

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДЕЙТРОНА И ОБОГАЩЕННОГО СВИНЦА
 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb И ^{208}Pb**

С. ГАГИНЯН^{1,2*}

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Brno University of Technology, Brno, Czech Republic

*e-mail: susgaginyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 25 января 2023 г.)

Теоретический расчет сечений остаточных ядер, образованных в обогащенных свинцовых мишенях ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb , облученных дейтронным пучком при энергии 2.2 ГэВ/нуклон, выполнен с помощью кода Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP). Экспериментальные результаты получены на нуклотроне Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (Дубна, РФ). Методом наведенной активности определены сечения образования фрагментов примерно 90 остаточных ядер в каждой из упомянутых выше мишеней. Впервые проведено облучение ^{204}Pb в диапазоне энергий в нескольких ГэВ. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов показало хорошее соответствие данных эксперимента и моделирования.

1. Введение

Изучение ядерных реакций представляет особый интерес для ядерной физики, поскольку позволяет получить ответы на вопросы, связанные со структурой ядра и механизмом реакций. Изучение реакций на тяжелых ядрах особенно важно потому, что тяжелые материалы используются в промышленности, и соответствующие знания необходимы при планировании технологических процессов. В частности, свинец является одним из конструкционных материалов реакторов нового поколения. Свинец используется в качестве конструкционного материала в ускорительных системах, предназначенных для генерации нейтронов (ADS).

Для реакторов на быстрых нейтронах одними из основных кандидатов на роль теплоносителя являются жидкий свинец и эвтектический расплав свинца с висмутом [1]. Поэтому анализ изотопов свинца на ядерном уровне приобретает большое значение, в частности получение информации о точных сечениях ядерных реакций может быть весьма полезным для моделирования и строительства реакторов.

Исследование ядерных реакций на мишенях свинца проводилось довольно интенсивно. Взаимодействию протонов различных энергий со свинцовыми мишенями посвящены публикации [2–5]. Исследования были сосредоточены на получении теоретических и экспериментальных функций возбуждения. В указанных работах для теоретических расчетов были использованы различные модели [2–4]. В работе [4] для получения результатов использовались модели LANET, CEM03, LAQGSM03, INCL4+ABLA, CASCADE, CASCADO и LANETO. Эти же модели, с небольшими вариациями, являлись основными кодами для моделирования измеренных сечений в работах [3,4]. В [5] к вышеуказанным кодам для теоретического анализа были добавлены INUCL, YIELDX, CEM2k и CASCADE/INPE. Здесь, для удобства при анализе данных, продукты разделены на четыре диапазона: продукты расщепления ($A > 170$), продукты глубокого расщепления ($140 < A < 170$), продукты деления ($30 < A < 140$) и продукты фрагментации ($A < 30$). В результате предсказательные способности всех использованных моделей удовлетворительны для диапазона расщепления, однако не дают хорошего соответствия между теоретическими и экспериментальными результатами для остального большого диапазона масс продуктов. В случае же продуктов фрагментации и продуктов области на границе расщепления и деления разброс между теоретическими и экспериментальными результатами достаточно большой, что указывает на необходимость уточнения механизмов образования остаточных ядер – испарения/деления/фрагментации.

Исследования взаимодействий частиц со свинцовыми мишенями в основном относятся к диапазону низких энергий. В работах [6, 7] обсуждаются результаты облучения ^{208}Pb свинца дейтронами. Однако эти эксперименты были проведены давно и только при низких энергиях дейтронов ($E = 70$ МэВ). В работе [8] проведено исследование функций возбуждения ядерных реакций, индуцированных дейтронами на ^{nat}Pb свинце. Измерения проводились для энергии до 40 МэВ с учетом ее применения в технологических областях и биологических системах. Также был проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных. Существует только одна работа по дейтрон-индуцированной ядерной реакции на ^{204}Pb до 10–15 МэВ [9].

Области высоких энергий посвящена работа [10], где исследована обратная реакция, и в качестве пучка использовались ионы свинца с энергией 1 ГэВ на нуклон, а в качестве мишени – дейтроны.

