

величины фотоядерного сечения при высоких энергиях, то применение методов теории возмущений в КХД вплоть до столь малых p_T , как 1 ГэВ/с, вызывает сомнение, и, как следствие этого, есть сомнения в корректности проведенных расчетов $\sigma_{\gamma N}$. В любом случае вопрос о величине $\sigma_{\gamma N}$ при высоких энергиях будет решен экспериментально в недалеком будущем на ускорителях HERA, УНК.

Так как школа проходила сразу же после летних каникул, являющихся обычно периодом интенсивного проведения различных конференций, то была заслушана информация о тех конференциях, которые могли представлять интерес для слушателей школы. С докладом о 25-й Международной конференции по физике высоких энергий в Сингапуре выступил научный руководитель школы С.Г. Матинян (ЕрФИ), о Международном симпозиуме по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий в г. Тарбе (Франция) — С.А. Славатинский (ФИАН), о 7-м Европейском симпозиуме по космическим лучам в г. Ноттингеме (Англия) — Т.Л. Асатиани (ЕрФИ).

С заключительным словом на школе выступил председатель оргкомитета Э.А. Мамиджян. Подводя итоги школе, можно отметить, что отставание отечественной экспериментальной базы в развитии физики высоких энергий, γ -астрономии, и, в частности, замедление темпов создания комплекса АНИ, сказались и на этот раз в недостатке новых экспериментальных результатов, доложенных на школе. Преобладание теоретических и интерпретационных работ стало не совсем приятной традицией, преодолевать которую можно лишь совместными усилиями всего сообщества физиков, работающих в этих чрезвычайно интересных и актуальных областях.

А.Д. Ерлыкин, Э.А. Мамиджян

539.17(063)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

(по материалам конференции в Прово,
шт. Юта, США, 22 — 24 октября 1990 г.)

В Университете Брайама Янга (Прово, шт. Юта, США) состоялась конференция "Аномальные ядерные эффекты в системах дейтерий/твердое тело", организованная Исследовательским институтом электроэнергетики, Департаментом энергетики США и Университетом Брайама Янга.

Выбор Университета Брайама Янга местом проведения конференции, посвященной проблемам низкотемпературного (холодного) ядерного синтеза (НТО, не случаен. Именно здесь за полтора года до этого группой С. Джонса впервые (независимо от М. Флейшмана и С. Понса) было обнаружено испускание нейтронов при насыщении дейтерием кристаллических решеток переходных металлов палладия и титана, послужившее началом "гонки за холодным синтезом".

Подзаголовок названия конференции: "Обзор международного прогресса" нашел достаточно полное отражение в ее составе. Несмотря на относительно

небольшое число участников (немногим более 150 человек), на ней были представлены 18 стран Америки, Европы и Азии.

Конференция вызвала очень большой интерес, который, по всей видимости, превзошел ожидания организаторов, предусмотревших для ее работы всего лишь три дня. В результате программа конференции, включавшая более 70 докладов, дюжину коротких сообщений и посещения лабораторий Университета Брайама Янга, оказалась чрезвычайно перегруженной. Несмотря на то, что заседания начинались в 8 часов утра и заканчивались в 9 — 10 часов вечера, времени для дискуссий и встреч участников конференции оказалось явно недостаточно.

Основное внимание на конференции было уделено экспериментальным работам по НТС (более 50 докладов, включая 6 по геофизическим аспектам НТС и 7 по методике).

Конференция подвела итог полутора годам "эры холодного синтеза", прошедших после первых сообщений в марте 1989 г., которые всколыхнули весь мир. За это время "холодный синтез" пережил период невероятной популярности, обусловленной надеждами решить на его основе энергетические проблемы, стоящие перед человечеством. Позже на смену восторгам пришли скептицизм, раздражение и неверие не только в энергетику, но и в реальность самого явления. Причиной этому послужили поток отрицательных результатов, полученных различными группами, и ставшая сущим проклятием для экспериментов по НТС невоспроизводимость их результатов. Еще одной немаловажной причиной неверия в НТС было отсутствие сколько-нибудь ясного понимания возможного механизма этого явления. Оно никак не хотело укладываться в привычные рамки представлений ядерной физики и физики твердого тела.

В журнале "УФН" уже было рассказано о противоречивой и драматической ситуации с НТС, сложившейся на начало 1990 г. (см.: Царев В.А./УФН. 1990. Т. 160, вып. 11. С. 3). Как же выглядит она сейчас, после конференции в Прово?

Представляется, что важнейший вывод, вытекающий из материалов конференции, состоит в безусловном доказательстве реальности явления НТС. Однако сейчас речь уже не идет о первоначальных надеждах на осуществление непрерывного, "стационарного" процесса низкотемпературного синтеза при "прокачивании" изотопов водорода через кристаллическую решетку. Скорее следует говорить о явлениях редких, спорадических и, по-видимому, не имеющих отношения к "холодному" слиянию ядер в классическом понимании этого термина. (Это изменение точки зрения, видимо, нашло отражение и в названии конференции, не включавшем ставшего уже привычным словосочетания "холодный ядерный синтез".) Уверенности в существовании НТС удалось достичь после того, как в ряде экспериментов была преодолена основная трудность, связанная с невоспроизводимостью. В некоторых экспериментальных сериях повторяемость положительных результатов была доведена до уровня 70 — 100%.

Успех был достигнут за счет следующих факторов:

а) работа с большими образцами Pd или Ti (массой до нескольких

сотен г, площадью поверхности до нескольких сотен см²) позволила получать большой суммарный полезный сигнал;

б) повышение эффективности регистрирующей аппаратуры (от 10^{-6} — 10^{-2} в первоначальных экспериментах до 30 — 45% в более поздних) позволило детектировать очень слабые сигналы и редкие события;

в) тщательный анализ и подавление фонов за счет использования в аппаратуре чистых от радиоактивных примесей материалов, применение пассивной и активной защиты от внешних помех, работа в подземных низкофоновых лабораториях и даже в подводной лодке (в опыте аргентинских физиков) позволили создать благоприятные условия для экспериментов;

г) доверие к положительным результатам усиливает тот факт, что многие из них получены в различных условиях и с помощью совершенно разной методики;

д) немаловажную роль в успехах экспериментов последнего времени сыграло также использование различных методов стимуляции НТС (воздействие пульсирующим током, термо- и криоудары, "взрывная десорбция" и др.).

Другим важным итогом исследований, представленных на конференции, по-видимому, можно считать результаты корреляционных измерений, проведенных советскими физиками из Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН), Луганского машиностроительного института (ЛМИ) и Института ядерных исследований АН СССР (ИЯИК впервые обнаружившими корреляцию испускания продуктов ядерного синтеза (нейтронов и протонов) с акустической и радиоэмиссией. Эти корреляции, ранее предсказанные группой ФИАН — ЛМИ, указывают на связь НТС с ускорением частиц в локальных электрических полях в кристаллах и могут оказаться ключевыми для понимания механизма явления НТС.

Рассмотрим теперь более подробно наиболее интересные экспериментальные результаты, представленные на конференции. Теоретические работы, заслуживающие отдельного обсуждения, будут упомянуты здесь очень кратко.

Эксперименты с регистрацией нейтронов. Начнем с наиболее обширной группы докладов, посвященных регистрации нейтронов.

Группа из Лос-Аламосской национальной лаборатории и Университета Брайама Янга продолжила свои исследования с насыщением Ti дейтерием из газовой фазы. Начиная с апреля 1990 г. работы проводились с усовершенствованной аппаратурой и улучшенной процедурой приготовления образцов. Использовался детектор, состоящий из двух независимых поясов с 9 и 41 нейтронным счетчиком на ³He, имеющий полную эффективность $\eta \approx 44\%$. Мониторинг фона осуществлялся тремя дополнительными детекторами. Для уменьшения фона от радиоактивных примесей применялись специальные газовые баллоны из нержавеющей стали. Измерения проводились с образцами из титана, титановых сплавов и губчатого титана общей массой до 300 г. в течение нескольких недель со многими температурными циклами.

В 11 из 13 использованных баллонах с образцами был зарегистрирован избыток нейтронов по сравнению с фоном на уровне от 3 до 12σ , частые небольшие вспышки (2 — 10 нейтронов за время ≤ 50 мкс) и значительно более

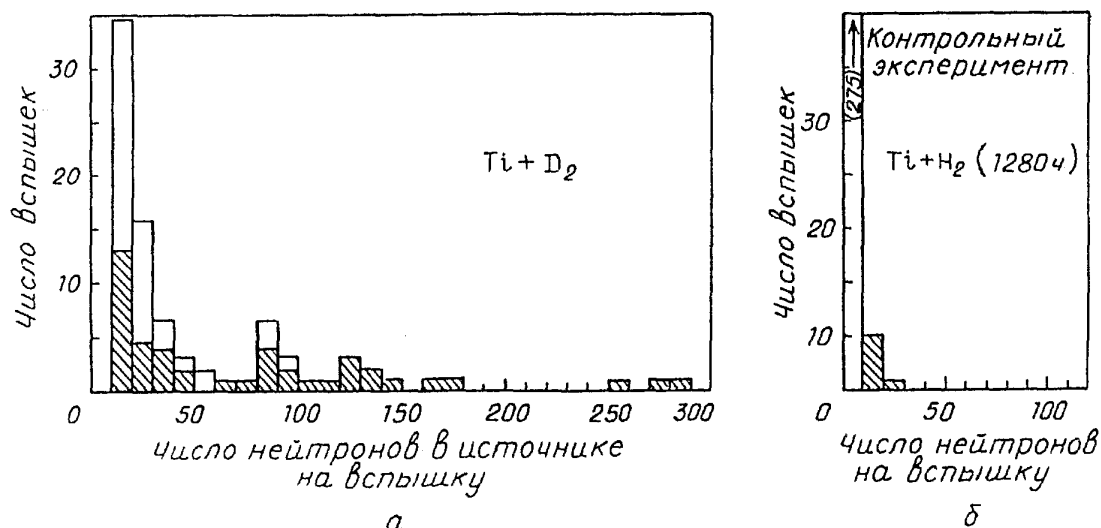


Рис. 1. Эксперимент ЛАНЛ — УБЯ: а — число нейтронных вспышек в зависимости от числа нейтронов в источнике на вспышку в активных образцах $Ti + D_2$; б — число событий в зависимости от числа нейтронов в источнике на вспышку, зарегистрированное в течение 1280 ч контрольного эксперимента с $Ti + H_2$

редкие вспышки с большой множественностью (до 300 нейтронов). На рис. 1,а показано распределение вспышек по множественности в измерениях с D_2 , а на рис. 1,б — аналогичное распределение в контрольных опытах с H_2 . В первой серии из 5 баллонов три дали положительный результат — 2 — 4 вспышки нейтронов с множественностью 20 — 30. Остальные 8 баллонов дали положительный результат, установленный суммированием измерений малых вспышек (по 2 — 10 нейтронов).

