

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИМИ НАНОСИСТЕМАМИ НА УНИКАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ФИАН С-60, ГЕЛИС И ПАВИКОМ

*О.Д. Далькаров*, рук. отд-ния ядерной физики и астрофизики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.

*М.А. Негодаев*, вед. науч. сотр. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, д-р физ.-мат. наук

*А.С. Русецкий*, вед. науч. сотр. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук

*Сообщается об исследовании протекания реакций DD-синтеза в гетероструктурах Pd/PdO:Dx и Ti/TiO2:Dx при низких энергиях, а также возможности их усиления и стимулирования пучками ионов и синхротронного излучения. Рассмотрены следствия, которые обнаруженные эффекты имеют для термоядерной энергетики, геофизики и астрофизики.*

**Ключевые слова:** ядерные реакции, ионные пучки и взаимодействие излучения с материалами, синхротронное излучение, водородосодержащие системы (материалы), ускоритель ионов, детекторы излучений, распознавание треков частиц.

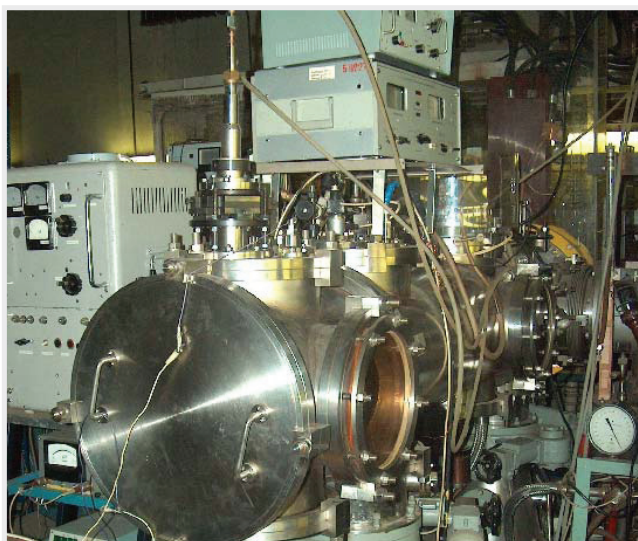
**Введение.** В рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», мероприятие 1.8., были выполнены работы по теме «Исследование реакций низкоэнергетического взаимодействия пучков ионов и синхротронного излучения с водородосодержащими наносистемами на уникальных установках ФИАН С-60, ГЕЛИС и ПАВИКОМ» (Государственный контракт № 16.518.11.7104 от 27 октября 2011 г.)

Проблема, на решение которой направлен реализуемый проект, связана с исследованием протекания реакций ядерного синтеза в твердом теле при низких энергиях взаимодействующих частиц. Данная проблема затрагивает различные области науки и техники (ядерную физику, астрофизику, термоядерную энергетику и др.)

Основной целью НИР являлось создание методики исследования взаимодействия пучков ионов и рентгеновского излучения с водородными наносистемами в металлах и полупроводниках, которое может приводить к увеличению вероятности инициирования ядерных реакций при низких энергиях, с помощью уникальных установок С-60, ГЕЛИС (см. рис.) и ПАВИКОМ. Также целью НИР являлось создание методик изготовления мишеней на основе водородосодержащих гетероструктур Pd и Ti, в которых процессы стимулирования ядерных реакций более ярко выражены.

В результате выполнения проекта были исследованы методы воздействия ионизирующего излучения (пучка ионов и рентгеновских квантов) на водородосодержащие гетероструктуры палладия и титана, предназначенные для повышения вероятности протекания ядерных реакций.

На первом этапе НИР были созданы методики изготовления мишеней на основе водородосодержащих гетероструктур Pd и Ti и изготовлены мишени для последующих экспериментов. Получены профили концентрации атомов в поверхностном слое мишеней. Установки С-60 и ГЕЛИС подготовлены к работе с исследуемыми мишенями. Трековые детекторы CR-39 прокальброваны протонами, альфа-частицами и нейтронами. Тестовые измерения показали готовность установок к проведению экспериментов.



**Внешний вид установки ГЕЛИС**

На *втором этапе* НИР была разработана методика измерений выхода ядерных реакций из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов и синхротронного излучения. Исследованы выходы DD-реакции из мишеней  $Ti/TiO_2:D_x$  и  $Pd/PdO:D_x$  при их облучении пучками протонов и дейтронов в диапазоне энергий 10–25 кэВ на установке ГЕЛИС, а также при их облучении пучком синхротронного излучения на синхротроне С-60.

