УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:
ООО Издательство «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ».
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-37278.
Подписной индекс в каталоге ОАО «Роспечать» 79217 «Пресса России» 34117

Сайт издательства: www.tgizd.ru

Главный редактор:
Рухадзе А.А.
д-р физ.-мат. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

Зам. гл. редактора:
Гаврилов Н.М., д-р физ.-мат. наук, проф.;
Галченко Ю.П., д-р техн. наук;
Щербаков Н.С., д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ

Редакция:
Боброва Е.А., Гончарова В.Б., Морозова Т.Ю., Чистякова М.А.

Редакционная коллегия:
Лагарьков А.Н., акад. РАН
Хомич В.Ю., акад. РАН
Пиралишвили Ш.А., д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ
Щербаков Н.С., д-р техн. наук., проф., заслуженный деятель науки РФ
Буланова Т.А., д-р техн. наук, проф.
Громов Ю.Ю., д-р техн. наук, проф.
Минаев И.М., д-р физ.-мат. наук, проф.
Михайлов Ю.Б., д-р техн. наук, проф.
Самхарадзе Т.Г., д-р техн. наук, проф.
Тагасов В.И., д-р техн. наук, проф.
Чебышов С.Б., д-р техн. наук, проф.
Гаврилов Н.М., д-р физ.-мат. наук, проф.
Рухадзе А.А., д-р физ.-мат. наук, проф.
Аксенов Ю.П., д-р техн. наук
Галченко Ю.П., д-р техн. наук
Морозова Т.Ю., д-р техн. наук
Проходский Ю.М., д-р техн. наук
Романов А.А., д-р техн. наук

Дизайн и верстка
Боброва Е.А.

Технический редактор:
Сердюк В.С.

СТАТЬИ, ПОСТУПАЮЩИЕ В РЕДАКЦИЮ, РЕЦЕНЗИРУЮТСЯ

Публикация статей бесплатная. Правом внеочередной публикации пользуются аспиранты и докторанты.

Материалы, опубликованные в настоящем журнале, не могут быть полностью или частично воспроизведены, тиражированы и распространены без письменного разрешения редакции.

Подписано в печать 27.08.2013.
Формат 60×88 1/8. Бумага кн.-журн.
Печать офсетная.
Усл.-печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 8,15. Зак. 150.
Тираж 1400 экз.

Адрес редакции:
107258, Москва, Алымов пер., д.17, стр. 2,
Тел.: (916) 008-20-70, (499) 168-21-28.
Тел./факс: (499) 168-23-58.
Бухгалтерия: (499) 168-13-69.
E-mail: INFIZIK@bk.ru

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены ООО Издательство «Научтехлитиздат»
107258, Москва, Алымов пер., д.17, стр. 2

Инженерная физика № 9 2013
ISSN: 2072-9995
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Цыганов Э.Н., Бавижев М.Д., Головатюк В.М., Дабагов С.Б., Лобастов С.П.
Механизм выделения энергии в реакции $D+D \rightarrow {}^4He^*$ в проводящих кристаллах (моделирование эксперимента) 3

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Макаров В.П., Рухадзе А.А.
Основы современной электродинамики материальных сред. Часть V. Электромагнитное поле, создаваемое внешними источниками 18

Филатова С.А., Трикшев А.И., Цветков В.Б.
Широкополосный источник излучения на основе Yb GTWave волокна 28

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Алисултанов З.З.
Динамическая проводимость эпитаксиального графена, сформированного на поверхности металла 32

Ильичев Н.Н., Самохин А.А.
Новый метод фотоакустического мониторинга процесса лазерной абляции 38

Плотникова Е.М., Ленкевич Д.А., Звездин К.А., Котельников А.Л., Бивол Г.Ю.
Свойства обменно-связного двухфазного магнита на основе FePt/Fe 48

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Воронов Г.С., Смурова Н.М., Харчевский А.А., Тедтоев Б.А.
Влияние микротечи воды на радиальное электрическое поле в краевой плазме стелларатора Л-2М 61

ГЕОФИЗИКА

Лаптухов А.И., Лаптухов В.А.
Прогноз глобальной температуры поверхности земли на 100 лет 67

Правила публикации 71

© ООО Издательство “Научтехлитиздат”. 2013 г.

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Э.Н. ЦЫГАНОВ[1], *доктор физ.-мат. наук, профессор, президент*
М.Д. БАВИЖЕВ[2], *доктор физ.-мат. наук, профессор, вице-президент*
В.М. ГОЛОВАТЮК[3], *канд. физ.-мат. наук, начальник сектора*
С.Б. ДАБАГОВ[4], *доктор физ.-мат. наук, профессор*
С.П. ЛОБАСТОВ[3], *старший научный сотрудник*
[1)] Cold Fusion Power, International, USA
[2)] ОАО «НПП «РАДИЙ», Москва
[3)] Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна
[4)] Физический Институт РАН им. П.Н. Лебедева и НИЯУ МИФИ, Москва
E-mail: edward.tsyganov@coldfusion-power.com

МЕХАНИЗМ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В РЕАКЦИИ $D+D \rightarrow {}^4He^*$ В ПРОВОДЯЩИХ КРИСТАЛЛАХ (МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА)

В настоящее время человечество подошло к такой стадии развития, когда борьба за энергетические ресурсы становится особенно актуальной, так как все известные источники энергии в самое ближайшее время не смогут обеспечить наши потребности. Химическая энергия, кроме этого, ограничена так называемым парниковым эффектом. Ядерная энергия, основанная на использовании делящихся материалов, также не является решением проблемы, так как запасы этих материалов ограничены. Первоначальные оптимистические ожидания перехода к процессу управляемого термоядерного синтеза пока так и не материализовались. Технические трудности устойчивого получения сверхгорячей плазмы и разрушающее воздействие громадного нейтронного потока, возникающего вследствие термоядерных реакций, отодвигают решение этой задачи на все более отдаленное и неопределенное будущее. Недавно появилась уверенность в том, что проблема управляемого ядерного синтеза может быть решена совершенно другим способом. Было показано экспериментально, что сечение подбарьерных процессов синтеза сильно зависит от физического состояния вещества, в которое помещены реагирующие атомы. Расстояние сближения двух ядер дейтерия с помощью механизма Ридберга в кристаллической ячейке металлов на порядок величины меньше, чем размер свободного атома дейтерия. Проницаемость кулоновского барьера в таком процессе DD синтеза очень сильно (на 50…60 порядков) возрастает по сравнению с проницаемостью барьера для свободной молекулы дейтерия. Настоящий манускрипт обсуждает возможность экспериментальной регистрации процесса «холодного» DD синтеза с помощью детектирования электронов малой энергии, которые появляются в результате реакции слияния двух дейтронов в кристалле палладия при очень малых (тепловых) энергиях возбуждения промежуточного составного ядра $^4He^*$. Такой процесс возможен благодаря обмену составного ядра с электронами кристаллической решетки последством виртуальных фотонов. Проведены расчеты электрических потенциалов внутри кристаллической решетки fcc-типа для различных кристаллов (титан, палладий, платина). Эксперимент промоделирован методом Монте-Карло.

Ключевые слова: синтез дейтронов, кристаллическая решетка, прозрачность кулоновского барьера, мюонный катализ, механизм Ридберга, катализ ядерного синтеза, деформация электронных оболочек, модель Томаса-Ферми, виртуальный фотон, полупроводниковые детекторы.

E.N. TSYGANOV[1], *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor, President*
M.D. BAVIZHEV[2], *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor, vice-president*
V.M. GOLOVATYUK [3], *Cand. of Phys.-Math. Science, Head of Sector*
S.B. DABAGOV [4], *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor*
S.P. LOBASTOV [3], *Senior Researcher*
[1)] Cold Fusion Power, International, USA
[2)] LLC «CPE «Radium», Moscow
[3)] Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna
[4)] P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow
E-mail: edward.tsyganov@coldfusion-power.com

THE MECHANISM OF ENERGY RELEASE IN THE REACTION D+D→^{4}HE* IN CONDUCTING CRYSTALS (SIMULATION OF THE EXPERIMENT)

At the present time, mankind has come to a stage of development, when the struggle for energy resources has become particularly urgent, because all the known renewable energy resources cannot meet the needs of human progress. The problem is exacerbated by the fact that the chemical energy is bound by the so-called greenhouse effect. Nuclear energy based on the use of fissile materials is not a solution, because the stocks of these materials are limited. Initial expectations that this problem would be solved soon by the process of controlled thermonuclear fusion did not materialize. Technical difficulties obtaining sustainable super-hot plasma and the damaging effects of the enormous neutron flux arising as a result of fusion reactions are pushing the solution of this problem to a more distant and uncertain future. Recently, the assurance that the problem of nuclear fusion can be solved quite differently has been aroused. It has been shown experimentally that the cross-barrier fusion processes greatly depend on the physical state of matter where reactive atoms are placed in. Convergence of two deuterium nuclei in metals is by an order of magnitude smaller than the size of the free atom of deuterium due to Rydberg mechanism. Coulomb barrier permeability in DD fusion greatly increases process (by the 50…60 orders) as compared with a permeability barrier to free molecules of deuterium. This manuscript discusses the possibility of the experimental detection of the «cold» DD fusion with the detection of low energy electrons, which are the result of the fusion reaction of two deuterons in palladium crystals with very small (thermal) excitation energies of the intermediate compound nucleus ^{4}He. This process is made possible by the exchange of the compound nucleus and the electrons of the crystal lattice by so-called virtual photons. Calculations of electrical potentials are performed for the crystal lattice of the fcc-type for the titanium, palladium, and platinum. The experiment was modeled using the Mote Carlo method.*

Key words: deuterium fusion, crystalline lattice, Coulomb barrier transparency, muon catalysis, Rydberg mechanism, nuclear fusion catalysis, electron shell deformation, Thomas-Fermi model, virtual photon, semiconductor detectors.

1. Введение

Первые два элемента нашей Вселенной – водород и гелий – были образованы в первые несколько минут после так называемого «Большого Взрыва». Небольшое количество лития, третьего элемента периодической таблицы, также было произведено в это время. Однако, большая часть лития, а также элементы бериллий и бор образовались из более тяжелых элементов в процессе их дезинтеграции в межзвездном пространстве под влиянием космического излучения. Все химические элементы из которых состоит Земля и мы сами, от углерода до урана, как предполагается, образовались в результате ядерных процессов в «сгоревших» звездах в течение длительного периода их эволюции.

Наша жизнь на Земле стала возможной благодаря теплу от ближайшей звезды, которую мы называем Солнце. Солнце – это относительно молодая

звезда с большим временем жизни. Энергия Солнца обязана синтезу гелия из водорода, ядерному процессу, который происходит в глубине этой звезды и обеспечивает наше существование.

В настоящее время человечество подошло к такой стадии развития, когда борьба за энергетические ресурсы становится особенно острой. В течение следующих 100…200 лет все известные химические ресурсы будут близки к полному истощению, что негативным образом отразится на будущем развитии человечества. Все известные возобновляемые источники энергии не смогут обеспечить потребности человеческого прогресса. Проблема усугубляется тем фактом, что химическая энергия ограничена так называемым парниковым эффектом, т.е. избытком углекислого газа в атмосфере нашей планеты.