Авторы отмечают, что, как правило, вспышки возникали в процессе отогревания образцов при температуре около $-30^\circ C$ (рис. 2).

С. Джонс представил результаты измерений, выполненных группой из Университета Брайама Янга, Лос-Аламоса и Горного колледжа Колорадо в свинцовой шахте в Ледвилле (Колорадо) на глубине 600 м. Медленные нейтроны при электролизе регистрировались набором из 16 пропорциональных счетчиков на 3He , помещенных в полиэтиленовый замедлитель и разделенных на 4 независимые группы. Полная эффективность детектора составляла $\eta \approx 34\%$. Измерения в течение 7 недель показали, что фон (обусловленный в основном радиоактивными распадами в стенках счетчиков) оставался ста-

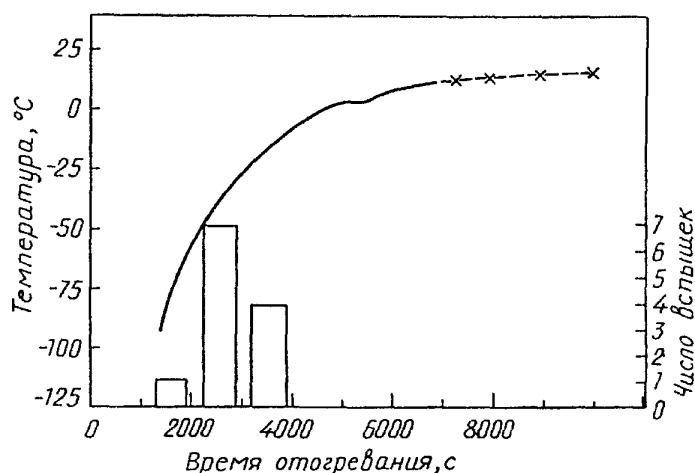


Рис. 2. Эксперимент ЛАНЛ — УБЯ. Число нейтронных вспышек в зависимости от времени и температуры отогревания для двух образцов $Ti + D_2$

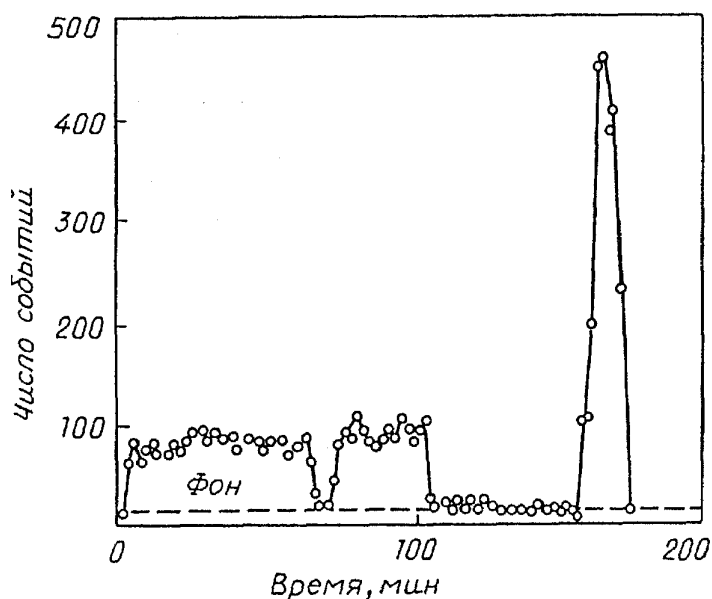


Рис. 3. Нейтронная вспышка с большой множественностью, зарегистрированная группой УБЯ — ЛАНЛ — ГКК

бильным и составлял $\approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Зарегистрированы периоды активности, длившиеся от 1,5 до 40 часов. За 3 недели рабочих измерений найдено 5 вспышек с числом нейтронов до 300 в интервале 128 мкс. Пример вспышки с большой множественностью приведен на рис. 3. Фон для коррелированных событий очень мал: за три недели зарегистрировано только одно фоновое событие, содержащее два отсчета за 128 мкс. Авторы подчеркивают, что использование сегментированного детектора в сочетании с подавлением фо-

на от космических лучей позволяет существенно повысить надежность измерений.

Обширная программа исследований по НТС реализуется в Бхабха-центре атомных исследований (Индия). 12 независимых групп проводят здесь эксперименты с электролитическим и газовым насыщением Pd и Ti.

В 11 различных электролитических экспериментах с катодами площадью от 0,1 до 300 см² наблюдались большие вспышки нейтронов. Некоторые из них показаны на рис. 4. Важно отметить, что первые вспышки эмиссии нейтронов (и трития) наблюдались, как правило, в начальный период проведения электролиза (см. наш обзор в "УФН"), после того как через ячейку прошел заряд в несколько амперчасов (от 0,6 до 3,2 А·ч/см²).

В экспериментах с насыщением из газовой фазы и последующим термодинамическим циклированием также была обнаружена множественная эмиссия нейтронов.

Характерное число нейтронов, зарегистрированных в различных экспериментах, составляет $10^6 - 10^7$. В большинстве случаев нейтроны испускаются для каждой из мишеней в виде одной большой вспышки с интенсивностью, во много раз превосходящей фоновую. По прошествии некоторого времени эмиссия нейтронов затухает и прекращается. Похоже, что вне зависимости от формы образцов интегральный выход нейтронов на единицу площади поверхности образца примерно одинаков и лежит в пределах $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Общая доля "успешных" экспериментов по регистрации нейтронов в Бхабха-центре составляет $\approx 70\%$. Их результаты представлены в табл. I.

Новые результаты были представлены тремя итальянскими группами.

Как известно, вскоре после первых электролитических экспериментов по НТС, проведенных в США, в Италии во Фраскати под руководством Ф. Скарамуци были выполнены эксперименты с применением другой техники: насыщением Ti из газовой фазы и изменением термодинамических параметров

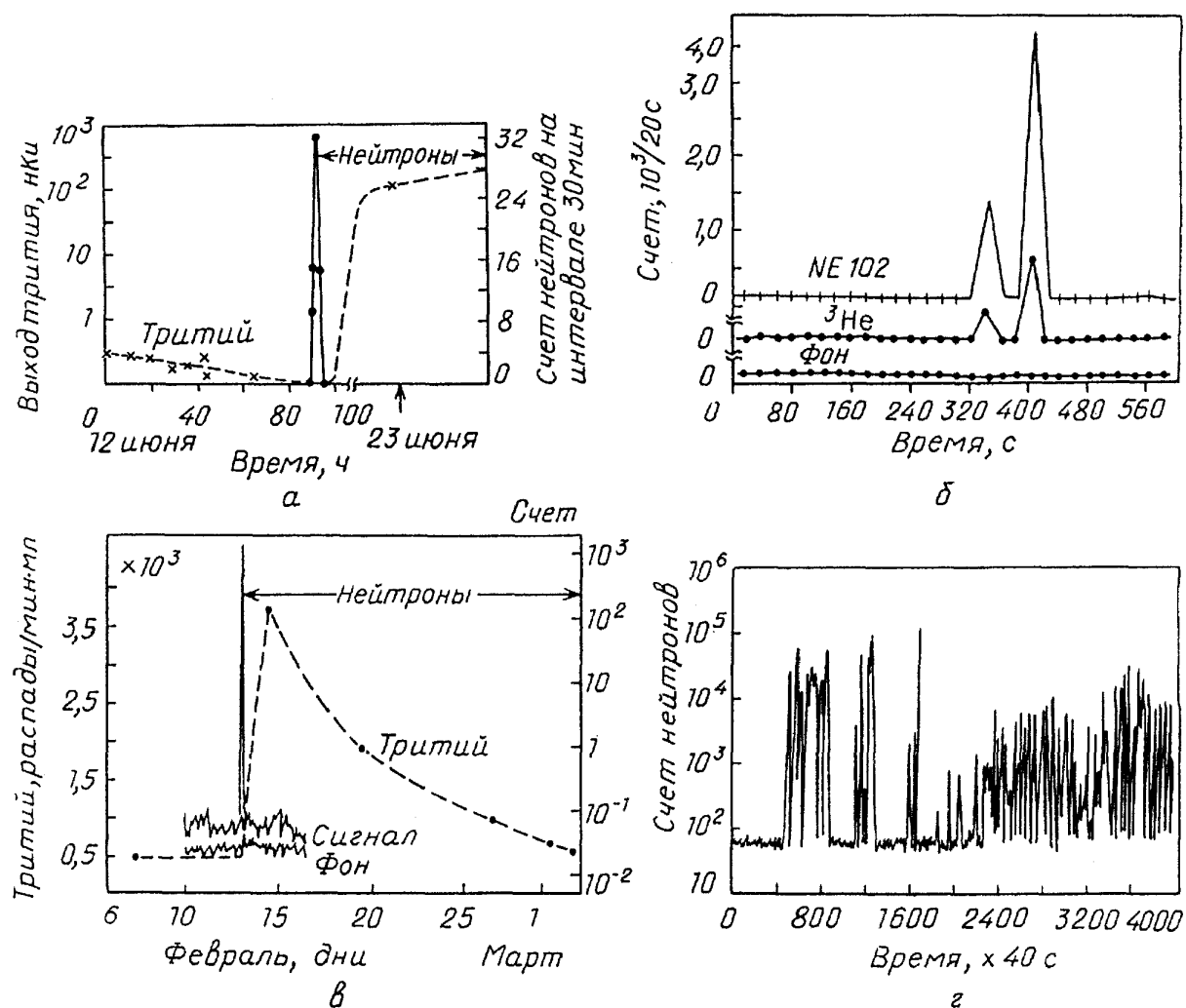


Рис. 4. Нейтронные вспышки и образование трития в экспериментах БЦАИ (а — г)

(давления, температуры). В этой работе впервые были обнаружены сильные нейтронные вспышки. В дальнейшем подобная техника нашла широкое применение в экспериментах по НТС.

