

## Сутегі атомының Бор ұсынған теориясы

- Бор теориясындағы энергияның квантталуы.
- Сутегі тәрізді жүйелердің спектрлік сериялары
- Ридберг тұрақтысын анықтау
- Спектрлік сызықтардың изотоптық ығысуы
- Сутегі атомының магниттік моменті
- Бор теориясының кемістіктері

1. Бор постулаттарын пайдаланып сутегі тәрізді атомдық жүйелердің спектрлеріндегі заңдылықтарды түсіндіруге болады.

Бақылау нәтижелерімен үйлесімді нәтиже алу үшін Бор сутегі атомындағы электронның импульс моменті

$$L = mvr = \hbar n, n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

шартын қанағаттандыратын дөңгелек орбиталармен ғана қозғалады деп ұйғарды, мұндағы  $n$  - кванттық сан. Осы (1) квантталу ережесінің көмегімен сутегі тәрізді жүйелердің ( $H, He^+, Li^{++} \dots$ ) стационарлық дөңгелек орбиталарының радиустарын және бұларға сай энергияларды табуға болады. Осындай жүйе ядросының заряды  $Ze$ -ге тең. Ядро массасы электрон массасынан едәуір үлкен, сондықтан электрон қозғалғанда ядроны қозғалмайды деп санауға болады.

Ньютонның 2-заңына сәйкес

$$m v^2 / r = z e^2 / (4 \pi \epsilon_0 r^2), \quad (2)$$

мұндағы  $m$  - электрон массасы,  $r$  - электрон қозғалатын дөңгелек орбитаның радиусы,  $\epsilon_0$  - электрлік тұрақты. Осыдан электронның кинетикалық энергиясы:

$$E_k = m v^2 / 2 = z e^2 / [2 (4 \pi \epsilon_0) r] \quad (3)$$

және ядроның кулондық өрісіндегі электронның толық энергиясы:

$$E = E_k + E_n = m v^2 / 2 - z e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r = -z e^2 / [2 (4 \pi \epsilon_0) r]. \quad (4)$$

(1) квантталу ережесі бойынша,  $m v r = \hbar n$ , осыдан

$$v = \hbar n / (r m). \quad (5)$$

(5)-ті (2)-ге қойғаннан кейін  $n$ -і стационарлық орбитаның радиусы үшін өрнекті аламыз:

$$r_n = 4 \pi \epsilon_0 \hbar^2 n^2 / m e^2 z. \quad (6)$$

Сутегі атомындағы ( $n=1, z=1$ ) электронның бірінші стационарлық орбитасының ( $n=1, z=1$ ) радиусы мынаған тең

$$r_1 = 4 \pi \epsilon_0 \hbar^2 / m e^2 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}. \quad (7)$$

Мұны **Бор радиусы** деп атайды.

$n$ -і стационарлық орби-тадағы электронның  $E_n$  энергиясы (4) формуламен анықталады, мұндағы  $g$ -дің орнына (6)-ны қойып,  $E_n$  үшін мынадай өрнекті аламыз:

$$E_n = -me^2e^2z^2/[2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2n^2]. \quad (8)$$

Осы формула сутегі тәрізді жүйелердегі электронның стационарлық күйлерінің энергия деңгейлерін бейнелейді. Сутегі атомы үшін, (8)-ге сәйкес, энергетикалық деңгейлер схемасы 1-суретте көрсетілген.  $n \rightarrow \infty$  болғанда энергия деңгейлері өзінің шектік  $E_\infty = 0$  мәніне қарай көршілес деңгейлер бірігіп кетеді.

Атомның энергиясы ең кіші күйі ( $n=1$ ) **негізгі** деп аталады. Сутегі атомы үшін негізгі күйге  $E_1 = -13,53$  эВ энергия сәйкес келеді. Осы энергия модулі бойынша негізгі күйдегі электронның **байланыс энергиясы** болып табылады:  $E_\delta = E_1$  негізгі күйде ( $n=1$ ) тұрған электронға, оны сутегі атомынан жұлып алу үшін, дәл осындай энергия берілуі керек. Осы себептен оны **иондау энергиясы** деп те атайды.

$$E_{\text{ион}} = E_\delta = 13,6 \text{ эВ}.$$

Атомның Бор ұсынған теориясынан алынған осы мән эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлеседі.

