

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1989/10

Р.Н.Кузьмин
Б.Н.Швилкин

ХОЛОДНЫЙ
ЯДЕРНЫЙ
СИНТЕЗ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

10/1989

Издается ежемесячно с 1967 г.

Р. Н. Кузьмин,
Б. Н. Швилкин

ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ



Издательство «Знание» Москва 1989

ББК 22.38
К 89

Авторы: КУЗЬМИН Рунар Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета МГУ им. Ломоносова; ШВИЛКИН Борис Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же факультета.

Редактор: КУТУЗОВА К. А.

17—18 ноября 1989 года
состоится Учредительный съезд Физического общества СССР.
Открытие съезда 17 ноября 1989 года
в Актовом зале МГУ им. М. В. Ломоносова
на Ленинских Горах.

Оргкомитет ФО СССР

Кузьмин Р. Н., Швилкин Б. Н.

К 89 Холодный ядерный синтез. — М.: Знание, 1989. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 10).

ISBN 5-07-000927-3

15 к.

В брошюре описываются результаты первых экспериментов по холодному ядерному синтезу и делаются попытки возможного объяснения этих результатов. Привлекаются представления о мюонном катализе и ядерных реакциях в твердых телах при движении ускоренных заряженных частиц.

Рассчитана на круг читателей, интересующихся достижениями и проблемами современной физики.

1604080000

ББК 22.38

ISBN 5-07-000927-3

© Издательство «Знание», 1989 г.

ВВЕДЕНИЕ

Природа создала гигантские естественные синтезаторы ядер. Солнце и другие звезды светят, как установили ученые, благодаря постоянно поддерживаемой в естественных условиях реакции ядерного синтеза, при которой происходит превращение водорода в гелий. Вполне естественно, что, имея наглядный аналог, ученые продолжили свои изыскания и на Земле. С 1951 г. ведутся работы по решению проблемы управляемого ядерного синтеза в лабораторных условиях, и уже имеются проекты промышленного масштаба. На расширение исследований тратятся большие деньги: миллиарды рублей, долларов, фунтов стерлингов, франков, марок, иен и других, менее известных, валют.

Главным основанием для расходов средств является истощение энергетических ресурсов природного происхождения. Тают запасы угля, нефти и даже урана, который медленно, но так же, как и другие невозполнимые источники энергии, пожирается в топках атомных электростанций. С другой стороны, запасов водорода хватит на миллионы лет, так как в необозримых просторах Мирового океана содержится 0,015% одного из изотопов водорода, дейтерия, — самого дешевого топлива. Необходимо найти безопасный и экологически чистый способ выделения ядерной энергии из водорода или его изотопов: дейтерия и трития. Неуправляемый ядерный синтез люди уже осуществили, проведя многочисленные взрывы водородных бомб. Взрывов над Хиросимой и Нагасаки было достаточно, чтобы убедиться в неизбежном конце человечества в ядерной войне. Однако потребовался еще и Чернобыль, Три-Майл-Айленд и более «мелкие» аварии подводных атомных лодок, чтобы понять, что выпустить ядерного джинна легче, чем его укротить. И все же вопрос об источниках энергии для

человечества оказался важным. Нельзя же тратить невозполнимые ресурсы органического топлива! Вот почему так велико желание избавить будущих землян от надвигающегося энергетического голода и сохранить им уголь и нефть, неповернутые вспять реки, оставить живописную природу хотя бы такой, какой мы ее видим сейчас, а не создавать им холодный лунный пейзаж из отвалов пустой породы.

Непростая это задача — укротить плазму Солнца в лаборатории: Физики после долгих лет борьбы за идею осознали, что проблема управляемого термоядерного синтеза настолько трудна, что ее можно решить лишь коллективными усилиями ученых разных стран. Появилось международное сотрудничество. Как оно родилось — вероятно, опишут историки науки. Огромную роль сыграла инициатива СССР по снятию секретности с работ по мирному применению термоядерных реакций, по мирному использованию атомной энергии.

Сейчас, в эпоху гласности и перестройки, принятия нового мышления для Советского Союза и всего мира, приятно вспомнить, что весной 1956 г. в Харвеллском атомном центре в Англии И. В. Курчатов, главный атомщик Советского Союза, рассказал об экспериментах, в которых ядерные реакции используются для мирных целей — получения электроэнергии. Международному сообществу ученых предстояло сделать шаг от водородной бомбы к мирному земному укрощенному Солнцу!

В настоящей брошюре сделана попытка дать освещение проблемы холодного ядерного синтеза. Над этой проблемой интенсивно поработали и многочисленные последователи американских «первооткрывателей», Флейшманна и Понса, — ученые и журналисты. Мы не претендуем на высказывание истины в конечной инстанции, но излагаем проблему «холодного ядерного синтеза» в таком аспекте, который нам кажется наиболее правильным.

Спустя два месяца после «открытия» Флейшманна и Понса, а также экспериментов Джоунса (все исследователи из штата Юта, США) прояснилось немного. Похоже, однако, что большинство ученых, которые занимались электролизом по методике Флейшманна и Понса, не подтвердили их результатов. Некоторый выход нейтронов, в несколько раз превышающий фоновое зна-

чение, наблюдали не только Джоунс, но и другие ученые, в том числе и авторы брошюры. Мы постарались снять драматизм общей ситуации, прибегнув к спокойному изложению фактов.

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Термоядерные реакции, или реакции синтеза (слияния) ядер, были открыты еще в 30-х годах. Они проходят в недрах звезд и нашего Солнца и состоят в слиянии ядер водорода в ядро гелия. Реакция экзотермическая, то есть она идет с огромным выделением энергии. Таких экзотермических реакций несколько, но, чтобы они проходили, нужна температура в десятки миллионов градусов. Эффект очевиден. Солнце излучает энергию реакций в виде квантов света и тепла. Взорвав атомную, а затем и водородную бомбы, человечество убедилось не только в том, что оно имеет оружие колоссальной разрушительной силы, но и в том, что температуру в миллионы градусов можно получить рядом, на Земле.

Энергия взрыва водородной бомбы настолько велика, что все электростанции Земли ее вырабатывают только за неделю. Надо укротить ядерный взрыв, заставить термоядерные реакции протекать медленно, а главное — управляемо. Понимание важности проблемы энергетического голода привело к тому, что идея об управляемом термоядерном синтезе получила гражданство.

Проведем маленький экскурс в ядерную физику, как говорят иногда, в рамках поставленной задачи. Советский ученый Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гайзенберг уже весной 1932 г. знали, что ядро состоит из протонов и нейтронов, между которыми действуют ядерные силы. Эти силы очень велики, но они короткодействующие. Необходимо всего на 10^{-14} — 10^{-15} м сдвинуть протоны, чтобы возникла ядерная реакция. Но перешагнуть через это расстояние оказалось нелегко. Протон — это ядро атома самого легкого элемента водорода, у которого заряд нейтрализован одним электроном.

Используя формулу Эйнштейна $E=mc^2$, можно подсчитать, какая энергия заключена в этом ядре. Масса протона $m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, скорость света $c=3 \cdot 10^8$ м/с. Возводим c в квадрат и перемножаем. Результат равен

$1,5 \cdot 10^{-10}$ Дж, или 938 МэВ. В ядерной физике используются единицы $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Энергию в 1 эВ при тепловом движении частицы приобретают при температуре 11 600 К. Можно оценить энергию, содержащуюся в 1 м^3 водорода, где «обитает» $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул H_2 или $5,4 \cdot 10^{25}$ протонов. Полная энергия составит $8,1 \cdot 10^{15}$ Дж, или $2,25 \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, что примерно составляет выработку электроэнергии нашей страны за один день.

У водорода имеются более тяжелые изотопы: дейтерий — D и тритий — T, которые принято обозначать также ^2H и ^3H . Они содержат соответственно дополнительно к протону один или два нейтрона. Казалось бы, необходимо сложить сумму масс нуклидов, чтобы получить массу протона. Но дело оказалось сложнее. В единицах атомной массы (а. е. м.), равной $1/12$ массы изотопа углерода ^{12}C , масса электрона $m_e = 0,000548$ а. е. м., протона $m_p = 1,007276$ а. е. м., нейтрона $m_n = 1,008865$ а. е. м., а сумма для сложных изотопов оказывается меньше его составляющих частей. Для дейтерия 2,0141 вместо 2,0165, для трития — 3,0165 вместо 3,2519. При соединении нуклонов разница масс переходит в колебательную энергию частиц или передается фотону, испускаемому в реакции. Никаких нарушений законов сохранения массы или энергии поэтому не происходит. Была изучена зависимость энергии связи частиц в ядре, приходящаяся на одну частицу (нуклон), от массового числа ядра (рис. 1). Очень резкий рост для легких ядер переходит после бора в плавную кривую с максимумом у ядра железа $^{56}_{26}\text{Fe}$, после которого энергия связи на один нуклон падает. При большом числе частиц в ядре расстояние между ними увеличивается, а энергия связи ослабевает. Положительные заряженные протоны все сильнее расталкиваются, поэтому ядра после урана и тория неустойчивы: они самопроизвольно распадаются.

Высвободить ядерную энергию из ядер можно поэтому двумя путями: расщепляя тяжелые ядра на осколки с массовым числом ~ 60 , для которых энергия связи максимальная, то есть производя деление, или соединяя легкие ядра, то есть производя реакцию синтеза, что ведет к получению более тяжелых по массе ядер.

Первый путь — это реакция деления, которая может

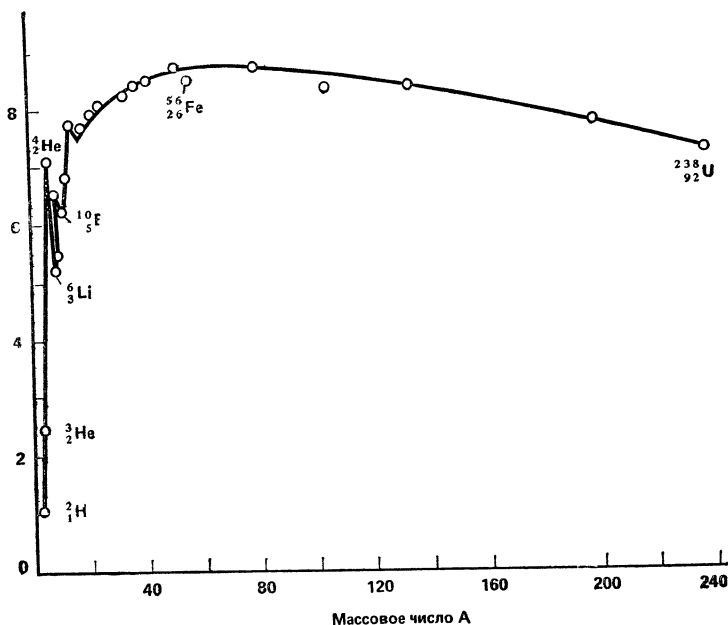
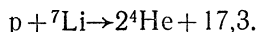
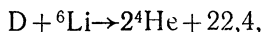
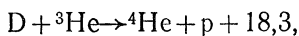
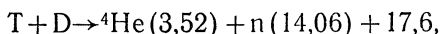
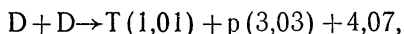
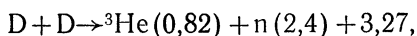


Рис. 1. Зависимость энергии связи ядер от массового числа ядра

быть осуществлена для элементов от трансурановых до железа. Второй путь — ядерный синтез, возможный для первой ветви от водорода до железа. Оба вида реакций сопровождаются выделением дополнительной энергии, которое происходит за счет разрыва связей между протонами и нейтронами в ядре. Но, чтобы получить эту избыточную энергию, требуется произвести работу над разрушением или преодолением ядерных сил. Здесь мы не будем касаться первого пути. После черновильской аварии многие поняли, что такое реакция деления. Об этом писала неоднократно даже «Литературная газета». Создание безопасной атомной энергетики, основанной на реакциях деления урана и плутония, продолжается, и она будет еще сотни лет служить человечеству. Но это, как мы уже указали, не снимает с повестки дня вопрос об использовании экологически более чистой реакции с использованием явления слияния легких ядер.

Чтобы осуществить реакцию синтеза, необходимо

преодолеть электрическое отталкивание ядер, проникнуть через кулоновский барьер. Силы электрического отталкивания зависят от заряда ядер: чем больше заряд, тем больше силы. По закону Кулона для сближения ядер с зарядами q_1 и q_2 , находящимися на расстоянии r , следует затратить энергию $E = kq_1q_2/r$. Действие ядерных сил становится заметным на расстоянии $r = 10^{-14}$ м; при еще меньших расстояниях ядерные силы преодолевают кулоновское отталкивание и ядра сливаются. Только для легких ядер: изотопов водорода, гелия и лития энергия электрического отталкивания невелика. Для изотопов водорода она составляет 0,15 МэВ, что отвечает температуре $\sim 1,6 \cdot 10^9$ К. Больше миллиарда градусов! Для остальных ядер вплоть до железа уже требуются немыслимые температуры: конечным продуктом на поверхности нейтронной звезды является железо ($^{56}_{26}\text{Fe}$). При участии легких ядер можно выполнить разнообразные реакции ядерного синтеза. Приведем реакции водородного цикла:



Цифрами указаны энергии частиц. Выделяющаяся энергия измеряется миллионами электронвольт. Если сопоставить энергию выделения с затратами на преодоление кулоновского барьера, то мы увидим явный выигрыш в энергии. Помимо энергетических затрат, указанных выше для слияния изотопов водорода, укажем, что для реакций с гелием они в 2 раза больше, а с литием — чуть меньше, чем в 3 раза ($\sim 0,5$ МэВ).

При рассмотрении ядерных процессов в качестве единицы измерения эффективного сечения используется 1 барн $= 10^{-24}$ см².

Эффективные сечения различных ядер, представляющих интерес для реакций синтеза, показаны на рис. 2. Для каждой кривой указано число, дающее величину

выделяемой при синтезе ядер энергии в мегаэлектрон-вольтах. Вероятности двух первых реакций примерно одинаковы. Точные соотношения вероятностей этих реакций приведены в таблице. Из таблицы видно, что для энергии относительного движения, изменяющейся более чем на 2 порядка, доля выхода реакции остается практически постоянной.

Энергия относительного движения дейтронов, кэВ	Сечение образования, миллибарны		Доля всех реакций, в которых образуется ^3He , %
	для ^3He	для T	
20	0,25	0,26	49
30	1,15	1,14	50
40	2,65	2,55	51
100	17	15,5	52
1000	96	79	55

На Солнце проходят 2 цикла реакций: водородный и углеродно-азотный. Исходным веществом служат протоны. Интересно отметить, что в углеродно-азотном цикле ядро углерода ^{12}C служит как бы катализатором. В циклы входят многие другие реакции, но процесс разрядки — выделения ядерной энергии происходит медленно. Всего из 1 м³ выделяется 20 Вт энергии. Экономно расходуя свою энергию, Солнце обеспечивает себе длительное существование. Уже более 10^{10} лет оно светит только благодаря своим грандиозным размерам. В водородной бомбе скорость выделения энергии очень велика, $\sim 10^{17}$ Дж за 10^{-5} с, то есть 10^{22} Вт. Скорость превращений в термоядерном реакторе должна быть существенно меньшей, чем в водородной бомбе, но идти быстрее, чем на Солнце. Следовательно, нам надо научиться правильно осуществлять реакции слияния ядер!

Чтобы преодолеть кулоновский барьер, частицам нужно сообщить кинетическую энергию, разогнав их в небольшом ускорителе. Для энергии частиц $\sim 0,130$ МэВ сечение реакции $\text{D}+\text{T}$ максимальное ~ 5 барн, или $5 \cdot 10^{-24}$ см². На рис. 2 приведены экспериментальные данные по измерению сечений в зависимости от энергии налетающей частицы.

