

СПЕКТРОСКОПІЯ ПІОННИХ АТОМІВ ТА ЕФЕКТИ СИЛЬНОЇ ПІОН-НУКЛОННОЇ ВЗАЄМОДІЇ

О.Ю. Хецеліус, д.ф.-м.н., проф.

І.М. Серга, к.ф.-м.н.,

Д.Є. Сухарев, к.ф.-м.н., доц.

А.М. Шахман, к.ф.-м.н.

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, nucserga@mail.ru*

Представлено ефективний релятивістський підхід до опису енергетичних та спектральних характеристик піонних атомів, який базується на рівнянні Клейна-Гордона-Фока з оптимізованим оптичним потенціалом сильної піон-нуклонної взаємодії і методи релятивістської багаточастинкової теорії збурень (ТЗ) з гамільтоніаном "0" наближення Дірака-Брейта-Кона-Шема (наближення до формально точної КЕД ТЗ) і коректним урахуванням релятивістських, радіаційних КЕД ефектів, ядерних ефектів кінцевого розміру ядра плюс ядерної квадрупольної деформації, а також електрон-екранувального ефекту (електромагнітний блок). Затравочний потенціал взаємодії в системі представлений у вигляді суми оптичного потенціалу π -N взаємодії, релятивістського кулонівського потенціалу, який описує взаємодію піона з ядром з урахуванням поправки Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow на кінцевий розмір ядра; узагальненого радіаційного потенціалу, що враховує основний КЕД ефект поляризації вакууму та ін., і самоузгодженого потенціалу виживших електронних оболонок. Для цілого ряду важких π^- -А, у т.ч., π^- -¹⁸¹Ta, ¹⁹⁷Au, ²⁰³Tl, ²⁰⁸Pb, ²⁰⁹Bi, отримані значення обумовлених сильною π^- -N взаємодією, зміщень і ширин 4f,3d рівнів, включаючи поправку, пов'язану безпосередньо з ефектом ядерної квадрупольної деформації. Для ряду π^- -А дані по зміщенням і ширинам рівнів у спектрі представлені вперше.

Ключові слова: рівняння Клейна-Гордона-Фока, оптичний потенціал π^- -N взаємодії, зміщення і ширини енергетичних рівнів, обумовлені сильною π^- -N взаємодією,

1. ВСТУП

В останні два десятиріччя у теорії атомного ядра і фізиці сильних взаємодій спостерігається дуже значний прогрес, пов'язаний з активним розвитком цілого ряду нових напрямків досліджень, серед яких особливе місце займає ядерна спектроскопія екзотичних адрон-атомних систем, зокрема, екзотичних (термін вперше введений Фермі-Теллером-Уілером, 1947 р.) піонних атомів. Традиційними способами вивчення структури та властивостей ядер є реакції за участю лептонів – пружне і непружне розсіювання електронів, фотоядерні реакції тощо. У всіх цих випадках взаємодії пробних частинок з нуклонами ядра набагато менше взаємодії між ними.

Особливе місце в ряду пробних частинок займають повільні піони, причому інтерес до вивчення їх взаємодії з ядрами початково був викликаний відомою обставиною – амплітуда взаємодії низькоенергетичних піонів на нуклонах мала. За теперішнього часу у зв'язку із запуском міцних прискорювачів (мезонних фабрик LAMPF-США, PSI-Швейцарія, ІЯФ-Росія, RIKEN-КЕК, Японія, DAΦNE-Італія та ін.), теоретичне вивчення взаємодії повільних піонів з ядрами стає особливо актуальним, так як велика інтенсивність піонних пучків дає можливість отримувати систематичні експериментальні дані з високою точністю. Це стимулює й проведення прецизійних розрахунків властивостей піонних атомів, які вкрай необхідні для планування подальших експериментів на цих прискорювачах.

Очевидно, дослідження спектрів піонних атомів (у загальному випадку, адронних) представляє собою дуже важливий і ефективний засіб для вивчення фундаментальних взаємодій, включаючи подальшу перевірку Стандартної моделі, та може дати вкрай важливу інформацію про властивості ядра (навіть протонний та нейтронний розподіли у ядрі) і самих адронів, про характер їх взаємодії з нуклонами, що в принципі дозволяє на основі спектроскопії рентгенівських переходів визначати і/або уточнювати значення мас, електричних та магнітних моментів, спинів, парності тощо адронів (мезонів), які дотепер є найбільш точними.

