

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

**“Новые данные по спектрам сверхтяжелых изотопов водорода  ${}^7\text{H}$ ,  ${}^6\text{H}$  и обнаружение моды спонтанного распада с испусканием 4-х нейтронов”**

Коллектив соавторов:

1. Безбах А.А. (ЛЯР ОИЯИ)
2. Григоренко Л.В. (ЛЯР ОИЯИ)
3. Горшков А.В. (ЛЯР ОИЯИ)
4. Крупко С.А. (ЛЯР ОИЯИ)
5. Музалевский И.А. (ЛЯР ОИЯИ)
6. Никольский Е.Ю. (НИЦ КИ / ЛЯР ОИЯИ)
7. Тер-Акопьян Г.М. (ЛЯР ОИЯИ)
8. Фомичев А.С. (ЛЯР ОИЯИ)
9. Худоба В. (ЛЯР ОИЯИ)
10. Шаров П.Г. (ЛЯР ОИЯИ)

В представленный цикл работ входят 4 публикации.

Краткая аннотация:

На протяжении более 40 лет сверхтяжелые изотопы водорода  ${}^7\text{H}$  и  ${}^6\text{H}$  являются одной из загадок ядерной физики и представляют повышенный интерес по целому ряду причин. Это самые экзотические нейтронно-избыточные системы, какие только можно себе представить (соотношение  $A/Z$  равно 7 и 6). В ядре  ${}^7\text{H}$  замыкается под-оболочка  $p_{3/2}$  для изотопов водорода, следовательно, в случае его обнаружения открываются новые возможности исследования оболочечной динамики в условиях исключительного дефицита протонов. Существование достаточно долгоживущих более тяжелых изотопов водорода крайне маловероятно именно за счет замыкания  $p_{3/2}$  под-оболочки в  ${}^7\text{H}$ . Есть все основания полагать, что распад основного состояния  ${}^7\text{H}$  имеет уникальную динамику – так называемый «истинно» 5-частичный распад  ${}^7\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + 4n$ . При этом 4 нейтрона должны испускаться практически одновременно. Такая динамика распада подразумевает исключительно большие времена жизни, вплоть до того, что возможно существование новой моды радиоактивного распада — четырех-нейтронной радиоактивности. Ранее исследованию этого явления с нашим участием были посвящены две работы: экспериментальная - [Golovkov *et al.*, “*Estimates of the  ${}^7\text{H}$  width and lower decay energy limit*”, Physics Letters B **588** (2004) 163] и теоретическая - [Grigorenko *et al.*, “*Two-neutron radioactivity and four-nucleon emission from exotic nuclei*”, Phys. Rev. C **84** (2011) 021303], послужившие началу подготовки новых экспериментов для углубленного изучения данной задачи. Теоретически было предсказано, что до энергии распада  $E_T \sim 100$  кэВ времена жизни для основного состояния  ${}^7\text{H}$  относятся к типичному для радиоактивности диапазону. Экспериментально же был получен верхний предел на время жизни и, соответственно, нижний предел на энергию распада основного состояния, из которого следовало, что до энергий распада  $E_T \sim 4\text{--}5$  МэВ можно ожидать весьма малые ширины ( $\Gamma < 100\text{--}500$  кэВ) для основного состояния  ${}^7\text{H}$ . Явление истинно 4-х нейтронного распада до сих пор не наблюдалось экспериментально и

его обнаружение знаменует открытие нового класса радиоактивных распадов с испусканием сильно взаимодействующих частиц [1].

