

Попенко В.И.

*старший научный сотрудник,
Научно-производственная корпорация
«Киевский институт автоматики»*

О ВЗАМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПРОТОНАМИ

Известны два основных взаимодействия электрона с протоном: кулоновское взаимодействие и слабое.

Кулоновское взаимодействие обязано электрическим зарядам электрона $-e$ и протона $+e$, состоит в уменьшении их энергии в результате взаимного погашения электрических полей при их сближении $W_k(r) = (-e)(+e)/r = -e^2/r$ и проявляется в действии сил взаимного притяжения $F = dW_k(r)/dr = e^2/r^2$.

К слабому их взаимодействию относится распад нейтрона на протон, электрон и, практически не наблюдаемое, антинейтрино, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Распаду подвержены как свободные нейтроны, так и нейтроны атомных ядер, отношение числа которых к числу протонов ядра больше величины характерной для их бета стабильности ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} X^A + e^- + \bar{\nu}$.

К слабым взаимодействиям относится также K захват электрона атомным ядром, у которого отношение числа нейтронов к числу протонов, меньше величины необходимой для его стабильности $e^- + {}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} X^A + \nu$. При этом один из протонов ядра превращается в нейтрон $e^- + p + \Delta W \rightarrow n + \nu$.

При распаде нейтрона освобождается энергия равная разности энергии покоя нейтрона и протона с электроном $\Delta W = [M_n - (M_p + m_e)]c^2 = 0,783$ МэВ.

Такое же количество энергии необходимо для объединения протона с электроном в нейтрон. Поэтому K захват вероятен, когда энергия электрона в кулоновском потенциале ядра, создаваемого суммарным зарядом протонов $eU_{я}$, по абсолютной величине $|eU_{я}|$, превосходит энергию объединения электрона с протоном в нейтрон $W \geq 0,783$ МэВ. Так, в K захвате электрона изотопом ксенона с превращением его в изотоп йода, ${}_{54}Xe^{127} + e^- \rightarrow {}_{53}I^{127} + \Delta W$, освобождается $\Delta W = 1072,7 - 1071,2 = 1,5$ МэВ, превышая $0,873$ МэВ, необходимых для объединения электрона с протоном в нейтрон.

Энергия слабого взаимодействия положительна, что соответствует взаимному отталкиванию частиц. Судя по отсутствию проявления её на расстояниях, превосходящих размеры атомов убывает она с расстоянием быстрее кулоновской энергии $W_c \propto r^{-n}$, $n > 1$. Величина её, в грубом

приближении, равна произведению максимальной энергии слабого взаимодействия $W_{\text{м.с.}} = 0,783$ МэВ на n – тую степень отношения расстояния r_c , соответствующей этой энергии к расстоянию r между частицами, $W_c(r) = W_{\text{м.с.}}(r_c/r)^n$.

Энергия взаимодействия электрона с протоном равна сумме энергии слабого и кулоновского взаимодействий:

$$W_{e,p}(r) = W_c(r) + W_k(r) = W_{\text{м.с.}}(r_c/r)^n - e^2/r. \quad (1)$$

На расстоянии, так называемого первого Боровского радиуса между электроном и протоном в атоме водорода r_H энергия их взаимодействия равна энергии ионизации атома водорода $W_{e,p}(r_H) = W_{\text{м.с.}}(r_c/r_H)^n - e^2/r_H = -0,5e^2/r_H$. Подставляя $e^2 = -2W_H r_H$ запишем $W_{e,p}(r_H) = W_{\text{м.с.}}(r_c/r_H)^n + 2W_H r_H/r_H = W_H$, откуда находим $(r_c/r_H)^n = -W_H / W_{\text{м.с.}}$.

Частицы размещаются на расстоянии r_H , на котором сила, действующая между ними, равна нулю $f = dW_{e,p}/dr = -n W_{\text{м.с.}} r_c^n / r_H^{n+1} + e^2 / r_H^2 = 0$, подставляя $e^2 = -2W_H r_H$, в $f = -n W_{\text{м.с.}} r_c^n / r_H^{n+1} - 2W_H r_H / r_H^2 = 0$, получим $r_c^n / r_H^n = -2W_H / nW_{\text{м.с.}}$.

Подставляя отношение $r_c^n / r_H^n = -2W_H / nW_{\text{м.с.}}$ в формулу энергии взаимодействия на расстоянии $r = r_H$, $W_{\text{м.с.}}(-2W_H / nW_{\text{м.с.}}) = -2W_H r_H / r_H + W_H$, получим $W_H 2/n = W_H$, откуда находим $n = 2$, и $W_H r_H^2 = W_{\text{м.с.}} r_c^2$.

