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

Холодный синтез сегодня

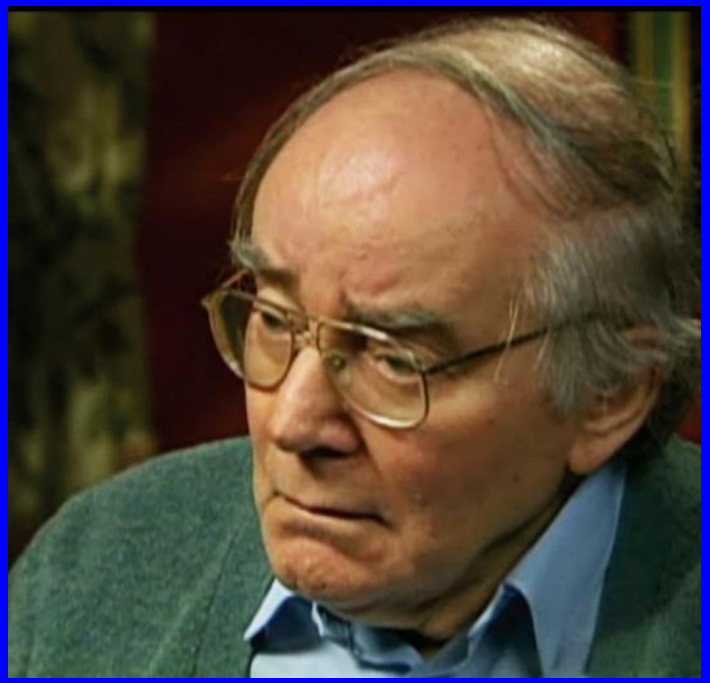
Э.Н. Цыганов

UT SWMC, Даллас, США

Лаборатория Физики Высоких Энергий ОИЯИ, 15 ноября 2012 г.

“Физика – наука экспериментальная”
Ричард Фейнман

История холодного синтеза
Основные участники



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

Микаел Мак-Кубре
D+D в палладии
С 1992 по настоящее время

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

Из сообщения проф. М. Милса на заседании Американского Химического Общества, 2010:

FUSION ENERGY CALCULATION

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + 23.8\ MeV$$

$$(1.5\times10^{43}\ D\ atoms)\left(\frac{1\,fusion}{2\,Deuton}\right)\left(23.8\times10^{6}\frac{eV}{fusion}\right)\left(1.602\times10^{-19}\frac{J}{eV}\right)=2.9\times10^{31}\ J$$

Energy per person per year (USA)

$$\left(10.0\frac{kW}{person}\right)\left(1000\frac{W}{kW}\right)\left(365\frac{days}{year}\right)(24\ hr/day)(60\ min/hr)(60\ s/min)=3.15\times10^{11}\ J$$

World (7 billion) Energy per year

$$(7\times10^{9})\ (3.15\times10^{11}\ J) = 2.2\times10^{21}\ J/year$$

Years Fueled by D + D Fusion

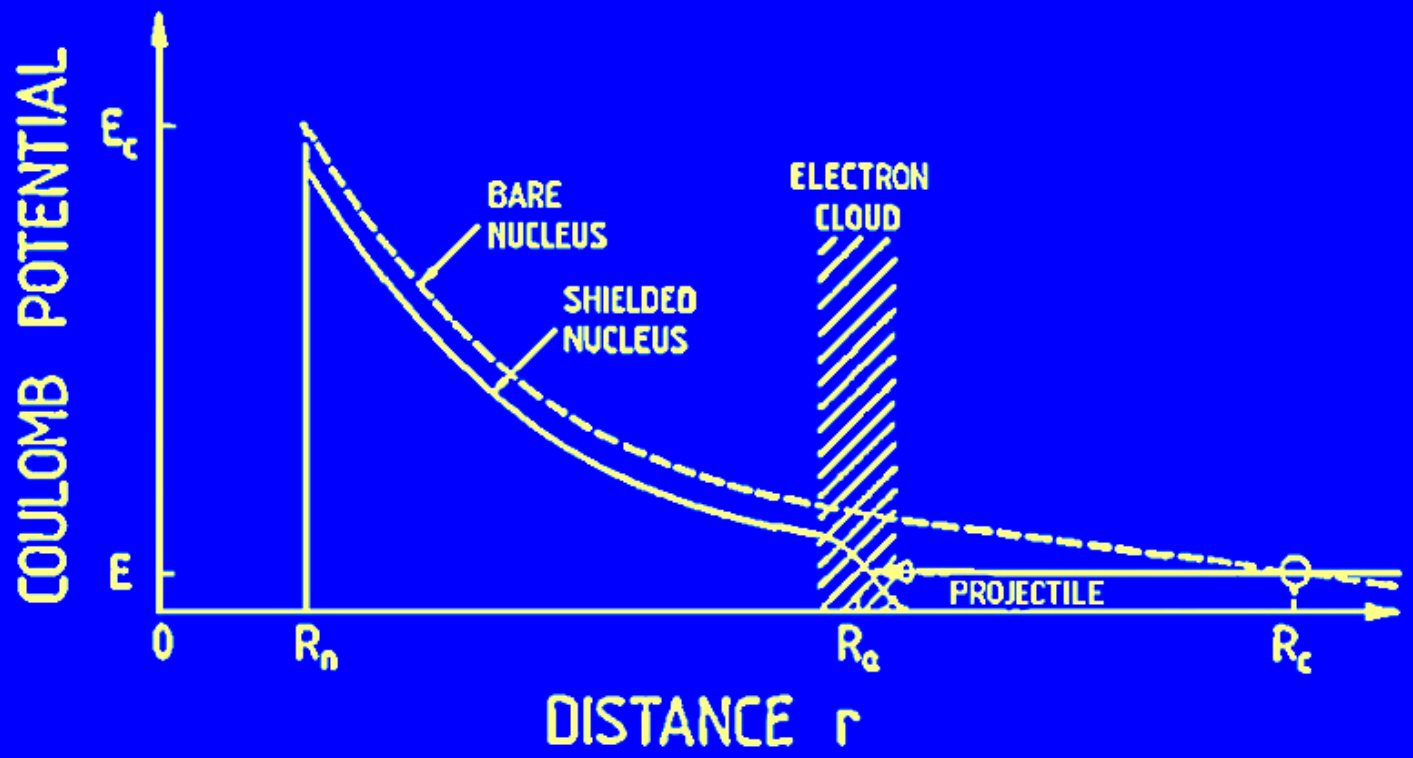
$$(2.9\times10^{31}\ J)\ /\ (2.2\times10^{21}\ J/year) = 1.3\times10^{10}\ years$$

(13 billion years!)

"Four ounces of heavy water today costs about $50 and contains enough energy to supply the average American with electricity for a lifetime"

В чем заключается “основной секрет” холодного синтеза?

В квантово-механическом рассмотрении процесса синтеза экранирующий потенциал электронов эквивалентен дополнительной энергии (H.J. Assenbaum, K. Langanke and C. Rolfs, 1987)



При взаимодействии свободных атомов дейтерия эта дополнительная энергия составляет 27 эВ

Эксперименты в Лаборатории Гран Сассо (коллаборация LUNA, 2002-2009) Руководитель проф. Клаус Ролфс

Сечение синтеза при столкновении двух ядер дейтерия:

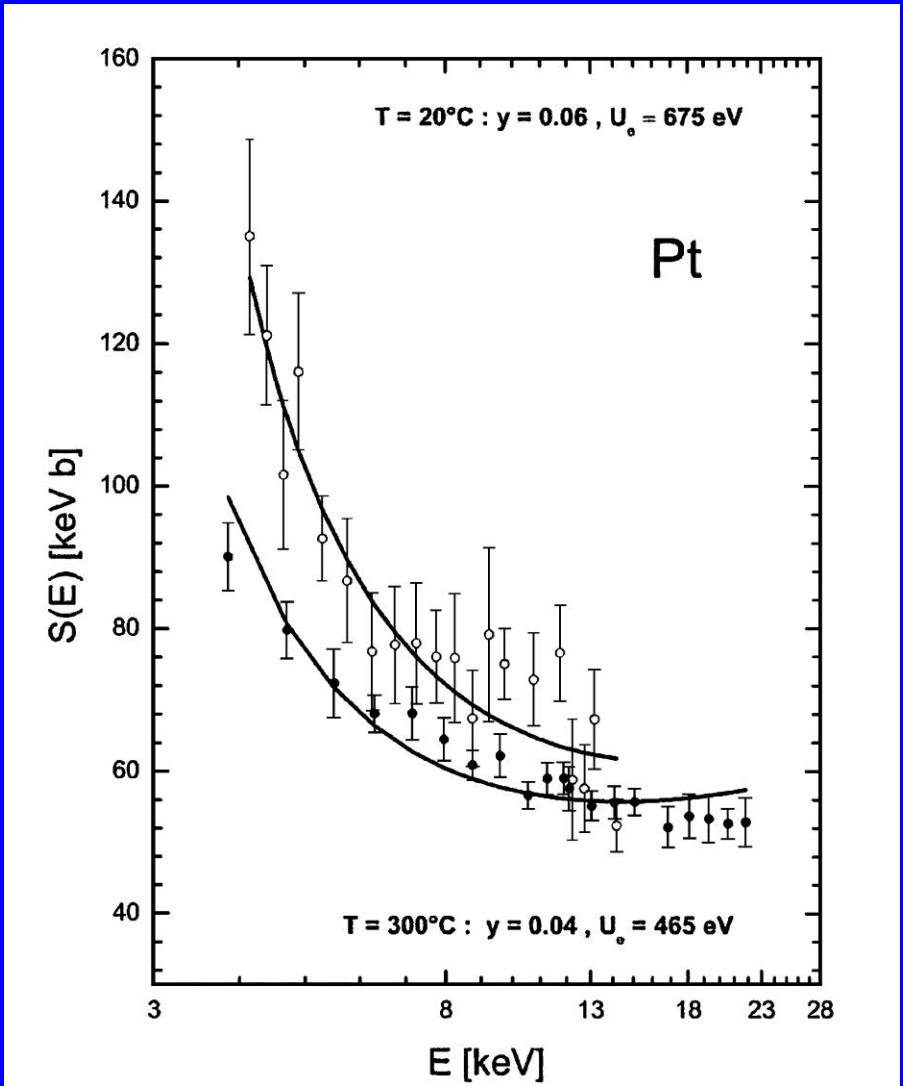
$$\sigma(E) = S(E)E^{-1}\exp(-2\pi\eta(E))$$

$$2\pi\eta = \frac{31.4}{\sqrt{E}}$$

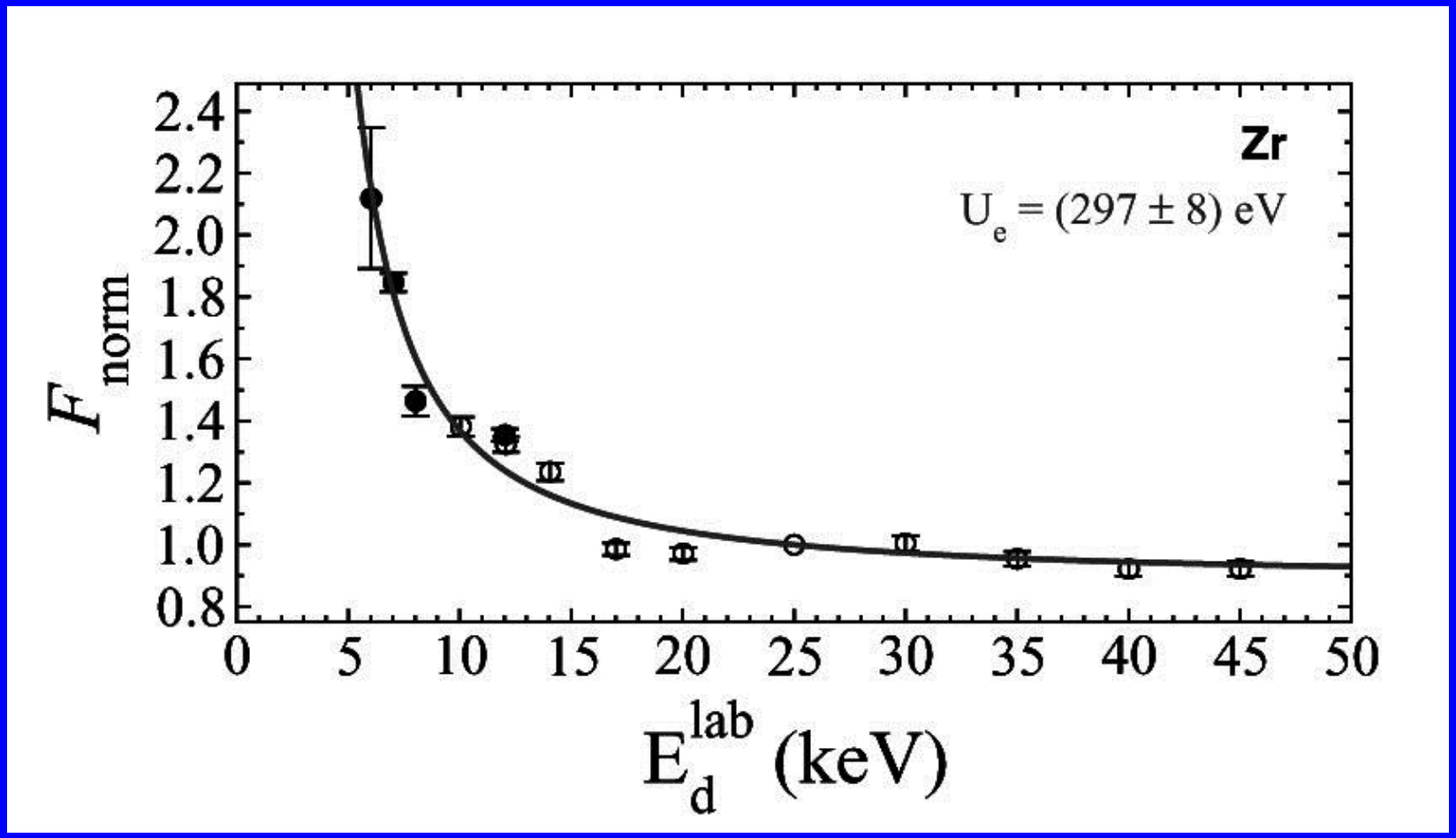
Здесь кинетическая энергия дейтронов *E* приведена в системе центра масс в единицах кэВ. *S(E)* - астрофизический фактор, который в области малых энергий можно считать постоянной величиной. Основная зависимость сечения синтеза от энергии содержится в выражении $exp(-2\pi\eta(E))$, которое определяет вероятность проникновения дейтрона через кулоновский барьер. В случае столкновения атомов дейтерия энергию *E* нужно заменить на E_{eff}:

