

Ядерная физика и исследование тяжелых элементов в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США)

М.А.Стойер, Л.Е.Ахле, Дж.А.Беккер, Л.А.Бернштейн, Д.Л.Блюель, Дж.Т.Берк, Д.Дашдорж, Р.А.Хендерсон, А.М.Херст, Дж.М.Кеннели, С.Р.Лешер, К.Дж.Муди, С.Л.Нелсон, Е.Б.Норманн, М.Педретти, Н.Д.Шелзо, Д.А.Шонесси, С.А.Шитс, В.Штойффль, Н.Дж.Стойер, М.Видекинг, П.А.Вилк, Ц.Ю.Ву

Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса
94551 Ливермор, Калифорния, США, факс +1(925)422–1370

В обзоре представлен ряд фундаментальных исследований в области ядерной физики, ведущихся в настоящее время в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США). Эти работы сосредоточены на изучении ядер в экстремальных состояниях. Работа группы экспериментальной ядерной физики нацелена на совершенствование нашего понимания ядер, ядерных реакций, процессов ядерного распада и ядерных процессов в астрофизике; она осуществляет экспертизу важных лабораторных программ в сфере национальной безопасности и фундаментальных исследований мирового класса.

Библиография — 42 ссылки.

Оглавление

I. Введение	1234
II. Основные направления исследований LLNL в области ядерной физики	1235

I. Введение

Сегодня мы вспоминаем Дмитрия Ивановича Менделеева в связи со 175-й годовщиной со дня рождения и 140-й годовщиной его выдающегося достижения — создания первой Периодической таблицы элементов. В 1869 г. Менделеев осознал периодичность химических свойств известных элементов, нашел способ систематизировать элементы на основе периодичности и, используя эти закономерности, предсказывать существование новых, еще не открытых элементов. Свои идеи Менделеев изложил в докладе «Соотношение свойств с атомным весом элементов» на заседании Русского химического общества в марте 1869 г. и затем в фундаментальном труде «Основы химии» (1869–1871). Периодическая таблица в различных ее видах¹ по сей день

М.А.Стойер, Л.Е.Ахле, Дж.А.Беккер, Л.А.Бернштейн, Д.Л.Блюель, Дж.Т.Берк, Д.Дашдорж, Р.А.Хендерсон, А.М.Херст, Дж.М.Кеннели, С.Р.Лешер, К.Дж.Муди, С.Л.Нелсон, Е.Б.Норманн, М.Педретти, Н.Д.Шелзо, Д.А.Шонесси, С.А.Шитс, В.Штойффль, Н.Дж.Стойер, М.Видекинг, П.А.Вилк, Ц.Ю.Ву — сотрудники LLNL.

Область научных интересов авторов: ядерная физика.

Дата поступления 26 мая 2009 г.

Перевод с английского И.В.Широковского

остается руководством для химиков и физиков, изучающих фундаментальные «кирпичики», из которых построен наш мир. С большим удовольствием и особой гордостью мы представляем научные работы Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (LLNL) в области ядерной физики и по изучению тяжелых элементов; понимание периодичности свойств химических элементов особенно важно для планирования подобных исследований.

Экспериментальные работы в области ядерной физики в LLNL сосредоточены на исследовании экстремальных состояний ядер, в частности на состояниях с экстремальными величинами спина, изоспина, энергии возбуждения, нейтронного избытка, экстремальными способами распада ядер, находящихся на пределе возможностей детектирования, и ядер, экзотических по массе и стабильности. Очевидно, что многие из этих областей исследований взаимосвязаны. В настоящем обзоре представлены примеры недавних исследований в этих экстремальных областях ядерной физики. Деятельность LLNL направлена на достижение в ядерной физике целей, сформулированных в Долговременном плане развития ядерной науки (Nuclear Science Long Range Plan),² а именно, на разработку всестороннего и единого описания ядер, что требует данных по экзотическим ядрам. Она нацелена на использование существующих и проектируемых установок (таких как FRIB, планируемая к вводу в Мичиганском университете) и на изучение свойств нейтрино и фундаментальных симметрий.

II. Основные направления исследований LLNL в области ядерной физики

1. Ядра с аномально высокими значениями спина

Наша лаборатория участвует в исследовании эффектов ядерных оболочек при увеличении углового момента ядра, т.е. эволюции оболочечной структуры при высоких спинах. Для этого используются реакции кулоновского возбуждения и передачи; работа ведется в Аргоннской национальной лаборатории с использованием сборки детекторов гамма-излучения из германия высокой чистоты «Gammasphere»³ и лавинного детектора рассеянных частиц CHICO.⁴ Так, с помощью пучка ^{40}Ar с энергией 170.5 МэВ на сверхпроводящем линейном ускорителе ATLAS (Argonne Tandem Linear Accelerator System) исследовалось кулоновское возбуждение мишени ^{242}Am ; возникающее при девозбуждении ядер γ -излучение регистрировалось детектором «Gammasphere» (рис. 1). Схема ядерных уровней, построенная из данных по гамма-гамма-совпадениям, показана на рис. 2. Как видно из схемы уровней и спектра γ -излучения, уровни, построенные на состояниях с $K = 5$ и 6, заселяются с высокой и близкой вероятностью. Сильное смешивание по K приводит к почти равному заселению состояний с $K^\pi = 5^-$ и 6^- . Детали экспериментов с мишенью ^{242}Am опубликованы в работе⁶.