Спектроскопія піонних атомів може дати дуже важливі дані, у тому числі, для створення нових, ефективних низько енергетичних рентгенівських стандартів. Унікальними можуть бути можливості теорії піонних атомів у дослідженні властивостей важких та суперважких ядер, у тому числі, достатньо елегантних пошуках, наприклад, доведення існування піонного конденсату в ядрах.

Хоча за теперішнього часу в теорії піонних атомів розвинута група як досить простих H-like розрахункових моделей, так й більш послідовні підходи, що базуються на рівнянні КГФ з використанням феноменологічного оптичного потенціалу для врахування піон-ядерної взаємодії і розкладів по параметру типу αZ , але наявні набори параметрів у цих підходах є абсолютно ненадійними при вивченні важких систем. В той же час прогресуючий експеримент вимагає розвитку послідовних ядерно-КЕД підходів, які дозволяли

більш менш прецизійно обчислювати як внесок сильної адрон (піон)-ядерної взаємодії, так і внесок електромагнітних взаємодій, включаючи, радіаційні ефекти (поляризація вакууму тощо), кінцевий розмір ядра з коректними протонним і нейтронним розподілами, що, навіть за теперішнього часу є вкрай актуальним і складним завданням не тільки в теорії адронних атомів, але й теорії ядра [1–5]. Слід також звернути увагу на відсутність по багатьох, особливо середніх і важких піонних атомів, надійних спектральних даних.

У роботі викладено основи нового релятивістського підходу до опису характеристик π^-A на основі рівняння КГФ з безпосереднім одночасним коректним урахуванням сильної π^-N взаємодії, релятивістських, радіаційних, ядерних, е-екранувальних ефектів.

2. ТЕОРІЯ

Як відомо, піон (спін 0, маса $m_{\pi^-} = 139.57018$ МэВ, $r_{\pi^-} = 0.672 \pm 0.08\Phi$) є бозе-частинкою, тому базовим рівнянням для опису його динаміки є релятивістське рівняння КГФ (стаціонарна форма)

$$[-(\hbar c)^2 \nabla^2 + \mu^2 c^4 + 2\mu c^2 V_{\pi N}] \phi_i = (E_i - V_C)^2 \phi_i, \quad (1)$$

де μ – зведена маса піона, c – швидкість світла, V_C – сума кулонівського потенціалу взаємодії π^-z ядром (з урахуванням кінцевого розміру ядра), радіаційного (вакуум-поляризаційного) потенціалу, потенціалу, обумовленого електронним екрануванням (у важких π^-A). Для опису сильної π^-N взаємодії використовується модель оптичного потенціалу, в якій найбільш коректна форма потенціалу має узагальнений вигляд типу Ericson-Ericson [4]:

$$V_{\pi^-N} = V_{opt}(r) = -\frac{4\pi}{2m} \left\{ q(r) \nabla \frac{\alpha(r)}{1 + 4/3\pi\xi\alpha(r)} \nabla \right\}, \quad (2)$$

$$q(r) = \left(1 + \frac{m_\pi}{m_N} \right) \left\{ b_0 \rho(r) + b_1 [\rho_n(r) - \rho_p(r)] \right\} + \left(1 + \frac{m_\pi}{2m_N} \right) \left\{ B_0 \rho^2(r) + B_1 \rho(r) \delta \rho(r) \right\},$$

$$\alpha(r) = \left(1 + \frac{m_\pi}{m_N} \right)^{-1} \left\{ c_0 \rho(r) + c_1 [\rho_n(r) - \rho_p(r)] \right\} + \left(1 + \frac{m_\pi}{2m_N} \right)^{-1} \left\{ C_0 \rho^2(r) + C_1 \rho(r) \delta \rho(r) \right\}.$$

Тут $\rho_{p,n}(r)$ – розподіл щільності, відповідно протонів і нейтронів, ξ - параметр ($\xi = 0$ відповідає відсутності кореляцій, $\xi = 1$ – випадку антикореляцій між нуклонами); відповідно ізоскалярні та ізовекторні параметри $b_0, c_0, B_0, b_1, c_1, C_0, B_1, C_1$ – відповідають s -хвильовій і p -хвильовій (відштовхуючий і притягуючий член потенціалу) довжинам розсіювання у комбінованому спин-ізоспінному просторі, враховано поглинання піону (з відмінними каналами на p -

парі $B_{0(pp)}$ і p - n парі $B_{0(pn)}$, а також ізоспінова і спінова залежності амплітуди π^-N розсіювання

$$b_0 \rho(r) \rightarrow b_0 \rho(r) + b_1 \{ \rho_p(r) - \rho_n(r) \},$$

ефект Лорентц-Лоренца в p -хвильовій взаємодії. Для π^- -атому за наявності електронних оболонок хвильова функція-добуток слетерівського детермінанту електронів (рівняння Дірака) і хвильової функції π^- .

