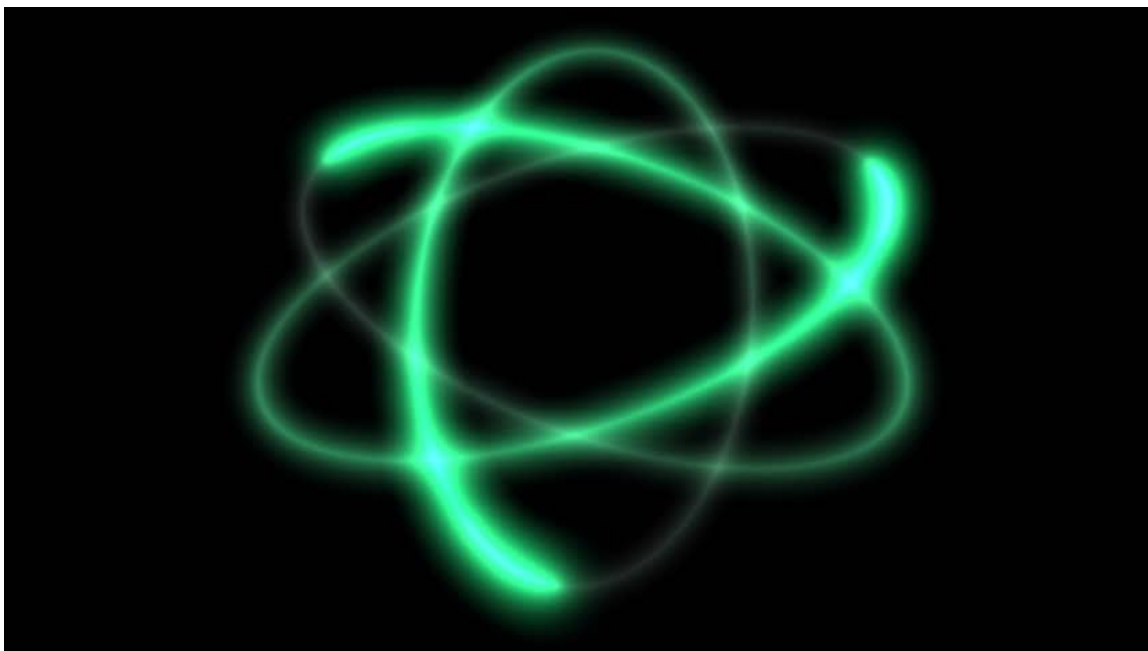


## Атоми и електрони. Връзка между маса и енергия

Проф. П. Райчев

Кл. Тютюлков



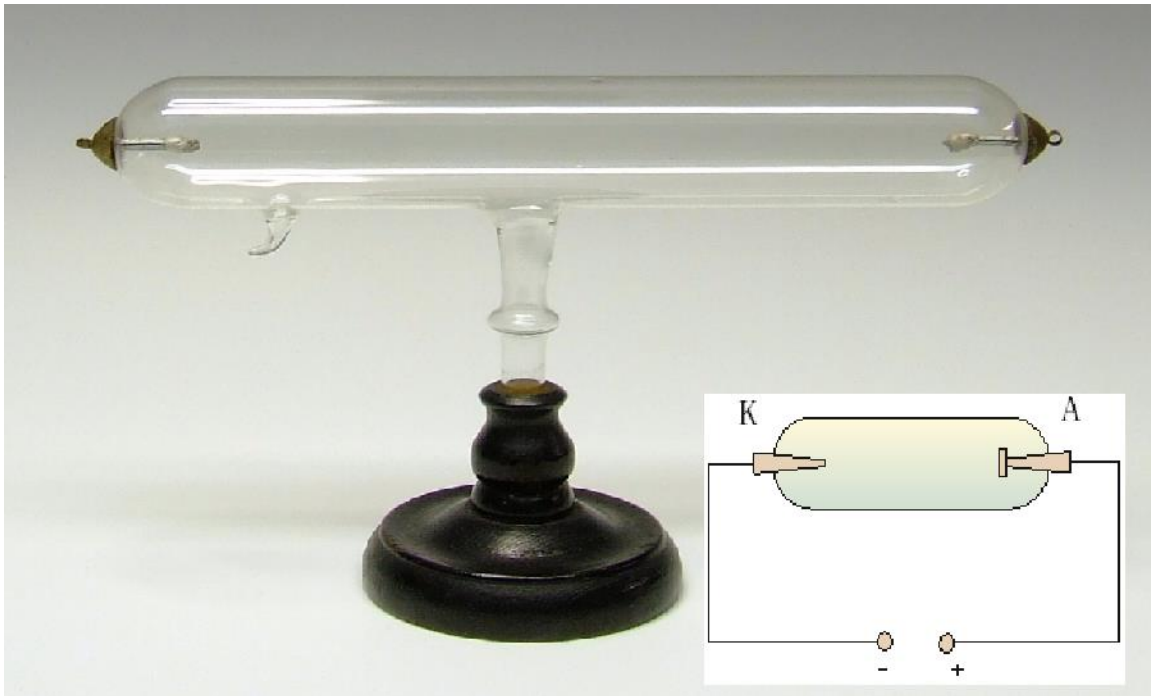
Догадката за съществуването на атомите (*Атом* означава *неделим*) -- най-малките, последни и неделими по-нататък частици на материята – е изказана още през V – IV в. пр. Хр. Тази идея съпътства цялото развитие на науката повече от две хилядолетия, има горещи привърженици и още по-разпалени противници, без обаче да получи сериозни експериментални доказателства. Едва в началото на 19 в., благодарение на химията, атомната хипотеза получи по-сериозни доказателства. Създадената в средата на 19 в молекулно–кинетична теория на газовете прави идеята за атомите още по-правдоподобна.

По ирония на съдбата съществуването на атомите е доказано, едва когато станало ясно, че атомите не са неделими. В края на 19 в. е установено, че при определени условия от тях могат да се отделят отрицателно заредени частици, наречени електрони. По същото време било установено, че атомът представлява сложна постройка, в центъра на която се намира