

Радиус атома водорода: фундаментальная константа Потапов А. А.

Потапов Алексей Алексеевич / Potapov Alexey Alexeevich – доктор химических наук,
кандидат физико-математических наук, профессор, пенсионер, г. Иркутск

Аннотация: рассматривается атом водорода как физическая константа. Дан анализ связи атома водорода с другими атомными константами. Обсуждается использование радиуса атома водорода в качестве критерия правомерности теории электронного строения вещества.

Ключевые слова: радиус атома водорода, фундаментальная константа, поляризуемость.

УДК 539.183

1. Радиус атома водорода – фундаментальная константа

Атом водорода является несводимой структурной единицей вещества, возглавляющей периодическую таблицу Менделеева. В этом отношении радиус атома водорода следует отнести к категории фундаментальных констант. Формально статус фундаментальной константы подтверждается наличием его связи с другими общепринятыми фундаментальными константами, например, [1, 2]

$$a_B = \frac{\hbar^2}{4\pi^2 m e^2}. \quad (1)$$

Здесь использовано основополагающее выражение для энергии связи атома водорода $\epsilon_H = \frac{L^2}{2ma_B^2}$, где m – масса электрона, L – момент количества движения, тождественно равный приведенной постоянной Планка $L \equiv \hbar$ [3, 4]. Фактически это означает, что радиус атома водорода выделен в природе как мировая размерная единица. Его численное значение, рассчитанное по формуле (1), может быть определено с точностью на уровне точности входящих в эту формулу констант. Погрешность определения радиуса атома водорода оценивается на уровне 10^{-6} [1, 2].

Атом Бора выступает в качестве структурообразующего элемента при формировании **одноэлектронных многозарядных катионов**, имеющих радиусы [5]

$$a_Z = a_B/Z \quad (2)$$

и соответствующие им энергии связи

$$\epsilon_Z = \epsilon_H Z^2 \quad (3)$$

Наблюдаемая дискретность радиусов и энергий связи атома водорода является следствием дискретности заряда ядра $+eZ$. По своей двухчастичной (электрон-ядерной) структуре одноэлектронные катионы подобны атому водорода и в этой связи получили название **водородоподобных катионов**. Энергия связи ϵ_Z катионов определяется кулоновским взаимодействием между зарядами ядра $+eZ$ и электрона ($-e$), разделяемых расстоянием, равным $\frac{a_B}{Z}$. Здесь радиус a_B атома водорода выступает в качестве естественной меры и структурообразующего элемента катионов водорода в последовательности $\frac{a_B}{Z}, \frac{a_B}{Z-1}, \dots, \frac{a_B}{3}, \frac{a_B}{2}, a_B$ в соответствии с порядковым номером Z элемента в таблице Менделеева [5]. Дискретность данной числовой последовательности задается дискретностью заряда ядра $+eZ$. Сопряженная радиусу катионов энергия связи также образует числовую последовательность $\{\epsilon_H Z^2\}$.

Атом водорода также предопределяет закон формирования радиусов a_n атома водорода в возбужденном состоянии $a_n = na_B$ и соответствующих им энергетических уровней $\epsilon_n = \frac{\epsilon_H}{n^2}$ [5].

Особенность радиуса водорода и водородоподобных структур заключается в том, что они, в отличие от прочих констант, имеют размерность (размерность длины) как отражение реального мира в восприятии человека. Вместе с этим радиус водорода входит в выражения ряда констант как их неотъемлемая составляющая.

Постоянная Планка \hbar представляет коэффициент, связывающий энергию излучения ϵ с частотой излучения f [6]

$$\epsilon = \hbar f. \quad (4)$$

Из этого соотношения следует $\hbar = \frac{\epsilon}{f} = \frac{mv^2}{f} = \frac{2\pi mva_B f}{f} = 2\pi L$. Здесь величина энергии ϵ определяется как электростатический потенциал заряда ядра, в поле которого происходит ускоренное движение электрона в процессе излучения, так что $\epsilon = \frac{e^2}{a_B} = mv^2$. Отсюда следует $L \equiv \hbar$, где $\hbar = \frac{\hbar}{2\pi}$ – приведенная постоянная

Планка, L – моментом количества движения, $L = mva_B$, где m – масса электрона, v – орбитальная скорость электрона. С другой стороны, радиус a_B непосредственно связан с постоянной Планка \hbar в соответствии с определением момента количества движения как произведение импульса $p = mv$ на радиус круговой орбиты a_B , т.е. $L = mva_B$. В таком виде данное соотношение раскрывает физический смысл постоянной Планка. Постоянная Планка соответствует численному значению момента количества движения, которая в соответствии с законом сохранения количества движения является атомной константой. Фактически это

означает, что *происхождение постоянной Планка обязано атому водорода* – его основополагающим параметрам, в первую очередь радиусу a_B .

