“Есть многое на свете, друг Горацио,
что и не снилось нашим мудрецам”
Шекспир

Э.Н. Цыганов

Cold Fusion Power, International

OSNovation Systems, Inc., Santa Clara, CA

ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Конференция Российско-Американского Научного Общества (RASA)

8-10 ноября 2013, Clearwater Beach, Fl

Заглянуть за горизонт...

Фламмарион, 1888, по мотивам 16-го столетия

Юлиан Швингер

Попытался “заглянуть за горизонт...”

“The pressure for conformity is enormous. I have experienced it in editors’ rejection of submitted papers, based on venomous criticism of anonymous referees. The replacement of impartial reviewing by censorship will be the death of science”.

Statement made while resigning from the American Physical Society

“Физика – наука экспериментальная”
Ричард Фейнман

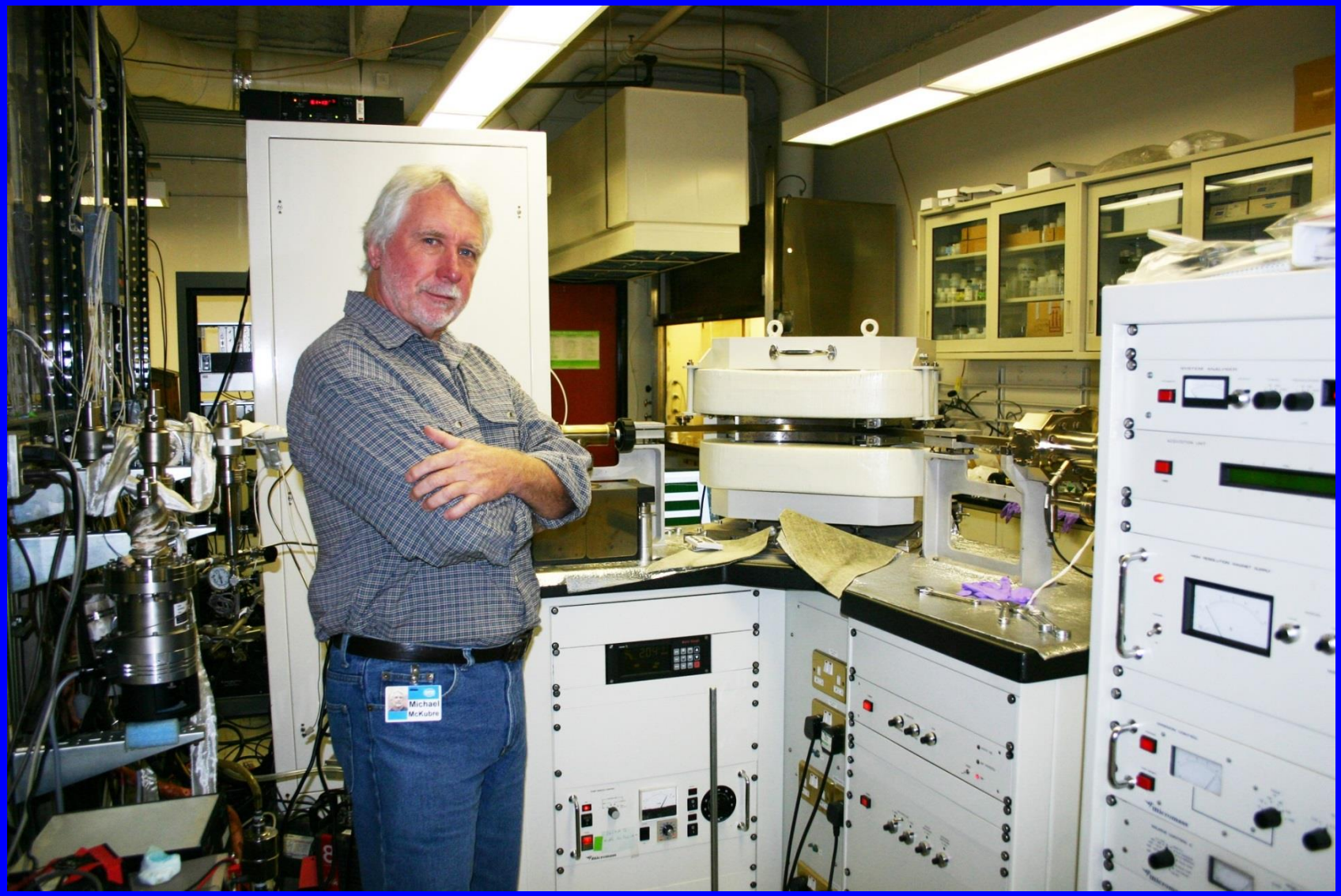
В настоящее время человечество подошло к такой стадии развития, когда борьба за энергетические ресурсы становится особенно актуальной. Все известные источники энергии уже в ближайшее время не смогут обеспечить наши потребности. Химическая энергия ограничена также так называемым парниковым эффектом. Ядерная энергия, основанная на использовании делящихся материалов, не является долгосрочным 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.

Термин “холодный ядерный синтез” описывает ряд процессов при сравнительно низкой температуре, приводящих к выделению тепла за счет слияния двух ядер. В нормальных условиях такие процессы запрещены кулоновским барьером, который препятствует сближению ядер. Однако, около 25 лет тому назад Флейшманом и Понсом были выполнены эксперименты, показавшие возможность “холодного” синтеза, если ядерные реагенты имплантированы в металлические кристаллы.

Быстро отвергнутые большинством ученых как невоспроизводимые, эти эксперименты постепенно стали давать повторяющиеся результаты. Классическим примером стали опыты, выполненные доктором Мак-Кубре и его коллегами в Стенфордском Международном Исследовательском Институте. Результаты этих экспериментов еще раз продемонстрировали выделение тепла нехимического происхождения, при этом эффект выходит за пределы 100 экспериментальных ошибок.

Доктор Мак-Кубре в своей лаборатории



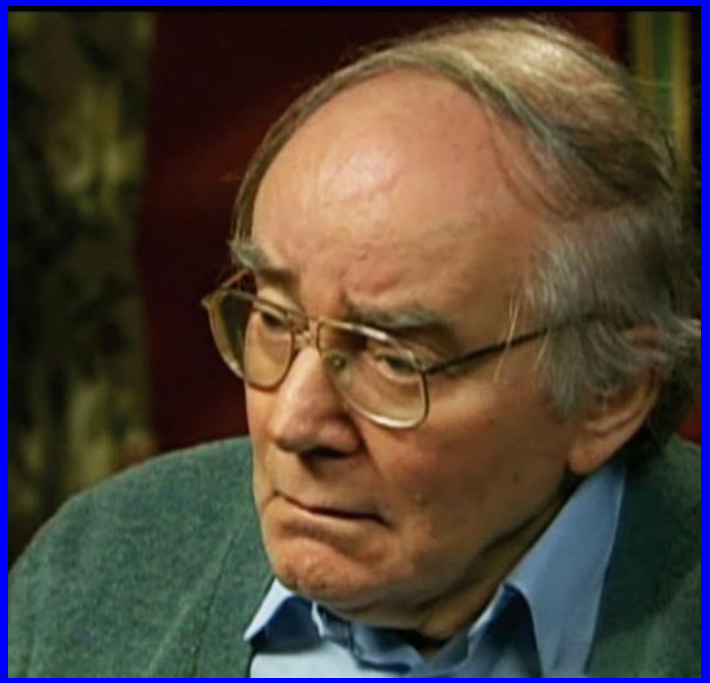
История холодного синтеза “в пробирке”

1. Мартин Флейшман 1989 – 2012
2. Микаэл Мак-Кубре 1992 – сегодня
3. Йошиаки Арата 1998 – 2008
4. Хагельстайн и Шварц (MIT) 1992 – сегодня

Около 20 – 30 групп работают в США, Западной Европе, России, Японии, Китае.

За последние несколько месяцев выдано 4 первых патента по холодному синтезу (США, Европа, Китай)

История холодного синтеза – основные участники



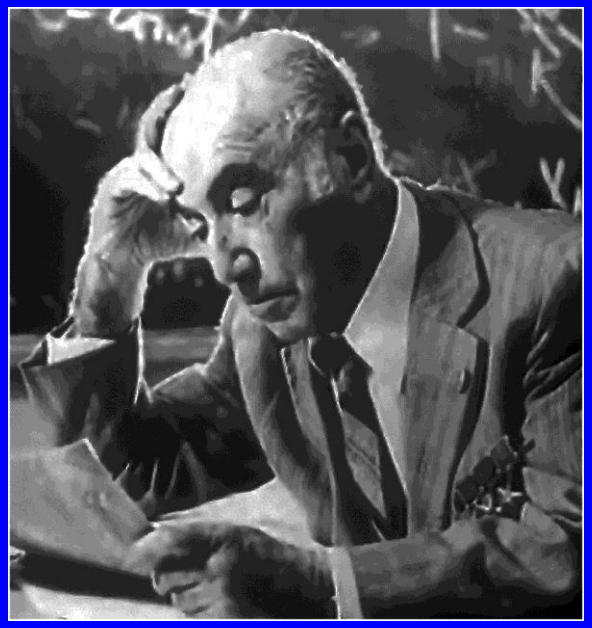
Мартин Флейшман (1927–2012)
D+D в палладии
1989

Микаэл Мак-Кубре
D+D в палладии
1992 – по настоящее время

Йошиаки Арата
D+D в палладии (ZrO_2)
1998-2008

Подтверждение идеи холодного синтеза неожиданно пришло из экспериментов на ускорителях.

Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн, УФН т. LXXI, вып. 4, 1960 г., с. 581. Рассмотрение пьезо-синтеза.



Я.Б. Зельдович

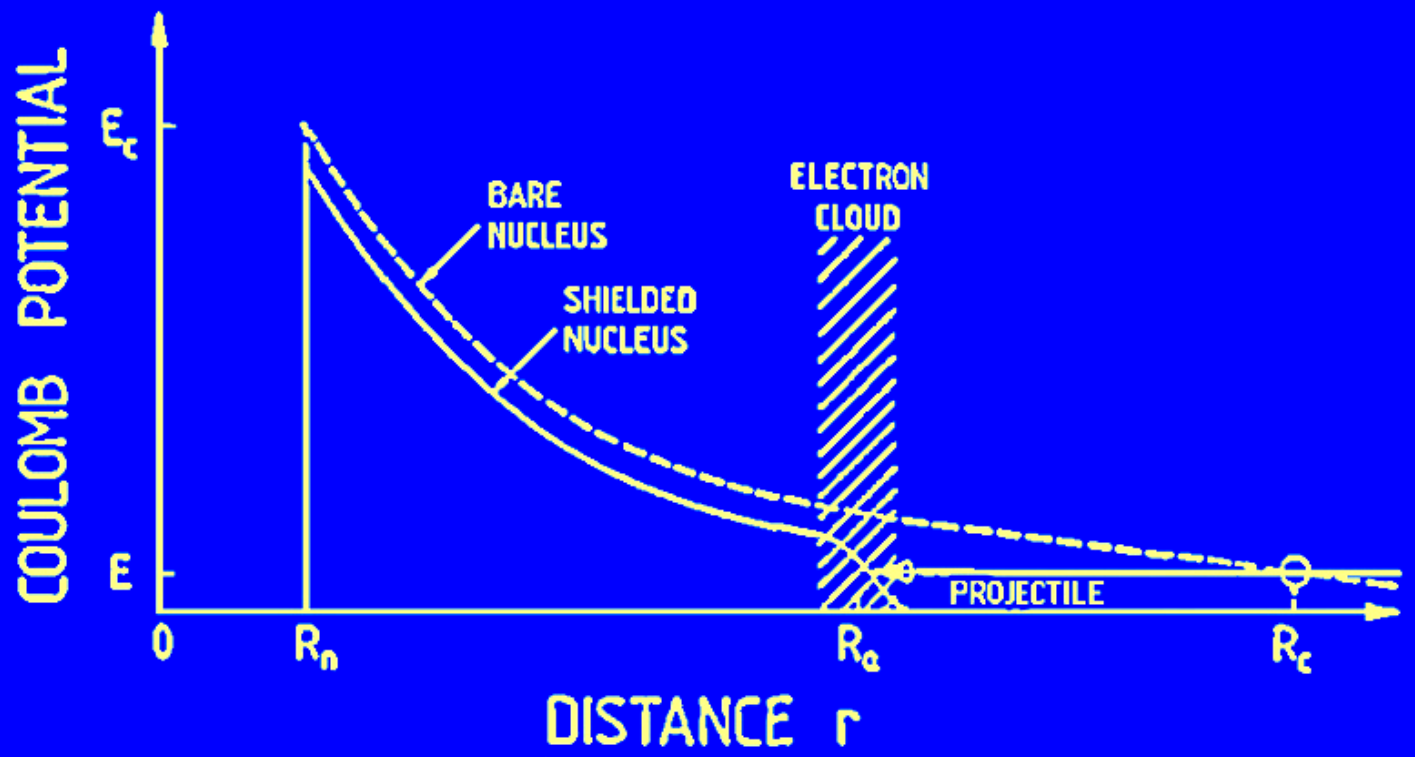
С.С. Герштейн

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

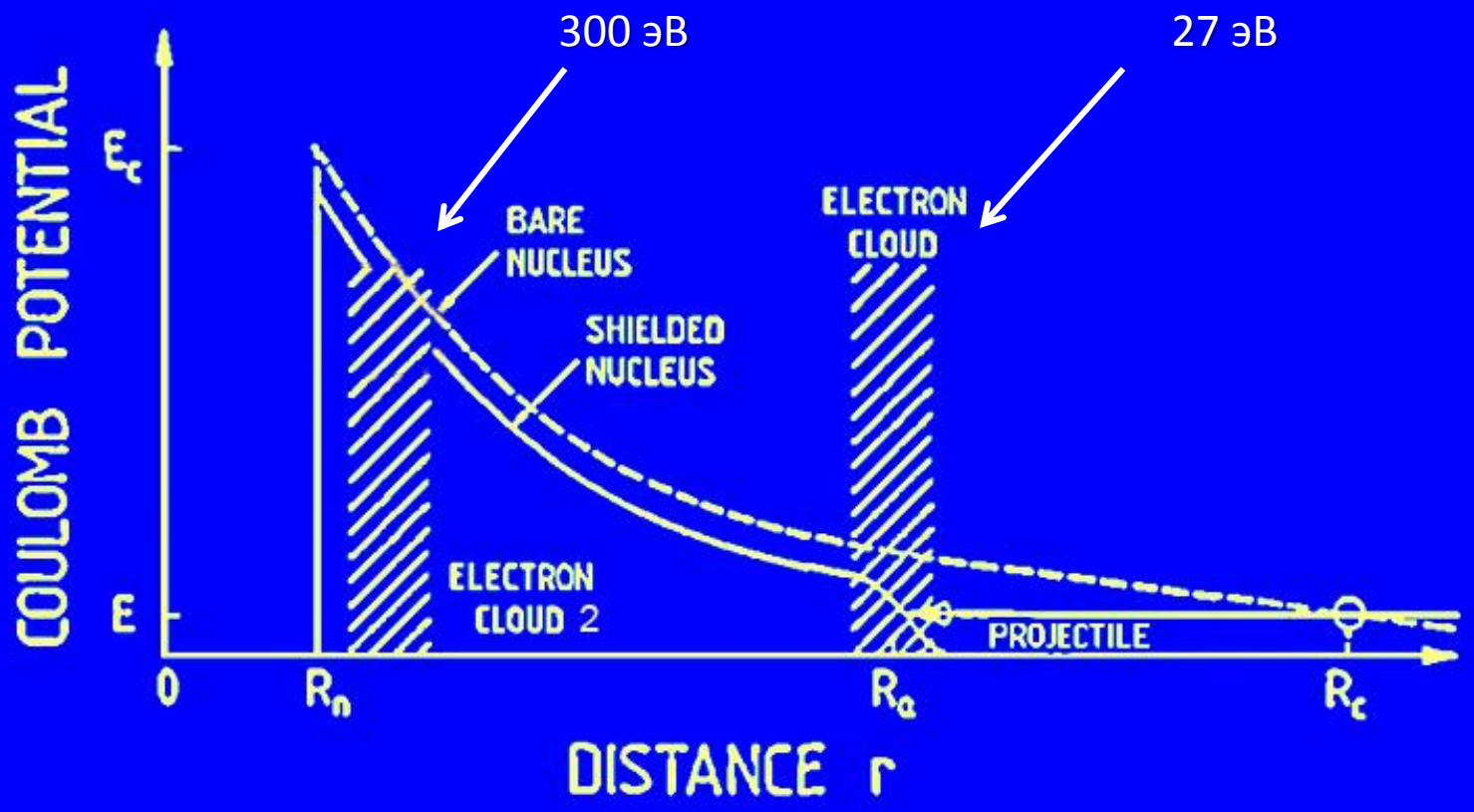
Давления, необходимые для достижения эффекта пьезо-синтеза оказались чрезвычайно высокими.