Разговоры о переходе к использованию ядерной энергии идут уже довольно длительное время. Как оказалось, ядерная энергия, основанная на использовании делящихся материалов, не является решением проблемы на длительный период, т.к. запасы этих материалов не бесконечны. Безопасность реакторов, основанных на процессе ядерного деления, должна быть существенно более надежной, что показали несколько недавних событий на ядерных реакторах. Захоронение ядерных отходов на длительное время все еще является практически нерешенной проблемой.

Уже в течение длительного времени ведутся разговоры о переходе к процессу управляемого ядерного синтеза. Однако, первоначальные ожидания того что эта проблема будет вскоре решена, так и не материализовались. Технические трудности устойчивого получения сверхгорячей плазмы (10^8…10^9 °C) и разрушающее воздействие громадного нейтронного потока, возникающего вследствие термоядерных реакций, отодвигают решение этой задачи на все более отдаленное и неопределенное будущее.

Недавно появилась надежда и даже уверенность в том, что проблема управляемого ядерного синтеза может быть решена совершенно другим способом.

Калориметрические измерения выделения тепла в палладиевых образцах, насыщенных дейтерием (в группе доктора Мак-Кубре, а также в ряде других групп), показывают, что при этих условиях происходит процесс так называемого холодного синтеза двух ядер дейтерия с образованием ^{4}He* и последующим выделением энергии 24 МэВ [1]. Эти эксперименты проводятся уже в течение почти 24 лет, и по-прежнему, либо полностью игнорируются сообществом ядерных физиков, либо встречаются ими с большой долей скептицизма. Два основных возражения, которые выдвигаются против экспериментов группы Мак-Кубре и других подобных экспериментов, группируются вокруг кажущегося нарушения второго закона термодинамики в этом процессе и того факта, что в этих экспериментах практически не наблюдается других ядерных продуктов, за исключением ^{4}He.

В работах [2, 3] было показано, что результаты этих экспериментов не противоречат ни одному из фундаментальных законов физики. Ниже мы покажем, что эксперименты на ускорителях низких энергий прямо указывают на существование нового явления, впервые наблюдавшееся по выделению аномально большого количества тепла в палладиевых образцах, насыщенных дейтерием. Наблюдающееся отсутствие ядерных продуктов в реакции холодного синтеза может быть объяснено уменьшением скорости ядерных распадов промежуточного возбужденного ядра ^{4}He* с уменьшением энергии его возбуждения. В этом случае энергия, выделившаяся в реакции, высвобождается с помощью виртуальных фотонов. Таким образом, мы встречаемся с совершенно новым явлением, которое может иметь важное практическое применение. Кроме этого, изучение процесса такого «тлеющего» ядерного разряда возбужденного ядра ^{4}He* может прояснить механизм упаковки нуклонов в ядерной системе и открывает новые возможности в изучении хромо-динамической природы ядерных сил [3].

2. Реакции синтеза при столкновении атомов внутри металлических кристаллов

При описании столкновений атомов необходимо соответствующим образом модифицировать выражение для вероятности проникновения через потенциальный барьер, написанное для столкновения «голых» ядер, т.к. атомные электроны экранируют эффект отталкивания зарядов ядер. В так называемом приближении Борна-Оппенгемера такая модификация была сделана в работе Ассенбаума и др. [4]. В рамках этого приближения было показано, что введенный авторами так называемый «потенциал электронного экранирования» для случая столкновения свободных атомов эквивалентен в выражении для прозрачности кулоновского барьера дополнительной энергии U_e в системе центра масс сталкивающихся частиц, т.е. $E_{eff}=E_{cm}+U_e$. Экспериментальные результаты могут быть хорошо описаны введением всего одного параметра U_e – потенциала электронного экранирования. По-видимому, такой подход эквивалентен способу учета толщины барьера при вычислении квантово-механического расчета вероятности проникновения через потенциальные барьеры, предложенному ранее Зельдовичем и Герштейном [5]. Предложение Ассенбаума, по-видимому,

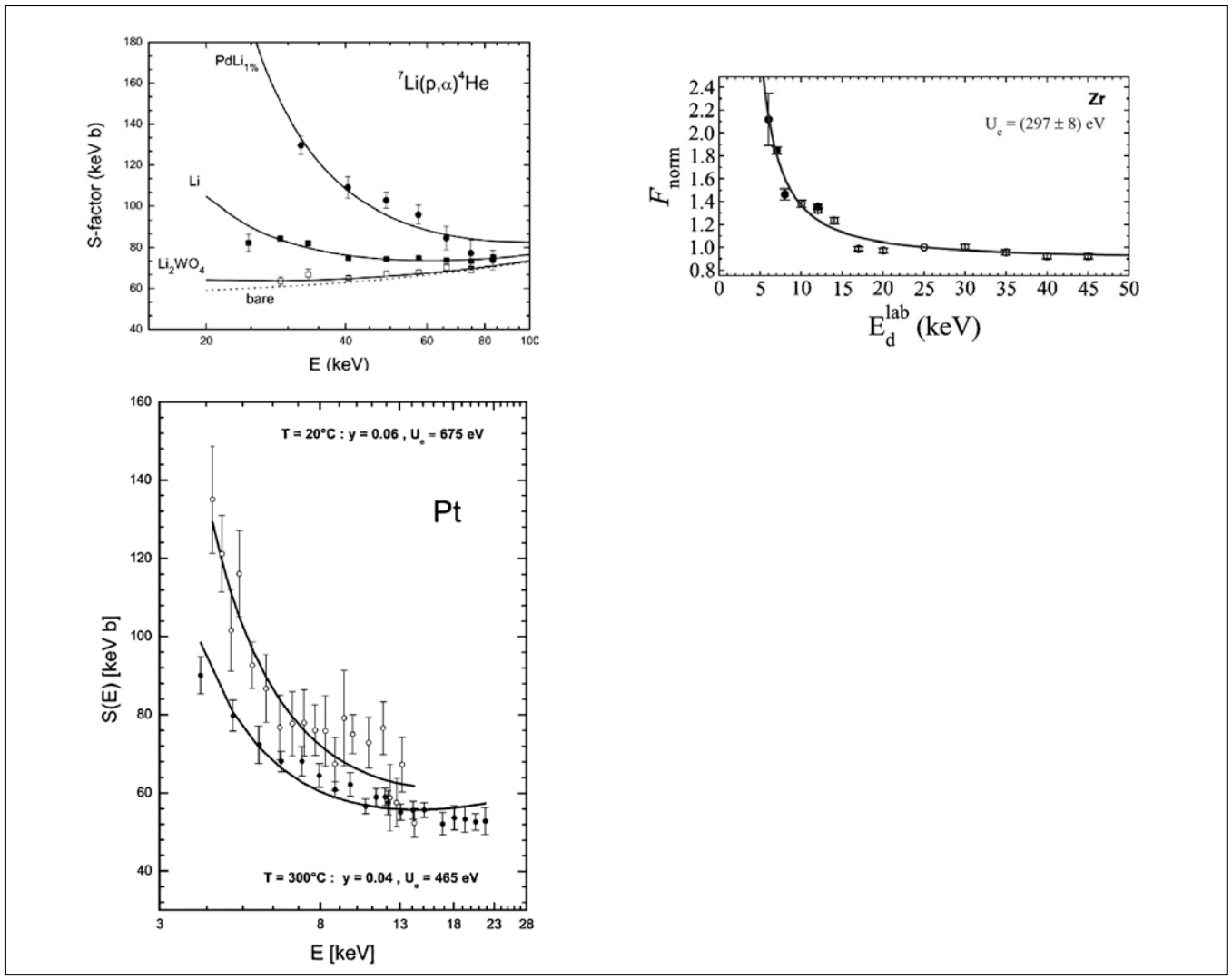

Рис. 1. В верхней части рисунка: слева – экспериментальные данные [6], показывающие энергетическую зависимость S-фактора для подпороговой ядерной реакции от агрегатного состояния вещества, содержащего ядра ^{7}Li. Справа – такие же данные для реакции DD, когда мишень размещена в кристалле циркония. Данные хорошо описываются введением потенциала электронного экранирования около 300 эВ. В нижней части рисунка – данные для реакции DD, когда мишень имплантирована в кристалл платины. Данные хорошо описываются введением экранирующего потенциала около 675 эВ.

верно, пока вводимый потенциал экранирования много меньше, чем максимальная величина потенциального барьера.

Экспериментальные результаты, которые совершенно неожиданно проливают свет на проблему холодного синтеза, были представлены в работах Ролфса и др. [6], Черского и др. [7] и Раиолы и др. [8]. Обзор работ в этой области содержится в статье Богдановой [9]. В этих исследованиях было показано, что сечение подбарьерных процессов синтеза элементов очень сильно зависит от физического состояния вещества, в которое помещены атомы мишени. На рисунке 1 представлены экспериментальные данные [6…8], демонстрирующие зависимость астрофизического фактора $S(E)$ и сечения синтеза элементов для подбарьерных ядерных реакций от агрегатного состояния вещества, в котором содержатся ядра-мишени.

Расстояние сближения двух атомов дейтерия в кристаллической ячейке при этих обстоятельствах на порядок величины меньше, чем размер свободного атома дейтерия. Необходимо заметить, что физическая природа увеличения сечения синтеза элементов, помещенных в кристаллическую решетку проводников, еще не до конца понята теоретически.

Как мы отметили выше, эффект электронного экранирования был довольно подробно рассмотрен в работе Ассенбаума и др. [4]. Рисунок 2 (слева) иллюстрирует физику этого процесса.

В 1960 г. Зельдович и Герштейн [5] рассмотрели проницаемость кулоновского барьера и нашли, что эта величина сильно зависит от радиуса орбиты экранирующего электрона.

$$B = \exp\left\{-\frac{2}{\hbar}\int_{x_1}^{x_2}\sqrt{2M\left(U(x)-E\right)}dx\right\} =$$

$$= \exp\left\{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2M\bar{U}}\,(x_2 - x_1)\right\}.$$

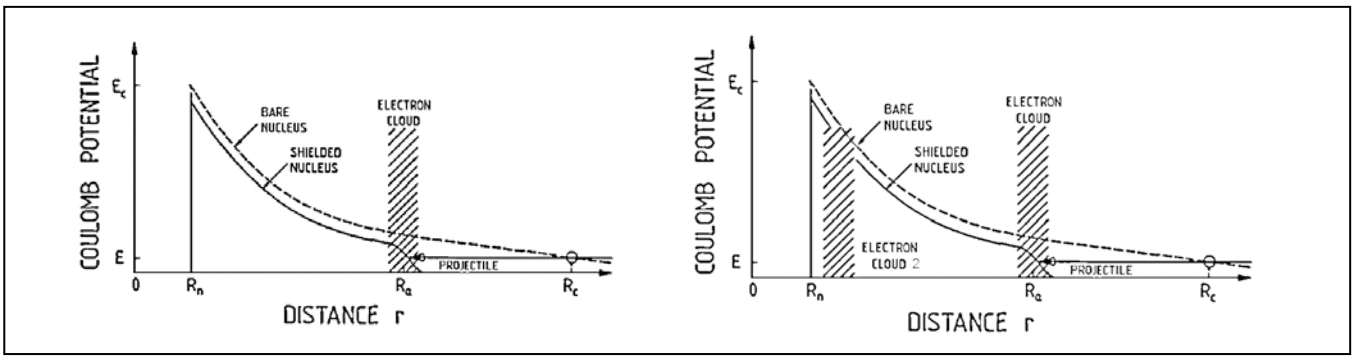

Рис. 2. Слева – схема процесса электронного экранирования в процессе ядерного синтеза (взято из работы Ассенбаума и др. [4]). До расстояния R_a налетающая частица не испытывает отталкивания от частицы-мишени. В случае, если электронная орбита частицы-мишени может быть отодвинута (гипотетически) ближе к ядру мишени, кулоновский барьер может оказаться сильно ослабленным (схема справа).

Они рассмотрели возможность уменьшения электронных орбит реагирующих атомов, используя дейтерий под очень высоким дввлением (мечты о пьезо-синтезе). К сожалению, необходимое давление оказалось чрезвычайно высоким, и такой процесс оказался практически неосуществимым.

Рисунок 3 схематически представляет постановку экспериментов в лаборатории Гран Сассо. Пучок дейтронов с энергией несколько кэВ бомбардирует дейтроны, предварительно имплантированные в кристалл или аморфный материал. При этих малых энергиях «голые» дейтроны, влетая в конденсированную среду, захватывают к себе на орбиту электроны твердого тела и двигаются внутри твердого тела в виде атомов, и взаимодействия атомов дейтерия осуществляются в веществе материала-хозяина. Процесс захватывания орбитальных электронов дейтронами происходит тогда, когда скорость дейтронов оказывается ниже Боровской скорости электрона в атоме водорода. Для дейтронов этот порог составляет 50 кэВ.

Поперечное сечение реакции DD синтеза свидетельствует о том, что так называемый электронный экранирующий потенциал в металлических кристаллах является высоким, порядка 300…700 эВ. Это означает, что перед тем как осуществляется реакция слияния, оба атома дейтерия приближаются друг к другу без отталкивания до расстояний меньше, чем одна десятая от размеров свободных атомов дейтерия. Другими словами, перед тем как реакция слияния происходит, обе электронные орбиты взаимодействующих атомов дейтерия в кристаллической решетке приобретают вытянутую форму, как это показано схематически на рисунке 3. При этом такая реакция является все еще реакцией слияния на-лету, т.е. это процесс одиночного столкновения двух атомов. Эти реакции слияния идентифицировались в экспериментах Гран Сассо с помощью обычных продуктов распада горячего DD синтеза [$d(d, p)t$].

При объяснении процессов холодного синтеза, представленного в статье [3], было сделано предположение о том, что два атома дейтерия, когда они внедрены в ту же самую нишу металлического красталла, имеют одинаковые вытянутые электронные орбиты, которые жестко ориентированы в кристаллической ячейке. В работе [3] параметры потенциалов электронного экранирования из экспериментов Гран Сассо и других аналогичных экспериментов были использованы для объяснения экспериментов Мак-Кубре.

Мы предполагаем, что изменение формы электронной орбиты налетающего атома дейтерия является достаточно быстрым, т.к. скорость налетающего атома дейтерия мала по сравнению со скоростью электронных процессов в кристалле. Если даже это не совсем так, тогда еще бо́льшие значения потенциалов экранирования должны использоваться для расчетов холодного синтеза.

Рисунок 4 схематически иллюстрирует ситуацию в нишах металлических кристаллов, насыщенных дейтерием. Затененная область в центре

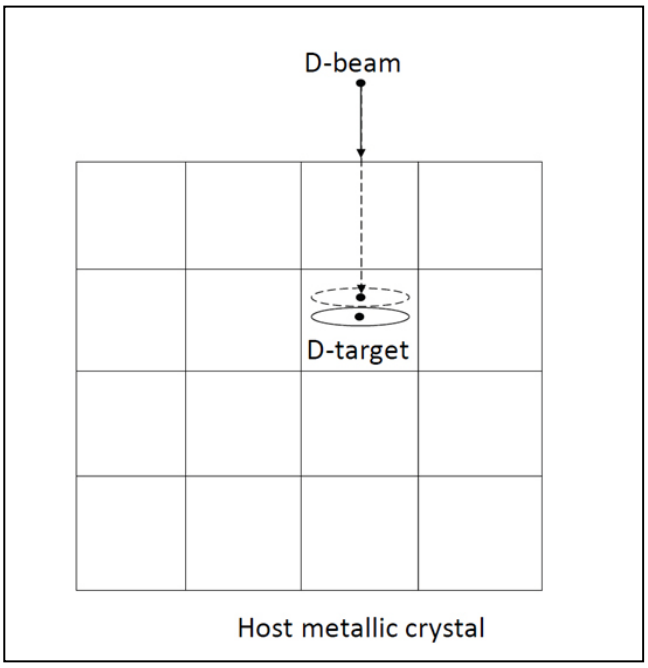

Рис. 3. Схема экспериментов Гран Сассо по синтезу элементов, когда атомы мишени внедрены в проводящий кристалл

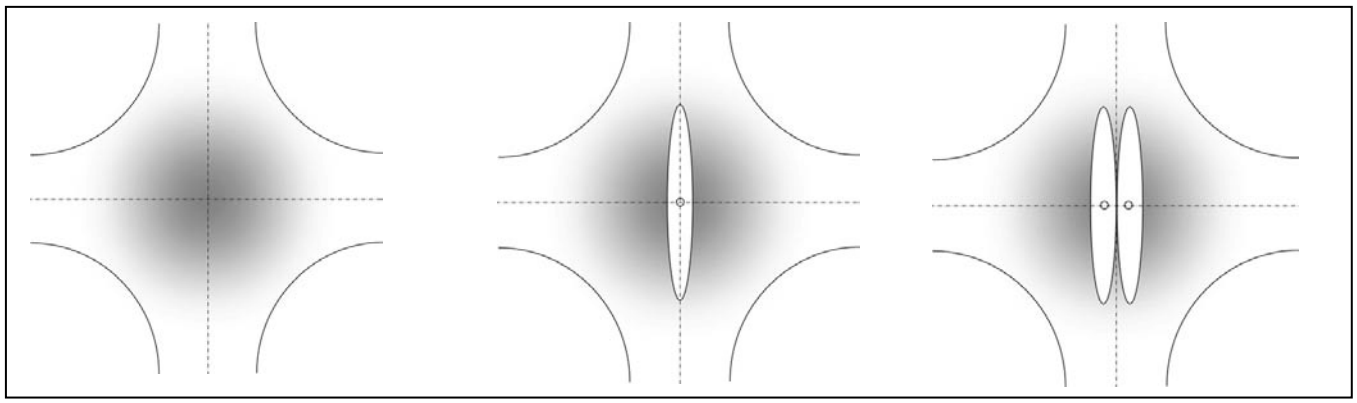

Рис. 4. Схематическое изображение потенциальных ниш в кристаллических ячейках металлов. Затененная область схематически представляет облако свободных электронов. Слева – незаполненная кристаллическая ниша, в центре – ниша, заполненная одним примесным атомом дейтерия. Справа – ниша, заполненная двумя атомами дейтерия. Процесс синтеза становится возможным только тогда, когда два атома дейтерия попадают в ту же самую кристаллическую нишу. Простая кубическая структура была использована в этом рисунке в дидактических целях

кристаллической ячейки схематически изображает облако свободных электронов. Процесс синтеза становится возможным только тогда, когда два атома дейтерия попадают в одну кристаллическую нишу.

На рисунке 5 приведена зависимость проницаемости кулоновского барьера для реакции $D+D \rightarrow {}^4He^*$ от потенциала электронного экранирования (эффективной энергии взаимодействия).

В работе [3] был рассмотрен процесс, аналогичный хорошо известному процессу мюонного катализа, в котором, однако, вместо обмена μ-мезоном сближение двух дейтронов обеспечивается влиянием электронов проводимости металлического кристалла. В этой работе был проведен расчет скорости реакции DD синтеза в кристаллах палладия и платины. В случае палладия потенциал электронного экранирования был взят равным 300 эВ, таким же, как в случае циркония. Для платины потенциал электронного экранирования равен 675 эВ. Экранирующий потенциал 3…6 кэВ приблизительно соответствует случаю μ-катализа для реакции DDμ.

Из графика на рисунке 5 видно, что скорость DD синтеза, которая пропорциональна вероятности проникновения дейтронов через кулоновский барьер, резко возрастает с увеличением потенциала электронного экранирования. Результаты расчета скорости синтеза двух атомов дейтерия, расположенных в одной и той же кристаллографической нише для палладия и платины представлены в таблице 1.

Таблица 1

Скорость синтеза двух атомов дейтерия в кристаллической ячейке

Кристалл	Потенциал экранирования, эВ	Частота осцилляций ν, c^{-1}	Прозрачность барьера $e^{-2\pi\eta}$	Скорость реакции λ, c^{-1}
Палладий	300	$0{,}74\times10^{17}$	$1{,}29\times10^{-25}$	$0{,}95\times10^{-8}$
Платина	675	$1{,}67\times10^{17}$	$2{,}52\times10^{-17}$	4,21

Таблица 2

Серии спектров атома водорода

n_1	n_2	Название серии	Начальная длина волны
1	2→∞	Лайман	91,13 нм (ультрафиолет)
2	3→∞	Бальмер	364,51 нм (видимый свет)
3	4→∞	Пашен	820,14 нм (инфракрасный свет)
4	5→∞	Брэккет	1458,03 нм (далекий инфракрасный)
5	6→∞	Пфунд	2278,17 нм (далекий инфракрасный)
6	7→∞	Хэмпфри	3280,56 нм (далекий инфракрасный)

Обычно принимается, что в невозбужденном состоянии электронная орбита атома водорода является круговой. Однако, облако свободных электронов в металлических кристаллах может исказить электронную орбиту примесного атома с добавлением очень малой энергией возбуждения, порядка нескольких эВ. Хорошо известный процесс химического катализа основан именно на этом явлении. Спектры излучения атома водорода, основанные на

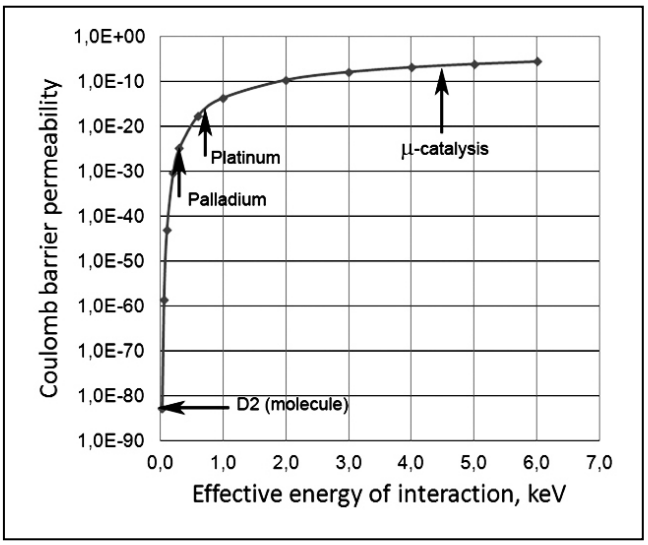

Рис. 5. Проницаемость кулоновского барьера в процессе DD синтеза в зависимости от потенциала электронного экранирования (эффективной энергии взаимодействия)

существовании эллиптических орбит электрона, были впервые введены Ридбергом в 1888 г. в его известной формуле: $1/\lambda=R[(1/n_1^2)-(1/n_2^2)]$. В таблице 2 представлены серии спектров излучения водорода, основанные на формуле Ридберга.

3. Структура кристаллов и распределение потенциалов в ячейках

Наиболее распространенными кристаллическими структурами являются простая кубическая (sc), кубическая объемноцентрированная (bcc), кубическая гранецентрированная (fcc) и гексагональная. Палладий и платина оба характеризуются кубической гранецентрической структурой (fcc) с плотнейшей упаковкой. Заметим, что не существует металлов с простой кубической структурой, и в наших предыдущих рассмотрениях мы использовали ее в чисто дидактических целях. В такой структуре единственная потенциальная ниша расположена в центре куба. Как показано ниже, для таких тяжелых металлов, как палладий и платина, расположение основных потенциальных ниш весьма похоже на расположение ниши в простой кубической структуре.

До настоящего времени не существует внятной квантово-механической теории твердого тела даже для такой упорядоченной системы как кристаллы. Сложные вычисления электронных оболочек различных атомов были выполнены сравнительно недавно, около 50 лет назад. Существование такой простейшей молекулы как водород (H_2) принципиальным образом зависит от ориентации спинов рассматриваемых двух атомов водорода (орто-водород и пара-водород). Было бы наивным думать, что кристаллическая структура палладия или платины, состоящая из сотен участвующих частиц может быть расчитана чисто теоретически, без использования экспериментальных данных.

Как уже было отмечено, эксперименты в Лаборатории Гран Сассо [6, 8] и в Берлине [7], выполненные в течение 2002–2009 гг. и взаимно многократно проверенные, привели к очень интересному наблюдению. Так называемый потенциал электронного экранирования для реакций синтеза (например, для случая DD) сильно возрастает, если реакция происходит в среде проводящего кристалла. В случае, если реакция протекает в среде полупроводника, изолятора или аморфного вещества, такое возрастание потенциала электронного экранирования отсутствует. В этих случаях потенциал электронного экранирования практически идентичен величинам, полученным при столкновении свободных атомов. Нужно подчеркнуть, что эффект увеличения потенциала электронного экранирования был зарегистрирован в реакции так называемого горячего синтеза с помощью регистрации протонов из реакции $D+D\rightarrow{}^3H+p$. Независимо от этого, однако, прозрачность кулоновского барьера в случае горячего или так называемого холодного синтеза определяется одним и тем же квантово-механическим выражением.

Уже в 2006 г. Клаус Ролфс заметил [6], что высокий потенциал электронного экранирования указывает на возможность сближения атомов дейтерия без кулоновского отталкивания на расстояния, гораздо меньшие, чем обычные размеры атома. К сожалению, он не продолжил эту мысль дальше и не применил эти рассуждения, например, к случаю так называемого холодного синтеза. Чтобы сделать такое обобщение, мы должны предположить, что реагирующие атомы расположены в той же самой потенциальной нише металлического кристалла и положить $E_{cm}=0$ в выражении для эффективного потенциала $E_{eff}=E_{cm}+U_e$.

Вычисление скорости DD реакции в работах [2, 3] основано исключительно на экспериментальных данных [7, 8] и не зависит ни от структуры потенциальных ниш в металлическом кристалле, ни от детального механизма деформации электронных оболочек атомов дейтерия в этих условиях. Тем не менее, изучение конфигурации таких ниш может помочь лучше понять механизм холодного синтеза.

Ниже приводятся вычисления электрических потенциалов для различных fcc кристаллических структур.

3.1. Модель Томаса-Ферми и Теория Плотности Функционала (DFT) для вычисления потенциалов

Как известно, потенциал взаимодействия в модели Томаса-Ферми записывается в виде:

$$V(r)=\frac{Z_1Z_2e^2}{r}\varphi(r/a),$$

где функция экранирования $\varphi(r/a)$ может быть вычислена в различных приближениях. Одним из наиболее известных приближений является приближение Мольер [10] (детали можно найти в работе [11]), где эта функция представлена в виде суммы экспонент, что упрощает его применение:

$$\varphi(r/a)=\sum_{i=1}^{3}\alpha_i\exp\left(-\frac{\beta_i r}{a}\right),$$

$$\{\alpha_i\}=\{0{,}1;0{,}55;0{,}35\},\quad \{\beta_i\}=\{6{,}0;1{,}2;0{,}3\}$$

со значением длины экранирования a в случае изолированного атома (Z_2) и полностью ионизованного иона (Z_1)

$$a=0{,}8853a_0Z_2^{-1/3},$$

где a_o=0,529 Å – боровский радиус. В нашем случае Z_1=1, Z_2=46 (палладий) и 78 (платина).

Теория Плотности Функционала (DFT) является дальнейшим развитием теории Хартри-Фока и

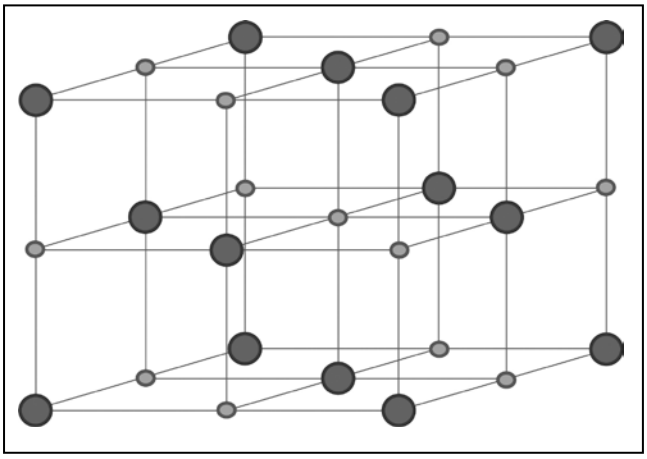

Рис. 6. Структура кристаллической решетки fcc. Большими кружочками обозначены атомы кристаллической решетки, малыми кружочками обозначены окто-хедральные центры (O) с минимальным электрическим потенциалом

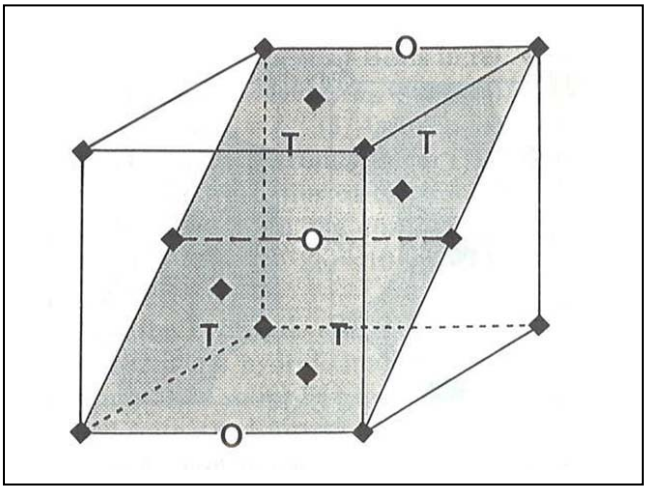

Рис. 7. Диагональная плоскость в структуре fcc. На рисунке представлены окто-хедральные (O) и тетра-хедральные (T) потенциальные ниши

в действительности является наиболее подходящим методом для вычислений в физике твердого тела. Для простоты вычислений при описании основных характеристик потенциалов в кристаллических ячейках тяжелых металлов мы ограничились приближением Мольер. Мы также частично провели вычисления в соответствии с теорией DFT и сравнили наши вычисления с работой Ишимару [12]. Детальная математическая дискуссия метода DFT содержится в книге Г. Эшрига [13].

3.2. Результаты вычислений для структуры fcc

Кристаллическая структура fcc представлена на рисунке 6. Большими кружочками обозначены атомы кристаллической решетки, малыми кружочками обозначены так называемые окто-хедральные центры (*O*) с минимальным элктрическим потенциалом. Как легко видеть, при перемещении точки отсчета из верхнего левого узла решетки к среднему атому решетки на верхней плоскости на половину константы решетки *a* в *X*- и *Y*-направлениях (то есть $X+a/2$, $Y+a/2$), структура всей ячейки повторяется, и центральный *O*-центр становится одним из крайних. Это означает, что все *O*-центры в этой структуре являются идентичными.

На рисунке 7, взятом из работы [12], представлена структура окто-хедральных *O* и тетра-хедральных *T* ниш, расположенных на диагональной плоскости в структуре fcc. Мы обозначим горизонтальное направление в ячейке как *X* и направление вдоль диагональной плоскости как *Y*.

Для того чтобы получить распределение электростатических потенциалов внутри единичной кристаллической ячейки, даже имея пространственное

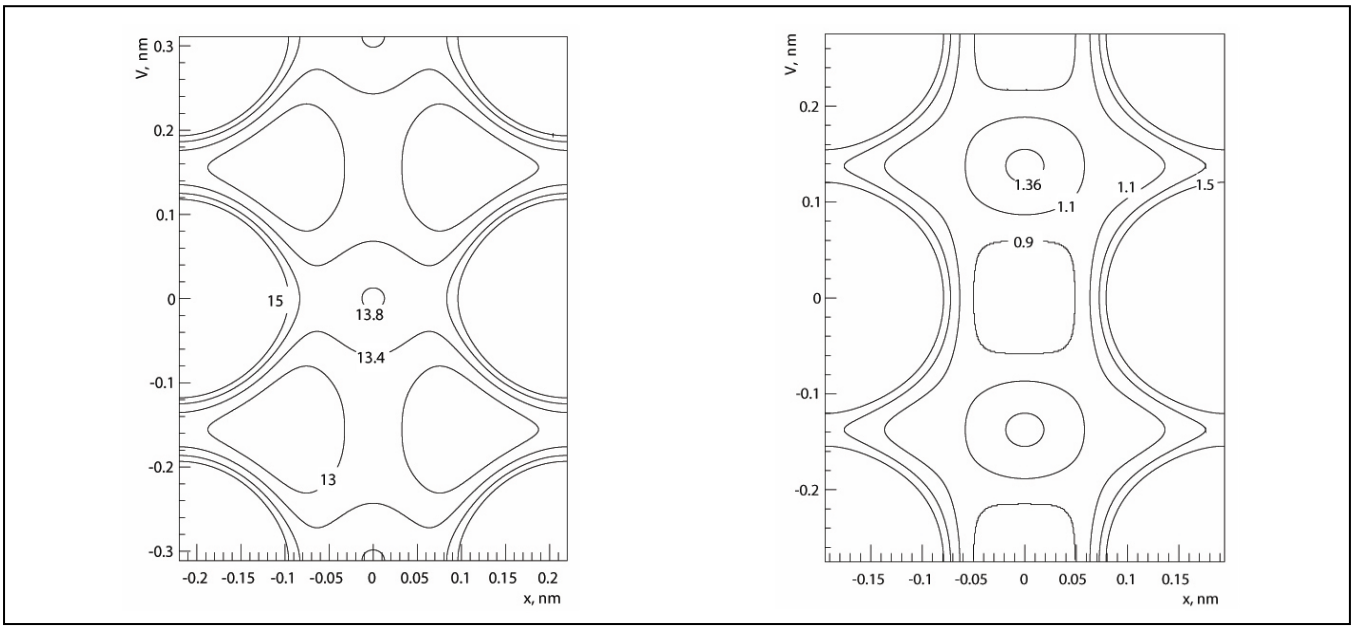

Рис. 8. . Потенциальные изолинии для fcc ячейки (диагональная плоскость) для титана (слева) и для палладия (справа) по модели DFT. Величины потенциалов для изолиний контуров даны в вольтах

распределение для отдельного атома, нужно поместить эту ячейку в группу большого числа таких ячеек. Это необходимо для того, чтобы избежать искажения результатов, возникающих из-за краевых эффектов. Мы просчитали несколько конгломератов кристаллических ячеек платины (одиночная ячейка, кластеры 3×3×3, 5×5×5, 7×7×7) и пришли к выводу, что центральная ячейка кластера 7×7×7 достаточно точно воспроизводит потенциалы для «бесконечно большого» кластера.

Несмотря на некоторые отличия в абсолютных величинах потенциалов в случае DFT-модели и в приближении Мольер, общее поведение потенциалов в обеих моделях удовлетворительно согласуются. Роль Т-центров постепенно нивелируется по мере продвижения ко все более тяжелым fcc-кристаллам.

4. Эксперимент

В этой работе мы изучили возможность детектирования реакции холодного синтеза в кристаллах, основываясь на гипотезе [3], что с уменьшением энергии возбуждения составного ядра ^{4}He* скорость распадов этого образования с испусканием ядерных продуктов также уменьшается. В этом случае главным механизмом высвобождения разницы в энергии связи двух дейтронов и ядра ^{4}He (24 МэВ) является процесс с участием виртуальных фотонов, который начинает играть решающую роль. Рисунок 12 иллюстрирует один из таких процессов.

В этом процессе энергия перехода от составного ядра ^{4}He* к основному состоянию ^{4}He выделяется в процессе испускания виртуальных фотонов, которые в свою очередь передают свою энергию

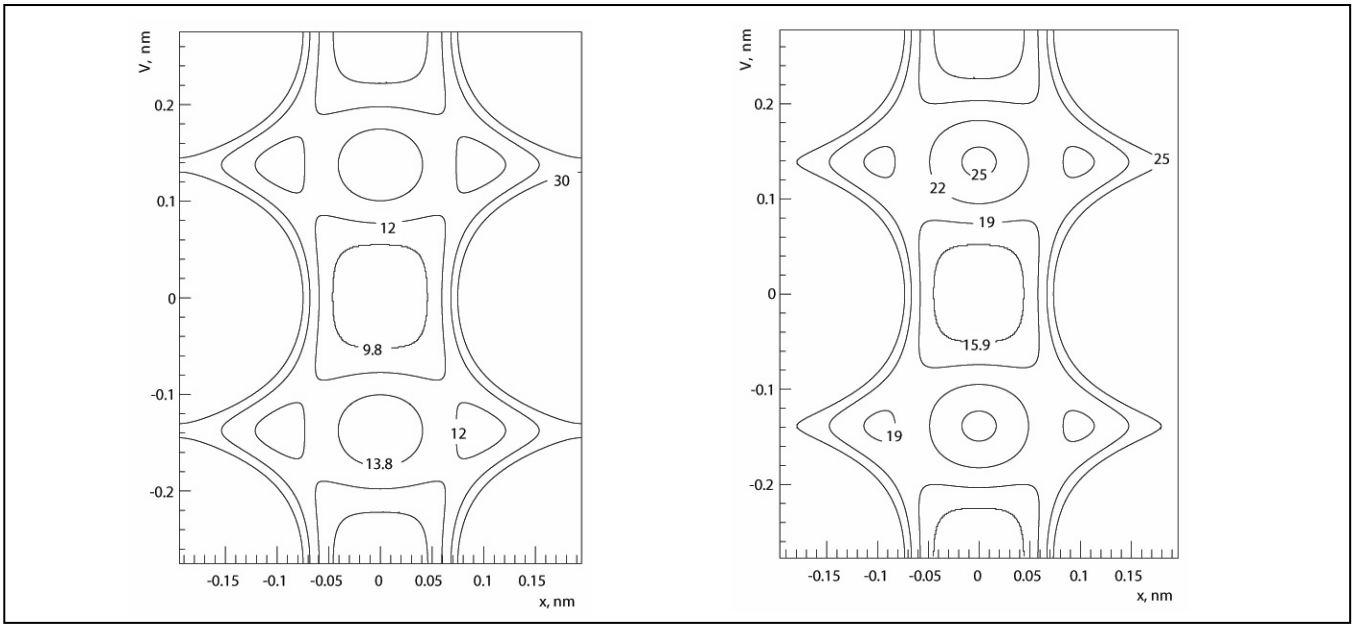

Рис. 9. Потенциальные изолинии для fcc ячейки (диагональная плоскость) для палладия (слева) и для платины (справа) в соответствии с приближением Мольер. Величины потенциалов для изолиний контуров даны в вольтах

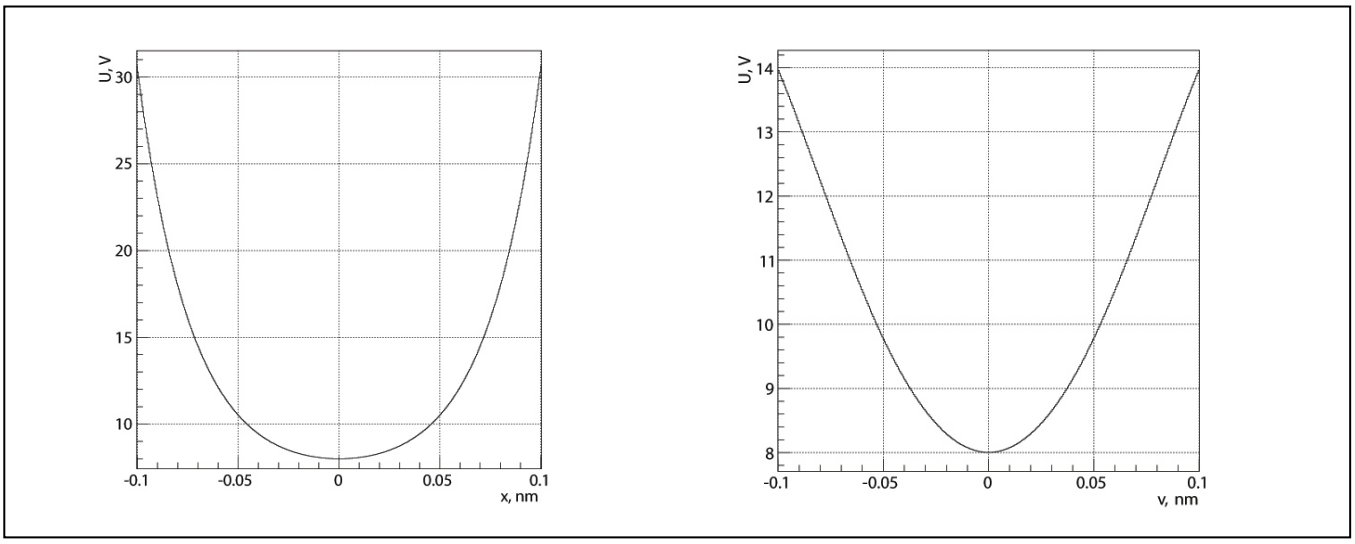

Рис. 10. Профили потенциала в О-центре в кристалле палладия в X-направлении (слева) и в V-направлении (справа) в приближении Мольер

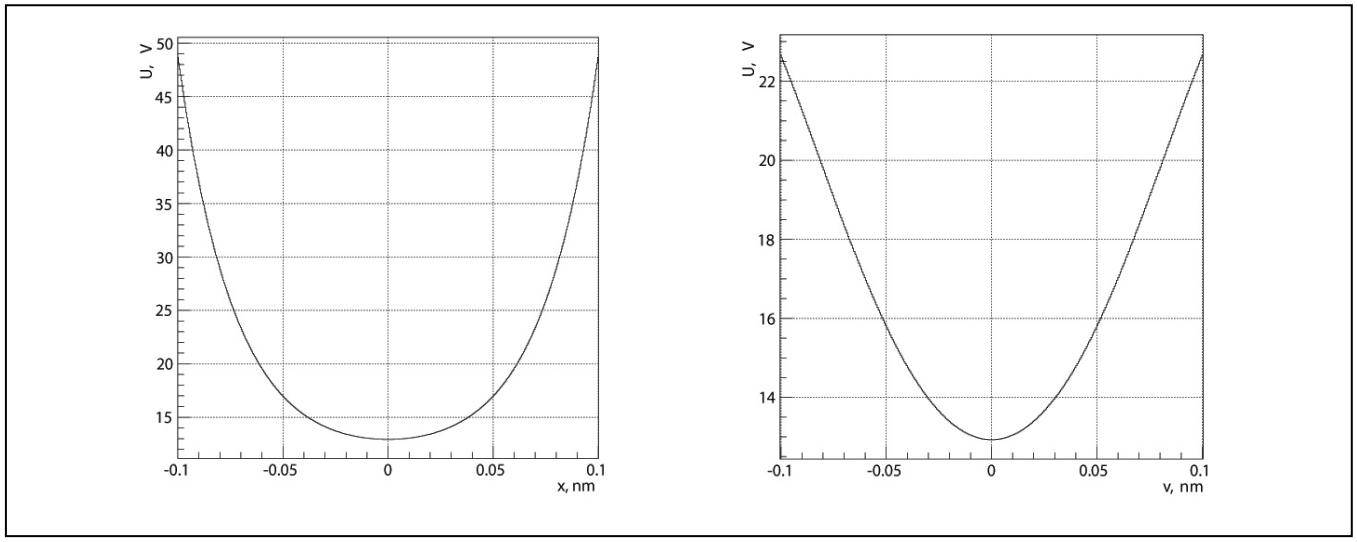

Рис. 11. Профили потенциала в О-центре в кристалле платины в X-направлении (слева) и в Y-направлении (справа) в приближении Мольер

окружающим электронам кристаллической решетки.

К сожалению, чисто калориметрический подход не позволяет понять, каким образом высвобождается энергия в процессе холодного синтеза. Для понимания механики этого процесса, в котором выделение энергии происходит без ядерных распадов промежуточного ядра ^{4}He*, требуются дополнительные эксперименты.

Рисунки 13 и 14 дают представление об экспериментальной геометрии, в которой можно получить дополнительную информацию о процессе холодного синтеза DD.

Как отмечалось выше, в металлических кристаллах электроны проводимости могут сильно модифицировать эффект потенциального барьера. В этом случае эффективный радиус электронного экранирования может оказаться на порядок величины меньше, чем боровский радиус орбитальных электронов. Соответственно, энергия электронов от разряда возбужденного составного ядра посредством виртуальных фотонов [2, 3] может быть на порядок величины больше, чем в случае столкновения свободных атомов. Мы провели вычисления для двух энергий испущенных электронов – 6 кэВ и 60 кэВ. Это соответствует двум величинам экранирующего потенциала для случая DD синтеза – в случае взаимодействия свободных атомов это 27 эВ, в случае DD взаимодействия в кристалле палладия – 300 эВ.

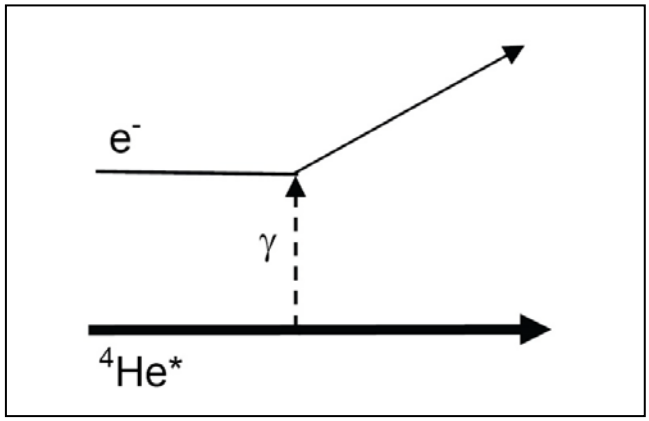

Рис. 12. Диаграмма процесса, который обеспечивает выделение энергии процесса холодного синтеза в проводящих кристаллах

В случае, представленном на рисунке 13, несколько полупроводниковых кремниевых детекторов размещаются по обе стороны палладиевого кристалла. Для подавления случайных отсчетов детекторы включены на совпадения с определенным минимальным энергетическим порогом, и случае совпадений их сигналы суммируются. Детекторы располагаются *n*-стороной к предполагаемому источнику радиации, толщина пассивной части (*n*-имплантация) должна быть не более чем

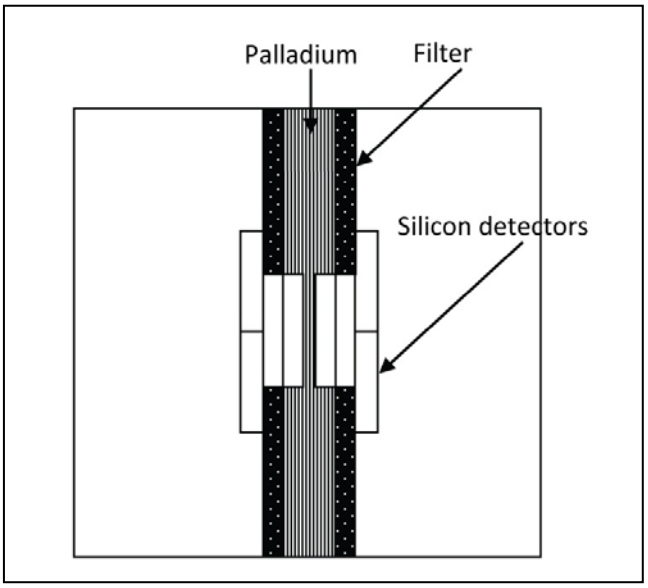

Рис. 13. Схематически представлена двухсторонняя постановка эксперимента. Несколько полупроводниковых кремниевых детекторов размещаются по обе стороны палладиевого кристалла и включены на совпадения

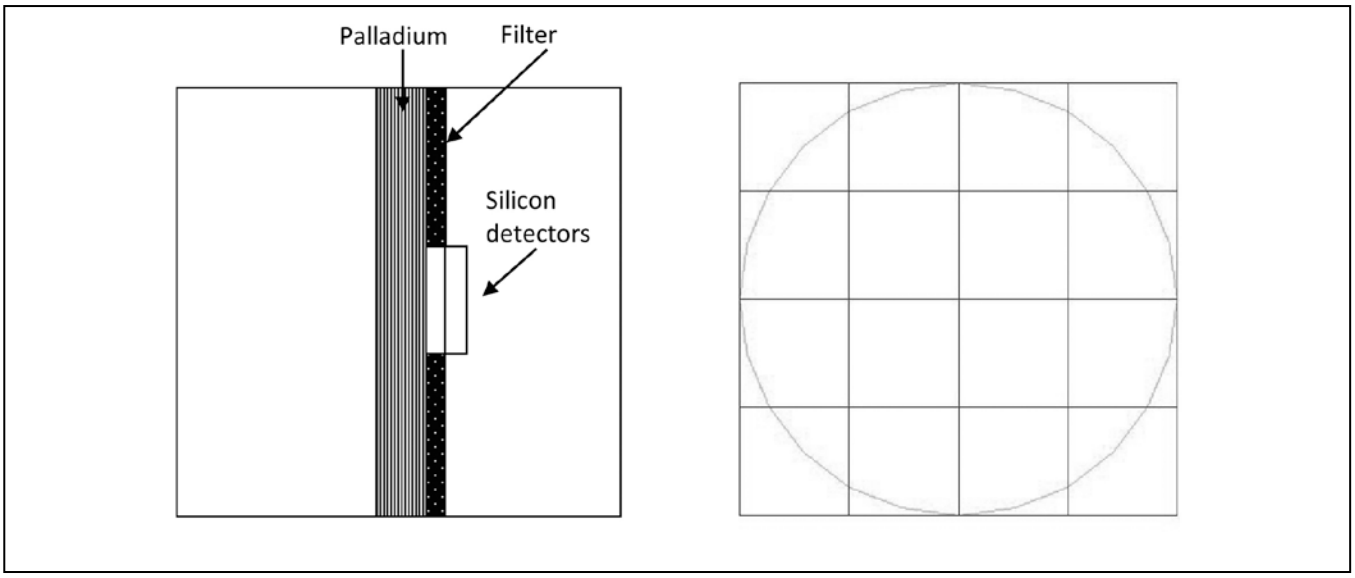

Рис. 14. Схема эксперимента, в котором несколько кремниевых полупроводниковых детекторов расположены с одной стороны палладиевого образца и включены на совпадения. Слева – вид сбоку, справа – относительное расположение апертуры и детекторов

0,02 микрометра. Для того чтобы минимизировать поглощение электронов, испускаемых в результате реакции DD синтеза, воздух из окружающего объема откачивается. Энергетическое разрешение детекторов оценивается как 10 кэВ, временное разрешение составляет около двух наносекунд [14].

Для уменьшения толщины палладия, который не является деректирующим элементом, рабочий элемент палладиевой фольги делается тонким с помощью травления. Толщина тонкой стенки составляет 1…5 микрометров. Толстый участок палладиевого элемента покрывается фильтром.

Нужно заметить, что в одиночном событии DD синтеза испускается несколько сотен электронов с суммарной энергией 24 МэВ, и идентификация таких событий не представит больших затруднений. Для дальнейшего изучения этого явления мы предлагаем использовать пиксельные детекторы с высоким пространственным разрешением.

На предварительной стадии эксперимента планируется провести измерения с регистрацией эмиссии электронов только с одной стороны палладиевой фольги. Схема эксперимента в этой постановке показана на рисунке 14. 16 кремниевых полупроводниковых детекторов расположены с одной стороны палладия и включены на совпадения.

Мы должны подчеркнуть, что в предлагаемых экспериментах степень концентрации дейтерия в палладии должна быть существенно меньше, чем в экспериментах [1], где эффект синтеза детектировался по выделению тепла. В нашей постановке опыта регистрация эффекта предполагается прямым счетом событий. Мы собираемся поднимать концентрацию дейтерия в палладии постепенно, пока скорость событий не достигнет приемлемого уровня.

5. Результаты моделирования

Полная энергия, выделяемая в детекторах, вычислялась методом Монте Карло (GEANT4) [15]. Для детальной симуляции электромагнитных процессов при низких энергиях использовались модели Livermore Physics (G4EmLivermorePhysics) [16] из пакета GEANT4. Эти модели используют базу данных Livermore EPDL и EEDL.

Предполагается, что событие DD синтеза приводит к генерации нескольких сотен электронов с энергией 60 кэВ (или несколько тысяч электронов с энергией 6 кэВ) с выделением полной энергии 24 МэВ в относительно короткое время (около

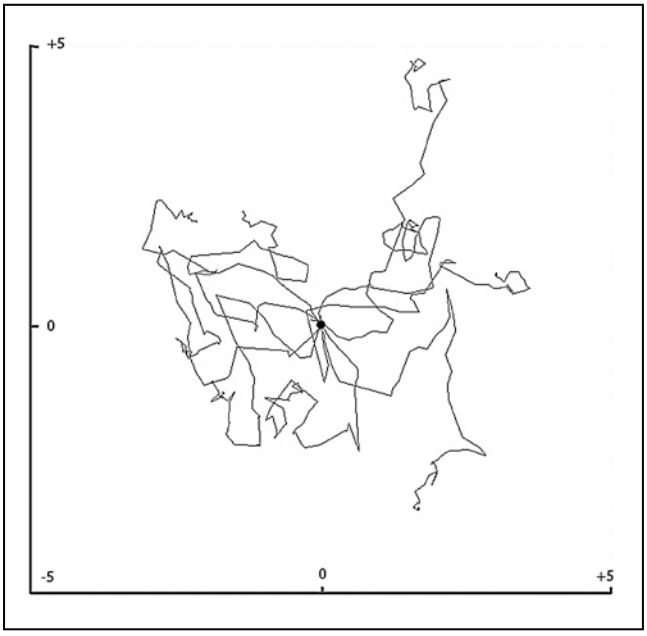

Рис. 15. Образцы траекторий 10 электронов с энергией 60 кэВ, испущенных изотропно из акта DD синтеза в палладии (в плоскости XY). Размеры указаны в микрометрах

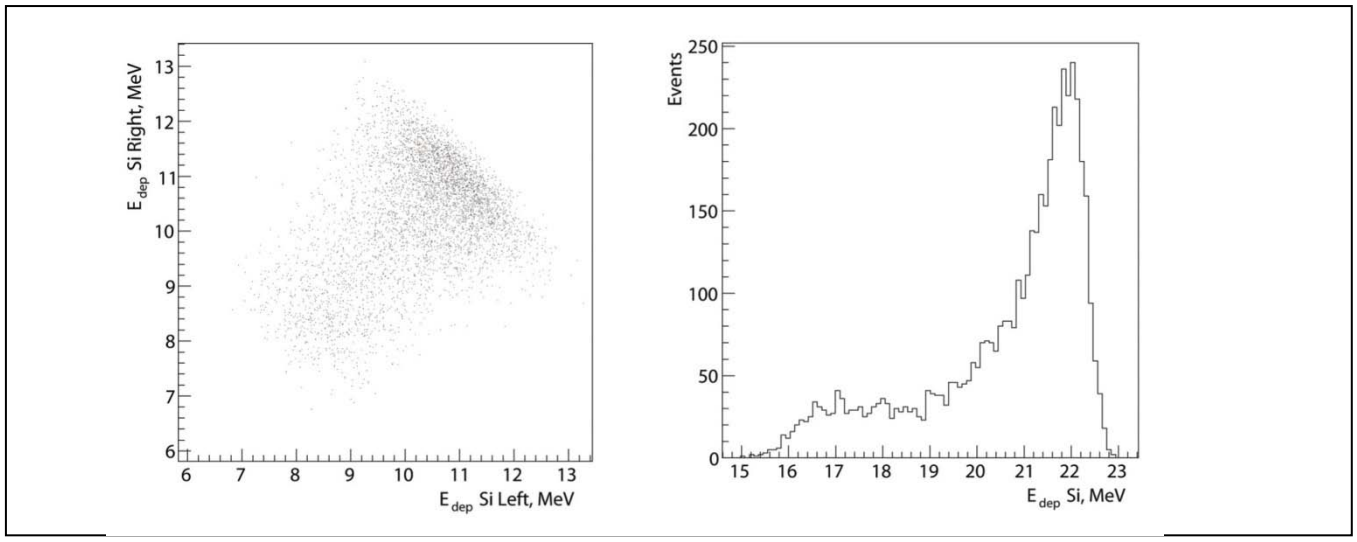

Рис. 16. Слева – энергия, выделенная 6 кэВ электронами в детекторах слева и справа от палладиевой пленки толщиной 0,1 микрометра. Справа – полная энергия, зарегистрированная в этом случае

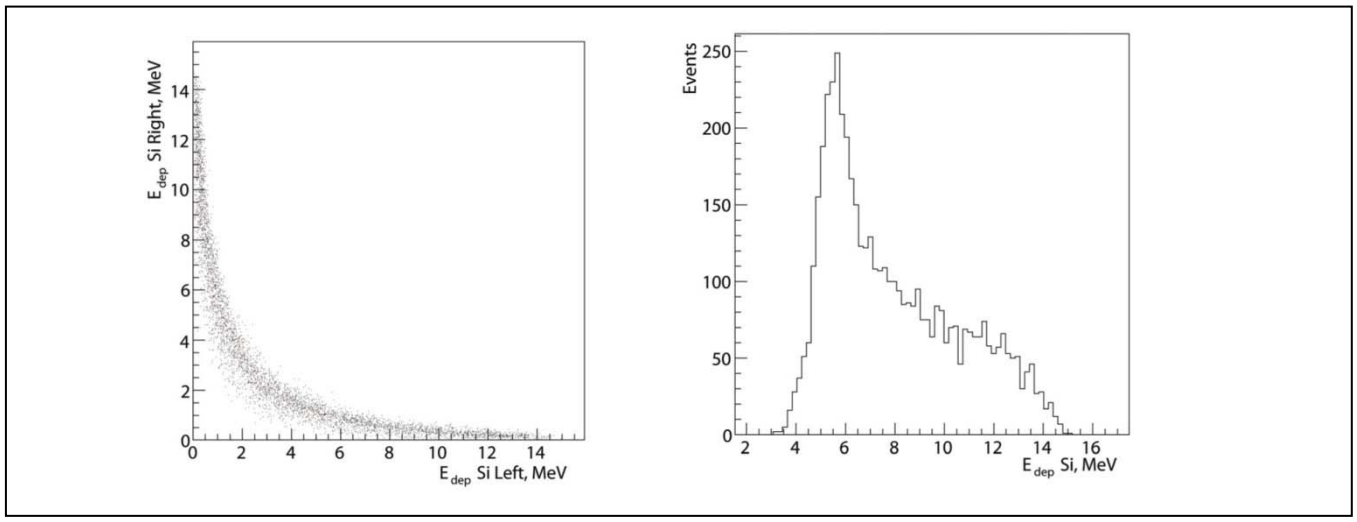

Рис. 17. Слева – энергия, выделенная 6 кэВ электронами в детекторах слева и справа от палладиевой пленки толщиной 1 микрометр. Справа – полная энергия, зарегистрированная в этом случае

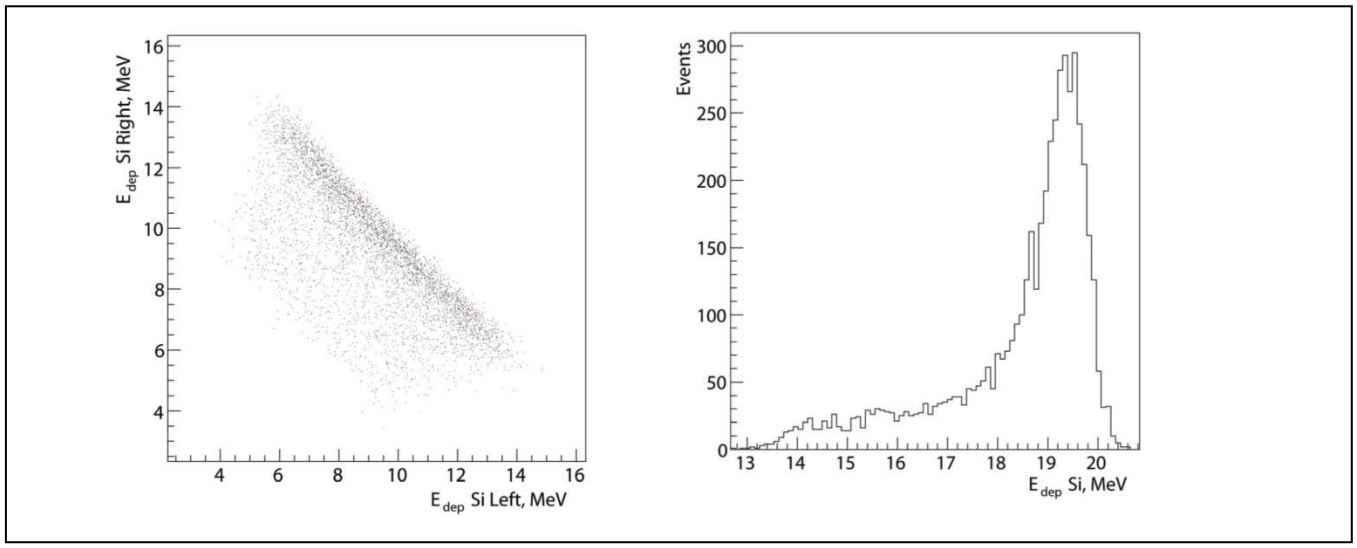

Рис. 18. Слева – энергия, выделенная 60 кэВ электронами в детекторах слева и справа от палладиевой пленки толщиной 5 микрометров. Справа – полная энергия, зарегистрированная в этом случае

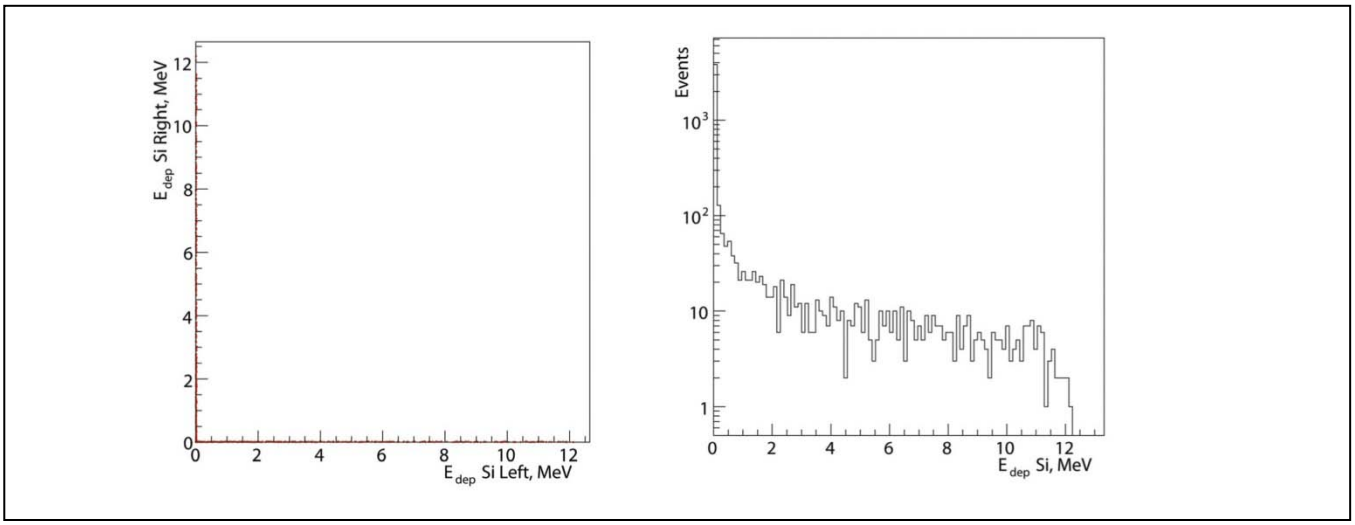

Рис. 19. Слева – энергия, выделенная 6 кэВ электронами в детекторах слева и справа от палладиевой пленки толщиной 1 микрометр. Справа – полная энергия, зарегистрированная в этом случае

10^{-15} с). Палладиевая фольга не является активным детектирующим элементом, поэтому энергия электронов из события DD синтеза, поглощенная этой фольгой, исчезает из процесса регистрации. Наши вычисления были выполнены для оптимизации толщины палладиевой фольги и геометрии детекторов.

Результаты моделирования представлены на рисунках 15…22.

6. Дискуссия

В случае энергии испускаемых электронов 60 кэВ и толщины палладиевой фольги 5 микрометров регистрация событий в варианте лево-правых совпадений, по-видимому, не представляет значительных трудностей. Когда порог срабатывания отдельного детектора установлен на уровне 100 кэВ, вероятность лево-правых совпадений составляет около 97 %. В случае электронов с энергией 6 кэВ вероятность лево-правых совпадений практически исчезает, даже в случае толщины палладия 1 микрометр. Тем не менее, даже в этом случае надежное детектирование событий может быть осуществлено с помощью совпадений срабатывания различных детекторов, расположенных с одной стороны палладиевой фольги.

Для энергии электронов 60 кэВ односторонняя геометрия расположения детекторов обеспечивает надежное детектирование событий. В этом случае максимальная суммарная энергия зарегистрированных событий равна примерно половине энергии, выделившейся в реакции D+D→^{4}He. По

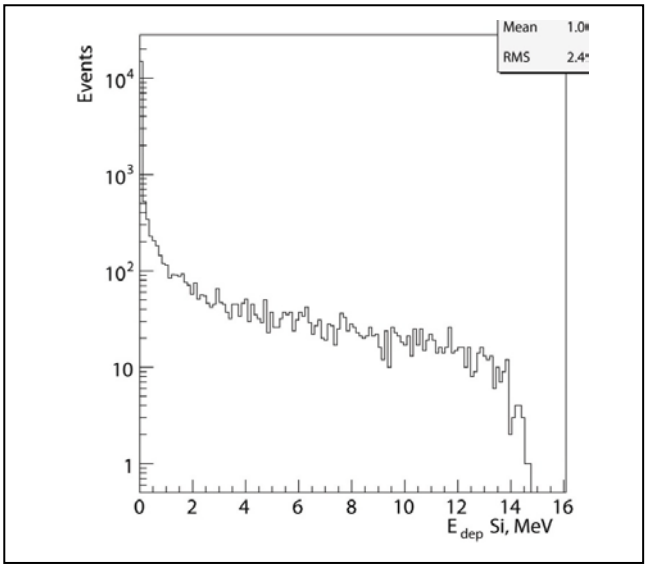

Рис. 20. Выделение энергии электронами 60 кэВ в детекторах, расположенных с одной стороны палладиевой фольги толщиной 20 микрометров. В около 75 % разыгранных событий электроны полностью поглощаются в палладии. Спектр простирается до энергии около 14 МэВ из-за рассеяния некоторой части электронов в палладии на 180 °

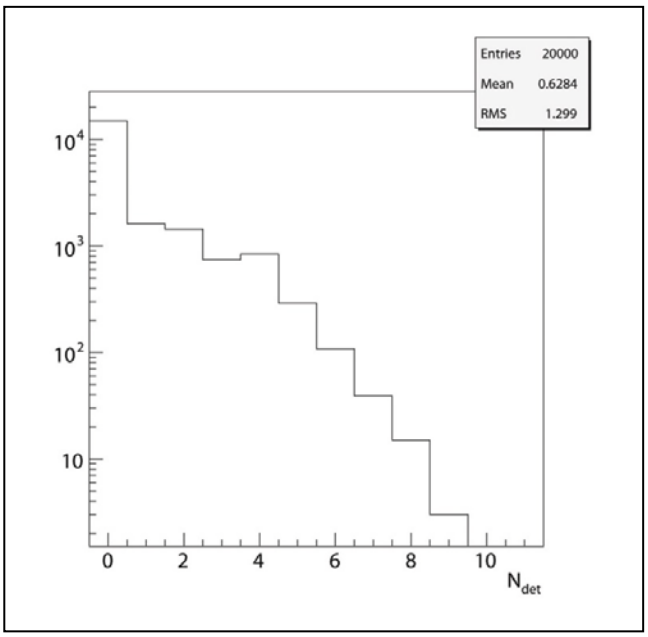

Рис. 21. Распределение событий по числу сработавших детекторов для одностороннего варианта эксперимента в случае электронов с энергией 60 кэВ. Порог срабатывания детекторов выбран на уровне 100 кэВ

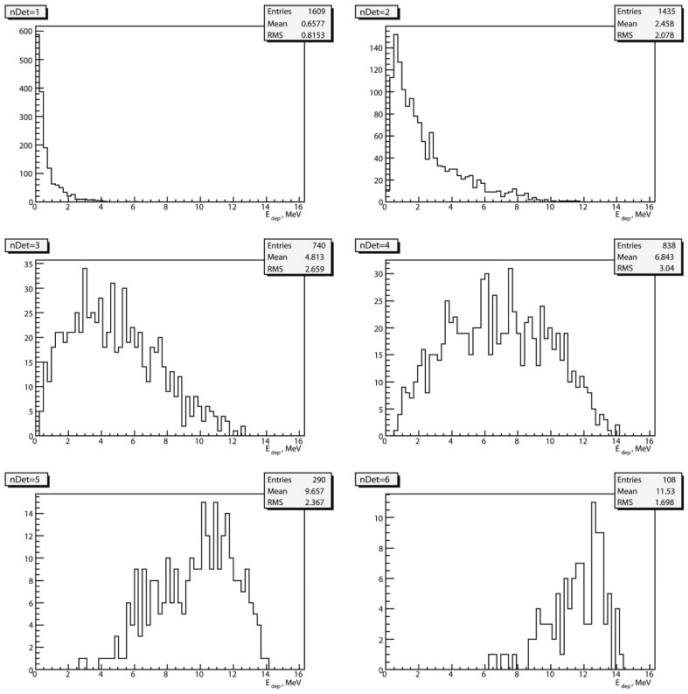

Рис. 22. Распределение событий по полной энергии, испущенной электронами с энергией 60 кэВ, для случая, когда детекторы расположены с одной стороны палладиевой фольги толщиной 20 микрометров. Различные гистограммы соответствуют различной множественности срабатывания детекторов. Порог срабатывания детекторов был выбран равным 100 кэВ

нашему мнению, регистрация этой реакции по выделению электронов в процессе конверсии виртуальных фотонов в кристалле палладия будет убедительным доказательством описываемого процесса.

Авторы благодарят профессора А.М. Таратина за консультации при расчетах потенциалов в кристаллической ячейке в приближении Мольер. Авторы также благодарят С.В. Кашигина за помощь при выборе конструкции полупроводниковых детекторов.

Список литературы

1. McKubre M.C.H., Tanzella F., Tripodi P. et al. Proceedings of the 8th International Conference on Cold Fusion, Lerici (La Spezia), 2000, Ed. by F. Scaramuzzi (Italian Physical Society, Bologna, Italy, 2001), p. 3; McKubre M.C.H. Condensed Matter Nuclear Science: Proceedings of the 10th International Conference on Cold Fusion, Cambridge, MA, USA, 21–29 Aug., 2003, Ed. by P.L. Hagelstein and S.R. Chubb (World Sci., Singapore, 2006); Review of Experimental Measurements Involving DD Reactions, presented at the Short Course on LENR for ICCF-10, Aug. 25, 2003.
2. Tsyganov E.N. Preprint LNF–11/03 (P). 2011. April 6.
3. Цыганов Э.Н. *Ядерная Физика*. 2012. Т. 75. № 2. Сс. 174…180.
4. Assenbaum H.J., Langanke K., Rolfs C. Z. Phys. A – Atomic Nuclei. 1987. Vol. 327. Pp. 461…468.
5. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. *Успехи Физических Наук*. 1960. Т. LXXI. № 4. с. 581.
6. Rolfs C. Enhanced Electron Screening in Metals: A Plasma of the Poor Man. Nuclear Physics News. 2006. Vol. 16. № 2.
7. Huke A., Czerski K., Heide P., Ruprecht G., Targosz N., Zebrowski W. Phys. Rev. 2008. C 78. P. 015803.
8. Raiola F. (for the LUNA Collaboration), Burchard B., Fulop Z. et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2005. Vol. 31. P. 1141; Eur. Phys. J. 2006. A27. P. 79.
9. Bogdanova L.N. Proceedings of International Conference on Muon Catalyzed Fusion and Related Topics, Dubna, June 18–21, 2007, publ. by JINR, E4, 15-2008-70, pp. 285…293.
10. Molière G.Z. Naturforsh. 1947. A 2. P. 133.
11. Gemmel D.S. Reviews of Modern Physics. 1974. Vol. 46. P. 129.
12. Ichimaru S., Ogata S., Nakano A. Journal of the Physical Society of Japan. 1990. Vol. 59. № 11. Pp. 3904…3915.
13. Eschrig H. The Fundamentals of Density Functional Theory. Institute for Solid State and Materials Research Dresden, and University of Technology, Dresden, 2003.
14. Agostinelli S. et al. Nucl. Instr. Meth. 2003. Vol. A506. P. 250.
15. Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces. Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA and MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17–21, 2010.
16. G4 Em Livermore Physics Package.

References

1. McKubre M.C.H., Tanzella F., Tripodi P. et al. Proceedings of the 8th International Conference on Cold Fusion, Lerici (La Spezia), 2000, Ed. by F. Scaramuzzi (Italian Physical Society, Bologna, Italy, 2001), p. 3; McKubre M.C.H. Condensed Matter Nuclear Science: Proceedings of the 10th International Conference on Cold Fusion, Cambridge, MA, USA, 21–29 Aug., 2003, Ed. By P.L. Hagelstein and S.R. Chubb (World Sci., Singapore, 2006); Review of Experimental Measurements Involving DD Reactions, presented at the Short Course on LENR for ICCF-10, Aug. 25, 2003.
2. Tsyganov E.N. Preprint LNF–11/03 (P). 2011. April 6.
3. Tsyganov E.N. Physics of Atomic Nuclei. 2012. Vol. 75. № 2. Pp. 153…159.
4. Assenbaum H.J., Langanke K., Rolfs C. Z. Phys. A – Atomic Nuclei. 1987. Vol. 327. Pp. 461…468.
5. Zel'dovich Ya.B., Gershteyn S.S. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics-Uspekhi]. 1960. T. LXXI. № 4. P. 581.
6. Rolfs C. Enhanced Electron Screening in Metals: A Plasma of the Poor Man. Nuclear Physics News. 2006. Vol. 16. № 2.
7. Huke A., Czerski K., Heide P., Ruprecht G., Targosz N., Zebrowski W. Phys. Rev. 2008. C 78. P. 015803.
8. Raiola F. (for the LUNA Collaboration), Burchard B., Fulop Z. et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2005. Vol. 31. P. 1141; Eur. Phys. J. 2006. A27. P. 79.
9. Bogdanova L.N. Proceedings of International Conference on Muon Catalyzed Fusion and Related Topics, Dubna, June 18–21, 2007, publ. by JINR, E4, 15-2008-70, pp. 285…293.
10. Molière G.Z. Naturforsh. 1947. A 2. P. 133.
11. Gemmel D.S. Reviews of Modern Physics. 1974. Vol. 46. P. 129.
12. Ichimaru S., Ogata S., Nakano A. Journal of the Physical Society of Japan. 1990. Vol. 59. № 11. Pp. 3904…3915.
13. Eschrig H. The Fundamentals of Density Functional Theory. Institute for Solid State and Materials Research Dresden, and University of Technology, Dresden, 2003.
14. Agostinelli S. et al. Nucl. Instr. Meth. 2003. Vol. A506. P. 250.
15. Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces. Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA and MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17–21, 2010.
16. G4 Em Livermore Physics Package.

Сведения об авторах

Цыганов Эдуард Николаевич, *доктор физ.-мат. наук, профессор, президент*
E-mail: edward.tsyganov@coldfusion-power.com
Cold Fusion Power International
1215 Teakwood Dr., Duncanville, TX 75137, USA
Бавижев Мухамед Данильевич, *доктор физ.-мат. наук, профессор, вице-президент*
ОАО «НПП «РАДИЙ»
125057, Москва, Российская Федерация, ул. Часовая, 28
Головатюк Вячеслав Михайлович, *канд. физ.-мат. наук, начальник сектора*
Лобастов Сергей Петрович, *старший научный сотрудник*
Объединенный Институт Ядерных Исследований
141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6
Дабагов Султан Барасбиевич, *доктор физ.-мат. наук, профессор*
Физический Институт РАН им. П.Н. Лебедева и НИЯУ МИФИ, Москва
119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр. 53

Information about authors

Tsyganov Эдуард N., *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor, President*
E-mail: edward.tsyganov@coldfusion-power.com
Cold Fusion Power, International, USA
1215 Teakwood Dr., Duncanville, TX 75137, USA
Bavizhev Mukhamed D., *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor, Vici-President*
LLC «CPE «Radium»
125057, Moscow, Russian Federation, Chasovaya, 28
Golovatyuk Vyacheslav M., *Cand. of Phys.-Math. Science, Head of Sector*
Lobastov Sergey P., *Senior Researcher*
Joint Institute for Nuclear Research (JINR)
141980, Dubna, Moscow region, Zholio-Kyuri, 6
Dabagov Sultan B., *Doctor of Phys.-Math. Science, Professor*
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, National Research Nuclear University «MEPhI»
119991, Moscow, Russian Federation, Leninskiy av., 4