Сечений реакций $\text{D}+\text{D}$ и $^3\text{He}+\text{D}$ на 2 порядка мень-

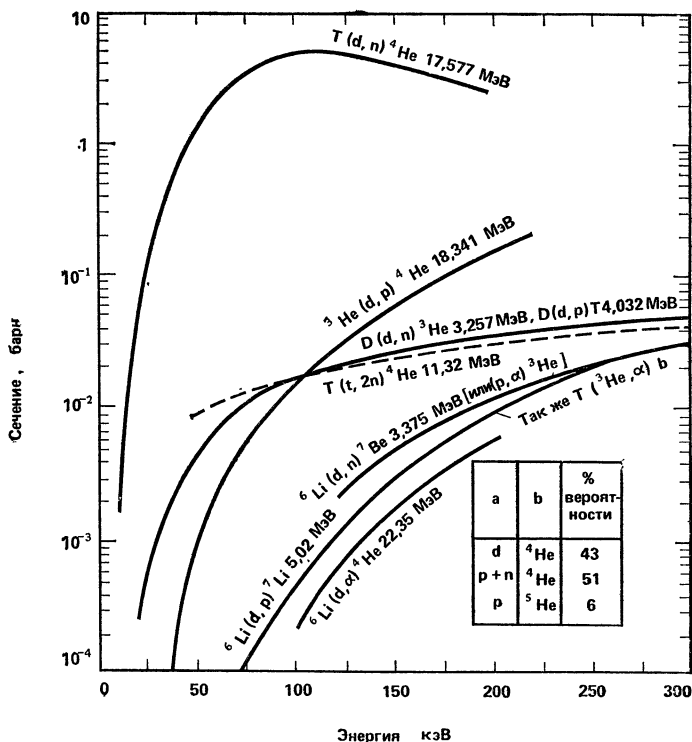


Рис. 2. Сечение реакций ядерного синтеза в зависимости от энергии налетающего ядра

ше, чем $D+T$ при малых энергиях. Чем меньше энергия налетающих частиц, тем осуществить их слияние труднее.

Ускоренное ядро, взаимодействуя с мишенью, теряет значительную часть энергии на ионизацию атомов. Электрическое поле быстро движущегося ядра отрывает электроны от мишени, при этом на каждый акт ионизации затрачивается энергия до 20—100 эВ. Сечение ионизации около 10^{-20} м^2 , а сечение реакции ядерного синтеза $\sim 10^{-28} \text{ м}^2$, отношение их — 10^8 . Обычно полагают, что в таком отношении находится и число актов ионизации, на которую в целом следует затратить 10^8 . $\Delta E_{\text{ионизации}} = 10^8 \cdot (20 \div 10^2) = 2 \cdot 10^9 - 10^{10} \text{ эВ} = 2 - 10 \text{ ГэВ}$

энергии, тогда как на каждую реакцию синтеза приходится всего ~ 20 МэВ. Следовательно, реактор с пучком ядер и мишенью оказывается энергетически невыгодным. Он производит энергии в 100—500 раз меньше, чем затрачено на получение частиц. Это обстоятельство привело к выводу о том, что реакция синтеза может дать положительный энергетический выход только в полностью ионизованной горячей плазме, состоящей из ядер и свободных электронов. Потери энергии на возбуждения и ионизацию частиц в ней исключены. Однако и это не спасает положения. В плазме ядро теряет свою энергию в упругих столкновениях с заряженными частицами, электронами и ионами. Прямой подсчет числа соударений и потери энергии на них показывает, что баланс энергии и в этом случае не является положительным.

Если перегреть плазму, то тепловая энергия мигрирующих частиц становится такой же, как и в пучках, что и обеспечит прохождение ядерных реакций. Кинетическая энергия частиц плазмы, нагретой до температу-

ры T , равна $mv^2/2 = \frac{3}{2} kT$ (k — постоянная Больцмана,

равная $1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К). Отсюда определим температуру плазмы, зная, что энергия теплового движения ядер при максимальном сечении $\sim 0,1$ МэВ. Следовательно, T больше миллиарда градусов. Такие высокие температуры необходимы для сближения взаимодействующих между собой ядер до расстояний, при которых ядерные силы притяжения способны превысить кулоновское отталкивание одноименно заряженных частиц. Ядра имеют некоторое, так называемое максвелловское, распределение по скоростям, поэтому для наиболее энергичных ядер возможна реакция синтеза и при меньшей температуре. Получение высоких температур, а затем и удержание нагретой на миллиард градусов плазмы представляют одну из важнейших проблем на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза. Не менее сложные задачи возникают при создании материалов для термоядерного реактора. В стационарно работающем реакторе тепловые потери должны быть минимальными. Частично можно компенсировать потери за счет энергии термоядерного процесса. Предполагается,

что нейтроны, покинувшие плазму, можно заставить отдавать тепло в специальном поглотителе, преобразуя его в электроэнергию, которую частично использовать опять же для подогрева плазмы. Английский физик Лоусон, рассматривая баланс тепла для плазмы в реакторе с положительным выходом, установил критерий, названный его именем: $n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ с/м}^3$, где n — плотность ядер, τ_E — время удержания энергии в реакторе. Выбор оптимальной плотности для вещества, раскаленного до 100 миллионов градусов, — сложная задача. Чем выше плотность и температура, тем выше давление смеси. Стенки реактора могут не удержать плазму. Уменьшение давления приводит к увеличению времени удержания плазмы. Надо искать оптимальные условия, варьируя и время удержания, и плотность ядер. Мощные потоки нейтронов будут действовать на стенки реактора разрушающе, что отразится на прочности материалов. Но это уже другая проблема — материаловедческая.

На пути осуществления управляемого термоядерного синтеза существует еще целый ряд сложных проблем, таких, как неустойчивость плазмы, поступление в нее примесей и др.

В настоящее время наиболее перспективными считаются установки типа «Токамак», впервые созданные в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова. Газ внутри этих установок полностью ионизован и существует в виде высокотемпературной плазмы. Для существования такой плазмы необходима ее изоляция от стенок камеры, внутри которой заключена плазма. Иначе плазму из-за ее хорошей теплопроводности, а также ухода частиц на стенки удастся нагреть до температур даже порядка нескольких сотен тысяч градусов. Для предотвращения ухода частиц на стенки используются сильные, порядка десятков тысяч гаусс, магнитные поля особой конфигурации, осуществляющие магнитную термоизоляцию плазмы.

В программе управляемого термоядерного синтеза, помимо «Токамаков», квазистационарных систем, получают развитие также и альтернативные им импульсные системы. В таких системах плазма создается при взаимодействии импульсов лазерного излучения или реляти-

вистских электронных пучков с твердотельной мишенью — дейтериево-тритиевой «таблеткой». Быстрый, происходящий за стомиллионные доли секунды нагрев поверхностного слоя небольшой таблетки до температуры в миллион градусов за счет торможения мощного пучка быстрых электронов инициирует маленький термоядерный взрыв. Этот взрыв служит как бы поджигом для реакции термоядерного синтеза легких ядер. Возникающее при взрыве огромное давление ускоряет вещество поверхностного слоя, сжимает и нагревает термоядерное топливо. Реактор такого типа в каком-то смысле аналогичен двигателю внутреннего сгорания. В нем энергия выделяется при периодически повторяющихся микровзрывах.

Общий итог исследований по управляемому термоядерному синтезу на сегодняшний день таков: вкладываемая для осуществления синтеза энергия оказывается большей, чем выделяемая от слияния легких ядер. Осуществление синтеза ядер для получения энергии является несравнимо более трудной задачей, чем осуществление деления тяжелых ядер. Одной из основных помех синтезу ядер служит кулоновское отталкивание одноименно заряженных частиц, препятствующее сближению ядер и проявлению ядерного взаимодействия. Этой проблемы не существует в реакторе деления, поскольку вызывающие деление тяжелых ядер нейтроны беспрепятственно проникают в ядра, не испытывая никакого отталкивания независимо от температуры среды.

ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Ознакомившись с проблемами «горячего» ядерного синтеза, проведение которого требует создания сложных экспериментальных установок для удержания плазмы, мощных лазеров или интенсивных релятивистских пучков электронов, мы перейдем от экстремальных условий к холодному ядерному синтезу, который чаще всего связывают с мюонным катализом.

Мюонный катализ

Сроки в половину и более человеческой жизни для науки не являются удивительными. Явление, которое

предстоит обсудить, далеко уже пережило свою первую молодость. Уже более сорока лет прошло со времени теоретического предсказания и более тридцати — с момента экспериментального открытия реакции синтеза ядер водорода и дейтерия, в которой принимал участие мюон. Он играл роль катализатора реакции. Отсюда и происхождение общего наименования реакций с участием мюонов — «мюонный катализ». Многие физики считают, что мюонный катализ является одним из наиболее перспективных направлений исследований проблемы холодного ядерного синтеза и может стать серьезным конкурентом термоядерному синтезу.

Если бы мы «заглянули в паспорт» мюона, то установили бы, что он был впервые обнаружен американскими физиками К. Андерсоном и С. Ниддермейером в 1936 г. (это официальная дата рождения мюона), что от ближайшего своего родственника — электрона — мюон заимствовал заряд, спин и характер взаимодействия в слабых и электромагнитных полях. Однако его масса примерно в 207 раз больше массы электрона. Именно величина массы мюона повлияла на его стабильность, поэтому живет он недолго, $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, и распадается на электрон и пару нейтрино: $\mu^+ \rightarrow e^- + 2\nu_\mu$.

Существует положительно заряженный мюон μ^+ , который является античастицей к μ^- . На уровне моря мюоны составляют основную компоненту (до 80 %) всех частиц космического происхождения, возникая при столкновении космических лучей с ядрами атомов в верхних слоях атмосферы. Мюоны искусственным путем получают на ускорителях ионов (протонов) высоких энергий. В столкновении с ядрами атомов мишени (например, углерода) возникают пионы, которые быстро распадаются по схеме $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Таким способом можно получить пучок мюонов с интенсивностью до 10^9 частиц/с.

Свойства, аналогичные электронным, мюон проявляет при образовании экзотических атомов. Простейший такой атом состоит из протона с вращающимся вокруг него мюоном. Орбита более тяжелого по сравнению с электроном мюона оказывается расположенной ближе к ядру в 207 раз.

Известно, что μ -мезон может связать 2 атома дей-

терия, образуя мезодейтериевый ион. При этом дейтроны оказываются настолько приближенными друг к другу, что становится возможным их слияние. Освобождающиеся при этом μ -мезоны и могут служить катализатором для дальнейших реакций.

До недавнего времени проведение холодного ядерного синтеза казалось ученым недостижимым. Однако теоретические и экспериментальные исследования последних лет показали, что при определенных условиях 1 мюон может катализировать более 100 реакций синтеза, что раньше представлялось невозможным. Теперь полагают, что холодный мюонный синтез может стать экономически выгодным способом производства энергии.

История мюонного катализа восходит к 1947 г., когда английский ученый Ф. Франк указал на способность мезонов вызывать ядерные реакции. До этого мюон пытались отождествить с частицей, которая, согласно гипотезе японского физика Х. Юкавы, является переносчиком ядерных сил. Мюон и π -мезон космических лучей принимали за одну частицу.

Подтвердить эту гипотезу удалось, проведя анализ необычных треков в фотоэмульсиях, на которых из точки остановки первоначального мезона начинался другой трек. Именно по нему и установили момент рождения новой частицы согласно приведенной выше реакции распада π^- -мезона. Теперь эта реакция изучена, но в то время надо было дать анализ и других вариантов. К тому же в 1947 г. расчет энергии по трекам дал для кинетической энергии мюона не 4,1 МэВ, как теперь установлено, а только в 5,5 МэВ. Последнее значение приводило к энерговыделению реакции синтеза водорода и дейтерия: $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + 5,4 \text{ МэВ}$. Франк не решился ввести новую частицу, но, следуя внутренней логике своих рассуждений, он предположил, что в точке остановки образуется мезоатом. А так как атом нейтрален, то он может способствовать образованию и мезомолекулы $dd\mu$, в которой дейтроны сблизятся до расстояния $5 \cdot 10^{-13}$ м. На таких расстояниях уже могут проходить реакции синтеза. После слияния двух ядер дейтерия мюон освобождается и уносит почти всю выделившуюся энергию. На фотоэмульсии остается память о процессе — новый трек. Нить рассуждений, как показало вре-

мя, была правильной. Но сам Франк из-за ничтожного содержания дейтерия в веществе фотоэмульсии посчитал такой процесс маловероятным и интерпретировал трек как распад π -мезона.

В 1948 г. А. Д. Сахаров, следуя упомянутым рассуждениям в работе Франка, наметил путь использования мюонов. Мюон высвобождается, но при этом вновь образует мезоатом и мезомолекулу и вызывает новую реакцию синтеза. Появляется непрерывность процесса, а мюон становится его катализатором. К сожалению, о работе А. Д. Сахарова, помещенной в отчете ФИАН СССР, было мало кому известно. Через семь лет Я. Б. Зельдович оценил вероятность образования мезомолескулы $p\bar{d}\mu$. В конце 1956 г. американский физик Л. Альварес наблюдал экспериментально явление мюонного катализа. Правильное объяснение опытам Л. Альвареса предложил Эд. Теллер. Механизм реакции был тем же, что и в ранней работе Франка.

Интересно привести выдержку из статьи, опубликованной 29 декабря 1956 г. в газете «Нью-Йорк таймс»: «Открыт третий революционный путь производства ядерной реакции. Он не использует ни урана, как в реакциях деления, ни нагрева до миллионов градусов, как в реакциях синтеза. Новое явление называется «катализом ядерных реакций»... Достаточно любопытно, что открытие сделано не в Ливерморе, где работают над проблемой управляемого термоядерного синтеза, а в Калифорнийском университете в Беркли, где ведутся фундаментальные исследования... Сейчас это явление не имеет коммерческого значения, но оно открывает возможность чрезвычайно важных приложений в промышленности».

Альварес и его группа исследователей думали, что им удалось навсегда решить проблему обеспечения человечества топливом. Оптимизм поубавился, когда было показано, что не все так просто. Только 1 из 10 мюонов в смеси дейтерия и водорода успевал совершить цикл реакций синтеза. Вероятность образования мезомолекул оказалась очень малой. Да и сам процесс поиска мюоном протона в веществе оказался длительным. При образовании мезомолекулы совершается процесс передачи энергии атомному электрону. Но эта лишняя энергия может не передаваться, и мюон не освободится, а останет-

ся на орбите образовавшегося ядра гелия. Для катализа такой мюон потерян. Мюонный ион гелия в отличие от мюонного водорода или дейтерия электрически заряжен, а это служит препятствием для образования из него мезомолекулы. Явление захвата мюона гелием (отравление мюона) сильно ограничивает число возможных слияний ядер.

Несколько более выгодно образование мезомолекул в смеси тяжелых изотопов водорода, дейтерия и трития. По оценке Я. Б. Зельдовича, вероятность «прилипания» мюона к гелию в такой реакции равна одной сотой. Но это ставит ограничение даже для стабильного мюона, который смог бы провести не более 100 циклов катализа. Поэтому в 1958 г. С. С. Герштейн сделал категорический вывод, что катализ ядерных реакций мюонами не может быть использован для целей ядерной энергетики. Явление мюонного катализа, однако, представляло интерес не только для изучения ядерных реакций, проходящих в специфических условиях, но и для исследования некоторых процессов слабого взаимодействия.

Дальнейший успех в изучении образования мезомолекул был получен членом-корреспондентом АН СССР В. П. Желеповым. Он установил, что время образования молекулы велико, $1,3 \cdot 10^{-6}$ с, и сильно зависит от температуры. Такое поведение мезомолекулы связывалось со старой идеей Я. Б. Зельдовича о наличии резонансного механизма образования молекул. В результате точнейших вычислений был проверен резонансный механизм образования молекул $dd\mu$ под руководством профессора Л. И. Пономарева, одного из авторов открытия «Явление захвата отрицательно заряженных π -мезонов ядрами химически связанного водорода». Он же показал, что скорость образования мезомолекулы с тритием еще больше, $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ с. Откуда следовало, что за время жизни мюона может осуществиться более 100 реакций синтеза.