Отсутствие воспроизводимости этих (как, впрочем, и всех других) экспериментов по НТС заставило группу Ф. Скарамуци провести тщательный анализ своих экспериментов "первого поколения", чтобы убедиться в достоверности обнаруженных ими эффектов. Результаты этого анализа и предварительные данные эксперимента "второго поколения" с улучшенной аппаратурой для регистрации нейтронов (и анализом на тритий) были представлены на конференции. Основные выводы авторов состояли в следующем:

а) критическая проверка результатов первых измерений подтвердила их обоснованность;

б) в новых экспериментах найдены вспышки нейтронов в системах $\text{Ti} + \text{D}_2$ (рис. 5) и не найдены в измерениях с $\text{Ti} + \text{H}_2$.

Увеличение скорости счета ^3He -детекторов вспышечного типа зарегистрировано также группой из Университета Ла Сapiенца (Рим, Италия) при электролизе с палладиевым электродом, хотя, как считают авторы, частично это могло быть обусловлено какими-то ложными эффектами (например, механоэмиссией, см. [1]).

Т а б л и ц а I. Регистрация нейтронов и трития при электролизе в Бхабха-центре атомных исследований

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Катод:											
материал	Ti	Pd—Ag	Pd—Ag	Pd—Ag	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd
площадь поверхности	104	300	300	78	20	5,9	6	5,7	18	4,4	8
Плотность тока, А/см ²	400	300	300	800	200	340	100	700	60	50	100
Зарядка:											
заряд, А·ч/см ²	1,2	0,6	—	3,2	0,8	3,0	2,5	650	3,4	0,15	36,7
время, ч	3	5	0,5	4	4	9	24	930	560	3	300
Активное время	несколько ч	3,5 ч	2 ч	3 мин	1 мин	5 ч	5 сут	100 с	40 ч	5 сут	8 ч
Выход нейтронов:											
число вспышек	непрерывно	9	1	1	1	3	17	1	Много	Много	2
полное число н-в	3·10 ⁷	4·10 ⁷	9·10 ⁷	5·10 ⁶	1·10 ⁶	3·10 ⁶	1,4·10 ⁶	3·10 ⁶	1,8·10 ⁸	5,8·10 ⁶	2,4·10 ⁶
нейтронов/см ²	2,9·10 ⁵	1,7·10 ⁵	1,3·10 ⁴	1,3·10 ⁴	5·10 ⁴	5·10 ⁵	2,3·10 ⁵	5,2·10 ⁵	10 ⁷	1,3·10 ⁶	3·10 ⁵
Выход трития:											
полный, Бк	2,6·10 ⁵	1,5·10 ⁷	3,8·10 ⁶	7·10 ⁶	—	1,4·10 ⁵	1,3·10 ³	7,7·10 ³	325	32,5	6,3·10 ³
полный, атомов	1,4·10 ¹⁴	8·10 ¹⁵	1,9·10 ¹⁵	4·10 ¹⁵	—	7,2·10 ¹³	6,7·10 ¹¹	4·10 ¹²	1,8·10 ¹¹	1,8·10 ¹⁰	3,5·10 ¹²
Т/см ²	1,3·10 ¹²	2,7·10 ¹³	6·10 ¹²	10 ¹³	—	1,2·10 ¹³	1,1·10 ¹¹	5,2·10 ¹³	1·10 ¹⁰	4·10 ⁹	4,4·10 ¹¹
Отношение Н/Т	2·10 ⁻⁷	0,5·10 ⁻⁸	0,5·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁹	—	4·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻³	3,2·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁷

О регистрации мощных вспышек γ -квантов группой из Фраскати, проводившей электролитическое насыщение дейтерием Pd и Ti в подземной лаборатории Гран-Сассо, сообщил Ф. Селани (см. обзор в "УФН"). В этом же докладе были представлены новые результаты по поискам нейтронной эмиссии при газовом насыщении дейтерием образцов из высокотемпературных сверхпроводящих материалов типа $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$. Образцы весом 6 — 8 г помещались в баллон из нержавеющей стали, в который подавался D_2 при давлении 35 бар и температуре 300 К. Затем производился нагрев до 371 К. После того как поглощение D_2 приводило к падению давления, температура снижалась до 358 К и система выдерживалась 3 ч. Затем за несколько минут проводилось охлаждение до 300 К и давление D_2 опять доводилось до 36 бар. После этого проводилось термоциклирование: охлаждение до 77 К и отогрев до 300 К за 1 ч. При первом термоцикле был зарегистрирован подъем уровня нейтронной эмиссии до $\approx 10 \text{ ч}^{-1}$ (при фоне $\approx 1 \text{ ч}^{-1}$). При последующих циклах уровень избыточной эмиссии уменьшался и полностью исчез после 10-го цикла.

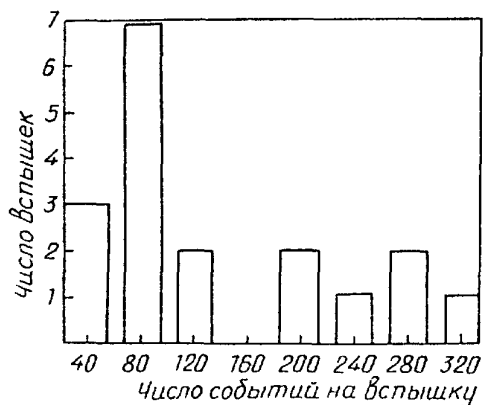


Рис. 5. Эксперимент Фраскати. Число нейтронных вспышек в зависимости от числа нейтронов в источнике на вспышку

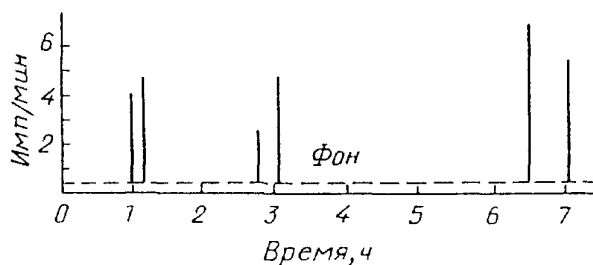


Рис. 6. Последовательность из 6 нейтронных вспышек, зарегистрированных в начале электролиза группой ФИАН — ЛМИ — ЛГУ

О регистрации в первые 6 часов электролиза последовательности из 6 нейтронных вспышек, содержащих $\sim 10^2$ нейтронов каждая (отношение сигнал/фон ≥ 10), длительностью < 1 мин (рис. 6) было сообщено группой ФИАН — ЛМИ — ЛГУ (Львовский государственный университет). Три гигантские нейтронные вспышки с $\sim 10^6$ нейтронов в интервале ≤ 1 с были зарегистрированы японскими физиками из Лаборатории фундаментальных исследований (Токио) при использовании специальной техники "взрывной десорбции" (см. ниже).

Вспышки были обнаружены также группой из Китайского института атомной энергии (Бенджин), проводившей часть своих измерений в подземной лаборатории на глубине 580 м. В 6 из 8 цилиндров со смесью Ti + D_2 вспышки возникали при температуре от -100°C до комнатной. В первых четырех сериях наблюдались вспышки с числом нейтронов от 15 до 500, что в 3 — 75 раз превосходило уровень фона. В контрольном эксперименте с Ti + H_2 вспышки не обнаружены.

25 периодов значительного подъема уровня нейтронной эмиссии были за-

регистрированы испанской группой из Мадридского университета в ходе 800-часового электролиза тяжелой воды с титановым катодом. Интенсивность нейтронного излучения во время вспышек колебалась от 6,4 до ~ 40000 счетов в час и значительно превышала фоновую (1 — 2 счета в час). Продолжительность вспышек составляла от 0,4 до 11,2 ч. Был зарегистрирован также сигнал γ -квантов с энергией в интервале 2,15 — 2,30 МэВ, возникавший всякий раз, когда нейтронный детектор показывал скорость счета нейтронов больше ~ 50 счетов в час. (Последнее обстоятельство легко понять, имея в виду происхождение γ -квантов от захвата нейтронов в замедлителе и эффективность их регистрации детектором на NaI(Tl).) Примеры вспышек по нейтронному и γ -каналам показаны на рис. 7.

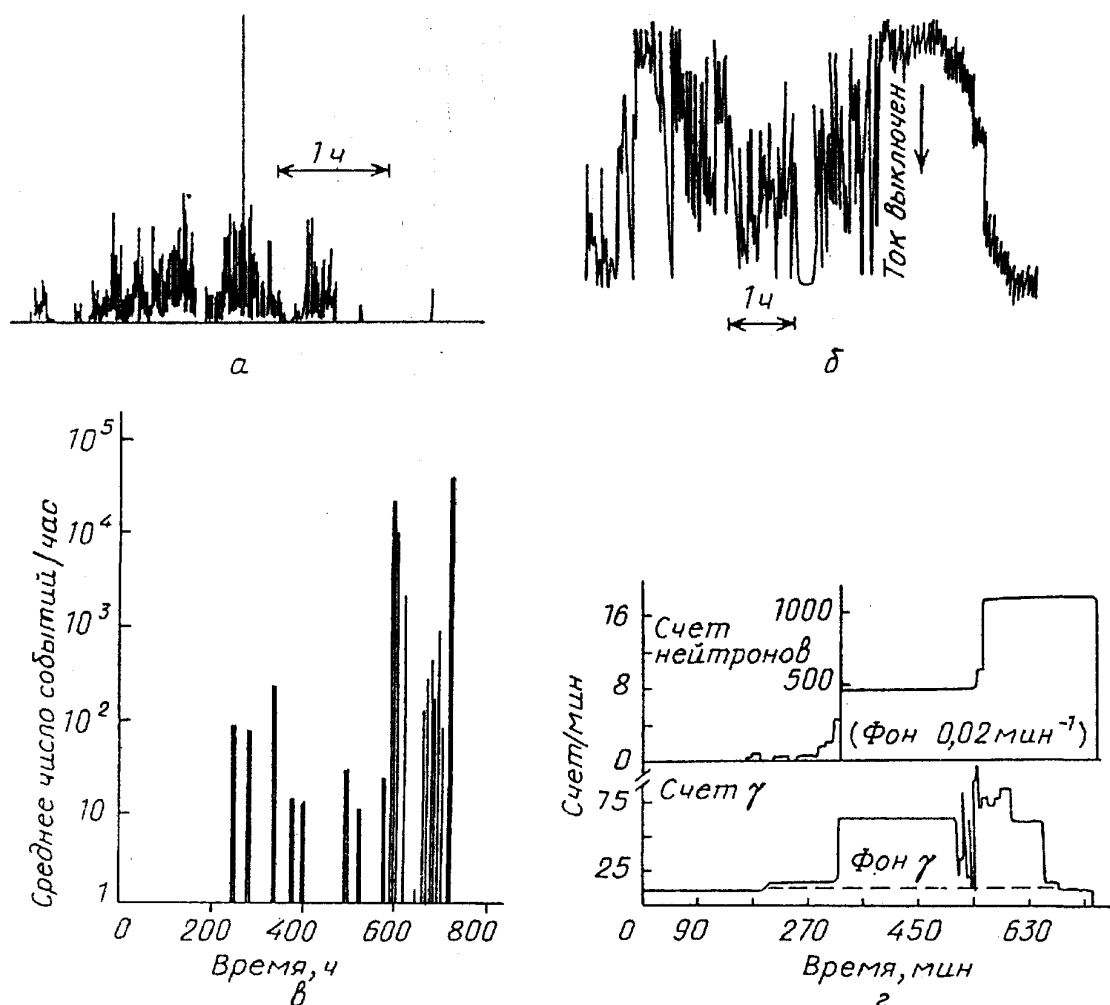


Рис. 7. Вспышки нейтронов и γ -квантов, зарегистрированные группой Мадридского университета: *а* — типичная вспышка; *б* — наиболее мощная вспышка, содержащая $\sim 3 \cdot 10^5$ нейтронов; *в* — средняя интенсивность в различные периоды активности; *г* — развитие нейтронного и γ -сигналов во время наиболее мощной вспышки