На протяжении примерно 40 лет (с начала 80-х) поиск изотопа  ${}^7\text{H}$  был безуспешным или не приводил к «решительным» результатам, а попытки получения данных о свойствах основного состояния ядра  ${}^7\text{H}$  предпринимались неоднократно (как правило с нашим участием) в ведущих мировых центрах – RIKEN, GANIL, GSI. В работе [Korshennikov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 082501], выполненной в RIKEN на RIPS, в реакции  ${}^1\text{H}({}^8\text{He}, 2p){}^7\text{H}$  наблюдалась особенность в районе порога  ${}^3\text{H}+4n$ , но фоновые условия и низкое разрешение ( $\sim 2$  МэВ) не позволили сделать количественного заключения. В работе, выполненной в GANIL [Caamaño *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 062502] утверждалось о наблюдении низколежащего резонансного состояния  ${}^7\text{H}$ , полученного в реакции  ${}^{12}\text{C}({}^8\text{He}, {}^7\text{H}){}^{13}\text{N}$  с использованием методики “active target”. Однако, в этой работе отсутствует идентификация канала реакции и заявка на то, что 7 наблюдаемых событий относятся к  ${}^7\text{H}$  и/или к  ${}^6\text{H}$  совершенно не однозначна. Имея неопределенность в энергетическом разрешении на уровне 2-5 МэВ констатация узкого резонанса при  $E_T \sim 0.6$  МэВ также вызывает сомнение. В RIKEN на RIPS [Nikolskii *et al.*, Phys. Rev. C **81** (2010) 064606] изучалась реакция  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$  при энергии пучка  ${}^8\text{He}$  42 МэВ/нуклон. В полученном спектре  ${}^7\text{H}$  была выявлена особенность в области  $\sim 2$  МэВ над порогом распада. Сильной стороной этой работы были - использование реперной реакции для энергетической калибровки, организация совпадений  ${}^3\text{He}$ -t для повышения однозначности выходного канала реакции и фоновые измерения; разрешение эксперимента составляло  $\sim 2$  МэВ.

В 2017 году в Лаборатории ядерных реакций была запущена новая установка – фрагмент сепаратор АКУЛИНА-2 на ускорителе тяжелых ионов У-400М. В 2018 году были начаты первые физические эксперименты с высококачественными радиоактивными пучками  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$  и др. С введением в строй АКУЛИНА-2 поиск изотопа  ${}^7\text{H}$  стал реалистической задачей — для исходного радиоактивного ядра-снаряда  ${}^8\text{He}$  были получены интенсивности  $\sim 10^5$  частиц/сек, что близко к рекордным мировым достижениям. В 2018 и 2019 гг. на установке АКУЛИНА-2 были проведены два эксперимента с интервалом в один год. Ядро  ${}^7\text{H}$  получали в реакции  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$ , идущей при энергии пучка  ${}^8\text{He}$  26 МэВ/нуклон, а энергетический спектр ядра  ${}^7\text{H}$  определяли методом недостающей массы по измеренной энергии и углу вылета ядер отдачи  ${}^3\text{He}$  с разрешением  $\sim 1$  МэВ [2,3]. Предпосылками для успешного поиска  ${}^7\text{H}$  на установке АКУЛИНА-2 являлись: (i) возможность использовать криогенную газовую мишень, обеспечивающую хорошие фоновые условия, (ii) возможность получить экспериментальное разрешение лучше 1 МэВ при весьма толстой мишени, (iii) надежная идентификация канала реакции и измерение импульсного распределения тритонов из распада  ${}^7\text{H}$  (в работе RIKEN в этой же реакции устанавливался лишь факт регистрации тритонов). В процессе подготовки к эксперименту по  ${}^7\text{H}$  впервые была разработана теоретическая модель для изучения распадов с испусканием 4-х нейтронов [1]. Было продемонстрировано существование в таких процессах корреляций типа «паулиевской фокусировки», определяемых оболочечной структурой во внутренней области и требованием антисимметризации по 4 нуклонам волновой функции в процессе распада. Монте-Карло «генератор», основанный на полученном коде, использовался в симуляциях при анализе данных экспериментов [2-4].

В первом эксперименте [2] ядра  ${}^3\text{He}$ , вылетающие из газовой криогенной мишени дейтерия с энергией 9 – 25 МэВ под углом  $8^\circ - 26^\circ$  к направлению траектории бомбардирующего ядра  ${}^8\text{He}$ , регистрировались с помощью двух телескопов кремниевых детекторов в совпадении с

летающими вперёд ядрами  $^3\text{H}$ , ожидаемыми продуктами распада  $^7\text{H}$ . В эксперименте было впервые обнаружено сравнительно узкое (шириной — 2.0(5) МэВ) возбуждённое состояние  $^7\text{H}$  с энергией  $E_T = 6.5(5)$  МэВ над порогом распада  $^3\text{H} + 4n$ . В полученном энергетическом спектре  $^7\text{H}$  была также зарегистрирована выделенная группа из пяти событий в диапазоне  $0.5 < E_T < 2.5$  МэВ, возникновение которой было объяснено возможным образованием основного состояния  $^7\text{H}$  с энергией  $E_T = 1.8(5)$  МэВ над порогом распада  $^3\text{H} + 4n$ . Все указанные события предполагаемого основного состояния  $^7\text{H}$  были зарегистрированы в системе центра масс реакции  $^2\text{H}(^8\text{He}, ^3\text{He})^7\text{H}$  в диапазоне углов  $17^\circ - 27^\circ$ , соответствующем ожидаемому положению второго дифракционного максимума сечения для заселения основного состояния.