Постоянную тонкой структуры в перечне фундаментальных констант представляют в следующем виде [1, 2]

$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона, c – скорость света, $\alpha = 1/137$.

Надо отметить, что в отношении постоянной тонкой структуры исторически сложилась атмосфера таинственности, проистекающая из специфических особенностей квантовомеханических представлений [7]. В этом отношении характерно высказывание Р. Фейнмана: «Всех искушенных физиков-теоретиков это число ставило в тупик и тем самым вызывало беспокойство. Непосредственно вам хотелось бы знать, откуда эта постоянная появилась... Никто не знает» [8]. В величину α обычно вкладывается смысл относительной интенсивности электромагнитных взаимодействий.

С целью установления физического смысла константы α , можно преобразовать формулу (5), используя соответствие постоянной Планка моменту количества движения, $L \equiv \hbar$, где $L = mva_B$, v – орбитальная скорость электрона, m – масса электрона, так что $\alpha = \frac{e^2}{mva_Bc} = \frac{e^2}{2a_B} \cdot \frac{2}{mv^2} \cdot \frac{v}{c} = \frac{v}{c} = a_B \frac{\omega}{c}$, где ω – круговая частота обращения электрона. Здесь $\frac{e^2}{2a_B}$ и $\frac{mv^2}{2}$ – равные между собой полная и кинетическая энергия атома водорода соответственно, так что

$$\alpha = \frac{v}{c} = a_B \frac{\omega}{c}. \quad (6)$$

Этим соотношением устанавливается прямая связь постоянной тонкой структуры α с радиусом a_B атома водорода. Физический смысл данной связи заключается в возмущении статического состояния электрона (состояния покоя), силой Лоренца, возникающей при вращении электрона по круговой орбите в центральном поле ядра [3, 4]. Количественной мерой возмущения выступает орбитальная скорость v электрона. *Своим происхождением постоянная тонкой структуры α всецело обязана атому водорода* с характерным для него динамическим поведением электрона, $\varepsilon = \frac{m\omega^2 a_B^2}{2} = mc^2 \alpha$.

Постоянная Ридберга в перечне фундаментальных констант представлена в следующем виде [1, 2]

$$Ry = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}, \quad (7)$$

Константа Ry в виде (7) сложилась в связи с тем, что в спектроскопии энергию спектральных термов принято представлять в волновых числах $1/\lambda$. Величину Ry (в единицах $[\text{см}^{-1}]$) по (7) можно преобразовать следующим образом $Ry = \frac{m e^4}{4\pi h^3 c} = \frac{m e^4}{4\pi m^3 v^3 a_B^3 c} = \left(\frac{2}{mv^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{e^2}{2a_B}\right)^2 \cdot \frac{1}{4\pi a_B} \cdot \frac{v}{c} = \frac{\alpha}{4\pi} a_B^{-1}$, где использовано равенство $L \equiv \hbar = mva_B$, а также равенство полной и кинетической энергии, $\frac{e^2}{2a_B} = \frac{mv^2}{2}$, так что $Ry = \frac{1}{\lambda} = a_B^{-1} \alpha / 4\pi$. Физический смысл связи постоянной Ридберга с радиусом a_B в этом случае заключается в том, что измеряемая длина волны λ излучения (поглощения) атома водорода является величиной постоянной и кратной его радиусу.

Если спектральные термы представлять в энергетических единицах, то ридберг Ry следует домножить на постоянную Планка и скорость света c , так что $Ry \cdot hc = \frac{m e^4 hc}{4\pi h^3 c} = \frac{m e^4}{2h^2} = \frac{e^4}{2mv^3 a_B^2} = \frac{e^2}{mv^3 a_B} \cdot \frac{e^2}{2a_B} = \frac{e^2}{2a_B} = \varepsilon_H$. В этом случае *ридберг Ry принимает смысл энергии связи ε_H атома водорода*. Самостоятельного значения как физическая константа ридберг Ry не имеет и по отношению к энергии ε_H является избыточным.

