

АНОТАЦІЯ

Чеховська А. В. Перерізи фотоядерних реакцій для моделювання γ -процесу нуклеосинтезу в зірках. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Мета роботи

Наукове дослідження спрямовано на отримання нових експериментальних результатів по виходах фотоядерних (γ,n)- та (γ,p)-реакцій на магічних ядрах олово-112 (^{112}Sn), олово-114 (^{114}Sn) та індій-113 (^{113}In), які в ядерній астрофізиці належать до групи *p-ядер* (протон збагачених ядер), розуміння утворення, шляхи розпаду та розповсюдженість яких на Землі та у Всесвіті викликає великі труднощі. Отримані дані по виходах фотоядерних реакцій можуть бути використані для моделювання γ -процесу утворення стабільних ізотопів у зірках.

Унікальністю роботи є те, що отримані в експерименті дані дадуть внесок, як в розвиток фундаментальних наук (ядерної астрофізики, фундаментальної ядерної фізики та ядерної спектроскопії), так і можуть бути використані для розвитку суміжних прикладних наук (медичної фізики, та матеріалознавства).

Об'єкт дослідження

β -Розпад радіоактивних ядер ^{111}Sn , ^{111}In , ^{113}Sn , ^{112}In , котрі утворилися в результаті фотоядерних (γ,n) та (γ,p) реакцій. Та детальне дослідження

утворених довгоживучих ізомерних станів при радіоактивному розпаді батьківських ядер.

Предмет дослідження

Гама-випромінювання, що супроводжує радіоактивний розпад ядер ^{111m}In , ^{111g}In , ^{111}Sn , ^{112m}In , ^{112g}In та ^{113}Sn для подальшого отримання значень експериментальних виходів реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111m}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112g}\text{In}$ та $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$ з метою визначення їх швидкостей для дослідження γ -процесу утворення *p-ядер* в зірках.

Методи дослідження

Експериментальні виходи фотоядерних реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111m}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112g}\text{In}$ та $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$ визначалися із застосуванням методики наведеної активності, яка передбачає опромінення мішені потоком високоенергетичних фотонів та подальше вимірювання утворених в цих реакціях радіоактивностей кінцевих ядер. Для вимірювання радіоактивностей застосовується техніка γ -спектрометрії з високою енергетичною розподільною здатністю, на базі напівпровідникового германій-літієвого Ge(Li) детектора та детектору з надчистого германію HPGe. При теоретичних розрахунках індивідуальних виходів фотоядерних реакцій, що вивчаються, застосовуються традиційне активаційне рівняння та рівняння активації для генетично пов'язаних радіоактивних нуклідів.

Наукова новизна

В дисертаційній роботі було вперше виміряно експериментальні значення інтегральних виходів фотоядерних реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$,

$^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$, $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ та $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{g}}\text{In}$ з використанням гама-активаційного методу. Додатковим результатом стало встановлення факту некоректності представлених в міжнародних базах ядерних даних значень коефіцієнтів розгалуження для γ -переходів між енергетичними рівнями ядер ^{111}In та ^{112}Cd , що супроводжують радіоактивний розпад ядер ^{111}Sn та $^{112\text{g}}\text{In}$ відповідно. Виходячи з наших експериментальних даних, нові значення коефіцієнтів розгалуження для цих γ -переходів були правильно обчислені та опубліковані в наукових статтях.

Продемонстровано вплив варіації параметрів статистичної теорії ядерних реакцій на характер поведінки виходів ядерних реакцій при теоретичних розрахунках. При порівнянні експериментальних та теоретичних значень виходів фотоядерних реакцій, котрі досліджуються, обрано найбільш адекватні моделі густини ядерних рівнів та радіаційної силової функції статистичної теорії ядерних реакцій.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено огляд наукових публікацій стосовно найважливіших питань, що розглядаються в ядерній астрофізиці. Розкрито поняття зіркового нуклеосинтезу та відомості про нього, що існують та опубліковані до сьогодні. Описано можливі способи утворення спостерігаємих в природі стабільних ізотопів хімічних елементів та умови їх розповсюдженості у Всесвіті. Наприкінці розділу наведено огляд експериментальних робіт та отриманих результатів інших наукових груп, що виконувалися раніше, та в котрих досліджувалися різні ядерні реакції, які приводять до утворення кінцевих ядер (продуктів реакції), що вивчаються у представленій дисертаційній роботі. Описано експериментальні методики та вимірювальну апаратуру, що

використовувалися у цих роботах, та зроблено висновки щодо отриманих раніше результатів, котрі, як виявилось наразі, потребують перевірки.