В квантово-механическом рассмотрении процесса синтеза экранирующий потенциал электронов U_e эквивалентен добавочной энергии (H.J. Assenbaum, K. Langanke and C. Rolfs, 1987). “The penetration through a shielded Coulomb barrier at projectile energy E is equivalent to that of bare nuclei at energy $E_{eff} = E + U_e$”.

На рисунке, взятом из работы Ассенбаума, схематически изображено столкновение налетающего ядра дейтерия с атомом дейтерия. При столкновении двух свободных атомов дейтерия эта добавочная энергия составляет 27 эВ.



Экранирующий потенциал характеризует расстояние, до которого сближающиеся атомы не испытывают кулоновского отталкивания.



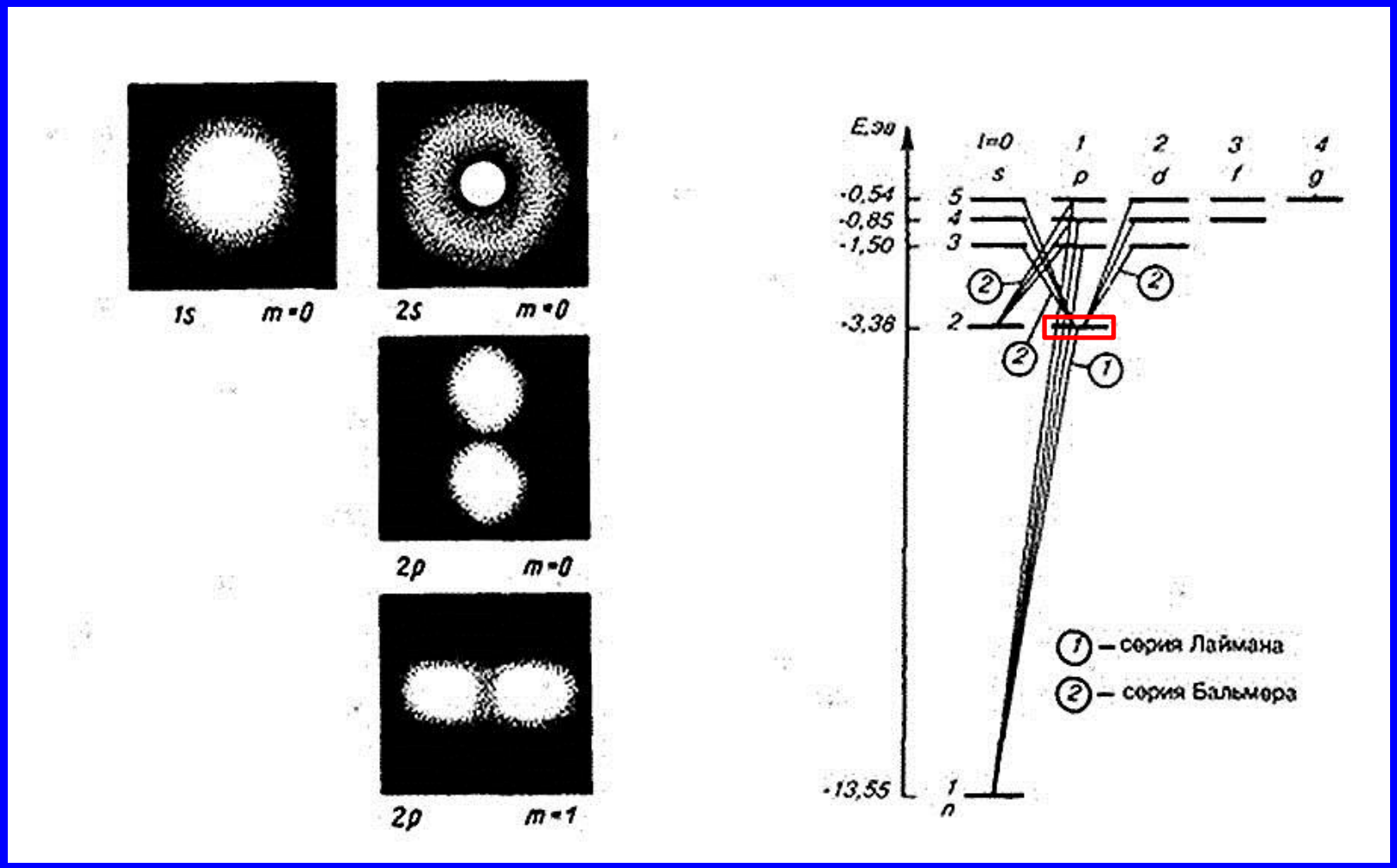
Основной секрет процесса холодного синтеза - преодоление кулоновского барьера - в конце концов оказался на удивление простым. Это впервые было замечено профессором Bressani в 1998 году на конференции ICCF-7 на основании серии японских экспериментов на ускорителях, выполняемых начиная с 1995 года. Bressani довольно четко изложил пути к объяснению холодного синтеза. К сожалению, сообщество холодного синтеза не последовало призыву Bressani.

Сегодня, 16 лет спустя, мы знаем, что атомы дейтерия, имплантированные в металлы, не находятся более в основном состоянии. Облако свободных электронов в металле вынуждает электрон имплантированного атома занять возбужденное *p*-состояние. Это позволяет двум ядрам дейтерия разместиться в одной потенциальной нише кристаллической ячейки на очень близком расстоянии друг от друга.

Эксперименты на ускорителях показали, что величина экранирующего потенциала примесных атомов в металлических кристаллах достигает 300 эВ и более. Это означает, что в DD реакции, происходящей в среде металлического кристалла, примесные атомы дейтерия возбуждены и имеют не круговые, а эллиптические электронные орбиты, ориентированные друг относительно друга определенным кристаллографическим образом. В этом случае ядра этих атомов могут сближаться на расстояние, существенно меньшее чем размер атома, без кулоновского отталкивания.

Подобные процессы известны в науке и являются причиной химического катализа. Иоханнес Ридберг впервые количественно описал эти процессы в 1888 г.

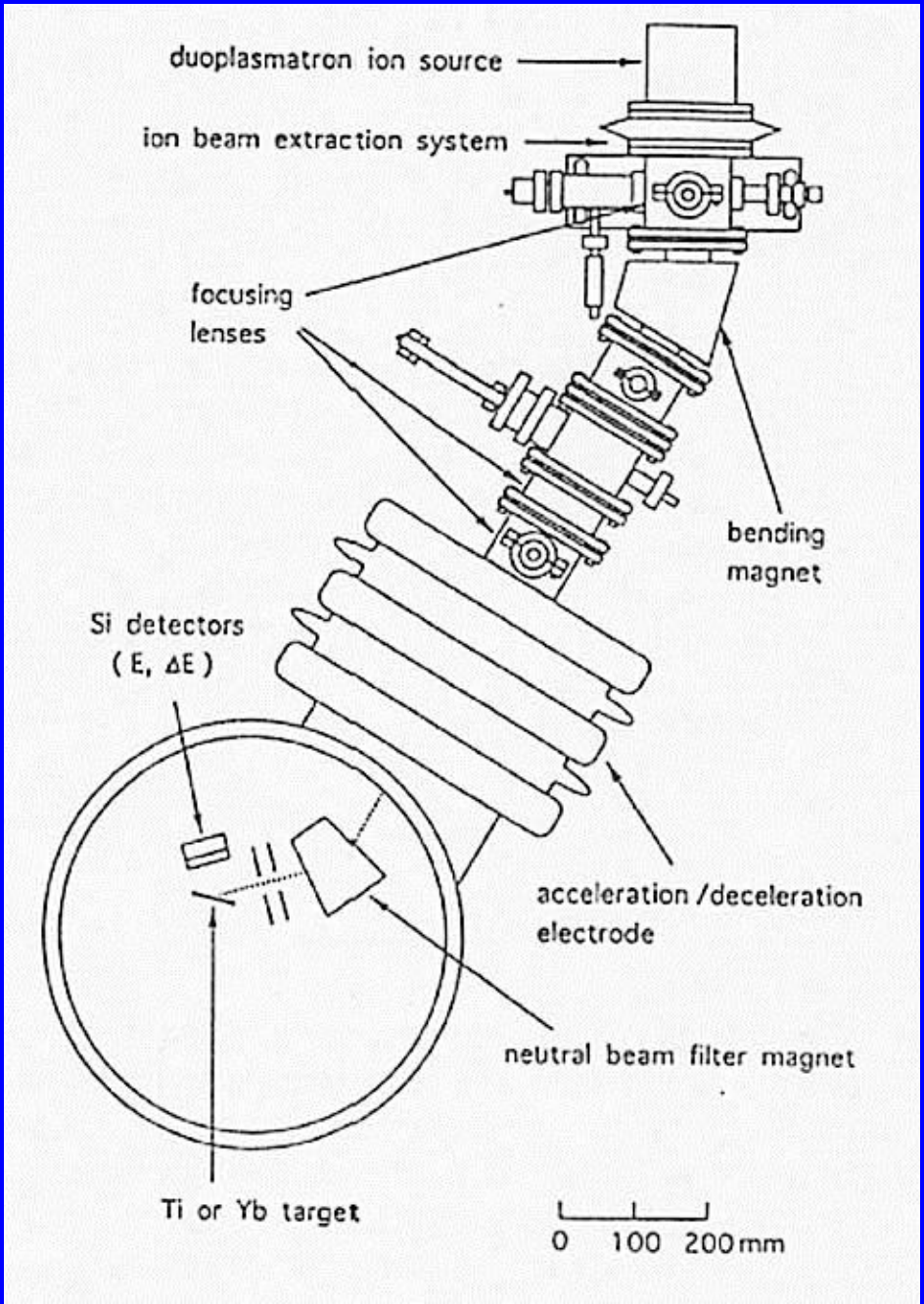
Механизм Ридберга для атома водорода. Орбита электрона в *2p*-состоянии более не является круговой.



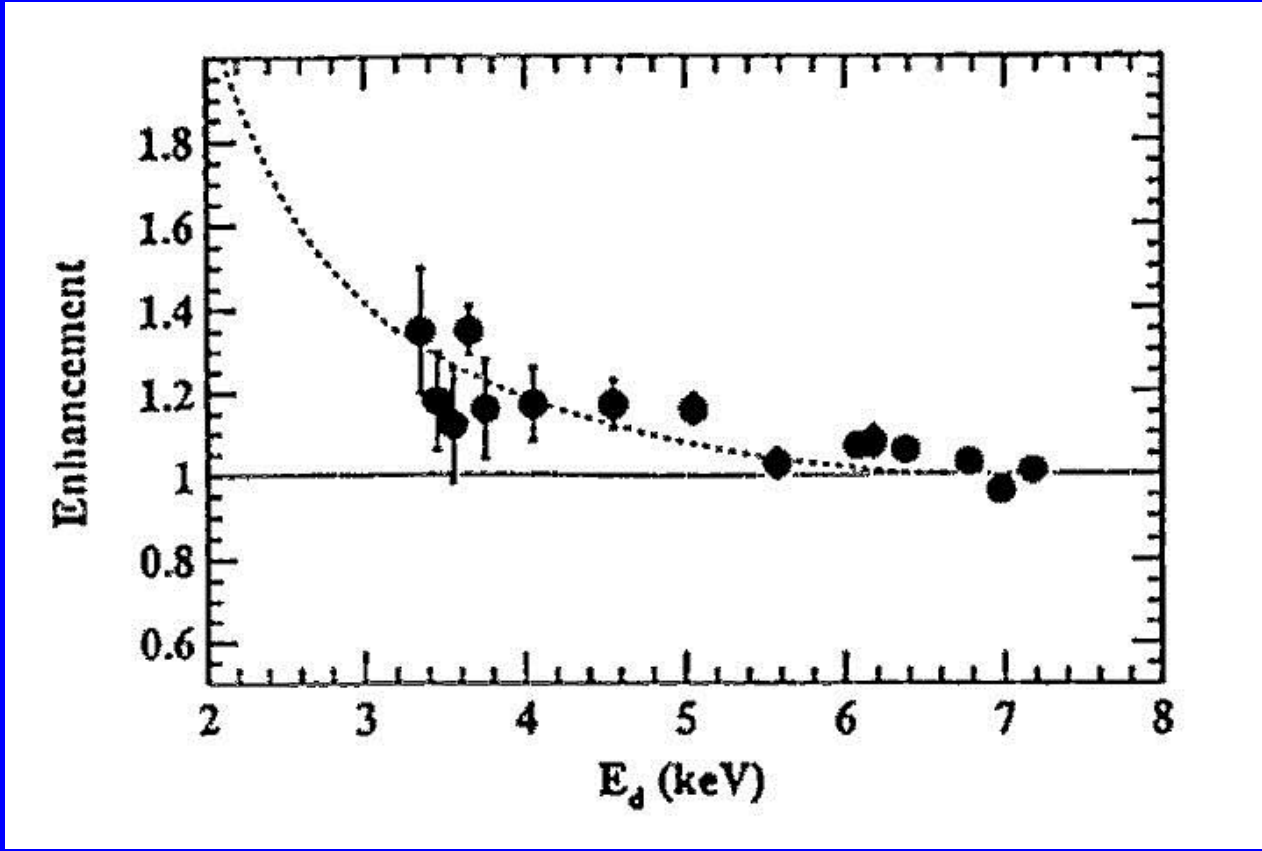
Один из первых DD экспериментов на ускорителе.