Исследование показало, что при высоких плотностях тока пучка дейтронов ( $>200$  мкА/см<sup>2</sup>) в гетероструктурах  $Ti/TiO_2:D_x$  и  $Pd/PdO:D_x$  наблюдаются значительные эффекты усиления выхода DD-реакций по сравнению с расчетными значениями. Потенциалы экранирования, которые характеризуют величину этого усиления, в данных условиях эксперимента были оценены в диапазоне  $U_e = 630–980$  эВ для гетероструктуры  $Pd/PdO:D_x$  и  $U_e = 160–750$  эВ для  $Ti/TiO_2:D_x$ . Данные величины потенциалов экранирования значительно выше значений, которые ранее были получены в экспериментах на ускорителе [1]. Возможно, это объясняется тем, что в работе [1] измерения проводились при плотностях тока пучка намного меньше, чем на установке ГЕЛИС, и это минимизировало эффекты усиления.

Впервые нами было показано, что воздействие пучка протонов в диапазоне энергий 10–25 кэВ на гетероструктуры  $Ti/TiO_2:D_x$  и  $Pd/PdO:D_x$  стимулирует протекание в них ядерных реакций DD-синтеза.

Измерение эмиссии протонов и нейтронов (продуктов DD-синтеза) проводилось с помощью трековых детекторов CR-39 с различными покрытиями и нейтронного детектора на основе 12 счетчиков с наполнением газом He-3. Показания обоих детекторов находятся в хорошем согласии друг с другом, что дает нам уверенность в правильности измерения исследуемых ядерных реакций.

На *третьем этапе* НИР осуществлена оценка сечений ядерных реакций при низких энергиях для легких ядер при воздействии ионных пучков и синхротронного излучения, проведено сопоставление полученных результатов с имеющимися данными по сечениям DD-реакций при низких энергиях, полученных в других экспериментах, дан анализ соответствующих следствий для астрофизики и термоядерной энергетики. Также осуществлено

обобщение и дана оценка дальнейшего применения полученных результатов. Подготовлены в печать 4 статьи с изложением основных результатов НИР.

На основе полученных данных можно проанализировать следствия для термоядерной энергетики.

До недавнего времени при оценке выхода DD/DT-реакций на поверхности «первой стенки» дивертора термоядерных реакторов типа ITER не принимались во внимание нелинейные процессы усиления реакций синтеза в металлах при низких энергиях бомбардирующих частиц. Действительно, при столкновении частиц в вакууме или плазме выход продуктов синтеза при энергии в лабораторной системе  $(E_d)_{lab} \leq 2 \text{ keV}$  будет пренебрежимо мал [3]. Однако, при низкоэнергетической дейтронной бомбардировке металлических мишеней возникают условия, кардинально отличные от условий вакуумно-плазменных столкновений. Нелинейные эффекты усиления наблюдаются вследствие значительного увеличения потенциала экранирования дейтронов в металлических мишенях при  $E_d < 5 \text{ keV}$ , особенно при большой плотности тока, когда количество несвязанного с атомами мишени дейтерия существенно возрастает. В этой связи можно предположить, что усиление выхода реакций синтеза будет также иметь место в процессе плазменной бомбардировки поверхностей реактора дейтронами/тритонами, ускоренными электростатическим полем в зазоре «плазма – стенка реактора» в сильноточных термоядерных установках типа ITER. Понимание вклада подобных эффектов становится важным при рассмотрении вопроса о возможных дополнительных источниках эрозии материалов первой стенки реактора при длительной его эксплуатации.

Оценки интенсивности DT-реакции, с учетом фактора усиления при низких энергиях дейтронов в металлах, указывают на наличие игнорируемых ранее дополнительных краевых эффектов в термоядерных установках типа ITER. Альфа-частицы, генерируемые в таких реакциях и тормозящиеся в материалах дивертора/первой стенки, будут создавать дополнительные точечные дефекты (вакансии). Генерация избыточных вакансий может увеличить скорость распыления поверхностного слоя первой стенки. Атомы гелия-4, образующиеся при остановке этих альфа-частиц, будут накапливаться в приповерхностном слое материала в ядрах краевых дислокаций или захватываться дислокационными атмосферами. Данный процесс может привести к потере пластичности приповерхностного слоя металлов даже при достаточно малых концентрациях  ${}^4\text{He} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , сопровождающейся блистерингом и образованием микротрещин.

Описанные эффекты, являющиеся следствием усиления реакций синтеза в первой стенке термоядерного реактора, могут привести к уменьшению времени его эксплуатации. Этот вывод особо относится к более мощным энергетическим реакторам будущего (DEMO и др.), в которых поток заряженных частиц на первой стенке, а значит и фактор усиления реакций DD/DT-синтеза будут значительно выше. В этой связи, наряду с эффектами объемных повреждений, индуцируемых быстрыми нейтронами, и поверхностным распылением конструкционных материалов потоками низкоэнергетических заряженных частиц, вклад усиления реакций синтеза в радиационную коррозию материалов первой стенки энергетических реакторов также подлежит серьезной экспериментальной оценке.

