Топлинно излъчване

Излъчването на светлина от телата се дели на:
1) Топлинно излъчване, при което в лъчение се превръща част от енергията на топлинното хаотично движение на молекулите на тялото.
2) Луминесценция, при която излъчването се получава в резултат от химични реакции, облъчване с някакви лъчи и др.

Тук ще говорим само за топлинното излъчване, като ще имаме предвид не само светлина, а изобщо излъчване на електромагнитни вълни.

Всяко тяло поглъща и излъчва (при температура над 0 К) електромагнитни вълни. Ако температурата на тялото е по-висока от тази на околната среда, излъчването преобладава над поглъщането. Ако е по-ниска – преобладава поглъщането. Ако имаме една изолирана система от няколко тела след известно време се достига термодинамично равновесие – температурата на телата се изравнява и всяко тяло излъчва за даден интервал време толкова енергия, колкото и поглъща. Такова лъчение се нарича *равновесно лъчение*. Неговите свойства зависят само от температурата на телата.

Излъчвателна способност $E_{\lambda,T}$ наричаме мощността на лъчението dW от единица площ на тялото при температура T в интервал от дължини на вълните от λ до $\lambda + d\lambda$:

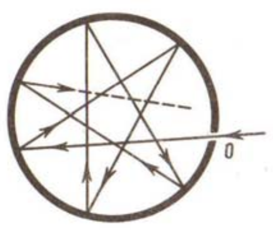
$$E_{\lambda,T} = \frac{dW}{d\lambda}$$

Поглъщателна способност наричаме отношението на погълнатата енергия към падналата върху тялото енергия във вид на електромагнитни вълни с определена дължина на вълната λ при дадена температура на тялото T:

$$A_{\lambda,T} = \frac{W_{погълната}}{W_{паднала}}$$

Телата поглъщат само част от падналата върху тях светлина. Опростено цветът на телата може да бъде обяснен по следния начин. Нека осветим синьо тяло с бяла с светлина. То поглъща всички цветове с изключение на синия. Синият цвят се отразява от тялото, поради което ние го виждаме в този цвят. Белите тела отразяват светлина с всички цветове, докато черните тела поглъщат всички цветове.

Абсолютно черно тяло наричаме тяло, което поглъща напълно падналите върху него електромагнитни вълни независимо от дължината на вълната и температурата.

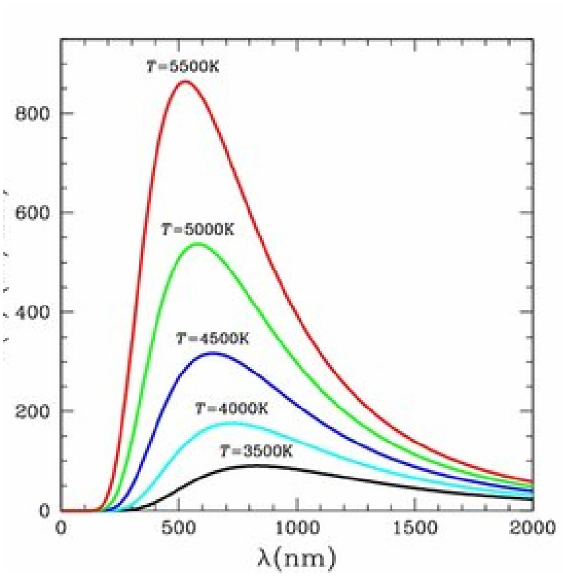


За абсолютно черно тяло $A_{\lambda,T} = 1$. Абсолютно черното тяло е една идеализация. Всяко реално тяло отразява някаква част от падналата върху него светлина. Като модел на абсолютно черно тяло се използва кухина с малък отвор. Когато в кухината попадне светлина, тя се отразява многократно от стените докато на практика се погълне напълно.

Закон на Кирхоф: Отношението на излъчвателната и поглъщателната способност не зависи от вида на тялото. То е една универсална функция на дължината на вълната и температурата.

$$\frac{E_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$

Този израз показва, че ако едно тяло не може да излъчва светлина с дадена дължина на вълната, то не може и да я поглъща.



За абсолютно черно тяло $E_{\lambda,T} = f(\lambda,T)$, тъй като $A_{\lambda,T} = 1$. След като абсолютно черното тяло може да поглъща вълни с всяка дължина на вълната, то то може и да излъчва вълни с всяка дължина на вълната (пример – Слънцето).

Видът на функцията $f(\lambda,T)$ е бил получен експериментално. На фигурата е показана зависимостта на $f(\lambda,T)$ от дължината на вълната при различни стойности на температурата.

Закон на Стефан-Болцман:

$$E_T = \sigma T^4$$

Тук T е температурата на абсолютно черно тяло, $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2K^4)}$ е константа, а E_T е излъчената от единица площ от тялото мощност във вид на електромагнитни вълни с всякакви дължини на вълната.

Пример: Температурата на абсолютно черно тяло се увеличава 3 пъти. Колко пъти ще се увеличи излъчената мощност?

$$E_{T0} = \sigma T_0^4 \qquad E_T = \sigma T^4 = \sigma(3T_0)^4 = 81\sigma T_0^4 = 81E_{T0}$$

Мощността ще се увеличи 81 пъти.

Закон на Вин:

$$\lambda_{\max} T = b$$

Тук $b = 2{,}9.10^{-3}\,\mathrm{m.K}$ е константа, T е температурата абсолютно черно тяло, а $\lambda_{\max}$ е дължината на вълната при която излъчването има максимум. От закона на Вин и от фигурата по-горе се вижда, че когато температурата расте, $\lambda_{\max}$ намалява.

Пример: Температурата на повърхността на Слънцето е около 5800 K. При каква дължина вълната излъчването от Слънцето е максимално?

$$\lambda_{\max} T = b \qquad \lambda_{\max} 5800 = 2{,}9.10^{-3} \qquad \lambda_{\max} = 500.10^{-9}\,\mathrm{m} = 500\,\mathrm{nm}$$

Тази дължина на вълната е областта на максимална чувствителност на окото.

Пример: Температурата на жичката на електрическа крушка е 2400 K. При каква дължина вълната излъчването от крушката е максимално?

$$\lambda_{\max} T = b \qquad \lambda_{\max} 2400 = 2{,}9.10^{-3} \qquad \lambda_{\max} = 1{,}2.10^{-6}\,\mathrm{m} = 1200\,\mathrm{nm}$$

Тази дължина на вълната е в областта на инфрачервените лъчи и е невидима за окото. Установено е, че едва около 5% от излъчването на крушката е видима светлина.

Теоретичното получаване на функцията $E_{\lambda,T}$ (излъчвателната способност на абсолютно черно тяло) се оказало невъзможно с методите на класическата физика. За да реши проблема през 1900 г. Макс Планк използва принципно нов подход.

Хипотеза на Планк: *Светлината не се излъчва непрекъснато, а на порции, наречени кванти*. Енергията на един квант е:

$$E = h\nu$$

като $h = 6{,}62.10^{-34}\,\mathrm{J.s}$ е константа на Планк, а ν е честотата на светлината.

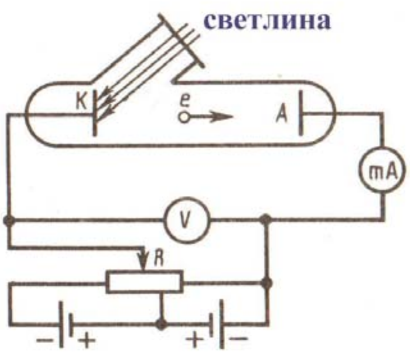
С помощта на тази хипотеза за излъчвателната способност на абсолютно черно тяло се получава:

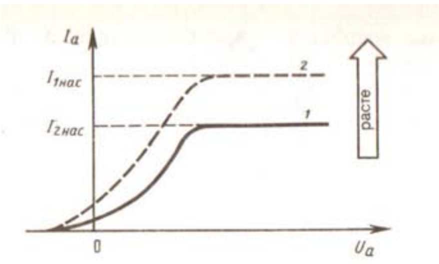
$$E_{\lambda,T} = \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\right)\frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$$

Тук c е скоростта на светлината, а k е константа на Болцман.

Фотоелектричен ефект

Фотоелектричен ефект (фотоефект) наричаме отделянето на електрони от повърхността на метал при облъчване със светлина. Открит от Херц през 1887 г.