У *другому розділі* розглядаються можливі напрямки науки, де можуть бути використані отримані в цій дисертаційній роботі експериментальні дані. Головним напрямком використання отриманих експериментальних даних та висновків дисертаційної роботи є ядерна астрофізика та питання нуклеосинтезу. Не менш важливими напрямками, де використовуватимуться отримані в експерименті дані це фундаментальна ядерна фізика та ядерна спектроскопія. Також експериментальні дані можуть бути корисними для ядерної медицини, загалом для вдосконалення методики добування діагностичних або терапевтичних радіоізотопів. Ще експериментальні дані необхідні для розвитку радіаційної фізики та матеріалознавства. Виходячи з вищеописаних обґрунтувань стосовно важливості результатів, що отримані в експериментальній роботі, у цьому розділі сформульовано основні задачі.

У *третьому розділі* описано експериментальну частину дисертаційної роботи та обрану методику проведення експерименту. Для вивчення інтегральних перерізів фотоядерних реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$, $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ та $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{g}}\text{In}$, було обрано γ -активаційну методику, що найкраще підходить для виконання поставлених задач (див. розділ 2) і має найменші похибки, що вносяться в остаточні значення виходів фотоядерних реакцій, від початку опромінення та подальшого вимірювання. У одному з підрозділів описано важливість використання моніторної мішені при проведенні опромінення дослідницьких мішеней, показана необхідність точного визначення потоку фотонів, що проходять крізь мішені, що опромінюються. Детально описано процеси калібрування германій-літійового Ge(Li) детектора та детектору з

надчистого германію HPGe, наведено енергетичні розпадні спектри від стандартних паспортизованих джерел γ -випромінення, за допомогою яких виконувалося калібрування обох детекторів та визначалися їх фотоефективності.

У четвертому розділі розглянуто теоретичну частину, що було виконано у дисертаційній роботі. Тобто розглядається статистична теорія ядерних реакцій, умови її застосування для кожного експерименту, що були описані в третьому розділі. Наведені основні формули та параметри, що входять у статистичну теорію ядерних реакцій; наведені комп'ютерні коди для теоретичних розрахунків, в котрі імплементована статистична теорія; різні модифікації активаційного рівняння, що використовувалися для конкретних радіоактивних розпадів, які розглядаються у роботі. Виходячи з особливостей розпадних характеристик вивчаємих ядер, використовуються традиційне рівняння активації (для випадку простого радіоактивного розпаду, з миттєвими γ -переходами між енергетичними рівнями дочірнього ядра) та рівняння активації для генетично пов'язаних радіоактивних нуклідів (коли при радіоактивному розпаді ядра відбувається затримка γ -переходу на довгоживучому стані, що утворює в ядрі ізомерний рівень або коли ядро-продукт реакції може утворитися у двох конкуруючих реакціях).

Особлива увага приділяється результату, що було отримано додатково, були отримані нові, коректно розраховані значення коефіцієнтів розгалуження для γ -переходів, що супроводжують радіоактивний розпад ядер ^{111}Sn та ^{112g}In . В розділі наведено розв'язок системи диференціальних рівнянь, який було отримано для конкретного радіоактивного розпаду при знаходженні інтегральних перерізів ядерних реакцій, в яких батьківське ядро є радіоактивним та утворене дочірнє ядро теж є радіоактивним і зазнає розпаду, з подальшим утворенням ядра у стабільному стані.

