J. Condensed Matter Nucl. Sci. 17 (2015) 1–15

Холодный ядерный синтез в металлической среде

Э.Н. Цыганов*
Cold Fusion Power, International, США

М.Д. Бавижев
НПО “Радий”, Москва, Россия

М.Г. Буряков, В.М. Головатюк, С.П. Лобастов
Объединеннвй Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

С. Б. Дабагов
Физический Институт Российской Академии Наук им. П.Н. Лебедева, Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

В настоящей статье обсуждается механизм так называемого холодного синтеза дейтерия и других элементов, имплантированных в потенциальные ниши проводящих кристаллов. Холодный синтез в металлах становится возможным из-за того, что имплантация атомов в такой кристалл приводит к их возбуждению на уровни ***p***, что определяется преимущественным позиционированием в зоне этих потенциальных ниш так называемых свободных электронов проводимости. Энергия возбуждения ***p***-состояний составляет около 10–14 эВ. Ориентация таких возбужденных атомов в кристалле не является более случайной, а задается электростатическими потенциалами его кристаллической решетки. Расчеты показывают, что прозрачность кулоновского потенциального барьера, например в случае DD синтеза, возрастает приблизительно на 60 порядков, если два атома дейтерия встречаются друг с другом в потенциальной нише проводника в ориентации *крест-на-крест*. Большая часть статьи посвящена процессу DD-синтеза при электролитическом насыщении кристаллов дейтерием, так как в этих опытах процесс был наиболее подробно изучен. В статье кратко комментируются и другие экспериментальные результаты по холодному синтезу.
©2015 ISCMNS. All rights reserved. ISSN 2227-3123

Keywords: Deuterium, Excess Power, Nickel, Palladium, Platinum

* *Ответственный автор:* edward.tsyganov@coldfusion-power.com

©2015 ISCMNS. All rights reserved. ISSN 2227-3123

1. Введение

Уже в течение свыше 60 лет ведутся разговоры о переходе к процессу управляемого термоядерного синтеза. Однако, первоначальные ожидания того, что эта проблема будет вскоре решена, так и не материализовались. Технические трудности устойчивого получения сверхгорячей плазмы (~10^9 °C) и разрушающее воздействие громадного нейтронного потока, возникающего вследствие термоядерных реакций, отодвигают решение этой задачи на все более далекое и неопределенное будущее.

В 1989 г. были доложены результаты опытов М. Флейшмана и С. Понса [1], где при электролитическом насыщении кристаллов палладия дейтерием наблюдалось значительное выделение тепла, которое количественно не могло быть объяснено химическими реакциями. Авторы пришли к заключению, что в этих опытах они наблюдали процесс ядерного DD-синтеза, происходящий при комнатной температуре. Ортодоксальным физическим сообществом опыты Флейшмана и Понса быстро были признаны ошибочными. Однако, после их последующих многочисленных подтверждений и проверок появилась уверенность в том, что проблема управляемого ядерного синтеза может быть решена именно этим способом. Наиболее серьезные исследования были проведены группой Мак-Кубре [2]. Тем не менее, результаты проводимых уже в течение 25 лет экспериментов по холодному синтезу попрежнему либо полностью игнорируются сообществом ортодоксальных ядерных физиков, либо встречаются ими с большой долей скептицизма. Два основных возражения, которые выдвигались против результатов этих экспериментов, заключаются в следующем:

(1) Многочисленные попытки дать научное объяснение, каким образом в процессе холодного ядерного синтеза преодолевается так называемый кулоновский барьер, не увенчались успехом.

(2) В экспериментах по холодному ядерному DD-синтезу, в отличие от процессов при термоядерном синтезе, практически не наблюдается других ядерных продуктов, за исключением ^{4}He. Этому феномену не предлагается внятных объяснений.

В следующих разделах нашей статьи мы постарались ответить на эти вопросы.

Тепловыделение в реакциях холодного синтеза приблизительно в 10^6 раз больше, чем в любых химических реакциях. Таким образом, мы встретились с новым физическим явлением, которое несомненно изменит весь ход человеческой цивилизации. Некоторые из практических применений этого явления (корабли, самолеты, космонавтика) просто недоступны устройствам с использованием циклопически больших размеров токамаков и других гипотетических установок с использованием обычного термоядерного синтеза.

2. Эксперименты по DD синтезу на ускорителях низких энергий

В экспериментах по DD-синтезу на ускорителях было показано, что если атом дейтерия-мишени располагается в проводящем кристалле, то реакция синтеза при низких энергиях идет с гораздо большей вероятностью, чем в случае свободных атомов дейтерия. Эти эксперименты дали прямое указание на объяснение явления холодного синтеза.

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 рамках приближения Борна-Оппенгеймера в работах Ассенбаума [3] и в ряде других публикаций было показано, что введение так называемого “потенциала электронного экранирования” для случая столкновения свободных атомов эквивалентно введению в выражение для прозрачности кулоновского барьера $\boldsymbol{P=e^{-2\pi\eta}}$ (здесь $\boldsymbol{2\pi\eta=31.41/E_{eff}^{1/2}}$, где $\boldsymbol{E_{eff}=E+U_e}$) дополнительной энергии $\boldsymbol{U_e}$=27 эВ. В экспериментах на ускорителях [4-13] потенциал электронного экранирования для реакции DD-синтеза в проводящих кристаллах неожиданно оказался очень большим, равным $\boldsymbol{U_e}$ ~300–700 эВ. На Рис. 1 представлены результаты измерения астрофизической функции $\boldsymbol{S(E)}$ из работы [11] в случае, когда атомы дейтерия-мишени внедрены в подложку из кристалла платины. Вместо того, чтобы с уменьшением энергии налетающих дейтронов стремиться к величине около 50 кэв-б, как это происходит в случае размещения дейтерия-мишени в подложке из полупроводников, изоляторов или аморфных веществ, значение $\boldsymbol{S(E)}$ начинает резко возрастать.

Наличие свободных электронов проводимости кристалла, группирующихся в области потенциальных ниш кристаллической решетки проводников, приводит к запрету для ***s***-состояния водорода занимать эти ниши. Возбуждение электронной оболочки атома водорода всего на 10 эВ или несколько выше переводит атом дейтерия в состояния ***2p***, ***3p*** и т.д. и эффективно снимает этот запрет. Это означает, что если в одну кристаллическую нишу в условиях проводящего кристалла попадают два атома дейтерия, расстояние между ядрами этих атомов оказывается равным 1/10–1/20 от номинальных размеров невозбужденных атомов. Это обстоятельство резко повышает вероятность реакции синтеза.

Процессы холодного DD-синтеза были рассмотрены нами в работах [14-18].