Исследование сечений ядерных реакций играет ключевую роль для получения данных о ядерных структурах и механизме ядерных реакций. В частности, ядерные реакции при высоких энергиях на тяжелых мишенях представляют интерес в связи с тем, что в образовании одного и того же фрагмента может участвовать несколько различных механизмов. Реакции на разделенных изотопах дают необходимую информацию о ядерной структуре и механизме реакции. В настоящей работе основное внимание уделено теоретическим расчетам на мишенях ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb , которые были сопоставлены с экспериментальными результатами.

2. Моделирование с помощью программы MCNP (Monte Carlo N-Particle)

Метод Monte Carlo N-Particle, лежащий в основе данного кода, представляет собой комплексный инструмент для расчета переноса различных частиц, таких как нейтроны, фотоны, электроны, ионы и т.д. в области энергий до 1 ТэВ/нуклон. При моделировании учитываются форма, размеры и состав мишени. Для каждого случая транспортировки, которую совершает частица, используются табличные ядерные и атомные данные, которые более полные для легких налетающих частиц. В зависимости от энергии взаимодействия работают различные модели, и в зависимости от стадии взаимодействия также используются различные модели. Основными моделями ядерных взаимодействий в MCNP являются модели IntraNuclear Cascade (INC) [BAR72, BAR73, MAS12], предравновесные модели [GUD75, MAS74, MAS12] и модели испарения/деления Generalized Evaporation/Fission Model (GEM2)) [11].

3. Описание эксперимента

Эксперимент проводился на пучке дейтронов с энергией 2.2 ГэВ/нуклон на нуклотроне Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в Дубне [12]. В качестве мишеней использовались обогащенные изотопы свинца ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb . Мишени представляли собой металлические пластины, толщина которых для ^{204}Pb составляла 30 мкм, для ^{206}Pb – 50 мкм, для ^{207}Pb – 53 мкм, а для ^{208}Pb – 55 мкм. Пластины имели прямоугольную форму и размеры $1.85 \times 3.15 \text{ см}^2$ для ^{206}Pb , $1.95 \times 2.90 \text{ см}^2$ для ^{207}Pb , $1.8 \times 1.6 \text{ см}^2$ для ^{208}Pb . Мишень ^{204}Pb имела форму прямоугольного треугольника со сторонами $0.5 \times 0.72 \text{ см}^2$. Вес мишеней составлял: для ^{204}Pb 0.0625 г, для ^{206}Pb 0.325 г, для ^{207}Pb 0.35 г и для ^{208}Pb 0.193 г. Обогащение мишеней было следующим: ^{208}Pb (98.7%), ^{206}Pb (87.9%), ^{207}Pb (90.4%) и ^{204}Pb (51%). При расчете экспериментальных сечений ядер-продуктов из мишеней ^{204}Pb учитывался вклад образования данного ядра-продукта из других изотопов свинца. Учитывался изотопный состав натурального свинца.

Интенсивность дейтронного пучка определялась с помощью мониторинг реакции $^{27}\text{Al}(d,3p2n)^{24}\text{Na}$ с известными сечением. Мониторные алюминиевые фольги, повторяющие формы мишеней, помещались перед каждой мишенью. Интенсивности падающих дейтронов представлены в табл.1.

Для анализа данных использовался метод наведенной активности. Характерные гамма-спектры остаточных ядер, образованных в мишенях в результате облучения, измерялись на германиевом детекторе высокой чистоты (HpGe).

Табл.1. Поток дейтронов, падающих на мишени ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb

Реакция	Энергия E_d , кэВ	^{204}Pb , дейтрон/сек	^{206}Pb , дейтрон/сек	^{207}Pb , дейтрон/сек	^{208}Pb , дейтрон/сек
$^{27}\text{Al}(d,3p2n)^{24}\text{Na}$	1368	4.61×10^7	3.54×10^8	3.566×10^8	1.7125×10^8

Эффективность германиевого детектора была определена при помощи стандартных изотопов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{152}Eu и ^{113}Sn с известной активностью.