$$E_{eff} = E + U_e \qquad U_e = e^2 / R_a$$

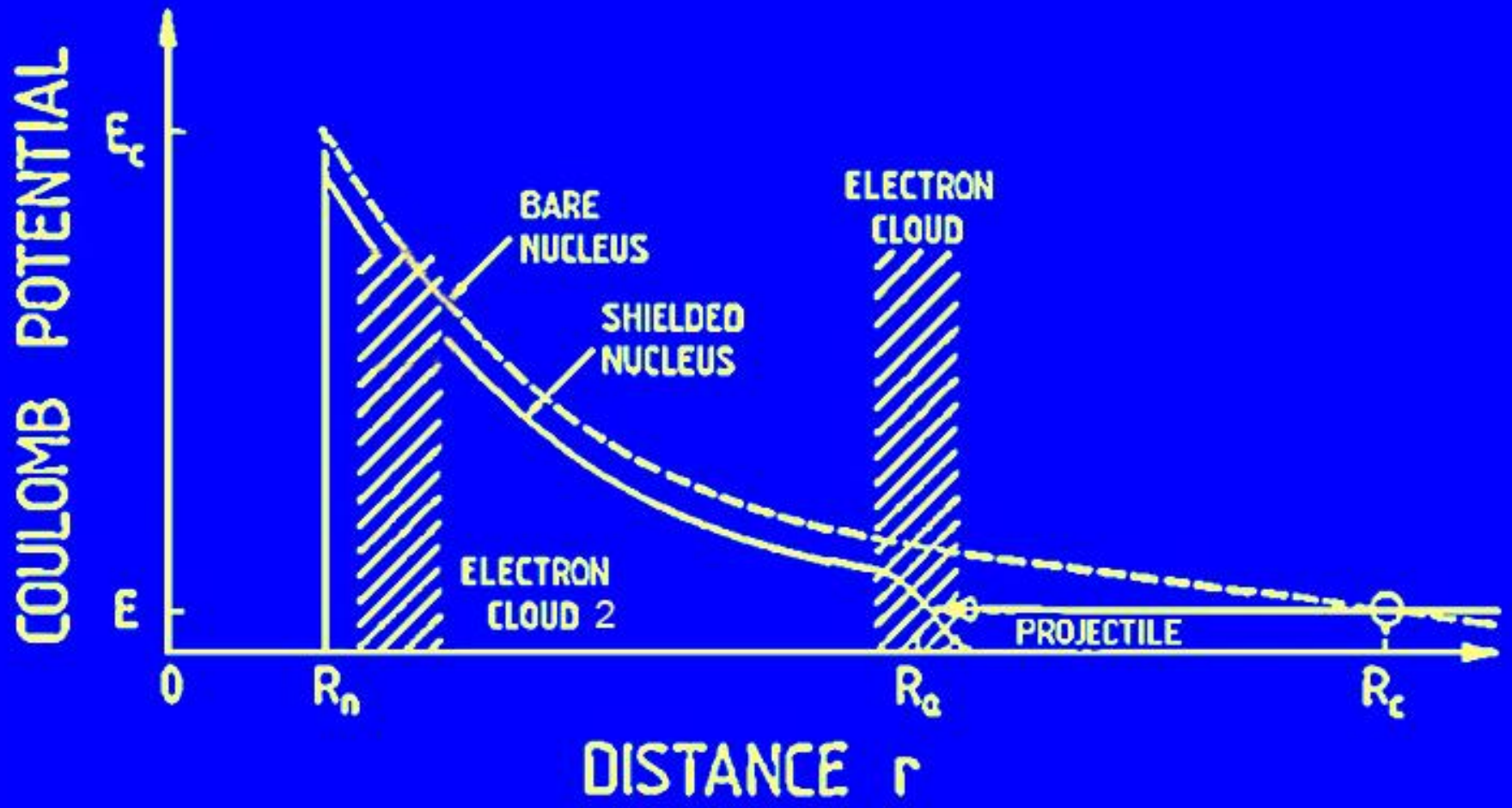
Астрофизический фактор *S(E)* для DD-синтеза, мишень имплантирована в платину (F. Raiola et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31, 2005, pp 1141–1149). U_e = 675 eV



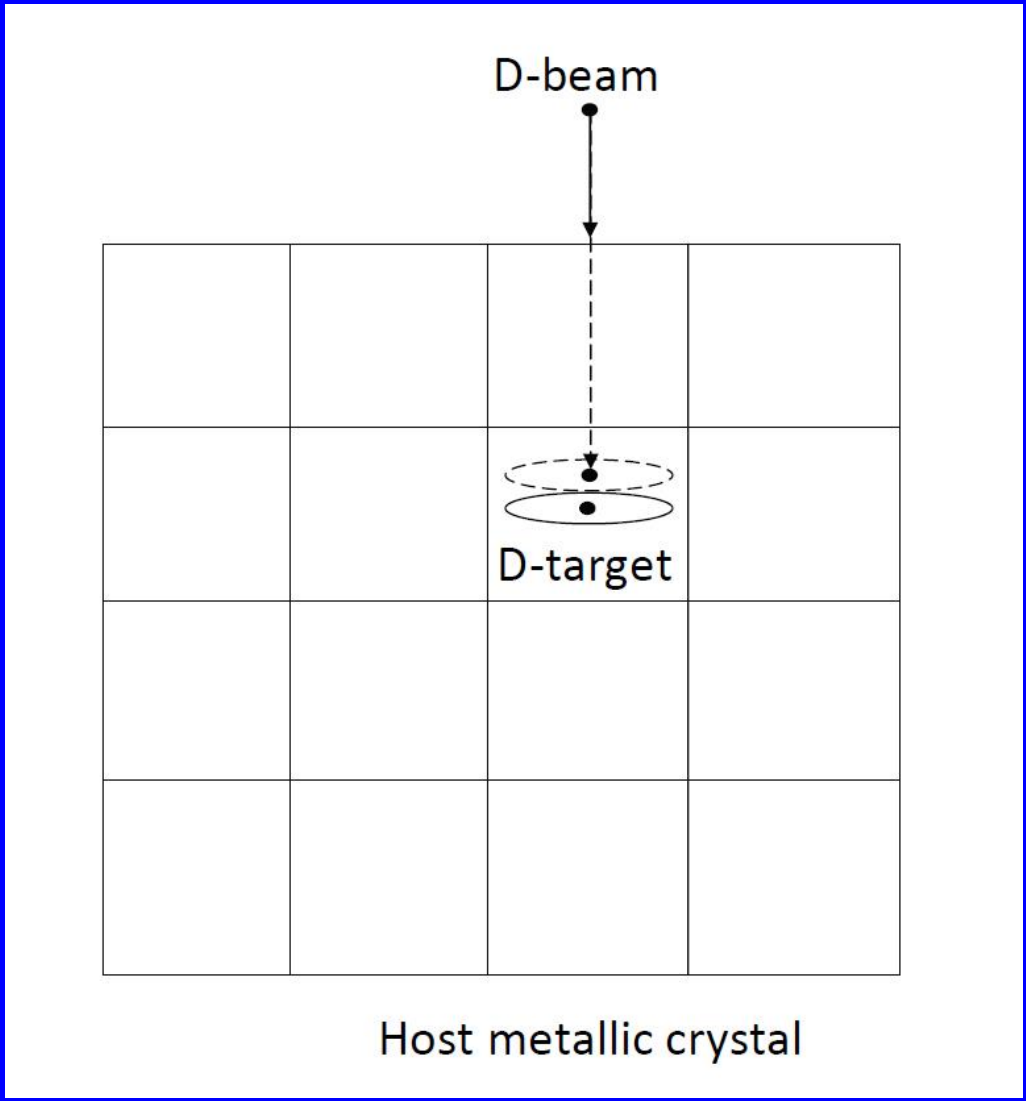
Нормированный астрофизический фактор *S(E)* для DD-синтеза в случае, когда мишень имплантирована в цирконий. Необычно большой потенциал экранирования, приблизительно в 10 раз больший, чем для свободных атомов (A. Huke, K. Czerski et al., Physical Review C 78, 015803, 2008)



Экранирующий потенциал характеризует размеры атома



Эксперименты Гран Сассо



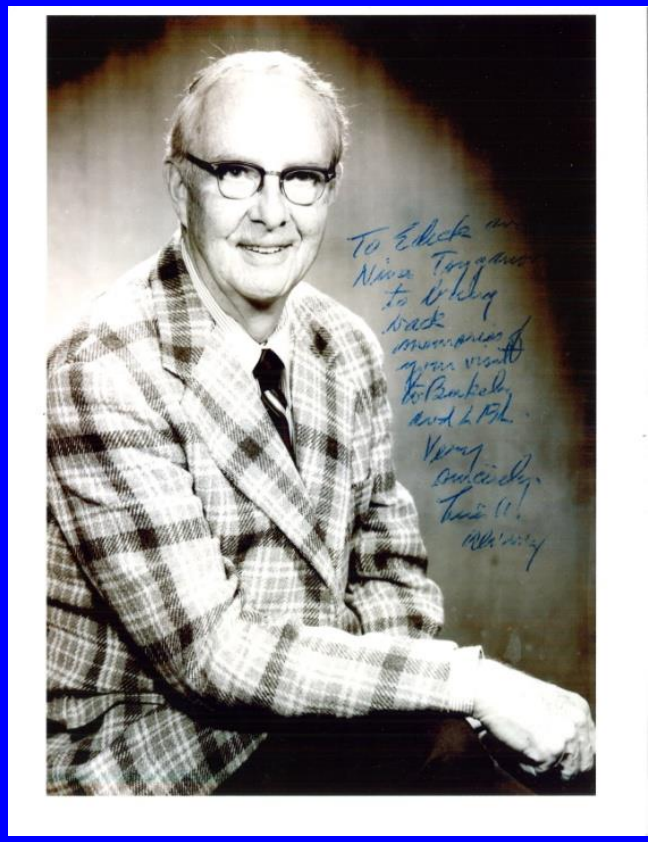
Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн, 1960
Рассмотрение “пьезо-синтеза”

Я.Б. Зельдович

С.С. Герштейн

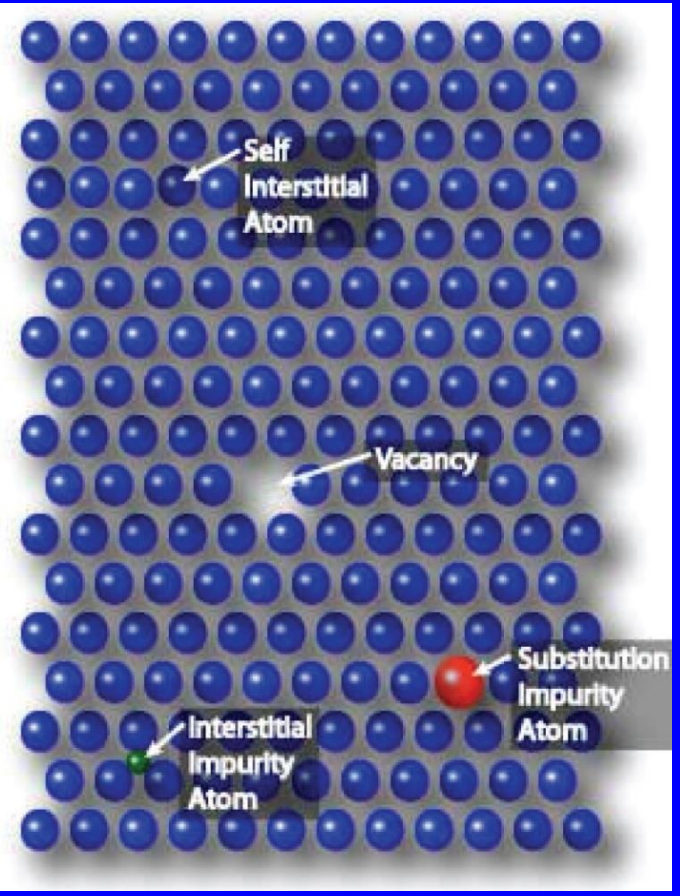
$$B = \exp\left\{-\frac{2}{\hbar}\int_{x_1}^{x_2}\sqrt{2M\left(U(x)-E\right)}\,dx\right\} = \exp\left\{-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2M\bar{U}}\,(x_2-x_1)\right\}$$