Установки «Gammasphere» и CHICO использовались также в экспериментах, нацеленных на изучение высоко-спиновых состояний в изотопах Np. Уровни ^{235}Np заселялись в реакции передачи двух нейтронов $^{237}\text{Np}(^{116}\text{Sn}, ^{118}\text{Sn})^{235}\text{Np}$. Чтобы оптимизировать выход каналов передачи одного и двух нейтронов, была выбрана энергия пучка ^{116}Sn , равная 801 МэВ, что несколько выше кулоновского барьера. По существу, экспериментальные данные содержат также информацию о неупругом возбуждении ^{237}Np и дополни-

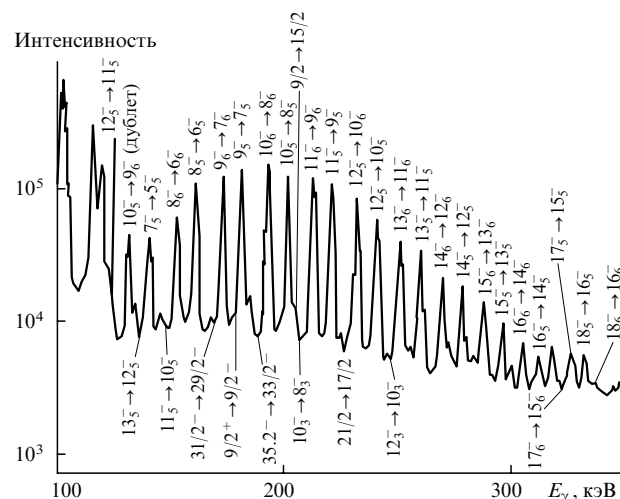


Рис. 1. Энергетический спектр γ -квантов, измеренный в совпадении с рассеянными частицами.

Для известных переходов указаны начальный и конечный спины, четность и значение K . Состояния с нецелым значением спина относятся к примеси ^{241}Am в мишени.

тельно об основной вращательной полосе ^{236}Np в результате передачи одного нейтрона. Обе реакции передачи позволяют исследовать вращательное выстраивание в ядрах Np. Наблюдаемые энергетические спектры γ -лучей и частичная схема уровней ^{235}Np показаны на рис. 3. Детали экспериментов с ^{237}Np описаны в работе⁷.