У п'ятому розділі продемонстровані результати експериментів та теоретичних розрахунків, що були отримані за період виконання дисертаційної роботи. На графіках зображено порівняння експериментальних даних з евалюйованими даними та теоретичними розрахунками, що були виконані із застосуванням статистичної теорії ядерних реакцій. При теоретичних розрахунках особлива увага приділяється варіаціям різних моделей густини ядерних рівнів та радіаційної силової функції. Обрано відповідні комбінації параметрів теоретичних моделей, котрі найкраще описують отримані в експерименті результати. Це є важливим для перевірки статистичної теорії ядерних реакцій та її подальшого вдосконалення.

Ключові слова: фотоядерні реакції, зірковий нуклеосинтез, радіоактивний розпад, активаційна методика, γ -спектри, гальмівне випромінювання, p -ядра, статистична теорія ядерних реакцій.

ABSTRACT

Chekhovska A. V. **Cross-sections of photonuclear reactions for modeling of nucleosynthesis γ -process in stars.** Qualification scholarly paper: a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality 105 – Applied Physics and Nanomaterials. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The scientific research is aimed at obtaining new experimental results on the yields of photonuclear (γ,n)- and (γ,p)-reactions on the magic nuclei tin-112 (^{112}Sn), tin-114 (^{114}Sn) and indium-113 (^{113}In), which in nuclear astrophysics refers to a group of so-called *p*-nuclei (proton riched nuclei), understanding the formation and distribution of which in the Earth and Universe causes great difficulties. As an additional result, new values of the branching coefficients for γ -transitions of the intranuclear transitions of the daughter nuclei of the $^{111}\text{Sn} \rightarrow ^{111}\text{In}$ and $^{112}\text{In} \rightarrow ^{112}\text{Sn}$ radioactive chains were determined. It is important for the correct calculation of the cross-sections of various nuclear reactions leading to the formation of these nuclei through different nuclear reactions or their combinations. It is also important for the development of existing nuclear spectroscopy theories. The obtained data on the yields of photonuclear reactions will be used for modeling and calculating the γ -process of stable isotopes formation in stars, as well as to improvement and parameterization of the statistical theory of nuclear reactions.

The uniqueness of this work is that the data obtained in the experiment will contribute both to the development of fundamental sciences (nuclear astrophysics, fundamental nuclear physics and nuclear spectroscopy), and can be used for the

development of related applied sciences (medical physics radiation physics and materials science).

The object of the research is the β -decay of radioactive nuclei ^{111}Sn , ^{111}In , ^{113}Sn , ^{112}In , which were formed as a result of photonuclear (γ, n) and (γ, p) reactions. Moreover. A detailed the study of long-lived isomeric states formed during the radioactive decay of parent nuclei.

The subject of the thesis is gamma-radiation accompanying the decay of ^{111m}In , ^{111g}In , ^{111}Sn , ^{112m}In , ^{112g}In and ^{113}Sn nuclei for further obtaining values of experimental yields of the $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111m}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112g}\text{In}$ and $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$ reactions in order to determine their reaction rates.

Research methods are experimental yields of photonuclear reactions $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111m}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$, $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$ and $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112g}\text{In}$ were determined using the method of induced activity, which involves irradiating the target with a high-energy photon flux that is exciting the target's stable nuclei to energies above the threshold binding energies of neutrons and protons in these nuclei, and further measuring the radioactivities of the residual nuclei formed in these reactions. The high-energy resolution gamma-spectrometry technique using the semiconductor germanium-lithium Ge(Li) detector and the high pure germanium HPGe detector were applied to measure residual radioactivities. The traditional activation equation and the activation equation for genetically related radioactive nuclides were used calculating individual yields of isotopes of the radioactive chains.

The scientific novelty of this thesis is that the experimental values of integral yields of photonuclear reactions $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111m}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$, $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$ and $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112g}\text{In}$ were measured for the first

time using the activation technique. An additional result was the fact establishment of incorrectness of data on the branching coefficients for γ -transitions between energy levels in ^{111}In and ^{112}In nuclei accompanying the radioactive decay of ^{111}Sn and ^{112g}In nuclei, respectively, presented in international nuclear databases are incorrect. The new correct values of the branching coefficients for γ -transitions were recalculated and presented in this work, as well as published in scientific articles.

The influence of the variation of different parameters of the statistical theory of nuclear reactions on the nature of the behavior of the yields of nuclear reactions during theoretical calculations and computer modeling is demonstrated.

The most appropriate parameters for the optical potential, the nuclear levels density and the radiation strength function of the statistical theory of nuclear reactions were established for a more accurate description of the data obtained in the experiment.

In the first chapter of the thesis, a review of scientific publications related to the most important issues considered in nuclear astrophysics are carried out. The concept of stellar nucleosynthesis and information about it, which exist and have been published to date, are revealed. Possible ways of formation of known chemical elements and conditions of their distribution in the Universe are described. At the end of the chapter, there is an overview of the experimental works and the obtained results of other scientific groups, which were carried out earlier and in which various nuclear reactions were studied, which lead to the formation of final nuclei (reaction products), which are studied in this dissertation work. The experimental methods and measuring equipment used in these works are described, and conclusions are drawn regarding the previously obtained results, which, as it turned out, currently require verification.

In the second chapter, all possible directions and sciences are considered, where the experimental data obtained in this dissertation can be used. The main direction of using the obtained experimental data and conclusions of the dissertation is nuclear astrophysics and the issue of nucleosynthesis. Fundamental nuclear physics and nuclear spectroscopy are no less important areas where the data obtained in the experiment will be used. Also, experimental data can be useful for nuclear medicine, in general, for improving the technique of obtaining diagnostic or therapeutic radioisotopes. More experimental data are necessary for the development of radiation physics and materials science. Based on the above justifications regarding the importance of the results obtained in the experimental work, the main tasks are formulated in this section.

The third chapter describes the experimental part of the thesis and the chosen method of conducting the experiment. To study the integral cross sections of the photonuclear reactions $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$, $^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ and $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{g}}\text{In}$, the γ -activation technique was chosen, which is best suited to the tasks (see chapter 2) and has the smallest errors included in the final value of the yields from the start of irradiation and subsequent measurement. One of the subsections describes the importance of using a monitor target when irradiating research targets, and shows the need to determine accurately the photon flux passing through the irradiated targets. The calibration processes of the germanium-lithium Ge(Li) detector and the high pure germanium HPGe detector are described in detail, energy decay spectra with the standard certified γ -radiation sources, which were used to calibrate both detectors and determine their photoefficiency are given.

The fourth chapter examines the theoretical part that was performed in the thesis. That is, the statistical theory of nuclear reactions, the conditions of its application for each experiment, which were described in the third chapter, are

considered. The main formulas and parameters included in the statistical theory of nuclear reactions are given; computer codes for theoretical calculations are given, in which statistical theory is implemented and various modifications of the activation equation used for specific radioactive decays considered in this work. Based on the peculiarities of the decay characteristics of the studied nuclei, the traditional activation equation is used (for the case of simple radioactive decay, with instantaneous γ -transitions between energy levels in the decaying nucleus) and the activation equation for genetically related radioactive nuclides (when radioactive decay of the nucleus occurs in delay of γ -transitions on the long-lived state, which forms an isomeric level in the nucleus).

Special attention is paid to the result that was obtained in addition, in the work, new, correctly calculated values of the branching coefficients for γ -transitions accompanying the radioactive decay of ^{111}Sn and ^{112g}In nuclei were obtained. The section presents the solution of the system of differential equations that was obtained for a particular radioactive decay to find the integral cross-sections of nuclear reactions in which the parent nucleus is radioactive and the resulting daughter nucleus is also radioactive and decays, followed by the formation of a stable state nucleus.

The fifth chapter shows the results of experiments and theoretical calculations, which were obtained during the period of the dissertation work. The graphs show a comparison of experimental data with evaluated data and theoretical calculations made using the statistical theory of nuclear reactions. In theoretical calculations special attention is paid to variations of different models of some parameters of the statistical theory of nuclear reactions, such as nuclear potential, nuclear levels density, and radiation strength function. Appropriate combinations of parameters of theoretical models, which best

describe the results obtained in the experiment, were chosen. This is important for testing the statistical theory and its further improvement.

Key words: photonuclear reactions, stellar nucleosynthesis, radioactive decay, activation technique, γ -spectra, bremsstrahlung radiation, p-nuclei, statistical theory of nuclear reactions.