положително заредено ядро, съдържащо почти цялата маса на атома и около което обикалят електроните. Оказва се също, че ядрата на някои химични елементи не са вечни, а могат спонтанно да излъчват частици и да се превръщат в ядра на други елементи. Тези т.нар. радиоактивни превръщания показват, че и атомните ядра имат сложна структура и са съставени от по-малки частици, наречени елементарни частици. Въпросът дали елементарните частици не са съставени от други, още по-малки частици, остава нерешен и до сега. И така, предположението на древните мислители, че съществуват най-малки и неделими по-нататък частици на материята остава недоказано и до днес. Ясно е обаче, че заобикалящите ни тела имат сложна

вътрешна структура. Нейното изследване е предмет на атомната физика.

### Електрони

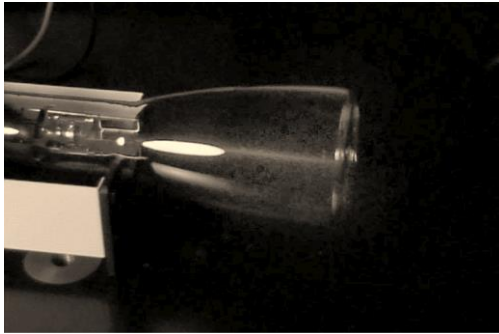
В средата на 19 в. немският стъklar Гайслер приготвил стъклена тръба, към която били запоеани два електрода – катод К със сравнително остър връх и анод А с произволна форма. (фиг. 1) Въздухът от тръбата бил изпомпен, а на електродите било подадено високо напрежение.



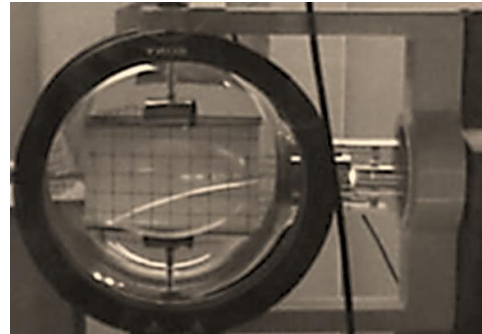
фиг. 1. Гайслерова тръба

Гайслер забелязал, че от катода излизат някакви лъчи, а останалият в тръбата въздух с ниско налягане започва да свети. С намаляване на налягането светенето на газа постепенно изчезва, а върху стъклената повърхност срещу катода се появява светещо петно. Оказало се, че светещото петно винаги се намира срещу катода (независимо от това, къде се намира анодът), а ако срещу катода се постави някаква преграда, нейната сянка се откроява върху светещото петно. Това показва, че от катода наистина излизат някакви лъчи, които били наречени *катодни лъчи*.

По-късно било установено, че катодните лъчи се отклоняват от електрични и магнитни полета. Това отклонение е такова каквото би трябвало да бъде, ако катодните лъчи представляват сноп от отрицателно заредени частици. Това предположение било проверено от френския физик Перен, който установил, че частиците изпускани от катода са отрицателно заредени.



Катодна тръба

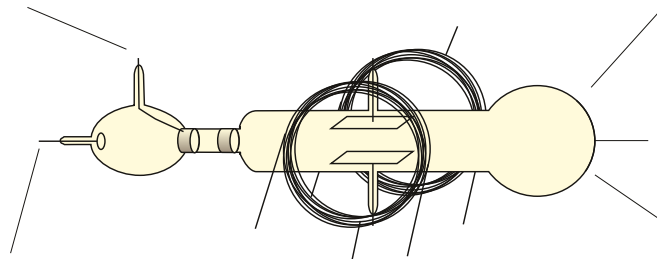


Отклонение на катодните лъчи в магнитно поле

фиг. 2

Най-подробни изследвания върху катодните лъчи извършил английският физик Дж. Дж. Томсън в края на 19 в. Той установил, че катодните лъчи се влияят не само от магнитни, но и от електрични полета и доказал, че катодните лъчи представляват поток от заредени частици, които се откъсват от катода с огромни скорости. Томсън определил скоростта на тези частици и отношението на електричния им заряд  $q$  към масата им  $m$  (т.нар. *специфичен електричен заряд*)

Томсън си служил със следната апаратура, която за онова време била много сложна, макар че днес изглежда като детска играчка (фиг. 3). (Всъщност тя е предтеча на използваните до неотдавна телевизионни кинескопи)



фиг. 3

Тя представлява катодна тръба в която анодът  $A$  е поставен в страни от катода  $K$ , така че да не пречи на движението на катодните лъчи. Снопът от лъчи преминава през система от филтри (които не са показани на фигурата), така че се получава много тънък сноп, който оставя малко светещо петънце  $O$  върху флуоресциращия екран на тръбата  $F$ . По пътя си снопът преминава през кондензатора  $C$ , на който се подава електрично напрежение, т.е. между плочите възниква електрично поле, което закривява траекторията на снопа и отмества светещото петънце "надолу" в точката  $O'$ . От двете страни на тръбата са поставени две намотки  $M$ , по които тече ток и които създават магнитно поле насочено перпендикулярно на равнината на чертежа. Магнитното поле отклонява снопа от частици "нагоре" и го връща отново в точката  $O$ . Като се знаят интензитетът на електричното поле  $E$  и индукцията  $B$  на магнитното поле, при които петънцето се отмества, може да се пресметне както скоростта на електроните  $v$ , така и техният специфичен електричен заряд

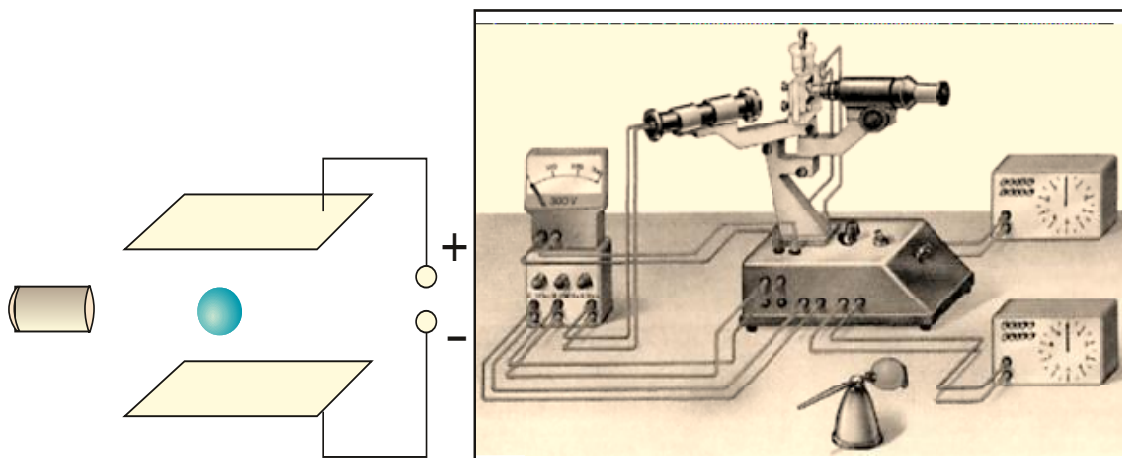
Той установил, че скоростта на частицата зависи от напрежението, прилагано между катода и анода и е много по-голяма от всички скорости в света, който наблюдаваме непосредствено с очите си (от порядъка на  $10^7 - 10^8$  m/s). Специфичният заряд на частицата, обаче винаги е един и същ и равен на:

$$q/m = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$$

Значително по-съществен е фактът, че *всички частици от катодните лъчи имат един и същ специфичен заряд, т.е. че всички те са еднакви*. Това показва, че имаме работа с един нов основен природен обект, една основна частица, която изгражда материята. Тази частица получила името *електрон*.

**Заряд на електрона.** Макар опитите на Томсън да показват, че всички електрони притежават еднакъв специфичен заряд, те още не доказват, че всички електрони са еднакви. Възможно е, (макар и малко вероятно) например, тези от тях, които имат по-голям заряд да имат и по-голяма маса, така че отношението за всички електрони да е еднакво. Поради това за учените било важно чрез непосредствено измерване да се определи зарядът на електрона. Такива опити извършва в началото на 20 в. американският физик Миликън.

Идеята е следната (фиг. 4). Капчица от течност с позната плътност  $\rho$  пада през малка дупчица между плочите на кондензатор. Перпендикулярно на пластините на кондензатора е поставен микроскоп, през който тя може да се наблюдава. Това позволява да се определи радиусът на капчицата и да се пресметне скоростта, с която тя се движи и по тези данни да се определи зарядът на електрона.



фиг. 4 Опит на Миликън

Като определя радиуса на капчицата  $r$  Миликън същевременно определя и нейния обем  $V = 4/3(\pi r^3)$  а тъй като познава плътността на течността, той определя и нейната маса  $M$ :

$$M = V\rho = 4/3(\pi r^3\rho)$$

Поради земното привличане капчицата трябва да пада между плочите на кондензатора с ускорение  $g$  равно на земното, т.е. върху нея трябва да действа сила на тежестта  $Mg$ , насочена надолу.

Много често обаче капчицата се оказва заредена<sup>1</sup>. Така върху капчицата освен силата на тежестта ще действа и електричното поле  $E$ , създадено между плочите на кондензатора, което е избрано така, че да издига частицата "нагоре". Миликън се стремил да подбере на интензитета на електричното поле, така, че то да уравни силата на тежестта, т.е. да бъде изпълнено условието:

$$Mg = qE$$

Ако това условие е изпълнено, капчицата ще "увисне" неподвижно между плочите на кондензатора. Тъй като всички величини в уравнението са известни от него може да се пресметне зарядът на капчицата  $q$ .

Миликън извършил стотици хиляди измервания на зарядите на капки от различни течности и стигнал до извода, че зарядът на капчицата винаги е целочислено кратен на един минимален електричен заряд  $e$  (т.нар. *елементарен заряд*), т.е. той констатирал, че винаги е изпълнено условието  $q = n e$ , където  $n$  е цяло число. Големината на този елементарен електричен заряд се оказала  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  С. Това е най-малкият, (елементарният) електричен заряд в природата, по-малък от който не е открит и до днес.

**Единица за енергия в атомната физика. Електрон-волт.** В края на 19 .в и началото на 20 в. основен източник на електрони за провеждане на експерименти са били катодните лъчи. Електроните "изскачат" от катода и получават определена скорост, благодарение на това че между катода и анода съществува определена потенциална разлика. Тъй като зарядът на всички електрони е един и същ, равен на  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  С, енергията на електроните се определя от потенциалната разлика между катода и анода.

От друга страна, кинетичната енергия, която получава електронът, при преминаване от една точка на електричното поле в друга точка на полето е:  $E_{\text{kin}} = e(U_1 - U_2)$ . Кинетичната енергия, която придобива електронът в електричното поле не зависи от дължината на пътя, които той изминава в полето, а *зависи само от потенциалната разлика, между началната и крайната точка на неговия път*. Поради това е удобно да се въведе специална единица за енергия, наречена *електрон-волт*, която се отбелязва с eV.

***Един електрон-волт е енергията, която получава електрон, когато бъде ускорен от потенциална разлика равна на 1 V.***

Тази единица за енергия изглежда много малка, но за микрочастиците тя е "достатъчно представителна". Така например масата на електрона също е много малка и можем да

---

<sup>1</sup> Една от причините за това може да бъде например, действието на космичните лъчи. Това са частици с висока енергия, които долитат до Земята от Космоса. Когато такава частица попадне върху капчицата, тя може да "избие" от нея един или няколко електрона и така капчицата се оказва електрически заредена

пресметнем, че един електрон с енергия 1 eV се движи със скорост от около  $6 \cdot 10^5$  m/s, която е около 1/100 от скоростта на светлината!<sup>2</sup>. Тази единица обаче е малка, когато описваме процесите, протичащи с атомните ядра и елементарните частици, където си служим с единицата мега-електрон волт  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ , а при елементарните частици използваме и единицата гига-електрон-волт ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ )}

**Маса на електрона.** След като са известни специфичният електричен заряд  $e/m$  и зарядът на електрона, може да се определи и масата на електрона. Тя се оказва равна на:

$$m_e = 9,108 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Масата и зарядът на електрона са изключително малки величини. Те показват какви са мащабите в света на атомите. Най-поразителното обаче е това, че *всички електрони в света имат напълно еднакви заряди и маси*, т.е. те са напълно еднакви частици.

Електроните се "отделят" от атомите на веществата при определени външни въздействия. Ала електроните, отделени например от атомите на златото по нищо не се отличават от тези, отделени от атомите на цинка или на хелия. Нещо повече - електроните, които се наблюдават при земни условия по нищо не се отличават от тези, които бихме наблюдавали на Марс или в някоя отдалечена галактика. Поради това електроните са едни от основните частици, които изграждат материята. Такива частици се наричат *елементарни частици*

### Въпроси и задачи

1. Какви сили действат на заегдените частици при опита на Миликен?
2. Какво разбираме под "заряд" и "специфичен заряд" на една частица?
3. Как се дефинира единицата за енергия в атомната физика?

**Зависимост на масата на електрона от скоростта.** Още в началото на 20 в. измервания извършени на електрони с много високи скорости показали, че специфичният електричен заряд на електрона намалява с увеличаване на неговата скорост, което означава че при това или зарядът или масата на електрона се изменят. Тъй като електричният заряд на електрона е една фундаментална природна константа, която определя електромагнитните взаимодействия между телата, трудно е да се допусне, че зарядът на електрона зависи от скоростта. Поради това било изказано предположението (което било в съгласие с резултатите от опитите), че масата на електрона зависи от неговата скорост съгласно закона:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

---

<sup>2</sup> Електроните в катодната тръба притежават енергии от порядъка на няколко стотин електрон-волта или няколко KeV,  $1 \text{ KeV} = 1000 \text{ eV}$ .

където  $m_0$  е масата на електрона, когато той е неподвижен (т.нар. *маса в покой*,  $c$  е скоростта на светлината, а  $v$  е скоростта на електрона.

Тази зависимост може да се напише в един по общ вид, която установява връзката между енергията и масата на частицата въобще:

$$E = mc^2$$

**Физически смисъл на еквивалентността между масата и енергията.** Обстоятелството, че може да се сложи знак за равенство между две величини като масата и енергията, които се дефинират по толкова различен начин, може да предизвика известно недоумение. Всъщност ако помислим малко, ще си спомним, че във физиката има ред величини, които са еквиваленти, макар че се определят по различен начин.

Като първи пример ще посочим масата. Масата може да се дефинира като коефициент на пропорционалност, който определя какво ускорение получава дадено тяло под действието на определена външна сила от закона  $F=ma$ . Така определената маса се нарича *инертна маса*, за да се напомни как се измерва. (Може да приложим определена сила върху частицата и след като определим ускорението, което частицата получава, да пресметнем нейната маса.)

От друга страна масата може да се определи от закона за всеобщото превличане ( $F = \gamma(mM/r^2)$ ), т.е. като разгледаме поведението на частицата в гравитационно поле. Определената по последната рецепта маса се нарича *тежка маса*. Както виждаме, тежката и инертната маса се определят по различен начин и всъщност са различни величини. Основен природен закон обаче е, че тежката и инертната маса на дадено тяло винаги са пропорционални една на друга и при подходящ избор на основните мерни единици могат да се измерват с една и съща единица – килограми.

В този смисъл можем да кажем, че инертната и тежката маса са еквивалентни. Приблизително същия смисъл влагаме и когато казваме, че масата и енергията са еквивалентни – те могат да се измерват в едни и същи единици. Така например, масата на електрона може да се измерва в единици за енергия – мега електрон-волта (MeV). В такива единици масата на електрона е 0,51 MeV .

Друг добре известен пример е еквивалентността на механичната и топлинната енергия, въпреки че тези две величини се определят по съвсем различен начин. При наличие на сили на триене, кинетичната енергия на тялото може да "изчезне" и да се превърне в енергия на вътрешното движение на молекулите на тялото, т.е. в топлина. При това количеството на "изчезналата" кинетична енергия винаги е пропорционално на "появилата" се топлина. С подобна ситуация - обаче свързана с еквивалентността на масата и енергията – се облъскваме и при взаимните превръщания на атомните ядра и елементарните частици, с които ще се запознаем по-нататък.

Фактът за еквивалентността на масата и енергията всъщност представляват едно "разширение" на валидността на закона за запазване на енергията, като към енергията на системата вече се причислява и енергията свързана с нейната маса.

Накрая ще отбележим, че ефектите, свързани със зависимостта на масата от скоростта<sup>3</sup> почти не играят роля при обясняване на движенията и превръщанията на телата, които ни заобикалят, тъй като техните скорости са пренебрежимо малки спрямо скоростта на светлината. Без отчитането на тези ефекти обаче е невъзможно да се обяснят процесите протичащи с атомите, атомните ядра и елементарните частици, а в крайна сметка – и на процесите във Вселената като цяло.

---

<sup>3</sup> Тези ефекти се наричат още релативистични (думата "релативизъм" означава относителност), тъй като те се предсказват и обясняват от теорията на относителността, създадена от Айнщайн.