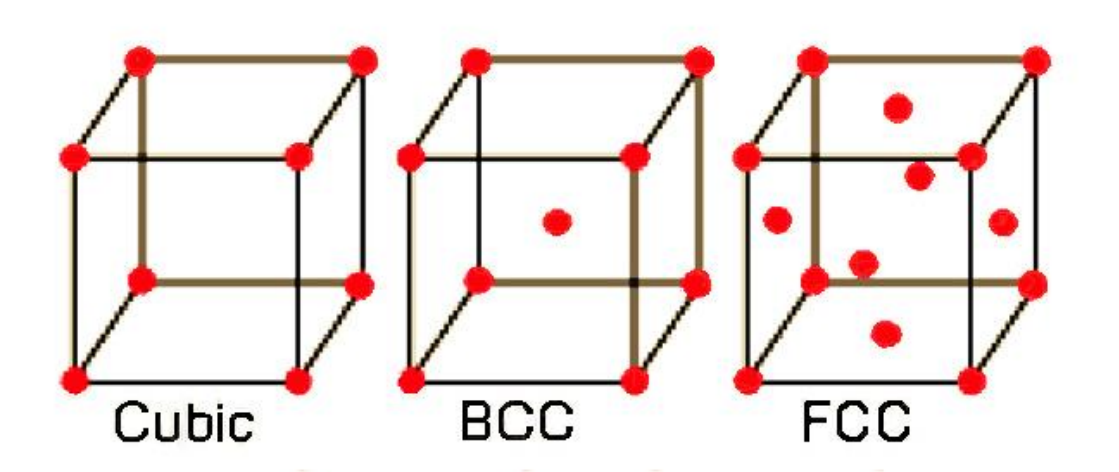
В дополнение к реакции синтеза при прямом взаимодействии двух отдельных ядер, около 50 лет тому назад началась дискуссия относительно другого типа этого процесса (μ-катализ), который также приводит к синтезу элементов. В этой связи интересно процитировать первую экспериментальную работу по μ-катализу Л. Альвареца и др., где был проанализирован случай в водородной камере, напоминающий μ-катализ. (*L.W. Alvarez et al., Physical Review Series II, v. 105, 1957, p. 1127-1128).* Упоминая теоретическую работу Я.Б. Зельдовича 1954 года, Л. Альварец пишет:

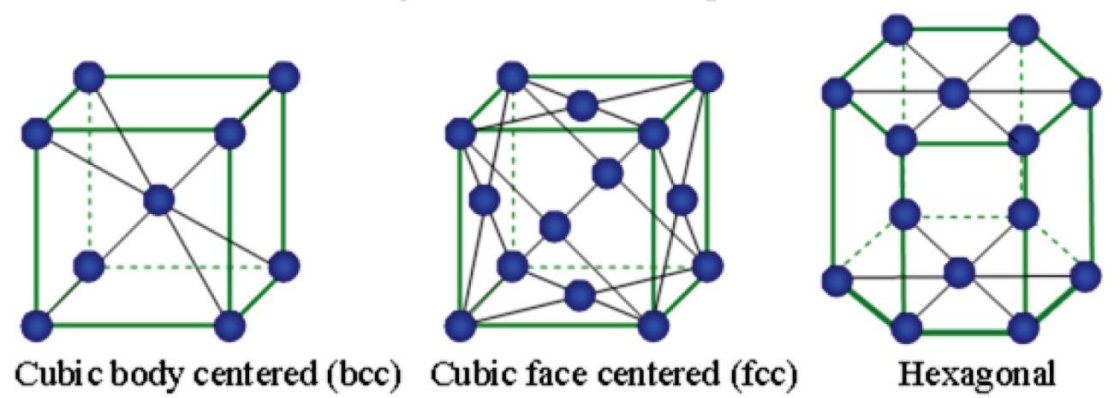


“Мезон, по существу, помещает два ядра в “ящик” с небольшими размерами. Грубые оценки проницаемости барьера (приблизительно 10^{-5}) и частоты вибраций (приблизительно 10^{17} в секунду) показывают, что время, необходимое для осуществления ядерной реакции между H и D должно быть мало по сравнению с временем жизни μ-мезона”.

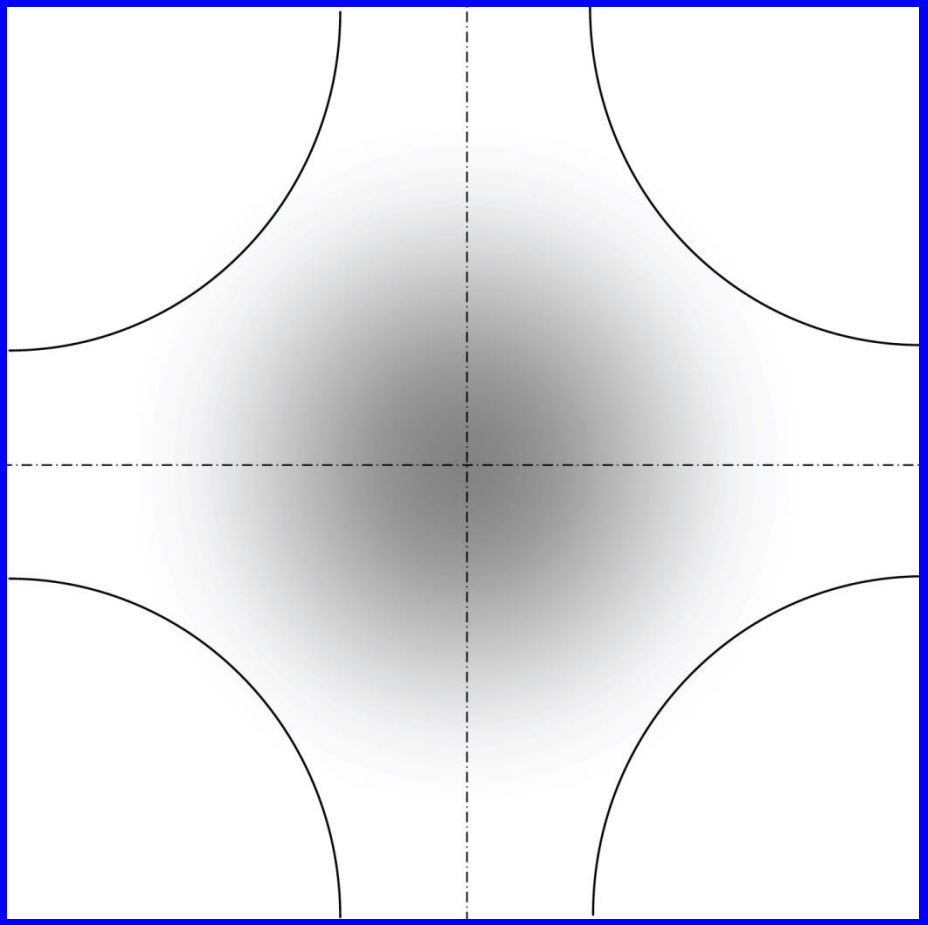
Слева – несколько типов дефектов в кристаллах.
Промежуточный (interstitial) тип примеси типичен для атомов малого размера.
Справа - типы кристаллических структур. Вверху справа – структура FCC (палладий, платина). Внизу справа – гексагональная ячейка HPC.





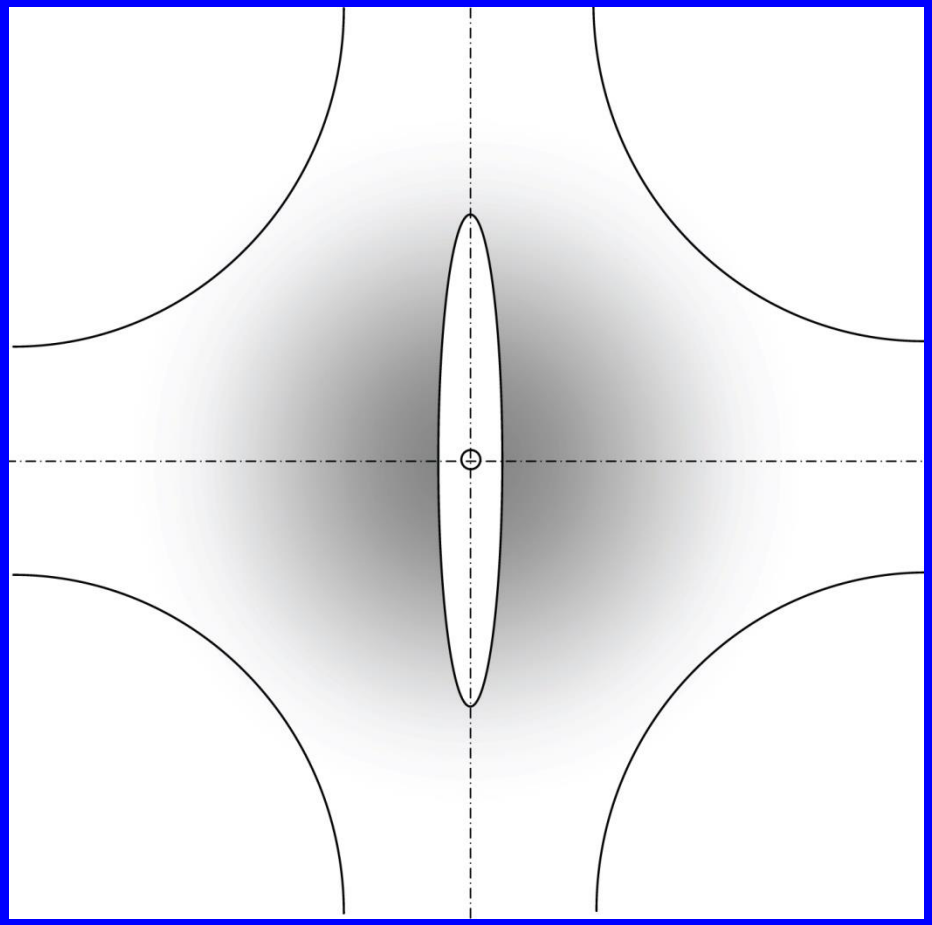


Кристаллическая ячейка проводника. Простая кубическая структура использована как дидактический пример. Затененная часть рисунка схематически изображает область расположения свободных электронов.

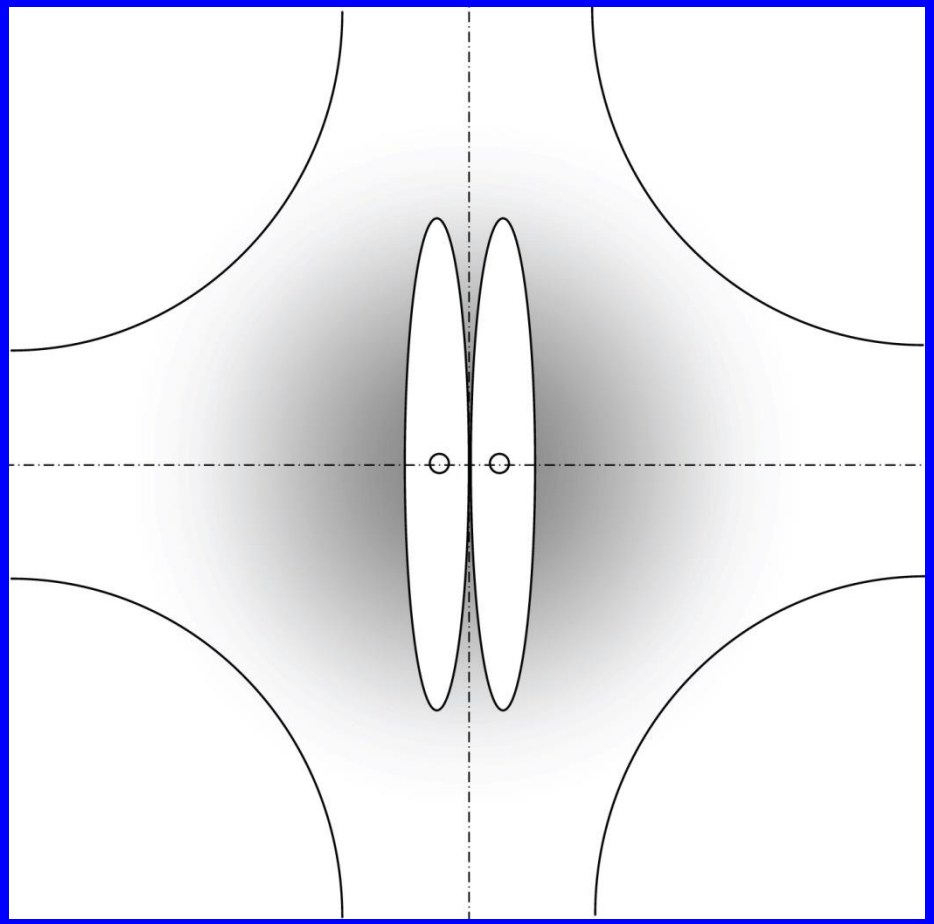


Кристаллическая ячейка проводника с одним примесным атомом дейтерия. Электронная оболочка примесного атома искажается облаком свободных электронов, работает механизм Ридберга.