Эксперименты Желепова стимулировали дальнейшее включение в проблему групп исследователей. В нашей стране работы интенсивно продолжались в Ленинградском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова под руководством А. А. Воробьева. За рубежом наиболее активным оказался Ст. Е. Джоунс, американский физик-экспериментатор, профессор физики и аст-

рономии Университета Брайана Янга (штат Юта, США). Свои опыты он начал в 1982 г. в Лос-аламосской национальной лаборатории на мезонной фабрике LAMPF. Ведутся также исследования по мюонному катализу в Резерфордской лаборатории в Англии, Японской национальной лаборатории физики высоких энергий в Цукубе. Предложенная Джоунсом резонансная модель, развивавшаяся Л. И. Пономаревым с сотрудниками, была окончательно подтверждена.

Джоунс, изучая температурную зависимость скорости образования молекул на различных смесях трития и дейтерия, показал, что эксперименты Джелепова правильны, так как при небольшой концентрации трития мюон образует вначале мезоатом с дейтроном, а лишь потом перескакивает на тритий. Температурная зависимость активно проявляется при содержании в смеси более 30% трития. В цикле мезокатализа происходит образование мезоатома трития, затем мезомолекулярного иона, наконец ${}^5\text{He}$, что является конечной стадией ядерного синтеза.

Роль мюона сводится к сближению частиц вначале при образовании мезоатома, затем мезомолекулы и слияния ядер через механизм туннелирования, когда просачивание ядер через барьер становится возможным благодаря включению сильных ядерных взаимодействий. ${}^5\text{He}$ распадается на свободный мюон, который вновь может участвовать в каталитическом процессе, α -частицу (${}^4\text{He}$), нейтрон. При слиянии ядер дейтерия и трития выделяется энергия 17,6 МэВ.

Джоунс показывает, что один мюон может осуществить более 300 реакций синтеза, поэтому можно достичь энергетически выгодного процесса. Однако следует помнить, что на получение мюона требуются энергетические затраты, а именно — энергия на питание ускорителя. В результате ядерной реакции слияния получается тепловая энергия, которую надо обычным способом (в паровых турбинах) преобразовать обратно в электрическую при низком кпд ($\sim 40\%$). Советский физик Ю. Б. Петров из ЛИЯФ им. Б. П. Константинова считает, что мюонный катализ коммерчески невыгоден даже при 500 актах слияния ядер. Но он утверждает, что мюонный катализ хорош не как генератор энергии, а как источник нейтронов с энергией 14 МэВ.

С помощью нейтронов можно превращать ^{238}U в изотоп плутония ^{239}Pu , используемый как топливо в реакторах на тепловых нейтронах.

Таким образом, возникает схема использования мезокаталитических реакторов, в которых камера dt-реакций окружена урановой оболочкой — бланкетом. Сама гибридная схема не нова, она ранее предлагалась для термоядерных реакций.

Конечно, остается проблема «отравления» катализатора из-за прилипания мюона к ядру гелия, утечки трития при критических параметрах работы мезокаталитических реакторов при высоких температурах ($\sim 500^\circ\text{C}$) и давления (~ 3000 атм). Появляются чисто технологические проблемы: материалы из-за насыщения изотопами водорода становятся хрупкими, механическая их прочность значительно уменьшается, а просачивание трития требует разработки специальных покрытий стенок камеры: золочения, покрытия термостойкими эмалями. Возможно создание новых, более «дешевых», дейтронных ускорителей, что также не просто, ибо для их питания нужна мощность стандартного блока атомной электростанции (~ 1000 МВт).

Оптимизм исследователей порой весьма легко охлаждается технологическими проблемами.

Чудеса холодного синтеза

История науки характерна тем, что любое вновь открытое явление активно обсуждается, шлифуется коллективным умом и только затем утилизируется. Изобретения движут и науку, и технику. После открытия высокотемпературной сверхпроводимости казалось, что подобных потрясений научный мир не переживет еще долго. И вот опять не меньшая сенсация: ядерный синтез при комнатной температуре.

Начало событиям было положено телевизионным сообщением компании Эй-би-си о пресс-конференции, которая состоялась в Университете штата Юта 23 марта 1989 г. Согласно этому сообщению химики — англичанин Мартин Флейшманн из Саутгемптонского университета и его американский коллега из упомянутого университета в Солт-Лейк-Сити Стенли Понс — предложили способ осуществления ядерного синтеза при электро-

лизе при комнатной температуре. Необычные условия опыта, сногшибательные рекламные заявления первооткрывателей положили начало бурному шествию по всему миру сообщений Флейшманна и Понса, а также имевшего непосредственное отношение к этой истории американского физика Стивена Джоунса из соседнего университета Брайана Янга того же штата Юта.

Препринты их статей разошлись в тысячах экземпляров, минуя обычный канал публикации научных сообщений в специальных журналах. Но об истории с тяжбой о приоритете между этими двумя группами исследователей несколько позже. А сейчас мы кратко передадим содержание указанных препринтов. Теперь это уже опубликованные статьи, и каждый может прочитать их в научных журналах.

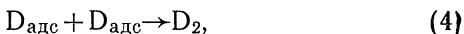
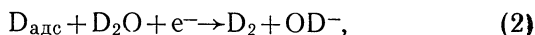
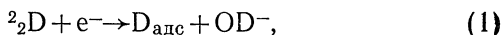
Водород издавна интересовал и химиков, и физиков, и металлургов, а в последнее время им заинтересовались и энергетики и медики. Водород вместе с кислородом играют огромную роль в существовании всего живого мира. Вскоре после открытия водорода в XVIII в. французским ученым Жаном Франсуа Пилатром де Розье проводились опыты по изучению его свойств. Как теперь хорошо известно, водород — бесцветный газ, не имеющий ни запаха, ни вкуса. Ученый не знал этого и, чтобы выяснить эти свойства водорода, несколько раз глубоко вдохнул его, а затем... дунул на пламя свечи. Водород смешался с воздухом, образовался гремучий газ, произошел взрыв. Ученый описал это так: «Я боялся, что у меня вылетят все зубы». К счастью, он серьезно не пострадал.

С тех пор прошло много времени, были открыты изотопы водорода, дейтерий ^2H , или D, и тритий ^3H , или T, различающиеся числом нуклонов. (У водорода один положительно заряженный протон, у дейтерия имеется еще нейтрон, а у трития их два.) Роднит изотопы водорода один-единственный отрицательный электрон. Есть еще одна близкая по свойствам к водороду частица — мюоний, о которой мы упоминали еще в первой части нашего рассказа.

Свойства водорода и его изотопов необычны не только тем, что изотопы различаются по массе, но и тем, что они существенно изменяют физические и химические свойства при соединении с другими элементами

или при образовании твердых растворов внедрения. Изотопы водорода так малы, что свободно размещаются в пустотах решеток (октаэдрических и тетраэдрических) многих металлов и сплавов. Наиболее известны соединения водорода с металлами, так называемые гидриды. Среди металлов по «жадности» к растворению в себе водорода не последнее место занимают палладий, титан, тантал, цирконий, редкоземельные элементы, сплавы ванадия и т. д.

Странное поведение водорода, внедренного электролитически в палладий, изучается уже более 100 лет, а в связи с развитием атомной энергетики было освоено промышленное производство тяжелых изотопов водорода из расплавов. Для выделения дейтерия из щелочного раствора тяжелой воды известны следующие стадии:



которые осуществляются при отрицательных потенциалах относительно +50 мВ по обратной водородной шкале при внедрении водорода в палладий, когда в нем образуется β -фаза. Диаграмма состояния «водород — палладий» включает как твердый раствор водорода в палладии (α -фаза) с отношением концентраций $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}} = 0,02$, так и β -фазу с $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}} = 0,60$ до полного насыщения гидрида палладия (PdH).

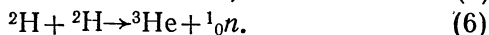
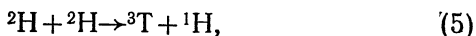
Интересно, что подвижность водорода в палладии довольно велика: коэффициент диффузии для α -фазы $\sim 10^{-7}$ см²/с при комнатной температуре. Есть сведения металлофизиков о том, что значительную роль в явлениях переноса играет перестройка кристаллов при взаимных переходах из α - в β -фазу и обратно, особенно в двухфазной области. Замечено также, что насыщение палладия водородом, а также его потеря (улетучивание) происходят скачками, прерывисто. И совсем удивительно, что внедрение или разрушение водородсодержащих твердых тел может происходить мощным потоком водорода (от 10^{14} до 10^{17} частиц/см²·с).

Схематически процесс дейтерирования описывается реакциями (1)—(4).

Разложение тяжелой воды в конечном итоге приводит к освобождению дейтерия из щелочного раствора D_2O (реакции (1) и (2)) и определяется относительной скоростью этих реакций, а также связанным с ними химическим потенциалом растворенных ионов D^+ . Установление отрицательной разности потенциалов на выходной поверхности палладиевых мембран при выделении из нее тяжелого водорода определяется из баланса всех четырех стадий начиная с (1) по (4). Эксперименты Флейшманна и Понса показали, что химический потенциал может возрастать до очень больших значений: величина $\sim 0,8$ эВ достигается сравнительно легко, но при определенных усилиях можно получить и ~ 2 эВ.

Астрономический масштаб этой последней величины можно легко оценить: чтобы достичь такого уровня с помощью сжатия газообразного дейтерия D_2 (стадия 4), потребуется давление $\sim 10^{26}$ атм. При этом молекулярный дейтерий все равно не образуется, то есть электронная плотность на ядре очень низка, и электроны водорода становятся частью зонной структуры палладия.

Можно предположить, что существует очень высокая степень разделения абсорбированного водорода и дейтерия. Это может быть объяснено тем, что H^+ и D^+ ведут себя в решетке как делокализованные состояния или находятся в очень мелких потенциальных ямах. Если это так, то, учитывая высокое сжатие и подвижность растворенных газов, число близких столкновений должно стать значительным и появляется вероятность ядерного синтеза D^+ по реакциям



Флейшманн и Понс проводили внедрение D^+ в палладий на образцах в виде фольги, прутков и кубиков в растворе с концентрацией 0,1 моль/л $LiOD$ в смеси из 99,5% D_2O и 0,5% H_2O . Потенциалы электродов были измерены по отношению к опорному электроду из палладия с дейтерием, в котором образуются α - и β -фазы в соответствии с равновесной диаграммой состояния (рис. 3). Калориметрические измерения теплового ба-

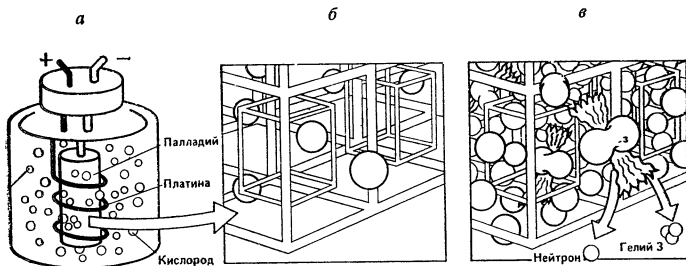
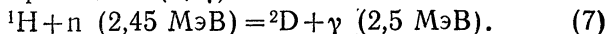


Рис. 3. Ядерный синтез: а) схема электролиза; б) насыщение решетки палладия дейтерием; в) реакция ядерного синтеза в решетке палладия с образованием гелия-3 и нейтрона

ланса проводились в соответствии с равновесной диаграммой состояния при низких плотностях тока ($\sim 1,6$ мА/см²). Использовался листовой палладиевый катод размером 2 мм×8 см×8 см, окруженный платиновым электродом. Калориметрические измерения выполнялись в сосуде Дьюара, помещенном в водяную баню, температура которой поддерживалась на уровне 300 К.

Калориметрические измерения были проделаны при обычной плотности тока при использовании палладия в виде прутков длиной 10 см с различными диаметрами: 1, 2 и 4 мм с проволочными анодами из платины в виде растянутой пружины. Дьюары имели нагреватели из проволоки для компенсации потерь на охлаждение. Перемешивание растворов осуществлялось по мере необходимости пропусканием через них электролитически полученного газообразного дейтерия. Измерения при самых высоких плотностях тока в 512 мА/см² были выполнены с использованием прутков длиной 1,25 см. Спектр гамма-лучей, испускаемых водяной баней, был обусловлен реакцией (п, γ):



Спектр регистрировался с помощью детектора, расположенного над длинным прутком палладия, погруженным в воду, и сцинтилляционного счетчика, данные с которого накапливались в многоканальном амплитудном анализаторе. Палладий был «нашпигован» дейтерием до образования равновесной фазы. Коррекция фона осу-

ществлялась путем вычитания спектра, полученного на расстоянии 10 м в точно такой же водяной бане.

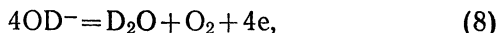
Поток нейтронов из ячейки, содержащей электрод из прутка палладия размером $0,4 \times 10$ см, измерялся стандартным дозиметром нейтронного излучения. Эффективность счета нейтронов с энергией 2,5 МэВ оценивалась $2,4 \cdot 10^{-4}$ и в дальнейшем была еще уменьшена в 100 раз благодаря неблагоприятной конфигурации расположения палладиевого прутка и детектора из BF_3 . Фон измерялся на расстоянии 50 м от лаборатории, в которой проводились опыты. Аппаратура была расположена в подвале, над которым находилось еще пять этажей с бетонными стенами и перекрытиями. Из-за низкой эффективности счет импульсов выполнялся в течение 50 ч. Измерения с прутком палладия размером $0,4 \times 10$ см проводились во время электролиза при токе 64 мА/см^2 и показали, что счет нейтронов превышает фон в 3 раза.

Во всех экспериментах постоянно анализировался состав раствора электролита. Фиксировалось образование (накопление) трития, потери D_2O , обусловленные электролизом, восполнялись только тяжелой водой. Был проведен масс-спектроскопический анализ образующихся газов ^3He и ^3H .

Масс-спектрометр позволяет проводить разделение ионизованных молекул и атомов по их массам, что достигается при воздействии магнитных и электрических полей на летящие в вакууме пучки ионов. В масс-анализаторе прибора происходит разделение ионов по массам, а точнее, по величине отношения массы иона к его заряду. Одновременно с информацией о массе иона по известному току ионов можно получать сведения и о количестве ионов.

Современная масс-спектропия позволяет определять массы ядер относительной погрешностью $\sim 10^{-5}\%$ для легких и $10^{-4}\%$ — для тяжелых элементов.

В калориметрических измерениях скорость выделения джоулева тепла могла изменяться в зависимости от того, уравнивались ли реакции (1), (2) и (4) реакцией



проходящей на платиновом аноде, или обратимостью этих реакций. В первом случае джоулево тепловыделе-

ние есть просто ток в ячейке, умноженный на такое напряжение, при котором реакции (1), (2) и (4), сбалансированные реакцией (8), являются термонейтральными. Необратимость процессов в реакциях на электроде и потери на омическом сопротивлении оказывали то же влияние, что и на джоулево тепло. Вычитание потерь потенциала на омическом сопротивлении в растворе для ячейки, содержащей большой палладиевый анод, показывает, что электролиз D_2O является преобладающим процессом, то есть можно предположить, что выделение джоулевого тепла близко к минимальному.

Были получены данные калориметрических измерений, которые говорят, что излишек генерируемого тепла заметно зависит от плотности тока (величины измененного химического потенциала) и пропорционален величине объемов электродов, то есть явление происходит в объеме палладиевого электрода. Из этих же данных следует, что энтальпия может превышать на палладиевом электроде 10 Вт/см^3 , стабильно поддерживаясь в экспериментах более чем 120 ч, в течение которых выделение тепла из электрода превышало 4 МДж/см^3 . По мнению Флейшманна и Понса, это не может быть объяснено ничем, кроме как наличием ядерных процессов.