Электрический дипольный момент в перечень фундаментальных констант не входит, хотя по определению он представляет произведение двух фундаментальных констант [9]

$$\mu_e = e a_B \quad (8).$$

Физический смысл дипольного момента заключается в том, что в атоме водорода электрон и протон жестко связаны между собой кулоновскими силами и представляют единое целое в виде устойчивой атомной структуры.

Магнитный дипольный момент (магнетон Бора)

$$\mu'_m = \frac{eL}{2mc} \quad (9)$$

С учетом равенства $L \equiv \hbar$ эту формулу можно преобразовать к виду $\frac{eL}{2mc} = \frac{e m a_B}{2m} \cdot \frac{v}{c} = \frac{1}{2} e a_B \alpha$. Здесь коэффициент $1/2$ появился в результате ошибочной интерпретации магнитного момента атома водорода [4]. В действительности магнитный момент водорода всецело определяется орбитальным магнитным моментом электрона, так что исправленная величина магнитного момента должна быть равной $\mu_m = 2\mu'_m$ и окончательно $\mu_m = e a_B \alpha = \mu_e \alpha$.

Происхождение магнитного момента связано с упомянутым выше динамическим эффектом, проявляющимся в зависимости величины заряда электрона от скорости его движения, $e^* = e \frac{v}{c}$, в частности, в эффекте Лорентца [3, 4, 10], так что $\mu_m = e^* a_B$. По сути, магнитный дипольный момент – это

ортогональная составляющая электрического момента, который возникает благодаря вращению электрона. «Магнитный» дипольный момент является производной величиной от электрического дипольного момента.

Комптоновская длина волны с позиций квантовой механики представляет сдвиг длины волны рентгеновского излучения в результате его рассеяния на свободных электронах [1, 2]

$$\lambda_K = \frac{h}{m_0 c} \quad (10)$$

тракуется как фундаментальная константа.

Обращает на себя внимание тот факт, что формула для комптоновской длины волны с точностью до постоянного коэффициента совпадает с формулой для «магнитного» радиуса $a_B \alpha$ атома водорода, входящего в (9).

С учетом релятивистской поправки на массу электрона в атоме, а также с учетом того, что постоянная Планка по своему содержанию представляет собой момент количества движения $L = \hbar$ ($\hbar = 2\pi\hbar$), соотношение (10) можно преобразовать, так что

$$\lambda_K = \frac{h}{m_0 c} = \frac{2\pi m v_B a_B}{m_0 c} = 2\pi a_B \frac{v_B}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}} \approx 2\pi a_B \frac{v_B}{c}. \quad (11)$$

В эту формулу входят только постоянные величины c, a_B, v_B , объясняя тем самым ее константность, с одной стороны, и связь с «магнитным» моментом – с другой. В таком виде формула (11) помогает раскрыть физический смысл комптоновской длины волны. Присутствие в этой формуле радиуса a_B и постоянной тонкой структуры α предполагает наличие внутренней связи комптоновской длины волны с энергией ϵ_H атома водорода.

Очевидно, что под воздействием рентгеновского излучения атомы вещества ионизируются. В созданной таким образом плазме могут находиться катионы с разной кратностью зарядов, в том числе одноэлектронные водородоподобные катионы. С учетом динамического эффекта, который заключается в зависимости напряженности электрического поля от скорости движения заряда, энергию связи многозарядного одноэлектронного катиона можно записать в следующем виде [4]

$$\epsilon_Z = \frac{e^2 Z^2}{2a_B} + \frac{ev}{c} E_{\perp} = \epsilon_H Z^2 (1 + \alpha^2), \quad (12)$$

где первое слагаемое представляет энергию связи соответствующего катиона, второе слагаемое – энергию, возникающую благодаря динамическому эффекту Лорентца; $E_{\perp} = \frac{eZ^2 v}{2a_B^2 c}$ – напряженность добавочного электрического поля, обусловленного вращением электрона с орбитальной скоростью $v = \alpha c$, которую принято представлять как напряженность магнитного поля $B = E_{\perp}$.