При этом энергия взаимодействия электрона протоном (1) примет вид

$$W_{e,p}(r) = W_c(r) + W_k(r) = W_H (r_H/r)^2 - e^2/r \quad (2)$$

Из равенства $r_c^2 / r_H^2 = -W_H / W_{\text{м.с.}}$ оценим расстояние между электроном и протоном, на котором энергия их взаимодействия максимальна $\sim 0,783$ МэВ

$$r_c = -r_H (W_H / W_{\text{м.с.}})^{0,5} = -r_H (-13,6 / 0,783 \cdot 10^6)^{0,5} = 4,16 \cdot 10^{-2} r_H = r_H / 240.$$

Приравнявая (2) нулю, найдём расстояние r_0 , на котором энергия взаимодействия электрона с протоном равна нулю: $r_0 = 0,5r_H$.

Таким образом, известны четыре значения энергии взаимодействия электрона с протоном от расстояния между ними:

– расстояние объединения их в нейтрон $r_c = r_H / 240$, при котором энергия их взаимодействия положительна и составляет, порядка $W_{e,p}(r_c) = 0,783$ МэВ;

– расстояние $r_0 = 0,5r_H$, на котором энергия их взаимодействия равна нулю $W_{e,p}(r_0) = 0$;

– расстояние r_H , на котором энергия их взаимодействия меньше нуля и равна энергии связи атома водорода $W_{e,p}(r_H) = -13,605\text{эВ}$;

– расстояния $r > r_H$, где энергия их взаимодействия возрастает до нулевого значения обратно пропорционально расстоянию между частицами $W_{e,p}(r) \propto r^{-1}$.

Полагая, что между этих значений энергия взаимодействия изменяется плавно, и соединяя их плавной кривой, переходящей в обратно пропорциональную зависимость на больших расстояниях, получим график зависимости энергии взаимодействия электрона с протоном рис. 1.

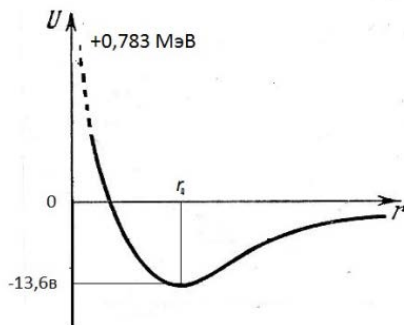


Рис. 1. Слабое и кулоновское взаимодействие электрона с протоном образуют сферическую потенциальную яму, глубиной $-13,605\text{эВ}$, на дне которой размещается электрон водорода

Внутренняя стенка ямы со стороны ядра крутая, энергия взаимодействия со значения $W_{м.с.} = +0,783 \text{ МэВ}$ при $r_c = r_H/240$ снижается до максимальной глубины ямы $-13,605 \text{ эВ}$ на расстоянии r_H пропорционально r^{-2} .

Внешняя, пологая, отрицательная энергия взаимодействия с максимальной глубины ямы $-13,605 \text{ эВ}$ возрастает до нуля на бесконечности, пропорционально r^{-1} .

Энергия W_{K_1} первого K электрона, согласно (2) равна $W_{K_1} = -W_H r_H^2 / r^2 - e q_{я} / r = -W_H r_H^2 / r^2 - z e^2 / r = -W_H r_H^2 / r^2 - z 2 W_H r_H / r$,

где $q_{я} = e z$ заряд ядра атома. Электрон размещается относительно ядра на расстоянии, на котором сумма действия сил кулоновского и слабого взаимодействий равна нулю: $F = dW_{K_1} / dr = W_H (-2 r_H^2 / r^3 + 2 z r_H / r^2) = 0$, или $r_H^2 / r^3 = z r_H / r^2$,

откуда находим, что первый электрон атомов размещается на расстоянии электрона атома водорода r_H , делёном на зарядовое число ядра атома z .

$$r(z) = r_H/z. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), находим, что энергия первого K электрона равна произведению энергии электрона водорода, на квадрат зарядового числа ядра z ,

$$W_{K_1}(z) = -W_H r_H^2/r^2 - ze^2/r = z^2(-W_H r_H^2/r_H^2 + e^2/r_H) = z^2 W_H. \quad (4)$$

Это подтверждается отношением энергии ионизации первого K электрона атомов W_{K_1} [2] к энергии ионизации атома водорода W_H :

$$z^2 \quad 1; 4; 9; 16; 25; 36; 49; 64; 81; 100.$$

$W_{K_1}(z)$ 13,59; 54,4; 122,42; 217,66; 340,13; 489,84; 666,83; 871,12; 1101,8; 1360,2.