Для урахування ефекту Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow взято модель Фермі розподілу заряду в ядрі

$$\bar{\rho}(r) = \rho_0 / \{ 1 + \exp[(r - c) / a] \}, \quad (3)$$

де параметр $a = 0.523\Phi$ м, а параметр c вибирається таким чином, що середньо-квадратичний радіус $\langle r^2 \rangle^{1/2} = (0.836 A^{1/3} + 0.57)\Phi$. З урахуванням скінченного розміру ядра відповідний потенціал є

$$V_{FS}(r|R) = -\left(\frac{1}{r} \right) \int_0^r dr' r'^2 \rho(r'|R) + \int_r^\infty dr' r' \rho(r'|R), \quad (4)$$

процедуру обчислення якого зведено до розв'язання системи диференціальних рівнянь із заданими межовими умовами. Для опису електронної підсистеми важкого піонного атому використано формалізм релятивістської багаточастинкової теорії збурень (ТЗ) з гамільтоніаном “0” наближення Дірака-Брейта-Кона-Шема (наближення до формально точної КЕД ТЗ) і коректним урахуванням релятивістських, КЕД, екранувальних ефектів.

Релятивістський потенціал взаємодії взято у формі, що враховує ефекти запізнення і брейтівської взаємодії у нижчому по α (параметр тонкої структури) наближенні, тобто

$$V(r_i r_j) = \exp(i\omega_{ij} r_{ij}) \cdot (1 - \alpha_i \alpha_j) / r_{ij}, \quad (5)$$

де $\alpha_i \alpha_j$ - матриці Дірака, ω - частота переходу. Зсув енергії збудженого стану має вигляд

$$\Delta E_i = \text{Re } E_i + i \text{Im } E_i = \text{Re } E_i - (i/2) \Gamma_i^{dec},$$

де Γ_i^{dec} включає радіаційну ширину рівня, яка у рамках релятивістського енергетичного підходу (Gell-Mann і Low формалізм) пов'язана з уявною частиною матричних елементів (5).

Ключовим питанням теорії є визначення радіаційних КЕД поправок (головна з яких, безумовно, поправка на поляризацію вакууму, дія якої характерна для відстаней порядку комптонівської довжини хвилі:

$$\lambda_C^e = \hbar / m_e c = 386.16\Phi,$$

$$\pi^- \lambda_C^\pi = 1.41382\Phi.$$

В π^-A радіус Бора $r_B^\pi = 194n^2 / Z \Phi$ до енергії станів π^-A , Наш підхід базується на використанні вперше в теорії піонних атомів узагальненого радіаційного потенціалу Uehling-Serber, що враховує основну

поправку Uehling-Serber плюс ефективно члени вищих порядків $[\alpha^k(Z\alpha)]^n$ ($n, k=2, \dots$), у т.ч. поправки Källén-Sabry порядку $\alpha^2(\alpha Z)$ і Wichmann-Kroll порядку $\alpha(Z\alpha)^n$:

$$U(r) = -\frac{2\alpha}{3\pi r} \int_1^\infty dt \exp(-2rt/\alpha Z) (1+1/2t^2) \frac{\sqrt{t^2-1}}{t^2},$$

$$U(r) = -\frac{2\alpha}{3\pi r} C(g),$$

$$g = r/\alpha Z, \quad (6)$$

де для функції $C(g)$ одержана нова оптимізована апроксимаційна форма.

Перехід від потенціалу (6) для точкового ядра до потенціалу, що враховує кінцевий розмір ядра, реалізується шляхом «розмазування» потенціалу по (4).

Оцінка малих поправок, у т.ч., електромагнітних поправок на N і π^- поляризацію, релятивістської поправки на віддачу, кінцевий розмір π^- тощо проведена по методиці [1,3,7]. В [9] викладена узагальнена теорія надтонкої структури спектрів, що враховує взаємодію орбітального моменту π^- відповідно з ядерним квадрупольним і магнітним моментом. Розподіл заряду в ядрі, апроксимований в узагальненому наближенні Фермі, з урахуванням ядерної квадрупольної деформації є

$$\bar{\rho}(r) \approx \bar{\rho}_0(r) + \sqrt{\frac{5}{16\pi}} \bar{\rho}_2(r) Y_2^0(\theta). \quad (7)$$