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



Кристаллическая ячейка проводника с двумя примесными атомами дейтерия. Облако свободных электронов искажает электронные оболочки двух примесных атомов.

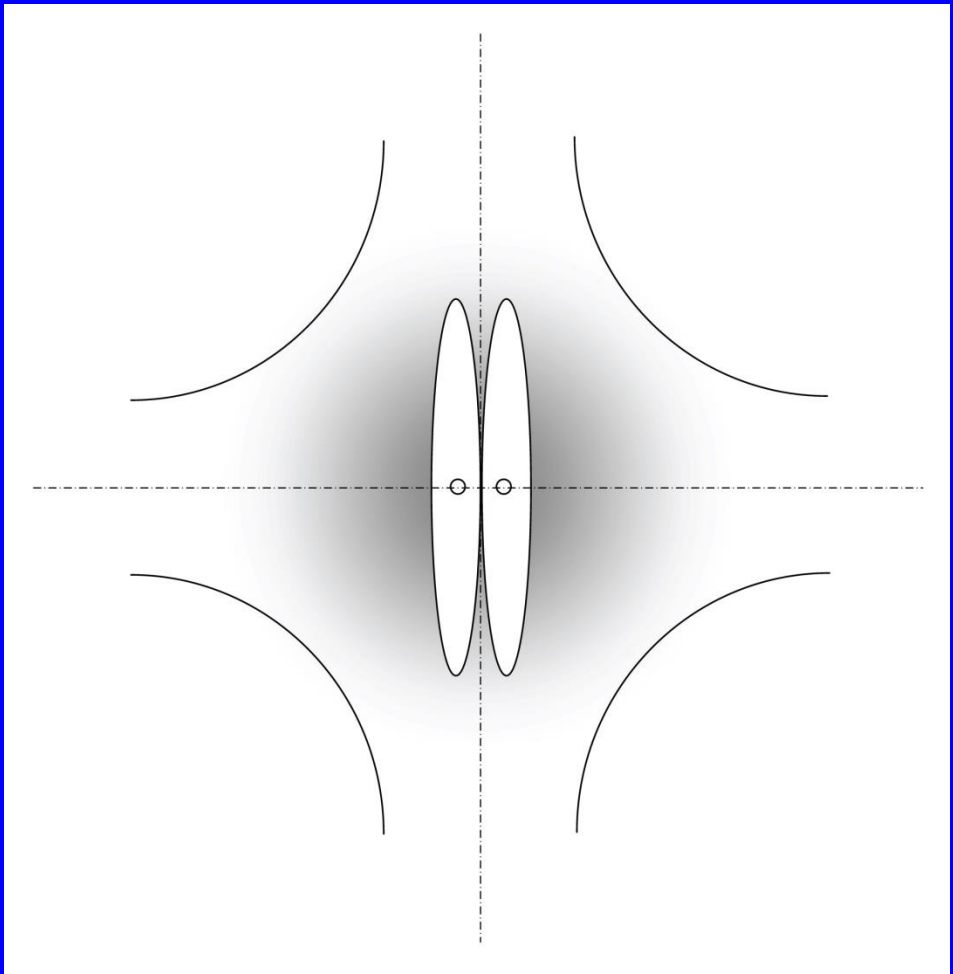


DD в ячейке проводящего кристалла. Начало процесса синтеза обеспечивается деформацией электронных оболочек примесных атомов (химический катализ)

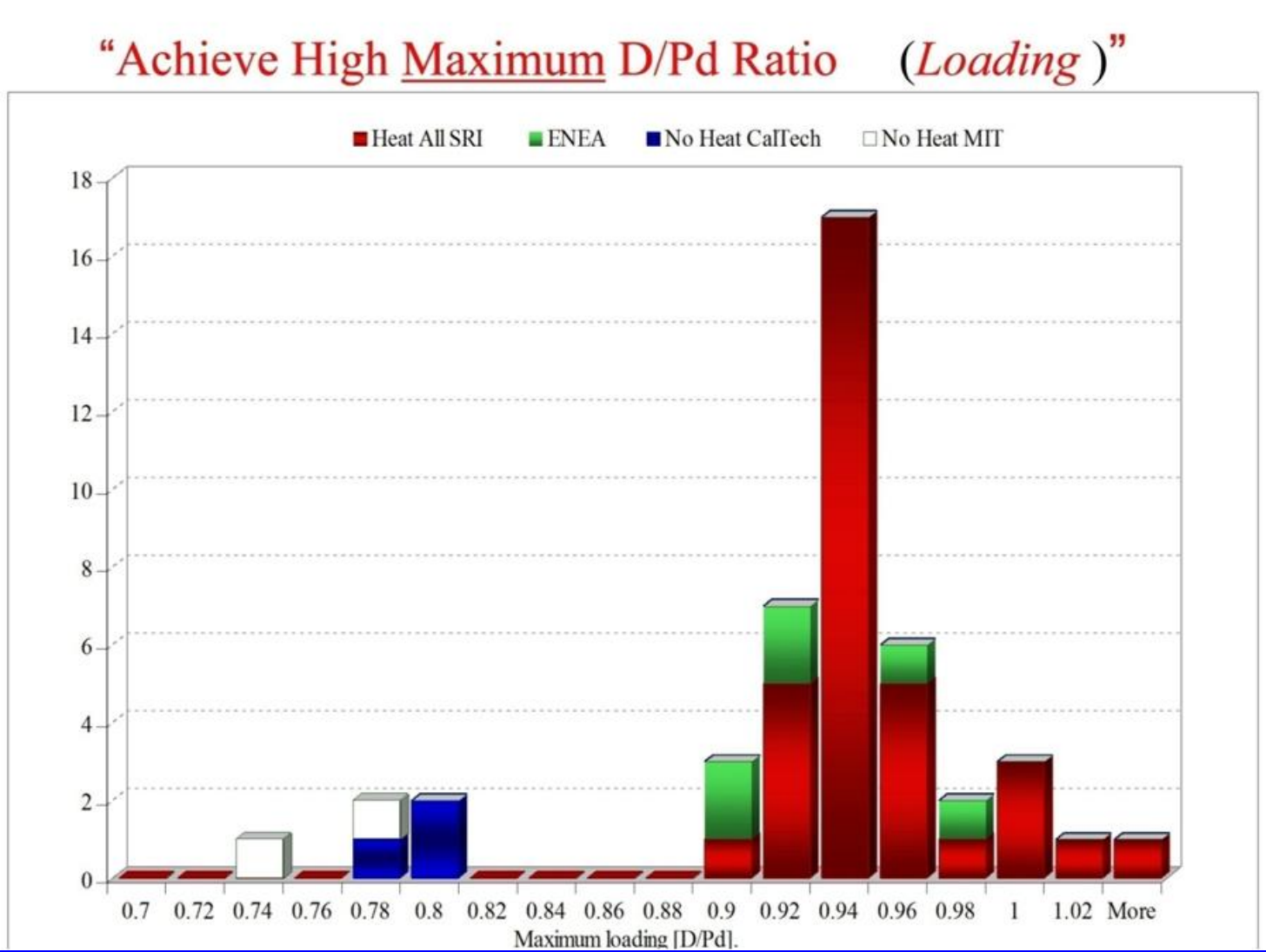
Формула Ридберга (1888):

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

n_1	n_2	Name	Converge toward
1	$2 \rightarrow \infty$	Lyman series	91.13 nm (UV)
2	$3 \rightarrow \infty$	Balmer series	364.51 nm (Visible)
3	$4 \rightarrow \infty$	Paschen series	820.14 nm (IR)
4	$5 \rightarrow \infty$	Brackett series	1458.03 nm (Far IR)
5	$6 \rightarrow \infty$	Pfund series	2278.17 nm (Far IR)
6	$7 \rightarrow \infty$	Humphreys series	3280.56 nm (Far IR)

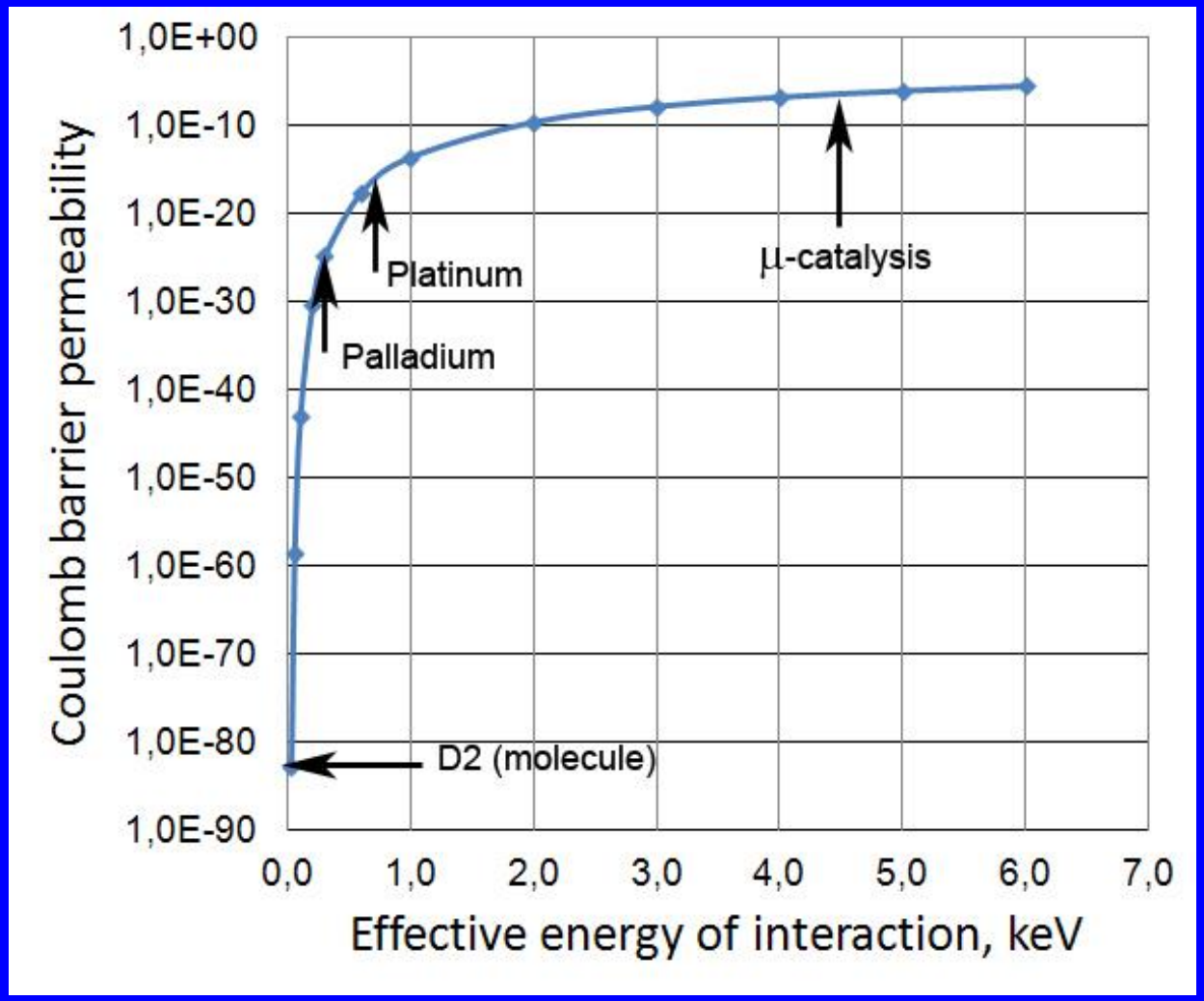


Сколько дейтерия можно разместить в ячейке палладия?