Заметим, что в экспериментах советской группы ФИАН — ЛМИ — ЛГУ, японской из Университета Осака, аргентинской из Атомного центра в Барилоче и итальянской из Университета Ла Сапиенца было продемонстрировано стимулирующее воздействие на НТС меняющегося во времени тока электролиза, предсказанное ранее группой ФИАН — ЛМИ (см. обзор в "УФН").

Аргентинская группа обнаружила различие в уровне нейтронной эмиссии в периоды подъема и спада тока, в зависимости от режима его предварительного насыщения дейтерием.

Еще одно интересное наблюдение сделано группой из Веберовского государственного колледжа. В эксперименте с газовым насыщением дейтерием Pd, где были зарегистрированы несколько нейтронных вспышек и общий подъем уровня нейтронной эмиссии, длившийся около 10 суток, обнаружены резкие изменения в сопротивлении образца, совпавшие с одной из больших нейтронных вспышек (рис. 8). Заметим, что возможность таких изменений проводимости, связанных с образованием нестабильных гидридных фаз, была ранее предсказана группой ФИАН — ЛМИ (см. обзор в "УФН").

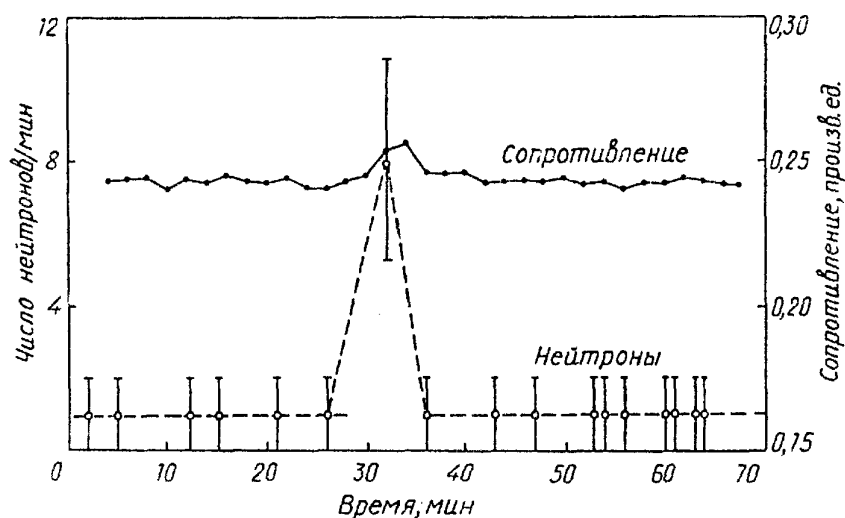


Рис. 8. Корреляция нейтронной вспышки и изменения сопротивления образца в эксперименте группы ВГК

Результат, не получивший пока объяснения, был сообщен группой из Университета Осака, проводившей регистрацию нейтронов при электролизе с помощью нейтронного спектрометра на жидком сцинтилляторе NE213 с разделением сигналов от нейтронов и γ -квантов. Кроме ожидаемых нейтронов с энергией 2,45 МэВ, найдены сигналы от нейтронов с энергией 3 — 7 МэВ, происхождение которых пока не понятно.

Указание на возможное инициирование реакций НТС в химических реакциях было впервые получено в экспериментах, проведенных в Институте ядерной физики СО АН СССР. Короткое сообщение об этом было сделано М. Даносом, посетившим незадолго до конференции этот институт. При растворении кристаллов LiD в D₂O, сопровождавшемся нагреванием до 70 — 80°C, было обнаружено повышение счета в нейтронном детекторе по отношению к фоновому в $1,70 \pm 0,14$ раз. Аналогичный эффект был обнаружен при взаимодействии с цинком сложных солей Pd и Pt, содержащих дейтерий.

Наряду с докладами, содержащими положительные результаты, на конференции в трех докладах сообщалось об экспериментах, в которых не удалось наблюдать нейтронную эмиссию.

В докладе Р. Андерсона из Лос-Аламосской национальной лаборатории были приведены результаты измерений интегрального выхода нейтронов,

спектрометрических измерений и поиска нейтронных вспышек. Избыток нейтронов не был найден ни в эксперименте с электролизом, ни при газовом насыщении. Тщательное изучение нейтронного фона, выполненное авторами как на земле, так и в подвальном помещении (на глубине 15 м) с пустыми детекторами и с их различным наполнением, дало результаты, напоминающие эффекты, которые ассоциируются с сигналами НТС. В частности, в интегральном спектре нейтронов были обнаружены флуктуации на уровне $3 - 7\sigma$. В спектре фоновых нейтронов был обнаружен слабый пик при энергии $\approx 2,5$ МэВ. Наконец, наблюдались события с большой множественностью нейтронов, обусловленные фоном от космических лучей. Важный урок, следующий из этой работы, состоит в необходимости тщательного контроля за работой аппаратуры и уровнем фона в экспериментах по НТС.

Группа из Орегонского университета (США) в ходе 40-недельного электролиза тяжелой воды зарегистрировала 7 случаев подъема температуры, не сопровождавшиеся подъемом интенсивности излучения нейтронов, γ -квантов и концентрации трития и, по-видимому, обусловленные чисто электрохимическими эффектами. Не привели к положительному результату также попытки группы из Этвешского университета (Венгрия) зарегистрировать избыточные нейтроны или γ -кванты при электролитическом насыщении дейтерием аморфного вещества $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_{10}$, до сих пор не использовавшегося в экспериментах по НТС и обладающего высокой способностью к поглощению водорода.

Следует упомянуть еще об отрицательных результатах поиска нейтронной эмиссии при электролитическом и газовом насыщении Pd и Ti, которые были представлены группой Объединенного института ядерных исследований (Дубна), однако, из-за отсутствия авторов, на конференции не докладывались.

Регистрация заряженных частиц. Как известно, регистрация заряженных продуктов ядерного синтеза (p , T , ^3He) в экспериментах по НТС очень трудна, поскольку пробеги этих частиц в веществе образцов и аппаратуры малы. По этой причине до недавнего времени было опубликовано всего несколько работ по поиску заряженных продуктов НТС, по большей части с отрицательными результатами (см. обзор в "УФН").

На конференции в Прово было представлено удивительно много (7) работ, в которых получены положительные результаты по заряженным частицам (в основном протонам).

Прежде всего следует упомянуть работу группы из Горной школы в Колорадо (США), в которой впервые наблюдались интенсивные вспышки заряженных частиц (до 10^5с^{-1}) из дейтерированных фоль титановых сплавов. За 56 дней измерений зарегистрировано 24 вспышки в 12 образцах из 26. Активность возникала при термоциклировании в диапазоне от -180°C до комнатной температуры. Измерения, проводившиеся с помощью кремниевых поверхностно-барьерных детекторов, позволили установить, что среди заряженных частиц наряду с протонами имеются также тритоны. В восьми фольгах, насыщенных водородом, аналогичные вспышки не наблюдались в течение 7 суток измерений.

В эксперименте группы из шести Калифорнийских институтов (доклад Э. Лопеса) тонкая палладиевая пленка (толщиной $3400\text{\AA}$, с площадью поверхности 1 см^2) была напылена на поверхность полупроводникового детектора и подвергнута ионной имплантации в пучке ионов D_2^+ с энергией 80 кэВ. После насыщения пленки и выключения источника был зарегистрирован сигнал эмиссии заряженных частиц.

Техника ионной имплантации была использована также для насыщения титановых фольг дейтонами с энергией 0,3 — 1 кэВ в эксперименте, проведенном в Военно-морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне (США), а также группой канадских физиков из Университета Манитоба.

В экспериментах трех групп: ФИАН — ЛМИ, Университета Осака (Япония) и Университета Синьхуа (Китай) проводились эксперименты по поиску корреляций эмиссии протонов и электромагнитного излучения. При этом группы ФИАН — ЛМИ и Осаки для стимуляции реакций НТС использовали меняющийся во времени ток электролиза. Во всех трех экспериментах было зарегистрировано испускание заряженных частиц.

Кроме этих положительных результатов, группой из Техасского университета (США) были приведены отрицательные результаты. В этом эксперименте дейтерированные титановые фольги помещались в высокий вакуум и охлаждались до температуры жидкого азота. Затем в течение 24 часов происходил их отогрев. В каждой серии использовались два образца площадью около 300 мм^2 , которые просматривались кремниевыми полупроводниковыми детекторами. Один из них ($\Delta E/E$) площадью 100 мм^2 состоял из двух слоев толщиной 16 и 300 мкм, другой площадью 450 мм^2 имел толщину 300 мкм. Поштучное детектирование событий позволяло получать однозначную идентификацию частиц при высокой эффективности регистрации. В образцах, каждый из которых 4 раза подвергался термоциклированию, не была обнаружена эмиссия однозарядных частиц. Фон определялся главным образом α -частицами от радиоактивных распадов.