Полученные γ -спектры анализировались с помощью программного пакета DEIMOS. Для определения сечений радиоактивных изотопов использовалась формула:

$$\sigma = \frac{\Delta N \lambda}{\varepsilon \eta k N_d N_{nuc} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (1)$$

где ΔN – площадь под фотопиком, ε – эффективность измерения данной γ -линии, k учитывает поглощение γ -квантов в мишени, крышке детектора и в слое воздуха между мишенью и детектором, η – интенсивность γ -линии, λ – постоянная радиоактивного распада, N_d – количество падающих дейтронов ($1/\text{см}^2 \times \text{с}$), N_{nuc} – число ядер мишени на 1 см^2 , t_1 – время облучения мишени, t_2 – время между концом облучения и началом измерения и t_3 – время измерения γ -спектра.

Для каждой мишени были получены экспериментальные выходы – примерно 90 остаточных ядер. Теоретические значения изобарных выходов были получены при помощи кода MCNP. Полученные результаты представлены на рис. 1. На рис. 2 расчетные сечения остаточных ядер сравнены с экспериментальными, где теоретический расчет MCNP обозначен сплошной линией, точками обозначены экспериментальные изобарные выходы. Изобарный выход – это сумма выходов всех изобар ($\sigma_A = \sum_Z \sigma(A, Z)$), т.е. берется сумма сечений всех остаточных ядер с данным массовым числом, но разными порядковыми номерами. Поскольку в процессе облучения образуются стабильные и короткоживущие изотопы, которые не регистрируются использованным нами методом активационного анализа, недостающие данные в экспериментальных изобарных выходах добавляются расчетами MCNP. Как видно из рисунков, наилучшее совпадение между экспериментальными данными и теоретическими расчетами получено для изотопа ^{204}Pb . Это может быть связано с тем, что при определении сечений образования остаточных ядер из ^{204}Pb были учтены вклады из всех примесей изотопов свинца. Для остальных мишеней не были учтены эти вклады, так

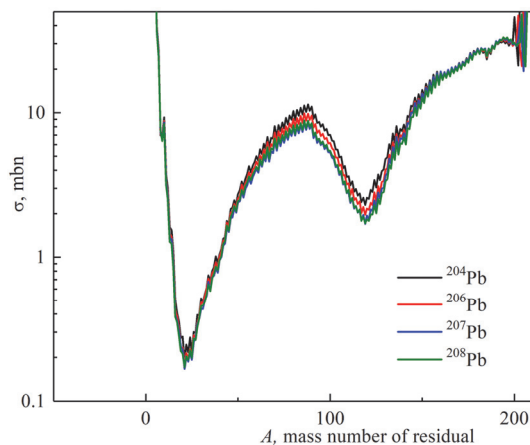


Рис. 1. Теоретические массовые распределения изобар для всех мишеней.