H. Yuki, T. Satoh, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki, J. Kasagi

ICCF-6 October 13-18, 1996 Japan



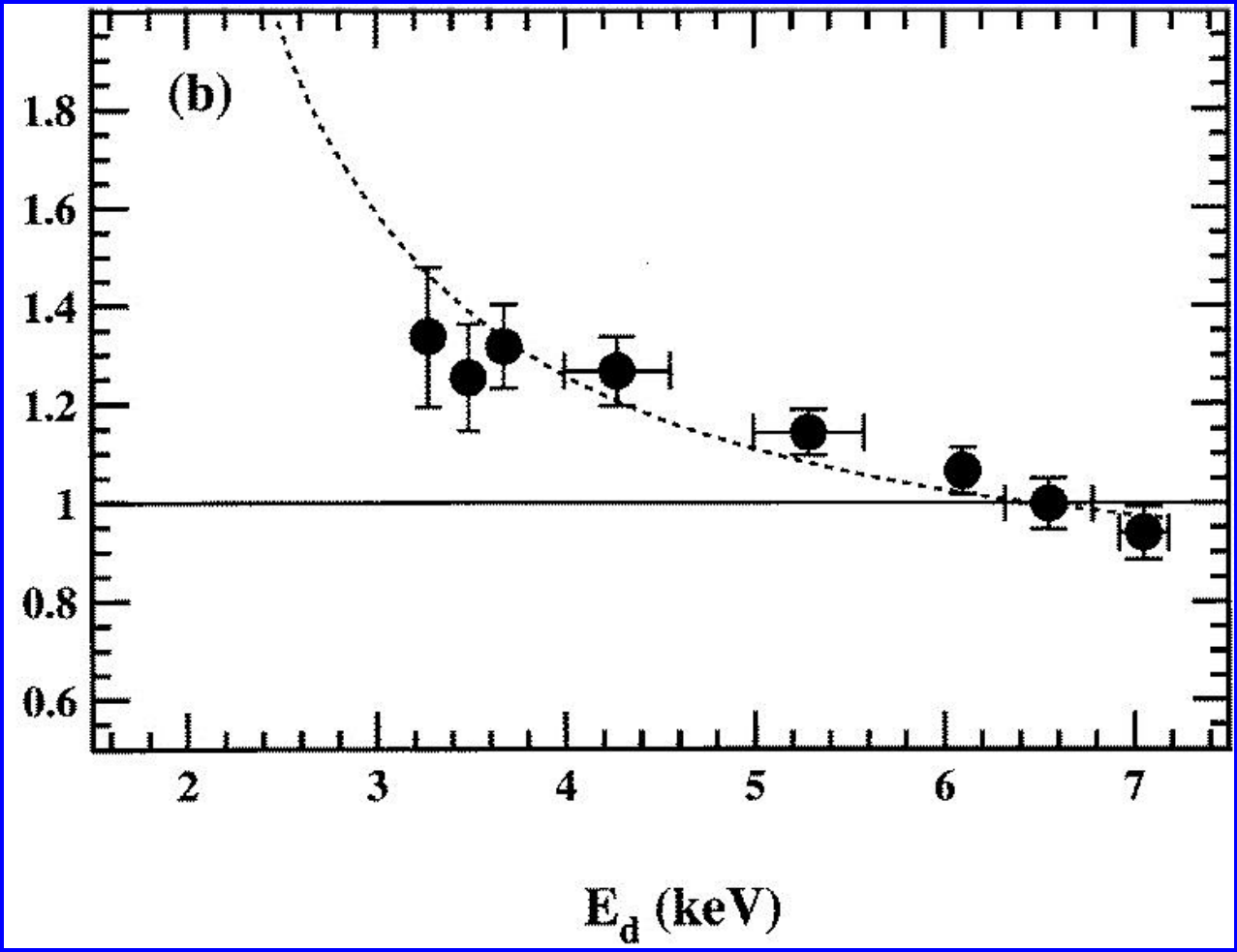
H. Yuki, T. Satoh, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki, J. Kasagi ICCF-6 October 13-18, 1996 Japan. Это одна из самых ранних работ по электронному экранированию в металлах.



Отношение выхода реакции D(d,p)T в толстой мишени к его расчетному значению в иттербии (Yb). Пунктирная линия показывает расчеты со значением электронного экранирующего потенциала 60 эВ.

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" в журнале J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 23 (1997) 1459–1464.

Увеличение сечения в иттербии (редкоземельный элемент с металлической электропроводностью) – электронное экранирование равно 81±10 eV.

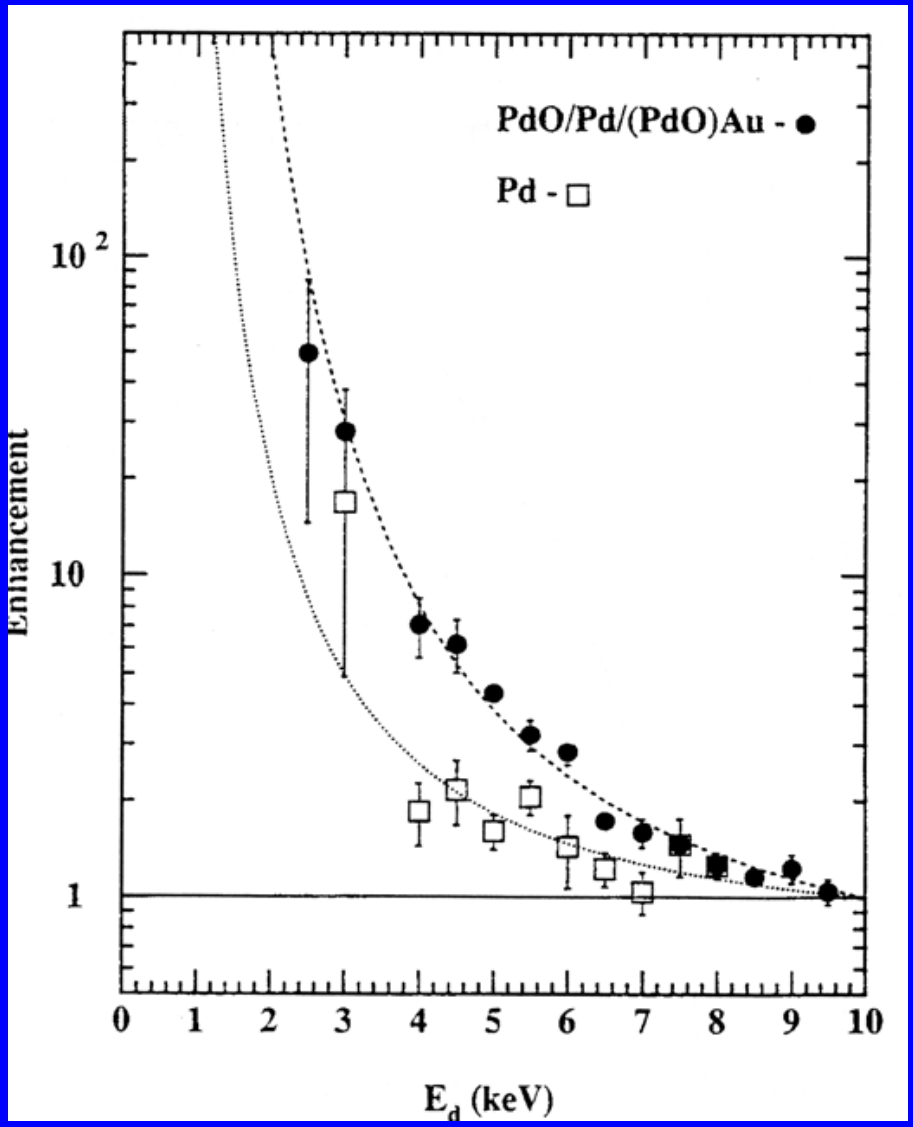


The Seventh International Conference on Cold Fusion. 1998. Vancouver, Canada:, ENECO, Inc., Salt Lake City, UT. : p. 180.

"Anomalously enhanced d(d,p)t reaction in Pd and PdO observed at very low bombarding energies"

J. Kasagi, H. Yuki, T. Itoh, N. Kasajima, T. Ohtsuki and A. G. Lipson *

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Japan
* Institute of Physical Chemistry, The Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



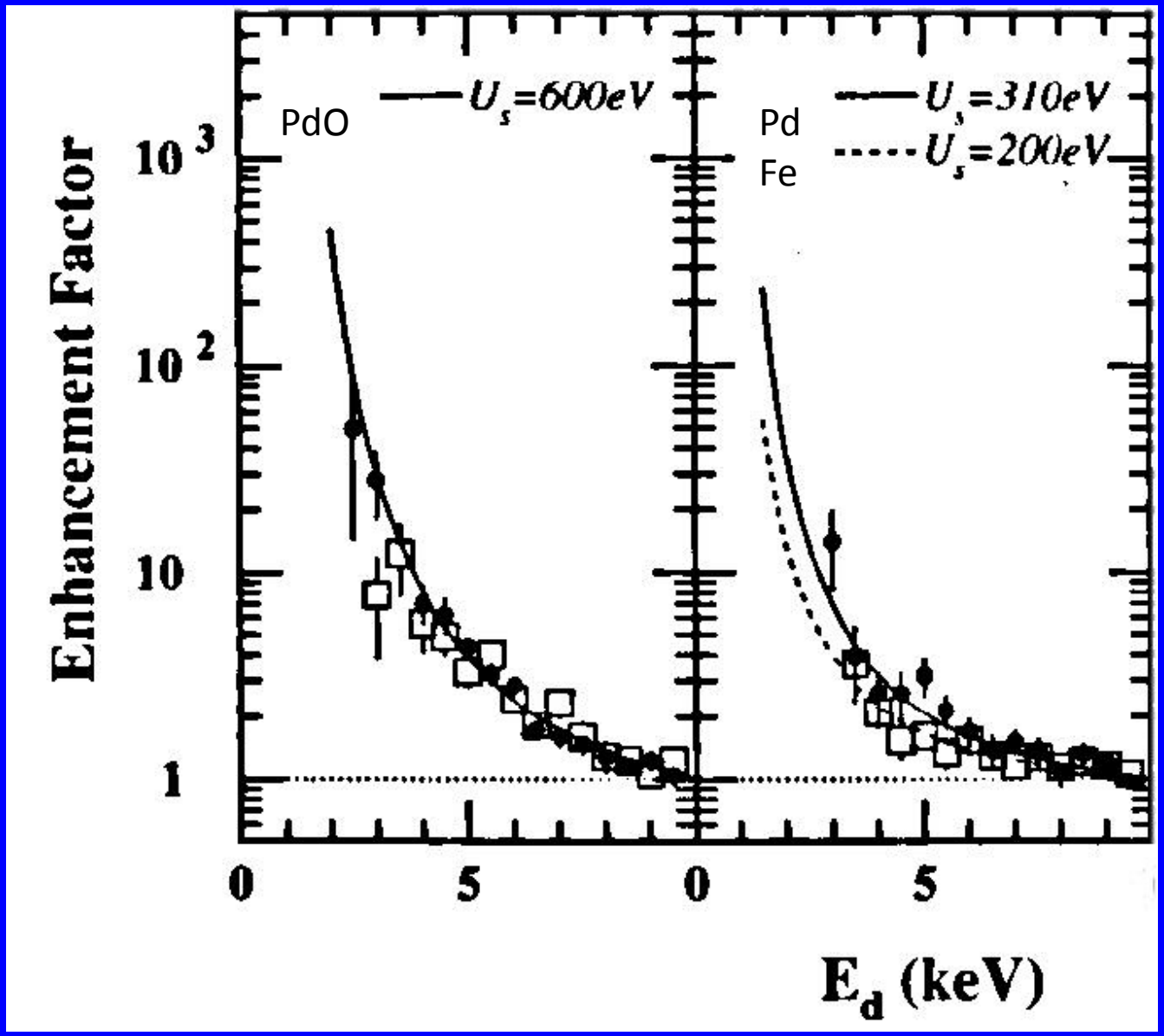
The dotted and dashed curves are those with the screening potential Ue = 250 and 600 eV, respectively.

Один из последних (2002) японских DD экспериментов на ускорителе

Jirohta Kasagi, Hideyuki Yuki, Taiji Baba, Takashi Noda, Tsutomu Ohtsuki and Andrey G. Lipson

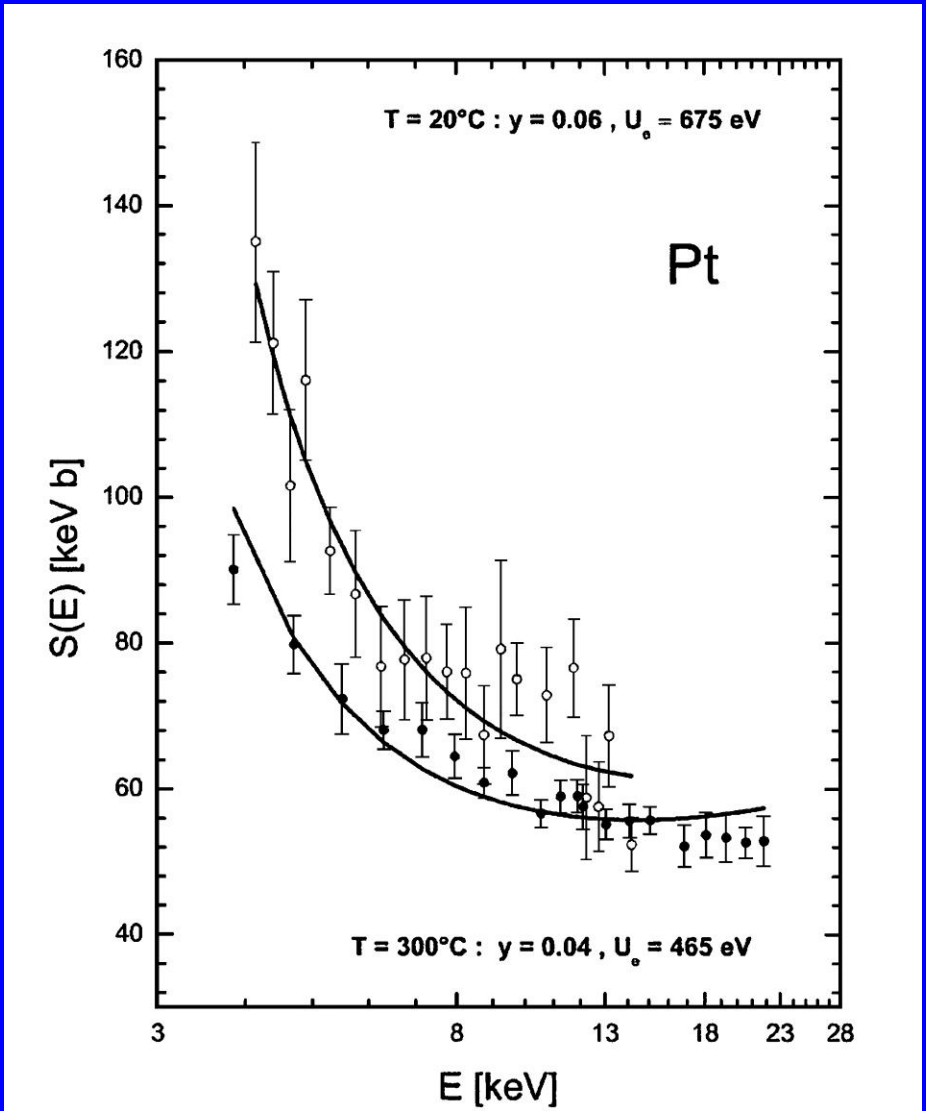
"Strongly Enhanced DD Fusion Reaction in Metals Observed for keV D^+ Bombardment"

Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 71, No. 12, December, 2002, pp. 2881-2885.