Анализ на тритий. Большое внимание на конференции было уделено экспериментам по поиску образования трития. Вопрос о генерации трития по каналу $D + D \rightarrow T + p$ в НТС является одним из наиболее острых и спорных. В то время как в целом ряде экспериментов был обнаружен выход трития, притом, как правило, превосходящий на несколько порядков выход нейтронов, во многих других опытах избыток трития не был обнаружен. Конференция в Прово хотя и укрепила позиции сторонников идеи о преобладании "трיתי-евого канала" над "нейтринным" ($D + D \rightarrow n + {}^3\text{He}$), тем не менее не дала окончательного ответа на этот вопрос.

Наиболее обширные и впечатляющие результаты по тритию были получены в Бхабха-центре атомных исследований при электролизе, газовом насыщении и в опытах с установкой типа плазменного фокуса. Уровень трития в приповерхностном слое образцов измерялся различными методами: прямым

счетом β -активности с помощью газовых пропорциональных счетчиков, посредством регистрации детекторами на NaI и Ge 4,9-кэВных рентгеновских квантов от возбуждения атомов Ti, радиографией с помощью рентгеновских пленок. Во всех 22 экспериментах с электролитическими ячейками найден избыток трития в количестве от 10^{10} до 10^{16} атомов. Получено указание относительно одновременного образования нейтронов и трития (примерно в половине опытов, см., например, рис. 4а, в). Интегральная плотность выхода трития лежит в пределах $4 \cdot 10^9 - 1,7 \cdot 10^{14}$ на см^2 поверхности образца. В 10 из 22 ячеек она находится в пределах $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$, тогда как в остальных — $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Как и по нейтронам, общая доля "успешных" серий с регистрацией трития в Бхабха-центре составляет $\approx 70\%$.

Наиболее поразительной чертой является большое значение отношения выхода трития и нейтронов, составляющее типично $10^6 - 10^9$ и только изредка $10^3 - 10^4$.

Интересный результат, полученный в Бхабха-центре в последнее время, связан с использованием установки типа плазменного фокуса с дейтериевым наполнением. После сеанса с 80 разрядами в поверхностном слое центрального электрода установки найдено 10^{16} атомов трития. Авторы высказывают предположение о стимулирующей роли радиочастотного нагрева в генерации трития в Ti.

Таблицы I — IV содержат основные сведения об экспериментах Бхабха-центра по поискам трития.

Положительные результаты по поискам трития были представлены также группами Фраскати (Италия), Мадридского университета (Испания), Института ядерной энергии (Китай), Университета Ла Сапиенца (Италия) и ФИАН — ЛМИ — ЛГУ. При этом последние три группы использовали для стимуляции НТС меняющийся во времени ток в электролизере.

Группа из Мадридского университета в ходе длительного 800-часового электролиза тяжелой воды с титановым электродом получила указание на существование двух режимов образования трития. В первые 500 часов было обнаружено несколько периодов повышения содержания трития, коррелированные с нейтронными и γ -вспышками (рис. 9). Задержка (~ 10 часов) между T и n, γ -вспышками может быть объяснена временем диффузии T из катода в электролит. После ≈ 500 часов концентрация трития стала проявлять "осциллирующее" поведение, при котором нейтронные и γ -вспышки сопровождались не подъемом, а падением содержания трития (см. рис. 9, д, е). По мнению авторов, два обнаруженных режима могут соответствовать реакциям $D + D \rightarrow T + p$ (${}^3\text{He} + n$) и $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ (в последнем случае нейтрон должен иметь энергию не 2,45 МэВ, а 14,1 МэВ).

Наряду с этими положительными результатами по тритию, группа из Техасского университета (США) отказалась от своих прежних данных, указывавших на обильное образование трития при электролизе, и представила отрицательные результаты. В новых измерениях в более чем 100 электролитических ячейках не было обнаружено образование трития, которое можно было бы отнести на счет реакций НТС. По мнению авторов, наблюдавшийся

Т а б л и ц а II. Регистрация трития при электролизе в Бхабха-центре атомных исследований

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Катод:</i> материал	Pd—Ag	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd	Pd
площадь, см ²	113	113	19	14,5	6,37	6,37	6,37	2,75	0,57	0,126	4
Объем электролита, мл	150	150	150	65	60	100	80	80	28	3	1,5
Плотность тока, мА/см ²	350	350	105	160	< 350 пульс	< 470 пульс	< 350 пульс	800	100	278	7,5
Продолжительность электролиза	12 ч	30 ч	13 сут	7,4 сут	366 ч	183 ч	5,8 сут	40 сут	190 сут	17 сут	80 сут
<i>Измерения трития:</i> начальная концентра- ция Бк/мл	1,44	3,33	3,6	2,7	2,81	2,77	2,70	2,68	4,6	2,0	2,5
максимальная кон- центрация, Бк/мл	225,7	18,5	—	$0,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	4,6	—	—	72	65	23
отношение конечной и начальной концент- раций	167	5,6	3,36	3425	21	1,66	2,5	1,9	15,7	32,5	9,16
полный избыток, Бк атомов	$3,3 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^3$	10^{12}	10^{11}	$2 \cdot 10^{10}$
Выход Т/см ²	$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$0,8 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	$6,2 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^{12}$	$0,5 \cdot 10^{10}$

Т а б л и ц а III. Образование трития при газовом насыщении Pd дейтерием в Бхабха-центре атомных исследований

Номер эксперимента	1	2	3	4	5
Материал образца	Pd	Pd—Ag	Pd—Ag	Pd—Ag	Pd—Ag
Масса, г	20	0,96	10,9	10,6	0,43
Объем поглощенного D ₂ , мл	1325	34,5	516,4	222	20,2
Отношение D/Pd	0,63	0,46	0,45	0,20	0,45
Время прихода в равновесие, ч	16	16	240	40	240
Объем воды, использованный для извлечения, мл	50	6	50	50	5
Тритиевая активность воды, Бк/мл	8,1	5,9	8,5	12,5	32,6
Отношение T/D в Pd	$32 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$0,87 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$8,3 \cdot 10^{-11}$
Абсолютная активность трития, Бк	411	37	429	718	159
Полное число атомов трития в Pd	$23 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{11}$	$9 \cdot 10^{10}$
Число атомов трития на грамм Pd	$1,2 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$20,8 \cdot 10^{10}$

Т а б л и ц а IV. Образование трития в Ti при газовом насыщении дейтерием в Бхабха-центре атомных исследований

Номер эксперимента	1	2	3
Масса образца, г	0,98	0,206	0,2
Масса поглощенного D ₂ , мг	0,42	0,07	0,29
Активность по счету рентгеновских квантов, Бк	290	1300	$5,5 \cdot 10^6$
Число атомов трития	$1,5 \cdot 10^{11}$	$6,5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
Отношение T/D	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$

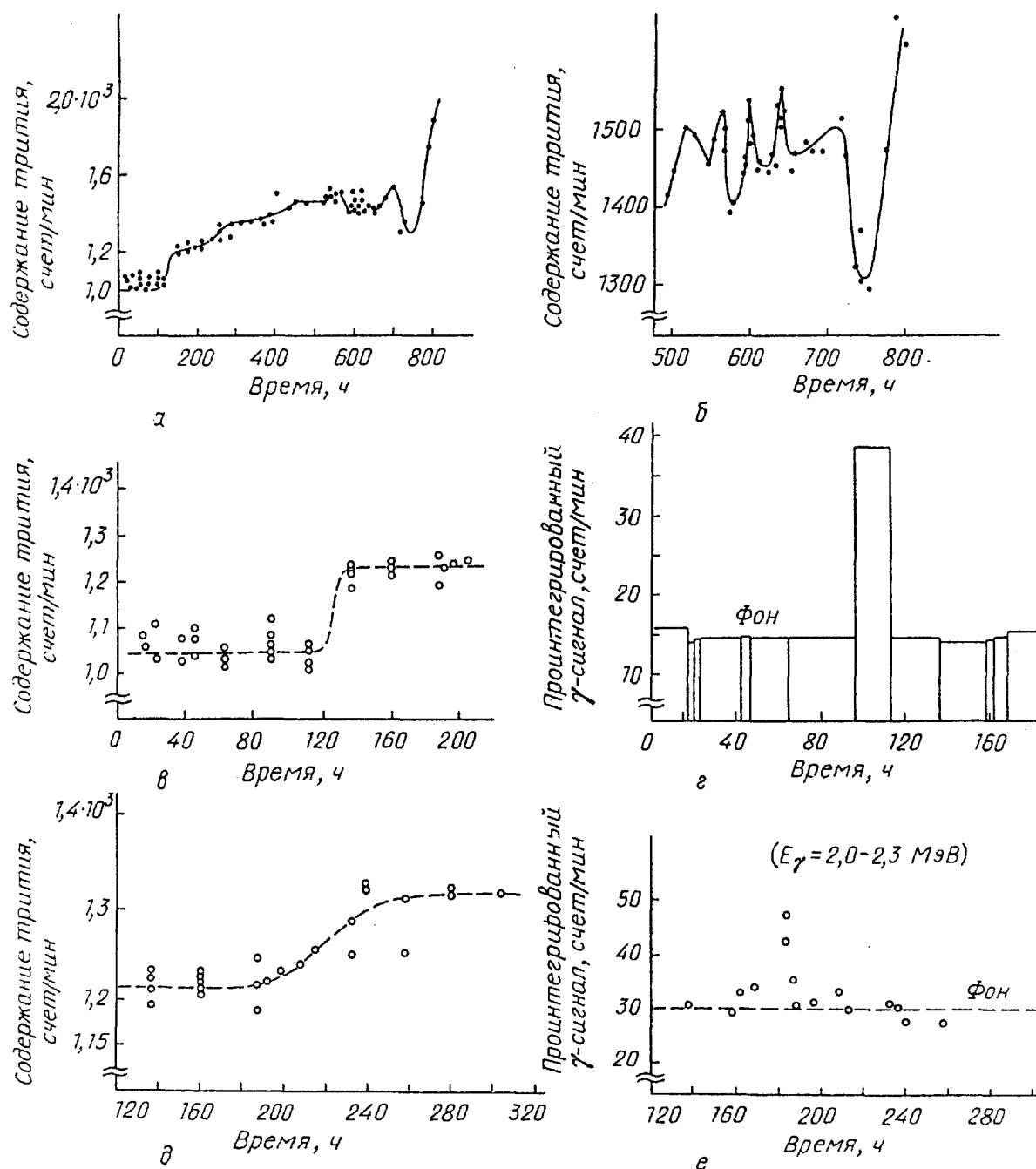


Рис. 9. Концентрация трития в электролите в эксперименте группы Мадридского университета: в — Содержание трития в электролите в первые 200 ч; г — Проинтегрированный γ -сигнал в первые 200 ч; д — Содержание трития в электролите в период 120 — 320 ч измерений; е — Проинтегрированный γ -сигнал в период 120 — 320 ч

ими избыток трития обусловлен примесями, содержащимися в металле электрода и в электролите.