В исследованиях по термоядерному синтезу эффекты можно выразить в процентах к вложенной мощности. Тогда 100% соответствуют выходу тепла, равному входу (без учета мощности, необходимой для питания установки). В электрохимических экспериментах дополнительно принимался в расчет и КПД, рассчитанный по оценке джоулева тепла, или по полной энергии, вложенной в ячейку. В последнем случае запасенная энергия зависит от природы реакции на аноде. Авторы считают, что выход может стать большим и что можно сделать разумные проекты с увеличением выхода тепла до 1000%.

В проектах с использованием смесей D_2O — DTO — T_2O (обычных для реакции синтеза) могут, следовательно, ожидать и большие излишки тепла, с предполагаемой тепловой мощностью $\sim 10 \text{ кВт/см}^3$. Флейшманн и Понс сообщили, что в условиях одного из последних опытов при использовании только D_2O значительная часть катода расплавилась (температура плавления

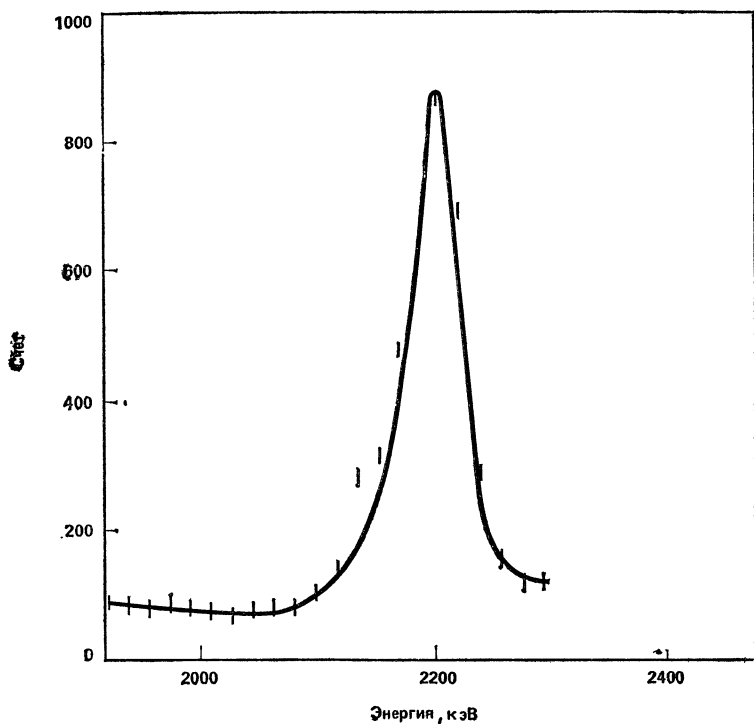


Рис. 4. Гамма-спектр

1554° С) и затем испарилась, а ячейка и ее содержимое и часть вытяжного шкафа разрушились.

На рис. 4 приведен спектр γ -лучей, зарегистрированный в области пространства над водяной баней, смежной с электролитическими ячейками. Эти спектры подтверждают, что выход нейтронов с энергией 2,45 МэВ указывает на генерацию по реакции (6). Можно заметить, что интенсивность спектра мала, соответственно нейтронный поток, рассчитанный по измерениям с дозиметром, приблизительно равен $4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ для 10-сантиметрового электрода диаметром 0,4 см при плотности тока 64 мА/см^2 .

Опыты и регистрация излучения показывают, что в ячейке образуется тритий (рис. 5). В реакции (5) выход составляет $1,2 \cdot 10^4 \text{ ат/с}$, что согласуется с измере-

ниями потока нейтронов. С другой стороны, величина тепловыделения требует скоростей для реакции ядерного синтеза порядка 10^{11} — 10^{14} ат/с. Очевидно, что эти реакции представляют собой только малую часть общей химической реакции и других ядерных процессов.

Флейшманн и Понс критически оценивают свои результаты и считают, что они содержат больше вопросов, чем ответов, и для выяснения истины потребуются большая и длительная работа. Факт наблюдения генерации нейтронов и трития при электрохимическом вдавливании дейтерия в палладиевый катод сам по себе является сюрпризом, и очевидно, необходимо пересмотреть физи-

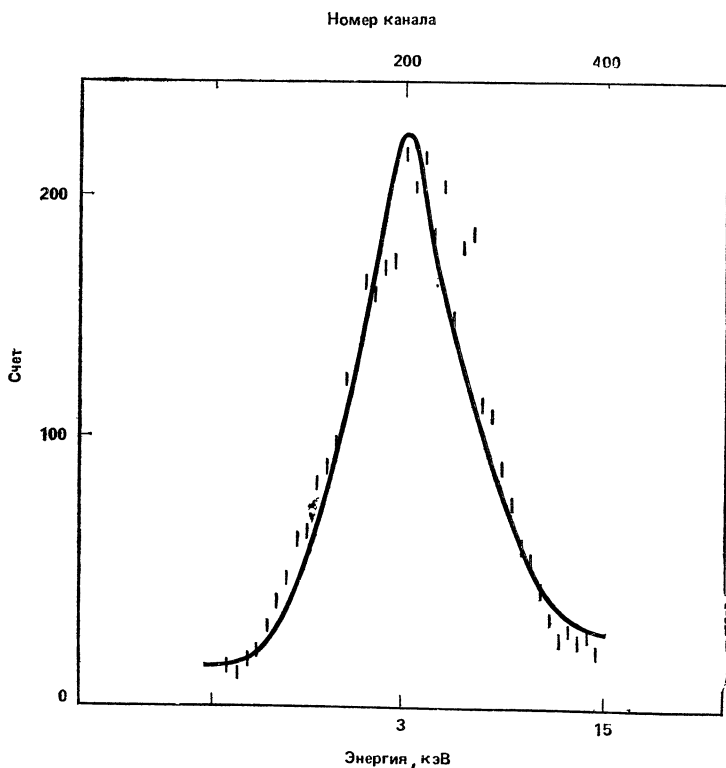


Рис. 5. Регистрация β -излучения трития

ческий механизм взаимодействия электронов и дейтронов в кристаллах. Можно поставить вопрос и о реализации огромной скорости слияния ядер (10^{-19} с⁻¹) для реакций ядерного синтеза в дейтронных кластерах, вероятно, локализованных в октаэдрических позициях решетки при обычном значении энергии связи в 1 эВ. Эксперименты с гидридами на изотопах водорода с известной структурой могли бы прояснить этот вопрос.

Интересно, что реакции ядерного синтеза представляют собой лишь малую часть общей химической реакции и что основная доля высвобождаемой энергии обусловлена неизвестным до сих пор процессом (или процессами), происходящими в кластерах дейтронов.

Реакция научного мира на сообщение М. Флейшманна и С. Понса оказалась противоречивой, но в основном отрицательной, вероятно, еще и потому, что до сих пор не ясен основной физический механизм явления. Единственный известный в настоящее время процесс, способный привести к «холодному» ядерному синтезу, — описанный ранее мюонный катализ — при обычных условиях не может привести к практически ощутимому эффекту за счет нейтрализации электрического заряда соседних ядер дейтерия. О своем недоверии к сообщению Флейшманна и Понса заявил бывший директор Аргоннской национальной лаборатории Р. Сакс. Скептицизмом, смешанным с надеждой, пронизано интервью специалиста по ядерному синтезу из Массачусеттского технологического института А. Хатчинсона. Заявление же Эд. Теллера, считающегося «отцом» американской водородной бомбы, проникнуто оптимизмом. «Поначалу я считал подобное невозможным, — заявил он. — Однако результаты выглядят весьма многообещающими. Я счастлив, поскольку вижу очень хорошие шансы на то, что был совершенно не прав».

Показательно заявление еще одного специалиста — ведущего разработчика метода мюонного катализа в США Ст. Джоунса: «Нами накоплены важные подтверждения существования новой формы «холодного» ядерного синтеза, который происходит, когда изотопы водорода погружаются в кристаллические структуры твердых веществ без мюонов».

Подавляющее большинство физиков-ядерщиков воздерживалось от комментариев до появления независи-

мых экспериментальных подтверждений. К возможности скорой практической отдачи от технической реализации опытов Флейшманна и Понса техниками высказывается недоверие.

Прежде чем перейти к дальнейшему обсуждению проблемы, следует ознакомиться с сообщением группы Джоунса, который вел параллельные работы в Университете Брайяна Янга того же штата Юта. Он, будучи специалистом по мюонному синтезу, был привлечен к анализу заявки Флейшманна и Понса, когда последние обратились в военное ведомство по поводу финансирования их работы.

Сообщение Джоунса открывается описанием физической природы слияния ядер водорода и дейтерия, которое легко осуществляется в звездных условиях. Но в земных, когда вещества не имеют такой большой плотности, ядра не могут сближаться из-за наличия электростатического отталкивания — кулоновского барьера. Интенсивность ядерного синтеза в молекулярном водороде будет определяться в этом случае на основе квантово-механического туннелирования через барьер. Иными словами, требуется установить вероятность сближения ядер для слияния. В молекуле дейтерия, где равновесное расстояние между дейтронами (d) составляет $0,74 \text{ \AA}$, скорость синтеза $d-d$ исключительно мала, составляет примерно 10^{-70} на молекулу D_2 в 1 с.

Замена электрона в ионе молекулярного водорода более массивной частицей существенно увеличивает скорость синтеза. В мюонном катализе межъядерное расстояние уменьшается в 200 раз — во столько же, во сколько масса мюона больше массы электрона, а скорость ядерного синтеза возрастает примерно на 80 порядков. Гипотетическая квазичастица всего в несколько раз более массивная, чем электрон (раз в 2—5) увеличила бы скорость холодного синтеза до измеряемых уровней ($\sim 10^{-20}$ слияний в 1 с) на одну дейтериевую молекулу.

Джоунс предполагает, что эквивалентное возмущение межъядерной волновой функции водорода может быть реализовано при внедрении изотопов водорода в кристаллическую решетку металлов или других конденсированных сред. Он указывает на то, что он получил прямые доказательства существования индуцированного

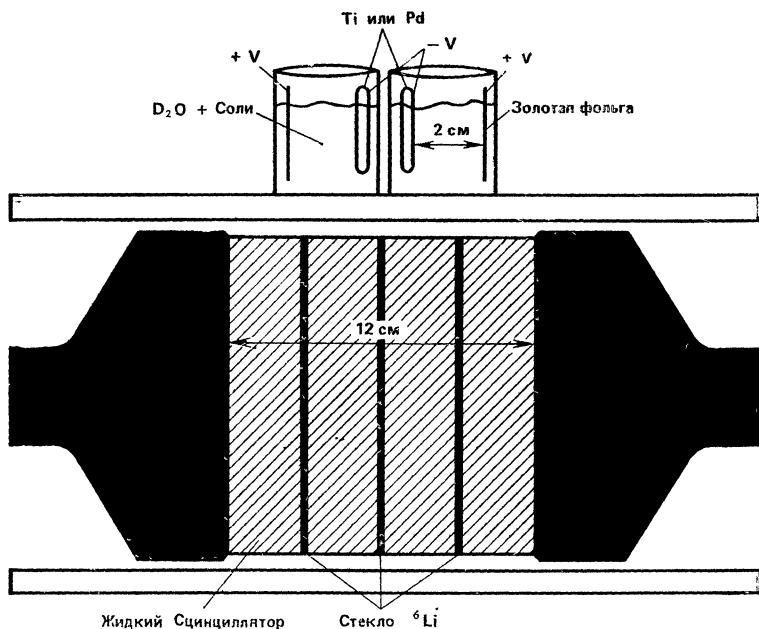


Рис. 6. Схема эксперимента Джоунса. Электролитическая ячейка показана сверху нейтронного спектрометра

ядерного синтеза без использования высоких температур и мюонного катализа.

Обсудим экспериментальные результаты Джоунса и косвенные, геологические доказательства протекания холодного ядерного синтеза, приводимые им в его сообщении.

Джоунс утверждает, что он с коллегами наблюдал ядерный синтез при слиянии ядер дейтерия в процессе прохождения низковольтного электролиза при комнатной температуре, когда дейтроны вдавливаются в металлический титановый или палладиевый электрод.

Он приводит в сообщении реакцию синтеза, которая существенно ускоряется, если D^+ и металлические ионы электролита осаждаются на отрицательном электроде (катоде). Нейтроны, имеющие энергию $\sim 2,5$ МэВ, четко детектировались чувствительным нейтронным спектроном. Схема эксперимента Джоунса приведена на

рис. 6. Продукты второй равновероятной реакции слияния ядер дейтерия Джоунс не исследовал. Его нейтронный детектор состоял из жидкого органического сцинтиллятора, размещенного в стеклянном цилиндре диаметром 12,5 см, в которой были встроены три пластины стеклянного сцинтиллятора с литием-6. Нейтроны отдают энергию в жидкий сцинтиллятор за счет столкновений, а мощность измеряемого света передает информацию об энергии.

Таким образом, нейтроны низкой энергии поглощаются ядрами ${}^6\text{Li}$ в стеклянной пластине, где реакция $n + {}^6\text{Li} \rightarrow t + {}^4\text{He}$ приводит к сцинтилляции в стекле. Импульсы от двух сред отличаются, и отчетливые сигналы регистрируются двумя фотоумножителями, сигналы от которых суммируются. Совпадение сигналов из двух сред в течение 20 мкс и определяет наличие нейтронов.

Калибровка спектрометра по энергии осуществлялась по нейтронам с энергией 2,9 и 5,2 МэВ, которые генерировались дейтрон-дейтронным взаимодействием при углах 90 и 0° соответственно по отношению к пучку дейтронов из ускорителя Ван-де-Граафа. Наблюдаемый энергетический спектр обнаруживает широкополосную структуру, что означает появление в каналах анализатора нейтронов с энергией 2,45 МэВ. Стабильность детекторной системы проверялась между сериями измерений по скорости счета нейтронов ядерного распада калибровочного источника. Исследователи провели также другие опыты, которые показали, что нейтронный детектор в этой области регистрации импульсов не чувствителен к другим источникам радиации, например к тепловым нейтронам.

Величина фона в нейтронном счетчике составила $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ в той области энергий, где ожидалось нейтроны с энергиями 2,5 МэВ. Путем сравнения энергетических спектров от γ - и нейтронных источников было выяснено, что почти весь фон обусловлен случайными совпадениями актов испускания γ -лучей.

Во всех экспериментах использовались присадки в поглощающих экранах и фильтры для γ -лучей, что привело к значительному снижению фона.

Опыты свидетельствуют, что важно совместное осаждение дейтронов и ионов металлов на отрицательный

электрод. Было также обнаружено, что наиболее эффективными электродами могут служить металлы титан и палладий, первоначально выбранные из-за их большой способности удерживать водород и образовывать гидриды. В предварительных опытах использовались и другие металлы, а также некоторые гидриды. Формы электродов были испробованы также разные — от фольг до булек.

За экспериментом можно было вести визуальное наблюдение. Видно было, что на палладиевой фольге образовывались пузырьки водорода только через несколько минут с начала электролиза, наводя на мысль о быстрой абсорбции фольгой дейтронов. Пузырьки кислорода на золотом аноде возникали сразу же после начала электролиза.

Выпрямитель обеспечивал напряжение 3—5 В на ячейках при токах от 10 до 100 мА.

Пока еще не установлена связь между ходом синтеза, напряжением, силой тока и состоянием поверхности электродов.

Ячейки имели вид маленьких сосудов высотой и диаметром 4 см. В каждой находилось 20 мл электролита. Ячейки размещались вдоль нейтронного счетчика или на нем (см. рис. 6). Устройство их очень просто, но далеко не оптимально; тем не менее данная комбинация электролизеров и нейтронного спектрометра оказалась достаточной для установления того факта, что во время электролитического внедрения водорода в металлы имело место явление холодного ядерного синтеза.