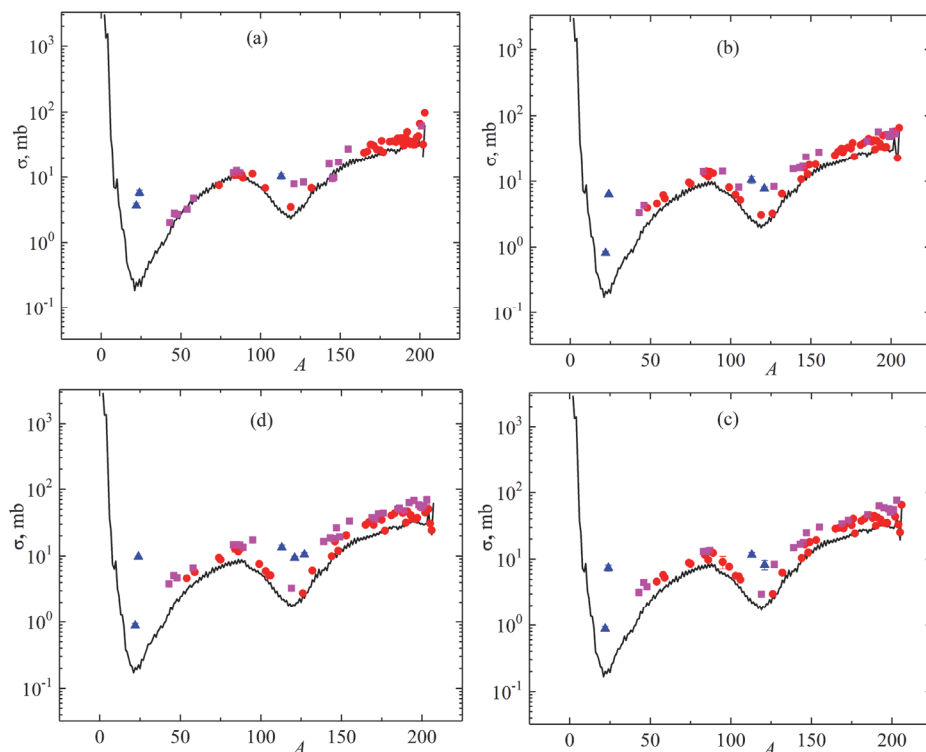


Рис.2. Зависимость сечений образования остаточных ядер от массового числа (массовые выходы для изобар), полученных в результате: (a) $d + {}^{204}\text{Pb}$, (b) $d + {}^{206}\text{Pb}$, (c) $d + {}^{207}\text{Pb}$ и (d) $d + {}^{208}\text{Pb}$ реакций. Сплошной линией обозначены рассчитанные при помощи MCNP кода данные. Экспериментальные данные: круг – менее 40 % экспериментальных результатов были включены в изобарный выход; треугольник – более 70% экспериментальных результатов были включены в изобарный выход; квадрат – 40–70 % экспериментальных результатов были включены в изобарный выход.

как их обогащение порядка и больше 90% и этот вклад входит в статистические ошибки.

На рис.2 приведены массовые распределения (зависимость изобарного выхода от массового числа), полученные для мишеней ${}^{204}\text{Pb}$, ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$ и ${}^{208}\text{Pb}$. Поскольку метод активационного анализа позволяет рассчитывать сечения только для радиоактивных остаточных ядер, недостающие сечения были добавлены рассчитанными при помощи MCNP данными. На рис.2 экспериментальные результаты разделены на три категории: результаты, где менее 40% экспериментальных результатов были включены в изобарный выход (кружки); результаты, где 40–70% экспериментальных результатов были включены в изобарный выход (крестики); результаты, где более 70 процентов экспериментальных результатов были включены в изобарный выход (треугольники). Как видно из рисунков, наилучшее совпадение между экспериментальными и расчётными данными наблюдается при включении в экспериментальные изобарные выходы менее 40% экспериментальных результатов. Это вполне объяснимо, поскольку основной

вклад в эти экспериментальные данные вносят расчётные данные. Несмотря на это, большинство экспериментальных данных в этой области находится выше, чем теоретические расчеты. Для остальных областей масс экспериментальные данные также выше, чем теоретические расчеты. Это можно объяснить тем, что модель не учитывает все механизмы образования остаточных ядер. К аналогичному выводу пришли и в исследованиях протон-ядерных реакций [3–5].

5. Заключение

Расчет сечений остаточных ядер для обогащенных свинцовых мишеней ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb , облученных пучком дейтронов с энергией 2.2 Гэв/нуклон, выполнен с помощью программы Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP). Экспериментальные результаты получены на нуклотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Сравнение экспериментальных и теоретических изобарных выходов указывает на различие этих данных. Лучшее согласие получено для изотопа ^{204}Pb . Это может быть связано с тем, что при определении сечений образования остаточных ядер из ^{204}Pb были учтены вклады от всех примесей изотопов свинца, что не было сделано для остальных мишеней. Тем не менее различие между экспериментальными и расчетными данными объясняется тем, что модель не учитывает все механизмы образования ядер-продуктов.