В дискуссии по этому докладу и некоторых последующих выступлениях эта точка зрения была подвергнута критике. Так, группа из Национального института холодного синтеза (Солт-Лэйк-сити, США) сообщила о работе, проведенной ими специально для проверки предположения о примесях в Pd как возможном источнике избыточного трития. Использовались открытые электролизеры, подобные тем, которые применялись в экспериментах, где ранее было обнаружено образование трития. Были проверены 45 палладиевых образцов, произведенных тремя различными компаниями и имевших различные размеры и металлургическую историю. Никаких признаков примесей трития обнаружено не было: в пределах ошибки эксперимента (± 3 распадов/мин.мл) все образцы давали счет трития на уровне фона (26 распадов/мин.мл). Авторы замечают, что использование открытых электролизеров может приводить к ненадежным результатам, если не предусмотрены специальные меры предосторожности. В этом отношении более предпочтительными являются системы с замкнутым циклом электролиза.

Корреляционные эксперименты. Рассмотренные выше эксперименты, в которых при различных способах насыщения решетки металлов дейтерием регистрируются те или иные продукты ядерного синтеза (нейтроны, протоны, γ -кванты, тритий), можно отнести к категории традиционных. Наряду с этим на конференции были представлены результаты первых экспериментов нового типа, так называемых "корреляционных", в которых проводилась одновременная регистрация продуктов ядерных реакций и возможных сигналов от "сопутствующих" явлений (см. обзор в "УФН"),

В эксперименте, проведенном группой ФИАН — ЛМИ, был использован богатый опыт исследований по радиационной акустике и механоэмиссии, накопленный группой П.И. Голубничего (ЛМИ). Искались временные корреляции между импульсами ядерной (протонной), электромагнитной и акустической эмиссий при электролитическом насыщении дейтерием палладиевых мишеней. В непосредственной близости от мишени были помещены датчики регистрационных каналов: а) ядерного: сцинтиллятор CsI, просматриваемый ФЭУ; б) акустического — пьезокерамическая шайба ИТС-19, припаянная к мишени из Pd; в) электромагнитного — тороидальная катушка с усилителем, обладающим коэффициентом усиления $\sim 10^4$ и полосой пропускания ~ 1 МГц. Загрузка по указанным каналам составляла соответственно $\sim 10^{-3}$ Гц, ~ 400 Гц и $\sim 0,03$ Гц. Стартовый импульс вырабатывался сцинтиллятором CsI. В акустический импульс была введена задержка 10 мкс, позволявшая регистрировать акустические сигналы, предшествовавшие ядерному импульсу. Искались тройные корреляции в пределах временного интервала 10 мкс. При указанных условиях вероятность случайных тройных совпадений составляла $\sim 3 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$. В течение 15 часов контрольных измерений с электролизом H_2O не было зарегистрировано ни одного тройного совпадения.

За время трех рабочих серий с электролизом D_2O общей продолжительностью измерений $\sim 11,5$ ч были обнаружены два события с тройными совпадениями, осциллограммы которых схематически изображены на рис. 10.

Были также измерены амплитуды акустического и радиосигналов. В обоих случаях акустический импульс начинал свое развитие на 2 — 3 мкс раньше стартового импульса, что естественно с точки зрения ускорительного механизма (см. обзор в "УФН"). Ожидаемое число случайных тройных совпадений за время измерений $\sim 10^{-7}$. Еще одна корреляция протонной вспышки и акустической эмиссии была зарегистрирована во время термодесорбции дейтерия при нагревании насыщенной дейтерием мишени Pd.

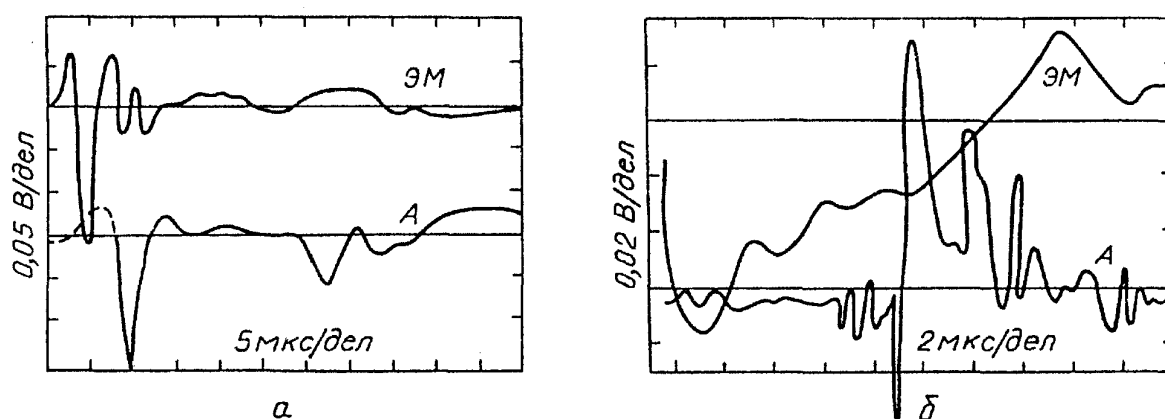


Рис. 10. Осциллограмма двух событий (а, б), зарегистрированных группой ФИАН — ЛМИ, демонстрирующую временную корреляцию между импульсами ядерной, акустической (А) и электромагнитной (ЭМ) эмиссии из палладиевой мишени. Запуск разверток осциллографа осуществлялся сигналом сцинтилляционного детектора

К сожалению, этот эксперимент имел некоторые недостатки: а) число зарегистрированных событий очень мало; б) имеется возможность механоэмиссионной природы сигнала с CsI (фотоны, рентгеновские кванты, сопровождающие растрескивание гидрида Pd), хотя контрольный эксперимент с H_2O в значительной мере исключает этот фактор; в) возможен вклад специального рода коррелированного фона, индуцированного взаимодействием частиц космических лучей, которые могут образовывать быстрые нуклоны и одновременно вызывать раскрытие трещин в напряженном материале гидрида.

Чтобы избавиться от этих недостатков, группа ФИАН — ЛМИ — ИЯИ провела специальный эксперимент в низкофоновой лаборатории Баксанской подземной нейтринной обсерватории института ядерных исследований АН СССР. Использовалась низкофоновая камера, сооруженная для исследований двойного β -распада на глубине 1000 м водного эквивалента с применением низкофоновых материалов. Фон в камере был существенно понижен по сравнению с типичными лабораторными условиями на уровне моря, например, по мюонам примерно в 10^4 раз, по γ -квантам (с энергией 0,5 — 2,5 МэВ) и нейтронам примерно в 10^3 раз. К сожалению, эти прекрасные фоновые условия удалось использовать далеко не в полной мере, поскольку применявшаяся в измерениях стандартная аппаратура содержала значительные радиоактивные примеси. В результате имели: $N^\gamma \sim N_{\text{лаб}}^\gamma / 200$ и $N^n \sim N_{\text{лаб}}^n / 30 \sim 5 \cdot 10^{-3}$ медленных нейтронов в сек в детекторе.

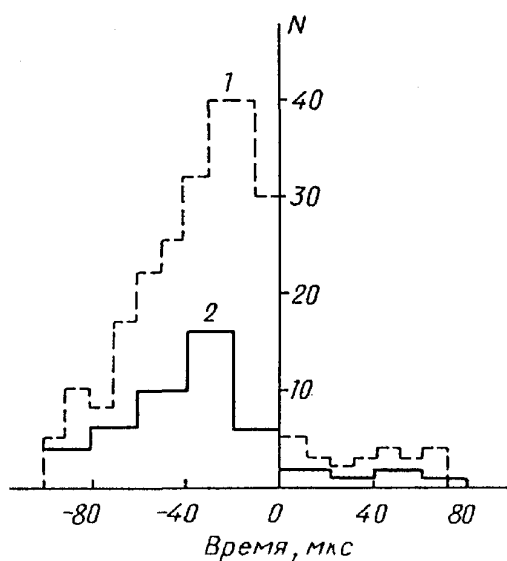


Рис. 11. Корреляционный эксперимент ФИАН — ЛМИ — ИЯИ: 1 — распределение по времени замедления нейтронов в контрольном эксперименте, 2 — распределение по разности времени прихода акустического и нейтронного сигналов в рабочем эксперименте

прихода нейтронных и акустических сигналов (см. рис. 11) подтверждает корректность полученных результатов. Контрольные эксперименты позволили исключить возможные ложные аппаратурные эффекты.

Наличие протонной эмиссии и электромагнитного излучения было подтверждено также в эксперименте группы из Университета Синьхуа при насыщении Pd дейтерием из газовой фазы.

Группа из Университета Осака зарегистрировала высокочастотные сигналы на аноде своей электролитической ячейки, которые возникали в начале электролиза, однако не смогла установить, в какой мере они коррелируют с событиями протонной эмиссии.

Сигналы акустической эмиссии в экспериментах с газовым насыщением Pd и Ti были зарегистрированы группой Лос-Аламоса и Университета Брайама Янга и использовались для контроля за стадией растрескивания образцов.

Завершая этот раздел, еще раз подчеркнем, что корреляционные эксперименты важны прежде всего потому, что, устанавливая связь между НТС и процессами растрескивания гидридов, они могут указывать на возможные механизмы, инициирующие это явление.

Развитие методики. Важным аспектом работ по НТС является совершенствование регистрирующей аппаратуры и методики проведения экспериментов. Остановимся на некоторых итогах конференции в этой области.