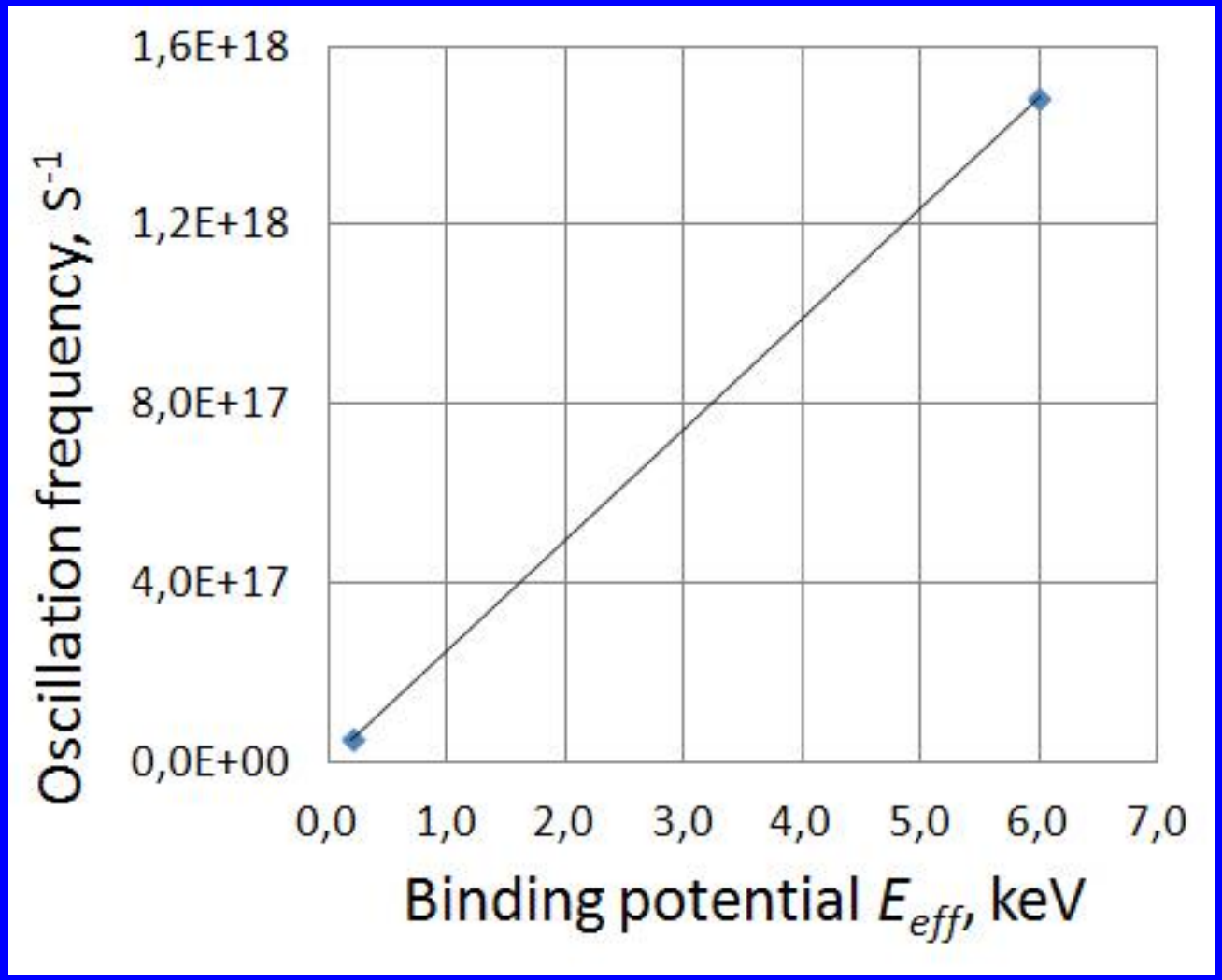


Проницаемость кулоновского барьера для DD синтеза

$$P = e^{-2\pi\eta} \quad (2\pi\eta = 31.41/E_{eff}^{1/2},\ E_{eff} \text{ в кэВ})$$



Частота осцилляций $\nu \cong E_{eff} / h$ ($h=6.5\times10^{-34}$ Js, 1 eV = 1.6×10^{-19} J)



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.*

13/2/2012

Дорогой Эдуард Николаевич!

Ваше письмо мне показалось интересным. Мы с Я.Б.Зельдовичем думали о ядерном синтезе в химических соединениях, но не нашли ни одного, где расстояние между ядрами было бы меньше, чем в молекуле водорода. Может быть, такое действительно осуществляется в имплантантах.

Вместе с тем, фактор выигрыша в вероятности реакции в мезомолекуле (при μ-катализе) по сравнению с реакцией «на лету» пропорционален отношению куба межатомного расстояния к размеру мезомолекулы и составляет в конденсированном веществе около 10^6. В Вашем случае такого выигрыша ожидать не приходится (максимум порядок).

Я совершенно не допускаю того, что синтез может быть без испускания нейтронов. Для этого нет физических оснований.

Я постараюсь выкроить время, чтобы подробнее изучить Вашу статью в ЯФ.
С наилучшими пожеланиями,

С.Герштейн

В поисках вечного двигателя

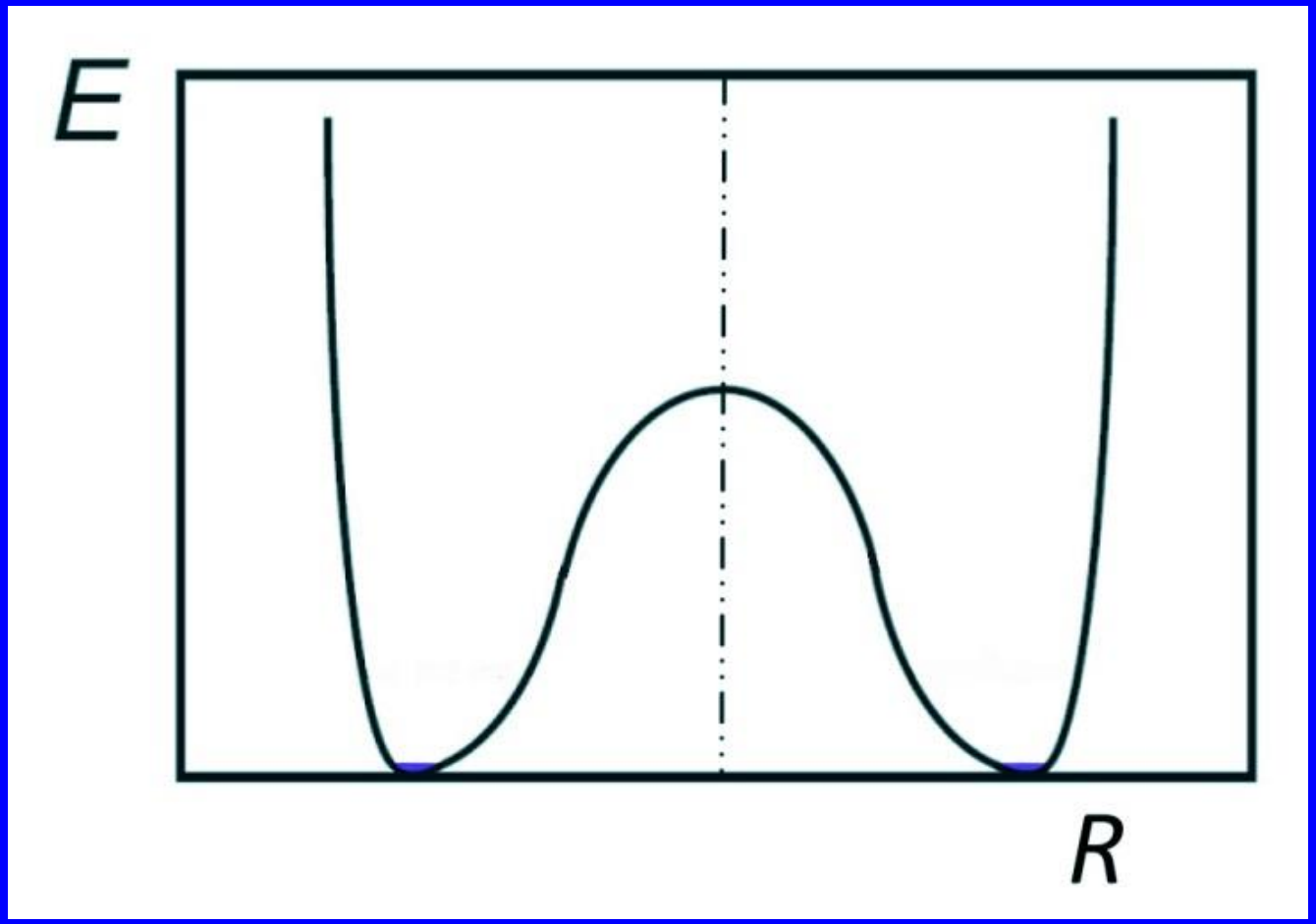
Л.Н. Богданова, С.С. Герштейн, Л.И. Пономарев

“При всех этих разногласиях спорящие солидарны в том, что явление «холодного синтеза», даже будучи доказанным, не имеет практического значения в том его виде, который восходит к работе Понса и Флейшмана, и не только по причине его нестабильности (100% воспроизводимость так и не достигнута), но главное – по малости генерируемой дополнительной энергии”.

“Так что же это: эпохальное открытие нового взаимодействия в природе, отличного от всех известных? Или ошибка (либо и того хуже - банальная, хотя и широкомасштабная афера)? Каждый для себя сам вправе ответить на этот вопрос, но вероятность второго исхода несравненно выше. Во всяком случае, «момент истины» уже близок и ответ на этот принципиальный вопрос вскоре будет получен”.

“Здесь можно упомянуть также Нобелевского лауреата Юлиана Швингера, профессоров Скарамуцци, Препарата, Кима, а в России – Рухадзе, Цыганова и др. Они, без сомнения, знакомы с аппаратом современной физики, но используют его с нарушением базовых принципов научной методологии: непременная воспроизводимость эксперимента и непротиворечивость его интерпретации”.

Возможная причина замедления скорости ядерных распадов при уменьшении энергии возбуждения – остаточный кулоновский барьер между ядрами дейтерия внутри потенциальной ямы сильных взаимодействий. Система становится метастабильной при близких к нулю энергиях возбуждения. Для нейтронов работает “принцип ослабления корреляций с расстоянием (Н.Н.Б.)”?



Виртуальные фотоны в стабильной системе (Ричард Фейнман)