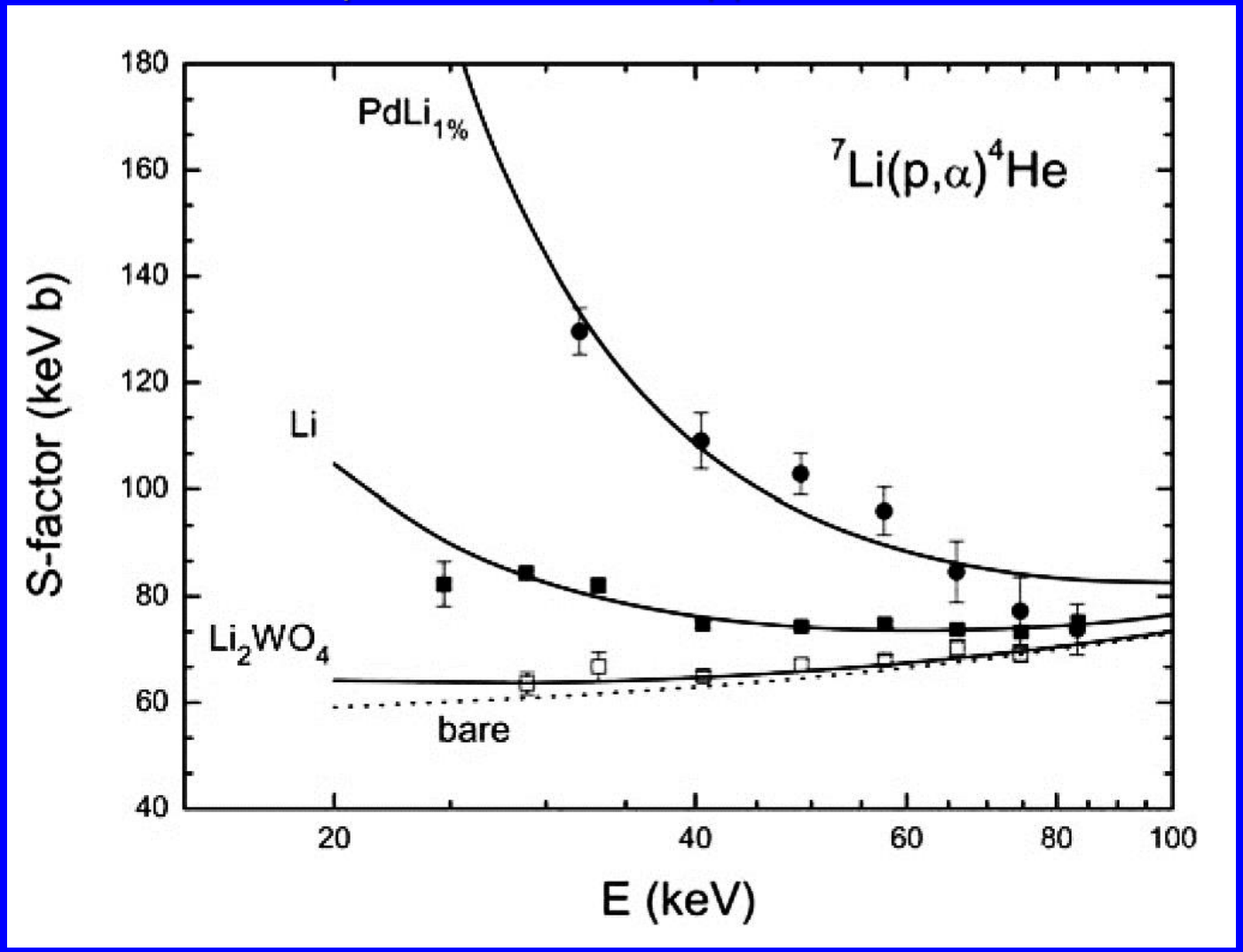


C. Rolfs et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31, 2005, pp 1141–1149. (Gran Sasso)

S(E) для DD-синтеза, мишень имплантирована в платину, U_e = 675 eV

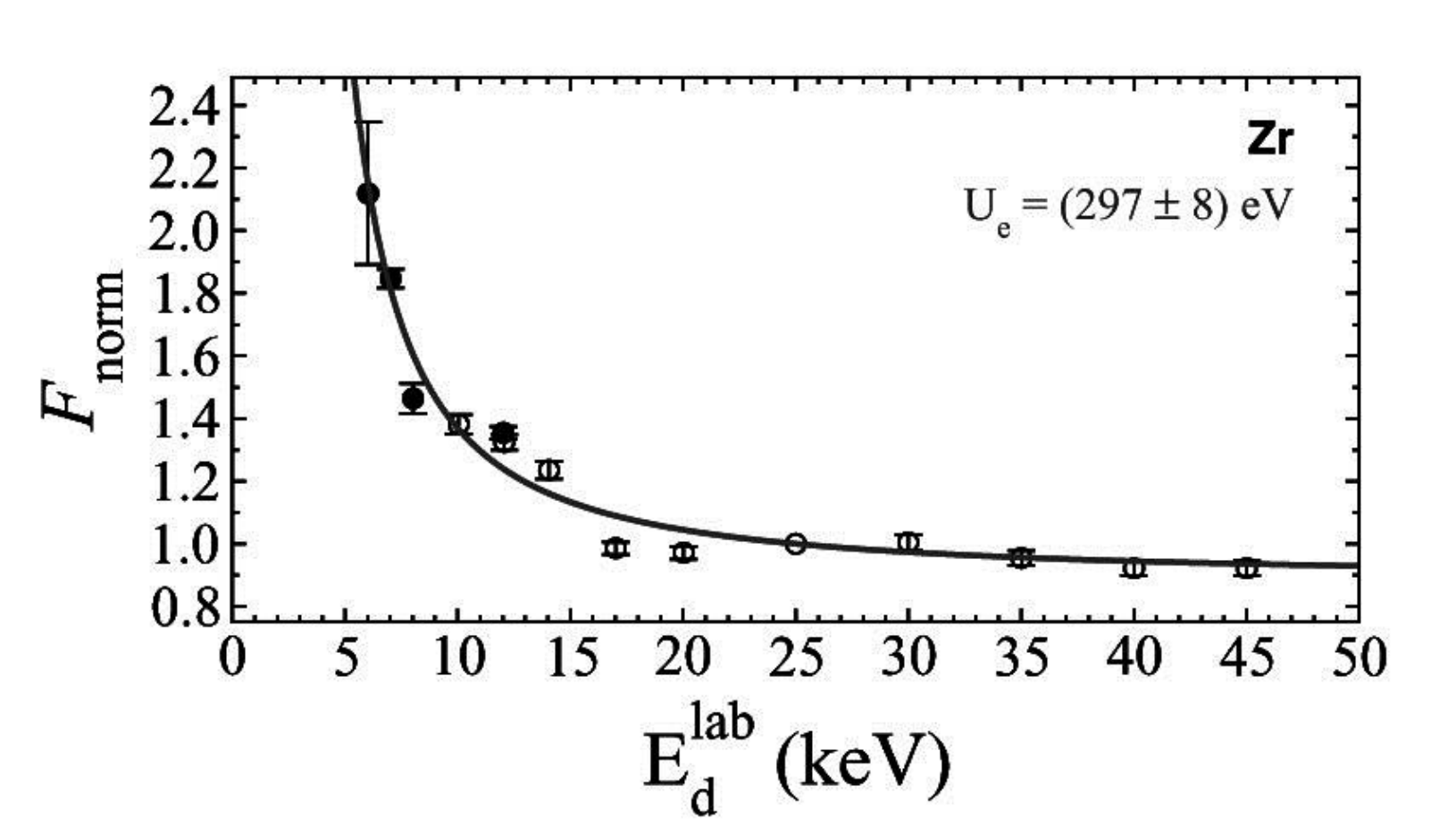


Claus Rolfs, Vol. 16, No. 2, 2006, Nuclear Physics News, p. 9. Нормированный астрофизический фактор *S(E)* для синтеза $p+^7Li$ в случае, когда мишень ^7Li имплантирована в палладий.



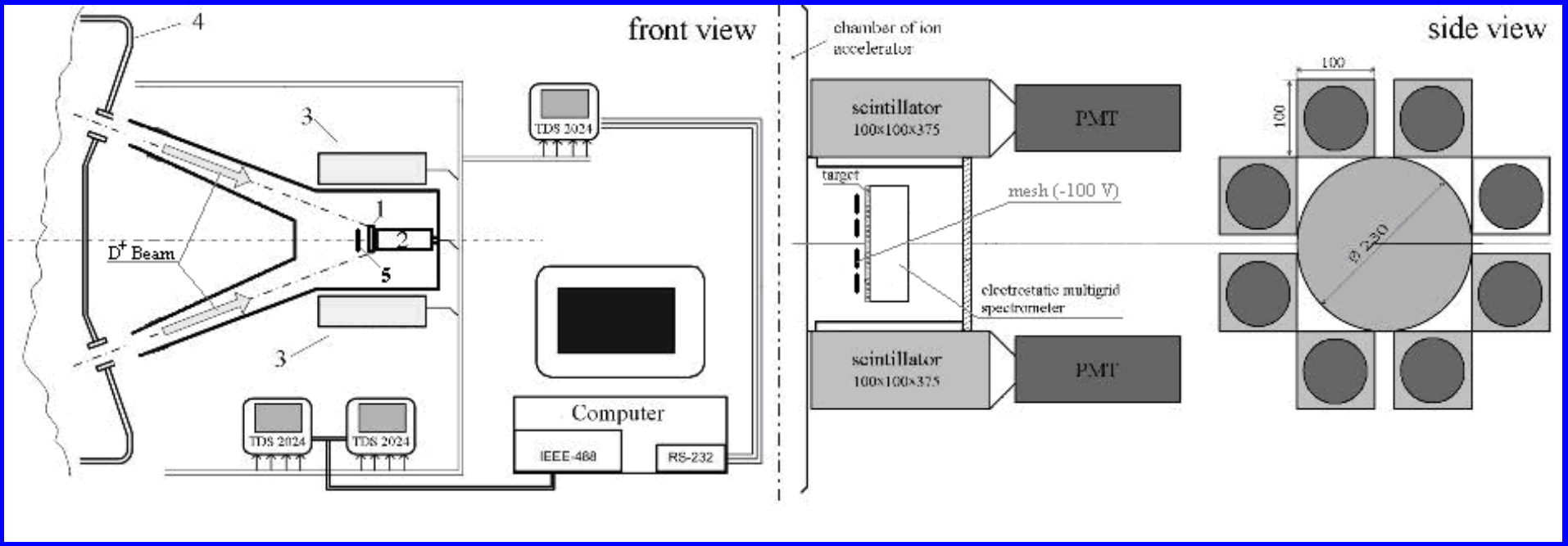
K. Czerski et al., Physical Review C 78, 015803, 2008 (Берлин)

Нормированный астрофизический фактор *S(E)* для DD-синтеза в случае, когда мишень имплантирована в цирконий. Потенциал экранирования приблизительно в 10 раз больше, чем для свободных атомов дейтерия. Что это может означать?



V. M. Bystritsky, Vit. M. Bystritskii, G. N. Dudkin, M. Filipowicz, S. Gazi, J. Huran, A. P. Kobzev, G. A. Mesyats, B. A. Nechaev, V. N. Padalko, S. S. Parzhitskii, F. M. Pen'kov, A. V. Philippov, V. L. Kaminskii, Yu. Zh. Tuleushev, J. Wozniak

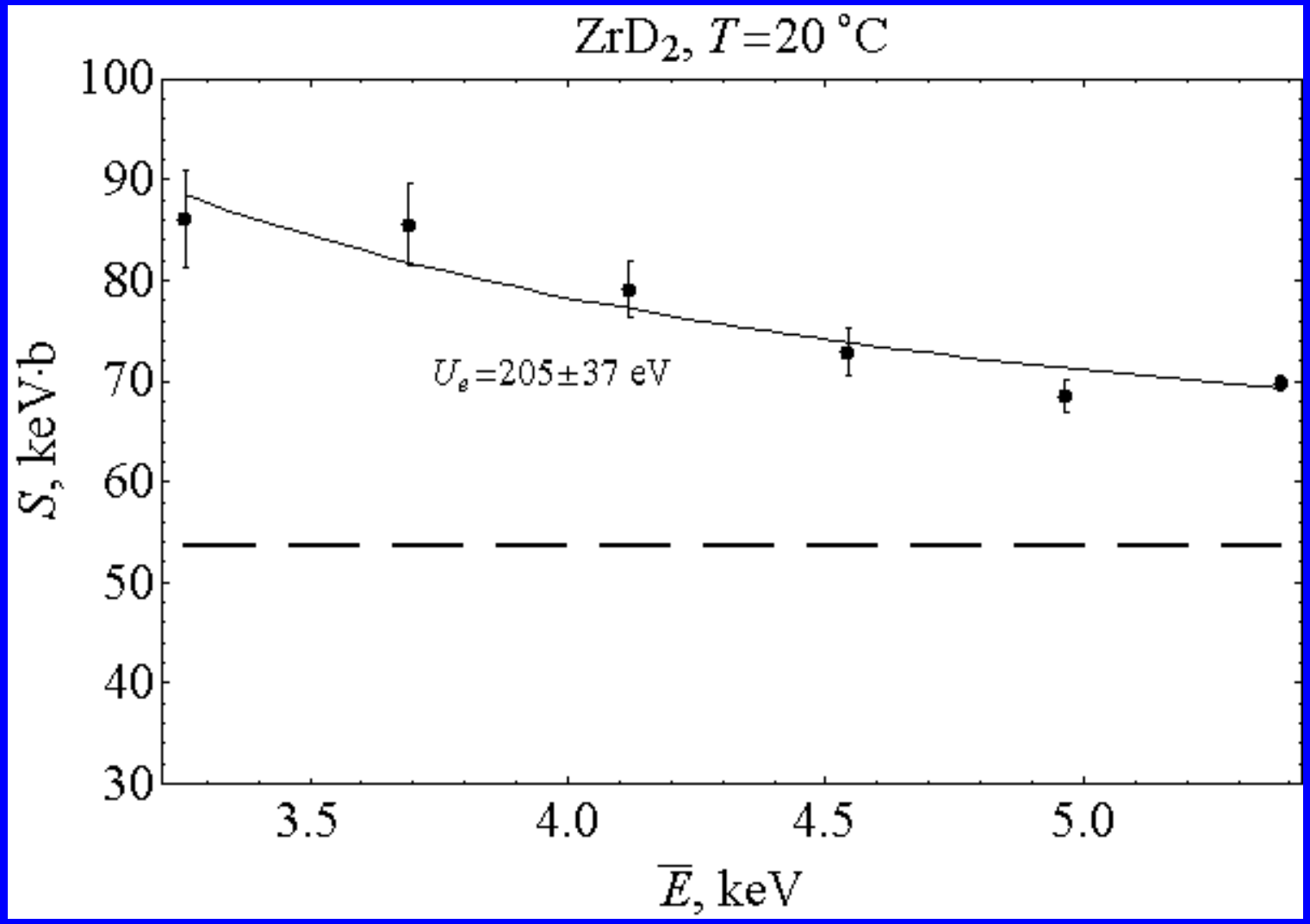
National Scientific Research - Tomsk Polytechnical University, Russia, Nuclear Physics, 2013 (in press)