1. Техника регистрации нейтронов в принципиальном плане не претерпела существенных изменений. Для регистрации быстрых нейтронов по-прежнему используются твердые и жидкие сцинтилляторы, повсеместно дополняемые системами для γ/n -разделения. Медленные нейтроны регистрируются с помощью пропорциональных счетчиков на ^3He и BF_3 . Вместе с тем значи-

В специальной вспомогательной серии центральный блок парафинового замедлителя был заменен детектором быстрых нейтронов и радиоактивным источником ^{252}Cf . С помощью этой модификации была получена кривая распределения времен замедления нейтронов в условиях геометрии эксперимента, показанная на рис. 11. Типичные времена замедления составляли несколько десятков мкс. В основной серии измерений продолжительностью 4 ч регистрировались медленные нейтроны и акустические импульсы на совпадение и для стимуляции НТС использовался пульсирующий ток и охлаждение образца. Были зарегистрированы 42 события с корреляцией сигналов от нейтронов и акустики в пределах временного интервала 100 мкс при ожидаемом числе случайных совпадений ~ 5 . Хорошее согласие формы кривой замедления и кривой распределения по разности времен

тельно повысилась эффективность (в лучших детекторах до $\approx 45\%$) и помехозащищенность регистрирующей аппаратуры. В ряде установок осуществляется контроль за работой отдельных элементов, исключающий наводки и ложные срабатывания. Наиболее надежным методом является регистрация нейтронов до и после замедления, впервые примененная группой Джонса, а затем использованная в экспериментах групп ФИАН — ЛМИ, Бхабха-центра и ряда других.

Для регистрации заряженных частиц, как правило, применяются полупроводниковые детекторы, которые позволяют не только регистрировать частицы и находить их энергию, но при использовании сэндвичей $\Delta E/E$ дают возможность определять сорт частиц.

Для регистрации трития используется разнообразная техника, включая прямой счет β -активности жидкими или твердыми сцинтилляторами, регистрацию рентгеновских квантов, радиографию и др. Использование различной методики позволяет повысить надежность результатов.

2. В отличие от экспериментов по НТС, проведенных в начальный период, в настоящее время большое внимание уделяется вопросам подавления фона. Достаточно сказать, что в целом ряде измерений использовались низкофоновые подземные лаборатории (рис. 12). Три итальянские группы работали в нейтринной лаборатории Гран Сассо, советская группа ФИАН — ЛМИ — ИЯИ использовала низкофоновую камеру подземной нейтринной обсерватории Баксан, китайская группа из Института атомной энергии (Бейджин) проводила измерения в подземной лаборатории Ментоу на глубине 580 м, а группа С.Джонса — в свинцовой шахте в Колорадо. Это позволило снизить фон от космических лучей на 3 — 6 порядков. В таких условиях важнейшим источником фона становятся радиоактивные примеси, содержащиеся в материалах приборов и окружающих породах. В Баксанской низкофоновой камере, сооруженной для экспериментов по двойному β -распаду, последний источник фонов также существенно подавлен. Специальные низкофоновые материалы стали использоваться также для изготовления экспериментальной аппаратуры для НТС.

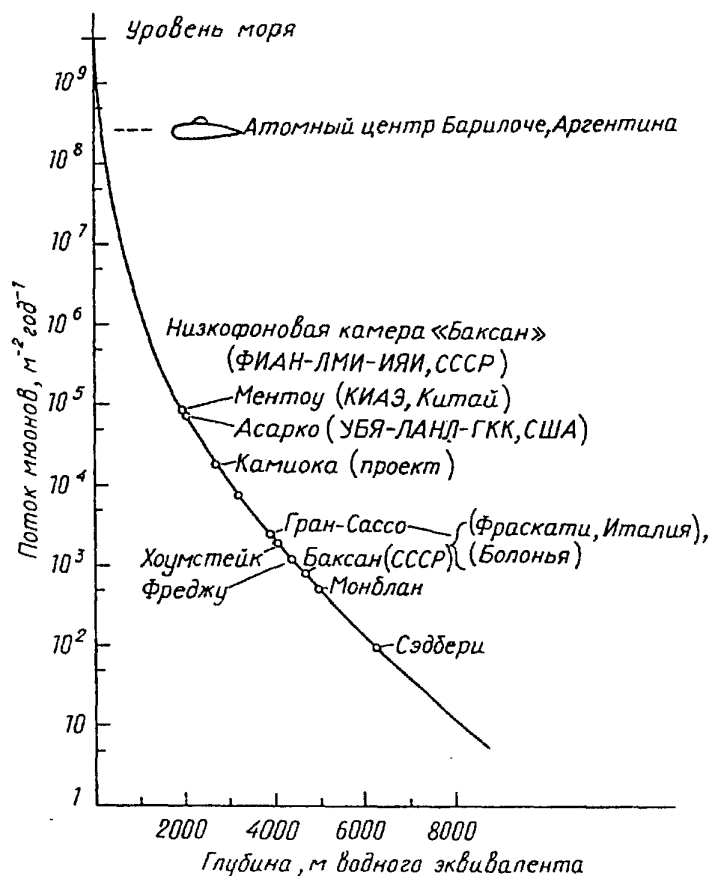


Рис. 12. Изменение потока космических мюонов с глубиной расположения подземных лабораторий. В скобках указаны группы, проводившие в этих лабораториях эксперименты по НТС

Чрезвычайно интересные перспективы для экспериментов по НТС открывает использование подземного черенковского детектора Камиоканде, предложенное в докладе И. Тотсука из Университета Токио (Япония). Предполагается поместить электролитическую ячейку внутрь цилиндра из никеля и регистрировать γ -кванты от реакции захвата нейтронов $\text{Ni}(n, \gamma)\text{Ni}$. Изотопы ^{58}Ni , ^{60}Ni и ^{62}Ni , составляющие 68%, 26% и $\approx 3,7\%$ естественного Ni, дадут γ -кванты с энергией 9,0; 7,8 и 6,8 МэВ соответственно, которые с эффективностью $\approx 10\%$ будут зарегистрированы детектором. Учитывая очень низкие фоновые загрузки, можно обеспечить предел чувствительности к нейтронам (на доверительном уровне 90%) $4 \cdot 10^{-5}$ нейтронов/с ($1 \cdot 10^{-5}$ нейтронов/с) при пороговой энергии γ -квантов 7 МэВ (8 МэВ), что по крайней мере на три порядка превосходит существующий уровень. Возможна также регистрация γ -квантов от реакции $p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ фактически в безфоновых условиях.

3. В предыдущем разделе мы уже говорили о корреляционных измерениях. Они представляют интерес не только с точки зрения выяснения природы НТС, но (в том случае, если наличие корреляций будет подтверждено последующими исследованиями) могут стать удобным и эффективным способом подавления фона и выделения слабых сигналов.

4. Уже в первой работе группы ФИАН — ЛМИ (апрель 1989; см. обзор) высказано предположение о возможности стимуляции процессов НТС с помощью различных внешних воздействий: ультразвука, термо-, крио- и токоциклирования, механических деформаций и т.п. В настоящее время некоторые из этих способов широко используются и, по-видимому, действительно приводят к интенсификации НТС. Так, термоциклирование, впервые использованное группой Ф. Скарамуци, сейчас широко применяется во всех экспериментах по насыщению металлов дейтерием из газовой фазы. В работах групп из Университета Осака, Атомного центра Барилоче, ФИАН — ЛМИ, Университета Ла Сapiенца и других сообщалось об экспериментальном обнаружении стимулирующего воздействия на НТС переменного во времени (пульсирующего или ступенчатого) тока при электролизе (рис. 13).

Интересное наблюдение было сделано индийскими учеными из Бхабха-центра, обнаружившими стимулирующее воздействие на образование трития радиочастотного разогревания дейтерированного образца.

В докладе группы из Токийской лаборатории фундаментальных исследований сообщается о новой эффективной технике стимулирования процессов НТС. Пластика дейтерида палладия (α -фаза) толщиной 1 мм была покрыта с одной стороны (100 нм) пленкой золота, препятствующей выходу атомов дейтерия, а с другой — пленкой MnO толщиной $\lesssim 10$ нм, имеющей коэффициент диффузии, меньший, чем у Pd. Этот слой служил в качестве поверхностного барьера для регулирования скорости выхода атомов дейтерия из гидрида. Три таких образца были помещены в вакуумную камеру. Спустя три часа были обнаружены следующие явления, произошедшие практически одновременно: эмиссия нейтронов ($\sim 10^6$), длившаяся 2 — 3 с, "взрывное" выделение газа, повышение температуры поверхности $\gtrsim 700^\circ\text{C}$ и биаксиальная деформация образцов из-за равномерного расширения со стороны, покрытой

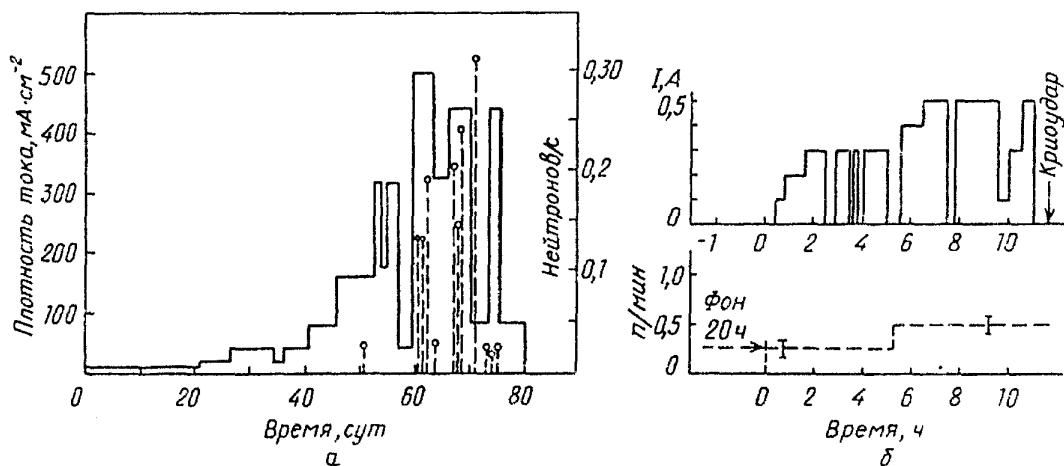


Рис. 13. Изменение тока электролиза для стимуляции НТС: *а* — эксперимент группы Университета Ла Сapiенца. Штриховой линией показаны нейтронные вспышки. *б* — эксперимент ФИАН — ЛМИ — ИЯИ. Верхняя часть рисунка — изменение тока, нижняя — уровень нейтронной эмиссии

пленкой MnO . При последующих откачках те же образцы дали еще две вспышки нейтронов примерно такой же мощности. Последующие 20 откачек не привели к каким либо новым сигналам. Как подчеркивают авторы, указанная процедура приводит к созданию вблизи поверхности, покрытой пленкой MnO , тонкого слоя Pd (≤ 40 мкм) с повышенной концентрацией дейтерия.