Тут перший доданок визначається (3), а другий доданок має вигляд

$$\bar{\rho}_2(r) = \sqrt{\frac{16\pi}{5}} \beta \rho_{Nc} \cdot \exp\left[\frac{r-c}{a}\right] / \left[a \left(1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right) \right)^2 \right], \quad (8)$$

де β – параметр деформації, пов’язаний з квадрупольним моментом ядра; далі зсув енергії визначається у першому порядку ТЗ як

$$\Delta E = \beta \left[\langle V_{opt}^{(2)} \rangle + \langle \frac{E - V_C^{(0)}}{\mu} V_C^{(2)} \rangle \right], \quad (9)$$

для визначення якого обчислюються стандартні інтеграли (типа «надтонких») з використанням радіальної частини хвильової функції π^- . Для виконання всіх розрахунків нами використані PC коди “Superatom-ISAN”, “Cowan”.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У табл.1 в якості ілюстрації наведені дані (Γ^2) нашого розрахунку в межах теорії КГФ і релятивістської ТЗ радіаційних ширин 3d,4f,5g рівнів для ряду π^-A . Для порівняння наведені аналогічних дані (Γ^1) de Laat-Konijn et al розрахунку по теорії КГФ і релятивістської теорії Хартрі-Фока (РХФ).

Таблиця 1 - Радіаційні ширини (eB) 3d,4f,5g рівнів для ряду π^-A

Ядро	Γ^1_{rad} (5g)	Γ^2_{rad} (5g)	Γ^1_{rad} (4f)	Γ^2_{rad} (4f)	Γ^1_{rad} (3d)	Γ^2_{rad} (3d)
¹⁶⁵ Ho	-	15.2	-	56.1	-	228.8
¹⁷³ Yb	-	17.9	-	66.8	-	275.4
¹⁷⁵ Lu	-	20.7	-	77.5	-	320.3
¹⁸¹ Ta	25.7	23.5	90.9	88.6	369.9	366.1
²⁰³ Tl	-	37.2	-	136.8	-	557.2
²⁰⁸ Pb	41.5	39.4	146.8	143.2	587.6	583.8
²⁰⁹ Bi	43.7	41.5	156.2	153.1	617.3	613.7

В табл.2 для ряду π^-A наведені одержані на основі нашої теорії, а також альтернативні теоретичні і експериментальні зміщення і ширини (keB) 4f рівня із-за сильної π^-N взаємодії. Скорочені позначення наборів параметрів $V_{\pi N}$: Tauscher, $\xi = 0$ –Tau1; Tauscher, $\xi = 1$ –Tau2; Batty etal–Bat.; Seki etal–Sek; de Laat-Konijn et al – Laat, Shakhman et al–Sha. В нашій параметризації $V_{\pi N}$ залишені без зміни параметри, які вважаються найбільш надійно визначеними (B_0, c_0, c_1, C_0), а параметри, значення яких сильно відрізняються в різних наборах, зокрема, b_1 ($b_1 = -0.094$) плюс ще не враховані до сих пір в основних наборах $V_{\pi N}$: $ImB_1=0.10$, $ImC_1=-0.25$ були оптимізовані шляхом обчислення залежностей сильних зсувів для $\pi^-^{20}Ne, ^{24}Mg, ^{93}Nb, ^{133}Cs, ^{175}Lu, ^{181}Ta, ^{197}Au, ^{208}Pb$ від значень b_1, ImB_1, ImC_1 , після чого обрані вказані значення, які задовольняють найменшому середньоквадратичному відхиленню від надійних експериментальних значень.

Дані табл. 2 всіх альтернативних теорій (за виключенням стовпцю «H-like Func», що містить дані розрахунку в межах варіаційної теорії з релятивістськими H-like

функціями і вкрай незадовільно узгоджується з експериментальними даними.) отримані на основі рівняння КГФ з $V_{\pi N}$ Еріксона-Еріксона з різною параметризацією і ТЗ по αZ . Більш точними є дані обчислень на основі теорії КГФ з $V_{\pi N}$ типу Еріксона-Еріксона з параметрами Tau1 важких π^-A . Наша теорія показує, що більш оптимальна параметризація $V_{\pi N}$ може істотно поліпшити якість визначення характеристик π^-A , що визначаються сильною π^-N взаємодією.