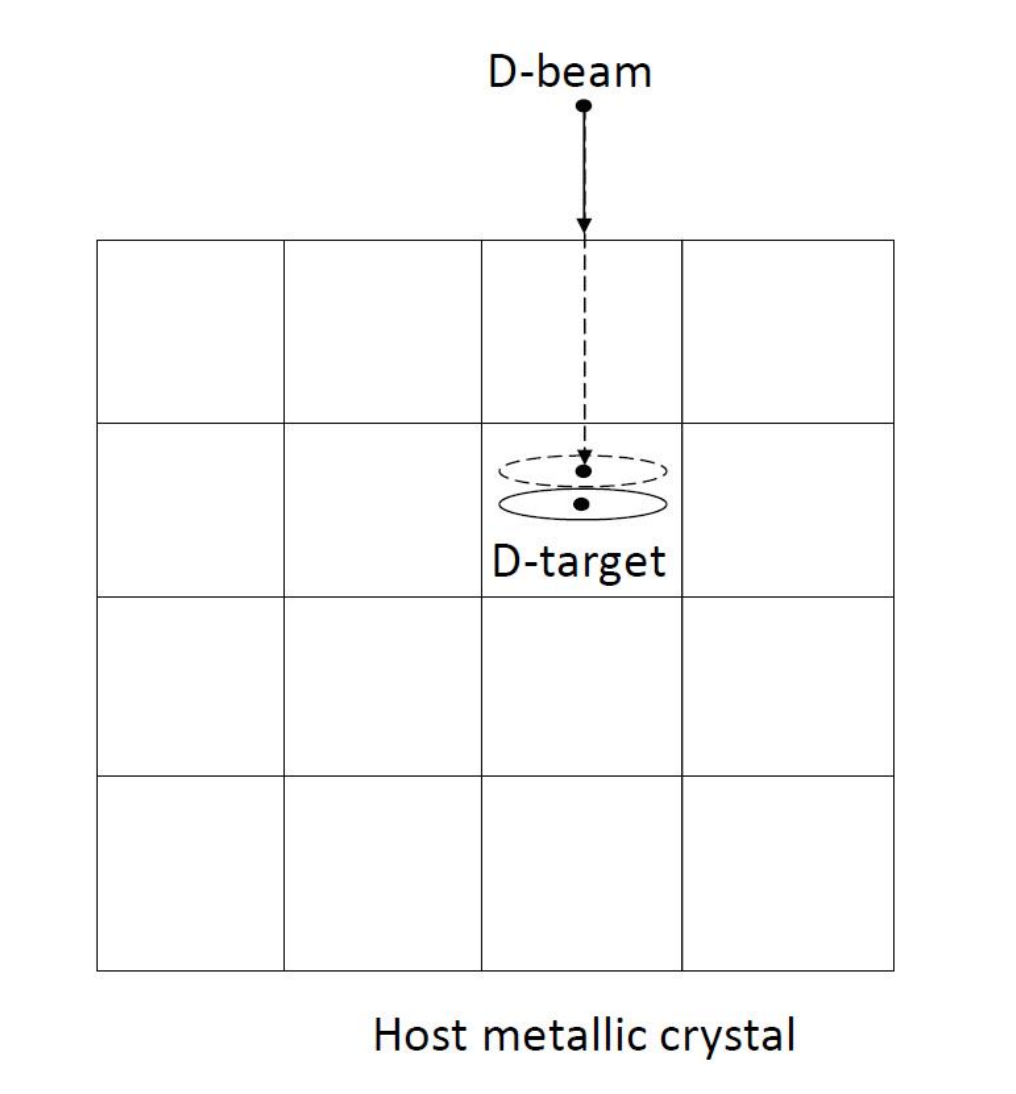
V. M. Bystritsky et al,

National Scientific Research - Tomsk Polytechnical University, Russia,

Nuclear Physics, 2013 (in press)



Эксперименты на ускорителях



Итак, расстояние сближения двух примесных ядер дейтерия, попавших в одну и ту же кристаллическую нишу металла, оказывается на порядок величины меньше, чем размер свободного атома дейтерия.

Хотя законченная интерпретация этого явления пока отсутствует, многочисленные эксперименты на ускорителях не оставляют никакого сомнения в его существовании. Проницаемость кулоновского барьера в таких условиях в процессе DD-синтеза очень сильно (на 50-60 порядков) возрастает по сравнению с проницаемостью барьера в случае свободной молекулы дейтерия.

Сечение синтеза при столкновении двух ядер дейтерия:

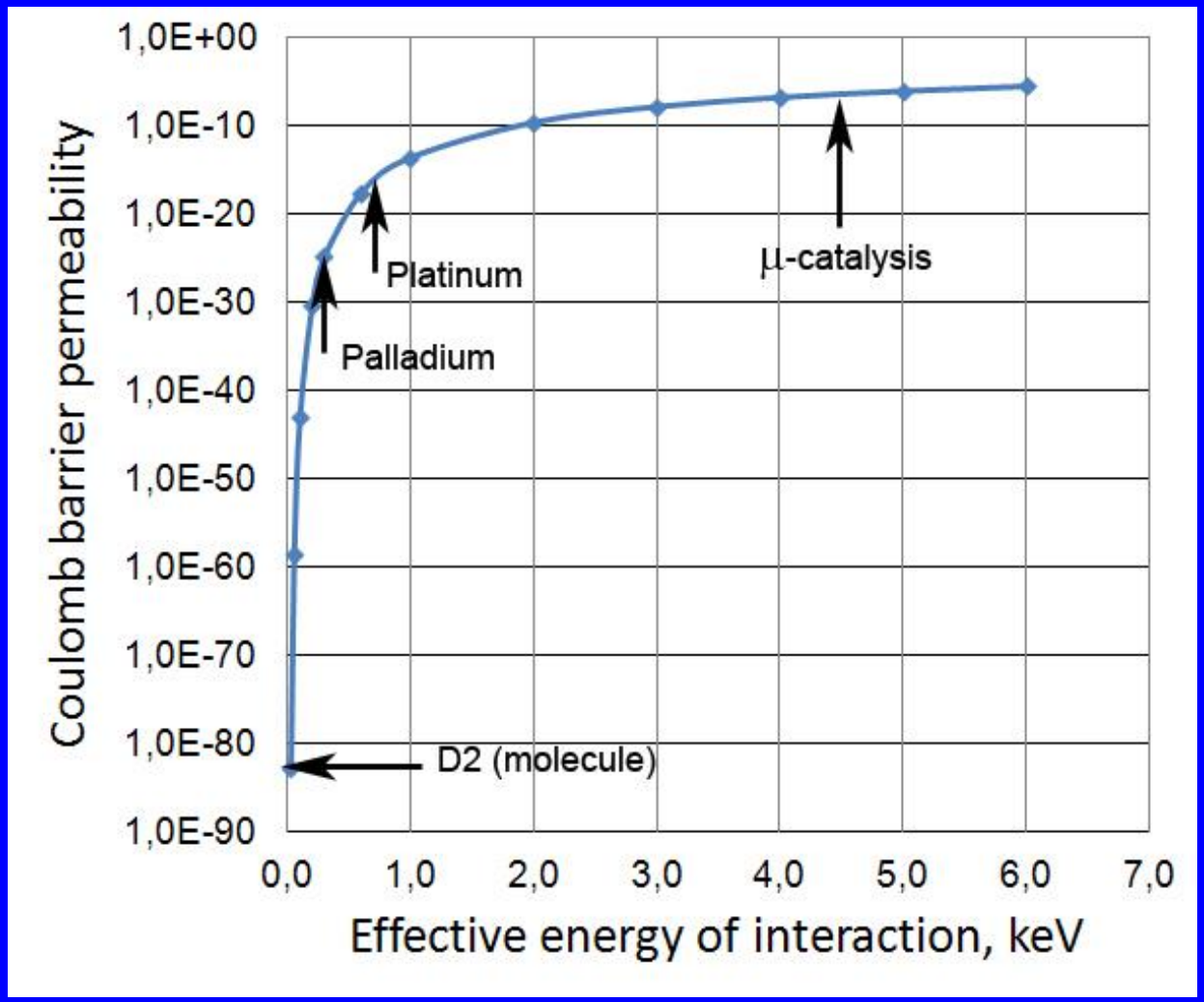
$$\sigma(E) = S(E)\, E^{-1} \exp(-2\pi\eta(E))$$

$$2\pi\eta = 31.4/E^{1/2}$$

Здесь кинетическая энергия дейтронов E приведена в системе центра масс в кэВ. $S(E)$ - астрофизический фактор, который в области малых энергий можно считать постоянной величиной. Основная зависимость сечения синтеза от энергии содержится в выражении $\exp(-2\pi\eta(E))$, которое определяет вероятность проникновения дейтрона через кулоновский барьер при однократном столкновении. В случае столкновения атомов энергию E нужно заменить на $E_{eff} = E + U_e$, где $U_e = e^2/R_a$. Как мы уже отмечали, для невозбужденного атома водорода $U_e = 27$ эВ.

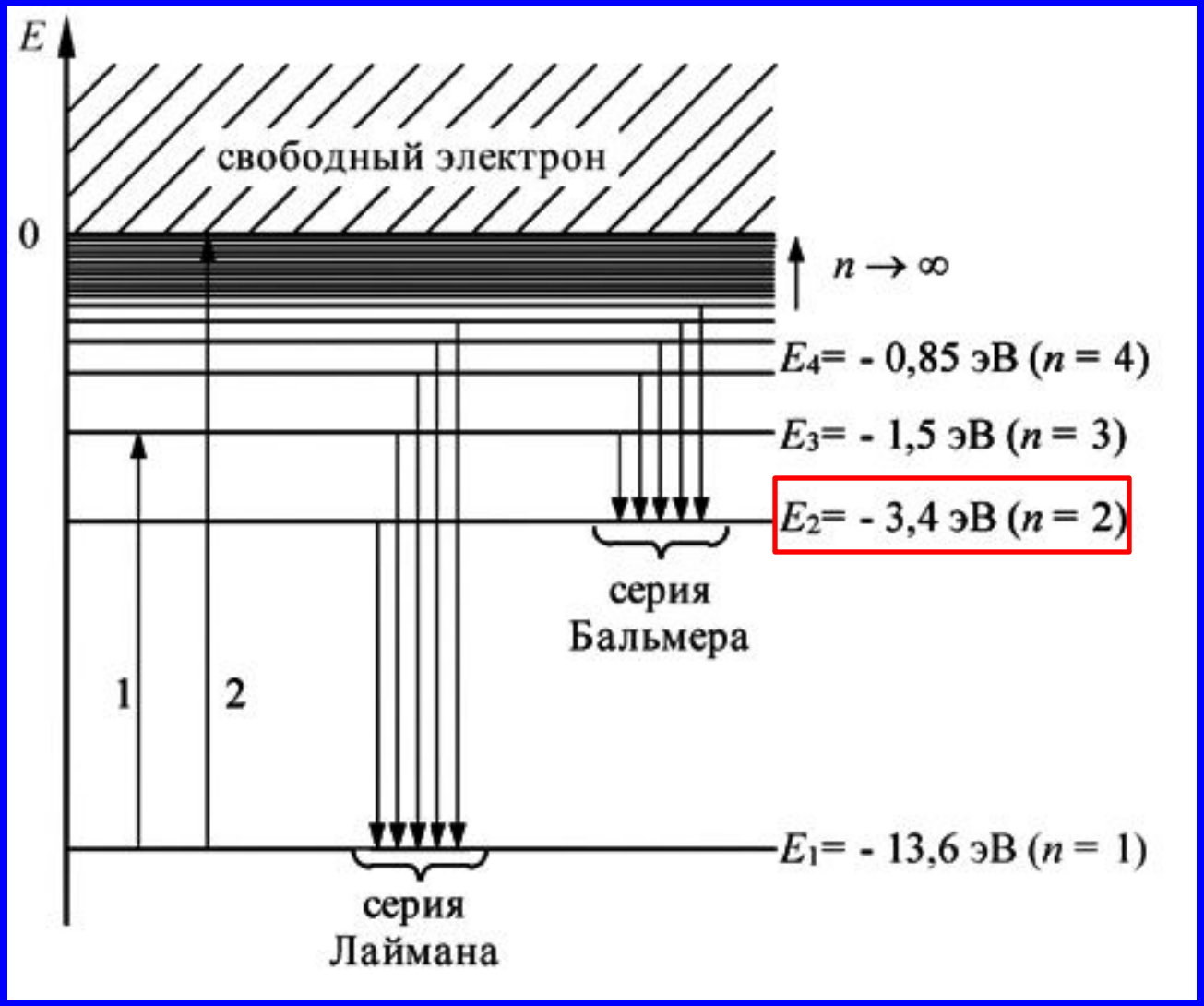
Проницаемость кулоновского барьера для DD синтеза

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



Для холодного синтеза $E \cong 0.040$ эВ

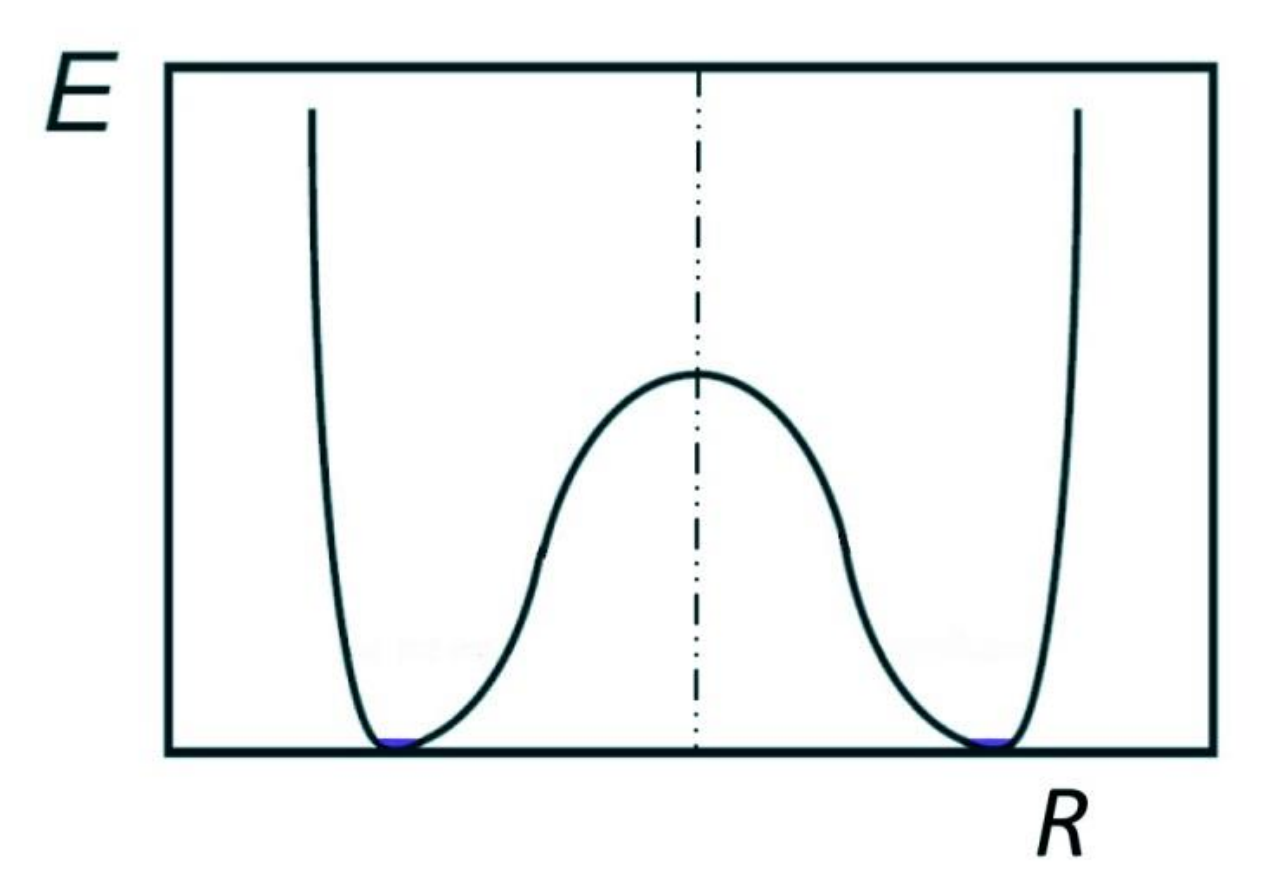
Механизм Ридберга для атома водорода



Итак, первый секрет холодного синтеза, который с необходимостью приводит к слиянию ядер дейтерия при насыщении дейтерием проводящего кристалла, на сегодня можно считать практически разгаданным.

Вторая неожиданность процесса холодного синтеза: в этих реакциях практически отсутствуют стандартные ядерные продукты распада $^{4}He^{*}$.

