

АНОМАЛІ В СПЕКТРІ ЗБУДЖЕННЯ ЯДРА ${}^5\text{He}$
В ОБЛАСТІ $E^* \sim 20 \text{ MeV}$

Ю.М. Павленко

Неузгодженість існуючих спектроскопічних даних про рівні ядра ${}^5\text{He}$ з енергією збудження $E^* \sim 20 \text{ MeV}$ може бути частково знято шляхом врахування кулонівської взаємодії у вихідному каналі багаточастинкових реакцій. У випадку, коли реєструється тільки одна з кінцевих частинок, може спостерігатись зсув і розширення резонансів, що обумовлені інтегрованими за кутом розпаду кулонівськими ефектами. Внаслідок розпаду резонансів у різні канали можливі додаткові зміни їх положення та форми. Аналізуються дані, отримані при вимірюванні інклюзивних та кореляційних спектрів.

Для всіх відомих станів ядра ${}^5\text{He}$ характерною є певна неузгодженість існуючих спектроскопічних даних. Ядро ${}^5\text{He}$ вже в основному стані є нестабільним і представляє собою короткоживучий резонанс із шириною $\Gamma \sim 0.6 \text{ MeV}$ ($\tau \sim 10^{-21} \text{ c}$). Перший збуджений стан цього ядра є ще більш короткоживучим. Потребує пояснення значна розбіжність отриманих при дослідженні різних реакцій даних про положення та ширину цього резонансу ($E^* = 2.6 - 5.2$, $\Gamma = 4 - 7 \text{ MeV}$) [1]. Слід зауважити, що область збуджень $E^* > 20 \text{ MeV}$ для ядра ${}^5\text{He}$ практично не досліджена. Відсутні також узгоджені між собою дані щодо рівня (чи рівнів) з $E^* \sim 20 \text{ MeV}$.

В [1] наведені усереднені компіляційні значення енергії збудження та ширини цього рівня: $E^* = (19.8 \pm 0.4) \text{ MeV}$, $\Gamma = (2.5 \pm 0.5) \text{ MeV}$. У кореляційних спектрах продуктів реакцій ${}^4\text{He}(d, pd){}^3\text{H}$ [2] спостерігалось три досить вузьких рівня з енергіями збудження $E^* = 18.6$, 18.8 та 19.2 MeV і ширинами $\Gamma = (0.18 \pm 0.06) \text{ MeV}$. Близький результат отримано і для реакції ${}^3\text{H}({}^4\text{He}, d){}^4\text{He}$ [3]. У той же час результати більшості інклюзивних експериментів вказують на наявність одного широкого рівня з $E^* \sim 20 \text{ MeV}$.

Спроба пояснити вказані неузгодженості даних складає основну мету даної роботи. Аналізуються обумовлені кулонівською взаємодією із супутніми частинками зміни спостережуваних параметрів незв'язаних короткоживучих станів ядер ${}^5\text{He}$, що збуджуються в різних багаточастинкових реакціях. Раніше було встановлено [4], що параметри короткоживучих резонансів залежать від умов їх збудження, а саме: типу реакції, енергії взаємодії та кореляційних кутів, тобто кутів розпаду незв'язаної системи.

Диференційні перерізи тричастинкової реакції

$$p + T \rightarrow i + R_{jk} \rightarrow i + j + k, \quad (1)$$

імпульсну діаграму якої зображено на рис. 1, визначаються амплітудою реакції T та фактором фазового простору $\rho(E_i)$:

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_i d\Omega_j dE_i} \sim |T|^2 \rho(E_i). \quad (2)$$

Врахування впливу кулонівського поля частинки i на розпад незв'язаної системи R_{jk} приводить до появи в енергетичній залежності амплітуди реакції $T(E_i)$ додаткового множника $F(\eta, \Gamma^0)$ [4]:

$$|T|^2 = \text{const} \cdot F(\eta, \Gamma^0) / [(p_{jk}^2/2\mu_{jk} - E_R^0)^2 + (\Gamma^0/2)^2], \quad (3)$$