Из данного выражения следует, что энергия излучения катиона ϵ_Z отличается от его энергии в связанном состоянии $\epsilon_H Z^2$ на постоянную величину, определяемую константой α^2 . Приведенная разность энергий соответствует приведенной разности длин волн, так что $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Z} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_Z} = \alpha^2$ и соответственно $\Delta\lambda = \lambda_K = \lambda_Z \alpha^2 = 0,457 \cdot 10^{-5} \text{ см} \cdot 5,328 \cdot 10^{-5} = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{ см} = 0,0243 \text{ \AA}$. Независимость величины $\Delta\lambda$ от заряда eZ одноэлектронных катионов объясняется законом сохранения количества движения $L = const$, из которого следует постоянство произведения va_B для всех водородоподобных катионов.

Т. о., комптоновская длина волны по своей природе связана с излучением одноэлектронных (водородоподобных) катионов, образующихся в результате ионизации атомов электромагнитными волнами рентгеновского диапазона. Количественно комптоновская длина волны определяется как разность длины волны, излучаемой водородоподобными катионами, и, собственно, длиной волны данного катиона в связанном (в основном) состоянии.

2. Связь радиуса атома с его поляризуемостью

Поляризуемость является атомной константой, представляющей фундаментальное свойство атомов, которое проявляется в упругой деформации их электронных оболочек под воздействием электрического поля [9, 11]. Исследования поляризуемости атомов в значительной мере предопределили прорыв в осознании принципиальной возможности постижения электронного строения атомов [5].

Установление связи радиуса атома водорода с его поляризуемостью представляется чрезвычайно важным. Дело в том, что данные ранних расчетов поляризуемости водорода существенно отличаются от данных эксперимента, что стало в свое время основанием для вывода о несостоятельности классического описания на атомном уровне и необходимости перехода к квантовомеханическому описанию [9, 11].

Важно отметить, что измерение поляризуемости практически не вносит возмущение в исходное состояние атома, тем самым опровергая выводы принципа неопределенности о невозможности определения геометрии атома. Авторские исследования позволили уточнить связь поляризуемости с радиусом атома водорода [5].

Существенным представляется наличие у атома водорода дипольного момента p , что предполагает взаимодействие его с внешним электрическим полем E как по ориентационному, так и по деформационному механизму [5, 9, 11]. Это означает, что наблюдаемая в эксперименте поляризуемость α_H имеет две

составляющие, $\alpha_H = \alpha_{or} + \alpha_d$. Ориентационная поляризуемость α_{or} определяет способность атомов ориентировать свой дипольный момент p вдоль воздействующего поля E . Ограничивающим фактором, который препятствует свободной ориентации диполя, выступает «сила» вращательного движения электрона по круговой орбите. Этой силе F_K соответствует кинетическая энергия ϵ_K , равная половине потенциальной энергии ϵ_P , так что $\epsilon_K = 13,6$ эВ. На рис. 1 показана схема формирования ориентационного дипольного момента.

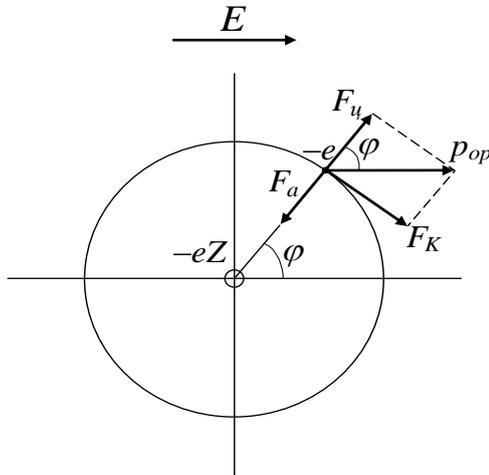


Рис. 1. Схема, поясняющая формирование ориентационного дипольного момента атома водорода

Ориентационную поляризуемость можно найти стандартным путем, усредняя величину дипольного момента по ориентациям [5, 9]

$$\langle p_{or} \rangle = \frac{\int p \sin \varphi \exp \frac{-pE \sin \varphi}{\epsilon_K} d\varphi}{\int \exp \frac{-pE \sin \varphi}{\epsilon_K} d\varphi}, \quad (13)$$

где φ – угол между направлениями поля E и вектора скорости электрона, $p_{or} = p \sin \varphi$.