Уточнение теоретических моделей важно тем, что эти модели можно использовать для анализа в широкой области приложений ядерной физики: проектирование реакторов, протонная и нейтронная терапия в медицинской физике, проектирование ускорителей и исследования на них, производство энергии и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. **B. Abrams, D. Chapin, D. Kammen et al.**, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, Issued by the U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, and the Generation IV International Forum, (2002).
2. **Yu.E. Titarenko, V.F. Batyaev et al.**, Residual Nuclide Formation in Pb-206, Pb-207, Pb-208, Pb-nat and Bi-209 Induced by 0.04-2.6-GeV Protons as well as in Fe-56 Induced by 0.3-2.6- GeV Protons, 1099 (2008).
3. **Yu.E. Titarenko, V.F. Batyaev et al.**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **562**, 801 (2006).
4. **Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov et al.**, Phys. Rev. C, **65**, 064610 (2002).
5. **Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov et al.**, Spectral Measurements of Neutrons from Pb, W, and Na Targets Irradiated by 0.8 and 1.6 GeV Protons, 2000.
6. **A. Auce, R.F. Carlson et al.**, Phys. Rev. C, **53**, 2919 (1996).
7. **J.R. Wu, C.C. Chang, H.D. Holmgren.** Phys. Rev. C, **19**, 370 (1979).
8. **F. Ditrói, F. Tárkányi et al.**, J. Radioanal. Nuclear Chem., **276**, 835 (2008).
9. **S. Mukhammedov, E. Pardayev.** Izv. Akad. Nauk Uzb.SSR, **5**, 81 (1985).
10. **T. Enqvist, P. Armbruster et al.**, Nuclear Physics A, **703**, 435 (2002).

11. **C.J. Werner.** MCNP Users Manual Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR-17-29981 (2017).
12. **A.R. Balabekyan et al.,** J. Phys. G: Nucl. Part. Phys, **46**, 095103 (2019).

ԴԵՅՏՐՈՆԻ ԵՎ ՀԱՐՍՏԱՑՎԱԾ ԿԱՊԱՐԻ ԹԻՐԱԽՆԵՐԻ (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb ԵՎ ^{208}Pb)
ՓՈԽԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԵՍԱԿԱՆ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՏՐՎԱԾՔՆԵՐԻ
ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ս. ԳԱԳԻՆՅԱՆ

2.2 ԳԷՎ/նուկլոն էներգիայով դեյտրոնային փնջով ճառագայթված հարստացված կապարի թիրախներում՝ ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb և ^{208}Pb , առաջացած մնացորդային միջուկների կտրվածքների տեսական հաշվարկները կատարվել են Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP) միջոցով: Փորձարարական արդյունքները ստացվել են Միջուկային հետազոտությունների միջազգային ինստիտուտի Բարձր էներգիաների ֆիզիկայի լաբորատորիայի նուկլոտրոնի վրա (Դուբնա, ՌԴ) : Այնուհետև Ներմուծված ակտիվության մեթոդով որոշվել են թվով մոտ 90 մնացորդային միջուկների առաջացման կտրվածքներ յուրաքանչյուր թիրախից: ^{204}Pb -ի ճառագայթումը ԳԷՎ էներգիաների տիրույթում կատարվել է առաջին անգամ: Տեսական և փորձարարական հաշվարկների համեմատությունը լավ համընկում է ցույց տվել:

COMPARATIVE ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INTERACTION CROSS SECTIONS OF DEUTERON AND ENRICHED LEAD ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , AND ^{208}Pb

S. GAGINYAN

The modeling calculation of cross-sections of residual nuclei for isotopically enriched lead (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , and ^{208}Pb) targets irradiated by 2.2 GeV/nucleon deuteron beam has been made by Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP). The experimental results were obtained on the Nuclotron of the Laboratory of High Energy Physics at the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna. Afterwards, the production cross sections of target fragments were determined for about 90 residual nuclei of each target mentioned above by the method of induced activity. The first-time irradiation has been made on the ^{204}Pb in the GeV range. The comparison of theoretical calculations and experimental results revealed a good agreement between the experiment and simulation data.