де p_{jk} – імпульс відносного руху частинок j та k ; μ_{jk} – їх приведена маса; E_R^0 – резонансна енергія взаємодії частинок j та k у вакуумі; Γ^0 – ширина цього резонансу; η – ефективний кулонівський параметр, що визначається зарядами частинок Z_i, Z_j, Z_k та імпульсами відносного руху p_{ij} та p_{jk} :

$$\eta = \eta_{ij} + \eta_{ik} = Z_i Z_j \mu_{ij} / p_{ij} + Z_i Z_k \mu_{ik} / p_{ik}. \quad (4)$$

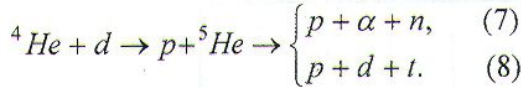
Імпульси p_{ij} та p_{ik} , в свою чергу, залежать від Θ_{i-jk} - кута розпаду ядра R_{jk} у системі координат Якобі (див. рис. 1). Аналіз (3) показує, що поява залежності від η та Γ^0 приводить до зсуву, розширення та асиметрії резонансної лінії, а саме:

$$\Delta E = E_R^0 - E_R = \eta \Gamma^0 / 2, \quad (5)$$

$$\Gamma = \Gamma^0 \exp(0.425 \eta), \quad (6)$$

де E_R і Γ – значення параметрів резонансу, що спостерігаються в експерименті. Ефект зсуву пропорційний кулонівському параметру η та ширині резонансу Γ^0 (зворотно пропорційний часу життя резонансу). Більш детально аналіз виразу (3) для амплітуди реакції (1) викладено в [4].

Розрахунки (згідно з (5)) залежностей $E_R(\Theta_{i-jk})$ для рівнів ядра ${}^5\text{He}$, що спостерігались у реакції ${}^4\text{He}(d,pd){}^3\text{H}$ [2], наведено на рис. 2. У реакції ${}^4\text{He}(d,p){}^5\text{He}$, де ядро ${}^5\text{He}$ утворюється з енергіями збудження, що перевищують енергію зв'язку дейтрона і тритона ($E_{d+t} = 16.70$ MeV), можуть спостерігатись два канали розпаду ${}^5\text{He}$:



Як видно з рис. 2, при розпаді ядра ${}^5\text{He}$ в $(d + t)$ канал (реакція (8)), величина зсуву положення резонансів з енергіями збудження $E^* = 18.6, 18.8$ слабко змінюється зі зміною кута розпаду Θ_{i-jk} і становить $\Delta E \sim 30$ кеВ. Для рівня 19.2 MeV залежно від кута Θ_{i-jk} може спостерігатись зсув до $(30 - 80)$ кеВ. Розрахунки показують, що ефект значно помітніший для каналу розпаду ${}^5\text{He} \rightarrow \alpha + n$ (реакція (7)). Для кутів розпаду, що відповідають емісії α -частинок у напрямку руху протона ($\Theta_{i-jk} = 0^\circ$), величина зсуву досягає $\Delta E \sim 300$ кеВ.

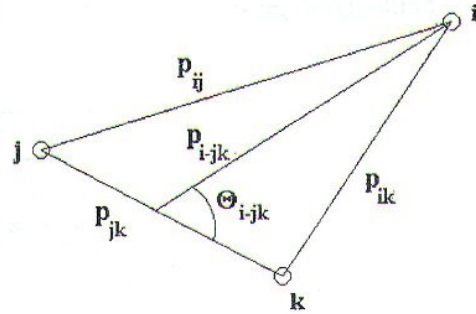


Рис. 1. Імпульсна діаграма реакції $p + T \rightarrow i + R_{jk} \rightarrow i + j + k$.