С учетом малости энергии взаимодействия pE по сравнению с энергией ϵ_K , на основании данного уравнения может быть получена формула для упругой составляющей ориентационной поляризации [5, 9]

$$\alpha_{or} = \langle p_{or} \rangle = \frac{2p^2}{3\epsilon_K}, \quad (14)$$

где учтено усреднение $\sin^2 \varphi = 2/3$.

Подстановка в (14) известных величин, $\epsilon_K = 13,6$ эВ, $a_B = 0,53 \text{ \AA}$, $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГС дает $\alpha_{or} \approx 0,20 \text{ \AA}^3$. На долю деформационной поляризации приходится $\alpha_H - \alpha_{or} = \alpha_d = (0,667 - 0,20) \text{ \AA}^3 = 0,467 \text{ \AA}^3$.

Факт наличия у атома водорода составляющих деформационной и ориентационной поляризуемости подтверждается прямыми расчетами «оптической» поляризуемости α_d , которая является деформационной по определению. Согласно осцилляционной модели атома $\bar{\alpha}_d = \frac{e^2}{m\omega^2}$, где e и m – элементарный заряд и масса электрона; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 – собственная частота колебаний атома, $\omega_0 = 2\pi \cdot 6,57 \cdot 10^{15}$ Гц. Подстановка известных величин в выражение для поляризуемости дает $\bar{\alpha}_d \approx 0,1485 \text{ \AA}^3$. Поляризуемость является измеряемой и, следовательно, эффективной (усредненной) величиной $\bar{\alpha}_d = \frac{\alpha_{||} + 2\alpha_{\perp}}{3}$, поэтому поляризуемость в направлении, выделенным электрическим полем E , равна $\alpha_{||} = 3\bar{\alpha}_d \approx 0,445 \text{ \AA}^3$. Небольшое отличие рассчитанной поляризуемости от экспериментальной величины, возможно, объясняется неучтенной при

расчете изгибной поляризуемости [9, 11]. В целом расчет продольной составляющей поляризуемости $\alpha_{\parallel} \approx \alpha_d$ подтверждает полученную на основании (14) величину $\alpha_d = 0,47 \text{ \AA}^3$.

Располагая данными деформационной поляризуемости, можно составить уравнение баланса составляющих внутриатомных сил. Индуцированный дипольный момент определяется как $p_d = p_i = \alpha E = e\Delta a$, где Δa – приращение радиуса атома под действием поля E . То есть дипольный момент $p_d = p_i$ определяется приращением Δa в выделенном направлении, задаваемым полем E . С другой стороны, величина α_d – это результат усреднения приращений радиуса по всем направлениям, так что $\overline{\Delta a} = \frac{\Delta a_{\parallel} + 2\Delta a_{\perp}}{3}$. Деформация атома выделена в направлении поля E , поэтому поперечная составляющая деформации равна нулю, $\Delta a_{\perp} = 0$, и соответственно $\Delta a_{\parallel} = 3\overline{\Delta a}$. Это соотношение следует учесть при составлении уравнения баланса сил. С одной стороны, это сила со стороны внешнего поля, $F_E = eE$ а другой – сила со стороны ядра, $F_a = \frac{e^2}{2a_B^2} \cdot \frac{2\Delta a}{a_B}$. Приравняв силы $F_E = F_a$, получаем уравнение баланса [9, 11]

$$\frac{e^2}{2a_B^2} \cdot \frac{2\Delta a}{a_B} = \frac{ep_{\parallel}}{\alpha_d} = \frac{e^2\Delta a_{\parallel}}{\alpha_d} = \frac{3e^2\Delta a}{\alpha_d}, \quad (5)$$

из которого следует соотношение $\alpha_d = 3a_B^3$ и соответственно основополагающее выражение для радиуса атома водорода

$$a_B = \sqrt[3]{\frac{\alpha_d}{3}}, \quad (16)$$

Рассчитанный по (16) радиус равен экспериментальной величине $a_B = 0,53 \text{ \AA}$.

Согласие рассчитываемого радиуса a_B по данным поляризуемости с экспериментом подтверждает планетарную модель Резерфорда-Бора. Это важный результат, поскольку до последнего времени считалось, что невозможность классического описания поляризуемости атома водорода является обоснованием необходимости перехода к квантовомеханическому описанию внутриатомного строения [5, 9].