Це доказують й дані обчислення обумовленого сильною π^-N взаємодією квадрупольного зміщення ϵ_2 4f рівня в спектрах декотрих π^-A , зокрема, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷³Yb, ¹⁷⁵Lu, ²⁰⁹Bi. Для ¹⁶⁵Ho, ¹⁷⁵Lu, ²⁰⁹Bi експеримент дає такі значення відп.: $\epsilon_2 = -0.053 \pm 0.027$; $\epsilon_2 = -0.089 \pm 0.029$; $\epsilon_2 = -0.007 \pm 0.005$ keB. Згідно оцінками Bakenstos і Olaniyi et al відповідно для ¹⁶⁵Ho $\epsilon_2 = -0.020$ і $\epsilon_2 = -0.025$, для ¹⁷⁵Lu - $\epsilon_2 = -0.028$ і $\epsilon_2 = -0.035$. Для ²⁰⁹Bi КГФ теорія Bakenstos дає значення $\epsilon_2 = -0.009$. Наша теорія дає такі значення: $\epsilon_2 = -0.064$ (¹⁶⁵Ho), $\epsilon_2 = -0.093$ (¹⁷⁵Lu), $\epsilon_2 = -0.008$ (²⁰⁹Bi). Для $\pi^-^{169}Tm, \pi^-^{173}Yb$, згідно нашої теорії, теоретичні значення квадрупольного внеску є відповідно -0.079 -0.086 keB (нажалу у літературі по останнім π^-A немає ні експериментальних ні теоретичних даних).

Таблиця 2 - Зсуви і ширини (кеВ) 4f рівня за рахунок сильної π -N взаємодії

$\epsilon_{4f}, \Gamma_{4f}$	Exp	H-like Func.	Tau1 $\xi=0$	Tau2 $\xi=1$
$^{165}\text{Ho}: \epsilon$	0.29±0.01	0.21	0.25 0.27	0.24 0.26
$^{169}\text{Tm}: \epsilon$	-	-	-	-
$^{173}\text{Yb}: \epsilon$	-	-	-	-
$^{175}\text{Lu}: \epsilon$	0.51±0.04	0.36	0.43	0.42
$^{181}\text{Ta}: \epsilon$	0.56±0.04	0.47	0.57	0.54
$^{197}\text{Au}: \epsilon$	1.25±0.07	-	1.21	1.14
$^{208}\text{Pb}: \epsilon$	1.68±0.04	-	1.76	1.62
$^{209}\text{Bi}: \epsilon$	1.78±0.06	-	1.94	1.80
$^{165}\text{Ho}: \Gamma$	0.21±0.02	0.08	0.13	0.12
$^{169}\text{Tm}: \Gamma$	-	-	-	-
$^{173}\text{Yb}: \Gamma$	-	-	-	-
$^{175}\text{Lu}: \Gamma$	0.27±0.07	0.14	0.23	0.22
$^{181}\text{Ta}: \Gamma$	0.31±0.05	0.16	0.31	0.30
$^{197}\text{Au}: \Gamma$	0.77±0.04	-	0.73	0.68
$^{208}\text{Pb}: \Gamma$	0.98±0.05	-	1.18	1.04
$^{209}\text{Bi}: \Gamma$	1.24±0.09	-	1.35	1.18
$\epsilon_{4f}, \Gamma_{4f}$	Bat $\xi=1$	Sek $\xi=1$	Laat $\xi=1$	Sha $\xi=1$
$^{165}\text{Ho}: \epsilon$	0.24	0.21	0.26	0.29
$^{169}\text{Tm}: \epsilon$	-	-	-	0.38
$^{173}\text{Yb}: \epsilon$	-	-	-	0.44
$^{175}\text{Lu}: \epsilon$	0.41	0.36	0.46	0.50
$^{181}\text{Ta}: \epsilon$	0.53	0.47	0.60	0.55
$^{197}\text{Au}: \epsilon$	1.12	0.98	1.25	1.24
$^{208}\text{Pb}: \epsilon$	1.58	1.39	1.68	1.65
$^{209}\text{Bi}: \epsilon$	1.78	1.57	1.83	1.77
$^{165}\text{Ho}: \Gamma$	0.13	0.11	0.13	0.20
$^{169}\text{Tm}: \Gamma$	-	-	-	0.23
$^{173}\text{Yb}: \Gamma$	-	-	-	0.26
$^{175}\text{Lu}: \Gamma$	0.24	0.20	0.24	0.28
$^{181}\text{Ta}: \Gamma$	0.31	0.27	0.31	0.30
$^{197}\text{Au}: \Gamma$	0.69	0.58	0.67	0.75
$^{208}\text{Pb}: \Gamma$	1.03	0.86	0.98	0.97
$^{209}\text{Bi}: \Gamma$	1.17	0.99	1.10	1.22