На рис. 7 представлен энергетический спектр, полученный при описанных выше условиях и сопоставленный со спектром фона. При традиционных предположениях, что все отклонения от фона являются статистическими флуктуациями, масштаб счетчика был согласован во всем диапазоне энергий. Характерной особенностью спектра является то, что результаты счета в каналах 45—150 оказываются примерно в 4 раза больше, чем стандартные отклонения. Это заставляет предположить, что допущения справедливы и данные измерения отклонений от фона представляют собой реальный физический эффект.

Путем пересчета фона для согласования уровня фона во всех других областях спектра был получен раз-

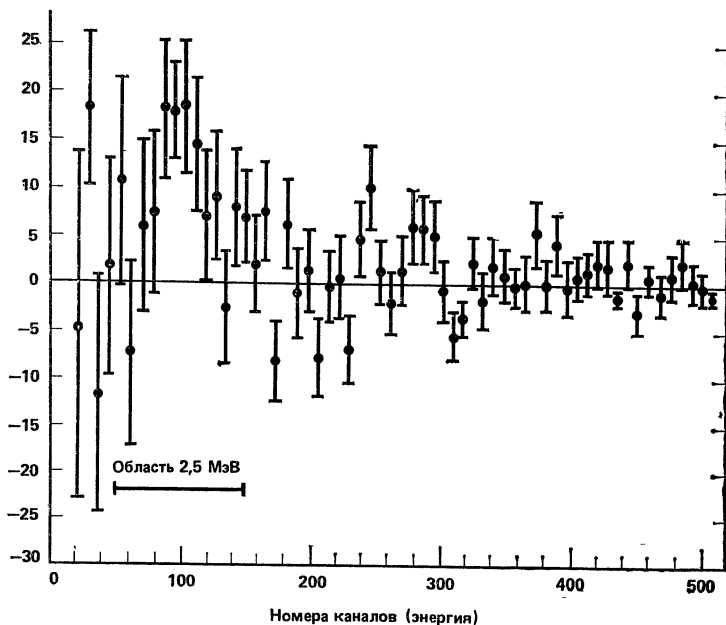


Рис. 7. Приведенные результаты регистрации нейтронов в области 2,5 МэВ

ностный график (см. рис. 7). Он показывает, что надежный сигнал с центром на канале 100 превышает 5 стандартных статистических отклонений.

Центр гауссовой кривой, соответствующей этому пику, находится в 101-м канале и имеет дисперсию в 28 каналов. Это точно соответствует тому, что в спектре появились нейтроны с энергией 2,5 МэВ за счет ядерного синтеза, что справедливо согласно проведенной калибровке. Тот факт, что значительный сигнал появляется над фоном с той энергией, которая соответствует энергии нейтронов при $d-d$ синтезе ($\sim 2,5$ МэВ), доказывает, что в электролитических ячейках действительно идет ядерный синтез.

Чтобы оценить скорость холодного слияния ядер, следует более тщательно рассмотреть результаты измерений четырнадцати отдельных серий, приведенных на рис. 8. На нем изображены данные в виде отношения

сигнала в области с энергией 2,5 МэВ к фоновому сигналу той же серии, а не абсолютные значения скорости счета. Особенно примечательна серия 6, имеющая статистическое значение сигнала примерно в 5 стандартных отклонений над уровнем фона. В этом случае в качестве катода использовались плавленные дробинки из титана с общей массой 3 г. Выход нейтронов вырос после одного часа электролиза. Спустя примерно 8 часов выход нейтронов значительно снизился (см. рис. 8, седьмую серию измерений). При визуальном рассмотрении поверхности титанового электрода оказалось, что она имеет темно-серый налет.

Проведенная электронная микроскопия участка катода показала, что поверхностный налет представляет главным образом железо, осевшее на катоде в процессе электролиза тяжелой воды. Подобное падение сигнала

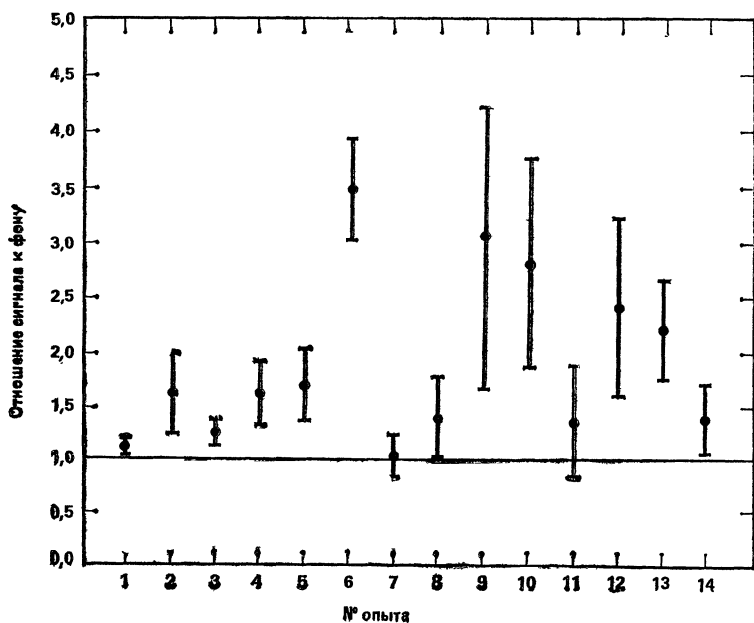


Рис. 8. Отношение сигнала к фону в различных опытах по регистрации нейтронов

проявилось примерно через восемь часов работы также в серии 13, за которой следует серия 14 с еще меньшим сигналом. В сериях 13 и 14 использовались те же самые электрохимические ячейки, и снова на отрицательном электроде образовался налет спустя несколько часов после начала электролиза. Эти эксперименты подтверждают важность подготовки поверхности для успешного осуществления процесса холодного ядерного синтеза.

Действительно, работа с электрохимическими ячейками с большим числом разных ионов предусматривала широкое изменение условий на поверхности электродов, а эти изменения в какой-то мере могут объяснить разницей в величине сигналов. В частности, наблюдаемое «выключение» сигнала спустя восемь часов может объяснить низкое отношение сигнала к фону в сериях 1 и 3, в которых сигнал мог упасть после прохождения процесса (около 20 ч). Когда серия измерений за № 10 началась с сигналов, значительно превышающих фон, Джоунс остановил измерения и взял половину ячеек на пробу. После анализа интенсивность выхода нейтронов, как и ожидалось, упала (серия 11), так как выявились начальные признаки пассивации электродов.

Однако в приведенную статистическую выборку были включены данные серий 1, 3, 7, 11 и 13 с низким отношением сигнала к фону, несмотря на то, что причина снижения скорости счета нейтронов была ясна из анализа поверхности электродов. Данные по серии 8 были утрачены из-за небрежности хранения магнитной записи и не были включены в окончательное рассмотрение результатов.

Значительные усилия потратили экспериментаторы на выявление возможных причин внешнего фона и на их устранение. Ложные сигналы могли появляться от ускорителя Ван-де-Граафа, который находился в отделении. Поэтому во время экспериментов отключались гамма- и нейтронные источники и другие помехи, которые могли нарушать условия чистого опыта. Джоунс позаботился также о том, чтобы провести измерения с электролитическими ячейками, заполненными обычной (H_2O) водой вместо тяжелой (D_2O) воды. Проведенные измерения показали отсутствие какого-либо превышения сигнала над фоном как в случае протекания

тока через те же самые ячейки, так и без него.

Таким образом, Джоунс оградил себя от, в общем-то, пустякового вопроса о корректности выполнения условий эксперимента. Максимальный эффект Джоунсом был получен для серии № 6. Она и была взята в качестве основы для оценки скорости слияния ядер в холодном синтезе. Проводился подсчет следующим образом.

Определялось число слияний, приходящихся на пару дейтронов по формуле: $(R/e)/(M \times d/2M)$, в которой $R = (4,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$ — наблюдаемое число слияний в секунду; $e = (1,0 \pm 0,3)$ — эффективность детектирования нейтронов с учетом геометрического фактора и вычисленная по методу Монте-Карло; $M \simeq 4 \cdot 10^{22}$ атомов, содержащихся в 3 г титана; $d/2M \approx 1$ — отношение числа пар дейтронов к числу ионов металла, которое выбрано на том допущении, что почти все тетраэдрические пустоты заняты в структуре титана. Данная ситуация соответствует образованию гидрида титана $\gamma\text{-TiO}_2$. Затем на основе приведенного уравнения можно оценить скорость прохождения холодного синтеза: $\lambda_f \sim 10^{-23}$ слияний (на пару дейтронов)/с.

Если большинство слияний имеет место вблизи поверхности, или если решетка титана далека от насыщения дейтронами, или если условия, благоприятствующие синтезу, имеют место не непрерывно, то полученная скорость синтеза должна быть значительно больше, возможно, 10^{-20} слияний/пара дейтронов/с.

Заметим, что такая скорость синтеза может быть достигнута за счет «слипания» дейтронов на расстоянии, составляющем примерно половину нормального ($0,74 \text{ \AA}$) их удаления друг от друга в молекулах. То, что такая скорость теперь наблюдается в уплотненном веществе, наводит на мысль о «пъезоядерном» синтезе, о котором Джоунс писал в предыдущей работе.

Возможной причиной явления может быть образование в насыщенной дейтерием решетке металла квази-электронов, имеющих эффективную массу, в несколько раз превышающую массу свободного электрона. Известно, что изотопы водорода собираются на дефектах металлических решеток и локально высокая концентрация ионов водорода может привести к пъезоядерному синтезу.

Поскольку нет никаких доказательств протекания синтеза в равновесных состояниях насыщенных дейтерием металлов или соединений, то можно заключить, что для холодного синтеза существенны именно неравновесные условия. Электролиз — это один из путей создания именно таких условий. Кажется замечательным, что на эффективную скорость синтеза можно влиять путем изменения внешних параметров, таких, как давление, температура, электромагнитные поля, но именно такие эффекты проявляются в другой форме холодного ядерного синтеза — в мюонном катализе.

Такие изменения встречаются в естественных геологических условиях, где тепло, давление и контактная разность потенциалов производят неравновесные условия. Некоторые данные, полученные при изучении образцов вулканического происхождения, можно истолковывать как свидетельства справедливости гипотезы о пикно-ядерном сжатии.

Гигантский холодный ядерный синтез по Джоунсу непрерывно осуществляется в недрах Земли. Наблюдаемые термические эффекты, а также распределение ^3He и трития в земной коре можно объяснить реакцией слияния ядер водорода и дейтерия. Дейтерий находится в земной коре с момента ее образования. Существующее содержание дейтерия в морской воде составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ дейтрон/протон. Вода поступает в верхнюю мантию по стыкам плит и распространяется на глубину расширяющихся областей Мохоровичича. Оценка протока воды свидетельствует, что в течение 1 миллиарда лет через мантию проходит количество воды, равное по массе Мировому океану. Таким образом, через мантию проходит $1,4 \cdot 10^{43}$ дейтронов за $3 \cdot 10^{16}$ с. В каждом акте $p-d$ синтеза освобождается 5,4 МэВ ($8,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). На основе этой величины можно рассчитать тепловой поток, который составляет сотни мВт/м². Таким образом, геологический ядерный $p-d$ синтез, возможно, определяет наблюдаемый тепловой поток и высокую температуру земной коры, а также обеспечивает энергией тектонические процессы.

На основании этих данных Джоунс дает оценку скорости геологического ядерного синтеза $\lambda_f = 3 \cdot 10^{-18}$ с. Исходя из того, что тритий распадается с образованием

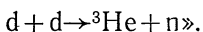
^3He , Джоунс полагает, что тритий можно зарегистрировать при извержении вулканов, что может подтвердить его накопление в результате холодного ядерного синтеза. Он приводит данные по содержанию трития в продуктах извержения вулкана Мауна-Лоа на Гавайях. Эти данные хорошо согласуются с теорией Джоунса. Аналогичные процессы, по его мнению, происходят на Юпитере.

Другое доказательство существования холодного синтеза в конденсированной материи получено при изучении содержания ^3He и ^4He в алмазах и металлических рудах. Факты существования природных объектов с различным изотопным содержанием гелия известны давно, но аномально высокое отношение изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$ в техногенных металлах и полупроводниках серьезно обсуждается лишь недавно. Наши соотечественники обратили внимание на это в начале 70-х гг. Так, в сообщении Б. А. Мамырина и других было показано, что отношение содержаний $^3\text{He}/^4\text{He}$ в металлах близко к единице. Это, по их мнению, свидетельствует о том, что происхождение изотопов гелия в исследованных ими материалах обусловлено какими-то другими ядерными или физико-химическими, а не природными процессами, которые ранее принимались для объяснения наличия источников гелия в земной коре, лунном грунте, атмосфере, минералах.

Исследования проводились с применением масс-спектрометрической и низкофоновой газоразделительной аппаратуры. Минимально измеряемые количества ^3He и ^4He соответственно составляли $\sim 10^6$ и 10^9 атомов. Были исследованы образцы 18 элементов, в том числе титана, молибдена, свинца, алюминия, палладия и др. — всего около 300 образцов.

Во многих образцах было обнаружено значительное количество ^3He — от 10^{10} до 10^6 атомов/г. Авторы этой работы рассмотрели четыре возможных процесса, приводящих к появлению ^3He в металлах. В частности, они предположили, что при электролизе металлов возможно вхождение в них дейтерия. Прочитируем последний их вывод полностью: «Можно предположить, что ^3He в металлах образуется вследствие процессов, протекающих непосредственно в металле, и эти процессы приводят к возникновению или ^3He , или T , или T и ^3He вместе.

Аналогом такого типа процессов может служить ядерная реакция, идущая при взаимодействии мезоатомов дейтерия с обычными атомами дейтерия при тепловых энергиях



Отсюда можно сделать вывод, что для прохождения холодного ядерного синтеза в твердых телах достаточно каталитического дейтерия космических мезонов. Можно только сожалеть о том, что работа Мамырина с сотрудниками не была продолжена и механизм возникновения гелиевой аномалии в техногенных материалах оказался не раскрытым.

Вслед за чудесами

Необычные результаты опытов Флейшманна — Понса и Джоунса так взбудоражили умы ученых и химиков, и физиков, что они непрерывно обсуждают проблему начиная с конца марта 1989 г. 14 апреля на имя академика Б. Кадомцева от Л. Пономарева, советского физика, находившегося в командировке в Италии, пришло сообщение о международном совещании в Эрике. Результаты совещания можно просуммировать так.

Опыты Флейшманна и Понса по выделению избыточного тепла никто не подтвердил, но Джоунса и его коллег никто не опроверг. Исследования продолжаются. Проверочные эксперименты необходимо провести в низкофоновых лабораториях, например Баксанской нейтринной лаборатории. После обсуждения хода экспериментов Флейшманна — Понса и Джоунса возникло всеобщее убеждение в том, что тепло в первых и нейтроны во вторых — если и то и другое действительно наблюдалось — не связаны между собой. Ни одна лаборатория мира к тому времени не воспроизвела результатов Флейшманна, а данные Джоунса совместимы с новыми наблюдениями, но все они находятся на уровне фона, и определенных заключений об их достоверности сделать пока нельзя.

Как будет видно из дальнейшего, конференция в Эрике не прошла бесследно. итальянцы были, наверное, более всех западноевропейских ученых возбуждены итогами конференции и по горячим следам событий выра-

ботали собственную программу действий. В связи с тем что при написании брошюры мы не имели сведений о научных публикациях, упомянем газетные сообщения из Италии. Газета «Корриера делла сера» от 18 апреля сообщила об удачных экспериментах, выполненных в лаборатории Энея во Фраскатти. Здесь профессор Ф. Скарамуччи, специалист по физике низких температур, решил испытать другой метод «вдавливания» атомов дейтерия в титан. Хорошо известно, что, помимо электролиза, существуют другие технологические методы получения гидридных фаз, в том числе в газе при высоких температурах, которые широко используются для получения гидридов.