Возможная причина замедления скорости ядерных распадов при уменьшении энергии возбуждения – остаточный кулоновский барьер между ядрами дейтерия внутри потенциальной ямы сильных взаимодействий. Возможно, для нейтронов работает “Статистический принцип ослабления корреляций с расстоянием” (Н.Н. Боголюбов, Избр. труды по статистической физике, М., 1979).



Согласно нашей *гипотезе*, скорость ядерных распадов промежуточного ядра $^4He^*$ является функцией энергии возбуждения этого ядра $E_к$. Мы *предполагаем*, что при $E_к \sim 0$ (тепловые энергии) составное ядро $^4He^*$ является метастабильным с временем жизни около 10^{-15} с. После истечения времени $\sim 10^{-16}$ секунды составное ядро уже больше не является изолированной системой, так как виртуальные фотоны от $^4He^*$ могут достигать ближайших электронов в кристалле и уносить энергию возбуждения составного ядра $^4He^*$.

Нужно подчеркнуть, что изложенная *гипотеза* является лишь попыткой объяснить хорошо установленный экспериментальный факт практического отсутствия ядерных каналов распада промежуточного составного ядра $^4He^*$ в процессе холодного синтеза.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2012, том 75, № 2, с. 174–180

ЯДРА

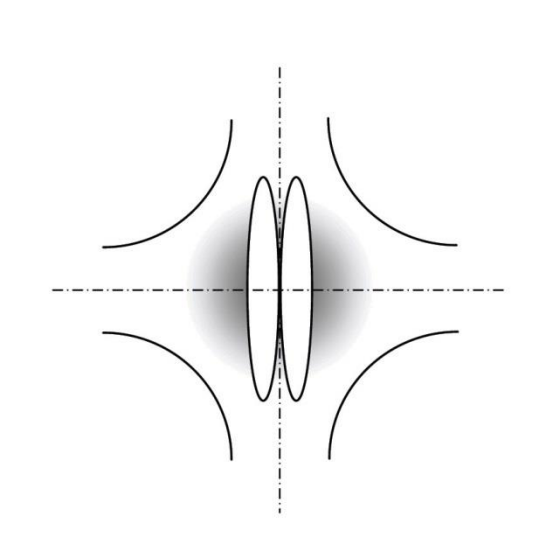
ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

© 2012 г. Э. Н. Цыганов*

Юго-западный медицинский центр Техасского университета, Даллас, США

Поступила в редакцию 21.03.2011 г.; после доработки 01.07.2011 г.

Недавние эксперименты на ускорителях по синтезу различных элементов показали, что эффективные поперечные сечения таких реакций зависят от того, в каком материале размещены ядра частицы-мишени. В этих экспериментах наблюдалось существенное увеличение вероятности взаимодействия в тех случаях, когда ядра мишени внедрены или являются частью проводящего кристалла. Эти опыты позволяют совершенно по-новому взглянуть на проблему так называемого холодного ядерного синтеза.



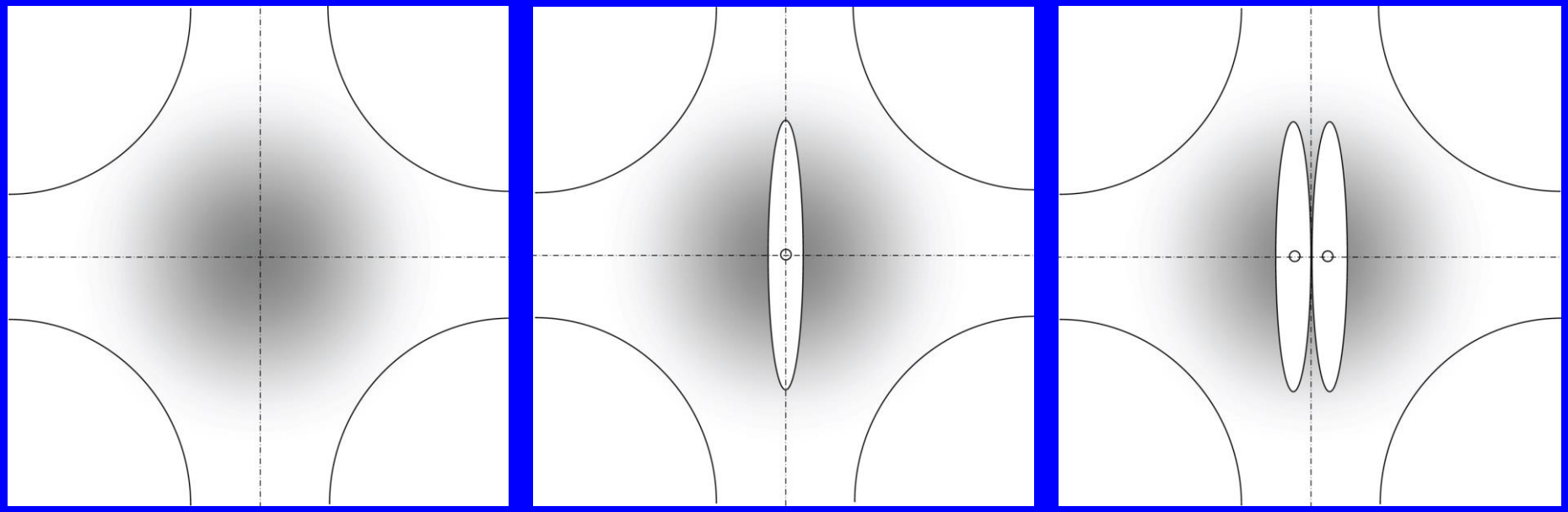
Скорость DD синтеза в кристаллической ячейке

Тип кристалла	Потенциал экранирования, эВ	Частота колебаний ν, c^{-1}	Проницаемость 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

Э.Н. Цыганов, *Ядерная Физика, 2012, том 75, № 2, с. 174–180.*
E.N. Tsyganov, *Physics of Atomic Nuclei, 2012, Vol. 75, No. 2, pp. 153–159.*

Кристаллическая ячейка проводника. Простая кубическая структура использована как дидактический пример. Затененная часть рисунка изображает область расположения свободных электронов. Работает механизм Ридберга.

$$1/\lambda = R[(1/n_1^2) - (1/n_2^2)]$$



В наших недавних статьях обсуждается 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 составного ядра $^4He^*$. Такой процесс становится возможным благодаря обмену промежуточного ядра с электронами кристаллической решетки посредством виртуальных фотонов.

Author's personal copy

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 309 (2013) 95–104

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nimb

ELSEVIER

Registration of energy discharge in D + D → $^4He^*$ reaction in conducting crystals (simulation of experiment)

E.N. Tsyganov [a,*], V.M. Golovatyuk [b], S.P. Lobastov [b], M.D. Bavizhev [c], S.B. Dabagov [d]

[a] University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas, USA
[b] Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
[c] North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
[d] RAS PN Lebedev Physical Institute & NRNU MEPhI, Moscow, Russia

ARTICLE INFO

Article history:
Received 30 November 2012
Received in revised form 29 December 2012
Accepted 12 January 2013
Available online 3 April 2013

ABSTRACT

The experiment on registration of low-energy electrons which occur after the fusion reaction of two deuterons in the palladium crystal at very low excitation energies was modeled using Monte Carlo simulations.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

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.

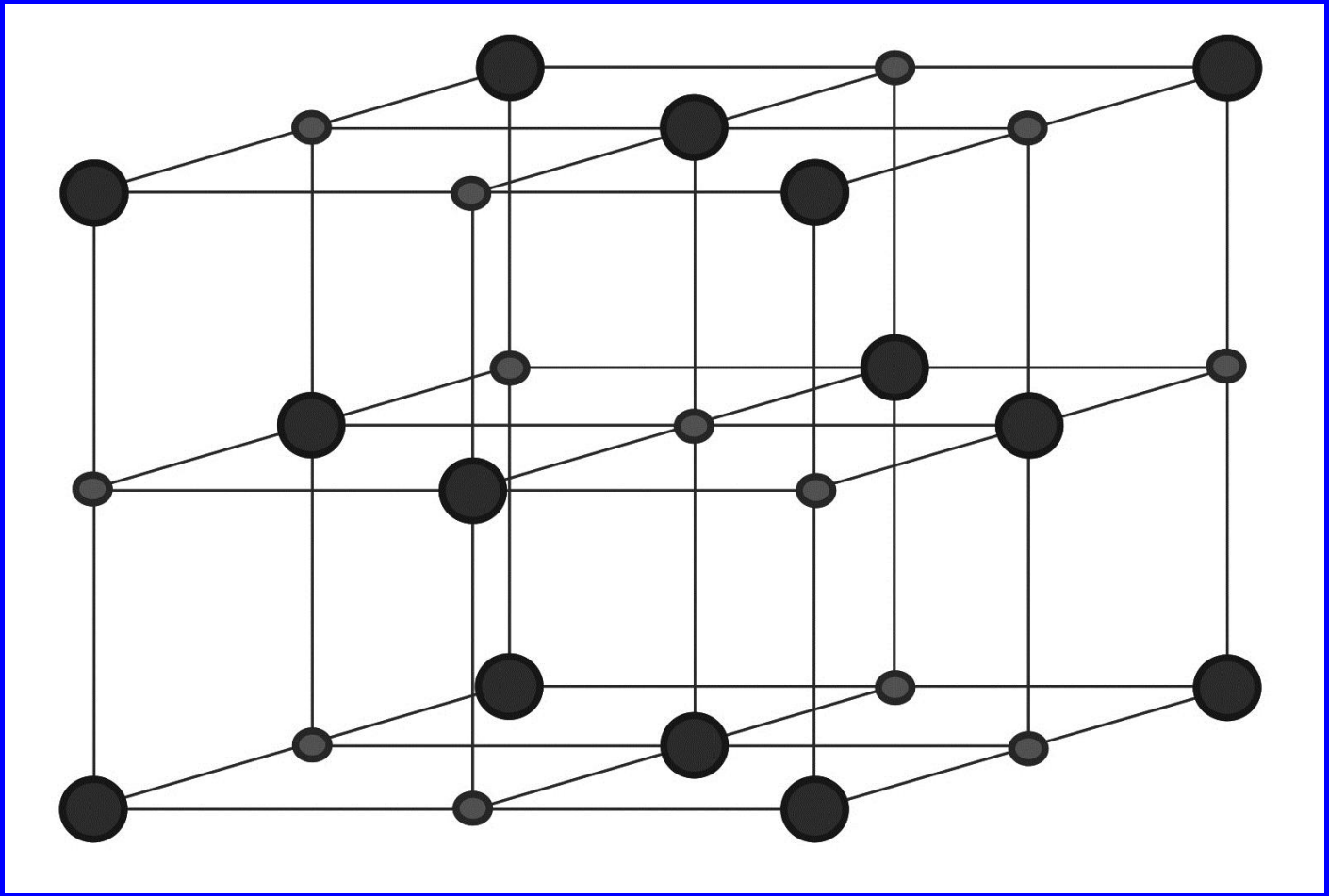
Инженерная физика № 9 2013
ISSN: 2072-9995
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

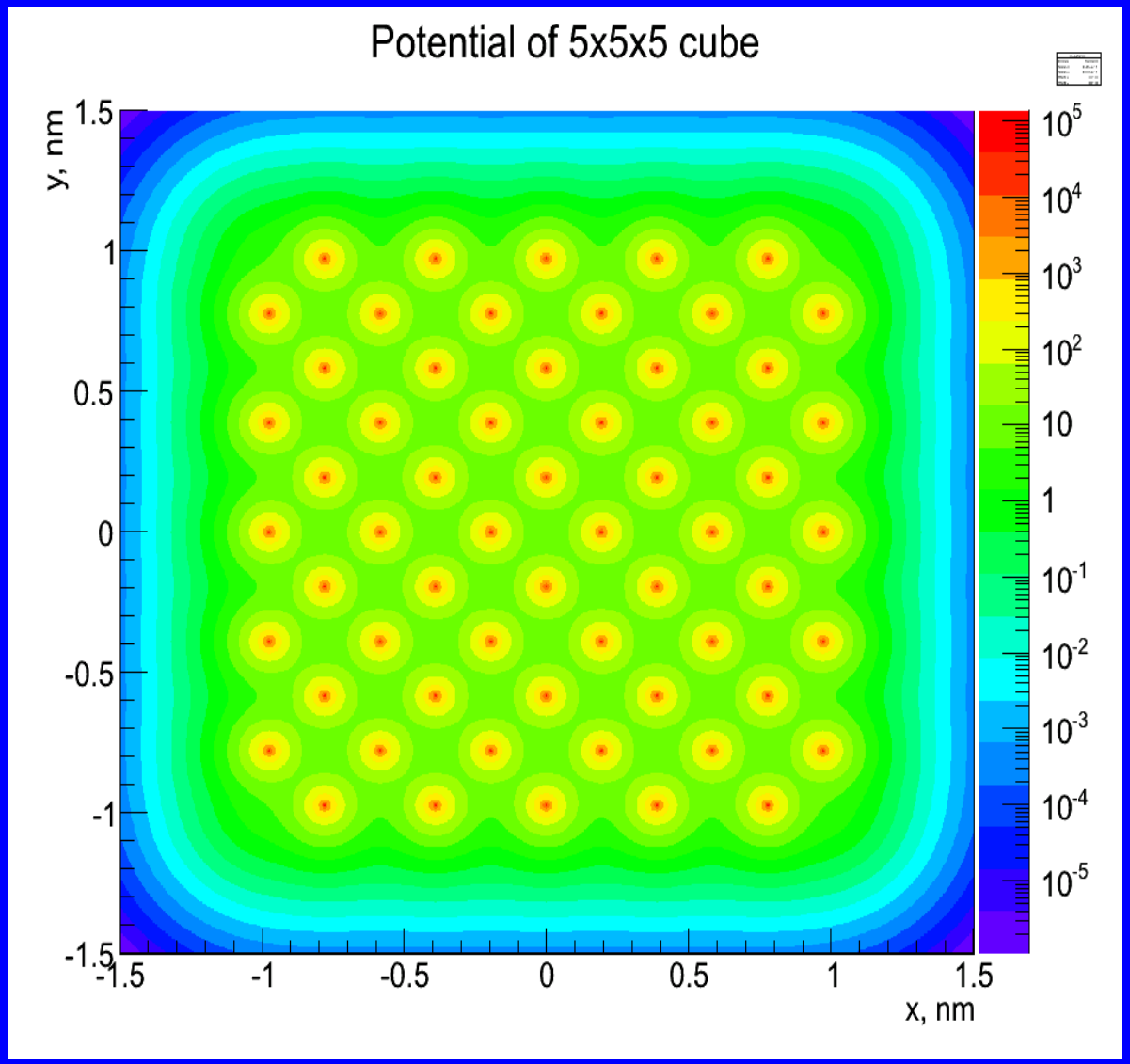
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