Прим. Дані з: Ericson- Ericson, Ann. Phys., 1966; Tauscher L., "π-Meson Nucleus Interaction", CNRS-Strasbourg, 1971; Batty et al, Phys. Rev. Lett., 1978; Nucl.Phys.A., 1983; Seki et al, Phys.Rev.C., 1983; Bakenstos, Ann.Rev.Nuc.,1970; Olaniyi etal, Nucl.Phys.A (1982); de Laat-Konijn et al, Phys.Lett.B.-1987; Phys. Rev A ,1991; E_{N3}-Shakhman et al; J.Phys.Cs. (IOP),2012; Itahashi et al, EPJ Web of Conf., 2012;

Таким чином, в роботі представлений ефективний релятивістський підхід до опису енергетичних та спектральних характеристик піонних атомів, що базується на рівнянні Клейна-Гордона-Фока з оптимізованим оптичним потенціалом сильної піон-нуклонної взаємодії і методі релятивістської багаточастинкової ТЗ з гамільтоніаном "0" наближення Дірака-Брейта-Кона-Шема (наближення до формально точної КЕД ТЗ) і коректним урахуванням релятивістських, радіаційних КЕД ефектів, ядерних ефектів кінцевого розміру ядра плюс ядерної квадрупольної деформації, а

також електрон-екранувального ефекту (електромагнітний блок). Затравочний потенціал взаємодії в системі представлений у вигляді суми оптичного потенціалу π -N взаємодії, релятивістського кулонівського потенціалу, що описує взаємодію піона з ядром з урахуванням поправки Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow на кінцевий розмір ядра; узагальненого радіаційного потенціалу, що враховує основний КЕД ефект поляризації вакууму та ін., і самоузгодженого потенціалу виживши електронних оболонок. Для цілого ряду важких π^- -А, у т.ч., π^- - ^{165}Ho , ^{169}Tm , ^{173}Yb , ^{175}Lu , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{203}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi , отримані значення обумовлених сильною π^- -N взаємодією, зміщень і ширин 4f,3d рівнів, включаючи поправку, пов'язану безпосередньо з ефектом ядерної квадрупольної деформації. Для ряду π^- -А дані по енергіям переходів, зміщенням і ширинам рівнів у спектрі представлені вперше, що є дуже важливим особливо з урахуванням наявності або дуже мізерних і недостатньо коректних альтернативних теоретичних і частково експериментальних даних, або їх повної відсутності взагалі (напр., для π^- - ^{169}Tm , ^{173}Yb).

REFERENCES

1. Yang F., Hamilton J.H. (Eds). *Fundamentals of nuclear models*. Singapore: World Scientific, 2010. 740 p.
2. Marciano W., White S. (Eds). *Electromagnetic Probes of Fundamental Physics*. Singapore: World Scient, 2003. 560 p.
3. Ericson T., Ericson T., Weise W. *Pions and Nuclei*. Oxford: Clarendon, 1988. 320 p.
4. Deloff A. *Fundamentals in Hadronic Atom Theory*. Singapore: World Sci., 2003. 352 p.
5. Scherer S. Introduction to Chiral Perturbation Theory. *Advances in Nuclear Physics*. Springer (Berlin), 2003, vol.27, pp. 5-50. (Eds: Negele J.W., Vogt E.W.).
6. Anagnostopoulos D., Biri S., Boisbourdain V., Demeter M., Borchert G. et al. -PSI Low-energy X-ray standards from pionic atoms. *Nucl. Inst. Methods B*, 2003, vol.205, pp. 9-18.
7. Itahashi K., Berg G., Fujioka H., Geissel H., Hayano R. et al. First pionic atom spectroscopy at RIBF. *EPJ Web of Conf.*, 2012, vol.37, pp. 01013-01036.
8. Glushkov A.V. *Relativistic Quantum Theory. Quantum, mechanics of Atomic Systems*. Odessa: Astroprint, 2008. 900 p.
9. Khetselius O.Yu. *Hyperfine structure of atomic spectra*. Odessa: Astroprint, 2008. 210 p.
10. Khetselius O.Yu. Relativistic perturbation theory calculation of the hyperfine structure parameters for some heavy-element isotopes. *Int. Journ. of Quantum Chemistry*, 2009, vol.109, no. 14, pp. 3330-3335.
11. Glushkov A.V., Khetselius O.Yu., Loboda A.V., Shakhman A.N., Svinarenko A.A., Florko T.A. *Frontiers in Quantum Methods and Applications in Chemistry and Physics*. Springer, 2014, vol.33, pp. 71-94.
12. Glushkov A.V., Khetselius O.Yu., Svinarenko A.A. Relativistic theory of cooperative muon-gamma-nuclear processes: Negative muon capture and metastable nucleus discharge. *Advances in the Theory of Quantum Systems in Chemistry and Physics*. Springer, 2012, vol.22, pp. 51-70.
13. Shakhman A.N. Relativistic theory of spectra of heavy pionic atoms with account of strong pion-nuclear interaction effects: new data for ^{175}Lu , ^{205}Tl , ^{208}Pb . *Photoelectronics*, 2014, no. 23, pp. 71-75.
14. Serga I.N., Dubrovskaya Yu.V., Shakhman A.N., Kvasikova A.S., Sukharev D.E. Spectroscopy of hadronic atoms: Energy shifts. *Journal of Physics: C Ser.* (IOP, London, UK), 2012, vol.397, pp. 012013-012018.

