вълна (напр. плътността на снопа се изменя периодично). Може би именно тази „вълна на плътността“ дифрактира и интерферира и това създава наблюдаваната картина. Това обяснение, обаче се оказва невярно. Вижда от следния опит. Със специални приспособления може да се постигне извънредно малка интензивност на падащия сноп, така че микрообектите да попадат върху дифракционна решетка един по един. Ако достатъчно дълго време облъчваме дифракционната решетка с такъв слаб сноп и след това проявим фотографската плака, ще видим, че върху нея се е получила картина, която по нищо не се отличава от тази, която се получава, когато върху решетката падат едновременно много микрообекти.

Какъв извод може да се направи от този опит?

Изводът е, че всеки микрообект, сам и независимо от останалите, има поведението на вълна. Нека върху решетката падне един единствен микрообект, който се описва от една вълна с дължина λ . Получаването на дифракционна картина се обяснява с това, че тази вълна поражда сферични вълни, източник на които са всеки един от процепите на решетката. В пространството зад решетките тези вълни интерферират и върху екрана се получават точки, където интензитетът на вълната е максимален и точки с минимален интензитет. В това е смисълът на думите, че микрообектът интерферира сам със себе си. Това обаче не означава, че в някоя точка на пространството два електрона ще се „насложат“ и ще се унищожат, а в друга точка на пространството тези два електрона ще дадат четири електрона. Интерферират не самите електрони, а вълната, която описва тяхното движение.

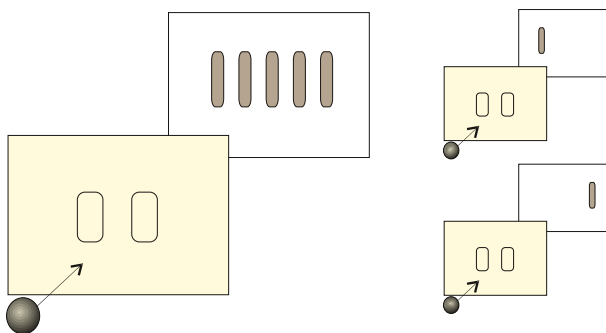
Възниква обаче въпросът къде ще попадне конкретен микрообект. Нали той може да бъде открит само в една точка, докато описващата негово движение вълна е разпростряна навсякъде, макар и с различен интензитет?

Необходимост от вероятностно описание на процесите.

Да потърсим отговора на поставения по-горе въпрос. Опитите показват, че плаката е най-силно почерняла на тези места, където интензитетът на дифрактиралата вълна е най-голям. Следователно микрочастицата може да бъде открита с най-голяма вероятност там, където интензитетът на описващата я вълна е най-голям. Понеже върху екрана падат много частици, повечето от тях ще попаднат (всяка независимо от останалите) в мястото, където тяхното откриване е най-вероятно. Там плаката ще почернее най-много.

От тук е ясно, че ние можем да предскажем вероятността за попадането на микрочастицата в една или в друга точка на екрана, но не и да кажем със сигурност къде точно ще попадне тя. Защо обаче трябва да си служим с вероятностите? Дали защото не знаем „какво точно става“ с частицата?

Мислен опит за интерференция на частиците.



Нека през дифракционна решетка, която се състои само от два процепа пропуснем толкова слаб сноп от микрообекти, че те практически да падат върху решетката един по един. Както и следва да се очаква, след проявяването на плаката върху нея се появява дифракционната картина.

а. Нека запушим една от дупчиците на решетката. Тогава, вместо дифракционната картина, срещу отворчето ще се получи само едно черно петно, б), тъй като преминаващият през отвора сноп няма с какво да интерферира. Да запушим сега другата дупчица. Отново се получава само едно тъмно петънце срещу отворената дупчица. Ако известно време държим отворена първо едната дупчица, а после я запушим и отворим другата, на фотографската плака ще се появят две петънца, срещу всеки един от отворите, но не и дифракционната картина, която се получава, когато и двата отвора са отпушени.

Микрочастиците, обаче попадат върху фотографската плака една по една. Ако те се движат по определени траектории, всяка една от тях ще преминава през една от двете дупчици и не би трябвало да има никаква разлика в картините, които са получени когато двете дупчици са отворени едновременно и когато са отворени една след друга. А опитът показва, че такава разлика съществува! Как микрочастицата, която съгласно нашите нагледни представи преминава през една от двете дупчици може да знае отворена ли е другата дупчица или не? За да обясним получаването на дифракционната картина трябва да допуснем, че микрочастицата минава едновременно и през двете дупчици. Докато се движи, тя има свойствата на вълните, а вълните са "разпрострени" навсякъде в пространството. И тъй, трябва да приемем, че докато се движи, микрообектът се намира едновременно във всички точки на пространството! Знаем обаче, че върху фотографската плака микрообектът оставя едно единствено черно петънце -- точката в която той е попаднал върху екрана. В това отношение микрообектите приличат на класическите частици (винаги може да се посочи точката в която става тяхното появяване, изчезване или регистрация). Микрообектът може да бъде открит само в една точка, но не и в две или повече точки едновременно. Това обаче може да стане само с определена вероятност. Тази вероятност е пропорционална на интензитета, който притежава в дадена точка вълната, описваща движението на частицата}.

И така, *{ резултатите от опитите извършвани над микрообектите могат да се предсказват само като се посочи вероятността за получаването на един или друг резултат от опита (например вероятността за откриването на електрона в дадена точка). Това не е следствие от нашето незнание за това как протичат процесите, а е резултат на особената природа на микрочастиците.*

Въпроси и задачи

1. Ще се наблюдава ли дифракция на електрони, ако те преминават през дифракционната решетка един по един?
2. Когато електроните взаимодействат с фотографската плака те имат поведение на частици. Коя е основната разлика между тях и класическите частици?
3. Как разбирате твърдението "Микрообектът може да бъде открит само в една точка, но това може да стане само с определена вероятност."
4. Каква трябва да е стойността на ускоряващото напрежение в рентгенова тръба, за да имат ускорените електрони дължина на вълната 1 pm (10^{-12} m)?

Съотношение на неопределеност

Разгледаните по-горе примери могат да ни убедят, че свойствата на микрочастиците са коренно различни от тези на окръжаващите ни макроскопични тела. Изобщо казано, когато се движат микрообектите нямат определено положение в пространството, те могат да бъдат открити с определена вероятност едновременно навсякъде. Това означава, че в този случай понятието координата за микрообектите няма определен смисъл. От друга страна тяхната регистрация, появяване и изчезване може да стане само в една единствена точка. Резултатът от опита за откриване на частицата може да се предскаже само вероятно -- възможно е частицата да се открие в множество различни точки и всяка една от тях се характеризира с определена вероятност за откриване на частицата.

С подобни опити и техния анализ може да се покаже, че в общия случай за микрообектите понятието скорост няма определен смисъл. Частицата може едновременно да притежава няколко различни скорости.

Понятията координата и скорост в микросвета. Опитите показват, че величините координата и скорост имат само ограничено приложение в атомния свят. В квантовата теория могат само да се предсказват вероятностите за получаване на един или друг резултат от опита (например вероятността за преминаване или отразяване на фотона от една пластинка, вероятността за откриване на частицата в дадена точка на пространството и пр.). Необходимостта от това да си служим с вероятности е следствие на факта, че микрообектите не са нито "истински" частици, нито "истински" вълни, те са нещо трето – те притежават особена природа. Същевременно ние можем да описваме движението на микрообектите само с помощта на представите за частици и вълни, които не са напълно достатъчни за описание на поведението на микрообектите. По-точно казано, величините, с които искаме да опишем тяхното поведение -- координата, импулс, дължина на вълната и пр. -- не са подходящи за тази цел, но ние просто не разполагаме с други, по-подходящи от тях.

Принцип на неопределеност. Обстоятелството, че микрообектите притежават вълнови свойства води до това, че е невъзможно в един и същ момент да се предскажат точните стойности на координатата и на скоростта на една частица. Това следствие е известно под името *принцип на неопределеност*.

Принципът на неопределеност става ясен от следните разсъждения. Нека предположим, че разглеждаме една частица с точно определена скорост. Ако скоростта на частицата е v , то на нея съответства вълна с дължина $\lambda = h/(mv)$. Видяхме, че амплитудата на тази вълна в една точка на пространството е пропорционална на вероятността за откриване на частицата в дадена точка. Обаче вълната, която описва движението на частица със скорост v е синусоида, простираща се из цялото пространство. Амплитудата на вълната е навсякъде еднаква. Поради това вероятността да открием частицата в коя да е точка на пространството е една и съща. Явно е, че координатата на нашата частица няма определена стойност – частицата може да се намира с еднаква вероятност навсякъде в пространството. И така, когато познаваме скоростта (т.е. импулса) на една частица, тя се описва с плоска вълна и ние не можем да кажем нищо за нейната координата. Вярно е и обратното – оказва се, че когато частицата се намира в някаква област с размери Δx (т.е. когато вероятността за нейното откриване е различна от нула само в тази област), нейната скорост v_x няма точно определена стойност – при опитите за нейното измерване могат да се получат с известна вероятност различни стойности, които лежат в интервала $v_x, v_x \pm \Delta v_x$.

Съотношение на неопределеност. Немският учен Хайзенберг показва, че величините Δv и Δx са свързани с релацията:

$$m\Delta v \cdot \Delta x \geq h$$

Това е неравенство е количествен израз на принципа на неопределеност и се нарича съотношение на неопределеност.

Смисъл на съотношението на неопределеност. Съотношението на неопределеност показва, че координатата и импулсът на електрона не могат да бъдат измерени едновременно. Колкото по-точно знаем координатата на частицата (т.е когато Δx е малко), толкова по неопределен е импулсът на частицата (т.е Δv е голямо) и обратното. Това съотношение е израз на особената природа на микрообектите и не е следствие от недостатъците на нашата измерителна апаратура, а е израз на неприложимостта на класическите величини (координата, скорост и пр.) за описание поведението на микрообектите.

Трябва да се обърне внимание, че съотношенията за неопределеност са валидни за всички тела, а не само за микрообектите. В макросвета те обаче нямат никакво практическо значение.

В този смисъл съотношенията на неопределеност определят границите на микрокосмоса – към микрокосмоса се причисляват тези обекти, при които съотношенията на неопределеност играят съществена роля. Тези обекти се подчиняват на квантовите закономерности.

Координатата и скоростта на микрочастицата не могат едновременно да бъдат определени с произволно голяма точност. Колкото по-точно е определена координатата, толкова по-неопределена е скоростта на микрочастицата и обратно (принцип на неопределеност). Принципът за неопределеност е следствие от ограничената приложимост на нагледните класически представи в микросвета. Към микросвета се причисляват тези обекти, за които съотношенията за неопределеност играят съществена роля.

Въпроси и задачи

1. Намерете неопределеността на скоростта на частица с маса 1g , ако местоположението ѝ може да се определи с точност 1mm .
2. Намерете неопределеността в енергията на фотони, излъчени за период 10^{-8} s .