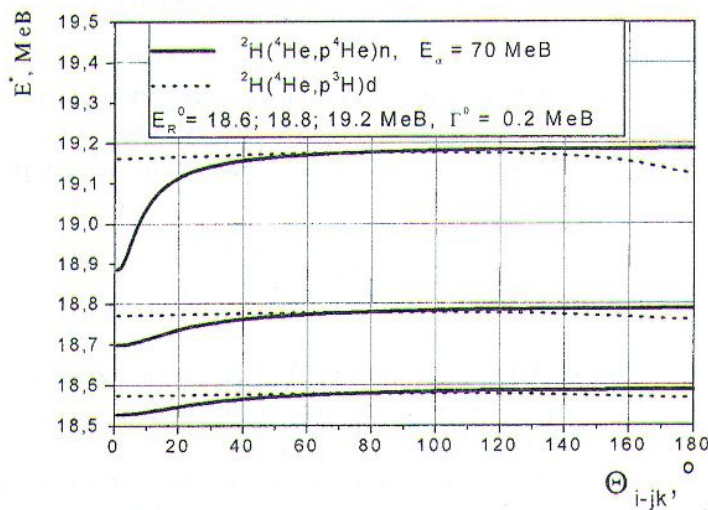


Рис. 2. Залежності $E_R(\Theta_{i-jk})$, розраховані для $\alpha + n$ (суцільні лінії) та $d + t$ (штрихові лінії) каналів розпаду ядра ${}^5\text{He}$ з енергіями збудження $E^* = 18.6, 18.8$ та 19.2 MeV. Розрахунки виконано для реакції ${}^4\text{He} + d \rightarrow p + {}^5\text{He}$ ($E_\alpha = 70$ MeV, [2]).

В інклюзивних експериментах, де реєструється лише одна частинка (частинка i в реакції (1)), аналізуються диференційні перерізи

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_i dE_i} = \int_0^\pi d\Theta_j \int_0^{2\pi} d\varphi_j \frac{d^3\sigma}{d\Omega_i d\Omega_j dE_i}, \quad (9)$$

тобто спостерігаються інтегральні за кутом Ω_j характеристики. Інтегрування по всіх можливих кутах Θ_j та φ_j еквівалентно інтегруванню по куту Θ_{i-jk} (з точністю до множника, що характеризує якобіан переходу з лабораторної системи координат до координат Якобі (див. рис. 1)). Відповідно і залежність $E_R(\Theta_{i-jk})$ інтегрується по всіх кутах емісії частинок, що приводить до розширення спостережуваної в інклюзивному експерименті спектральної лінії. Причиною додаткового розширення є залежність від кулонівського параметра (або кута Θ_{i-jk}) ширини резонансу (див. $\Gamma(\eta)$ в (6)). Це ілюструє рис. 3, де наведено розрахунки $\Gamma(\Theta_{i-jk})$ для станів ${}^5\text{He}^*(18.8 \text{ MeV})$ та ${}^5\text{He}^*(19.2 \text{ MeV})$, збуджуваних в реакціях (7) та (8). Слід врахувати також асиметрію резонансної лінії, що відповідно до (3) зростає із зростанням η .

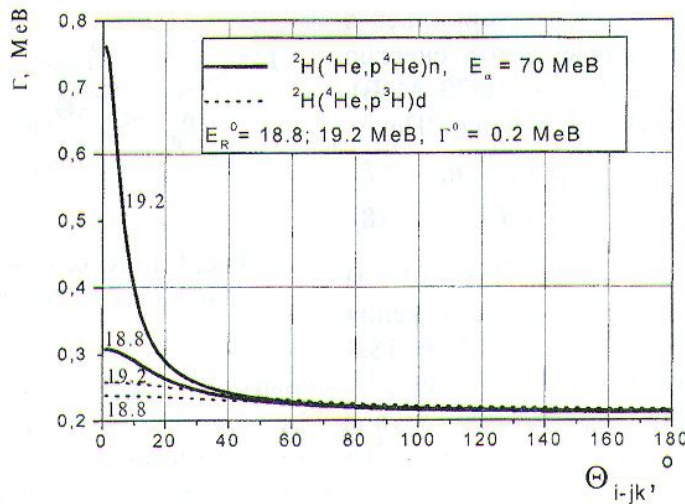


Рис. 3. Залежності $\Gamma(\Theta_{i-jk})$, розраховані для $\alpha + n$ (суцільні лінії) та $d + t$ (штрихові лінії) каналів розпаду ядра ${}^5\text{He}^*(18.8 \text{ MeV})$ та ${}^5\text{He}^*(19.2 \text{ MeV})$ в реакції ${}^4\text{He} + d \rightarrow p + {}^3\text{He}$ ($E_\alpha = 70 \text{ MeV}$, [2])