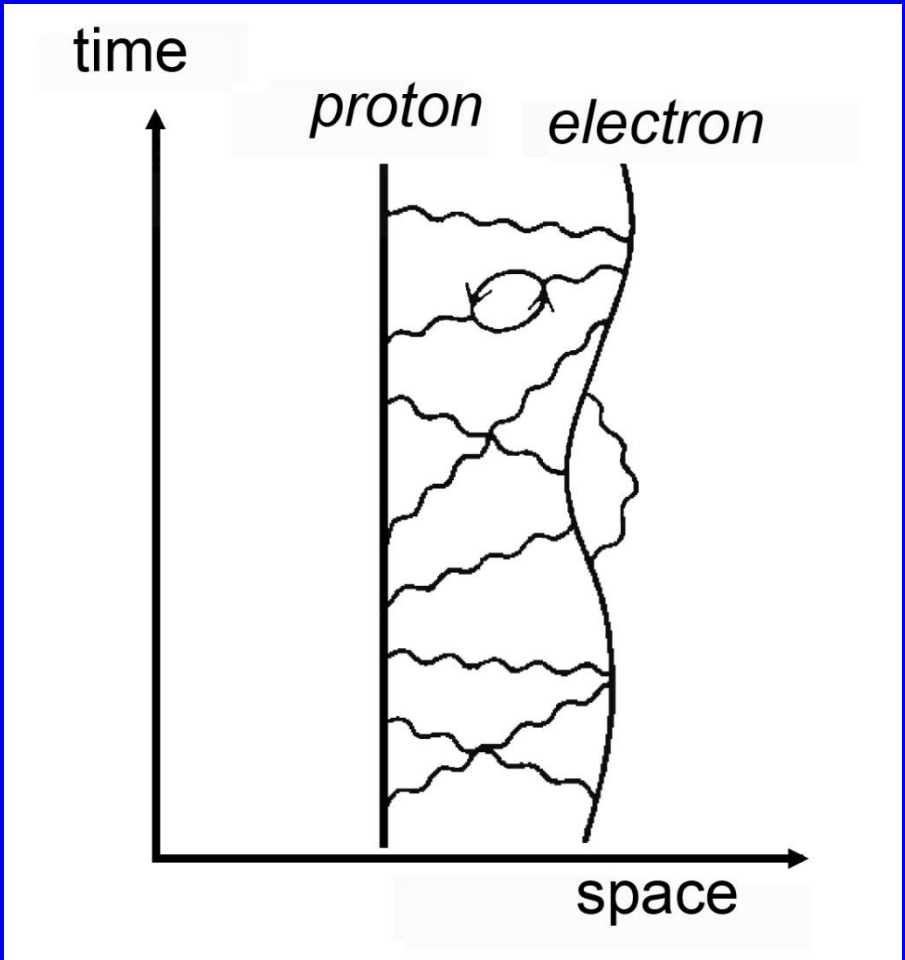
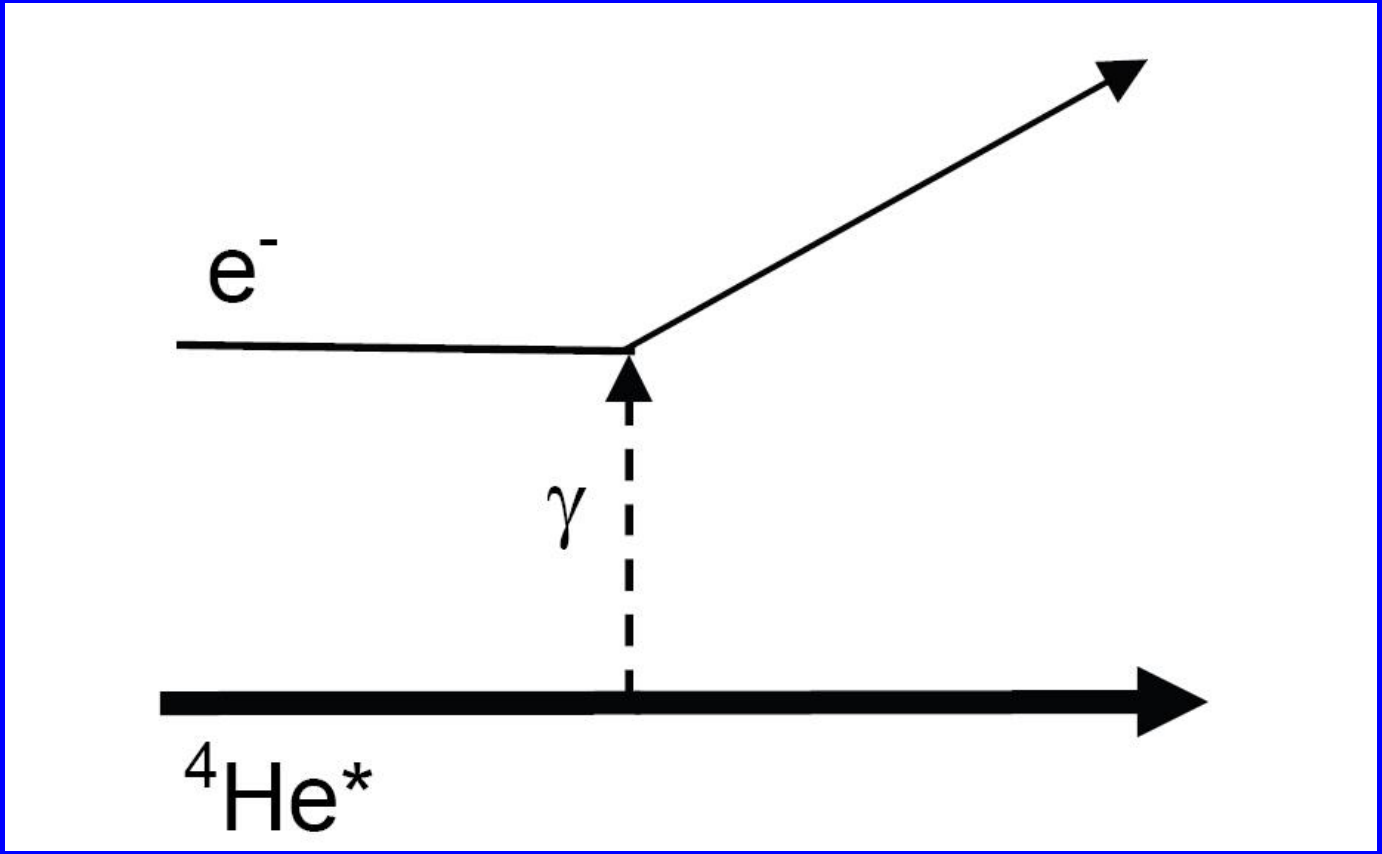
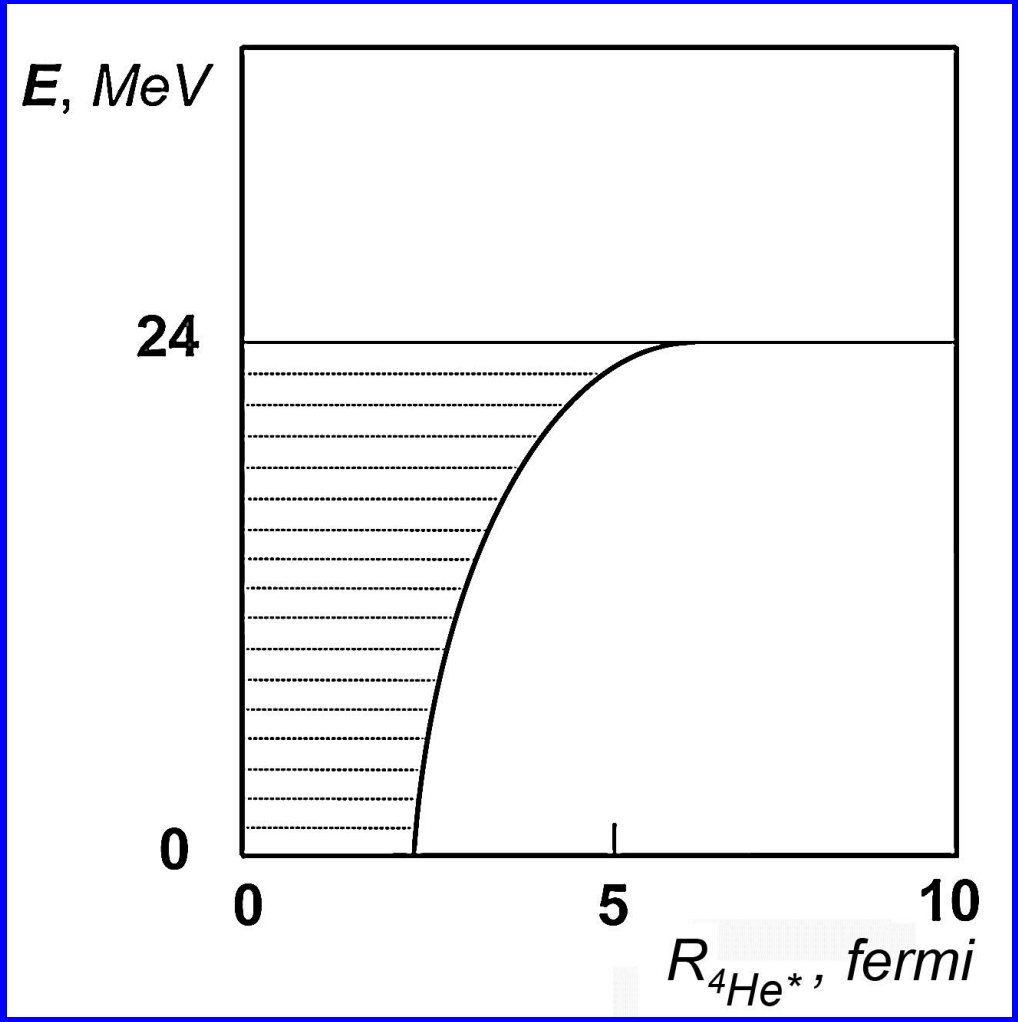


Диаграмма процесса, обеспечивающего “термолизацию” DD-синтеза в проводящих кристаллах. Виртуальный фотон испускается ядром $^4He^*$.



Возможная энергетическая диаграмма возбужденного ядра $^4He^*$.



Как нам кажется, в затянувшейся истории холодного синтеза постепенно открывается тайна этого любопытного и загадочного феномена. Помимо практической пользы, которую может принести применение этого явления для будущей энергетики, научному сообществу полезно учесть социологические уроки, которые мы получили в процессе столь длительного отторжения этой блестящей и в значительной степени случайной научной находки. Хотелось бы выразить особую признательность ученым, не согласившимся с отрицательным вердиктом, поспешно вынесенным около двадцати лет тому назад по отношению к их открытию подавляющим большинством ядерных физиков.

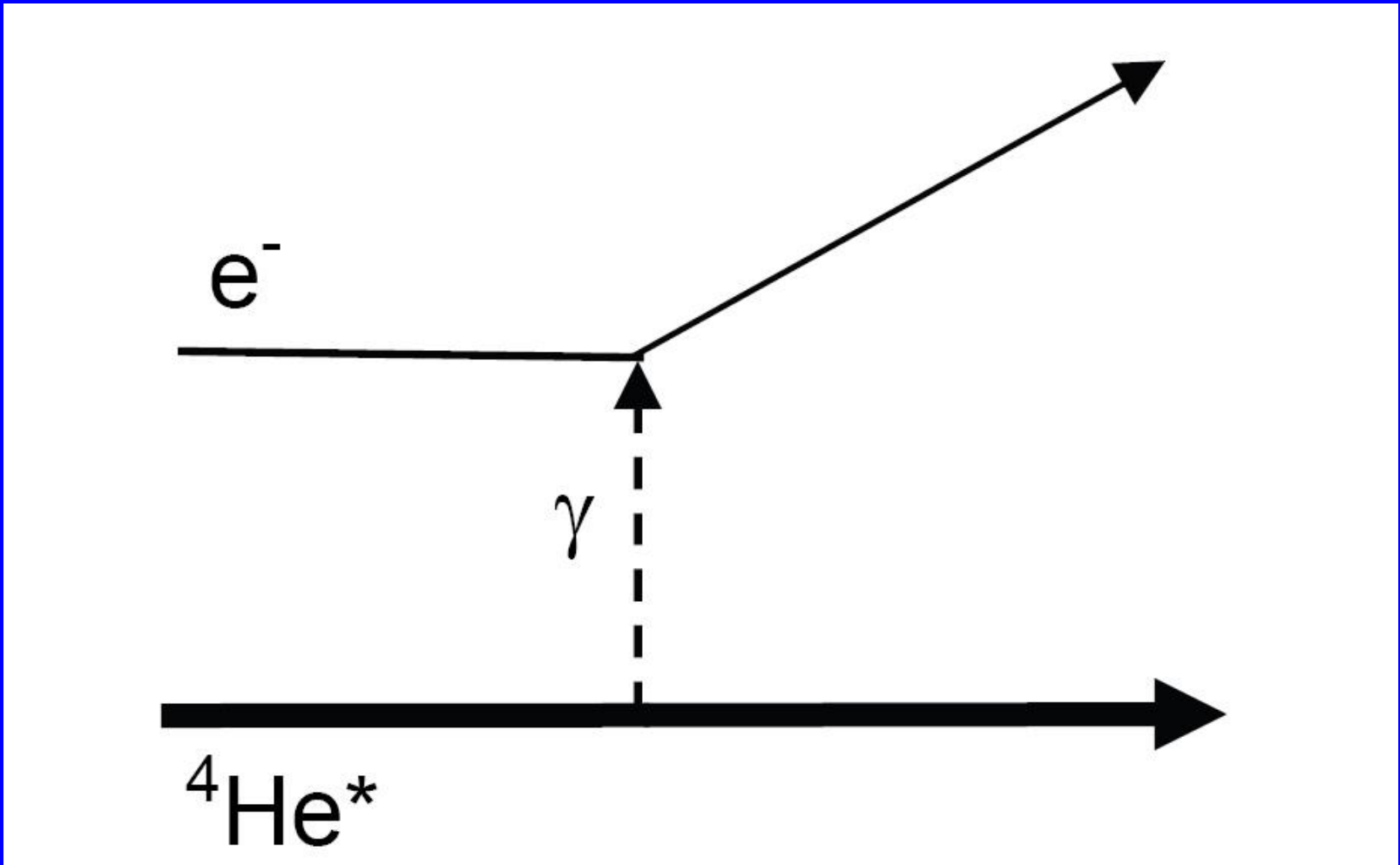
Особенности поведения примесных атомов в проводящих кристаллах

Э.Н. Цыганов
Юго-Западный Медицинский Центр Техасского Университета, Даллас, США
В.М. Головатюк, С.П. Лобастов
Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия
М.Д. Бавижев
Северо-Кавказский Государственный Технический Университет, Ставрополь, Россия
С.Б. Дабагов
INFN – Национальная Лаборатория Фраскати, Рим, Италия