1. Схема на опита

Два електрода – катод К и анод А – са поставени в стъклен съд, от който е изтеглен въздуха. Между катода и анода е подадено напрежение, което може да се променя с потенциометъра R. Катодът К се осветява със светлина (или някакви други електромагнитни вълни) и от него се отделят електрони. Анодът е положителен и отрицателните електрони се привличат от него. Между анода и катода протича ток, чиято големина може да се измери с милиамперметъра mA.

Зависимостта на тока от напрежението е показана на фигурата. Когато катодът е осветен, от него се отделят електрони. Те образуват един отрицателно зареден облак около катода. Много от отделените от катода електрони се отблъскват от този облак и се връщат в катода. Ако на анода подадем положително напрежение, електроните се привличат от него и токът нараства. Колкото по-високо е приложеното напрежение, толкова повече електрони достигат анода и токът е по-голям. При достатъчно високо напрежение всички излъчени електрони достигат до анода, след което токът спира да нараства. Тази стойност на тока се нарича *ток на насищане*. Електроните напускат катода с някаква начална скорост. Поради това, дори и при нулево напрежение, някои електрони достигат анода и токът не е нула. За да спрем тези електрони е необходимо да подадем обратно напрежение (анодът да отблъсква електроните). При определена стойност на това напрежение, наречена *спирачно напрежение*, токът става равен на нула.

2.Закони на фотоефекта. (В някои учебници – закони на Столетов)

1. При облъчване с монохроматична светлина броят на отделените електрони е пропорционален на интензитета на светлината.

2. Максималната кинетична енергия на отделените електрони зависи линейно от честотата на светлината.
3. За всеки метал съществува минимална честота, наречена червена граница, под която фотоефект не се наблюдава.
4. Отделянето на електрони започва веднага след осветяването със светлина.

Тези закони не могат да бъдат обяснени с класическата електродинамика.

3. Уравнение на Айнщайн

Обяснението на фотоефекта е направено от Айнщайн през 1905 г. Айнщайн стига до извода, че светлината не само се излъчва, но и се поглъща на порции, наречени кванти.

Енергията на един квант е:

$$E = h\nu$$

като $h = 6{,}62.10^{-34}\,\mathrm{J.s}$ е константа на Планк, а ν е честотата на светлината. По-късно светлинните кванти са наречени фотони.

Когато един фотон попадне в метала, той предава енергията си на един електрон. Част от тази енергия електронът изразходва за да напусне метала. Енергията, необходима на един електрон да напусне метала се нарича отделителна работа *A*. Останалата енергия е кинетичната енергия на електрона след напускането на метала:

$$h\nu = A + \frac{m\mathrm{v}^2}{2}$$

4. Обяснение на законите

1. По-голям интензитет на светлината означава по-голям брой фотони, падащи върху метала и следователно, по-голям брой електрони, които ще се отделят.
2. От уравнението на Айнщайн се вижда, че зависимостта на кинетичната енергия на електроните от честотата е линейна.
3. Ако $h\nu < A$, електроните няма да получат достатъчно енергия за да могат да напуснат метала и затова при ниски честоти фотоефект не се наблюдава.
4. Поглъщането на квантите става за много кратко време.

Пример. Червената граница за цезий е $\lambda = 680\ \mathrm{nm}$. Да се намери отделителната работа.
Първо намираме честотата: $\nu = c/\lambda = 3.10^{8} / 680.10^{-9} = 4{,}41.10^{14}\,\mathrm{Hz}$
$h\nu = A \quad A = h\nu = 6{,}62.10^{-34}.4{,}41.10^{14} = 2{,}92.10^{-19}\,\mathrm{J}$
Обикновено отделителната работа се мери в електронволт: $1\ \mathrm{eV} = 1{,}6.10^{-19}\,\mathrm{J}$
$A = 1{,}82\ \mathrm{eV}$

Пример. Лазер с мощност *P* = 1 mW излъчва светлина с дължина на вълната $\lambda = 633\ \mathrm{nm}$. Намерете колко фотона напускат лазера за една секунда.
Първо намираме честотата: $\nu = c/\lambda = 3.10^{8} / 633.10^{-9} = 4{,}74.10^{14}\,\mathrm{Hz}$
Енергията на един фотон е: $E = h\nu = 6{,}62.10^{-34}.4{,}74.10^{14} = 3{,}14.10^{-19}\,\mathrm{J}$
Броят на фотоните излъчени за една секунда е $\dfrac{P}{E} = \dfrac{1.10^{-3}}{3{,}14.10^{-19}} = 3{,}19.10^{15}$

Фотони

Основни свойства на фотоните

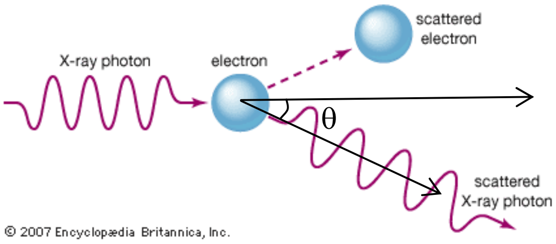
1. Винаги се движат със скоростта на светлината (следователно трябва да използваме теорията на относителността)
2. Енергията на фотона е $E = h\nu$
3. Масата на покой на фотона е нула. (Масата на покой е обикновената маса, с която сме свикнали в ежедневния живот. В теорията на относителността се показва, че когато едно тяло увеличи скоростта си, неговата маса нараства.)
4. От теорията на относителността връзката между маса и енергия се дава от:

$$E = mc^2 \quad \text{или} \quad h\nu = mc^2$$

От тук за масата на фотона получаваме $m = \dfrac{h\nu}{c^2}$.

5. Фотонът притежава импулс $p = \dfrac{h\nu}{c}$. (Припомняне: импулсът на телата е $p = m\mathrm{v}$, произведение от масата и скоростта.)

Някои експериментални доказателства за квантовите свойства на светлината и други електромагнитни лъчения



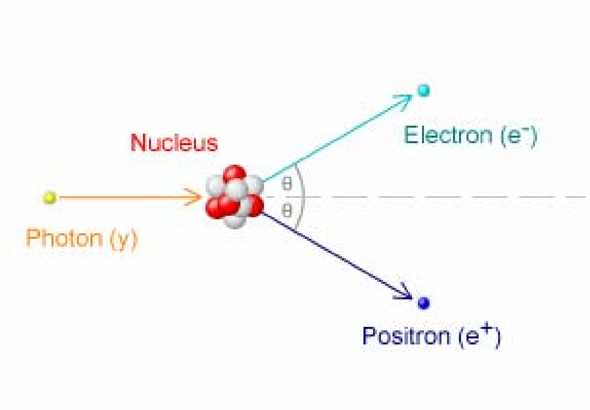
1. Ефект на Комптън При облъчване с рентгенови лъчи на вещества, изградени от леки атоми, се наблюдава разсейване на лъчите и увеличаване на дължината на вълната.

Изменението $\Delta\lambda$ на дължината на вълната се дава от формулата:

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2)$$

Тук λ_c е константа, а θ е ъгълът, на който са се отклонили рентгеновите лъчи.

Обяснението на ефекта може да бъде направено само с помощта на квантовата теория. Фотоните се проявяват като частици, които се удрят еластично в електрон. От законите за запазване на енергията и импулса може да се изведе горната формула. Дължината на вълната нараства, защото при удара фотона губи част от енергията си и следователно честотата му намалява.



2. Раждане на двойка електрон-позитрон. Електромагнитните вълни с най-висока честота и съответно най-висока енергия на фотоните са гама лъчите. Когато един гама квант премине в близост до ядро или друга частица е възможно да се роди двойка частици електрон-позитрон. Позитронът е античастица на електрона. Има същата маса, но зарядът му е положителен. Възможен е и обратният процес. Електрон и позитрон да анихилират (да се унищожат), при което се раждат гама кванти. При тези процеси отново се спазват законите за запазване на импулса и енергията.

3. Светлинно налягане. Тъй като фотоните притежават импулс, когато светлина попадне на някаква повърхност, тя оказва налягане върху нея. (Подобно на налягането на газ, което се дължи на ударите на молекулите в стените на съда.)

Разгледаните по-горе явления както и фотоефектът са доказателства за квантовия характер на светлината. В тези явления светлината се проявява като поток частици – фотони. В други явленията като интерференцията и дифракцията светлината се проявява като вълна.