Крім того, слід зауважити, що в інклюзивних експериментах досліджуються характеристики, що інтегруються по всіх каналах розпаду, для яких залежності $E_R(\Theta_{i-jk})$ та $\Gamma(\Theta_{i-jk})$ можуть значно відрізнятись. Як правило, для диференційних перерізів

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_i d\Omega_j} = \int dE_i \frac{d^3\sigma}{d\Omega_i d\Omega_j dE_i} \quad (10)$$

характерна кутова анізотропія. Переріз реакції (10) може бути максимальним саме для кутів Θ_{i-jk} , для яких зсув та зміна ширини резонансу теж максимальні. Ця обставина може значно посилити ефект розширення резонансів.

Таким чином, усі вищезгадані фактори (зсув (5), зміна ширини (6), наявність декількох каналів розпаду, кутова анізотропія перерізів (10)) обумовлюють розширення резонансів R_{jk} за умов їх спостереження в інклюзивних експериментах відносно даних, отриманих у кореляційних експериментах для окремих кутів Θ_{i-jk} і для одного виділеного каналу розпаду досліджуваного ядра R_{jk} .

На жаль, з точки зору порівняльного кількісного аналізу, авторами роботи [2] не досліджено канал реакції (7). В [2] не наведено також дані про параметри рівнів ${}^5\text{He}$, отримані при вимірюванні інклюзивних спектрів.

Цікаво, що дані про положення та ширину резонансу ${}^5\text{He}^*(16.75 \text{ MeV})$, отримані в різних роботах, у достатній мірі узгоджуються між собою. Це може бути обумовлено порівняно невисокою енергетичною роздільною здатністю, характерною для більшості експериментів, особливо виконаних при високих енергіях. Очікувані зміни параметрів цього резонансу завдяки відносно малій ширині $\Gamma = 0.076 \text{ MeV}$ становлять $\sim 20 \text{ keV}$, що лежить у межах експериментальних похибок. Лише в [5] було помічено зміну ширини резонансу ${}^5\text{He}^*(16.75 \text{ MeV})$ у реакції ${}^7\text{Li}(d, {}^4\text{He}){}^5\text{He}$ при $E_d = 6.8 \text{ MeV}$. Враховуючи, що цей стан ядра ${}^5\text{He}$ (так званий "термоядерний резонанс") в енергетичній шкалі лежить досить близько до порога розпаду в $(d + {}^3\text{H})$ канал ($E_{d+t} = 16.70 \text{ MeV}$), у реакціях типу (1) можливий також перерозподіл повних імовірностей розпаду в $({}^4\text{He} + n)$ та $(d + {}^3\text{H})$ канали, які, до речі, характеризуються різними орбітальними моментами. Такий перерозподіл імовірностей може бути обумовлено, як було показано в роботі [6], впливом кулонівського поля супутніх ядер. Для повного дослідження такого явища, наприклад у реакції ${}^7\text{Li}(d, {}^4\text{He}){}^5\text{He}$, необхідно виконати комплексні прецизійні вимірювання як у кореляційних, так і в інклюзивних експериментах. Для дослідження $(d + {}^3\text{H})$ каналу розпаду доцільно застосувати методику вимірювань кореляцій частинок з малим відносним імпульсом [7, 8], що дозволяє отримувати прецизійні дані про енергетичні характеристики незв'язаних станів ядер, незважаючи на значну немонохроматичність пучка бомбардуючих ядер. Ефективним інструментом для таких вимірювань міг би бути багатоканальний кільцевий стріп-детектор [9]. Для визначення повної імовірності розпаду ${}^5\text{He}^*(16.75 \text{ MeV})$ та оцінки розпаду в $({}^4\text{He} + n)$ канал необхідно провести вимірювання інклюзивних спектрів.