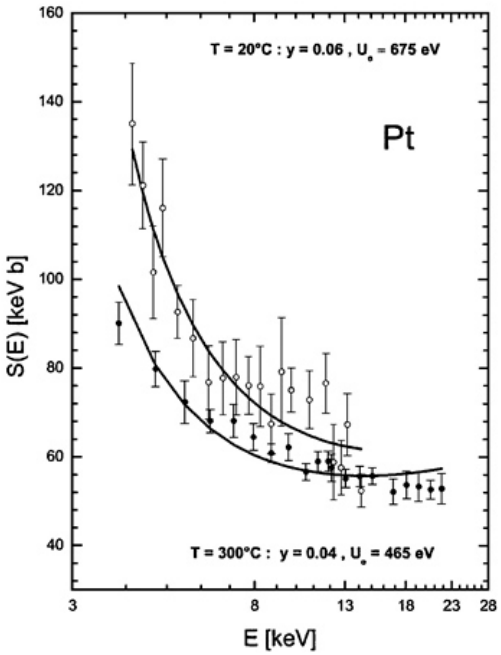
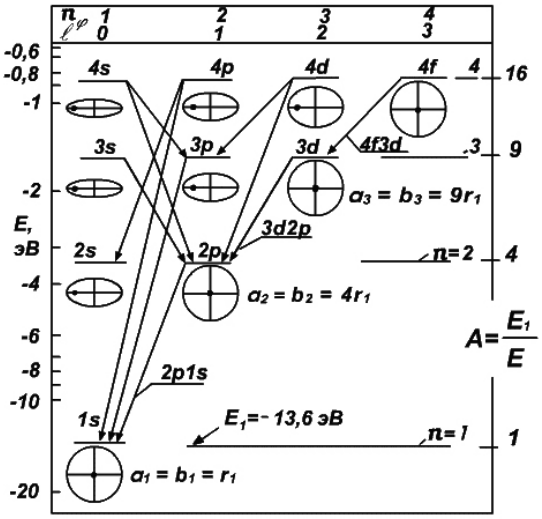


Рис. 1. Значение астрофизической функции ***S(E)*** в случае, когда атомы дейтерия-мишени внедрены в кристалл платины. При комнатной температуре данные хорошо фитируются потенциалом экранирования 675 эВ.

3. Физика холодного DD-синтеза

Схема электронных оболочек атома водорода схематически представлена в Таблице 1.

Таблица 1. Схема электронных уровней возбуждения атома водорода.



В этой таблице приводится схема электронных уровней возбуждения атома водорода. Для нас представляет интерес вторая вертикальная колонка с квантовыми числами n = 2, l = 1 и, в частности, уровни ***2p*** и ***3p***. Рис. 2 [19] и схематически иллюстрирует электронные плотности в атоме водорода в состояниях ***1s*** и ***2p***.

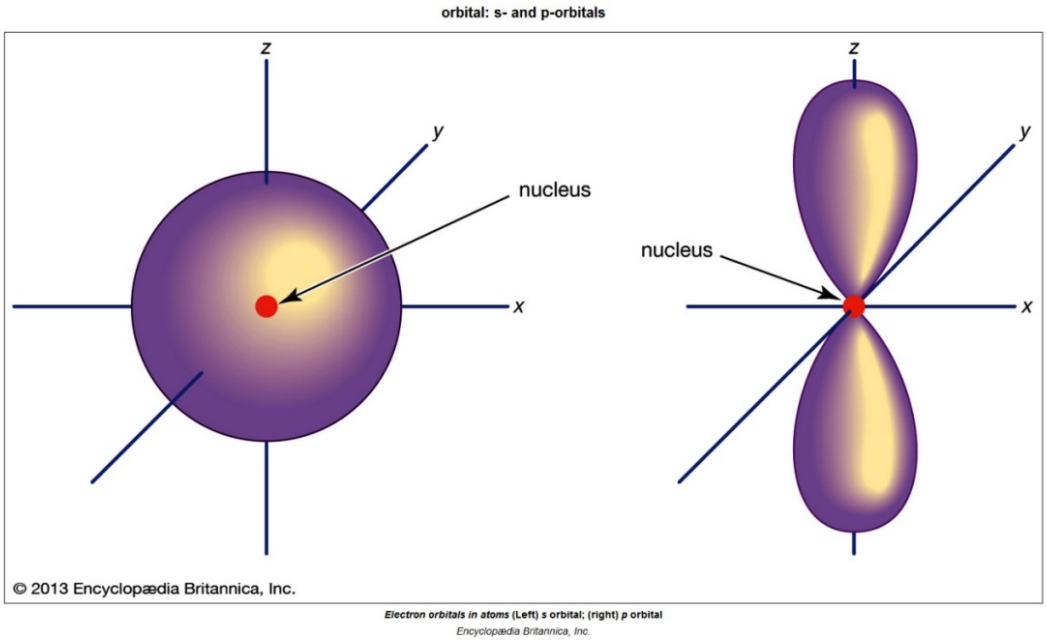


Рис. 2. Орбитали атома водорода ***1s*** (слева) и ***2p*** (справа). Рисунок взят из Encyclopædia Britannica, 2013 [19]. Представленные контуры включают 95% возможных позиций электрона.

Интересное представление расчетов различных орбиталей атома водорода развито в работах Винтера[20]. На рисунке 3 представлены функции электронной плотности водорода при решении уравнения Шредингера в состояниях ***2p*** и ***3p***.

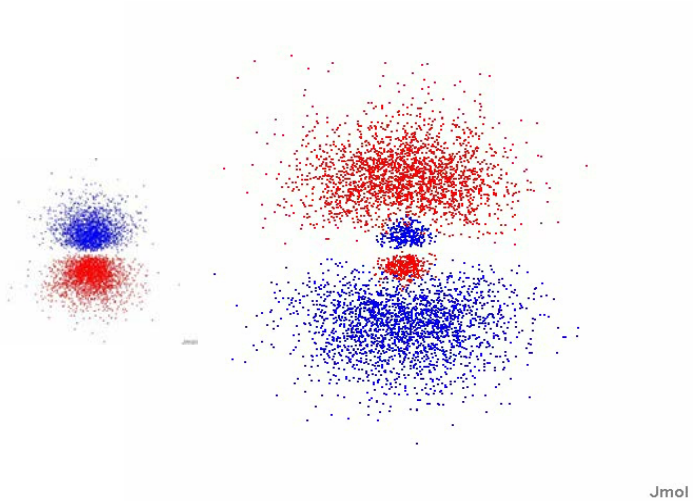


Рис. 3. Функции электронной плотности водорода в состояниях ***2p*** (слева) и ***3p*** (справа) из работы Винтера [20]. Красным и синим цветом обозначены плотности, полученные для положительного и отрицательного значения волновой функции ψ, соответственно.

На Рис. 4 графически изображена кристаллическая структура *fcc*, которой обладают кристаллы никеля, палладия и платины. Большими кружками обозначено расположение атомов кристалла-хозяина, малыми

кружками обозначено расположение наиболее глубоких октаэдральных потенциальных ниш в этой структуре. Параметры всех октаэдральных ниш являются идентичными.