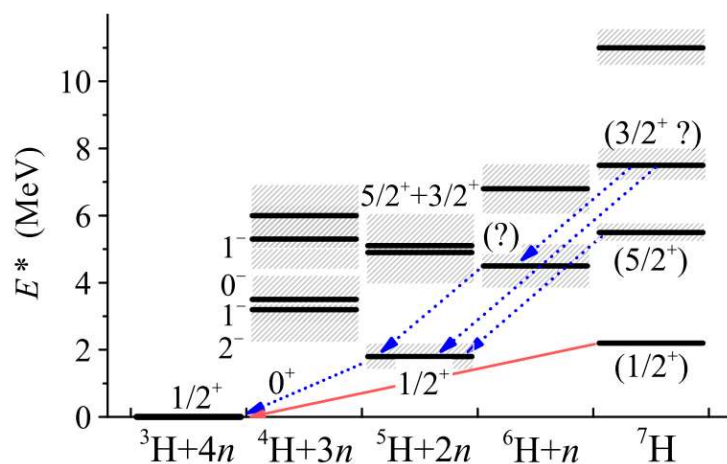
Основываясь на опыте работы [2], в эксперименте [3], проведённом в апреле 2019 года, была улучшена методика измерений. С целью получения данных о заселении искомого резонанса основного состояния  $^7\text{H}$  в угловом диапазоне, отвечающем первому дифракционному максимуму реакции  $^2\text{H}(^8\text{He}, ^3\text{He})^7\text{H}$ , был понижен до  $6^\circ$  предел регистрируемых углов вылета ядер отдачи  $^3\text{He}$ . Было удвоено количество телескопов для регистрации  $^3\text{He}$ . Кроме того, при помощи нейтронной стенки, установленной на базе 2 м от мишени, регистрировались нейтроны, что повышало надёжность вывода об идентификации  $^7\text{H}$  и каналах распада. В рамках эксперимента [3] было проведено дополнительное калибровочное измерение: спектр энергии для ядра  $^9\text{Li}$  был получен с использованием реперной реакции  $^2\text{H}(^{10}\text{Be}, ^3\text{He})^9\text{Li}$  при энергии  $E(^{10}\text{Be}) = 44$  МэВ/нуклон. Это позволило по известным уровням  $^9\text{Li}$  независимо определить экспериментальное разрешение и сделать необходимую калибровку всей установки. Результаты эксперимента [3] полностью подтвердили результаты [2]. Была учетверена полная статистика эксперимента. В низкоэнергетической части спектра 5 событий являлись тройными совпадениями  $^3\text{He}$ - $^3\text{H}$ - $n$ , и находились точно в областях обнаруженных пиков. Получены 11 событий, относящиеся к основному состоянию  $^7\text{H}$  с  $E_T = 2.2(5)$  МэВ. Эти события собраны в две группы по ц.м. углу реакции  $5^\circ - 10^\circ$  и  $17^\circ - 27^\circ$ , в соответствии с ожидаемыми для основного состояния первым и вторым дифракционными максимумами. Обнаружены два узких состояния  $E_T = 5.5$  и  $7.5$  МэВ, которые можно интерпретировать как дублет  $5/2^+ - 3/2^+$ ; в условиях эксперимента [2] они сливались в одной структуре с  $E_T = 6.5$  МэВ. Из данных [2, 3] следует указание на наличие резонансного состояния с  $E_T = 11$  МэВ.