Говорить окончательно о значении эффектов усиления выходов реакций DD/DT-синтеза для получения избыточной энергии пока преждевременно. Для этого необходимы точные калориметрические измерения, что является темой отдельного исследования. Хотя некоторые качественные оценки можно сделать уже сейчас. Напомним, что для обеспечения условий протекания реакций синтеза в термоядерных установках типа ITER используется сильно ионизированная плазма. Для поддержания этих условий в течение времени, необходимого, чтобы выделяющаяся энергия достигла нужных значений, требуется сложная система сжатия плазмы магнитным полем (что требует значительных энергозатрат). В других установках для создания горячей плазмы используются мощные (свыше

$10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) лазеры. Воздействие такого лазера на твердотельную мишень приводит к ее частичному или полному разрушению, благодаря чему и создается плазма. При этом энергетические затраты на лазерное излучение и удержание плазмы также очень велики. **До настоящего времени пока ни одна из термоядерных установок не выработала энергию, превышающую энергозатраты на поддержание ее работы.**

В этой связи представляется перспективным и заманчивым использовать в качестве мишеней материалы, содержащие дейтерий (и тритий) и обладающие высоким потенциалом экранирования. Расчеты, проведенные в [4] показали, что гидриды металлов можно рассматривать как двойную систему, где водородная подсистема находится в возбужденном состоянии. При этом эффективная температура водородной подсистемы может на несколько порядков величины превышать температуру металла – матрицы. Таким образом, водородную подсистему можно рассматривать как холодную плазму, внедренную в твердое тело, которое само не дает ей разлететься и поддерживает ее в возбужденном состоянии длительное время. При воздействии на такую систему внешним излучением, не разрушающим структуру твердого тела (рентгеновское излучение, пучки электронов и ионов, лазерное излучение малой мощности), можно добиться условий, при которых станет возможно протекание реакций синтеза. Увеличивая мощность внешнего воздействия, можно добиться усиления выхода продуктов ядерных реакций, и такой синтез будет вполне управляемым [5]. При этом затраты энергии на поддержания такой системы в рабочем состоянии могут быть существенно ниже (на порядки величины), чем для «классических» термоядерных установок.

Таким образом, поиск материалов с высоким потенциалом экранирования, обладающих стойкостью к экстремально высоким температурам и способных поддерживать протекание реакций синтеза длительное время, а также способов инициирования этих реакций с минимальными затратами энергии, представляется весьма важным и перспективным. При этом не стоит ограничиваться только исследованием реакций DD/DT-синтеза, а следует изучить и другие перспективные реакции с выделением избыточной энергии (He-3(d,p)He-4, Li-6(d, $\alpha$ )He-4, B-11(p, $\alpha$ )Be-8 и др.), протекание которых в твердом теле при низких энергиях пока до конца не изучено.

Также весьма важные следствия из наблюдаемых эффектов можно сделать для геофизики и астрофизики. На протекание реакций низкотемпературного ядерного синтеза (НТС) в недрах планет и их спутников указывают многие косвенные данные (планетарная и спутниковая вулканическая активность, избыточное содержание He-3 и трития в термальных водах, вулканических газах и в атмосфере). Отсутствие в зонах с повышенной вулканической активностью повышенного содержания радиоактивных элементов (тория, урана и калия) также говорит о том, что помимо их имеется дополнительный источник тепла в недрах Земли.

В работе [6] исследовалось возможное значение реакций НТС для геофизики, а именно даны оценки возможного вклада DD-реакций, протекающих в недрах Земли, на величину ее теплового потока. Показано, что при поддержании скорости DD-реакции на минимальном «уровне Джонса»  $\sim 10^{-23} \text{ с}^{-1} (\text{dd})^{-1}$  и при условии, что первоначальный состав Земли обогащен водородом (т. н. «модель изначально гидридной Земли» [7]), мощность, выделяемая при НТС в недрах Земли, примерно равна 0,14 ТВт. Это составляет 0,3 % от общей мощности теплового потока Земли, равного  $\sim 40$  ТВт. При этом оценки, данные в [6] не учитывали никаких возможных эффектов усиления выхода DD-реакций, протекающих в твердом теле. Простые оценки показывают, что при наличии данных эффектов тепловой поток, обусловленный протеканием НТС в недрах Земли, может быть на 1–2 порядка величины выше.