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

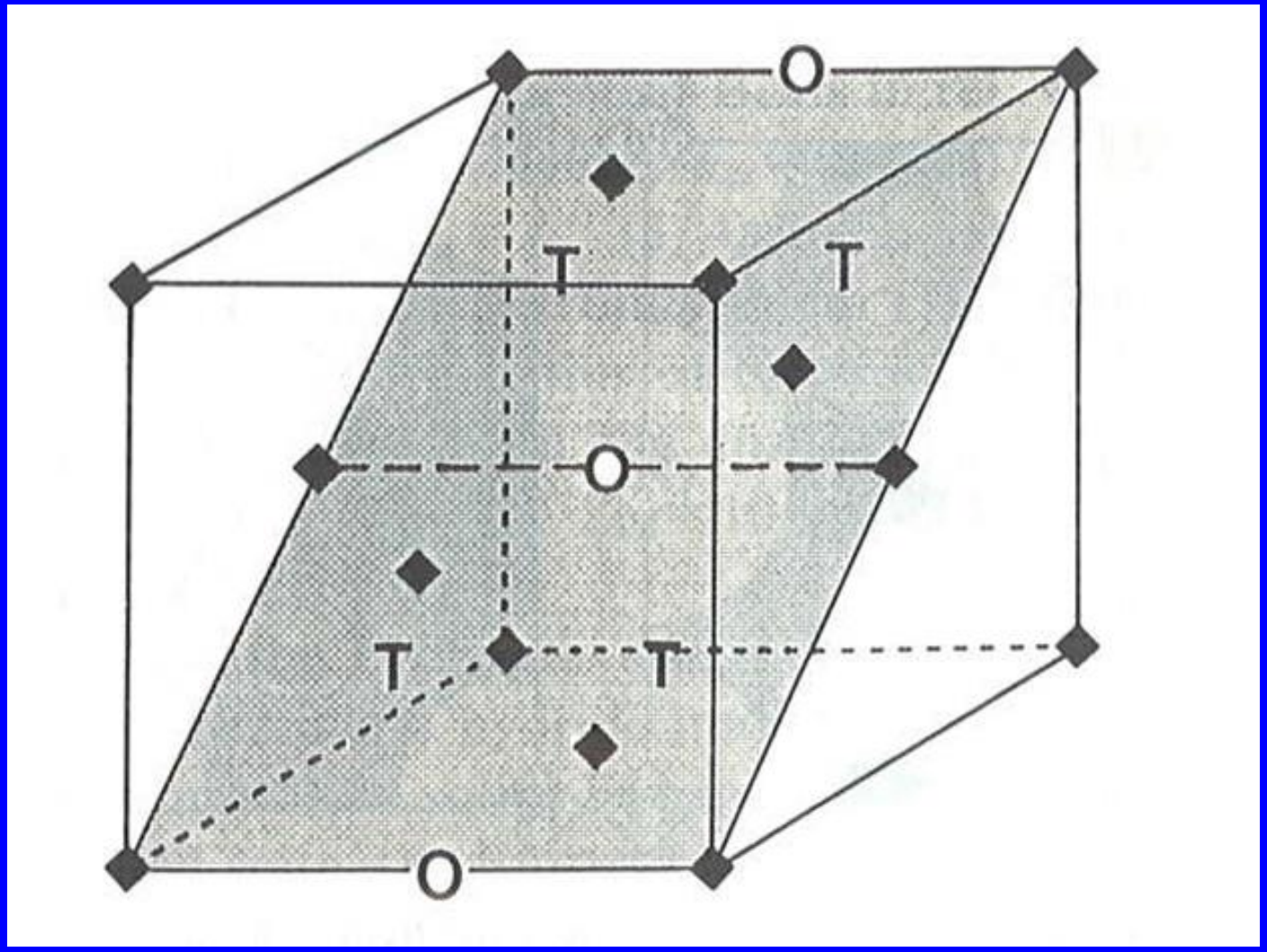
Кристаллическая ячейка проводника fcc-типа (палладий, платина). Большими кружками обозначены атомы кристалла-хозяина, малыми – октохедральные вакансии примесей.



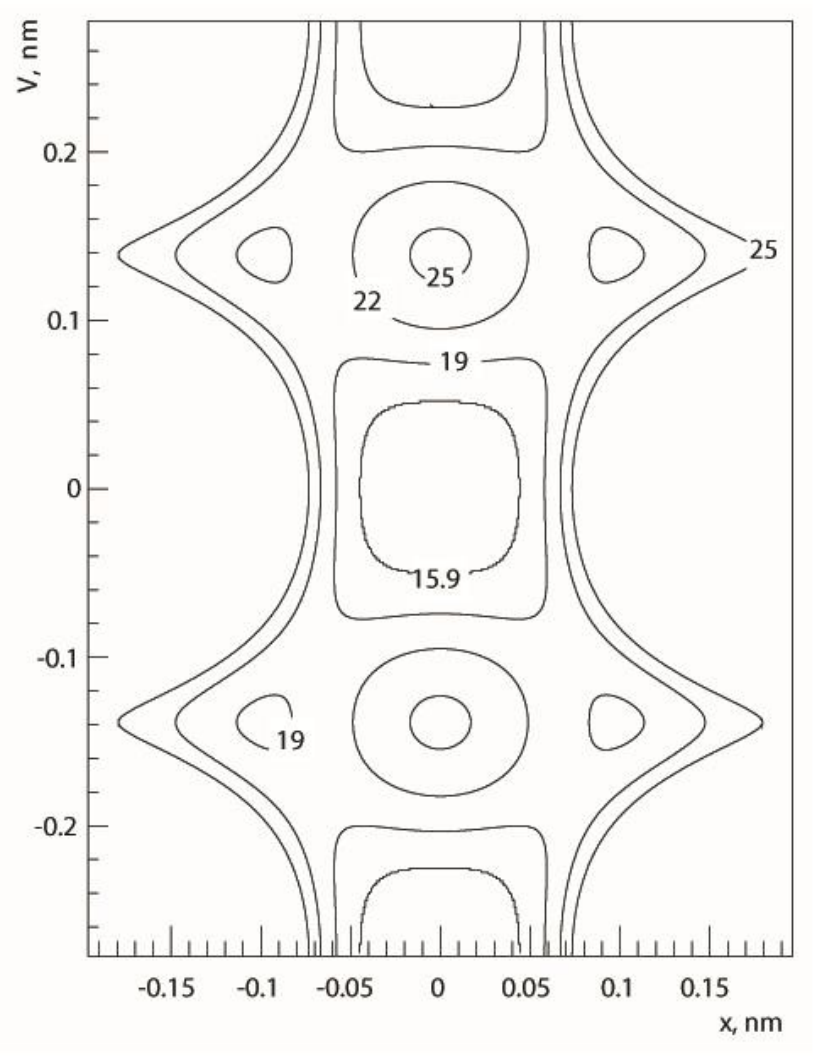
Атомные потенциалы кластера 5×5×5 ячеек кристалла платины



Диагональная плоскость *X-V* в кристаллах fcc. Знаками O обозначены октохедральные вакансии, знаками T - тетрахедральные вакансии.



Контуры потенциалов в диагональной плоскости *X-V* для платины.



Потенциал в окрестности октохедрального центра в кристаллической ячейке платины вдоль направления *V*

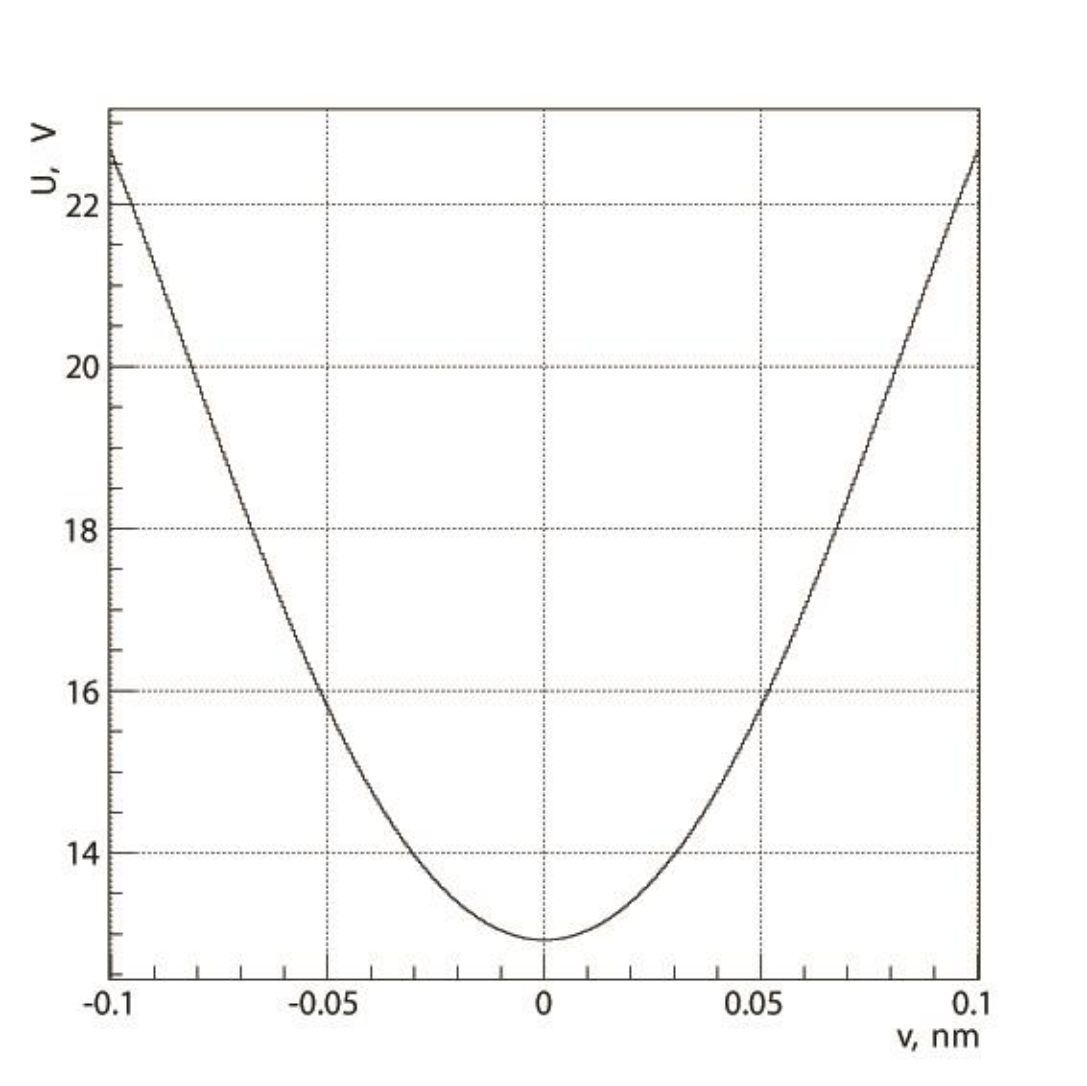
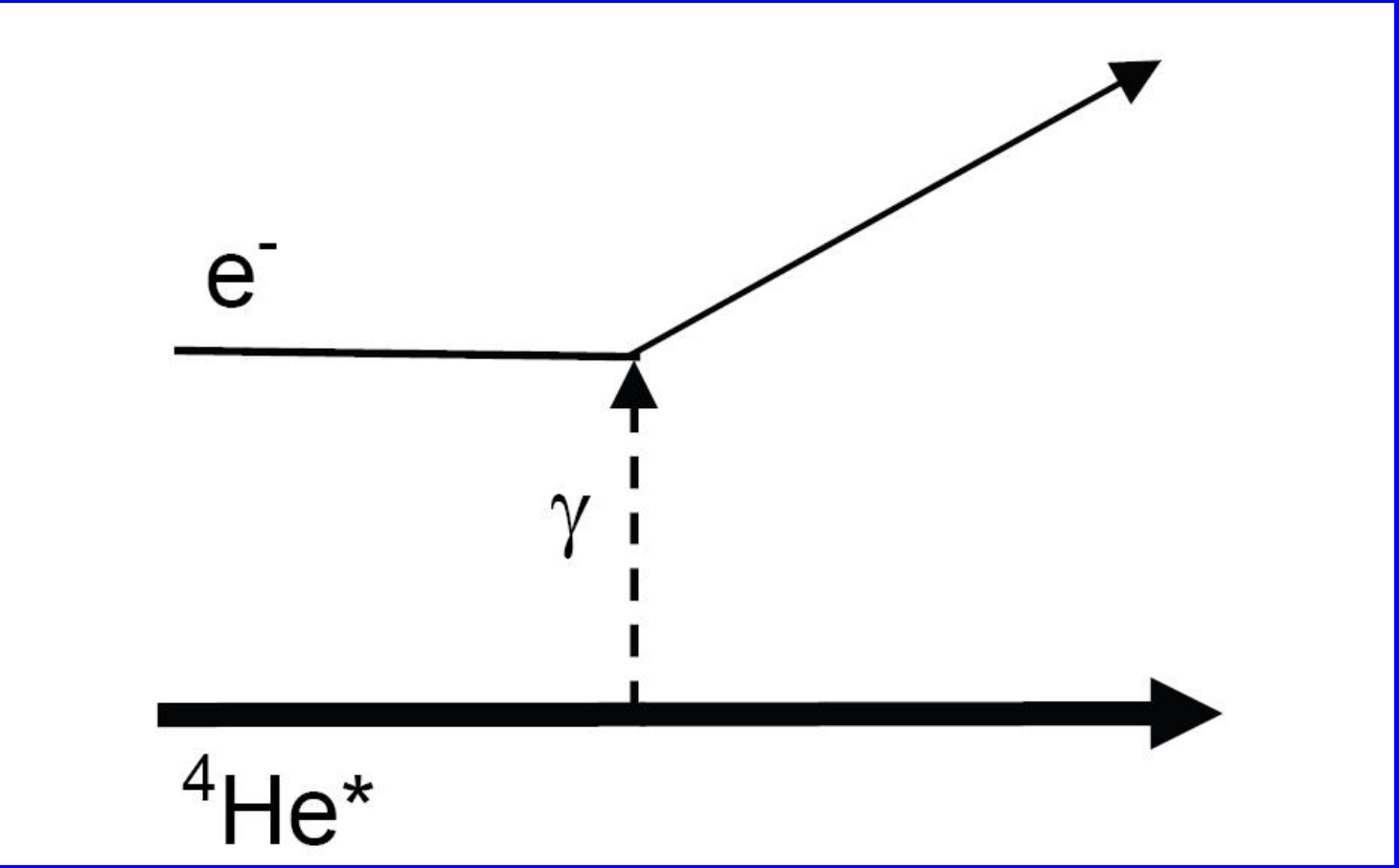
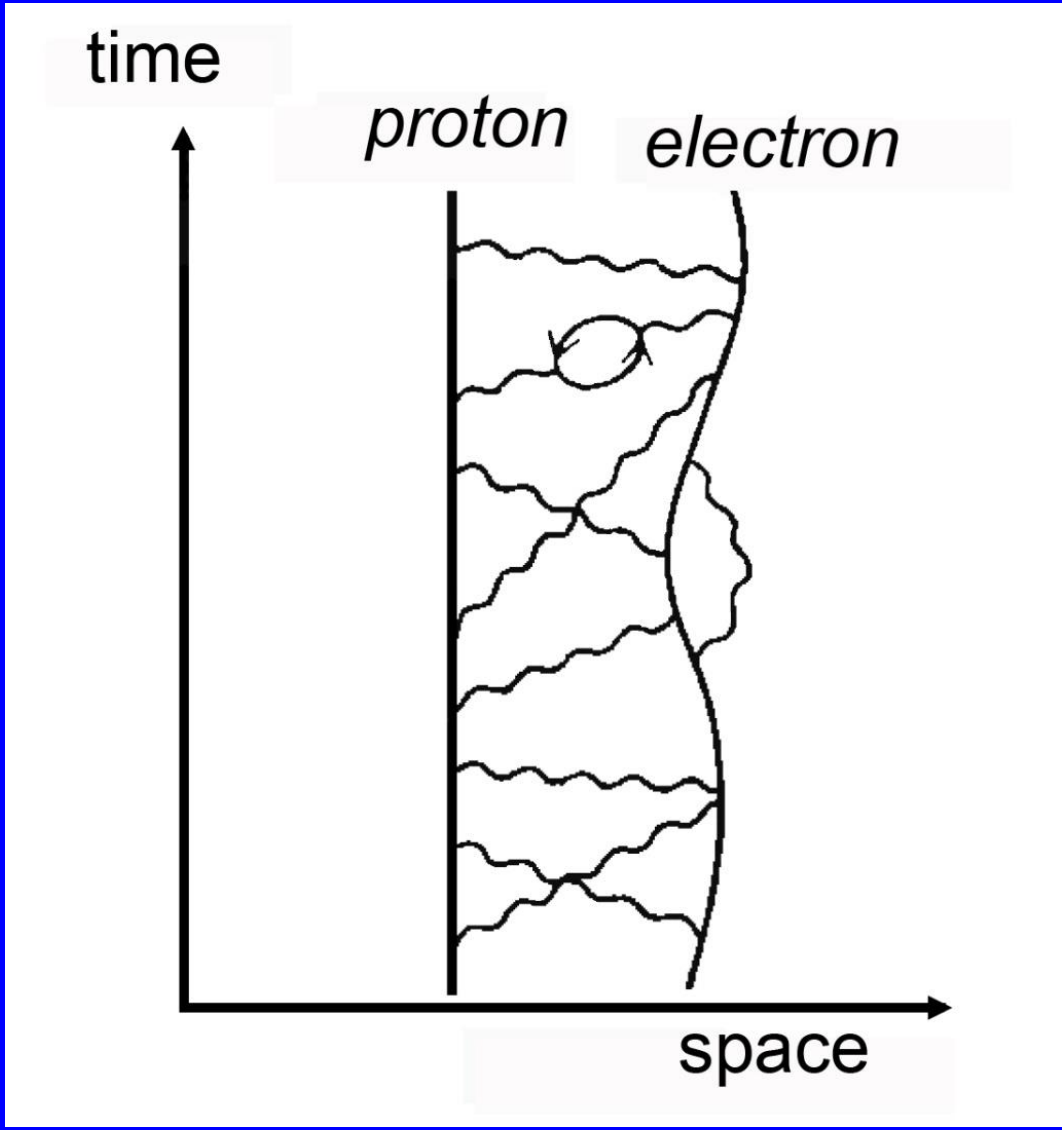