15. Olaniyi B., Shor A, Cheng S., Dugan G., Wu C.S. Electric quadrupole moments and strong interaction effects in pionic atoms of ^{165}Ho , ^{175}Lu , ^{176}Lu , ^{179}Hf , ^{181}Ta . *Nucl.Phys.A.*, 1982, vol. 403, pp. 572-588.
16. Eriksson M., Ericson T., Krell M. Peculiarities of the pion-nuclear interaction. *Phys.Rev.Lett*, 1969, vol.22, pp. 1189-1193.
17. Ericson M., Ericson T. Optical properties of low-energy pions in nuclei. *Ann. Phys.*, 1966, vol.36, pp. 323-362.
18. Tauscher L. Analysis of pionic atoms and the π -nucleus optical potential. *Proc.of the International Sem. "π-Meson Nucleus Interaction"*. CNRS-Strasbourg (France), 1971, pp.45-68.
19. Batty C.J., Biagi S.F., Friedman E., Hoath S.D. Shifts and widths of 2p levels in pionic atoms. *Phys. Rev. Lett*, 1978, vol.40, pp. 931-935.
20. Batty C.J., Friedman E., Gal A. Saturation effects in pionic atoms and the π -nucleus optical potential. *Nucl. Phys.A.*, 1983, vol.402, pp. 411-428.
21. Seki R., Masutani K., Jazaki K. Unified analysis of pionic atoms and low-energy pion-nuclear scattering. Hybrid analysis. *Phys. Rev.C.*, 1983, vol.27, pp. 1817-2832.
22. Rowe G., Salamon M., Landau R.H. Energy-dependent phase shift analysis of pion-nucleon scattering below 400 MeV. *Phys. Rev. C.*, 1978, vol.18, pp. 584-596.
23. Backenstoss G. Pionic atoms. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 1970, vol.20, pp. 467-510.
24. Indelicato P., Trassinelli M. From heavy ions to exotic atoms. *arXiv:physics*, 2005, vol.1, pp. 0510126-0510141.
25. Santos J., Parente F., Boucard S., Indelicato P. Desclaux J.X-ray energies of circular transitions and electron scattering in kaonic atoms. *Phys.Rev.A.*, 2005, vol.71, pp. 032501.
26. Mitroy J., Ivallov I.A. Quantum defect theory for the study of hadronic atoms. *J. Phys. G. Nucl. Part. Phys*, 2001, vol.27, pp. 1421-1433.
27. Anagnostopoulos D., Gotta D., Indelicato P., Simons L.M. Low-energy X-ray standards from hydrogenlike pionic atoms. *arXiv:physics*, 2003, vol.1, pp. 0312090-0312097.
28. Nagels M.M., de Swart J., Nielsen H. et al. Compilation of Coupling Constants and Low-Energy Parameters. 1976 Edition. *Nucl.Phys.B.*, 1976, vol.109, pp. 1-90.
29. Lauss B. Fundamental measurements with muons -View from PSI. *Nucl.Phys.A.*, 2009, vol.827, pp. 401-407. PSI experiment R-98.01, <http://pihydro.gen.psi.ch>
30. CERN DIRAC Collaboration, "Search for long-lived states of $\pi^+ \pi^-$ and πK atoms", CERN-SPSLC-2011-001 SPSLC-P-284-ADD. 2011. 22 p.
31. CERN DIRAC Collaboration, "Status report of DIRAC for the SPSC meeting of March 2011", CERN-SPSC-2011-013 ; SPSC-SR-081. 2011. 32 p.
32. Itoh S., Berg G., Geissel H., Hayano R., Inabe Itahashi K. Precision spectroscopy of pionic atom at RIKEN-RIBF. *Proc. of the XIV International Conference on Hadron Spectroscopy*. Munich (Germany), 2011, p. 4.
33. Ishiwatari T. Silicon drift detectors for the kaonic atom X-ray measurements in the SIDDHARTA experiment on behalf of the SIDDHARTA Collaboration. *Nucl. Instr. and Methods in Phys. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors*, 2007, vol.581, pp. 326-329.