Последние данные по измерению потоков геонейтрино (т. е. нейтрино, идущих из недр Земли), полученные в экспериментах KamLand и Borexino [8] позволили точнее оценить

мощность теплового потока, обусловленного радиоактивными распадами тория и урана в недрах Земли. Для мантии она оказалась равна  $20 \pm 9$  ТВт. Для Земной коры величина мощности теплового потока от радиоактивных распадов тория, урана и калия равна  $8,9 \pm 1,2$  ТВт. Таким образом, полная тепловая мощность от радиоактивных распадов оценена  $\sim 29$  ТВт. Андерсон [9] оценил вклад иных (нерадиационных) источников тепла, как  $\sim 16$  ТВт, а полный тепловой поток Земли оценен им в диапазоне 39–66 ТВт в зависимости от применяемой модели Земных недр. Поскольку диапазон оценок теплового потока Земли весьма широк, в нем могут присутствовать еще один или несколько дополнительных источников тепла (в частности, обусловленных НТС).

Наличие эффектов усиления ядерных реакций в твердом теле также должно оказывать влияние на протекание их в ядрах звезд. Действительно, сверхвысокие давления в ядрах звезд на определенной стадии их развития приводят к образованию сверхплотного углеродного ядра (фактически алмазного). По мере «выгорания» углерода в ядре звезды начинают преобладать все более тяжелые элементы вплоть до железа. Эффекты усиления реакций синтеза в ядре звезды приведут к увеличению выхода продуктов ядерных реакций и тепла, что скажется на ее тепловом балансе. Увеличение скорости выгорания «ядерного горючего» (легких элементов, слияние которых способствует к образованию более тяжелых) ведет к уменьшению активного времени жизни звезды. В свою очередь увеличение вероятности синтеза приводит к наработке новых тяжелых элементов и сказывается на их распространенности во Вселенной. Все это требует дополнительных расчетов с учетом эффектов усиления ядерных реакций в ядрах звезд.

В дальнейшем нами планируется дооснащение установки ГЕЛИС дополнительными детекторами для получения более полной информации об энергетических спектрах заряженных частиц и потоках нейтронов. С данной целью разработаны технические задания на создание спектрометра заряженных частиц на основе счетчиков GaAs и нейтронного детектора на 36 каналов.

**Заключение.** Таким образом, в результате выполнения НИР проведено комплексное исследование реакций низкоэнергетического взаимодействия пучков ионов и синхротронного излучения с водородосодержащими наносистемами на уникальных установках ФИАН С-60, ГЕЛИС и ПАВИКОМ. Создана методика измерений выхода ядерных реакций из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов и синхротронного излучения; разработаны методики изготовления мишеней на основе водородосодержащих гетероструктур Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, в которых процессы стимулирования ядерных реакций более ярко выражены.

Результаты, полученные в ходе выполнения проекта, важны для решения как фундаментальных, так и прикладных проблем:

1. *Термоядерной энергетики:* а) создание систем накопления и хранения изотопов водорода (дейтерия, трития); б) поиск путей снижения температур, необходимых для осуществления термоядерных реакций; в) исследование радиационной стойкости материалов, способных найти применение в термоядерных установках.

2. *Астрофизики:* измерение сечений термоядерных процессов, ответственных за энергетику звезд.

3. *Геофизики:* оценка вклада низкоэнергетических ядерных реакций в полный тепловой поток Земли;

4. *Ядерной физики:* измерение сечений ядерных реакций при низких энергиях.

Исследования, проводимые в рамках проекта, обеспечивают получение новых знаний и результатов в области новых перспективных материалов, нанотехнологий с использованием методов активного физического воздействия (пучков ионов и синхротронного излучения).

Полученные результаты и разработанные методы ориентированы на широкое применение. Результаты выполнения НИР должны обеспечить возможность проведения опытно-конструкторских/опытно-технологических работ, направленных на создание новых безопасных источников энергии.

### **Список литературы**

1. **Raiola F., Migliardi P., Gyurky G. et al.** Eur. Phys. J. A13, (2002) С. 377.
2. **Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П.** Краткие сообщения по физике ФИАН 2012. № 9, № 12.
3. **Bosch H.S. and Halle G.M.** Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities // Nucl. Fusion. 1994. V. 32. P. 611.
4. **Чернов И.П., Коротеев Ю.П.** Доклады Академии наук. 2008. 420, № 6.
5. **Чернов И.П., Русецкий А.С., Краснов Д.Н. и др.** Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. № 6. С. 139.
6. **Царев В.А., Голубничий П.И.** Краткие сообщения по физике ФИАН. 1991. № 3.
7. **Ларин В.Н.** Модель изначально гидридной Земли. М., Недра, 1980.
8. **Fiorentini G., Fogli G.I., Lisi E. et al.** Mantle geoneutrinos in KamLand and Borexino // <http://lanl.arxiv.org/abs/1204.1932>. V. 2 (2012).
9. **Anderson Don L.** Energetics of the Earth and the missing heat source mystery // (2005) Technical Report, [www.MantlePlume.org](http://www.MantlePlume.org).