Виконаний у даній роботі аналіз ефектів розширення резонансних ліній за умов їх спостереження в інклюзивних експериментах вказує на можливі причини неузгодженостей в існуючих на сьогодні даних відносно параметрів короткоживучих станів ядра ${}^5\text{He}$. Ефект розширення незначний для реакцій, в яких супутні частинки мають малий заряд, а також для реакцій, досліджуваних при достатньо високих енергіях налітаючих частинок. Але і за таких умов він може бути суттєвим, якщо ядро R_{jk} збуджується до високих енергій. Щоб отримати коректні дані про незв'язані стани ядер R_{jk} , необхідні комплексні дослідження реакцій (1) в інклюзивних та кореляційних експериментах. Останні потребують реєстрації всіх можливих каналів розпаду ядер R_{jk} .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ajzenberg-Selove F.* // Nucl. Phys. A. – 1988. – Vol. 490. – P. 7.
2. *Treado P.A., Lambert J.M., Kane R.J. et al.* // Phys. Rev. C. – 1973. – Vol. 7. – P. 1742.
3. *Гортинич О.К., Поворозник О.М., Пшедзьял А.П., Стружко Б.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. - 2000. - Т. 64. - С. 103.
4. *Немец О.Ф., Попова А.М., Комаров В.В. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1990. - Т. 54. - С. 942.
5. *Arena N., Cavallaro Seb., Fazio G. et al.* // Phys. Rev. C. – 1989. - Vol. 40. - P. 55.
6. *Pugatch V.M., Pavlenko Yu.N., Prokopets A.G. et al.* // Proc. of the third Kiev Intern. School on Nuclear Phys., June 22 - July 1, 1992. – Kiev. - P. 133.
7. *Павленко Ю.Н., Пугач В.М., Коломиец И.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. – 1994. - Т. 58. - С. 87.
8. *Павленко Ю.Н., Коломиец И.Н., Кива В.А. и др.* // Матеріали щорічн. наук. конф. Ін-ту ядерних досліджень НАНУ. – Київ. 1996. - С. 118.
9. *Nemets O.F., Pavlenko Yu.N., Pugatch V.M. et al.* // Тез. докл. Междунар. 48-го совещ. по ядерной спектроск. и структуре атомного ядра. – М.: Наука, 1998. - С. 346.

**АНОМАЛИИ В СПЕКТРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ
ЯДРА ${}^5\text{He}$ В ОБЛАСТИ $E^* \sim 20$ МэВ****Ю.Н. Павленко**

Несогласованность существующих спектроскопических данных об уровнях ядра ${}^5\text{He}$ с энергией возбуждения $E^* \sim 20$ МэВ может быть частично снята путем учета кулоновского взаимодействия в выходном канале многочастичных реакций. В случае, когда регистрируется только одна из конечных частиц, может наблюдаться уширение и сдвиг резонансов, которые обусловлены интегрированными по углу распада кулоновскими эффектами. Вследствие распада резонансов в различные каналы возможны дополнительные изменения их положения и формы. Анализируются данные, полученные при измерении инклюзивных и корреляционных спектров.

**ANOMALIES IN THE EXCITATION SPECTRUM
OF ${}^5\text{He}$ NUCLEUS AT $E^* \sim 20$ MEV****Yu.N. Pavlenko**

The discrepancies in spectroscopy data for ${}^5\text{He}$ levels at $E^* \sim 20$ MeV are partly explained by taking into account the Coulomb interaction in the exit channels of many particle nuclear reactions. The broadening and shift of resonances caused by Coulomb effects integrated over the decay angle can be observed when only one emitted particle is registered. The additional modification of resonance position and shape are possible due to decay into different channel. The data obtained by measurements of inclusive and coincidence spectra are analyzed.