Тем более что в подтверждение сказанному в рамках *квантовомеханических представлений* было получено выражение для расчета поляризуемости атома водорода $\alpha_d = \frac{9}{2}a_B^3$, которое «позволило» согласовать рассчитываемую величину α_d с экспериментальной. Но достигнутое согласие получено в результате решения уравнения Шредингера с помощью *метода пробной функции*, по сути, представляющий способ подгонки решения под нужный результат. К тому же следует помнить, что правомерность самого уравнения Шредингера остается под вопросом [5, 12].

3. Радиус атома водорода как параметр теории

В теории межатомных и межмолекулярных связей радиус водорода выступает как естественный параметр теории. Именно радиус атома водорода стал на этапе становления квантовой механики критерием правомерности уравнения Шредингера, как ее теоретической основы [5, 12].

Уравнение Шредингера описывает движение электрона e в центральном поле заряда eZ ядра и имеет следующий вид [9, 13]

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + U\psi = \varepsilon_H\psi \quad (17)$$

где m – масса электрона, U – потенциальная энергия, определяемая законом Кулона $U(r) = -\frac{Ze^2}{r}$, где r – расстояние e электрона от ядра, ∇^2 – оператор Лапласа, ψ – волновая функция, ε_H – полная энергия системы, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h – постоянная Планка.

При решении уравнения Шредингера волновую функцию представляют в виде трех составляющих. Одна из них, называемая радиальной функцией $R_{nl}(r)$, описывает поведение волновой функция ψ в зависимости от положения электрона относительно ядра атома. При решении радиальной части уравнения Шредингера была применена подстановка двух взаимно сопряженных величин [12, 14]

$$\varepsilon_n = -\frac{2\pi^2me^4Z^2}{h^2n^2}, \quad (18)$$

$$r = \frac{n\hbar^2}{2me^2Z}x, \quad (19)$$

где $x = \frac{2rZ}{na_B}$. Во-первых, это заведомо известные величины, полученные ранее в рамках теории Бора.

Во-вторых, в стремлении к формальному согласию рассчитываемых и измеряемых величин в процессе вывода уравнения (17) была допущена ошибка, повлекшая за собой цепь умозрительных и опрометчивых шагов. Ошибка состоит в том, что в процессе вывода уравнений (18) и (19) совершен подлог, когда некий виртуальный параметр теории r_{10} был отождествлен с реальным боровским радиусом a_B .

Согласно (17) энергия ε_H должна, казалось бы, представлять энергию взаимодействия точечного ядра со сферообразным электронным облаком. Согласно квантово-волновым представлениям плотность этого облака максимальна в центре атома (т. е. в месте нахождения положительно заряженного ядра!) и экспоненциально спадает по мере удаления от ядра. Придумать более нефизическую модель атома просто невозможно!

С целью придания этой модели некоторого правдоподобия, в рассмотрение введена так называемая функция радиального распределения, которая представляет искусственную конструкцию в виде произведения квадрата волновой функции $|\psi|^2$ и показательной функции r^2 , $P_{10} = 4\pi r^2 \psi \psi^* = \frac{4r^2}{a_B^3} \exp\left(-\frac{2r}{a_B}\right)$ [13, 14]. Полученная таким образом функция P_{10} имеет максимум при $r = r_{10}$. Вот это расстояние r_{10} преднамеренно (но совершенно бесосновательно) было отождествлено с боровским радиусом, так что $r_{10} \equiv a_B$ (!?)

Но радиус a_B по Бору – это радиус окружности круговой орбиты электрона, и он определен в полном соответствии с общепринятым пониманием термина «радиус». Если же следовать квантовомеханическому определению радиуса атома как сферы, в которой заключено (90 ÷ 99) % электронной плотности [6], то радиус атома водорода окажется равным $a = (3 \div 4)a_B$, т. е. много большим боровского радиуса. Так что расстояние r_{10} не может быть отождествлено с радиусом в его общепринятом понимании. Более того, величина r_{10} – это параметр теории, и он не поддается измерению в принципе. Дело в том, что положение максимума функции P_{10} (соответствующее расстоянию r_{10}) находится внутри гипотетического электронного облака, и оно недоступно для зондирующего внешнего поля в процессе измерения.