В лаборатории Энея маленький контейнер был заполнен титановой стружкой и помещен в тяжелую воду при изменявшихся температуре и внешнем давлении. Результаты опыта были отрицательные. Затем те же манипуляции были проделаны в дейтериевом газе под давлением 8 атм и при температуре — 120° С. Регистрация ощутимого количества нейтронов подтвердила, что дейтерий вошел в кристаллическую решетку титановой стружки и начался низкотемпературный синтез.

Через несколько часов после этого профессор Перфетти из Института структуры материи Центра ядерных исследований (Фраскатти) сообщил, что он наблюдал выход нейтронов, когда электроды подвергались резким изменениям температуры. Оба эти эксперимента свидетельствовали о протекании процесса слияния ядер в условиях нестабильного режима. Аналогичные опыты были повторены в Генуе. В конце апреля в Италии следовал синтез за синтезом. Во всей Западной Европе при этом были только отрицательные результаты.

Интересно, что эксперименты, аналогичные итальянским, были выполнены в лаборатории Лос-Аламоса только в конце мая, причем американские исследователи указали на то, что выход нейтронов из титанового образца невелик и результат соответствует данным Джунса, который сам принимал участие в этих опытах.

Только в ряде химических лабораторий США наблюдали значительный выход трития, а не нейтронов, что привело к выдвижению модели синтеза, в которой традиционные продукты реакций ^3He , p , T могут отсутствовать вообще, но должен образовываться ^4He , а из-

быточная энергия передаваться решетке. К тому же наиболее любознательные исследователи стали копаться в обширной литературе по электролизу и обнаружили, что в 1926 г. немецкие физики Ф. Панет и К. Петерс в Берлинском университете провели исследования и опубликовали статью «О превращении водорода в гелий» в журнале «Доклады немецкого химического общества».

В этих исследованиях была предпринята попытка превратить водород в гелий при использовании в качестве катализатора металлического палладия, палладиевой черни и других разновидностей палладия. К этому времени уже было известно, что эти вещества способны сорбировать водород и не способны поглощать гелий. В то время водород получали с помощью электролиза воды. Заметим, что при этом способе получения он содержит, как теперь известно, некоторое количество дейтерия.

Панет и Петерс насыщали металлы водородом, помещая их на длительное время в атмосферу газа и возбуждая газовый разряд. Обращалось большое внимание на предотвращение натекания гелия из атмосферы через стенки сосуда. С этой целью сосуд с водородом помещался в другой сосуд, с вакуумом, и все устройство погружалось в воду.

В опытах было обнаружено, что в большинстве случаев палладий и его разновидности выделяли гелий, за исключением тех случаев, когда газом насыщали раскаленный палладий. Через время порядка 12 ч «наводороженный» палладий выделял такое количество гелия, что можно было обнаруживать четыре — пять его спектральных линий. Со временем количество гелия в сосуде с палладием, насыщенным водородом, возрастало. Препараты палладия, насыщенные водородом и хранившиеся без употребления при комнатной температуре, выделяли значительное количество гелия при нагревании их до более высоких температур даже спустя более двух лет после насыщения их газом.

Было замечено, что металлы, не способные поглощать водород, гелия не выделяли. При использовании платины после контакта с водородом, также полученным путем электролиза воды, эффект был незначительным.

Заметим, что немецкие физики провели численный анализ возможности появления гелия иным путем, помимо появления его из водорода после длительного кон-

такта с палладием. В частности, они выясняли, не связано ли возникновение спектров гелия с α -радиоактивностью каких-либо веществ. Для этого они исследовали спектры гелия α -радиоактивных препаратов тория, предоставленных им известными немецкими физиками О. Ганном и Л. Мейтнер. Панет и Петерс пришли к выводу, что наблюдаемое ими явление не связано с α -радиоактивностью.

Попытки зарегистрировать γ -излучение успехом не увенчались. О существовании нейтронов, а также тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития — тогда еще не подозревали, нейтроны и дейтерий были открыты только 6 лет спустя, в 1932 г.

Сообщения о работах Панета и Петерса были опубликованы также в журнале «Доклады немецкого химического общества» в 1927 г. и в журнале «Природа» в 1926 и 1927 гг. Однако результаты работ были встречены резкой критикой, причем среди критиковавших был Э. Резерфорд — «отец» современной атомной теории. В современном издании «Популярной библиотеки химических элементов» под редакцией академика И. В. Петрянова-Соколова опыты Ф. Панета и К. Петерса уже отнесены к научным курьезам.

В это же время швед Д. Тандберг повторил этот опыт, модифицировав его тем, что для насыщения палладия водородом он использовал электролиз. С 1932 г., после открытия дейтерия, он продолжил исследования и с ним. Даже попытался взять патент на получение гелия, но, узнав, что Панет и Петерс отказались от результатов, забрал свою заявку. Таким образом, опыты Флейшманна и Понса напоминают то, что делал Д. Тандберг, а опыты Панета и Петерса сродни работам итальянцев.

Затем обнаружили и другие работы, проложившие путь к холодному ядерному синтезу с водородом и дейтерием. Здесь в первую очередь следует указать на то, что в механических процессах, приводящих к разрушению твердых тел, а также нарушению адгезионных связей контакта, наблюдаются электрофизические процессы, которые могут приводить к ускорению заряженных частиц.

В свое время член-корреспондент Б. В. Дерягин и его коллеги установили неизвестное ранее свойство све-

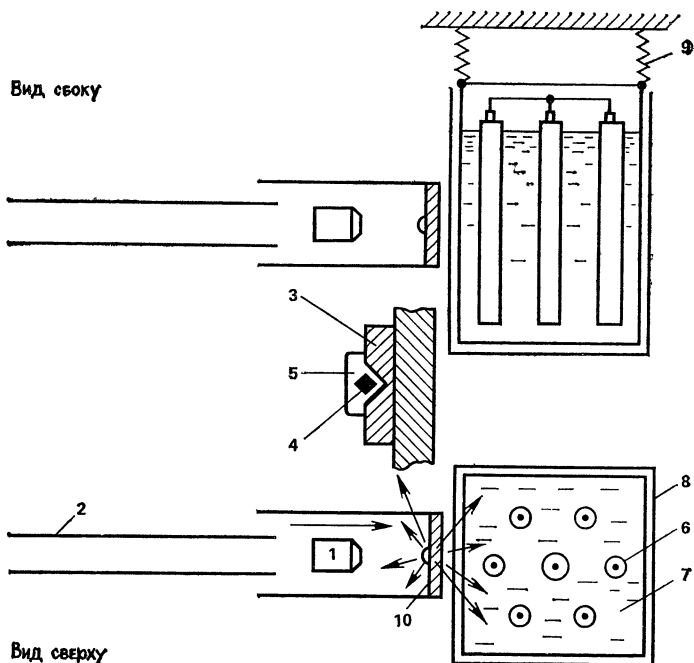


Рис. 9. Схема экспериментальной установки Б. Н. Дерягина

жеобразованных поверхностей твердых тел испускать в вакууме электроны высоких энергий. Это открытие зарегистрировано с приоритетом от 3 декабря 1952 г. Сущность открытия состояла в том, что свежеобразованные поверхности испускают в вакууме электроны, энергия которых достигает значений 100 кэВ.

Затем в последующих работах, опубликованных в середине 80-х гг., в ионных кристаллах дейтерида лития был обнаружен выход нейтронов порядка 10^{-11} на один дейтрон. Опыт состоял в разрушении кристаллов LiD металлическим бойком (1) массой $5 \cdot 10^{-2}$ кг, разогнанным в стволе газовой пушки (2) до скорости около 200 м/с. Мишень представляла собой свинцовую пластинку толщиной 7 мм (рис. 9, 3), в которой с одной стороны делалось коническое углубление глубиной 5 мм. В углубление помещался монокристалл LiD (4) куби-

ческой формы с ребром 3—4 мм. Кристалл закрывался латунной крышкой (5). Мишень была укреплена на вертикальной стенке камеры (10) (на рисунке: 6 — детекторы; 7 — замедлитель; 8 — корпус блока детекторов; 9 — подвеска).

Пересчет результатов регистрации нейтронов показал, что на 1 акт разрушения монокристалла дейтерида лития приходится ~ 10 нейтронов (рис. 10). Взаимодействие механического бойка с ионным монокристаллом LiD приводит к образованию микротрещин, составляющих, по сути, две обкладки конденсатора, между которыми происходит пробой. Возникающее поле ускоряет ионы дейтерия. Можно представить себе множество ускорительных трактов внутри монокристалла, которые приводят в конечном итоге к выходу нейтронов по реакции ${}^2\text{D}(\text{dn}) \rightarrow {}^3\text{He}$.

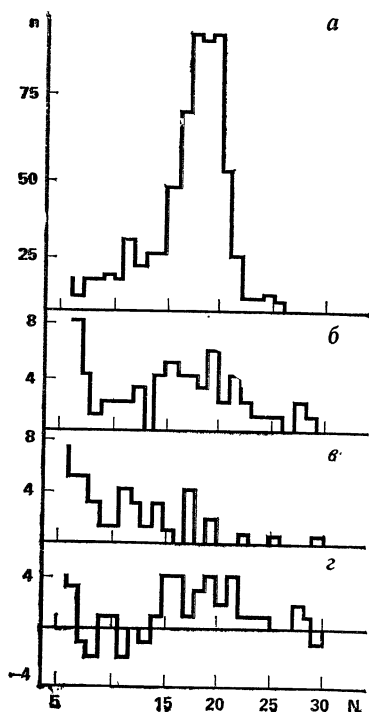


Рис. 10. Гистограммы распределения импульсов по каналам анализатора от источника нейтронов (а), при разрушении мишеней из дейтерида лития (б), при стрельбе по мишеням, не содержащим кристаллов дейтерида лития — «импульсный фон» (в), результат вычитания «импульсного» и космических фонов из амплитудного спектра, снятого при разрушении мишеней из дейтерида лития (г)

В дальнейшем Б. В. Дерягиным были обнаружены нейтроны при размалывании титана в шаровой мельнице в присутствии D_2O , LiD , полипропилена (D_6). В связи с этим В. П. Смилга, а также П. И. Голубничий с соавторами полагают, что ускорение дейтронов электрическими полями может иметь место при раскрытии кавитационных полостей (трещин) в металлическом катоде при электролизе.

Авторы брошюры и Е. М. Сахаров в опытах 7—9 апреля с. г. зарегистрировали нейтроны при электролизе тяжелой воды. Через пластинчатые электроды Pt , Pd , Ti пропускался однополупериодный выпрямленный ток с плотностью до 75 мА/см^2 при напряжении 100 В. Нейтроны регистрировались люминофором $ZnS(Ag)$, смешанным с оргстеклом, и ФЭУ, а также — счетчиками 3He с замедлителем. При электролизе с Pd и Ti было установлено превышение сигнала над фоном в 3—5 раз. В контрольных опытах с обычной водой нейтронов зарегистрировано не было. Катоды из Ti насыщались при кипении D_2O , сигнал наблюдался при охлаждении и спустя несколько минут после выключения тока. Один из наводороженных катодов Ti был вновь надейтерирован. Счет в 3 стандартных отклонения появился через 20 мин после конца электролиза, а еще через 17 мин произошло импульсное выделение нейтронов ($\sim 10^3 \text{ н}$), что и было использовано для расчета λ_f .

Электронная микроскопия показала, что на поверхности катода имеются лакуны, из которых, вероятно, шло интенсивное выделение дейтерия. Водород, как пружина, выжимал дейтерий из решетки при охлаждении катода, так как растворимость при комнатной температуре изотопов водорода в титане ничтожно мала.

Вычисленное значение $\lambda_f \sim 10^{-22} \text{ н}(\text{д}-\text{д})/\text{с}$. Наши опыты с TiD при переменном квазигидростатическом давлении ($\sim 120 \text{ кг/см}^2$), когда последнее изменялось за 2—5 с от минимального до максимального, показали, что средневзвешенная скорость счета нейтронов превысила фон на $\sim 30\%$. И хотя еле-еле заметный эффект требует проверки на более широком спектре веществ, он тоже указывает на механоэмиссионный механизм.

Перечислим опыты, в которых мы не наблюдали выхода нейтронов: при замораживании и размораживании льда D_2O , при его гидростатическом сжатии до 20 кбар

в стальной бомбе при 77 К и размораживании. То же, но с пластинками Ti и Zr, а также ZrD_2 . В тлеющем газовом разряде на электродах металлов, как гидрообразующих, так и не образующих гидридов при токах от 10 мкА до 5 А, напряжениях 100÷1500 В и температурах до 2000°C, по нашим данным, нейтронов нет. Слабое излучение есть от трития. Исследования доложены на научных семинарах в ИАЭ им. И. В. Курчатова (13.4.89), МГУ, ГК АЭ, химической секции Президиума АН СССР, на заседании Физического общества. Намечено в опытах изучить роль космического фона.

Среди теоретических исследований, предшествовавших опытам Флейшманна — Понса и Джоунса, которые не привлекали аналог мюониевой модели, была работа В. И. Высоцкого и одного из авторов (Р. Н. К.), в которой впервые была предложена оптимизация реакции холодного синтеза. Эта работа опубликована в 1981 г. в отделе писем «Журнала технической физики». Статья была посвящена рассмотрению возможности осуществления энергетически выгодной реакции управляемого ядерного синтеза в кристаллических мишенях. Положительный энергетический баланс реакции слияния ядер дейтерия и трития достигается за счет использования кристаллической мишени, в плоскости которой в определенном порядке расположены ядра дейтерия или трития, и определенного характера движения ускоренных частиц в кристалле.

Очевидно, что использование каналированного движения ускоренных дейтронов ведет к уменьшению отношения сечения ядерной реакции к потерям на ионизацию, что обусловлено преимущественной локализацией дейтронов в межплоскостном пространстве. В кристаллических каналах происходит наиболее активное взаимодействие с электронами, а ядер в них нет, поэтому выход продуктов реакции синтеза в этом случае минимальный. При попадании пучка дейтронов на монокристалл в произвольной ориентации или на поликристалл, естественно, отношение сечений $\sigma_{\text{яд}}/\sigma_{\text{электр}}$ становится усредненным, и в этом случае будет наблюдаться выход нейтронов — примерно 1 нейтрон на 10^6 дейтронов.

Уже такой источник нейтронов оказывается удобным для практического использования. Оптимизация реакции достигается выбором направления движения дейтронов

в кристалле, когда они сосредоточиваются в плоскостях, то есть в области высокой плотности ядер. Одним из важных аспектов этой работы явилось представление о том, что в кристаллах возможно изменение характера протекания реакции управляемого синтеза, связанное с существенной перестройкой волновых функций дейтронов, которая характерна как для надбарьерного движения, так и для каналирования в поле тяжелой матрицы, например палладия или титана.

Квантовые и тепловые флуктуации атомов кристаллической матрицы приводят к ее деформации на $\sim 10^{-9}$ см, что размывает или снижает значение кулоновского (отталкивательного) потенциала или барьера реакции. Величина его от $V_{\text{макс}} \sim e^2/R \sim 1$ МэВ уменьшается до величины 2—10 эВ. Естественно, что при таком снижении барьера характер ядерной реакции и выход продуктов синтеза могут существенно измениться.

Среди флуктуационного потока диффузии дейтронов, движущихся сквозь кристалл, в соответствии с максвелловским распределением имеются частицы разной энергии, в том числе и частицы с энергией $E \gg kT$, способные к реакции синтеза с туннельным преодолением барьера.