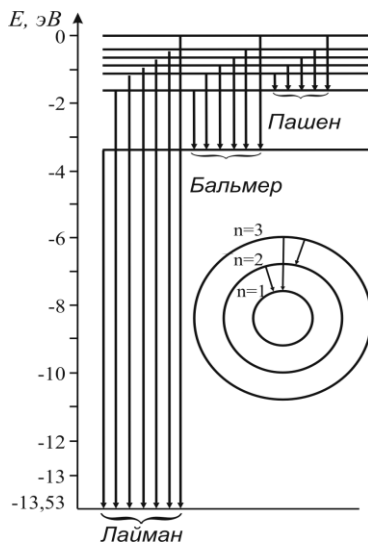
2. Атомның бір стационарлық күйден басқасына ауысқанда шығарылатын 1-сурет фотондар энергиясын анықтайтын Бордың екінші постулаты және (8) формулаға сәйкес мына өрнекті жазамыз:

$$\hbar\omega = E_2 - E_1 = m(e^2)^2z^2/[2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2](1/n_1^2 - 1/n_2^2), \quad (9)$$

осыдан фотонның жиілігі  $\omega$  және  $\tilde{\nu}$  толқындық саны мына өрнектермен анықталады:

$$\omega = m(e^2)^2z^2/[2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^3](1/n_1^2 - 1/n_2^2),$$

$$\hbar\omega = E_k - E_i = \frac{me^4Z^2}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right). \quad (9)$$



1-сурет

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c} = \frac{me^4 z^2}{4\pi(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^3 c} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (10)$$

Сонымен, біз Бальмердің жалпыланған формуласын алдық және Ридберг тұрақтысының қандай шамалардан тәуелді болатынын анықтадық:

$$R_\infty = m(e^2)^2 / [4\pi c (4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^3]. \quad (11)$$

3. (11) өрнекке  $m$ ,  $e$ ,  $\hbar$  шамаларының сан мәндерін қойып алынған  $R_\infty$ -тің сан мәні Ридберг тұрақтысының тәжірибеден белгілі мәнімен жақсы үйлеседі.  $R$ -дің  $\infty$  белгісі осы шама ядро шексіз ауыр және электрон қозғалғанда ядро қозғалмайды деп есептегенде алынған шама дегенді білдіреді.

$$R_\infty = 1.0973731 \cdot 10^7 \cdot m^{-1}$$

Ядро массасы шектеулі деп алғанда (11)-дегі электронның  $m$  массасын электрон-ядро жүйесінің  $\mu = mM/(m+M)$  келтірілген массасымен алмастыру керек, мұндағы  $M$  - ядро массасы. Сонда (11) мына түрге келеді:

$$R = R_\infty / (1 + m/M). \quad (12)$$

$R$  ядро массасына да тәуелді болады. (12) өрнек экспериментпен дәлірек келетін нәтиже береді.  $R = 1.0973731 \cdot 10^7 \cdot m^{-1}$ .

4. **Спектрлік сызықтардың изотоптық ығысуы.** Сутегі атомы үшін жоғарыда келтірілген теориялық заңдылықтар тәжірибе нәтижелерін өте дәл кескіндейді. Мәселен Ридберг тұрақтысының ядро массасына тәуелділігін (12) формула дәл беретіндігі соншалықты, осы тәуелділік негізінде сутегінің ауыр изотопы-дейтерийдің бар екендігі жөнінде қорытынды жасауға болады.  $Z$  тұрақты болғанда ядро массасының өзгеруі спектрлік сызықтардың ығысуын тудыратындығы (12), (10) өрнектерден көрінеді.

Сызықтардың осы сияқты ығысуы сутегі атомының изотоптарында да байқалуға тиіс. **Изотоптар** деп ядроларының зарядтары бірдей, ал массалары әр түрлі бір элементтің атомдарын айтады. Басқаша айтқанда изотоптардың ядроларында протондар саны бірдей де, нейтрондар саны әр түрлі болады.

Сутегінің изотоптары дейтерий мен тритий. Дейтерий атомының ядросы-дейтрон-протон және нейтроннан тұрады. Тритий атомының ядросы-тритон-протон және екі нейтроннан тұрады.

Әр түрлі изотоптар ядроларының массаларындағы айырмашылық бұлардың шығару спектрлеріндегі сызықтардың бір-біріне қатысты ығысуын туғызады. Сызықтардың осы ығысуы **ИЗОТОПТЫҚ ЫҒЫСУ** деп аталады.

Бұл ығысу болмашы ғана. Мәселен, дейтерий мен сутегі үшін  $R_D = R_\infty / (1 + m/M_D)$ ,  $R_H = R_\infty / (1 + m/M_H)$ . Демек

$$R_D - R_H \approx R_\infty (m/M_H - m/M_D) \approx R_\infty \cdot m / (2 M_H),$$

мұндағы  $M_D \approx 2 M_H$ ,  $m \ll M_H$ .

Сонда жиіліктер айырмасы мынаған тең болады:

$$\Delta\omega \approx \omega m / (2 M_H) \approx \omega / 4000.$$

Жиіліктердің осы айырмасы тәжірибеде сенімді түрде байқалады.

Мысалы, дейтерийдің  $H_\alpha$  сызығының 656,1 нм толқын ұзындығы, ал

сутегінің  $H_\alpha$  сызығына 656,3 нм толқын ұзындығы сәйкес

келеді: бұл өте аз, бірақ дейтерийді бірегейлеу үшін жеткілікті әбден анық айырмашылық. Сызықтардың осы ығысуы бойынша изотоптардың массасын есептеуге, ал сызықтардың интенсивтіктері бойынша изотоптардың мөлшері жөніндегі қорытынды жасауға болады. Сызықтардың ығысуы арқылы заттың изотоптық құрамын талдау әдісі іс жүзінде кең түрде қолданылады.