Произошла элементарная подмена понятий, когда виртуальному параметру теории r_{10} придан статус реального радиуса атома. Причина данного подлога вполне понятна: расстояние r_{10} , определяемое по формуле (19), принимается для расчета энергии ϵ_H по (18), которая, в свою очередь, принимается для сравнения с измеряемой величиной – потенциалом ионизации I_H , который выступает в качестве критерия соответствия теории эксперименту.

Принципиальное различие величин r_{10} и a_B , приводит к выводу о том, что выбор волновой функции в виде экспоненциальной функции в качестве решения уравнения Шредингера (17) оказался ошибочным. А декларируемое «согласие» рассчитываемой величины ϵ_H с данными экспериментальной величиной I_H на поверку оказалось не состоявшимся.

В *планетарной теории Резерфорда-Бора* радиус a_B атома также выступает в качестве параметра теории, которым определяется система жестко связанных между собой электрона и протона. Масса ядра намного больше массы электрона, а расстояние между ними существенно больше размеров самих микрочастиц. Единственным способом их сосуществования является динамическая система, в которой ядро выступает центром притяжения для обращающегося вокруг него электрона. При таких параметрах задача описания атома водорода близка к задаче о движении планеты вокруг солнца, известной как классическая задача Кеплера [5, 15]. В основе решения кеплеровой задачи о движении электрона в центрально-симметричном электрическом поле ядра лежат законы сохранения энергии ϵ и момента количества движения L . В полярных координатах эти законы приводят к дифференциальным уравнениям первого порядка относительно неизвестных функций радиус-вектора $r(t)$ и азимутального угла $\varphi(t)$ [3, 5, 14]

$$\epsilon(r) = \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2) - \frac{e^2Z}{r} \quad (20)$$

и

$$L = mr^2\dot{\varphi} \quad (21)$$

где eZ – заряд ядра атома.

Для решения данного уравнения обычно переходят от производных радиус-вектора по времени к производным по углу

$$\dot{r} = \frac{dr}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{L}{mr^2} \frac{dr}{d\varphi}. \quad (21)$$

Решением данного уравнения выступает функция [5, 15]

$$\frac{1}{r} = A \cos\varphi + \frac{meq}{L^2}, \quad (22)$$

в которой A – произвольная постоянная, определяемая из начальных условий.

Уравнение (22) представляет траекторию движения электрона. С другой стороны, оно является уравнением конического сечения в полярных координатах, которое имеет вид [15]

$$\frac{1}{r} = \frac{1 - \varepsilon \cos\varphi}{\varepsilon c}, \quad (23)$$

где ε – эксцентриситет, c – параметр траектории движения электрона, которому соответствуют 4 возможных типа функций: 1) гипербола, при $\varepsilon > 1$; 2) эллипс, при $0 < \varepsilon < 1$; 3) парабола, при $\varepsilon = 1$; 4) окружность, при $\varepsilon = 0$.

В предельном случае кругового движения $\dot{r} = 0$ уравнение (20) принимает следующий вид

$$\epsilon(r) = \epsilon_K + \epsilon_{\Pi} = \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{e^2Z}{r} \quad (24)$$

где ϵ_K и ϵ_{Π} – кинетическая и потенциальная энергии соответственно, r – действительное расстояние между ядром и электроном; L – момент количества движения, равный $L = mvr$; v – орбитальная скорость движения электрона с массой m ; eZ – заряд ядра.

Первое слагаемое энергии $\epsilon(r)$ в (24) представляет кинетическую энергию движения электрона, а второе слагаемое – потенциальную энергию как результат кулоновского взаимодействия заряда ядра $+eZ$ с

электроном. Существенным для уравнения (24) является то, что показатели степени при расстоянии r у первого и второго слагаемого различны. Данное обстоятельство приводит к тому, что в результате наложения функций $\epsilon_K(r)$ и $\epsilon_H(r)$ атома у результирующей зависимости $\epsilon(r)$ появляется характерный минимум потенциальной энергии, соответствующий равновесному состоянию атома. Данное состояние определяется стандартным путем (путем нахождения экстремума), так что

$$\frac{d\epsilon}{dr} = -\frac{2L^2}{2mr^3} + \frac{Ze^2}{r^2} = 0 \quad (25)$$

На основании (25) можно найти энергию связи, соответствующую *равновесному состоянию* a_B . Для атома водорода электродинамическая задача движения электрона e в центральном поле заряда ядра eZ имеет точное решение [3, 5]

$$\epsilon = -\frac{Z^2 e^2}{2a_B} \quad (26)$$

где ϵ – энергия связи, a_B – боровский радиус.