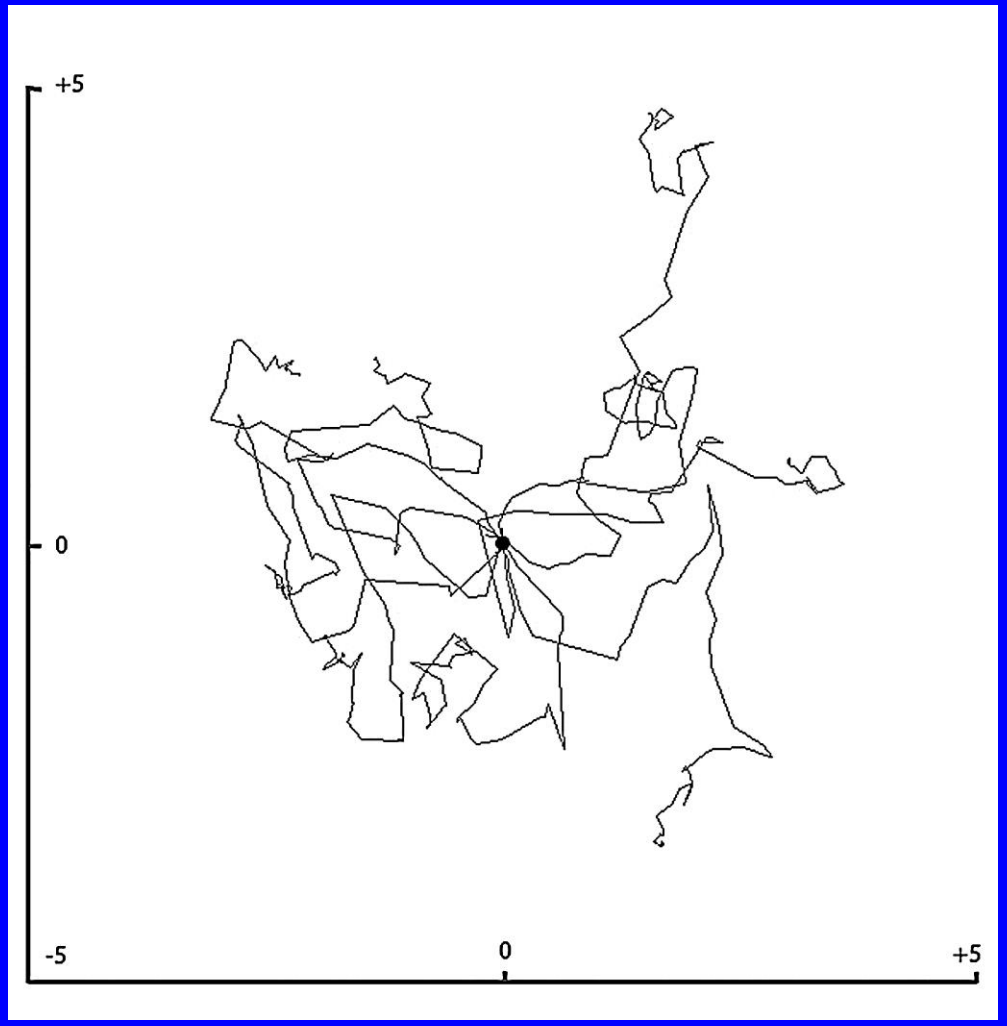
Диаграмма процесса, обеспечивающего “термолизацию” DD синтеза с образованием $^4He^*$ в проводящих кристаллах. Для того, чтобы этот процесс заработал, необходимо существование метастабильного состояния $^4He^*$.



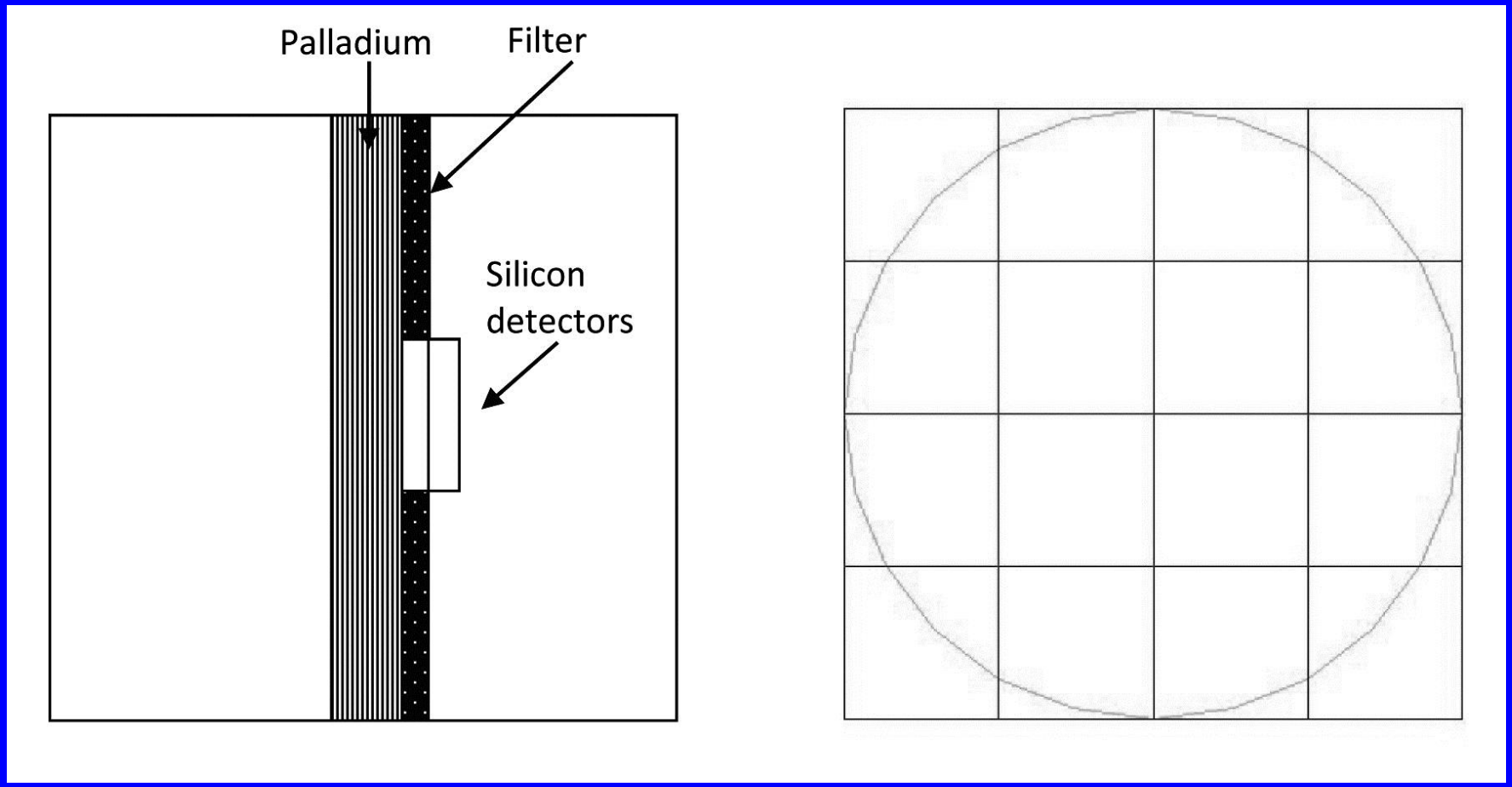
Виртуальные фотоны в атоме водорода (Ричард Фейнман)



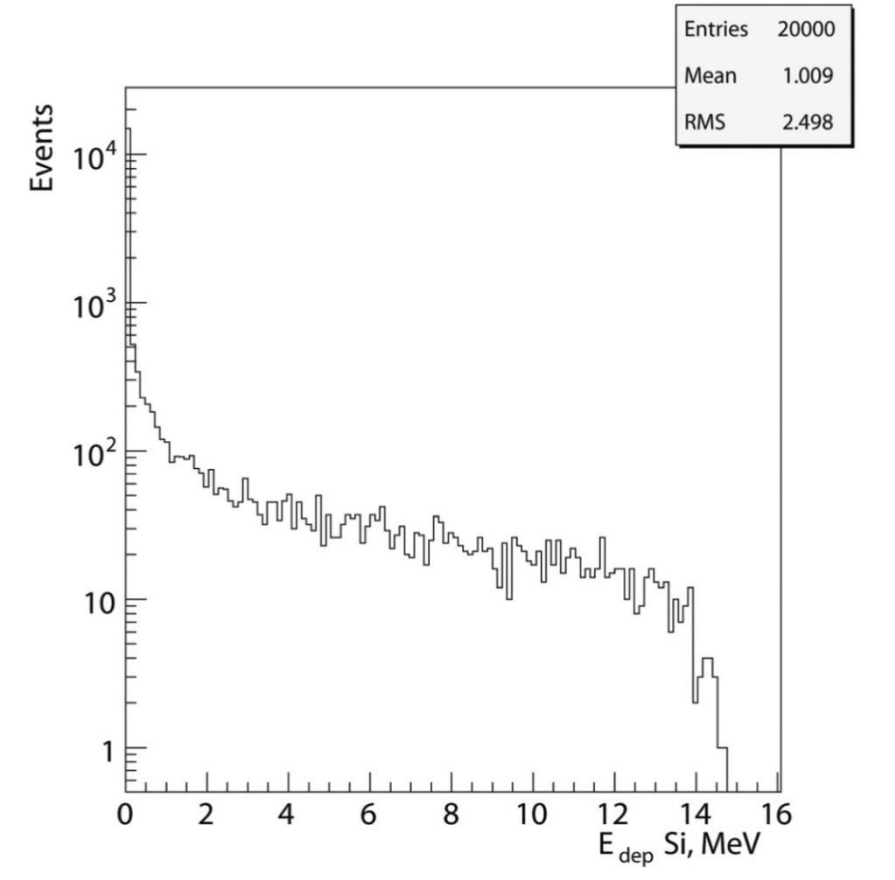
Траектории электронов (Монте Карло), генерированных в процессе холодного DD-синтеза в палладии. Размеры указаны в микронах.



Одностороняя схема эксперимента. Несколько кремниевых детекторов расположены с одной стороны палладиевой фольги и включены на совпадения. Слева – вид сбоку, справа – относительные позиции апертуры и детекторов.



Энергия, выделенная 60 кэВ электронами в детекторах, расположенных с одной стороны от палладиевой фольги. Спектр простирается до энергии 14 МэВ из-за того, что некоторая часть электронов рассеивается в палладии на углы до 180°.



Эксперименты по DD-синтезу в металлах на ускорителях

- 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”в журнале J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 23 (1997) 1459–1464.

- 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 International Conference on Cold Fusion, 1998. Vancouver, Canada:, ENECO, Inc., Salt Lake City, UT : p. 180.

- H. Yuki, J. Kasagi, A.G. Lipson, T. Ohtsuki, T. Baba, T. Noda, B.F. Lyakhov, N. Asami “Anomalous Enhancement of DD Reaction in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under a low energy deuteron bombardment”, письма в ЖЭТФ, том 68, выпуск 11, 10 декабря,1998.

- J. Kasagi, H. Yuki, T. Baba and T. Noda “Low Energy Nuclear Fusion Reactions in Solids”, 8th International Conference on Cold Fusion.,2000. Lerici (La Spezia), Italy: Italian Physical Society, Bologna, Italy.

- A.G. Lipson, G.H. Miley, A.S. Roussetski, A.B. Karabut “strong enhancement of dd-reaction…” Работа была доложена на ICCF-10 в 2003 г. Работа интересна тем, что в этом эксперименте регистрировалось сопутствующее мягкое рентгеновское излучение.

- Claus Rolfs – Gran Sasso, 2002 – 2006
  C. Rolfs, “Enhanced electron screening in metals: a plasma of the poor man”, Nucl. Phys. News 16 (2) (2006).
  F. Raiola, (for the LUNA Collaboration), B. Burchard, Z. Fulop, et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) 1141;
  F. Raiola, (for the LUNA Collaboration), B. Burchard, Z. Fulop, et al., Eur. Phys. J. A27 (2006) 79.
- K. Czerski – Berlin, 2002 – 2009
  A. Huke, K. Czerski, P. Heide, G. Ruprecht, N. Targosz, W. Zebrowski, Phys. Rev. C 78 (2008) 015803.
  K. Czerski, A. Huke, P. Heide, et al., J. Phys. G 35, 014012 (2008).
- Tomsk Collaboration, 2012 - 2013
  V. M. Bystritsky et al, National Scientific Research - Tomsk Polytechnical University, Russia, Physics of Atomic Nuclei, 2012, Vol. 75, No. 1, pp. 53–62.
  V. M. Bystritsky et al, National Scientific Research - Tomsk Polytechnical University, Russia, Nuclear Physics, 2013 (in press)

Заключение

1. Существование явления холодного ядерного синтеза в настоящее время убедительно доказано экспериментами, включая эксперименты на ускорителях низких энергий.

2. Наблюдаемое отсутствие ядерных продуктов при холодном синтезе может быть объяснено замедлением распадов промежуточного ядра $^4He^*$ по ядерным каналам с уменьшением энергии его возбуждения. Высвобождение энергии связи при этом происходит с участием виртуальных фотонов.

3. Предубеждение многих ядерщиков по отношению к явлению холодного синтеза связано с необычностью этого ядерного процесса. При холодном синтезе образованное промежуточное составное ядро $^4He^*$ оказывается метастабильным.

4. Накопленные эмпирические правила ядерной физики представляются ядерному сообществу незыблемыми, в то время как область их применения ограничена.

RASA, 8-10 ноября 2013, Clearwater Beach, FL

RASA, 8-10 ноября 2013, Clearwater Beach, FL

Спасибо за внимание!