Выражение для скорости реакции синтеза $\lambda_f = \sigma I \delta$, где $\sigma = 10^{-25}$ см², при реальном значении тока $I \approx 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹ и относительном числе дейтронов, имеющих энергию больше пороговой $\delta \sim 10^{-9}$, которая может быть получена из рассмотрения максвелловского спектра при $T \approx 300$ К, имеем $\lambda_f = 10^{-20}$, что соответствует экспериментальным значениям, полученным Джоунсом. Отметим также, что типичной концентрацией дейтерия в β -фазе палладия $n_D \approx 2 \cdot 10^{22}$ см⁻³ и объеме насыщенного им слоя $\Omega \approx 0,1—1$ см³ общее число актов реакции в 1 с составит $\lambda_f n \Omega = 2—20$ с⁻¹. С увеличением диффузионного тока и температуры должно иметь место возрастание как δ , так и I , что ведет к очень резкому увеличению скорости реакции.

Таким образом, при явлении холодного ядерного синтеза срабатывают три фактора, которые так или иначе проявляются в экспериментальных условиях: а) наличие максимальной плотности активных ядер, которое достигается в ходе или электролиза, или предварительного газового заполнения мишени под давлением, или при имплантации; б) наличие тока дейтронов или других

ядер, способных осуществить холодный синтез при определенной скорости потока через кристаллический образец; в) существование значительного снижения барьера реакции синтеза в кристаллах.

Можно заключить, что явление холодного синтеза становится возможным в нестационарных условиях: образование α - и β -фаз палладия при достижении максимальной плотности в β -фазе, причем обязательным является наличие потока дейтронов через электрод или мембрану.

Из экспериментов Флейшманна — Понса и Джоунса не было сделано какого-либо заключения о физическом механизме, который мог бы прямо объяснить преодоление электростатического отталкивания ядер, выяснить роль туннельного эффекта. Самые общие представления о различных физических механизмах при холодном ядерном синтезе основаны на предположении, что при электролизе возможно такое насыщение палладия или другого металла (титана, циркония) избыточной концентрацией дейтерия, даже превышающей их эквивалентное соотношение, то есть n_D/n_{Pa} . Эта мысль проглядывает в препринтах Флейшманна — Понса и Джоунса. Последний еще в 1986 г. выдвинул идею о пикноядерном, или пьезоядерном, сжатии дейтронов в кристалле.

Наличие металла как некоей емкости, допускающей предельное сокращение расстояний между дейтронами при ее принудительном заполнении, — идея весьма интересная. Однако термодинамические расчеты устойчивости кристаллических структур не допускают произвольного заполнения геометрического пространства. Можно считать только, что избыточное насыщение не приводит к развалу кристалла как периодической структуры и что возникает неравновесная система, в которой наряду с правильной структурой гидрида сосуществует динамический постоянный поток дейтронов, прокачиваемый через электрод, именно благодаря наличию электролиза.

Такой подход сразу позволяет выделить два случая: статическую и динамическую модели холодного синтеза с неограниченным количеством промежуточных вариантов, отвечающим изменениям внешних условий, например, температуры, плотности ядер, их энергии, направленности процесса и т. д., а также физико-химическим

характеристикам материалов. Статический случай отвечает реакции слияния при очень высокой их плотности в металле, динамический — когда реакция синтеза происходит в результате парных столкновений при их относительном движении.

Никто из экспериментаторов не получал мгновенного и гигантского избыточного тепла после длительного электролиза, исключая единственный случай, который якобы имел место в одном из опытов Флейшманна — Понса, когда расплавился не только электрод, но и ячейки. Поэтому статический случай можно рассматривать почти как невероятный, тем более что его сводят к возможному аналогу — мюонному катализу, когда случайные мюоны, порожденные космическими мезонами, ускоряют процесс слияния ядер в веществе с высокой концентрацией дейтронов.

При этом большинство известных экспериментальных результатов по холодному синтезу ядер получено в неравновесных условиях, когда дейтроны активно перемещаются в среде. Можно исходя из последней модели сделать некоторые оценки. Число частиц в единице объема в единицу времени равно $N = n_1 \cdot n_2 < v \sigma(v) >$, где n_1 и n_2 — концентрации изотопов водорода (D, T), v — относительная скорость сталкивающихся ядер. Угловые скобки означают усреднение по распределению относительных скоростей v . Для реакции слияния одинаковых по типу ядер вместо n_1 и n_2 должно быть $1/2 n^2$. В случае дейтерия $n_D = 10^{22}$ ат/см³. Учитывая связь между скоростью движения и кинетической энергией частиц E , запишем:

$$\begin{aligned} < v \sigma(v) > = \int_0^\infty v \sigma(v) f(v) dv = \\ = \int_0^\infty \sqrt{2E/M} \sigma_{\text{лаб}} \left(\frac{m_1}{M} E \right) F(E) dE, \end{aligned}$$

где E — энергия относительного движения ядер ($E = Mv^2/2$), $M = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ — их приведенная масса, $f(v)$ и или $F(E)$ — функция распределения ядер по скоростям или энергии, $\sigma_{\text{лаб}}$ — сечение реакции в лабораторной системе отсчета, в которой одна из частиц покоится. Обычно в расчетах учитывается температурная зависимость скорости реакции на основе максвелловского распределения частиц по скоростям. Допускает та-

кое рассмотрение простейшая модель потока дейтронов в решетке — модель «решеточного газа».

В большинстве случаев температурная зависимость для скоростей частиц имеет простой аналитический вид и связана главным образом с вероятностью туннельного перехода через кулоновский барьер. Высота барьера для пары дейтронов составляет ~ 200 кэВ. Для термоядерной плазмы такая энергия теплового движения отвечает температурам $2 \cdot 10^9$ К.

Аналитический вид скорости слияния ядер определяется, таким образом, двумя множителями в приведенном выше выражении. Один из них, входящий в $\sigma(v)$, — гамовский коэффициент проницаемости барьера, взятый для его предельной формы, справедливой при $E \ll E_D$, другой — экспонента максвелловского распределения. Для чисто кулоновского барьера вероятность слияния ядер при комнатной температуре исчезающе мала, $\sim 10^{-184}$. Учет наличия экранировки зарядов протонов изменяет форму кулоновского потенциала. В этом случае оценка скорости реакции синтеза дает величину $\sim 10^{-45}$, которая на несколько десятков порядков меньше значения, полученного из экспериментальных данных Флейшманна — Понса.

Лучшее согласие достигается, если принять изменение массы электрона, а следовательно, соответствующего изменения расстояния между ядрами до значения 5. В этом случае Дж. Кунин (США) и Л. И. Пономарев (СССР) получили значение $\sim 10^{-20} - 10^{-23}$, что согласуется по крайней мере с данными Джоунса.

Вроде бы блестящее совпадение с экспериментом и можно не принимать в расчет любые нападки на некоторую некорректность в наборе экспериментального материала. Во время написания настоящей брошюры десятки лабораторий уже наблюдали по нейтронам 2—3 стандартных отклонений от фона. Правда, многие исследователи делают свои сообщения устно, вероятно потому, что реально трудно учесть внешние факторы, влияющие на выделение сигнала из фона.

Рассмотрение теоретических моделей позволяет сделать следующее заключение. Наблюдаемое экспериментально увеличение скорости реакции холодного синтеза, не объяснимое на основе рассмотрения простейшей модели кулоновского отталкивания, дающей соотношение

скоростей $\lesssim 10^{-200}$, становится более понятным в предположении о роли вещества в увеличении скорости процесса слияния ядер ($\sim 10^{-20}$). Вывод вроде бы однозначный: решающую роль играют материалы, в которых происходит слияние ядер дейтерия и наиболее вероятно, что изменяются высота или форма потенциального барьера. Иначе эффект объяснить невозможно.

На май месяц 1989 г. все еще преобладали скептические теоретические модели и явно ощущался недостаток результатов экспериментальных исследований. Если бы не было столь активного негативного обсуждения результатов Флейшманна — Понса и сдержанного приема исследований Джоунса, число положительных публикаций, наверное, резко бы увеличилось. На данном этапе еще рано делать окончательные выводы. Облегченная процедура публикации сообщений об экспериментах по холодному синтезу была бы, вероятно, лучшим решением проблемы информированности.

Как в некоторых странах большую роль играет теневая экономика, не ограниченная государственными законами, так и в истории с холодным ядерным синтезом были нарушены принятые нормы научной информации: данные о результатах исследований передавались из уст в уста на семинарах и на основе «самиздата» препринтов и статей.

Обсуждение результатов, полученных Флейшманном — Понсом и Джоунсом, приняло наднациональный характер. Состоялась первая международная конференция в Италии, а в США — заседания трех научных обществ: химического, физического и электротехнического. На Востоке и Западе активно проводились научные семинары, жаркие страсти полемики охватили не только страницы периодических изданий, особенно газет, но перекинулись даже в журнал «Нейчур». Можно сказать, что не было ни одного номера этого журнала, в котором не обсуждались бы слабые места сообщений американских ученых.

Конечно, больше всего критики досталось за сообщение об избыточном тепле, которое было получено в опытах Флейшманна и Понса. Обвинения авторов носили порой ненаучный характер. Особую ярость оппонентов вызвала форма сообщения и интригующая история, в которой оказались замешанными оба университета шта-

та Юта. Подробно история конфликта изложена на страницах «Интернешнл бизнес уик» от 8 мая. В той ажиотажной ситуации, в которой оказались ученые, трудно кого-либо считать правым или виноватым.

Если бы Флейшманн и Понс не обратились за финансовой помощью в Министерство энергетики, а то не переслало бы их отчет на рецензию Джоунсу, который пригласил соседей в свою лабораторию ознакомиться с его исследованиями и соединить усилия в научных поисках на основе единого соглашения, то может быть все обошлось бы более благопристойно. Однако заключенное соглашение было нарушено Флейшманном и Понсом, которые выступили с заявлением на пресс-конференции 23 февраля. Остальное довершили любопытные репортеры, которые любые сообщения из лабораторий принимали за подтверждение результатов Флейшманна и Понса по исследованию холодного ядерного синтеза.

Конечно, во многом виноваты и сами ученые, которые охотно давали интервью, совершенно не заботясь о тех последствиях, которые возникают во время бума, когда пахнет возможностью сорвать приличный денежный куш и появляются проходимцы от науки, обивающие пороги правительственных учреждений.

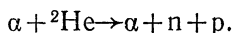
Нам же сейчас предстоит разобрать некоторые возражения оппонентов. Наиболее простые вопросы относительно процедуры проведения контрольных опытов, то есть вопросы о том, почему «что-то» не сделано. Например, проводились ли эксперименты с легкой водой, как определялся фон, какова была эффективность регистрации нейтронов и трития. То, что не очень ясно объяснение калориметрических опытов, выявилось довольно скоро. Появились объяснения наблюдаемого избыточного тепла чисто химическими реакциями: через образование переоксида палладия или разложение гидридов, в одной работе распад палладиевого электрода объясняется образованием соединения Li_3Pd на основе того, что в состав электролита входит соединение LiOD ,

Температура, при которой плавится это соединение, низка, что и привело к (возможному) растворению электрода. Подчеркивалось несоответствие количества тепла и малого выхода продуктов ядерной реакции холодного синтеза: для корректного объяснения недоставало нескольких порядков величины. Поэтому наиболее обос-

нованные возражения оппонентов сосредоточились вокруг тех малых значений надфоновых эффектов, которые были получены по выходу нейтронов.

В этом смысле наиболее обстоятельными были возражения французских физиков из центра Сакле.

Свои возражения они построили на том, что электроды могут содержать природные примеси изотопов урана, тория и радона, которые испускают при распаде α -частицы, что и приводит к наблюдаемым эффектам при электролизе. Известно, что α -частицы, испускаемые нуклидами ^{212}Po (8,8 МэВ) и ^{214}Po (7,8 МэВ), могут взаимодействовать с дейтерием по реакции



Порог этой реакции составляет 6,6 МэВ, что отвечает энергии α -частиц в лабораторной системе координат. Нейтроны имеют сильно растянутый спектр с энергией до 3,5 МэВ, в котором приблизительно 50% составляют нейтроны с энергией выше 2 МэВ. Поперечное сечение этой реакции было измерено еще в 1938 г. При 8 МэВ оно составляет 1 мбарн, а при 19 МэВ — 0,3 барна. Реакция происходит и в тяжелой воде, и в гидридах титана или палладия. В гидридах при отношении 1 атом дейтерия на 1 атом металла концентрация составляет $\sim 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, что соответствует микронному пробегу α -частиц в веществе. Уран и торий как природные примеси обычно присутствуют в материалах в количестве примерно единиц миллиграмм на 1 г вещества. Это было установлено в многочисленных экспериментах при наблюдении редких физических процессов, происходящих с очень малым числом событий: в двойном β -распаде, в поиске солнечных нейтрино и других. В этом случае очень важно иметь материалы с низким фоном природной радиоактивности.

В системах, из которых уран не может быть удален, он находится в равновесии со своими дочерними продуктами распада, поэтому при оценке радиоактивности следует учитывать каждого дочернего продукта распада.

В звене цепи распадов урана находится радон ^{222}Rn , который является газом, и цепь превращений может прерваться, если радон испарится. ^{214}Po распадается за 150 мкс и испускает α -частицы с энергией 7,8 МэВ.

Среди продуктов распада тория ^{232}Th также находят-

ся ^{220}Ra . Другие дочерние изотопы — ^{212}Po , распадающийся с испусканием α -частиц с энергией 8,8 МэВ (64%), и ^{208}Th , распадающийся с испусканием γ -лучей с энергией 2,61 МэВ (36%).

Проходя в тяжелой воде, α -частица теряет свою энергию, которая становится ниже, чем порог реакции уже на пути 30 км. В титане потери составляют 1900 МэВ/см. Если используется титан в виде губки (губчатый или пористый титан), то глубину проникновения можно оценить, исходя из размеров зерен, составляющих губку. Исходя из сечения реакции 0,1 барн можно рассчитать ее вероятность: $1,6 \cdot 10^{-5}$ для тяжелой воды, $6 \cdot 10^{-5}$ для гидрида титана и чистого дейтерия. Отсюда следует, что для получения сигнала уровня джонсовского, необходимо принять, что α -частицы взаимодействуют с тяжелой водой, а эффективность детектирования возникающих при этом нейтронов — $\sim 1\%$

Кроме того следует учесть, что фоновая активность от аппаратуры не более, чем $5 \cdot 10^4$ Бк, если она возникает за счет ^{214}Po (урановая цепь) и $2,5 \cdot 10^4$ Бк, — за счет ториевой цепи ^{212}Po . Тем не менее, эти природные загрязнения оказываются не такими уж малыми, особенно если учесть, что радон присутствует в окружающем нас воздухе. Кроме того, сами стены домов содержат радионуклиды и непрерывно испускают радон. Количественно эта радиация довольно точно оценена. Типичное ее значение — не более $3,7$ Бк/м³, или, что то же самое, концентрация составляет 1 атом радона на 10^{19} молекул воздуха. Помимо этого нуклида, в воздухе присутствуют также изотопы радона ^{220}Rn с более коротким периодом полураспада.

Радон, подобно другим газам, легко поглощается всеми материалами, которые используются при постановке опытов по холодному синтезу. Огромную роль играет состояние поверхности материалов, их дисперсность, наличие окислов на поверхности. Очищенные от окислов поверхности развитых стружек и опилок металлов обладают гигантской способностью к засасыванию газов даже при комнатной температуре.

Количество радона, необходимое для объяснения результатов наблюдения активности, должно составлять $3 \cdot 10^{10}$ атомов для ^{222}Rn и $2 \cdot 10^6$ атомов для ^{220}Rn . Если радон в таких количествах не присутствовал в самих

материалах, то он мог быть поглощен перед экспериментом, когда изготавливалась стружка, или во время опыта. Поглощенный радон производит дочерние продукты полония, которые и служат источником высокоэнергичных α -частиц.