Пока соотношение примесных атомов дейтерия и атомов кристалла-хозяина не превышает соотношение D/Pd ~0.9, никакого процесса холодного синтеза не происходит, так как примесные атомы дейтерия расположены в различных октаэдральных нишах и достаточно удалены друг от друга. Однако, когда в одну такую потенциальную нашу попадают два атома дейтерия, а это, как мы отметили ранее, происходит в состоянии уровня возбуждения их электронов ***2p*** или выше, вероятность проникновения через потенциальный барьер для процесса DD-синтеза резко увеличивается.

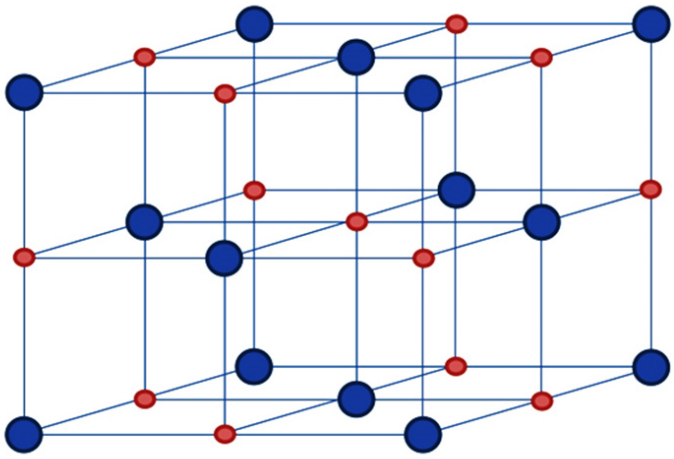


Рис. 4. Кристаллическая структура *fcc* (никель, палладий, платина). Малыми кружками обозначено расположение наиболее глубоких октаэдральных потенциальных ниш в этой структуре.

Одним из убедительных доводов скептиков холодного синтеза было отсутствие в этих опытах ядерных продуктов распада образующегося промежуточного ядра. Было принято считать: “нет нейтронов – нет синтеза”. Однако довольно большой интернациональный коллектив физиков, на данный момент насчитывающий в общей сложности около 200–300 человек, продолжает работы в этом направлении. К настоящему времени этими энтузиастами накоплен значительный опыт в области холодного ядерного синтеза. Лидирующей группой физиков, работающих в этом направлении, является группа под руководством доктора М. Мак-Кубре [2]. На рисунке 5 представлен график выделения избыточного тепла в ваттах в зависимости от значения электрохимического тока в экспериментах д-р McKubre др. [21].

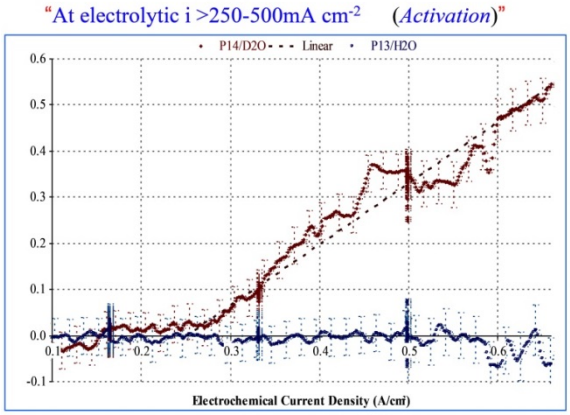


Рис. 5. Избыточное тепло в ваттах в зависимости от значения электрохимического тока в экспериментах д-р Мак-Кубре др. [21].

В работах Мак-Кубре и др. [22] был продемонстрирован график успеха экспериментов по холодному синтезу в варианте *да-нет* в зависимости от концентрации дейтерия в кристалле палладия (Рис. 6). После превышения соотношения D/Pd ~0.9 экспериментаторы устойчиво наблюдают процесс DD-синтеза.

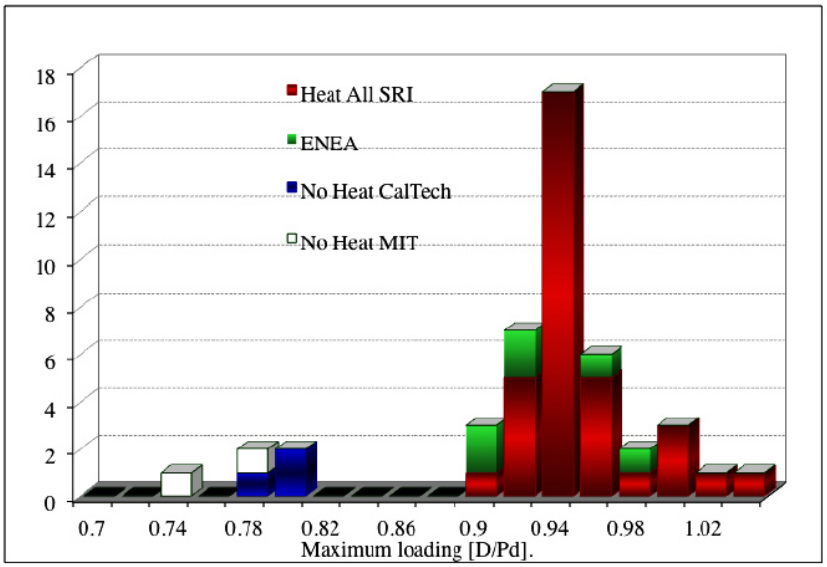


Рис. 6. Успех экспериментов по холодному синтезу в зависимости от концентрации дейтерия в кристалле палладия в работах Мак-Кубре и др. [22].

В нашей работе [16] мы провели расчеты электрических полей в объеме *fcc* кристаллов. .На Рис. 7 приведена форма октахедральной потенциальной ниши в кристалле платины:

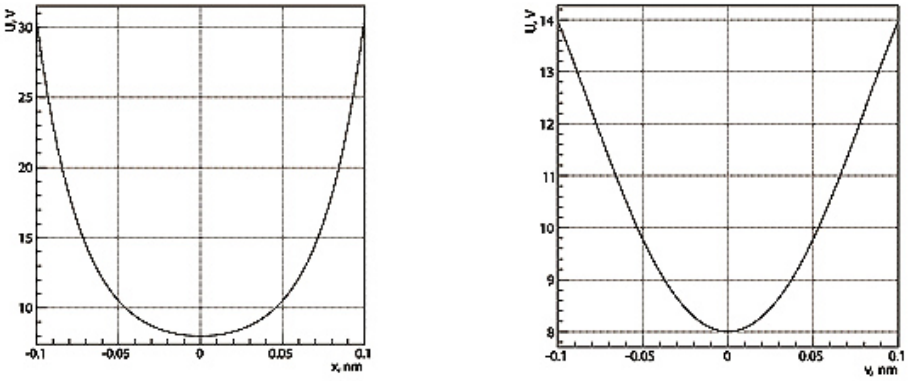


Рис. 7. Поведение электрического потенциала в окрестности октахедральной потенциальной ниши в кристалле платины. Слева – значение потенциала в вольтах при Z =0 в горизонтальной плоскости кристаллической ячейки, справа – в диагональной плоскости ячейки.