Методика постановки эксперимента [3] позволила также изучить спектр состояний ядра  $^6\text{H}$ , заселяемый в реакции  $^2\text{H}(^8\text{He}, ^4\text{He})^6\text{H}$  [4]. Предполагалось, что по аналогии с  $^7\text{H}$  регистрация тритонов высокой энергии в совпадении с  $^4\text{He}$  будет служить индикатором одного или нескольких последовательных распадов  $^6\text{H}$ . Калибровочное измерение в реакции  $^2\text{H}(^{10}\text{Be}, ^4\text{He})^8\text{Li}$  подтвердило эффективность используемого метода для идентификации  $^8\text{Li}$  и изучения механизма  $(d, \alpha)$  реакции. Спектр недостающей массы  $^6\text{H}$  восстанавливался из спектра низкоэнергетических  $^4\text{He}$ , зарегистрированных в совпадении с тритонами и нейтронами. Согласно симуляции экспериментов и полученных данных, энергетическое разрешение в спектре недостающей массы было лучше, чем 2 МэВ. В эксперименте [4], была получена рекордная для системы  $^6\text{H}$  статистика: более 4000 двойных совпадений  $^4\text{He}$ - $^3\text{H}$  и порядка 130 тройных совпадений  $^4\text{He}$ - $^3\text{H}$ - $n$ . В восстановленном спектре  $^6\text{H}$ , важным открытием было полное отсутствие возможных состояний в диапазоне  $E_T < 3.5$  МэВ над порогом распада  $^3\text{H} + 3n$ . Этот результат не согласуется с данными пионерской работы [Aleksandrov *et al.*, “Observation of nonstable heavy hydrogen isotope  $^6\text{H}$  in the reaction  $^7\text{Li}(^7\text{Li}, ^8\text{B})$ ”. *Yad. Fiz.*, 39:513, 1984.], где впервые декларировалось наблюдение резонансного состояния  $^6\text{H}$  при энергии  $E_T = 2.7(4)$  МэВ

(формирование этого бампа объясняется [4] заселением основного состояния  ${}^5\text{H}$  в реакции  ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^9\text{B}^*){}^5\text{H}$ , идущей с большим на порядок сечением). Из корреляционного анализа данных [4] с учетом тройных совпадений  ${}^4\text{He}-{}^3\text{H}-n$  были установлены два возможных состояния изотопа  ${}^6\text{H}$  при  $E_T \sim 4.5$  (g.s.) и 6.8 МэВ.

По результатам работы, посвященной поиску низколежащих состояний  ${}^7\text{H}$  в реакции  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$  и  ${}^6\text{H}$  в реакции  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^4\text{He}){}^6\text{H}$ , были сделаны следующие основные выводы:

- 1) Положение основного состояния  ${}^7\text{H}$  (предположительно  $1/2^+$ ) определено как 2.2(5) МэВ над порогом  ${}^3\text{H}+4n$  с шириной, определяемой экспериментальным разрешением  $\sim 1$  МэВ.
- 2) Наблюдается дублет (предположительно  $5/2^+ - 3/2^+$ ) относительно узких состояний при энергии 5.5(3) и 7.5(3) МэВ. Центроид дублета хорошо согласуется с возбужденным состоянием  ${}^7\text{H}$  6.5 МэВ, наблюдавшимся в эксперименте [2] и неразрешимым по энергии в его условиях.
- 3) Исключительно низкое сечение заселения основного состояния  ${}^7\text{H}$  ( $\sim 25$   $\mu\text{b/sr}$ ) объясняется крайней периферийностью взаимодействия в канале  ${}^8\text{He}+d$ , подтверждаемой также угловыми распределениями  $d\sigma/d\Omega$ . Это отражает повышенную аморфность и «хрупкость» данной нейтронно-избыточной системы, не выживающей при центральных столкновениях.
- 4) Полученные результаты объясняют безуспешность поиска основного состояния  ${}^7\text{H}$  в предыдущих экспериментах. При невысоком экспериментальном разрешении  $\sim 2$  МэВ или хуже, все ранее наблюдаемые в спектре  ${}^7\text{H}$  структуры должны сливаться в один непрерывный спектр, а слабо заселяемое основное состояние  ${}^7\text{H}$  может «тонуть» в фоновых событиях и событиях из первого возбужденного состояния.
- 5) Прежде декларируемое основное состояние  ${}^6\text{H}$  при энергии  $\sim 2.6-2.9$  МэВ над порогом  ${}^3\text{H}+3n$  не наблюдалось в нашем эксперименте  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^4\text{He}){}^6\text{H}$  с пределом на сечение  $d\sigma/d\Omega_{\text{c.m.}} < 5$   $\mu\text{b/sr}$ .
- 6) В спектре  ${}^6\text{H}$  была обнаружена широкая структура при энергии 6.8 МэВ над порогом  ${}^3\text{H}+3n$  с сечением  $d\sigma/d\Omega_{\text{c.m.}} \sim 190$   $\mu\text{b/sr}$ , типичным для прямой реакции передачи дейтрона. Эта структура может быть интерпретирована как одно или несколько резонансных состояний с нижним пределом на энергию  $E_T = 4.5$  МэВ для основного состояния.
- 7) Полученная в результате экспериментов [2-4] схема уровней и распадов «сверхтяжелых» изотопов водорода  ${}^7\text{H}$  и  ${}^6\text{H}$  позволяет утверждать, что распад основного состояния ядра  ${}^7\text{H}$  возможен только с одновременным испусканием 4-х нейтронов («истинный» пятичастичный распад  ${}^3\text{H}+4n$ ). Это первый доказанный случай существования такой моды ядерного распада.