5. Наряду с традиционными для экспериментов по НТС методами насыщения образцов (электролиз, D_2 -газ, ионная имплантация), в докладах, представленных на конференцию, сообщалось об успешном использовании установки типа плазменного фокуса (Бхабха-центр) и электролизера с твердым электролитом (Рочестерский университет, США). Заметим, что применение твердого электролита открывает интересные перспективы варьирования температуры в процессе электролиза.

Кроме использования традиционных Pd и Ti , идет поиск новых материалов — "накопителей" дейтерия: как правило, это различные сплавы Pd и Ti ; сообщалось также об экспериментах с аморфным $\text{Fe}_{90}\text{Zr}_{10}$ и высокотемпературными сверхпроводниками $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

6. В докладах на конференции было приведено много интересных "технологических" подробностей, связанных с приготовлением образцов, выбором режима электролиза и газового насыщения, а также с результатами структурных исследований (методами электронной микроскопии, нейтронографии, рентгеноструктурного анализа) и изучения трещинообразования и деформаций образцов в процессе их наводороживания.

Упомянем, в частности, что группа из Лос-Аламоса и Университета Брайама Янга добилась высокой повторяемости положительных результатов при газовом насыщении Ti , проводя предварительное обезжиривание образцов с помощью метилен хлорида, метанола и воды. Группа из Фраскати обращает внимание на то, что при электролитическом насыщении не удавалось получить положительных результатов, если электроды из Pd и Ti(Al) не были предварительно дегазированы, а также если электроды были выполнены из сверхчистого Ti .

НТС и геология. Интригующий аспект проблемы НТС обсуждался на специальной секции конференции, посвященной геохимическим и геофизическим исследованиям. В ряде докладов были высказаны предположения о той роли, которую могут играть процессы НТС в жизни нашей планеты, в частности в распространенности некоторых элементов и даже, возможно, в энергетическом балансе ее недр.

В докладе П. Палмера из Университета Брайама Янга были приведены следующие аргументы, которые могли бы свидетельствовать о протекании процессов НТС в недрах Земли.

а) Концентрация ^3He в атмосфере слишком велика, если не предполагать существование постоянно действующего или "первоначального" источника этого элемента.

б) В вулканических газах, жидкостях и лавах наблюдается неожиданно высокое значение отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$.

в) Тритий, нестабильный элемент с временем полураспада 12,4 года, присутствует в вулканических газах и воде горячих источников.

г) Тепло вулканизма, связанное с субдукцией холодных, несущих воду осадочных пород, оказывается слишком высоким, если объяснять его только фрикционным теплом, генерированным гравитационной потенциальной энергией, и теплом окружающих пород.

д) В то время как обычная радиоактивность, обусловленная U, Th и K, не ассоциируется с горячими точками Земли, а существует на холодных континентах, продукты ядерного синтеза, напротив, обнаруживаются в горячих точках.

е) Наконец, оценки радиогенных источников тепла Земли указывают на недостаточность U, Th и K для объяснения теплового баланса нашей планеты и высокой температуры ядра.

П. Бриттен из Рейсовской лаборатории (Гамильтон, США) привел данные анализа проб, взятых при глубоком бурении в зоне разлома в штате Массачусетс. Здесь было найдено, что концентрация трития и ^3He растет с глубиной примерно линейно, подсказывая наличие единого источника этих элементов или постоянно происходящего процесса, включающего оба этих изотопа.

Аномально высокое содержание трития в лавах кратера вулкана на горе св. Елены было обнаружено группой Лос-Аламосской национальной лаборатории. Исследования показали, что значительное количество атмосферной влаги циклирует через растрескивающуюся лаву. Накопление трития возможно как за счет природных процессов (НТС?), так и в результате загрязнений, связанных с испытаниями ядерного оружия.

В докладе Г. Макмуртри из Гавайского университета сообщается об аномальном увеличении содержания трития в атмосфере, зафиксированном станцией мониторинга трития на Гавайских островах в феврале — марте 1978 г. Анализ данных указывает на возможную корреляцию с извержением вулкана Мауна Улу, расположенного в 40 км от станции, тогда как связь с испытанием советской водородной бомбы за 5 месяцев до наблюдений является маловероятной. Эти и другие подобные им данные мотивируют необходимость более внимательного изучения возможной роли процессов НТС как источника не-

которых изотопов (и, возможно, тепла) в Земле, хотя результаты лабораторных экспериментов по НТС пока не дают для этого достаточно надежных оснований.

Модели НТС. Как и ранее, на конференции не была сформулирована единая, общепризнанная точка зрения на механизм НТС. В настоящем кратком обзоре невозможно сколько-нибудь детально рассмотреть различные теоретические модели и физические соображения, содержащиеся в двух десятках докладов на теоретических секциях и во многих экспериментальных работах, представленных на конференции. Поэтому ограничимся лишь краткими замечаниями о некоторых направлениях, в которых идет поиск ответа на вопрос о природе этого явления.

Если говорить о наиболее популярной идее, то таковой была идея об "ускорительном" или "ускорительно-трещинном механизме" (УТМ) НТС, которая упоминалась во многих докладах. В УТМ синтез, фактически, является не "холодным" (как в μ -катализе), а "микроскопически горячим". Энергия, необходимая для преодоления кулоновского барьера, сообщается ионам за счет ускорения в трещинах, возникающих в процессе насыщения металлов изотопами водорода (см. обзор в "УФН"). Наиболее существенным свидетельством в пользу УТМ являются результаты корреляционных экспериментов. Кроме того, как было показано в докладе группы ФИАН — ЛМИ (см. также [1]), все другие предсказания, сформулированные ранее на основе УТМ, также, по-видимому, получают экспериментальное подтверждение (поверхностно-объемный характер, стохастичность, возможная "квазипериодичность", неравновесность системы металл/дейтерий, "микрогорячее" слияние, возможность внешних воздействий, увеличение электросопротивления в периоды "активности"). Вместе с тем в УТМ имеется ряд проблем, связанных, в частности, с необходимостью предполагать наличие в трещинах достаточно сильных полей и с характерными временами различных конкурирующих процессов (см. обзор в "УФН"). Кроме того, если преобладание "третиевого" канала над "нейтронным" будет окончательно установлено, это потребует введения Б УТМ каких-то изменений в сечение ядерного взаимодействия, учитывающих неравноправие этих каналов. Некоторые возможности в этом отношении обсуждались И. Кимом из Университета Пурду (США) в связи с эффектом Ефимова (бесконечное число уровней в системе трех тел при наличии уровня с нулевой энергией в двухчастичной системе); различие $D(D, p)T$ и $D(D, n)^3He$ могло бы быть следствием взаимодействия в конечном состоянии.

В связи с проблемой "сильных полей" в докладе Дж. Препараты из Национального института холодного синтеза (США) была высказана идея о возможном объединении УТМ и подхода, учитывающего когерентные электродинамические эффекты в конденсированной среде.

Другая возможность может быть связана с указанным М. Даносом (Национальный институт стандартов и технологий, США) и В.Б. Беляевым (ОИЯИ, Дубна) эффектом усиления вероятности слияния ядер дейтерия в кулоновском поле ионов решетки. Возможно, этот эффект позволит объяснить также преобладание третиевого канала.

В ряде работ авторы обращаются к экзотическим частицам для объяснения НТС. Так, в докладах Дж. Рафельского из Аризонского университета (США) и Л. Шоу из Калифорнийского университета в г. Ирвин (США) по аналогии с μ -катализом предполагается сценарий, в котором НТС возникает благодаря катализу новыми тяжелыми частицами (целозаряженными адронами или дробнозаряженными свободными стабильными антидикварками). Предположение об испускании в процессах НТС новых легких частиц вводится также в докладе Т. Мацумото из Университета Хоккайдо (Япония). Подобные модели обладают очень интересными свойствами, однако имеют тот недостаток, что для объяснения одного непонятного явления привлекают другое, еще более гипотетическое.

Значительное число докладов было посвящено особенностям, возникающим в процессе слияния ядер благодаря коллективным эффектам, обусловленным кристаллической решеткой (доклады П. Хагельстойна из Массачусетского технологического института (США), С. Чабба из Корпорации исследовательских систем (США), А. Таненбаума из Университета Ла Сапиенца (Италия), Г. Такахаши из Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и др.).

В.М. Высоцкий из Киевского государственного университета и Р.Н. Кузьмин из Московского государственного университета обсуждают условия, при которых дейтоны, находящиеся вблизи микродефектов в кристаллах, могли бы участвовать в "беспороговом слиянии", обусловленном сильным перекрытием их волновых функций.

В докладе Дж. Черафолини из Лаборатории материаловедения (Сан Дато, Италия) высказывается предположение об образовании метастабильных экзотических "двухъядерных атомов" $(D^+ + D^+)2e^-$, предшествующих процессу их слияния.

Отметим еще ряд работ, в которых получены ограничения на сечение ядерного синтеза при очень малых энергиях. В. Закович и Дж. Рафельский из Аризонского университета показали, что имеющиеся в настоящее время данные по сечениям DD и pT -реакций при низких энергиях существенно ограничивают влияние возможных ядерных резонансов и исключают объяснение на их основе экспериментов по НТС. Другое ограничение на DD -сечение получено М. Гайдой из Аризонского университета из оценок избыточного тепла Юпитера. Оно примерно на 9 порядков меньше, чем требуется для объяснения данных по НТС. Наконец, М. Васелли из Института атомной и молекулярной физики (Пиза, Италия) подтвердил полученные ранее результаты относительно недостаточности эффекта экранирования в кристаллах Pd для согласия с экспериментами по НТС.

Подводя итоги конференции в своем заключительном выступлении, Д. Уорледж из Исследовательского института электроэнергетики (США) выделил следующие пункты:

- наблюдаемые явления не есть "нормальный" DD -синтез;
- эксперимент пока недостаточно ориентирует теорию;

- значительно улучшилось качество многих экспериментов;
- много очень разных экспериментов дают схожие результаты;
- развивающаяся область исследований имеет все права на существование и нуждается в поддержке.

Со своей стороны, завершая этот обзор, я хотел бы оценить ситуацию с НТС после конференции в Прово следующими словами: "Проклятье снято, вопросы остаются".

Автор выражает свою глубокую признательность Оргкомитету конференции за гостеприимство и финансовую поддержку, а также Д. Уорледжу за полезные обсуждения.

В.А. Царев