$W_{K_1}(z)/W_H$ 1; 4,00; 9,00; 16,01; 25,018; 36,03; 49,049; 64,076; 81,044; 100,08.

Второй K электрон в результате взаимного отталкивания размещается в диаметральной точке потенциальной ямы на расстоянии $r_{e,e} = 2r_{яe}$, энергия каждого повышается на энергию взаимодействия $W_{e_1 e_2} = 0,5 e^2/r_{e,e}$; $W_{e_1} = W_{e_2} = -W_H r_H^2/r^2 - ze^2/r + 0,5 e^2/2r = -W_H r_H^2/r^2 - 1,75 e^2/r$. Подставляя $e^2 = -2W_H r_H$, получим зависимость энергии K электронов гелия от расстояния r

$$W_{e_1} = W_{e_2} = -W_H(r_H^2/r^2 - 3,5 r_H/r). \quad (5)$$

Электроны разместятся в точках, где сумма сил, действующих со стороны ядра и их взаимодействия равна нулю

$$F = dW/dr = -W_H(-2 r_H^2/r^3 + 3,5 r_H/r^2) = 0.$$

Откуда находим $r = 0,57 r_H$. Подставляя $r = 0,57 r_H$ в (5), вычислим их энергию $W_{e_1} = W_{e_2} = 13,6(3,07 - 3,5 \cdot 1,74) = 41,07$ эВ.

Зависимость энергии K электронов от зарядового числа ядра z для семи значений приведена ниже, где $r(z)$ расстояние электронов от ядра, W_1 вычисленное значение энергии электронов, W_2 экспериментальное установленное значение, Δ их разность

z 2 3 4 5 6 7 8

$r(z)$ $0,57 r_H$ $0,36 r_H$ $0,26 r_H$ $0,209 r_H$ $0,174 r_H$ $0,148 r_H$ $0,129 r_H$

W_1 41,07 102,85 191,25 306,84 449,61 619,65 816,89

W_2 39,9 99,02 185,77 299,72 440,89 609,35 805,1

Δ 2,16 3,83 5,47 7,125 8,52 10,3 11,79.

Отличие Δ экспериментального значения энергии K электронов W_2 от расчетного W_1 может объясняться тем, что измерение ионизационного потенциала, удаление или присоединение электрона, сопровождается

излучением энергии, точное количество которой учесть не представляется возможным, особенно при удалении или присоединении одного из K электронов, когда остающийся электрон, при этом меняет своё положение r и состояние с $-39,44$, до $-54,4$ эВ.

Таким образом электрону атома водорода, как и электронам прочих атомов, чтобы не упасть на протон, нет необходимости вращаться вокруг ядра, подобно планетам вокруг солнца, как предполагал Бор.

Электрон никогда произвольно не сможет упасть на протон, поскольку предельное их сближение, при котором происходит объединение их в нейтрон, требует затрат дополнительной энергии, порядка $0,783$ мэВ.

Жертвой гипотезы о планетарном вращении электрона вокруг протона стало свойство электрических зарядов излучать э.м. энергию при неравномерном движении. В дальнейшем это свойство классической физики подменили загадочным свойством квантовых частиц «испускать фотоны».

Электрон атома водорода статично размещается на дне потенциальной ямы, образуемой его кулоновским и слабым взаимодействием с протоном, на расстоянии $r_H = \Lambda/2\pi\alpha = 5,29 \cdot 10^{-9}$ см от ядра с энергией связи $W_H = -0,5\alpha^2 mc^2 = 13,605$ эВ.

Первые электроны многоэлектронных атомов размещаются в потенциальной яме, глубиной в z^2 раз большей, $W_{я,e_1}(z) = z^2 W_H$ и в z раз ближе к ядру по сравнению с атомом водорода $r_{я,e_1}(z) = r_H/z$.

Список использованных источников:

1. Власов Н.Н. Нейтроны. Москва : «Наука», 1971. 33 с.
2. Потенциалы ионизации атомов и ионов. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. М-Л: Химия. Москва, 1982. Т. 1. С. 325–327.
3. Попенко В.И. Энергия связи электронов в атомах. *Молодой вчений*. 2016. № 12(39). С. 1–6.