**5. Сутегі атомының магниттік моменті.** Электрон радиусы  $r$  орбита бойымен  $v$  жылдамдықпен қозғалатын болсын. Электрон орбитасын қиып өтетін аудан арқылы әр секунд сайын  $ev$  заряд тасымалданады,  $e$ -электрон заряды,  $v$ -электронның ядроны айналу жиілігі. Демек, орбита бойынша қозғалатын электрон  $i = ev$  дөңгелек тоққа пара-пар.

Осындай токтың магниттік моменті, анықтама бойынша,  $\mu = iS$  немесе  $\mu = ev\pi r^2$ .  $2\pi v = v$  болатыны ескерілгенде  $\mu$  үшін өрнек мына түрге келеді:

$$\mu = ev\pi r^2 / 2.$$

Электронның импульс моменті  $L = mvr$ , сонда

$$\mu = -eL/2m, \tag{13}$$

мұндағы "-" таңбасы  $\vec{\mu}$  және  $\vec{L}$  моменттерінің бағыттары өзара қарама-қарсы екендігіне нұсқайды.

$L$  векторы электронның **орбиталық моменті** деп аталады.

Бөлшектің магниттік моментінің оның механикалық моментіне қатынасы **гидромагниттік қатынас** деп аталады. Электрон үшін ол мынаған тең:

$$\mu/L = -e/2m. \tag{14}$$

Бордың кванттық шартына сәйкес  $L = \hbar n$ , осыны пайдаланғанда (14) өрнекті мына түрде жазамыз:

$$\mu = \mu_B \cdot n, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (15)$$

мұндағы  $\mu_B$  - Бор магнетоны:

$$\mu_B = \hbar e / 2m = 0,93 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл.} \quad (16)$$

Сонымен, электрон Бордың бірінші орбитасымен қозғалғанда оның магниттік моменті бір Бор магнетонына тең болады.

**6.** Бордың кванттық теориясы атом құрылысы жайындағы ілімнің даму жолындағы едәуір жетістік болып табылады. Ол атом ішіндегі өтетін құбылыстарды бейнелеу үшін классикалық физиканың жарамсыздығын, микродүниеде кванттық заңдардың үстем болатынын айқын көрсетіп берді. Микродүние құбылыстарын зерттеген кезде физика кездескен жаңа кванттық заңдылықтарды ұғынуда ірі қадам болды.

Бірақ Бор теориясының елеулі кемшіліктері де басынан бастап білінді. Ең алдымен бұл теория бір ізді классикалық та, бірізді кванттық та болмады, жартылай классикалық, жартылай кванттық теория болды. Бор теориясының жетімсіздігі оны сутегі атомына қолданғанда-ақ білінді: спектрлік сызықтар жиілігінің дұрыс мәндері алынғанымен, бұлардың интенсивтілігін анықтау мүмкін болмады.

Бор теориясы сілтілік металл атомдары спектрінің дублеттік сипатын түсіндіре алмады. Бор теориясы шеңберінде сутегі атомынан кейінгі қарапайым атом-гелий атомы теориясын құруға жасалған әрекеттер сәтсіз болды.

ішкі қайшылықтары бар (бір жағынан классикалық физика заңдарын қолданады, екінші жағынан - кванттық постулаттарға негізделген).

- сызықтардың интенсивтіктерін түсіндіре алмады.

- неліктен кванттық ауысулар болады деген сұраққа жауап бере алмады.

- көпэлектронды атомдарға жарамсыз болып шықты (әуелі сутегі атомынан кейінгі гелий атомына да).

Сонымен Бор теориясы кейбір деректерді дұрыс түсіндіргенімен, бірқатар басқаларын түсіндіруге жарамады. Зат бөлшектерінің толқындық қасиеттері ашылғаннан кейін, классикалық механикаға сүйенген Бор теориясы, атомдық

құбылыстардың бір ізді теориясының жасалу жолындағы өтпелі кезең бола алатындығы түсінікті болды.

### **Сұрақтар**

1. Бордың ұсынған атом моделі бойынша атомның құрылысы қандай? Резерфорд моделінен айырмашылығы неде?

2. Сутегі атомының спектріндегі сериялық заңдылықтар Бор моделі көмегімен қалай түсіндіріледі?

3. Сутегі атомының энергетикалық диаграммасын (1-сурет) пайдаланып:

а) иондану энергиясын;

ә)  $n=4$ -ке сәйкес күйдің байланыс энергиясын;

б) бірінші қоздыру потенциалын анықтаңыз.

4. Спектрлік сызықтардың изотоптық ығысуы деген не және ол қалай түсіндіріледі?

5. Орбиталық механикалық және магниттік моменттерінің бағыттарын сызып көрсетіңіз және оны түсіндіріңіз?

6. Бор магнетоны деген не?

7. Бордың кванттық теориясының кемістіктері қандай?