Условия проведения опытов таким образом очень важны, поскольку они могут отражаться на результатах исследований. Так, в течение предварительного хранения перед экспериментами титановая стружка может растворить в себе определенное количество радона. То же относится и к электродам из титана или палладия. При этом количество растворенного радона может быть случайным и меняться от электрода к электроду. Проводимая перед использованием их очистка от газов нагреванием в вакууме может оказаться недостаточной, поэтому нельзя исключить полностью фактор насыщения электродов радоном.

Хорошо известно, что в процессе электролиза большое количество газа выделяется на электродах. Этот газ может подхватывать радон и удалять его как из электродов, так и из воды, разрывая тем самым цепь происходящих распадов дочерних изотопов. Такое положение приводит к тому, что радиоактивный сигнал, вызванный их присутствием, должен со временем исчезать.

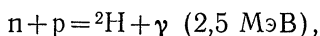
В экспериментах Джоунса опыты с № 1 по № 14 (см. рис. 8) регистрируют поток быстрых нейтронов. Не наблюдается никакой закономерности в результатах. Это можно объяснить изменением условий проведения опытов: смена электрода, добавление тяжелой воды в электролизер, температура — факторы, которые модифицируют условия эксперимента. Более того, фон измеряется перед и после постановки опыта, а не в течение измерений. Для оценки фона важно различать, в частности, используется тяжелая или легкая вода, которая имеет различные характеристики, что сказывается на прохождении нейтронов. Ячейки, наполненные обычной водой, могут экранировать нейтронный детектор.

В экспериментах должна учитываться каждая мелочь. Например, если при подщелачивании воды используется LiOD , то литий может мигрировать к катоду, где стать источником быстрых нейтронов по реакции (α, n). Выход $\sim 4,7 \cdot 10^{-6}$ нейтронов на одну α -частицу в поло-

ниевом источнике был установлен еще Сегре.

Предположения физиков из французского центра ядерных исследований оказались универсальными. Они объясняют наличием природной радиоактивности не только эксперименты при электролизе, но и другие опыты, в частности, эксперименты Скарамуччи из Фраскати. Скарамуччи вгонял дейтерий в свои образцы под давлением в виде газа. При этом титан охлаждался в жидком азоте (температура 77 К оказалась предпочтительной для поглощения газа, при комнатной температуре поглощение дейтерия на несколько порядков ниже). С другой стороны, присутствующий в воздухе лаборатории радон заранее мог быть захвачен ловушками решетки титана. Тогда в присутствии сжатого дейтерия реакция с α -частицами не кажется чем-то удивительным. Когда реакции с распадом радона заканчиваются, сигнал исчезает, как это и наблюдалось в эксперименте. В конце опыта некоторое количество радона может снова быть захвачено при повышении температуры, и тогда вновь появится всплеск нейтронов. Подобное явление может повторяться, пока газы, включая дейтерий и радон, не выйдут из титана.

Механизм реакции взаимодействия α -частиц с дейтерием может быть также применен к объяснению экспериментов Флейшманна — Понса. В их статье приведен пик γ -излучения с энергией 2,2 МэВ (см. рис. 4). Этот пик иллюстрирует выход нейтронов в реакции синтеза и образуется в результате реакции



по которой термализуются быстрые нейтроны в обычной воде. Скорость счета, полученная в эксперименте с дозиметром нейтронов, оказалась равной $4 \cdot 10^4$ п/с. Физики из Сакле считают, что на самом деле γ -лучи появляются от изотопа ${}^{208}\text{Tl}$, который находится в семействе ториевой цепи и излучает γ -кванты с энергией 2,61 МэВ. Такая скорость обеспечивается испусканием $8 \cdot 10^4$ α -частиц изотопом ${}^{212}\text{Po}$. Французы утверждают, что этот процесс может обеспечить скорость счета, близкую к полученной в экспериментах Джоунса, а именно, 1 п/с. Кроме того, γ -кванты, проходя через тяжелую воду, перерассеиваются, что приводит к уменьшению энергии нейтронов.

Так как сигнал от нейтронов в указанных опытах мал, то требуется тщательное детектирование нейтронов при исследовании явления холодного слияния ядер. Прежде всего для этого необходима тщательная дегазация элементов, входящих в круг экспериментальных узлов: электролитической ячейки, электродов, самих образцов, воды. Измерительная аппаратура должна позволять измерять не только величину фона, но и те ложные слабые сигналы, которые могут появиться за счет природной радиоактивности. Предварительно надо провести эксперименты с радоном, учитывая замечания о содержании его в воздухе лаборатории.

Большинство экспериментов по проверке опытов Флейшманна — Понса стараются проводить в подвальных помещениях. А ведь именно здесь происходит постоянное накопление радона, особенно если эти помещения плохо проветриваются. Кстати, опыты Флейшманна — Понса проводились именно в таких условиях.

Кроме указанных особенностей, изменение нейтронной компоненты в фоне может происходить при изменении влажности воздуха и при космических ливнях.

Завершая брошюру, укажем, что еще не поставлена точка в обсуждении возможности осуществления слияния ядер при низких температурах, использования низкотемпературного ядерного синтеза. Вероятно, неизбежными останутся основы мюонного катализа, который будет приближаться к практическому использованию, но и безмюонный низкотемпературный ядерный синтез также получил право на обсуждение и исследование, хотя его шансы были сильно поколеблены в результате интенсивных абстрактных обсуждений пока малочисленных экспериментальных результатов.

Отцы водородной бомбы Эдвард Теллер и Андрей Сахаров не обошли вниманием холодный ядерный синтез. В интервью журналу «Экспрессо» Э. Т. об опытах в штате Юта сказал: «Я лично не представляю себе, как реакцию, которую наблюдали тамошние экспериментаторы, можно использовать в качестве неиссякаемого источника энергии». У А. Д. Сахарова в интервью журналу «Огонек» есть слова по тому же поводу: «Ну, там в очень малых масштабах...», имеется в виду вероятность процесса слияния ядер при комнатной температуре.

ХРОНИКА СОБЫТИЙ

До холодного ядерного синтеза Водород, дейтерий, тритий и состоящая из них вода существовали вечно. Уже 3000 лет тому назад древние греки, не различая составных элементов воды, делали попытки разложить ее. Опыты оканчивались неудачно: вода превращалась в пар. В средние века был открыт водород (имя ему дал М. В. Ломоносов — газ, «рождающий воду» в химических реакциях восстановления). В 1866 г. Т. Грэм открыл способность металлического палладия активно поглощать водород в большом количестве. В 1926 г. Ф. Панет и К. Петерс опубликовали статью о превращении водорода в гелий (в эксперименте палладий насыщался водородом в газовой среде под давлением). В 1927 г. Дж. Тандберг повторил этот эксперимент, но уже насыщая палладий водородом с помощью электролиза. В 1929 г. Аткинсон и Хаутерманс высказали гипотезу о существовании ядерного синтеза внутри Солнца. В 1932 г. Г. Юри открыл изотоп водорода, дейтерий D или ^2H . Ядро дейтерия представляет собой связанное состояние протона и нейтрона. Большое различие масс D и протия ^1H обуславливает различие их изотопических свойств. В будущем дейтерий станет основным ядерным топливом. Тяжелая вода D_2O представляет собой лучший из известных замед-

**Начало эры
холодного
ядерного
синтеза**

лителей быстрых нейтронов.

В 1936 г. открыт тритий, Т или ^3H , сверхтяжелый изотоп водорода. Ядро Т состоит из 2 нейтронов и 1 протона. Тритий нестабилен, он распадается по схеме

$^3_1\text{H} \rightarrow ^3_1\text{He} + e^- + \bar{\nu}$ с периодом полураспада 12,4 г.

В том же году К. Андерсон и С. Неддермейер впервые обнаружили мюоны.

В 1947 г. Ф. Франк впервые указал на способность π -мезонов вызывать ядерные реакции.

В 1948 г. А. Д. Сахаров предложил практическое использование мюонов. Его идея состояла в том, что если образуются мезомолекулы $dd\mu$ и $dt\mu$, то почти мгновенно легкие ядра вступят в реакцию синтеза.

В 1954 г. Я. Б. Зельдович оценил вероятность образования мезомолекулы $rd\mu$ и нашел, что за время своей жизни μ -мезон может образовать мезомолекулу лишь с вероятностью в несколько процентов.

В 1956 г. Л. Альварец открыл явление $rd\mu$ -синтеза, названное катализом ядерных реакций.

В 1957 г. предсказано явление отравления мюонного катализатора. Дж. Джексон установил, что мюон в каталитическом процессе может быть захвачен α -частицей, что снижает скорость реакций. Независимо подобные оценки сделал Я. Б. Зельдович.

В 1958 г. С. С. Герштейн предположил, что в молекуле $dd\mu$ существует слабосвязанный уровень с энергией 7 эВ.

В 1966 г. В. П. Джелепов экспериментально обнаружил зависимость скорости мюонного катализа от температуры.

В 1967 г. Э. А. Весман объяснил физические процессы, протекающие в мезомо-

лекулярном комплексе, на основе резонансного механизма.

В 1977 г. С. С. Герштейн и Л. И. Пономарев на основе модели Весмана сделали вывод о том, что при определенных температурах и давлениях мюонный катализ дейтерия и трития должен протекать гораздо быстрее. В. П. Желепов с сотрудниками провел дополнительные эксперименты в широком интервале температур и снял полную резонансную кривую зависимости скорости образования мезомолекул $dd\ \mu$ от температуры.

В 1979 г. В. П. Желепов измерил нижнюю границу скорости образования мезомолекул. Оказалось, что они образуются за время, меньшее 10^{-8} с.

В 1981 г. В. И. Высоцкий и Р. Н. Кузьмин опубликовали теоретические исследования о возможности ядерного синтеза с положительным энергетическим балансом в конденсированной (твердотельной) среде без участия мюония. Выдвинута идея о снижении кулоновского барьера в реакциях синтеза в твердых телах в тысячи раз.

В 1981 г. Герштейн с соавторами и независимо Дж. Форентини и Л. Браччи пришли к выводу, что около 25% мюонов, прилипших к α -частицам, становятся свободными и могут вновь участвовать в процессе мюонного катализа.

В 1982 г. С. Джоунс начал исследования с мюонием в смеси дейтерия с тритием под давлением в тысячи атмосфер и подтвердил резонансную модель Л. И. Пономарева и работы Желепова.

В 1984 г. Ю. В. Петров предложил схему мезокаталитического реактора, окруженного урановой оболочкой — блонкетом.

В 1986 г. С. Джоунс рассчитал скорость

мюонного катализа и показал, что она может достигать до 10^{-20} слияний в 1 с на одну молекулу D_2 . Им же выдвинута идея «пъезоядерного» синтеза в твердом теле.

В 1986 г. опубликованы работы Б. В. Дерягина о наблюдении надфонового нейтронного потока при механическом разрушении дейтерида лития.

Наши дни

11 марта 1989 г. М. Флейшманн, профессор химии Саутгемптонского университета (Англия) и его бывший аспирант, ныне профессор, декан химического факультета университета штата Юта (США) С. Понс направили в «Журнал электроаналитической химии» статью «Синтез ядер дейтерия, вызванный электрохимически». Препринт в окончательном виде был готов 20 марта.

23 марта состоялась пресс-конференция Флейшманна и Понса в Ютском университете. На ней было объявлено об осуществлении холодного ядерного синтеза при электролизе тяжелой воды катодом палладия и анодом платины.

31 марта поступило сообщение из Венгрии о подтверждении ядерного синтеза. Зарегистрированы нейтроны.

7—9 апреля на физическом факультете МГУ при электролизе тяжелой воды обнаружено превышение нейтронов над фоном в 4—5 раз и выход нейтронов после электролиза.

12 апреля, по сообщению газеты «Правда», в Харькове проведен успешный эксперимент по низкотемпературному, ядерному синтезу.

12 апреля состоялась международная конференция на Сицилии, в Эрике, где впервые в Европе выступили с докладом Флейшманн и Джоунс. Присутствовали 50 участников. К этому времени резуль-

таты Флейшманна и Понса никто не подтвердил, а данные Джоунса никто не опроверг.

12 апреля в Далласе (США) состоялся симпозиум Американского химического общества. По словам его президента К. Каллиса, «он был большим и спешным». Понс прочитал открытую лекцию по холодному ядерному синтезу.

12 апреля П. Хагельстайн (Массачусетский технологический институт) передал для публикации в «Физикал Ревью леттерс» четыре статьи, посвященные теории холодного ядерного синтеза.

13 апреля представитель Вашингтонского университета в Сиэтле сообщил, что два аспиранта, Ван Эден и Вэй Лю, обнаружили тритий при электролизе тяжелой воды, а контрольные опыты с обычной водой дали отрицательный результат.

17 апреля профессора Ютского университета Ч. Уоллинг и Дж. Саймонэ предложили теорию химических процессов ядерного синтеза.

17 апреля министерство ВМС США объявило о финансировании исследований в Ютском и Техасском университетах.

18 апреля профессор Ф. Скарамуччи во Фраскатти (Италия) обнаружил выход нейтронов из танталовых образцов, насыщенных дейтерием в газовой среде под давлением и при низкой температуре (~ 77 K).

24 апреля министерство энергетики США объявило, что дано указание десяти национальным лабораториям активизировать попытки повторить эксперимент Флейшманна — Понса.

27 апреля Западный резервный университет Кейса в Кливленде (США). Группа исследователей под руководством профессора У. Ландау получила избыток тепла в 8—30%.

1—2 мая в Балтиморе (США) на заседании Американского физического общества было выражено негативное отношение физиков к опытам Флейшманна — Понса и снисходительное — к опытам Джоунса.

23—25 мая состоялся симпозиум Национального электрохимического общества США в Лос-Анджелесе. Профессор Р. Шриффер: «Скептическое отношение к холодному ядерному синтезу в результате симпозиума ослабело». На симпозиуме Национальная лаборатория США в Лос-Аламосе впервые заявила о наблюдении импульсного выхода нейтронов, значительно превышающего фон.

20 июня «Московская правда» в лысенковском духе осудила исследователей холодного ядерного синтеза.

Научно-популярное издание

Рунар Николаевич КУЗЬМИН
Борис Николаевич ШВИЛКИН

ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *К. А. Кутузова*

Мл. редактор *Н. А. Сергеева*

Обложка художника *А. А. Смирнова*

Худож. редактор *П. Л. Храмцов*

Техн. редактор *Т. В. Луговская*

Корректор *Л. В. Иванова*

ИБ № 10287

Сдано в набор 13.07.89. Подписано к печати 05.09.89. Т-01491. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,23. Тираж 29 400 экз. Заказ 1379. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894010. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В первом полугодии 1990 года в серии «ФИЗИКА» среди прочих предполагается выпустить следующие брошюры:

ВОЛНЫ И КЛЕТКИ, авторы — доктора физико-математических наук *О. В. Бецкий* и *В. В. Кислов*

О механизмах воздействия излучения на процессы жизнедеятельности клеток.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ, автор — доктор физико-математических наук *В. С. Голубев*

О разнообразных применениях лазеров в технике и технологии.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЧЕЛОВЕК, автор — доктор физико-математических наук *Е. П. Борисенков*

О влиянии климата на здоровье и деятельность человека и обратном явлении — антропогенных факторах изменения климата.

В будущем мы намерены предоставить страницы наших брошюр для информации о деятельности Физического общества СССР.

Мы ценим тот интерес, который Вы, уважаемые читатели, проявляете к нашему изданию.

Тем более будем мы благодарны, если Вы рекомендуете серию «Физика» вниманию Ваших друзей, коллег и учеников.

Напоминаем, что брошюры серии «Физика» в розничную продажу не поступают. Подписка на брошюры издательства «Знание» принимается без ограничений в любом отделении «Союзпечати».

Индекс издания — 70102, цена подписки на год — 1 р. 80 к.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 80 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА