

За определението на енергия на система

(или – защо енергията на водородния атом е отрицателна)

Във физиката в 10. клас има един пункт, който обикновено остава недобре изяснен – и в учебниците, и в процеса на преподаването. Той е свързан с третия постулат на Бор, според който¹ “Енергията E_n на електрона в дадено стационарно състояние на водородния атом зависи от едно цяло число n по следния начин:

$$E_n = -h \frac{R_1}{n^2} .”$$

Тази формула поражда поне два въпроса – първо, защо енергията е отрицателна, и, второ, какъв е смисълът на тази отрицателна енергия. При едно по-системно и по-задълбочено изучаване на физиката отговорите на тези въпроси въобще не представляват проблем. Проблемът е да се намерят отговори, подходящи за днешните десетокласници, т.е. съобразени със сегашните учебни програми, с това, което учениците (трябва да) знаят и с равнището, на което излагаме физиката пред тях. А това равнище вече слезе толкова ниско, налаганото ни непрекъснато “опростяване на учебното съдържание” доведе до такива пропуски по отношение на основни понятия и закономерности, че дори отговорите на прости въпроси като горепосочените стават проблем. Анализът на възможните отговори на тези въпроси разкрива следните пропуски.

Отговорът на втория въпрос – за смисъла на отрицателната енергия, е по-труден. Той се затруднява от факта, че в днешните учебни програми по физика отсъства по-общо определение за величината енергия. В 8. клас се дават определения за *кинетична* енергия, за *потенциална* енергия, за *механична* енергия, за *вътрешна* енергия, в 9. клас се говори за енергия на полето... по-общо определение за *енергия* обаче не фигурира никъде. Като резултат в съзнанието на учениците остава създадената още в 6. клас първоначална представа за енергията като мярка за ползата, която можем да получим от едно тяло (или система) чрез работата, която то е в състояние да извърши. А на това, което е полезно за нас, ние несъзнателно приписваме положителен знак и затова смисълът на отрицателната енергия въобще остава доста смътен. Това съответства и на смисъла, придаван на термина *енергия* във всекидневието – енергията е нещо, от което ние се нуждаем и във всяка наша дейност, и за да съществуваме като живи същества и т.н., нещо, за което плащаме и постоянно търсим нови източници.

Затруднение въобще не би съществувало, ако на подходящо място в механиката (напр. при по-системното ѝ изучаване в 10. клас) се включи определението, че

(I) енергията на една система е величина, чиято промяна е равна на работата на външните сили върху системата.

От това определение следва, че ако E_1 и E_2 са енергиите на една система в две нейни състояния, то:

$$(1) \quad E_2 - E_1 = A,$$

където A е работата на външните сили при прехода от първото във второто. Тази формула понякога се нарича *закон за изменение на енергията*. Тя обаче е точно толкова закон, колкото е закон и формулата $s = vt$ за пътя при равномерното движение. О своята същност тя представлява именно *определение, дефиниция* за величината енергия.

От (1) се вижда, че енергията е определена до една **адитивна** константа – (1) остава в сила, ако добавим (или извадим) една и съща константа както към E_1 , така и към E_2 . Затова, за да се избегне тази неопределеност, се правят допълнителни уговорки, които казват кога смятаме енергията за нула. Така например, ако големината на вътрешните сили намалява при увеличаване на разстоянието между частите на

¹ Вж. *Физика за 10. клас*, ч. II, *Относителност, вълни и частици*, С., Просвета, 1991, с. 44.

системата (какъвто е случаят с кулоновите и с гравитационните сили), за фиксиране на нулевото равнище към даденото определение обикновено се добавя уговорката, че когато въпросните части са безкрайно далече и не взаимодействат помежду си, съответната енергия (електрична, гравитационна) е нула. Когато между частите на системата действат сили на еластичност, ситуацията е различна, защото тези сили растат с увеличаване на деформациите (закон на Хук). Затова в този случай уговорката е, че енергията на взаимодействие е нула, когато липсват деформации.

За системи, чиято енергия е нула, когато частите им са безкрайно далече една от друга, от (1) следва *по-частното*, но в известен смисъл по полезно определение:

(II) енергията е равна на работата на външните сили при създаване на системата,

т.е. – при събиране на частите на системата от безкрайност.

Ако, накрая, освен това системата е и стационарна, т.е. не се променя с времето (в частност – статична), то във всеки момент външната и вътрешната сила, които действат на произволен неин елемент, са в равновесие, тогава получаваме трето, още по-частно, но още по-употребявано определение за енергия на такава система. Наистина, при направената уговорка за уравновесяването между външните и вътрешните сили е ясно, че работата на външните сили е равна на работата на вътрешните сили, но с обратен знак. Тъй като обикновено познати са тъкмо вътрешните, а не външните сили, по-удобно е в определението за енергия да се използва тяхната, а не на външните сили работа. При това, за да се избегне неудобството от наличието на знак минус в определението, вместо за **създаване**, в него се говори за **разрушаване** на системата. По този начин стигаме до третото определение за енергия:

(III) Енергията е равна на работата на вътрешните сили при разрушаване на системата,

т.е. – при разпръскване на частите ѝ в безкрайност.

Ясно е, че за да не се получават недоразумения, винаги трябва да се имат предвид условията, при които могат да се прилагат по-частните определения (II) и (III).

От определение (III) например следва, че енергията на всяка **статична** система, частите на която се привличат, а силите на привличане намаляват при раздалечаване на частите, е отрицателна. Наистина, при пренасяне на частите на такава система в безкрайност силите на привличане помежду им вършат отрицателна работа – следователно отрицателна е била и началната енергия на системата. Когато раздалечаваме частите, енергията на системата расте и достига своя максимум – нула, когато те са безкрайно далече една от друга.

И така, за да приключим с по-общия въпрос: **използването на общото определение за енергия може да позволи излизане от елементарното разбиране за енергията като нещо, от което можем да имаме само полза и затова винаги е положително.**

Да се върнем сега към по-частния въпрос – защо енергията на електрона във водородния атом е отрицателна? (Той би могъл да се постави и така: защо енергията на системата от протон и електрон, свързани във водороден атом, е отрицателна?)

Ако учениците знаеха, че потенциалът на точков заряд се описва с формулата:

$$(2) \quad \varphi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r},$$

а потенциалната енергия на същия заряд в точка от полето на други заряди, чиито потенциал е φ , се описва с формулата:

$$(3) \quad E_{\text{п}} = e\varphi,$$

отговор на въпроса може да се даде още в рамките на класическата физика, т.е. без отношение към постулатите на Бор. Наистина, кинетичната енергия на електрон с маса m , който се движи със скорост v , е:

$$(4) \quad E_k = \frac{mv^2}{2},$$

а потенциалната му енергия е:

$$(5) \quad E_{\pi} = (-e)\varphi = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

където r е радиусът на орбитата на електрона, а знакът минус е заради отрицателното стойност на неговия заряд.

При кръгово движение на електрона около ядрото роля на центроостремителна сила играе кулоновото привличане между протона и електрона, т.е. съществува връзката:

$$(6) \quad \frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

От (6) следва, че

$$(7) \quad E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Тогава от (5) и (7) за общата енергия на електрона (или по-точно – на системата протон–електрон) получаваме:

$$E = E_k + E_{\pi} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} < 0.$$

Подобно доказателство може да се намери в много учебници. То обаче е неприложимо поради факта, че в 9. клас формула (2) е включена само в незадължителния материал (на второ равнище). Срещу този факт не може да се протестира – формулата за кулоновия потенциал на точков заряд, макар и важна, отдавна е изпаднала от учебните програми за общозадължителната подготовка. По фрапиращо е обаче обстоятелството, че от последната учебна програма е отпаднало понятието **електрична потенциална енергия!** Според тази програма величината електричен потенциал се въвежда само чрез връзката ѝ с работата на електричните сили при отнасяне на един заряд в безкрайност, без да се спомене, че заряд, поставен в електрично поле, притежава електрична потенциална енергия. А това означава, че не може да се използва и формула (3).

Ако не беше отпаднало понятието електрична потенциална енергия, на въпроса за знака на енергията на електрона във водородния атом бихме могли да отговорим (макар и непълно) по следния начин:

Общата енергия на електрона е сума от неговата кинетична енергия, която винаги е положителна, и от неговата потенциална енергия. тъй като положителният заряд на протона създава поле, чиито потенциал е навсякъде положителен, според формула (3) потенциалната енергия на отрицателния електрон е отрицателна. Доказва се (тук е непълнотата!), че по абсолютна стойност потенциалната енергия на електрона е по-голяма от кинетичната, така че общата енергия на електрона е отрицателна. (При условие, че не може да се използва формула (2), дразнешното “доказва се” е неизбежно.)

И така, щом дори и това непълно разсъждение е неприложимо, може ли все пак да се приведе някакъв разбираем за десетокласниците довод в полза на твърдението, че енергията на водородния атом е отрицателна? Отговорът е утвърдителен, но ако се задоволим с косвен довод. Отговорът може да се опре на елементарното твърдение, че ако $a + b = 0$ и $b > 0$, то със сигурност $a < 0$. Наистина, един факт, която в 10. клас е

добре известен, е, че за да се йонизира водородният атом, т.е. за да се откъсне електронът от ядрото му, е необходимо на атома да се придаде определена енергия. Но йонизиран атом означава ядро и електрон безкрайно раздалечени – крайната енергия на такава система е нула. Тогава, щом добавянето към енергията на атома на положителна енергия дава в резултат нула, следва, че началната енергия на атома е била отрицателна.

Дали такъв отговор ще удовлетвори някого е въпрос, на който само практиката може да отговори.

Разгледаният частен въпрос е повод да обърнем внимание на факта, че последните учебни програми по физика за 7.–10. клас не дават възможност за пълноценно използване на енергетичния подход при решаване на практически важни задачи. Досегашните програми в това отношение бяха по-добри, защото в тях механиката в 8. клас се изучаваше на по-високо научно равнище и затова в 10. клас не се чувстваше нужда от връщане към въпросите за работа и енергия. Сега обаче добрата основа от 8. клас липсва, а в 10. клас не се предвижда разглеждане на тези въпроси. (В актуализирания вариант на програмата по физика за 10. клас те са оставени в допълнителния, незадължителен материал.) Според нас едно по-пестеливо излагане на координатния метод при решаване на задачите от кинематика и динамика би освободило резерв от време, който да се използва за разширяване и задълбочаване на получените в 8. клас знания за работа и енергия.