На Рис. 8 слева в проекции *XY* показано распределение потенциала в незаполненной октаэдральной нише. В центре рисунка показано возможное расположение одиночного атома дейтерия в состоянии ***2p*** в этой нише. Рисунок справа показывает одну из возможных комбинаций двух таких атомов, расположенных в той же нише. Цветная градация характеризует потенциал электрического поля в ячейке кристалла платины. Читатель должен иметь в виду некоторое (нулевое) квантовое дрожжание ***2p***-атомов дейтерия, которое, однако, не отменяет фиксации их среднего расположения в ячейке проводящего кристалла.

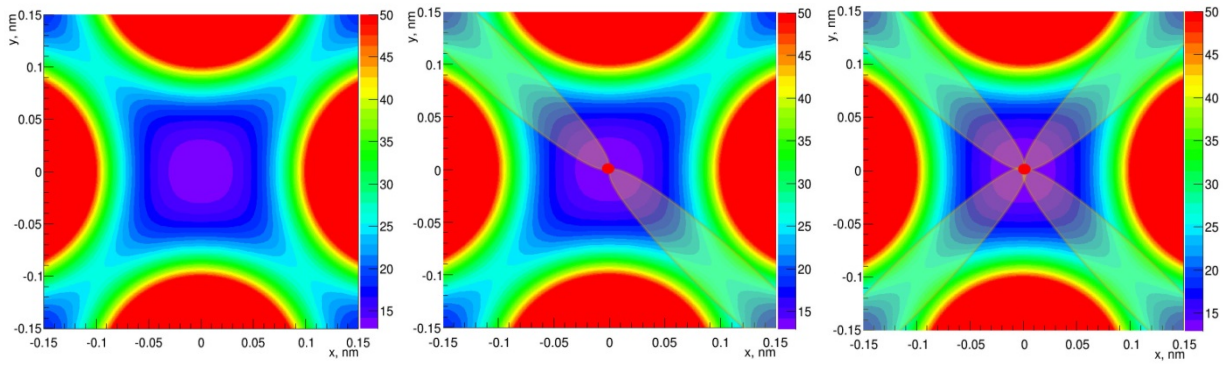


Рис. 8. Слева в проекции *XY* показано распределение потенциала в незаполненной октаэдральной нише. В центре показано возможное расположение одиночного атома дейтерия в состоянии ***2p*** в этой нише. Рисунок справа показывает одну из возможных комбинаций двух таких атомов, расположенных в той же нише. Цветная градация характеризует потенциал электрического поля в ячейке кристалла платины.

На Рис. 9 представлено расположение двух атомов дейтерия в состоянии ***2p*** в одной кристаллографической нише вдоль вертикальной оси *Z*.

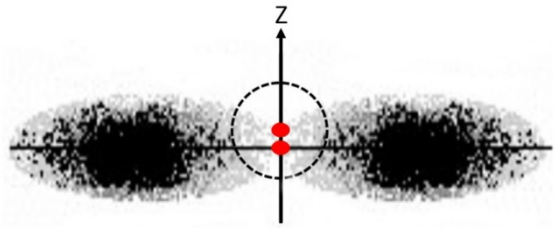


Рис. 9. Расположение двух атомов дейтерия в состоянии ***2p*** в одной кристаллографической нише вдоль вертикальной оси *Z*.

На Рис. 10 схематически иллюстрирован механизм перехода атома дейтерия в состояние ***2p*** при его имплантации в проводящий кристалл.

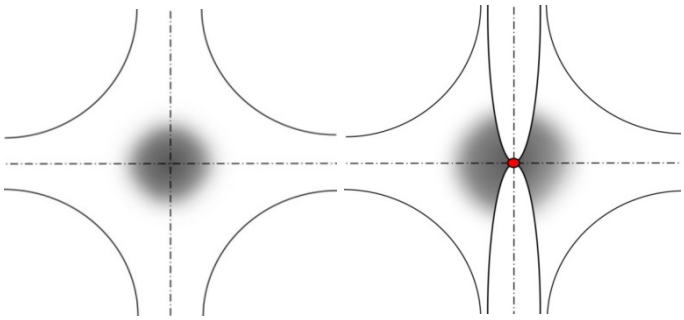


Рис. 10. Кристаллическая ячейка проводника. Простая кубическая структура используется в качестве дидактического примера. Заштрихованная область показывает расположение свободных электронов. Свободные электроны проводимости кристалла не покидают полностью свои позиции, в результате этого компромисного процесса атом дейтерия переходит из ***1s***-состояния в ***2p***-состояние.

Таким образом, атомы дейтерия-мишени, имплантированные в металлы, больше не находятся в основном ***1s***-состоянии, так как облако свободных электронов в вынуждает электрон имплантированного атома занять возбужденные ***p***-состояния. Величина экранирующего потенциала 300-700 эВ в экспериментах по DD-синтезу в экспериментах на ускорителях показывает, что атомы налетающего дейтерия в процессе движения в проводящем кристалле также находятся в ***p***-состояниях. Эти процессы позволяют двум ядрам дейтерия в потенциальной нише кристаллической ячейки оказаться достаточно близко друг к другу, не испытывая при этом сильного кулоновского отталкивания.

Рисунок 11 демонстрирует размеры различных орбиталей фтома водорода, в частности ***2p*** и ***3p*** [23].

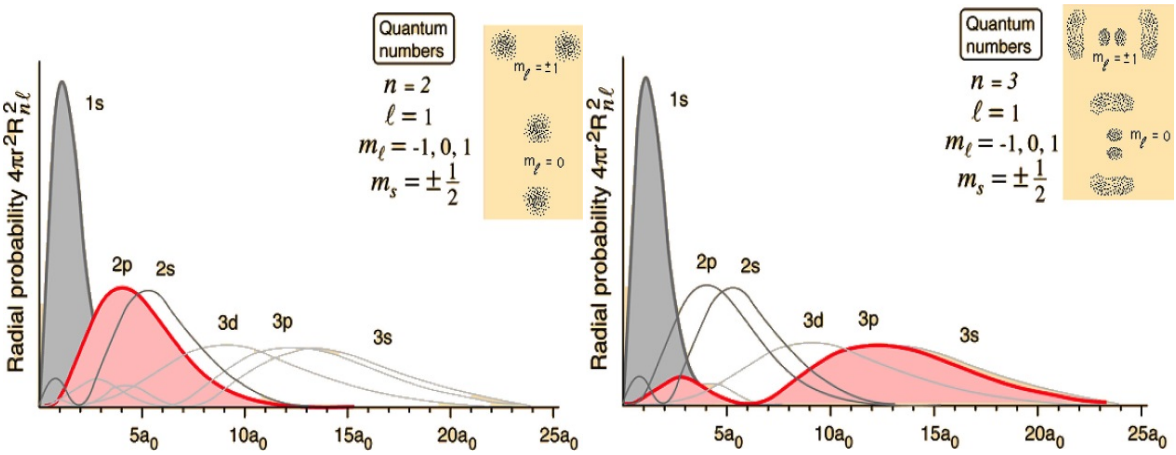


Рис. 11. Радиальные распределения вероятности электрона в атоме водорода для ***2p*** и ***3p*** состояний.