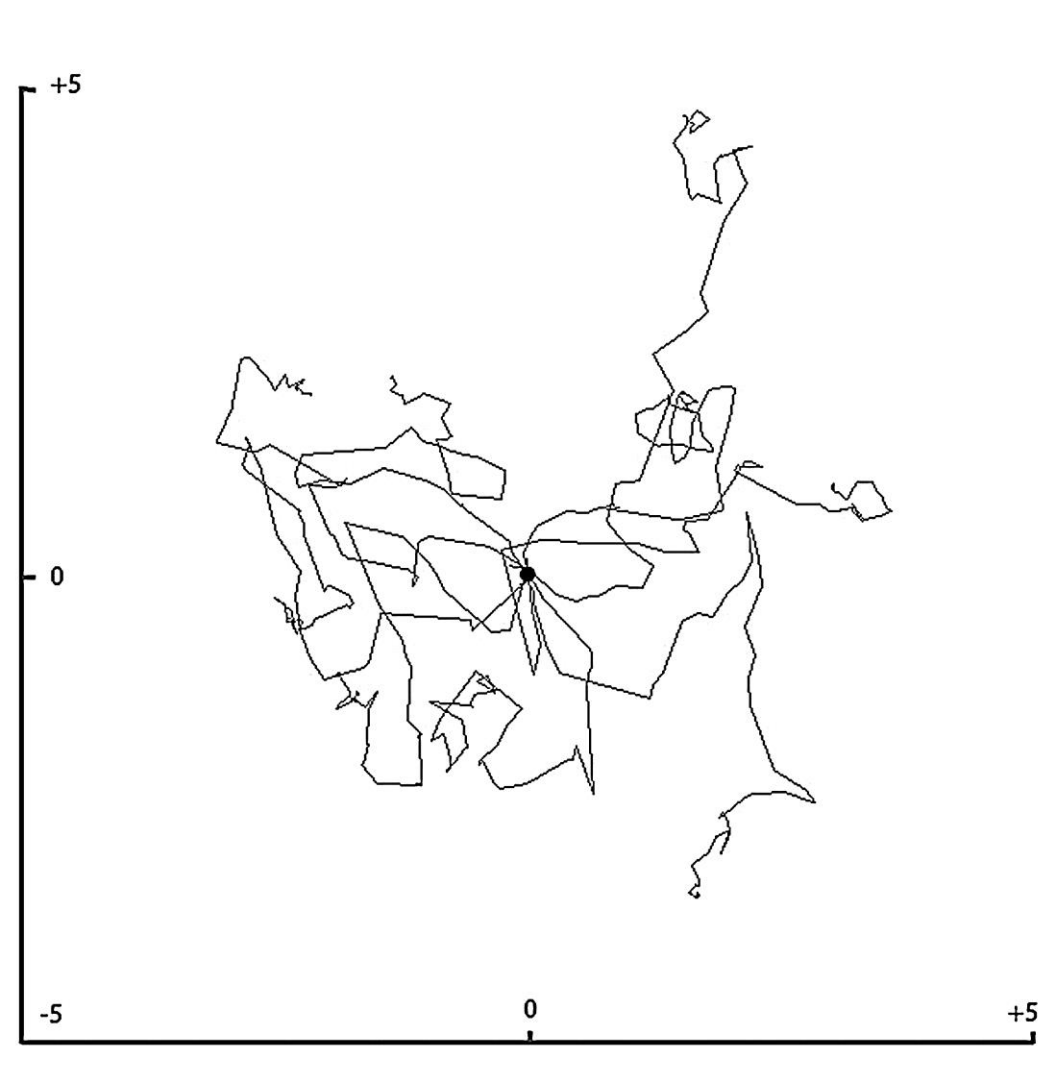
Абстракт

Экспериментальная регистрация низко-энергетических электронов, которые образуются после реакции слияния двух дейтронов в кристалле палладия при очень низких энергиях возбуждения, была промоделирована методом Монте Карло.

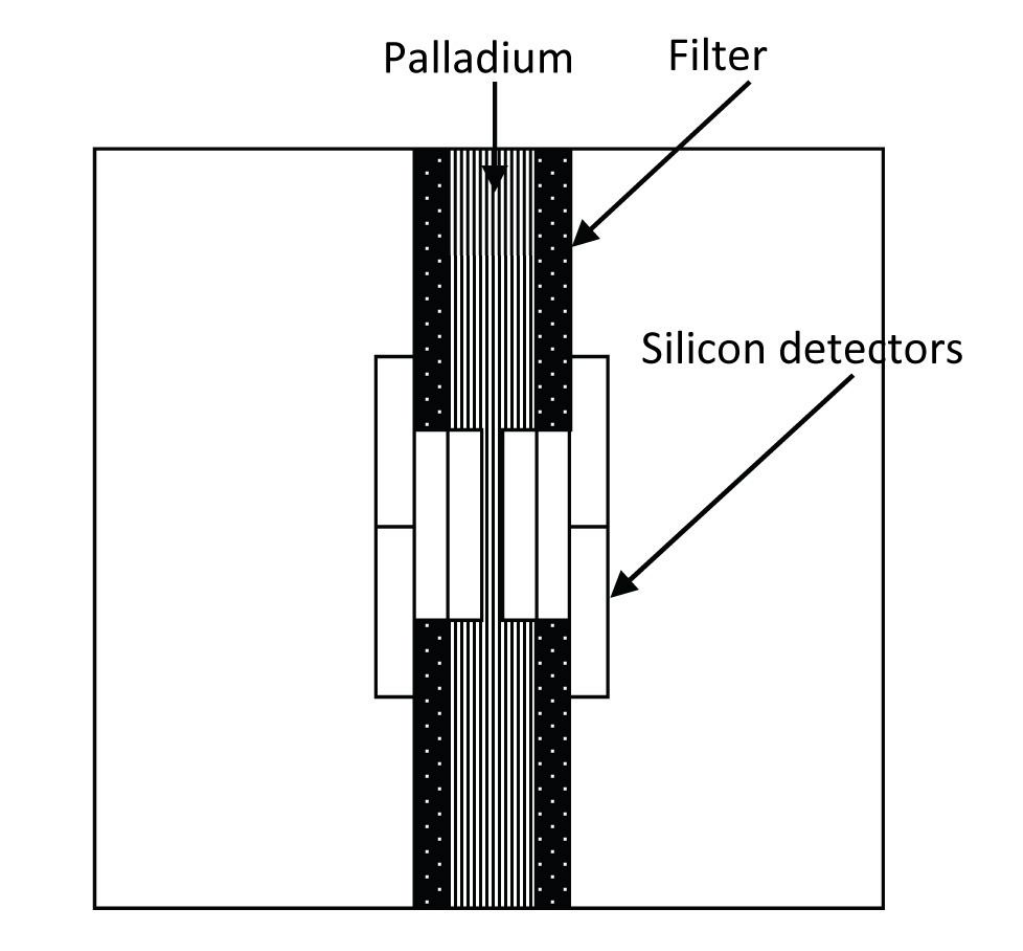
Диаграмма процесса, обеспечивающего “термолизацию” DD-синтеза в проводящих кристаллах.



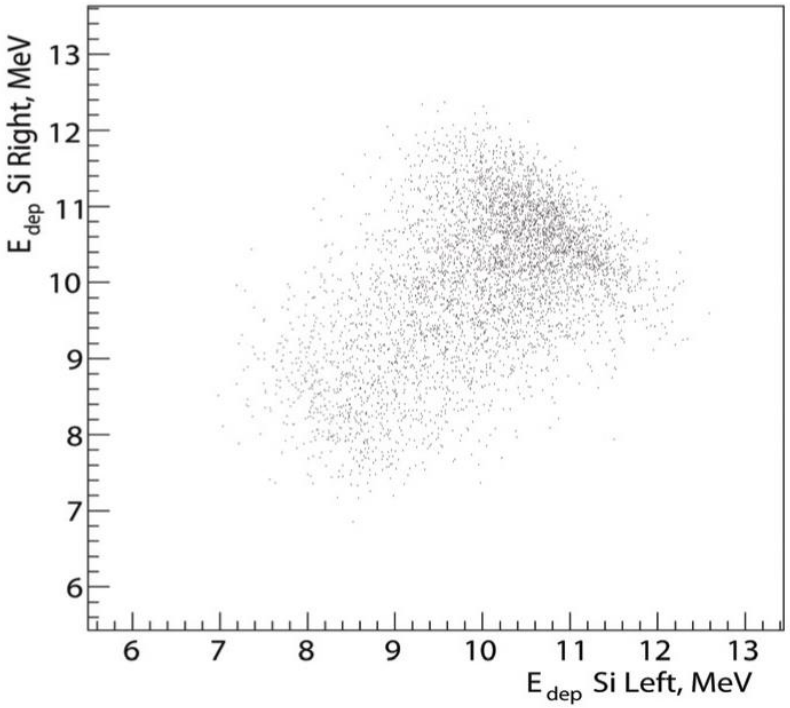
Траектории электронов (Монте Карло), генерированных в процессе холодного DD-синтеза в палладии. Размеры в микронах.

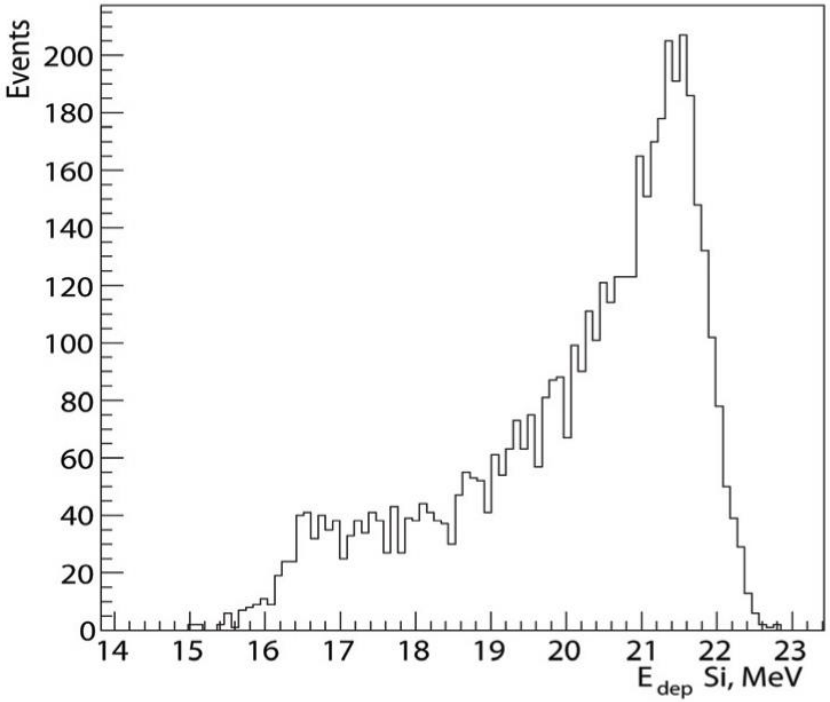


Двухсторонняя схема эксперимента. Несколько кремниевых полупроводниковых детекторов расположены по обе стороны палладиевой фольги и включены на совпадения.

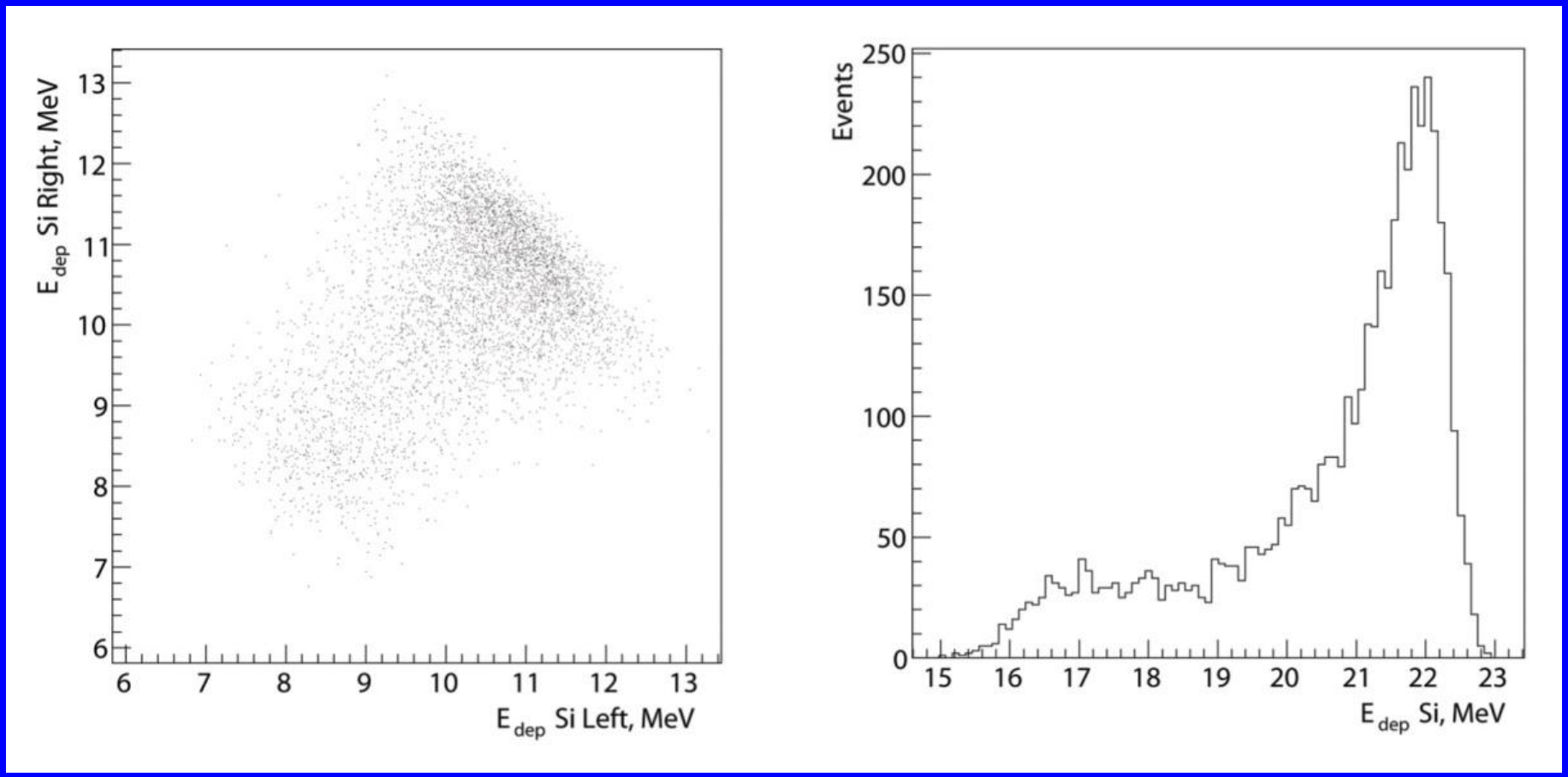


Слева – суммарная энергия 60 кэВ электронов в детекторах с левой и правой сторон палладиевой фольги толщиной 0,01 микрометра. Справа – полная выделившаяся энергия.