Поради това не може да се каже, че светлината е само поток от фотони или само електромагнитна вълна. В съвременната физика се говори за корпускулярно-вълнов дуализъм. (корпускула означава частица, дуализъм – двойственост).

Корпускулярно-вълнови свойства на микрочастиците. Вълни на дьо Бройл

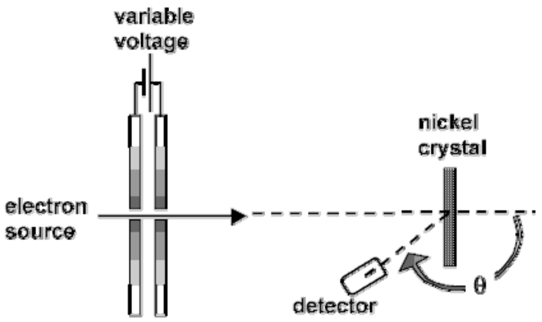
1. Вълни на дьо Бройл

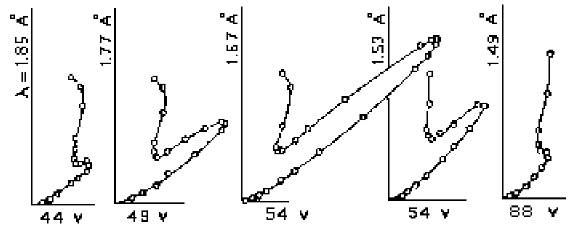
След като светлината има двойствена природа – на вълна и частица възниква въпросът дали и частиците нямат вълнови свойства. Според Луи дьо Бройл всяка частица проявява свойствата на вълна с дължина:

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

тук h е константата на Планк, а $p = m\mathrm{v}$ е импулса на частицата.

2. Опит на Дейвисън и Джермер





Дейвисън и Джермер насочили сноп от електрони към никелов кристал и наблюдавали разсеяните електрони (лявата фигура). Полученият резултат (дясната фигура) наподобявал известни резултати по дифракция на рентгенови лъчи. Както е известно, дифракцията се наблюдава само при вълнови процеси. Изчисленията показали, че дължината на вълната, получена в експеримента съвпада с дължината на вълната, изчислена по формулата на дьо Бройл. По такъв начин експериментално била потвърдена хипотезата на дьо Бройл.

По-късно дифракция е била наблюдавана и при протони, неутрони, атоми.

Пример. Да се намери дължината на вълната на дьо Бройл на електрон, движещ се със скорост $\mathrm{v} = 10^6\,\mathrm{m/s}$. Масата на електрона е $m = 9.10^{-31}\,\mathrm{kg}$.

Импулсът на електрона е $p = m\mathrm{v} = 9.10^{-31}.10^6 = 9.10^{25}\,\mathrm{kg.m/s}$. Дължината на вълната на дьо Бройл е

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}62.10^{-34}}{9.10^{-25}} = 7.10^{-10}\,\mathrm{m}$$

Пример. Да се намери дължината на вълната на дьо Бройл на топка за тенис, движеща се със скорост $\mathrm{v} = 20\ \mathrm{m/s}$. Масата на топката е $m = 0{,}1\ \mathrm{kg}$.
Импулсът на топката е $p = m\mathrm{v} = 0{,}1.20 = 2\mathrm{kg.m/s}$. Дължината на вълната на дьо Бройл е
$\lambda = \dfrac{h}{p} = \dfrac{6{,}62.10^{-34}}{2} = 3{,}3.10^{-34}\mathrm{m}$

От примерите се вижда, че дължината на вълната на големите тела е много малка. Следователно вълновите свойства на големите тела са слабо изразени.

3. Съотношения за неопределеност на Хайзенберг

Двойствената корпускулярно-вълнова природа на частиците променя начина, по който се описва движението им. Не може да се говори за траектория на частицата. Също така е невъзможно да се определят едновременно положението (координатите) и импулса на частицата, тъй като понятието “дължина на вълната в дадена точка” е лишено от физически смисъл.

Хайзенберг е показал, че ако Δx е точността, с която е определена координатата на частицата, а Δp_x е точността, с която е определен импулса, то произведението им е по-голямо от константата на Планк:

$$\Delta x.\Delta p_x \geq h$$

Това неравенство се нарича *съотношение за неопределеност на Хайзенберг.* То показва, че ако успеем да увеличим точността, с която измерваме например Δx, ще намалее точността, с която измерваме Δp_x. В класическата физика няма такова съотношение и там координатата и импулсът могат да се определят с произволна точност.

Съотношение за неопределеност е в сила и при енергията и времето:

$$\Delta E.\Delta t \geq h$$

4. Вълнова функция

Разглеждаме стъклена пластинка, върху която пада светлина. Част от светлината се отразява, а друга част преминава в стъклото. Енергията, която пренася светлинната вълна е пропорционална на квадрата на нейната амплитудата *A*. За светлината, падаща на стъклената пластинка можем да напишем:

$$A^2_{падаща} = A^2_{отразена} + A^2_{преминала}$$

Ако амплитудата на падащата вълна е равна на единица:

$$1 = A^2_{отразена} + A^2_{преминала}$$

Сега да видим как изглежда същия процес като използваме представата, че светлината е поток от фотони. На стъклената пластинка падат някакъв брой фотони *N*. Част от тях се отразяват, други преминават в стъклото.

$$N = N_{отразени} + N_{преминали} \quad \text{или}$$

$$1 = \frac{N_{отразени}}{N} + \frac{N_{преминали}}{N}$$

$\frac{N_{отразени}}{N}$ е вероятността един фотон да бъде отразен, а $\frac{N_{преминали}}{N}$ е вероятността един фотон да премине. Сравнението с израза за амплитудите на вълната показва, че $A^2_{отразена} = \frac{N_{отразени}}{N}$. Следователно квадратът на амплитудата на вълната е равен на вероятността фотонът да се отрази или да премине.

Дотук разглеждахме светлина. Когато разглеждаме частици, смисълът на вълната на дьо Бройл е същия: квадратът на амплитудата е равен на вероятността да намерим частицата в дадена точка.

Тук ще бъдат представени накратко съвременните представи за вълновите свойства на частиците. Състоянието на частиците се описва с функция на координатите и времето, наречена вълнова функция $\Psi(x, y, z, t)$. Тази функция може да бъде комплексна. Самата тя няма физичен смисъл. Физичен смисъл има $|\Psi(x, y, z, t)|^2$, която е равна на вероятността да намерим частицата в дадена точка.

Уравнение на Шрьодингер

1. Общо и стационарно уравнение на Шрьодингер

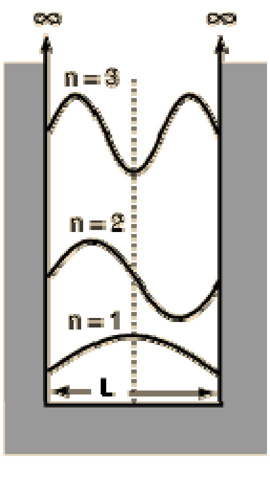
В класическата механика основно уравнение е втория принцип на Нютон $F = ma$. В квантовата механика основно уравнение е уравнението на Шрьодингер:

$$\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi - U.\Psi = -i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$$

Тук $\Psi(x, y, z, t)$ е вълновата функция, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ - константа на Планк, m маса на частицата, U е потенциалната енергия и $i = \sqrt{-1}$ е имагинерната единица. $\Delta\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}$ е оператор на Лаплас.

Горното уравнение се нарича общо уравнение на Шрьодингер, то зависи от времето. В много случай това уравнение може да се опрости, ако потенциалната енергия не зависи от времето.

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$



x = 0 at left wall of box.

Тук E е пълната енергия на частицата, а $\psi(x, y, z)$ е независеща от времето вълнова функция. Това уравнение се нарича стационарно уравнение на Шрьодингер.

2. Движение на частица в потенциална яма

Разглеждаме потенциална енергия, която е равна на безкрайност навсякъде, освен в интервала $0 < x < L$, където $U = 0$. Такова разпределение на потенциалната енергия се нарича безкрайна потенциална яма. Частицата не може да се движи там, където $U = \infty$, тя се движи само в интервала $0 < x < L$. Това е опростено представяне на случая, когато една частица е ограничена от някакво силно поле да се движи само в една малка област.

Тъй като движението е само по x записваме стационарното уравнение на Шрьодингер за едномерен случай за интервала $0 < x < L$.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0$$

(в този интервал $U = 0$). Полагаме $k^2 = \dfrac{2m}{\hbar^2}E$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0$$

Решението на това уравнение е $\psi = A\sin(kx)$. Сега остава да приложим граничните условия. Тъй като частицата не може да се разпространява извън областта $0 < x < L$, на границите на тази област стойността на $\psi = 0$.

при $x = 0$ $\quad \psi = A\sin 0 = 0$ това е изпълнено винаги

при $x = L$ $\quad \psi = A\sin(kL) = 0$ това е изпълнено само ако $kL = n\pi$, като $n = 1, 2, 3...$ е цяло положително число. Оттук $k = \dfrac{n\pi}{L}$ или $k^2 = \dfrac{n^2\pi^2}{L^2}$ и $\dfrac{2m}{\hbar^2}E = \dfrac{n^2\pi^2}{L^2}$. За енергията получаваме:

$$E = \frac{\hbar^2\pi^2}{2mL^2}n^2$$

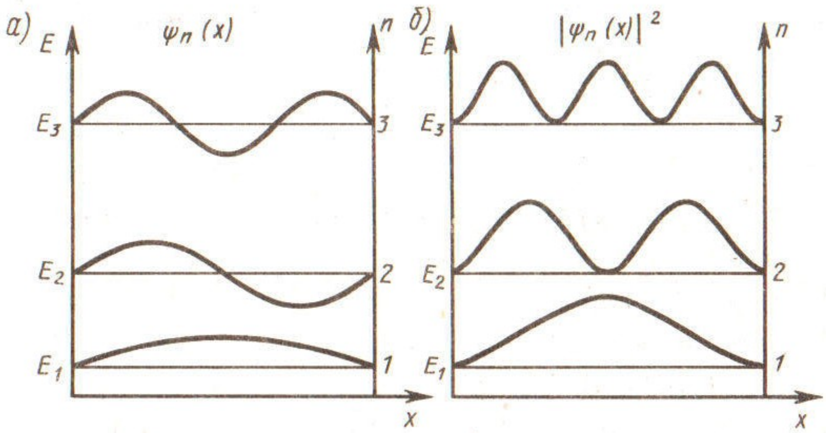
Извод: Енергията на частицата не може да взема произволни стойности, а само дискретни стойности, зависещи от стойността на n. Казваме, че енергията се квантува.

За различни n решението за вълновата функция е $\psi_n = A\sin(\dfrac{n\pi}{L}x)$. От предишната лекция - $|\psi_n|^2$ е равна на вероятността да намерим частицата в дадена точка. Частицата със сигурност се намира в интервала $0 < x < L$, т.е вероятността да я намерим там е равна на 1. От това условие получаваме амплитудата *A*.

$$\int_0^L |\psi_n|^2 dx = 1 \quad \text{или} \quad \int_0^L \left|A\sin(\frac{n\pi}{L}x)\right|^2 dx = 1 \qquad A^2\int_0^L \left|\sin(\frac{n\pi}{L}x)\right|^2 dx = 1$$

може да се покаже, че стойността на този интеграл е $\int_0^L \left|\sin(\frac{n\pi}{L}x)\right|^2 dx = \frac{L}{2}$. Оттук $A^2\frac{L}{2} = 1$ и $A = \sqrt{\frac{2}{L}}$.

Окончателно получаваме $\psi_n = \sqrt{\dfrac{2}{L}}\sin(\dfrac{n\pi}{L}x)$. На фигурата са показани графиките на ψ_n (лява фигура) и $|\psi_n|^2$ (дясна фигура) за стойности на n 1, 2 и 3. Тъй като $|\psi_n|^2$ е равна на вероятността да намерим частицата в дадена точка, от графиката се вижда, че при n = 1 е най-вероятно частицата да е в центъра. При n =2 вероятността да намерим частицата точно в центъра е нула.



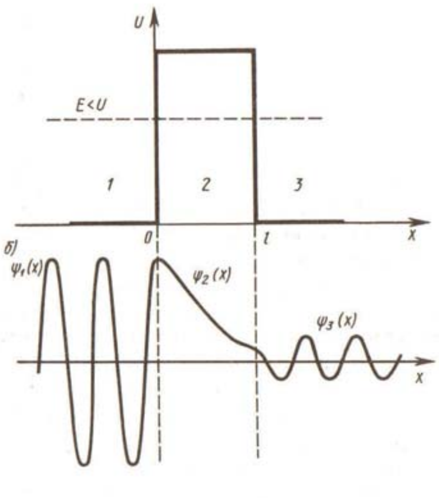
Преход към класическата физика. В класическата физика, при големите тела енергията може да заема произволни стойности и частицата може да се намира във всяка точка. Сега ще покажем как от горните резултати можем да достигнем до резултатите от класическата физика.

При големите тела масата и размерите на ямата са големи, т.е знаменателят в $E = \frac{\hbar^2\pi^2}{2mL^2}n^2$ е голям. Това означава, че множителят пред n е малък и следователно при промяна на n промяната на енергията ще е малка. Оттук се вижда, че и при големите тела енергията не може да заема произволни стойности, но позволените стойности са толкова близки, че това не се забелязва.

За големите тела $n >> 1$ и максимумите на синусоидата, т.е точките в които вероятността да намерим частицата е голяма, са много близо една до друга.

3. Тунелен ефект

Топче се движи към преграда. Ако енергията на топчето е голяма, то ще преодолее преградата. Ако енергията му е малка, то ще се издигне до някаква височина и после ще се върне обратно. Когато става дума не за топче, а за малка частица се оказва, че има някаква вероятност частицата да премине през преградата дори и да няма достатъчно енергия. Това явление се нарича *тунелен ефект*.



На горната фигура е показана правоъгълна преграда, като енергията на частицата не е достатъчна да преодолее преградата. На долната фигура е показана вълновата функция, получена като решение на уравнението на Шрьодингер. Вижда се, че амплитудата е по-голяма отляво на преградата, т.е. по-вероятно е частицата да не премине. Отдясно на преградата амплитудата на вълновата функция е по-малка, това означава, че има, макар и по-малка вероятност частицата да мине отдясно. Изчисленията показват, че вероятността частицата да премине през преградата се дава от израза:

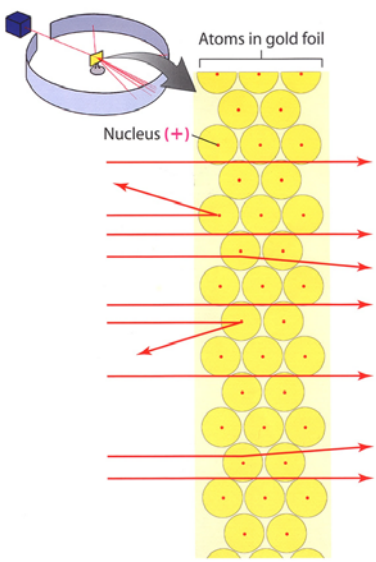
$$D = D_0 e^{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2m(U-E)}l}$$

Изразът показва, че с увеличаване на масата на частицата и ширината на преградата вероятността за преминаване намалява. Затова при големите тела (поради голямата им маса) този ефект не се наблюдава. Докато частицата е в преградата потенциалната й енергия е по-голяма от пълната й енергия, което в класическата физика е невъзможно (това е нарушение на закона за запазване на енергията). В квантовата механика, поради съотношенията за неопределеност $\Delta E.\Delta t \geq h$. Това означава, че ако частицата преминава през преградата за време Δt, неопределеността на енергията е $\Delta E \geq h/\Delta t$. Ако потенциалната енергия на бариерата е от този порядък, то частицата може да преодолее преградата.

Пример за тунелен ефект. Алфа частиците нямат достатъчно енергия да напуснат ядрото, но поради тунелния ефект те все пак се излъчват от ядрата при радиоактивно разпадане.

Строеж на атома

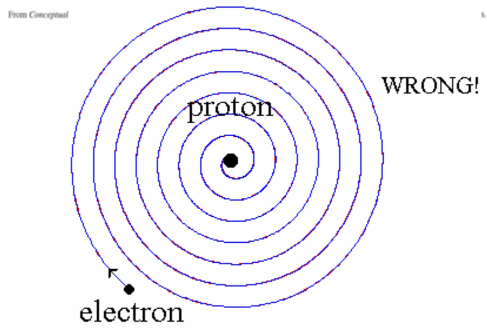
Figure 3.17 Rutherford's interpretation

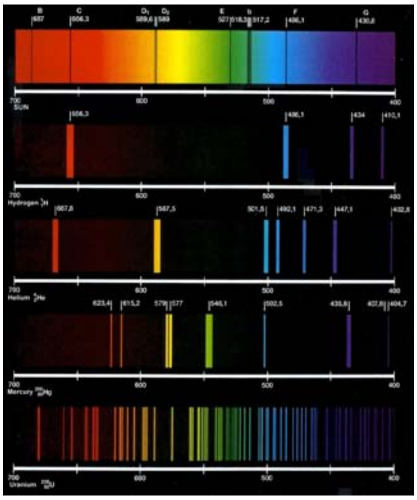


1. Опит на Ръдърфорд

Ръдърфорд насочил сноп от алфа-частици (хелиеви ядра) към тънко златно фолио. Повечето от алфа-частиците преминали през фолиото без да се отклонят. Малка част от алфа-частиците се отклонили на малък ъгъл и съвсем малка част се отклонили на голям ъгъл или се върнали обратно. Въз основа на този опит може да се направи извода, че масата на атома е съсредоточена в малко положително ядро, около което обикалят електрони. Тъй като масата на електроните е много по-малка от масата на алфа-частиците, при удар с електрон алфа-частицата не променя траекторията си. Голямо отклонение се получава само, когато алфа-частицата премине близо до ядрото. Ако алфа-частицата е насочена точно срещу някое ядро, тя се отразява след удара в обратна посока.

Изчисленията показали, че размерите на ядрото са около 100 000 пъти по-малки от размера на атома. Първоначалната идея на Ръдърфорд била, че атомите обикалят около ядрото подобно на планетите около Слънцето. Затова този модел на атома бил наречен планетарен. Той има следния недостатък: когато една заредена частица като електрона се движи по окръжност, тя излъчва електромагнитни вълни. При това тя губи енергия и радиусът на окръжността, по която се движи намалява. В крайна сметка, след много кратко време електронът ще падне на ядрото. Тъй като това не се наблюдава експериментално, станало ясно, че класическата физикане може да обясни строежа на атома.





2. Спектър на водородния атом

Когато през призма или дифракционна решетка се пропусне светлина, различните цветове (дължина на вълната и честота) се отклоняват на различен ъгъл. Полученото на екрана разпределение на цветовете се нарича спектър. На фигурата е показан спектърът на слънчевата светлина (най-горе) и на светлина, излъчена от атоми на водород, хелий, живак и уран. Вижда се, че атомните спектри се състоят от отделни линии, докато спектърът на слънчевата светлина е непрекъснат.

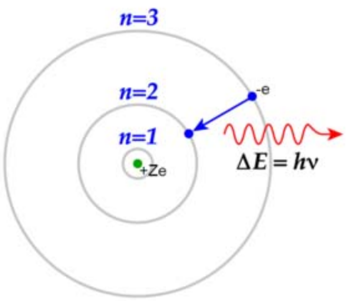
3. Постулати на Бор

Първият опит да се изгради квантова теория за строежа на атома е била направен от Нилс Бор. Съгласно тази теория:

1) *Електроните се движат само по стационарни орбити. При движението си по стационарна орбита електронът не излъчва енергия. Дължината на всяка стационарна орбита е равна на цяло число вълни на дьо Бройл.*

2) *При преминаване на електрон от орбита с енергия E_m на орбита с енергия E_k се излъчва (или поглъща) фотон с честота:*

$$h\nu = E_m - E_k$$



Честотите на светлината, излъчена от водородния атом, получени от теорията на Бор са в съгласие с експерименталните резултати от наблюдение на спектъра. Но теорията на Бор е вътрешно противоречива, тъй като смесва елементи от класическата и квантовата физика.

4. Квантови представи за строежа на атома.

В съвременната физика задачата за строежа на водородния атом се решава от квантовата механика. Както бе казано в предни лекции, основното уравнение на квантовата механика е уравнението на Шрьодингер.

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E-U)\psi = 0$$

Тук $U = -\dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ е потенциалната енергия на движение на електрона в електричното поле на ядрото, e е зарядът на електрона, ε_0 е електричната константа, r е разстоянието от ядрото до електрона, m е масата на електрона.

Оказва се, че това уравнение има решение само при определени условия, които ще изредим по-долу:

1) *Енергията E не може да заема произволни стойности, а само стойности определени от условието*: $E_n = -\dfrac{1}{n^2}\dfrac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2}$

Тук $n = 1, 2, 3, ...$ цяло число, наречено ***главно квантово число.***

2) *Моментът на импулса на електрона* L (масата, умножена по скоростта и радиуса на окръжността) *може да заема само стойности определени от условието*: $L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

Тук $l = 0, 1, 2, ...(n-1)$ е цяло число, наречено ***орбитално квантово число***.

3) Моментът на импулса на електрона L е вектор. Ако приложим външно магнитно поле в посока *z*, *проекцията на* L *в посока z може да заема само стойности, определени от условието:*

$$L_z = \hbar m_l$$

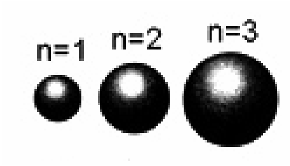
Тук m_l е цяло число, заемащо стойности от $-l$ до $+l$, наречено ***магнитно квантово число.***

Пример. Да се намерят възможните стойности на квантовите числа за n = 1, 2 и 3.

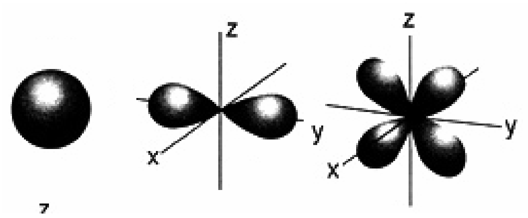
$n = 1$	$l = 0$ и $m_l = 0$.
$n = 2$	$l = 0$ и $m_l = 0$
	$l = 1$ и ($m_l = -1$, $m_l = 0$, $m_l = 1$)
$n = 3$	$l = 0$ и $m_l = 0$
	$l = 1$ и ($m_l = -1$, $m_l = 0$, $m_l = 1$)
	$l = 2$ и ($m_l = -2$, $m_l = -1$, $m_l = 0$, $m_l = 1$, $m_l = 2$)

След като се реши уравнението на Шрьодингер, се получава вълновата функция. Както бе казано в предишни лекции, квадратът на абсолютната й стойност дава вероятността да намерим електрона в дадена точка. Затова в съвременната физика не се говори за орбита, по която електронът се движи около ядрото, а за електронен облак, в различни точки на който можем да намерим електрона с определена вероятност.

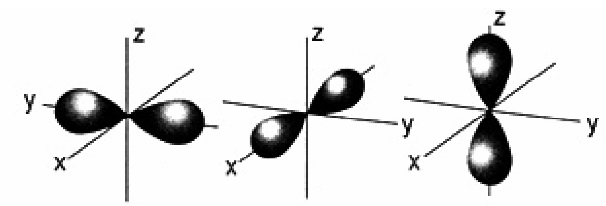
Главното квантово число и орбиталното квантово число характеризират размера на електронния облак и неговата форма. Магнитното квантово число характеризира ориентацията на електронния облак в пространството.



На фигурата: Различни стойности на главното квантово число n , $l = 0$ и $m_l = 0$.

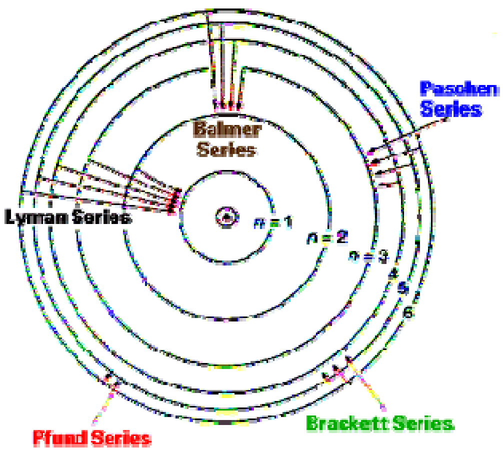


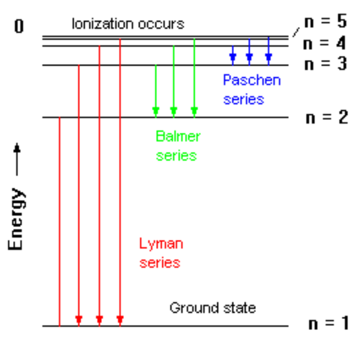
На фигурата: Различни стойности на орбиталното квантово число l .



На фигурата: Различни стойности на магнитното квантово число m_l при $l = 1$.

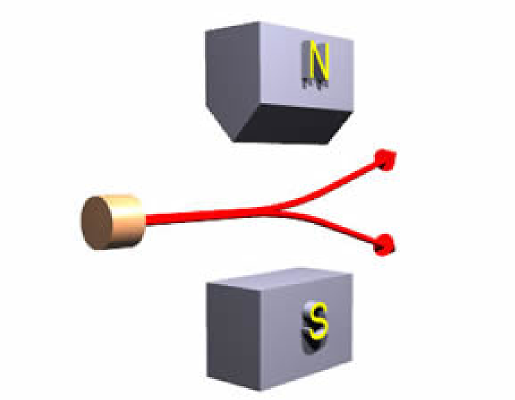
Както бе споменато по-горе, не е правилно да се говори за орбита, по която електронът се движи около ядрото, както е показано на лявата фигура. Различните енергетични нива (енергии, съответстващи на различно главно квантово число) се изобразяват като прави линии (дясната фигура). Вертикалните линии със стрелки съответстват на различни преходи на електрона от едно енергетично ниво на друго, при което се излъчва фотон.





Многоелектронни атоми

1. Спин на електрона



Щерн и Герлах пропуснали сноп от атоми през магнитно поле. Магнитният момент на атомите, породен от орбиталното движение на електроните бил равен на нула, поради което се очаквало, че магнитното поле няма да повлияе на движението. Опитът показал, че снопът електрони се разцепил на две. За да обяснят този резултат Уленбек и Гаутсмит предположили, че електронът притежава *собствен момент на импулса* и свързан с него *собствен магнитен момент*. Първоначално се е считало, че този собствен момент на импулса се дължи на въртене не електрона около собствената ос и затова бил наречен *спин* (от английски spin – въртя се). Днес се приема, че спинът на електрона е негово вътрешно свойство, подобно на заряда и масата. Големината на собствения момент на импулса (спина) се определя по общите правила на квантовата механика:

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$$

Тук s се нарича спиново квантово число и има стойност ½. Проекцията на спина по направление на външно магнитно поле се определя от:

$$L_{sz} = \hbar m_s$$

където $m_s = \pm\frac{1}{2}$ се нарича магнитно спиново квантово число.

Спин притежават и други частици. Например протоните и неутроните също имат спин ½. Такива частици се наричат *фермиони*. Други частици имат спин цяло число, например 1 (фотоните) или нула (π-мезони). Те се наричат бозони.

2. Принцип на Паули.

Състоянието на всеки електрон се характеризира от четири квантови числа:

главно n

орбитално l

магнитно m_l

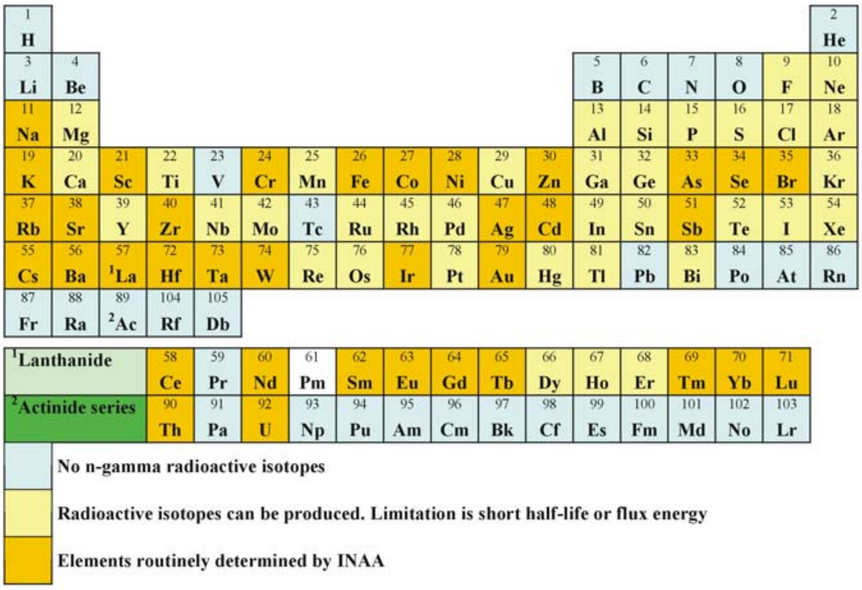
магнитно спиново m_s

Принципът на Паули гласи, че *в един атом не може да има два електрона, за които и четирите квантови числа са еднакви.*

Съвкупността от електроните в един атом с едно и също главно квантово число се нарича слой. Всеки слой се състои от подслоеве с едно също орбитално квантово число. Максималният брой атоми в слой с главно квантово число n е $2n^2$.

3. Периодична таблица на Менделеев.

Поредният номер на елементите в периодичната таблица е равен на броя на електроните в атома. Химичните и някои физични свойства се определят от най-външните електрони и за това периодичност в химическите свойства трябва да бъде свързана с периодичност в подредбата на най-външните електрони.



Първият елемент – водород H има един електрон, характеризиран с квантови числа $n = 1$, $l = 0$, $m_l = 0$ и $m_s = 1/2$ или $-1/2$. Вторият елемент – хелий He има два електрона, характеризирани с квантови числа $n = 1$, $l = 0$, $m_l = 0$ и $m_s = 1/2$ и $n = 1$, $l = 0$, $m_l = 0$ и $m_s = -1/2$. С това завършва слоят с главно квантово число $n = 1$. Запълването на слоевете и подслоевете нататък е представено в следната таблица:

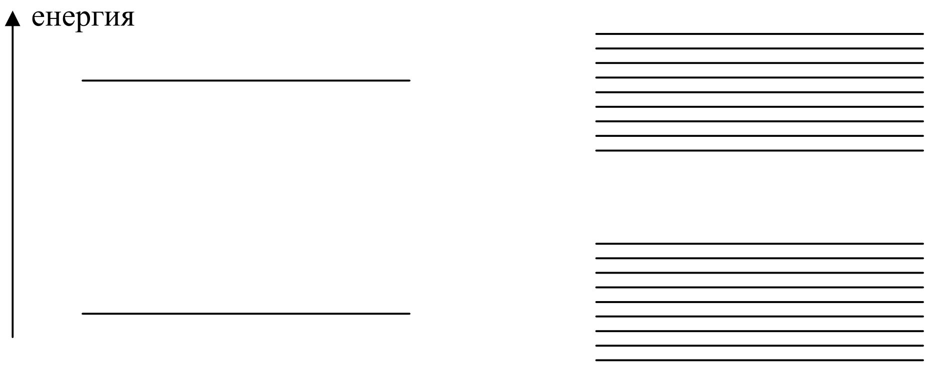
номер	елемент	$n = 1,\ l = 0$	$n = 2,\ l = 0$	$n = 2,\ l = 1$	$n = 3,\ l = 0$
1	H	1			
2	He	2			
3	Li	2	1		
4	Be	2	2		
5	B	2	2	1	
6	C	2	2	2	
7	N	2	2	3	
8	O	2	2	4	
9	F	2	2	5	
10	Ne	2	2	6	
11	Na	2	2	6	1

От таблицата се вижда, че първият слой ($n = 1$) е запълнен при елемента хелий He. Вторият слой ($n = 2$) е запълнен при елемента неон Ne. Затова тези два елемента имат сходни химични свойства – те са инертни газове.

При елемента литий Li има само един електрон от слоя ($n = 2$). Подобно е положението и с елемента натрий Na - само един електрон от слоя ($n = 3$). Затова и двата елемента имат сходни химични свойства – те са алкални метали.

Зонен модел на веществото

Дотук разглеждахме изолирани атоми. Електроните във всеки атом могат да имат само някои стойности на енергията – енергетични нива. Когато имаме един кристал с голям брой атоми (от порядъка на $10^{22} - 10^{23}$ атома), в резултат на взаимодействието между тях, енергетичните нива на отделните атоми се изместват и се образуват зони.



Енергетични нива на изолиран атом.

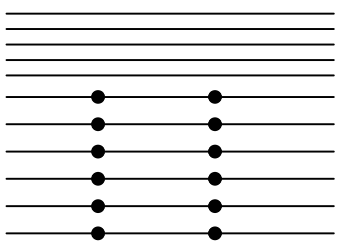
Зони в кристал. Във всяка зона има толкова енергетични нива, колкото са атомите в кристала.

Доколко една зона е запълнена с електрони зависи от това, доколко е запълнено съответното енергетично ниво в атома. Ако например едно ниво запълнено с електрони и съответната зона ще е напълно запълнена. От незаетите нива се образуват свободни зони, а от частично запълнените нива – частично запълнени зони.

Зоната, възникнала от енергетичното ниво, на което се намират валентните електрони се нарича *валентна зона.*

1. Метали.

При металите има два случая. Първо, възможно е валентната зона да е само частично запълнена. Тогава, под действие на външно електрично поле, електроните могат да се ускорят и да увеличат енергията си (да минат на по-горно енергетично ниво). Втората възможност е валентната зона да се припокрива с намиращата се над нея свободна зона (тя се нарича *зона на проводимост*). Тогава отново има свободни енергетични нива и електроните могат да получават енергия от електрично поле.



2. Диелектрици (изолатори)

При диелектриците валентната зона е напълно запълнена. Между нея и зоната на проводимост има област без енергетични нива, която се нарича *забранена зона*.

Близо над запълнената валентна зона няма свободни енергетични нива. За да се увеличи енергията на електрона е необходимо да му се предаде енергия, по-голяма от ширината на забранената зона. Обикновено електричното поле не може да предаде такава енергия на електрона и веществото не провежда ток.

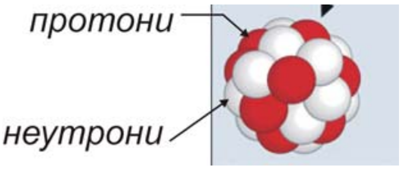
3. Полупроводници

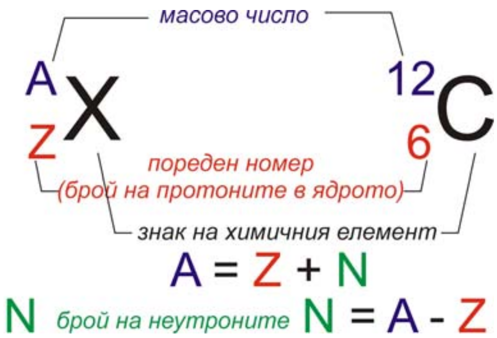
Това са вещества, които заемат междинно място между металите и диелектриците. При тях подобно на диелектриците има забранена зона, но нейната ширина е малка. При температура близка до абсолютната нула всички електрони са във валентната зона и веществото е диелектрик. При повишаване на температурата някои електрони придобиват достатъчно енергия да преодолеят забранената зона. В резултат на това веществото става проводник.

Състав и строеж на атомното ядро. Ядрени взаимодействия.

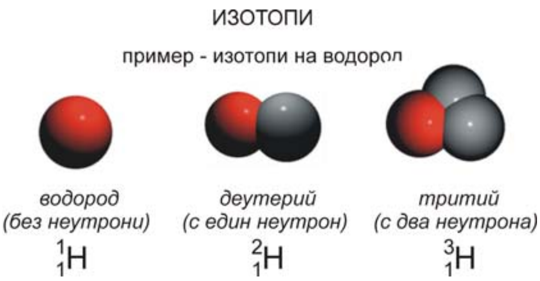
1. Основни понятия

Ядрото се състои от протони и неутрони. Броят на протоните е равен на броя на електроните в електронната обвивка и на *поредния номер* на елемента в таблицата на Менделеев. Сумата от броя на протоните и неутроните се нарича *масово число*. На дясната фигура е показано как се записват поредния номер и масовото число и е даден пример с елемента въглерод С. Протоните и неутроните се наричат общо нуклони.



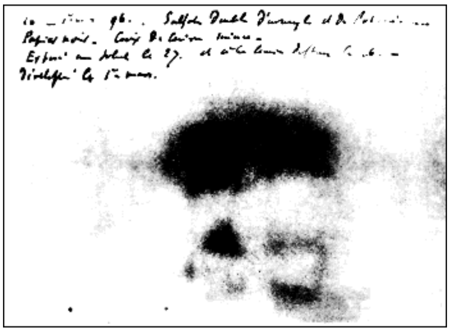


нуклон	маса	заряд
протон	$m_p = 1,672.10^{-27}$ kg $m_p = 1,007\,276$ u	$e = +1,6.10^{-19}$ C
неутрон	$m_n = 1,675.10^{-27}$ kg $m_n = 1,008\,665$ u	0



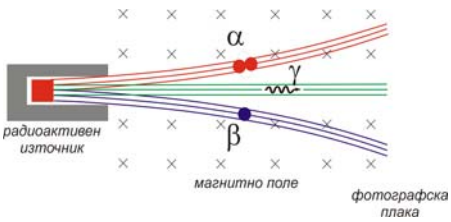
В таблицата са дадени масата и заряда на нуклоните. Понякога масата се измерва в атомни единици за маса 1 u ≈ 1.660×10^{-27} kg.

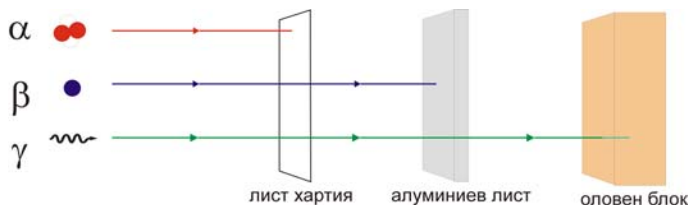
Химичните свойства на елементите се определят от електроните (броят им е равен на броя на протоните). Ядра с еднакъв брой протони, но с различен брой неутрони се наричат *изотопи*.



2. Радиоактивност

Радиоактивността е процес, при който нестабилни ядра излъчват частици или енергия. Открита е от Бекерел, който поставил къс уран върху фотохартия. Въпреки, че фотохартията била обвита, след проявяването й Бекерел забелязал осветяване на хартията с формата на къса уран. Изводът бил, че уранът излъчва някакви лъчи, които осветяват хартията. Когато по-късно тези лъчи били пуснати през магнитно поле било установено, че те са три вида –алфа, бета и гама лъчи. *Алфа лъчите са хелиеви ядра, бета лъчите – електрони и гама лъчите – електромагнитни вълни с много малка дължина на вълната*. Проникващата способност на различните видове лъчи е различна. Най-голяма е проникващата способност на гама лъчите (виж фигурата по-долу).

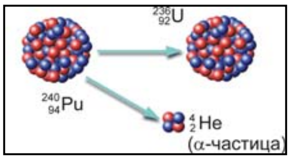




Процесът на <u>алфа разпадане</u> се записва така: $^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$

Пример:

$^{240}_{94}Pu \longrightarrow {}^{236}_{92}U + {}^{4}_{2}He$



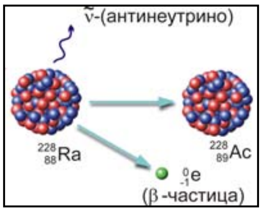
Процесът на <u>бета разпадане</u> се записва така: $^{A}_{Z}X \longrightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}$

Един от неутроните в ядрото се превръща в протон. Появява се един електрон и още една частица, наречена антинеутрино.

$n^0 \longrightarrow p^{+1} + e^{-1} + \tilde{\nu}^0$

неутрон протон електрон антинеутрино

Пример: $^{228}_{88}Ra \longrightarrow {}^{228}_{89}Ac + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}$

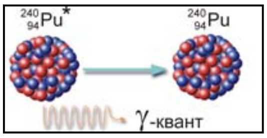


При <u>гама разпадане</u> ядрото преминава от състояние с по-голяма енергия в състояние с по-малка енергия при което се излъчва фотон (гама квант).

$^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$

$^{240}_{94}Pu^{*} \longrightarrow {}^{240}_{94}Pu + \gamma$

ядро във възбудено състояние



3. Период на полуразпад

Разпадането на радиоактивните ядра е случаен процес. Вероятността за разпадане на едно ядро за единица време ще означим с λ. Ако има N на брой ядра след време dt ще се разпаднат $dN = -\lambda N dt$ (знакът минус означава, че броят на ядрата намалява).

$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ интегрираме $\int\limits_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int\limits_{0}^{t} \lambda dt$ откъдето $\ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t$ и $N = N_0 e^{-\lambda t}$

Тук N_0 е броят на ядрата в началния момент $t = 0$.

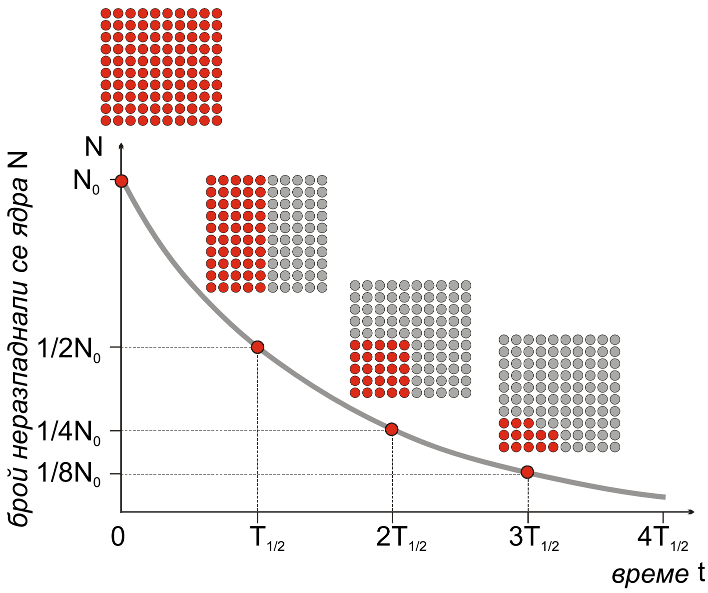
Период на полуразпад наричаме времето, за което половината от радиоактивните ядра се разпадат. Означава се с $T_{1/2}$.

След време $t = T_{1/2}$ ще останат $N = \frac{N_0}{2}$ ядра.

$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$ откъдето може да се получи, че $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ и $N = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} N_0$.

Пример. Радиоактивният изотоп Ксенон 135 има период на полуразпад 9 часа. Каква част от първоначалното количество ядра ще остане след 27 часа?

$N=\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}N_0 \quad N=\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{27}{9}}N_0 \quad N=\left(\frac{1}{2}\right)^{3}N_0 \quad N=\frac{1}{8}N_0$ Отговор: една осма част.

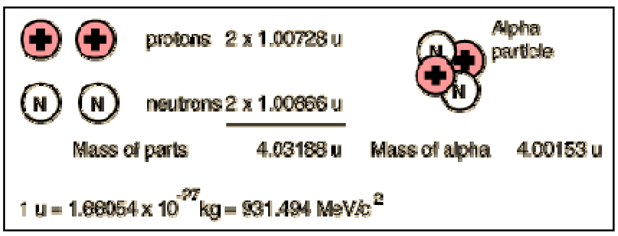


Някои примери за периоди на полуразпад:
Уран 238 – 4,47 милиарда години
Радий 228 – 5,75 години
Полоний 212 – 0,3 микросекунди

4. Ядрени сили

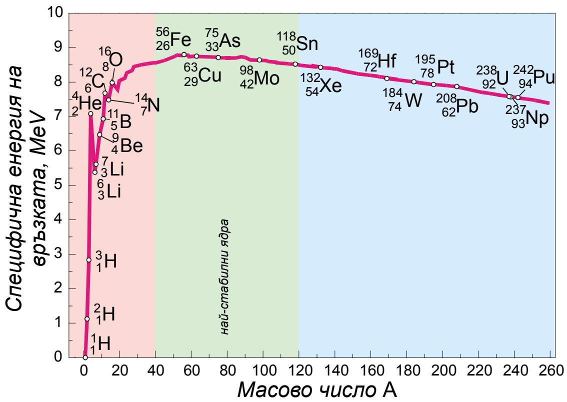
Протоните са положително заредени частици и следователно между тях действат сили на отблъскване. Ясно е, че действат и други сили, които задържат частиците в ядрото. Ядреното взаимодействие между нуклоните се нарича *силно взаимодействие*. Особеностите на ядрените сили са:

1. Действат на близки разстояния (от порядъка на размера на ядрото)
2. Те са сили на привличане
3. Действат по един и същи начин и на протони и на неутрони
4. Дължат се на обмен на частици, наречени мезони



5. Масов дефект и енергия на връзката

Оказва се, че масата на ядрото е по-малка от масите на съставящите го частици. Например масата на една алфа частица е 4,0015 атомни единици за маса, а сумата от масите на съставящите го протони и неутрони е 4,03188 атомни единици за маса. *Разликата между масата на ядрото и сумата от масите на съставящите го частици се нарича масов дефект* Δm. Обяснението е, че Δm съответства на енергия на връзката ΔE. *Енергията на връзката е енергията, необходима за разделянето на ядрото на отделни протони и неутрони*. Връзката между ΔE и Δm се дава от теорията на относителността: $\Delta E=\Delta mc^2$, където c е скоростта на светлината.



Енергията на връзката, разделена на масовото число се нарича специфична енергия на връзката. От графиката се вижда, че тя е най-голяма за елементите от средата на периодичната система и затова те са най-стабилни (необходима е най-голяма енергия за да се разрушат)

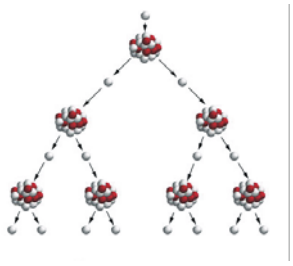
5. Ядрени реакции

Удари на ядрото с частици, в резултат на което се променя съставът на ядрото се наричат ядрени реакции. Ядрена реакция, при която едно тежко ядро се разцепва на две по-леки ядра се нарича *реакция на делене*.

Например неутрон може да предизвика делене на ядрото на урана:

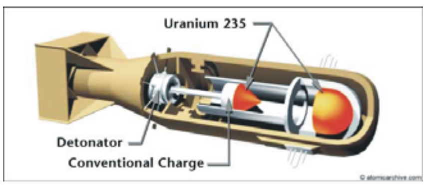
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{139}_{56}Ba + ^{94}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n$$

Ядрата, получени в резултат на деленето са различни, различен е и броят на получените неутрони. Винаги сумата от масовите числа на ядрата преди реакцията е равна на сумата от масовите числа на ядрата след реакцията. Същото се отнася и за поредните номера.

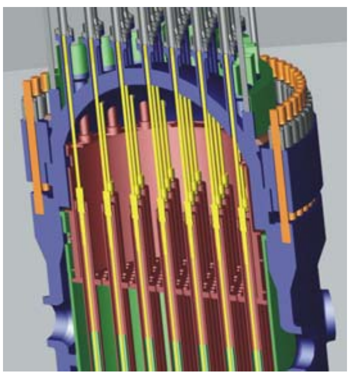


Възможно е всеки от получените неутрони да предизвика делене на нови уранови ядра – протича *верижна реакция*. Ако уранът е само малко късче, възможно е много от неутроните да напуснат урана без да предизвикат делене на нови ядра. Минималната маса на урана, при която протича верижна реакция се нарича *критична маса*.

При атомните бомби уранът е разделен на две или няколко части с маса под критичната. Когато бомбата трябва да се взриви, тези части се съединяват, масата става по-голяма от критичната, започва верижна реакция и се отделя голямо количество енергия.



В ядрените реактори реакцията се управлява, като в касетите с уран се вкарват пръти от вещество силно поглъщащо неутрони. Чрез изваждане или вкарване на тези пръти реакцията се усилва или отслабва. В реактора има още вода, която се загрява до висока температура в резултат на деленето на ядрата. След това тази топлина се използва за производство на електроенергия.



Ядрена реакция, при която става сливане на две леки ядра се нарича *ядрен синтез*. Например при сливането на два изотопа на водорода се получава хелий: $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$. При това се отделя голямо количество енергия. Подобни реакции протичат в ядрото на Слънцето и другите звезди. На Земята реакция на синтез се осъществява при взрив на водородна бомба. Една от големите задачи на съвременната физика е осъществяването на управляема реакция на термоядрен синтез, която би осигурила огромно количество енергия на човечеството.