Напомним, рисунки 2, 3, 9 и 11 справедливы только для свободных атомов и могут изменяться под действием химических связей. Они используются нами в качестве первого приближения. На Рис. 12 представлена зависимость прозрачности кулоновского барьера от потенциала электронного экранирования U_e для процесса холодного DD-синтеза.

$$P = e^{-2\pi\eta} \; (2\pi\eta = 31.41/E_{eff}^{1/2},\; E_{eff}=E+U_e)$$

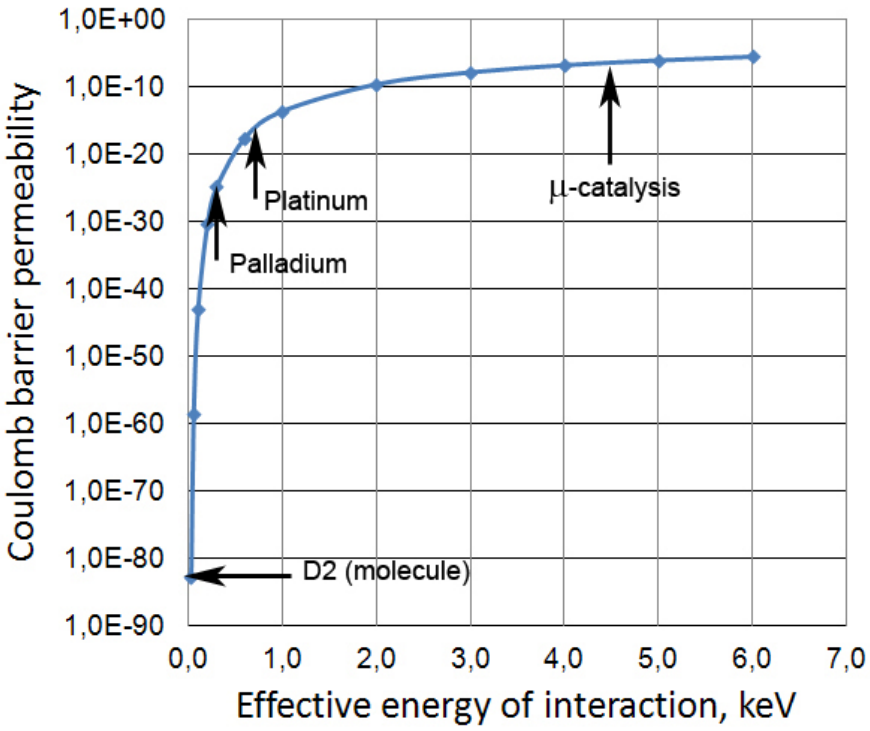


Рис. 12. Зависимость прозрачности кулоновского барьера в случае $\boldsymbol{E} = 0$ от потенциала электронного экранирования $\boldsymbol{U_e}$ для процесса холодного DD-синтеза.

Для холодного синтеза ($\boldsymbol{E} \cong 0{,}040$ эВ) отношение прозрачности кулоновского барьера для атомов дейтерия, которые находятся в той же нише кристалла платины к соответствующему значению прозрачности барьера для свободной молекулы дейтерия составляет Pt/D2 ≅ 10^{65}. Таким образом, в случае металлического кристалла проникновение ядер дейтерия через кулоновский барьер благодаря нулевым квантовым вибрациям системы становится практически возможным. В таблице 1, взятой из работы [15], приведены характеристики процесса холодного DD-синтеза для кристаллов палладия и платины.

Таблица 2. Характеристики процесса холодного синтеза для палладия и платины.

Тип кристалла	Потенциал экранирования, эВ	Частота колебаний ν	Прозрачность барьера $e^{-2\pi\eta}$	Скорость реакции DD-синтеза λ, c^{-1}
палладий	300	$0{,}74\times10^{17}$	$1{,}29\times10^{-25}$	$0{,}95\times10^{-8}$
платина	675	$1{,}67\times10^{17}$	$2{,}52\times10^{-17}$	4,2

В настоящем кратком обзоре экспериментов по холодному DD-синтезу нельзя не упомянуть о пионерских работах Й. Араты [24] и детальных экспериментах М. Шварца и П. Хагелстайна [25]. К сожалению, краткость обзора на позволяет нам остановиться на этих работах подробнее.

Ниже мы постараемся показать, что процесс релаксации возбужденного промежуточного ядра ^{4}He* может быть успешно объяснен обменом этого объекта со средой кристалла посредством так называемых *виртуальных фотонов*. Этот процесс оставался интригующей загадкой для науки на протяжении последних 25 лет.

4. Разряд избыточной энергии ядра ^{4}He* виртуальными фотонами

Мы показали, что из-за наличия свободных электронов в металле насыщение кристаллов дейтерием заставляет эти атомы стабильно занимать орбитали $\boldsymbol{2p}$ или выше. Когда все октаэдральные ниши уже

заполнены такими атомами дейтерия, начинают появляться ниши, содержащие более одного такого атома. В этом случае вероятность DD-системы проникать через потенциальный барьер резко возрастает. Как мы отметили выше, для кристаллов платины скорость DD-синтеза в такой нише может достигать 4 $с^{-1}$.

В связи с очень малой (тепловой) энергией возбуждения составного ядра в реакции DD→^{4}He* орбитальный момент этого составного ядра равен нулю, и это закрывает возможность испускания этой системой реальных гамма-квантов. Рис. 13 показывает потенциальную яму сильных взаимодействий для реакции DD→^{4}He*. Дейтроны, уже проникшие в эту потенциальную яму, по-прежнему разделены остаточным кулоновским барьером, значение которого, по-видимому, может достигать сотен электрон-вольт. При этом скорость ядерных распадов промежуточного ядра ^{4}He* по стандартным ядерным каналам распада ^{3}H+n и ^{3}He+p оказывается значительно замедленной. В этом случае обмен виртуальными фотонами с внешней средой попрежнему возможен, так как *спин виртуальных фотонов может быть направлен по оси времени*. Именно этот остаточный кулоновский барьер, действующий между двумя ядрами дейтерия уже внутри потенциальной ямы сильных взамиодействий, позволяет существенно замедлить скорость обычных ядерных каналов распада.

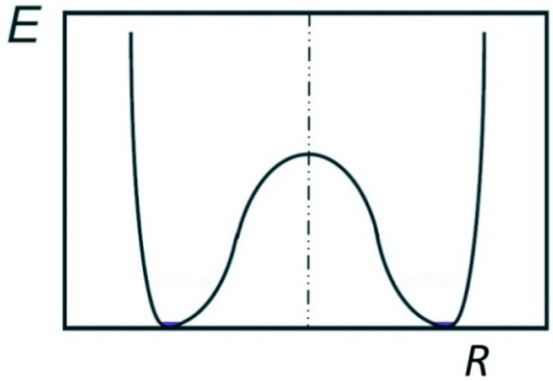


Рис. 13. Схематическое изображение потенциала на дне потенциальной ямы сильных взаимодействий в случае холодного DD-синтеза в проводящих кристаллах. Тепловая энергия возбуждения ядра ^{4}He* составляет около 0,040 эВ. Дейтроны в потенциальной яме, проникшие туда с помощью механизма холодного синтеза, по-прежнему разделены остаточным кулоновским барьером.

В соответствии с Рис. 13 мы предполагаем, что скорость проникновения дейтронов через остаточный кулоновский барьер уже в потенциальной яме сильных взаимодействий значительно меньше, чем 10^{-15} $с^{-1}$ из-за очень малой (тепловой) энергии возбуждения ядра ^{4}He*. За это время избыточная энергия возбужденного ядра ^{4}He* полностью уносится в окружающую среду.

Рис. 14 изображает процесс передачи энергии возбужденного состояния ^{4}He* окружающим электронам в проводящем кристалле *виртуальными фотонами*. Для того, чтобы этот механизм работал, ядро ^{4}He* должно находиться в метастабильном состоянии.

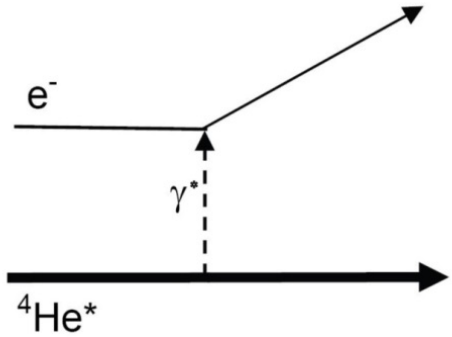


Рис. 14. Схема процесса разрядки избыточной энергии промежуточного ядра ^{4}He* серией последовательных обменов *виртуальными фотонами* между этим ядром и окружающей средой в проводящих кристаллах. Для того, чтобы этот механизм работал, необходимо существование метастабильного состояния ^{4}He*.

Можно предположить, что после реакции синтеза кулоновский потенциальный барьер, действующий уже внутри потенциальной ямы сильных взаимодействий, больше не является удерживающим фактором для нейтронов, и они могут практически свободно перемещаться из одного протона к другому. Однако то обстоятельство, что это “почти свободно”, а не “полностью свободно” означает, что дополнительная энергия около 2 МэВ необходима для этого процесса. Напомним, что в данном случае кинетическая энергия дейтронов в потенциальной яме сильных взаимодействий очень мала, существенно меньше, чем 1 эВ Рис. 15, слева, показывает атом водорода в представлении Фейнмана. Виртуальные фотоны, уносящие избыточную энергию возбуждения в реакции DD→^{4}He*, как это мог бы изобразить Фейнман, представлены на Рис. 15 справа.

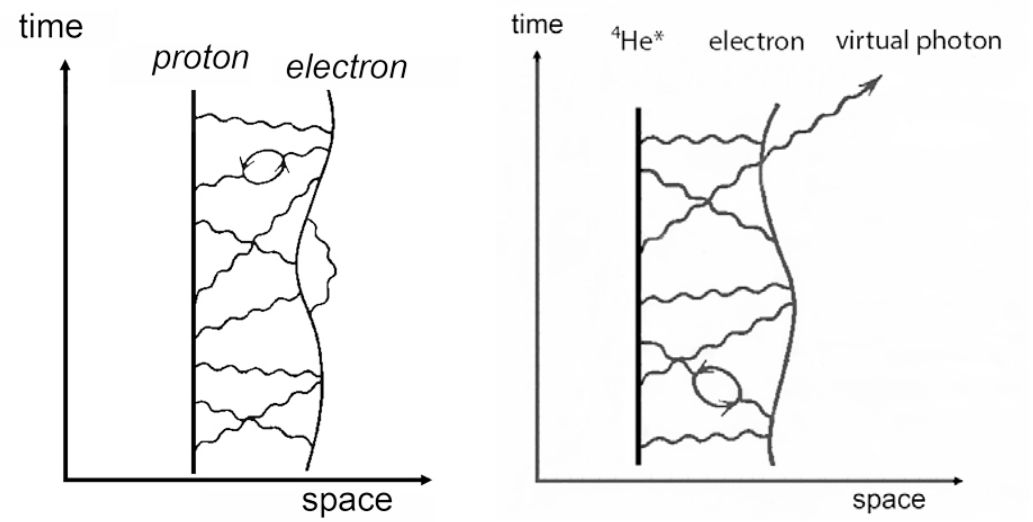


Рис. 15. На рисунке слева показана диаграмма процесса в изображении Фейнмана, описывающая стационарное состояние атома водорода. На рисунке справа представлены виртуальные фотоны возбужденного состояния ^{4}He* в процессе холодного DD-синтеза, как они *могли бы быть изображены Фейнманом.*

Рис. 16 иллюстрирует процесс передачи энергии электронов окружающей среде.

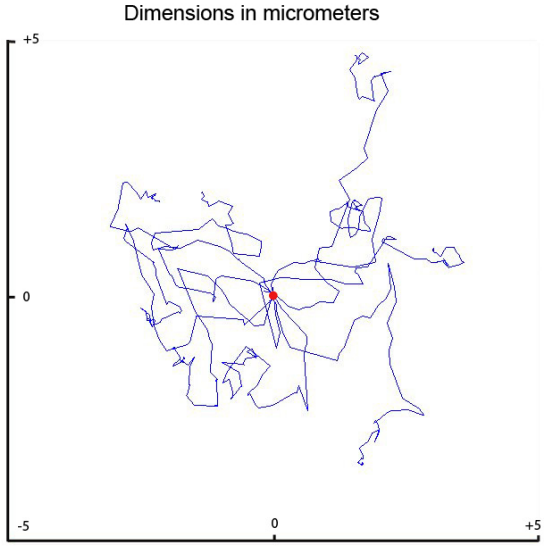


Рис. 16. Траектории первых 10 электронов, генерированых для описания процесса холодного DD-синтеза, в палладии с использованием Монте-Карло [16]. Размеры указаны в микронах.

Пространственное разделение двух дейтронов и промехуточном ядре 4He*, образованном в процессе холодного синтеза, должно быть достаточно большим для того, чтобы остаточное кулоновское отталкивание значительно задержало ядерный распад и позволило виртуальным фотонам обеспечить разряд $^4He^* \rightarrow {}^4He$. Это время определяется расстоянием между промежуточным ядром и ближайшими атомами кристаллической решетки.

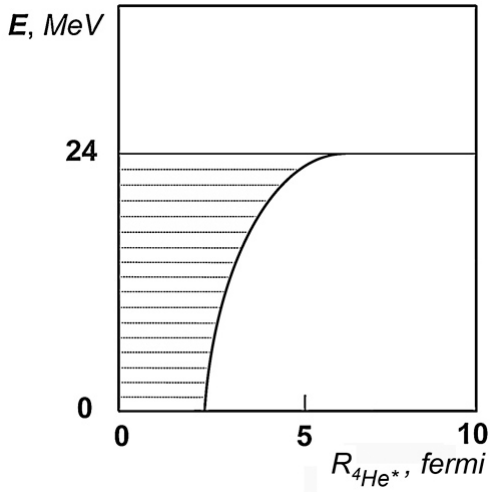


Рис. 17. На рисунке схематически изображены размеры промежуточного составного ядра $^4He^*$ в процессе высвечивания излишней энергии связи возбужденного ядра виртуальными фотонами. Масштаб этого графика по горизонтали весьма условный.

5. Постановка эксперимента

Калориметрический подход не позволяет понять в деталях конкретный механизм холодного DD-синтеза. Необходим эксперимент, который мог бы пролить свет на механизм передачи энергии DD-синтеза без ядерных распадов составной системы $^4He^*$. Предложения такого эксперимента были сформулированы нами в работе [16].

Как отмечалось выше, электроны проводимости и влияние решетки металлических кристаллов (подавление орбитали ***1s,*** возбуждение орбиталей ***2p*** и выше, а также пространственная ориентация этих орбиталей в кристаллической решетке) могут значительно изменить влияние потенциального кулоновского барьера. Эффективный радиус экранирования в данном случае может оказаться примерно на порядок меньше, чем для невозбужденных атомов.

Мы провели расчеты энергий эмиссии электронов с энергией 60 кэВ.

Ниже на Рис. 18 мы показываем геометрию эксперимента, который позволил бы получить дополнительную информации о процессе холодного DD-синтеза в кристаллах.

На предварительном этапе эксперимента планируется измерять суммарную энергию испускаемых электронов только с одной стороны кристалла палладия. Шестнадцать полупроводниковых кремниевых детекторов расположены с одной стороны кристалла палладия и включены на совпадения. Слева на Рис. 18 показан вид детектора сбоку, справа показано взаимное расположение детекторов.

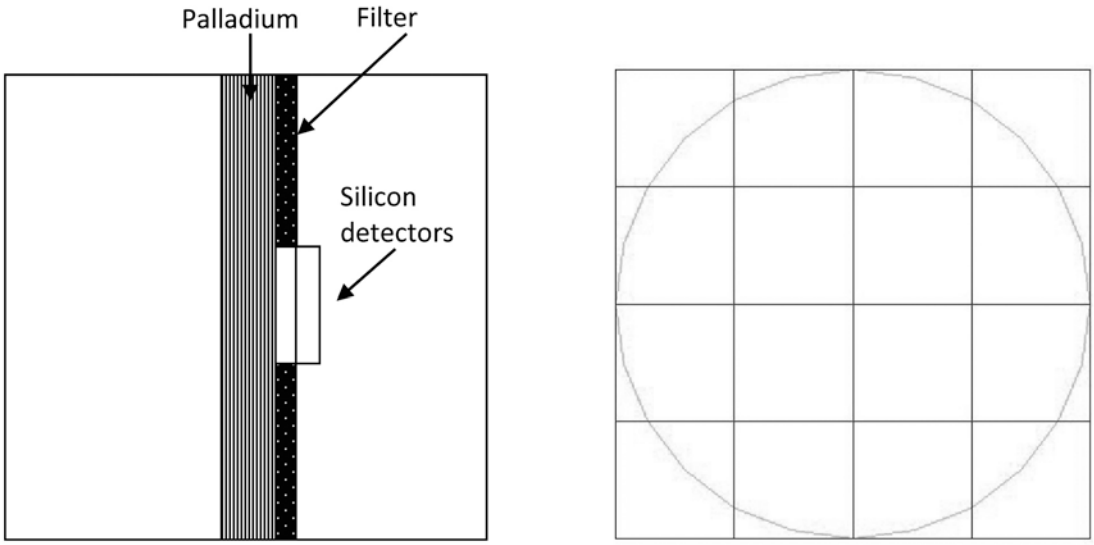


Рис.18. Односторонняя схема эксперимента. Несколько кремниевых полупроводниковых детекторов расположены с одной стороны палладия и заведены на совпадения. Слева показан вид детектора сбоку, на правой изображено взаимное расположение отверстия в фильтре и детекторов.

Общая задетектированная энергия рассчитывалась с использованием модели Монте-Карло (Geant4). Для детального низко-энергетического моделирования электромагнитных взаимодействий [26] мы использовали Livermore Physics model (G4EmLivermorePhysics) пакета GEANT4. Использовалась база данных и Livermore EPDL и EEDL.

Предполагалось, что, в результате синтеза, происходящего в течение относительно короткого времени (около 10^{-15} с), приблизительно 10^3 электронов попадают в детектор с энергией до 60 кэВ, при этом полная выделившаяся энергия равна 24 МэВ. Фольга палладия не является активным элементом; это означает, что часть энергии электронов в результате DD-синтеза исчезает из процесса измерения. Расчеты позволили оптимизировать толщину палладиевой фольги и геометрии детектора.

На Рис. 19 приведены результаты расчетов для одностороннего расположения детекторов и излучения электронов с энергией 60 кэВ. Отбор событий может быть сделан с помощью запуска от срабатывания на совпадения нескольких детекторов, расположенных с одной стороны от образца палладия.

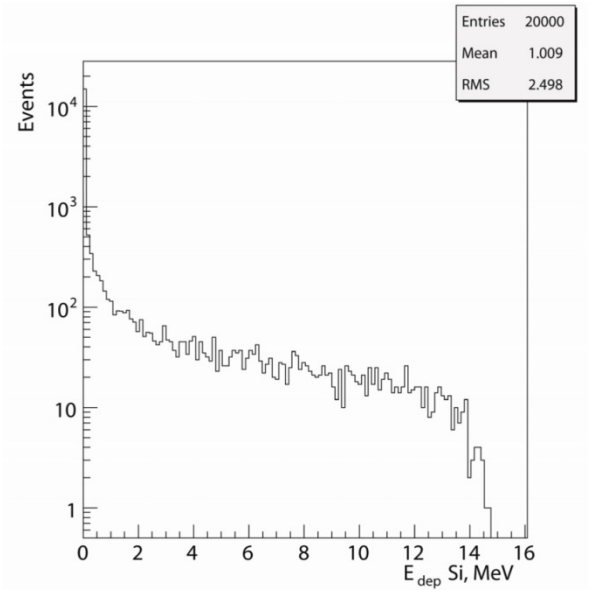


Рис. 19. Суммарная энергия испускаемых электронов с энергией до 60 кэВ в детекторах, расположенных с одной стороны палладия. Толщина палладиевой фольги была установлена равной 20 мкм. Около 75% событий Монте-Карло полностью поглощаются в образце палладия. Полученный спектр простирается примерно до 14 МэВ, из-за обратного рассеяния фракции электронов в палладии на углы до 180 градусов.

В случае, когда датчики расположены с одной стороны палладия, максимальная задетектированная энергия равна приблизительно половине энергии распада ^{4}He*. На наш взгляд, эти измерения могут послужить убедительным доказательством процесса передачи энергии возбуждения составного ядра ^{4}He* кристаллу-хозяину посредством *виртуальных фотонов.*

6. Обсуждение

Процесс адаптации научного сообщества к новым знаниям никогда не был легким. Нынешняя парадигма ядерной физики не поддерживает такие эффекты, как холодный синтез, хотя это явление не противоречит никаким фундаментальным законам природы. Все это усугубляется тем, что попытки найти решение управляемого термоядерного синтеза, которые проводились более чем полвека, зашли слишком далеко.

Наиболее продвинутой попыткой в этом направлении является международный проект ITER – Токамак. В настоящее время этот проект, находящийся в стадии строительства, имеет циклопические размеры и настолько же дорог. Реалисты оценивают, что строительство реактора и его возможный пуск могут быть завершены не ранее, чем в течение ближайших 35 – 50 лет. Этот проект рассматривается не более чем чисто исследовательский, и если сможет работать, то только в циклическом режиме. После его запуска должно начаться строительство еще более гигантской структуры – промышленного Токамака DEMO. Вырисовывается перспектива огромных финансовых и материальных затрат еще на полвека.

Глобальной топливной и нефтегазовой промышленностью эти проекты только приветствуются. Такое развитие событий может привести к изменению климата на нашей планете и к сопутствующим проблемам: сокращению глобальной численности населения и другим социальным катаклизмам.

Холодный синтез является реальной альтернативой этому трагическому сценарию. Мы верим, что в ближайшие годы произойдет общественное признание феномена холодного синтеза, и радикальные изменения произойдут в практических приложениях ядерных исследований.

Благодарности

Одит из авторов (Э.Ц.) благодарит доктора А.Г. Пархомова за дискуссии.

Литература

[1] M. Fleischmann, S. Pons and M. Hawkins, *J. Electroanal. Chem.* 201 (1989) 301.

[2] M.C.H. McKubre, F. Tanzella, P. Tripodi et al., in: F. Scaramuzzi (Ed.), *Proc. of the 8th Int. Conf. on Cold Fusion*, Lerici (LaSpezia), Italian Physical Society, Bologna, Italy, 2001, p. 3; M.C.H. McKubre, Condensed Matter Nuclear Science, in *Proc. of the 10th Int. Conf. on Cold Fusion*, P.L. Hagelstein and S.R. Chubb (Eds.), Cambridge, MA, USA, 21–29 August, 2003, World Scientific, Singapore, 2006. Michael C. H. McKubre and Francis L. Tanzella, Cold Fusion, LENR, CMNS, FPE: One Perspective on the State of the Science Based on Measurements Made at SRI, *J. Condensed Matter Nucl. Sci.* 4 (2011) 32–44.

[3] H.J. Assenbaum, K. Langanke and C. Rolfs, *Z. Phys. A – Atomic Nuclei* 327 (1987) 461–468.

[4] H. Yuki, T. Satoh, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki and J. Kasagi, D+D reaction in metal at bombarding energies below 5 keV, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 23 (1997) 1459–1464.

[5] J. Kasagi, H. Yuki, T. Itoh, N. Kasajima, T. Ohtsuki and A. G. Lipson*, Anomalously enhanced d(d,p)t reaction in Pd and PdO observed at very low bombarding energies, *the Seventh Int. Conf. on Cold Fusion*, Vancouver, Canada, ENECO Inc., Salt Lake City, UT, 1998, p. 180.

[6] H. Yuki, J. Kasagi, A.G. Lipson, T. Ohtsuki, T. Baba, T. Noda, B.F. Lyakhov and N. Asami, Anomalous enhancement of DD reaction in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under a low energy deuteron bombardment, *JETP Let.* 68(11) (1998) 10 December.

[7] J. Kasagi, H. Yuki, T. Baba and T. Noda, Low energy nuclear fusion reactions in solids, *8th Int. Conf. on Cold Fusion*, 2000, Lerici (La Spezia), Italy: Italian Physical Society, Bologna, Italy.

[8] A.G. Lipson, G.H. Miley, A.S. Roussetski, and A.B. Karabut, Strong enhancement of dd-reaction . . . , *ICCF-10*, 2003.

[9] C. Rolfs, Enhanced electron screening in metals: a plasma of the poor man, *Nucl. Phys. News* 16 (2) (2006).

[10] F. Raiola, (for the LUNA Collaboration), B. Burchard, Z. Fulop et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 31 (2005) 114.

[11] F. Raiola, (for the LUNA Collaboration), B. Burchard, Z. Fulop et al., *Eur. Phys. J. A* 27 (2006) 79.

[12] A. Huke, K. Czerski, P. Heide, G. Ruprecht, N. Targosz and W. Zebrowski, *Phys. Rev. C* 78 (2008) 015803.

[13] K. Czerski, A. Huke, P. Heide et al., *J. Phys. G* 35 (2008) 014012.

[14] E.N. Tsyganov, Preprint LNF–11/03 (P), April 6, 2011.

[15] E.N. Tsyganov, *Yadernaya Fizika* 75(2) (2012) 174–180 (in Russian); E.N. Tsyganov, *Phys. Atomic Nuclei* 75(2) (2012) 153–159.

[16] E.N. Tsyganov, V. M. Golovatyuk, S. P. Lobastov, M. D. Bavizhev, S. B. Dabagov. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2013. vol. 309, p. 95–104.

[17] E.N. Tsyganov, M.D. Bavizhev, V.M. Golovatyuk, S.B. Dabagov and S.P. Lobastov, *Eng. Phys.* 9 (2013) 3–17 (in Russian).

[18] E.N. Tsyganov, *Eng. Phys.* No. 6 (2014) 6–13.

[19] Encyclopædia Britannica, 2013.

[20] M.J. Winter, Department of Chemistry, The University Sheffield S3 7HF, UK, http://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/

[21] C.H. Michael McKubre et al., *J. Condensed Matter Nucl. Sci.* 4 (2011) 32–44.

[22] C.H. Michael McKubre et al., *J. Condensed Matter Nucl. Sci.* 8 (2012) 187.

[23] Tutorial http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hydwf.html

[24] Y. Arata and Y. Zhang, The establishment of solid nuclear fusion reactor, *J. High Temp. Soc.* 34(2) (2008) 85.

[25] M. Verner, G., M. Swartz and P. Hagelstein, Summary report: ‘Introduction to Cold Fusion’–IAP course at the Massachusetts Institute of Technology, *Current Sci.* 108(4) (2015) 653, http://www.currentscience.ac.in/Volumes/108/04/0653.pdf

[26] Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces. Joint International Conference on Super-computing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA and MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17–21, 2010; G4EmLivermorePhysics Package.