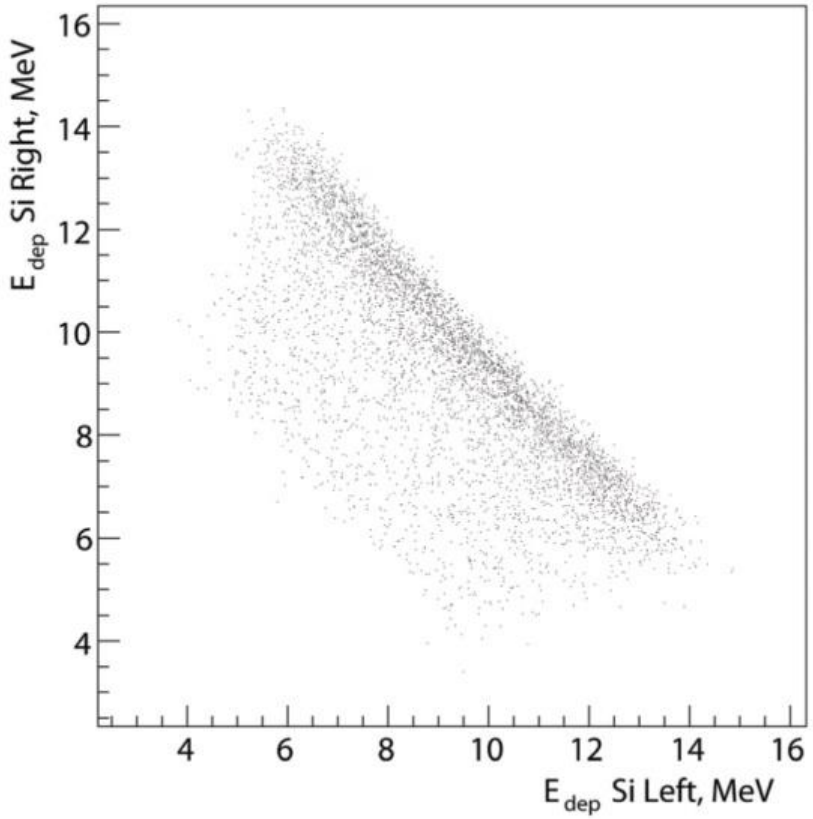


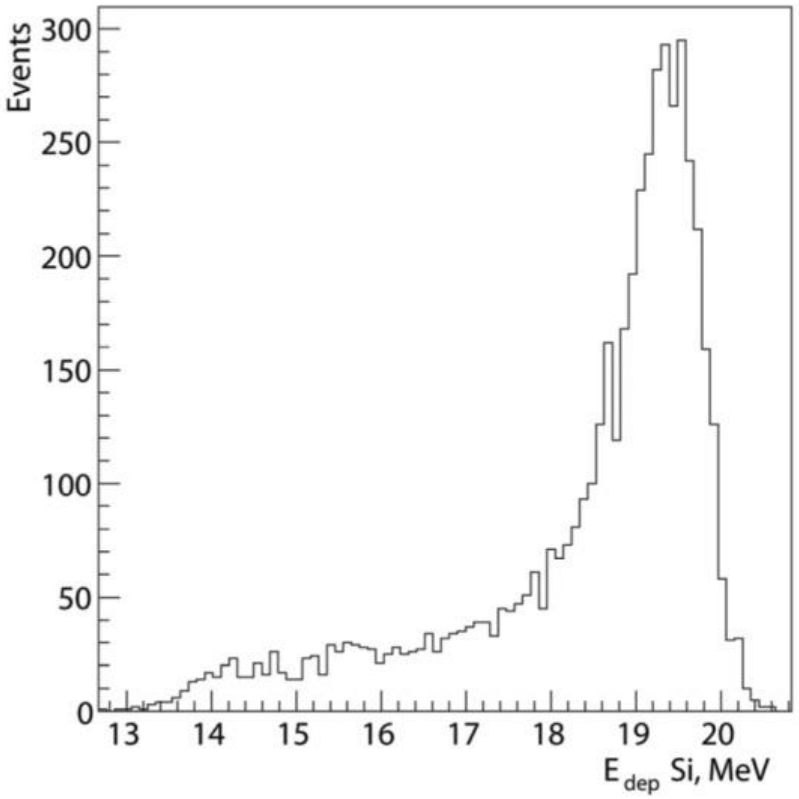


Слева – суммарная энергия 60 кэВ электронов в детекторах с левой и правой сторон палладиевой фольги толщиной 0,1 микрометра. Справа – полная выделившаяся энергия.

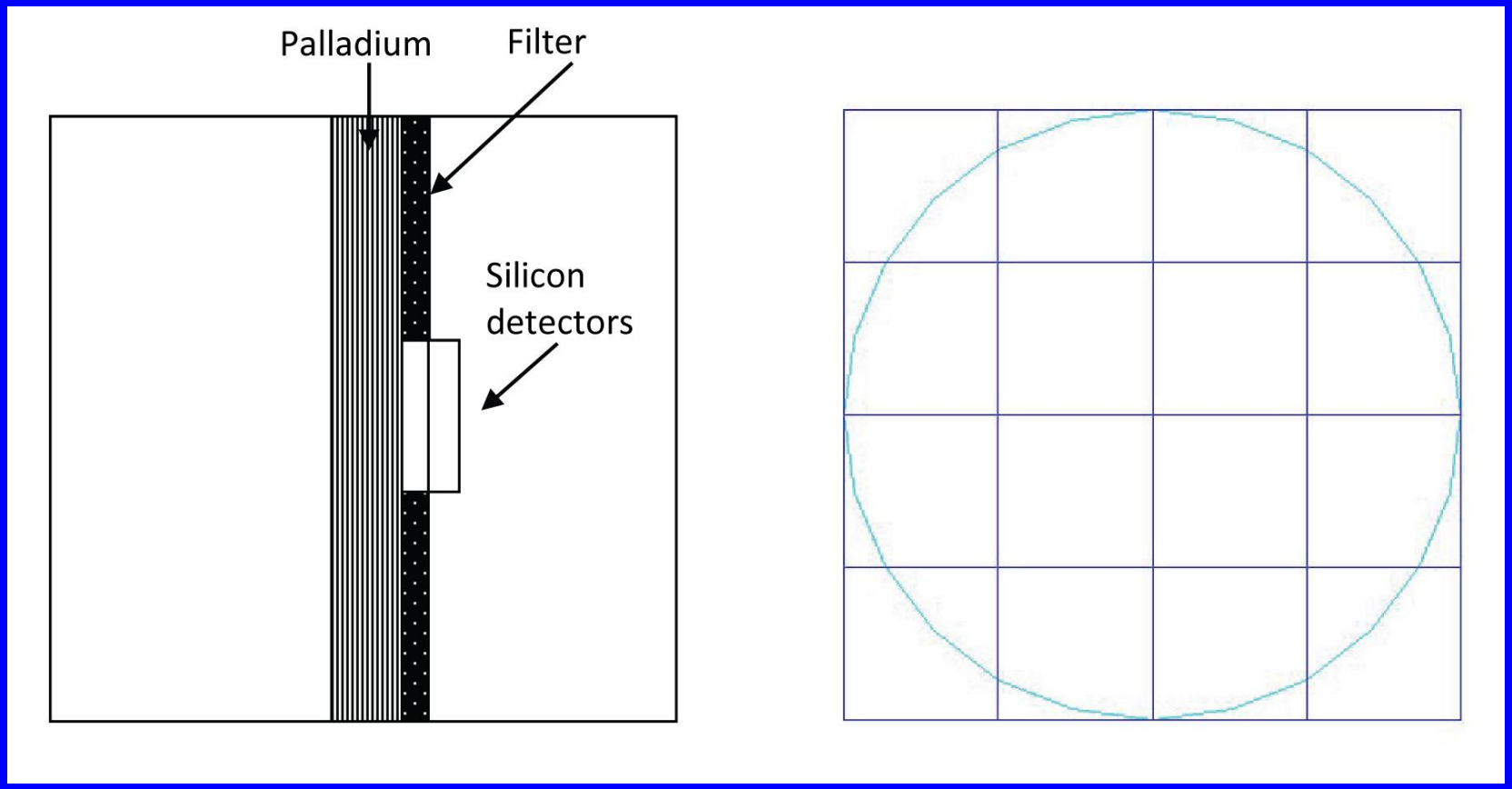


Слева – суммарная энергия 60 кэВ электронов в детекторах с левой и правой сторон палладиевой фольги толщиной 1 микрометр. Справа – полная выделившаяся энергия.

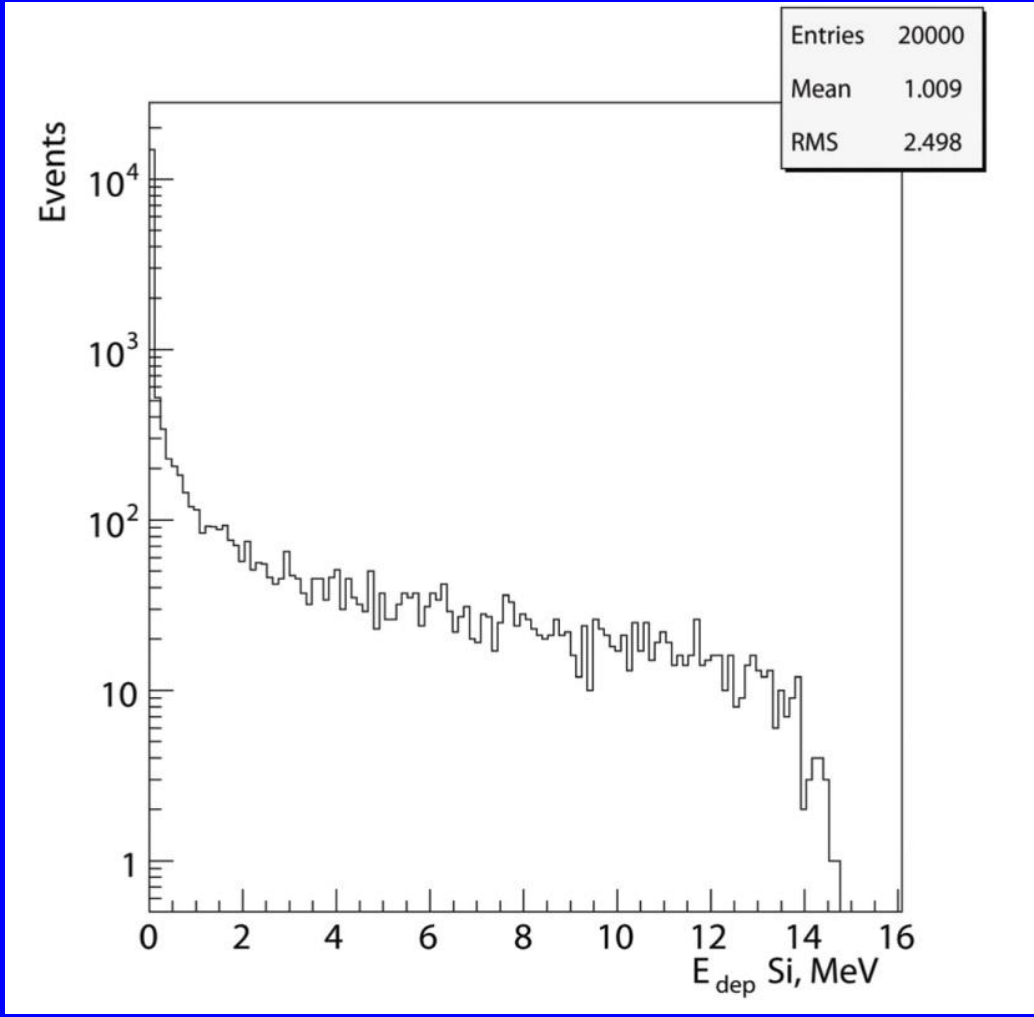




Одностороняя схема эксперимента. Несколько полупроводниковых кремниевых детекторов расположены с одной стороны палладиевой фольги и включены на совпадения. Слева – вид сбоку, справа – относительные позиции апертуры и детекторов.



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



Спасибо за внимание!