При $Z = 1$ получаем выражение для энергии связи атома водорода

$$\epsilon_H = -\frac{e^2}{2a_B} \quad (27)$$

Из всего семейства атомов условию круговой орбиты $\dot{\epsilon} = 0$ удовлетворяет только атом водорода. Физический смысл круговой орбиты атома водорода заключается в том, что движение электрона в центральном поле ядра в отсутствие внешних возмущающих факторов определяется строгим равенством зарядов ядра и электрона. В этом случае орбитальная скорость электрона постоянна, а движение по круговой орбите представляется как инерциальное.

Атом водорода является единственным из числа всех атомов, для которого энергия связи ϵ_H определена с наивысшей точностью (порядка 0,01%)[1, 2]. Она точно равна его измеряемой величине – потенциалу ионизации I_H , так что $\epsilon_H = I_H = 13,6$ эВ. Абсолютная связь радиуса a_B с энергией связи ϵ_H обеспечивает ему такую же высокую точность определения. Рассчитываемый радиус Бора равен $a_B = 0,529$ Å. Это важно, поскольку прямых методов измерения радиуса атома водорода нет.

Из приведенного выше анализа следует, что константы $\alpha, \hbar, \lambda_K, \mu_e, \mu_m, R_u$ являются производными от основополагающих констант e, c, m в сочетании с радиусом a_B , и в этой связи их следует отнести к категории атомных констант. Что касается радиуса a_B , то он представляет собой структурный элемент, состоящий из жестко связанных между собой протона и электрона, который является основой структурообразования многоэлектронных атомов и вещества в целом [16, 17]. Так что радиус атома водорода a_B является «мерой всех вещей».

Выводы

1. Радиус атома водорода как фундаментальная константа выступает естественной мерой длины и естественным структурным элементом образования атомов и вещества в целом

2. Такие атомные константы, как постоянная Планка, длина волны Комптона, постоянная Ридберга, электрический и магнитный дипольные моменты включают в себя радиус атома водорода и являются в этой связи производными от него.

3. Радиус атома водорода выступает естественным параметром теории электронного строения вещества, представляя атомный уровень.

Литература

1. *Тейлор Б.и др.* Фундаментальные константы и квантовая электродинамика. – М.: Атомиздат, 1972. – 328 с.
2. *Коэн Э.* Определение наилучших значений фундаментальных постоянных. Согласование значений фундаментальных констант. В сб. Квантовая метрология и фундаментальные константы. – М.: Мир, 1981. – с. 122–340.
3. *Потапов А. А., Минеев Ю. В.* Планетарная модель атома водорода и водородоподобных структур / Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 44. № 11. С. 1-15.
4. *Потапов А. А.* К вопросу о спине электрона / Путь науки, 2015, № 11.
5. *Потапов А. А.* Ренессанс классического атома. – М.: Издательский Дом «Наука», LAP LAMBERT Academic publishing, 2011. – 444 с.
6. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
7. *Борн М.* Тайнственное число 137.. УФН, 1936. т. XVI, вып. 6. с. 697–729.
8. *Carter J.* The Other Theory of Physics. Washington, 1994.
9. *Потапов А. А.* Деформационная поляризация: поиск новых моделей. – Новосибирск: Наука, 2004. – 511 с.
10. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1975. – 440 с.
11. *Потапов А. А.* Электронное строение атомов. – М-Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 264 с.

12. *Потапов А. А.* Наука о веществе: выход из кризиса. В сб. «Актуальные проблемы биологии, химии, физики»: материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во «ЭКОР-книга», 2011. с. 136–148.
13. *Эткинс П.* Физическая химия. Т. 1. – М.: Мир, 1980. – 584 с.
14. *Флайгер У.* Структура и динамика молекул. Т. 1. – М.: Мир, 1982. – 408 с.
15. *Киттель Ч. и др.* Механика. – М.: Наука, 1983. – 448 с.
16. *Потапов А. А.* Природа и механизмы связывания атомов. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2013. – 299 с.
17. *Потапов А. А.* Фундаментальные основы строения вещества // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 41. № 2. С. 1–29.