В первых экспериментах на новом фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 удалось разрешить одну из давно стоящих знаковых проблем экспериментальной ядерной физики - обнаружение изотопов  ${}^6\text{H}$  и  ${}^7\text{H}$ , а также продвинуться на пути изучения новой моды спонтанного ядерного распада с одновременным испусканием  $4n$ . Этапы данной работы неоднократно докладывались на международных конференциях по ядерной физике, семинарах ЛЯР и ОИЯИ. В представленном списке публикаций 4 статьи в журналах «Physical Review Letters», «Physical Review C» и «Письма в ЖЭТФ».

Председатель НТС ЛЯР \_\_\_\_\_

Ученый секретарь НТС ЛЯР \_\_\_\_\_

## Список работ цикла

### “Новые данные по спектрам сверхтяжелых изотопов водорода $^7\text{H}$ , $^6\text{H}$ и обнаружение моды спонтанного распада с испусканием 4-х нейтронов”

1. P.G. Sharov, L.V. Grigorenko, A. Ismailova, M.V. Zhukov,  
*“Pauli-principle driven correlations in four-neutron nuclear decays”*,  
JETP Letters **110** (2019) 5-14 [Письма в ЖЭТФ **110** (2019) 7-8; arXiv:1808.00513].
2. A.A. Bezbakh, V. Chudoba, A.V. Gorshkov, S.A. Krupko, S.G. Belogurov, D. Biare, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, I. Mukha, I.A. Muzalevskii, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, A.M. Quynh, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, P. Szymkiewicz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, B. Zalewski, M.V. Zhukov,  
*“Evidence for the first excited state of  $^7\text{H}$ ”*,  
Physical Review Letters **124** (2020) 022502 [arXiv:1906.07818].
3. I.A. Muzalevskii, A.A. Bezbakh, E.Yu. Nikolskii, V. Chudoba, S.A. Krupko, S.G. Belogurov, D. Biare, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, M.Yu. Kozlov, B. Mauryey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, W. Piatek, A.M. Quynh, V.N. Schetinin, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, N.B. Shulgina, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, P. Szymkiewicz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, B. Zalewski, M.V. Zhukov,  
*“Resonant states in  $^7\text{H}$ : Experimental studies of the  $^2\text{H}(^8\text{He}, ^3\text{He})$  reaction”*,  
Physical Review C **103** (2021) 044313 [arXiv: 2010.09655].
4. E.Yu. Nikolskii, I.A. Muzalevskii, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, S.A. Krupko, S.G. Belogurov, D. Biare, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, M.Yu. Kozlov, B. Mauryey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, W. Piatek, A.M. Quynh, V.N. Schetinin, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, N.B. Shulgina, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, P. Szymkiewicz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, B. Zalewski, M.V. Zhukov,  
*“ $^6\text{H}$  states studied in the  $^2\text{H}(^8\text{He}, ^4\text{He})$  reaction and evidence of an extremely correlated character of the  $^5\text{H}$  ground state”*,  
Physical Review C **105** (2022) 064605 [arXiv:2105.04435].