SPECTROSCOPY OF PIONIC ATOMS AND EFFECTS OF STRONG PION-NUCLEON INTERACTION

O.Yu. Khetselius, Dr Phys.-Math.Sci., Prof.

I.N. Serga, Cand. Phys.-Math.Sci.

D.E. Sukharev, Cand. Phys.-Math.Sci., Assoc. Prof.

A.N. Shahman, Cand. Phys.-Math.Sci.

*Odessa State Environmental University, 15,
Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, nucserga@mail.ru*

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine

It is presented an effective relativistic approach to the description of the energy and spectral characteristics of the pion atoms, based on the Klein-Gordon-Fock equation, model of optimized optical strong pion-nucleon interaction potential and method of the relativistic many-particle perturbation theory with the "0" Hamiltonian of the Dirac- Breit -Kohn-Sham approximation (approximation to the formal precision QED perturbation theory) and correct accounting for the relativistic, radiation QED effects, the finite size nuclear effects plus the nuclear quadrupole deformation correction and electron shielding effect (electromagnetic unit). The bare interaction potential in the system is represented as the sum of the optical strong π^- - N interaction potential, relativistic Coulomb potential describing the interaction of the pion with the nucleus as amended by the Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow correction on the final size of a nucleus, generalized radiation potential, taking into account the main QED effect of vacuum polarization, etc., and the self-consistent potential of the surviving electron shells. For a number of heavy π^- -A, including, ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{203}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi , etc there are presented the values of the shifts and widths for the 4f, 3d levels due to the strong π^- - N interaction, including the corrections, 'directly related to the effect of the nuclear quadrupole deformation. For a number of π^- -A the data on the shifts and widths of the energy levels in a spectrum are presented for the first time.

Keywords: Klein-Gordon-Fock equation, the optical potential of π^- - N interaction, shift and width of energy levels due to the strong π^- - N interaction.

СПЕКТРОСКОПИЯ ПИОННЫХ АТОМОВ И ЭФФЕКТЫ СИЛЬНОГО ПИОН-НУКЛОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

О.Ю. Хецелиус, д.ф.-м.н., проф.

И.М. Серга, к.ф.-м.н.,

Д.Е. Сухарев, к.ф.-м.н., доц.

А.М. Шахман, к.ф.-м.н.

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016 Одесса, Украина, nucserga@mail.ru*

Представлен эффективный релятивистский подход к описанию энергетических и спектральных характеристик пионного атома, основанный на уравнении Клейна-Гордона-Фока с оптимизированным оптическим потенциалом сильного пион-нуклонного взаимодействия и методе релятивистской многочастичной теории возмущений с гамильтонианом "0" приближения Дирака-Брейта-Кона-Шема (приближение к формально точной КЭД теории возмущений) и корректным учетом релятивистских, радиационных КЭД эффектов, ядерных эффектов конечного размера ядра плюс ядерной квадрупольной деформации, а также электрон-экранирующего эффекта (электромагнитный блок). Затравочный потенциал взаимодействия в системе представлен в виде суммы оптического потенциала π^- -N взаимодействия, релятивистского кулоновского потенциала, описывающего взаимодействие пиона с ядром с учетом поправки Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow на конечный размер ядра; обобщенного радиационного потенциала, учитывающий основной КЭД эффект поляризации вакуума и др., и самосогласованного потенциала выживших электронных оболочек. Для целого ряда тяжелых π^- -А, у т.ч., π^- - ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{203}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi , и др. представлены значения обусловленных сильным π^- -N взаимодействием смещений и ширины 4f, 3d уровней, включая поправку, связанную непосредственно с эффектом ядерной квадрупольной деформации. Для ряда π^- -А данные по смещениям и ширинам уровней в спектре представлены впервые.

Ключевые слова: уравнение Клейна-Гордона-Фока, оптический потенциал π^- -N взаимодействия, смещения и ширины энергетических уровней, обусловленные сильным π^- -N взаимодействием

Дата первого подання.: 15.06.2015

Дата надходження остаточної версії :20.07.2015

Дата публікації статті : 24.09.2015