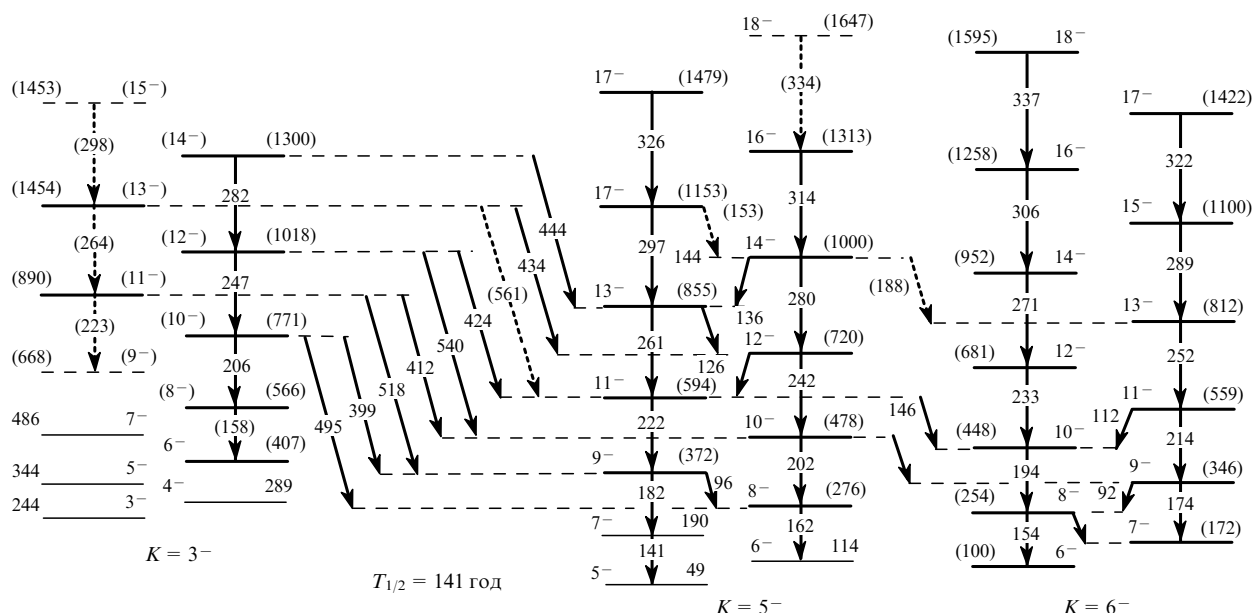


Рис. 2. Частичная схема уровней ^{242m}Am , построенная на основе данных по гамма-гамма-совпадениям.

Уровни, обозначенные жирными линиями, обнаружены в опытах по кулоновскому возбуждению. Ранее известные⁵ уровни обозначены тонкими линиями.

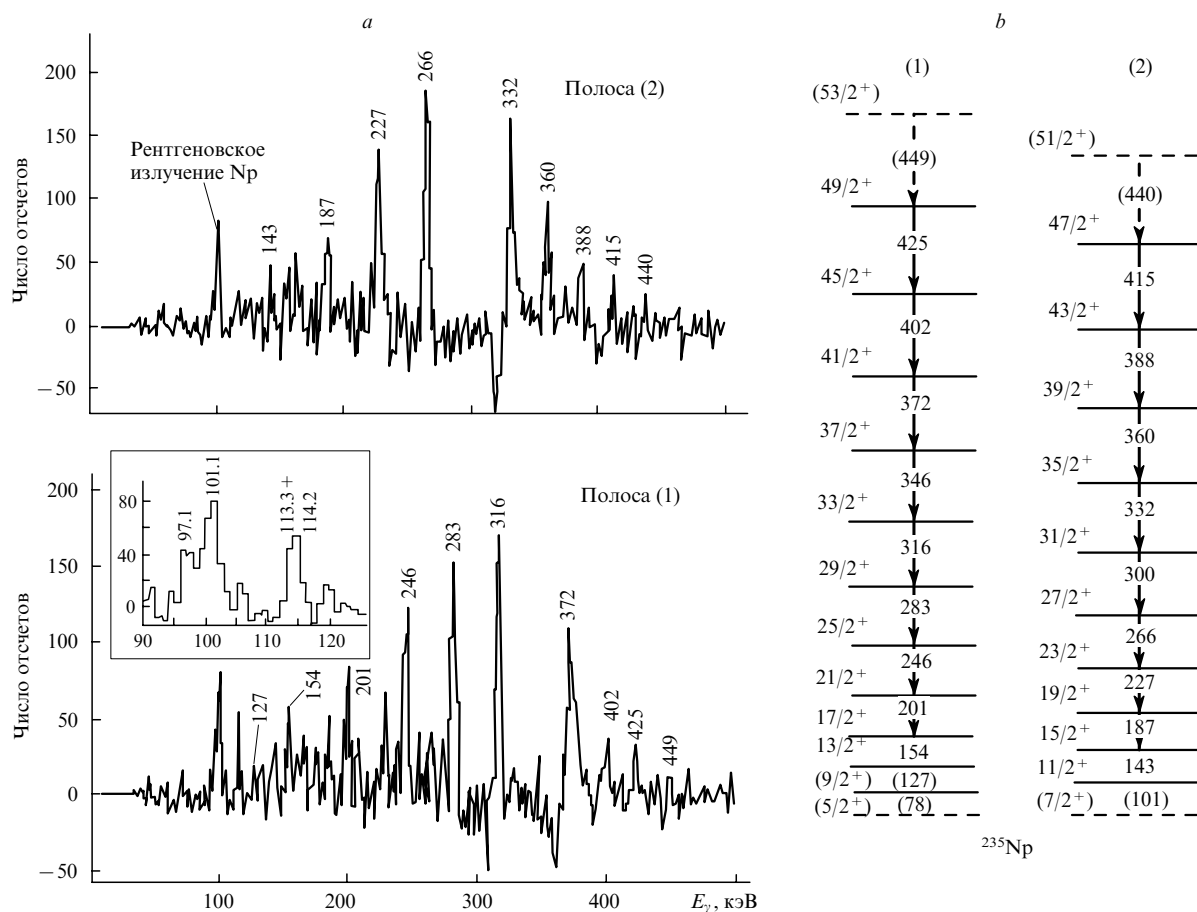


Рис. 3. γ -Спектр для передачи двух нейтронов, показывающий две сосуществующие полосы в ^{235}Np (a), и предложенная частичная схема уровней ^{235}Np , построенная на основе данных по гамма-гамма-совпадениям (b). На врезке показана часть спектра в увеличенном масштабе.

2. Ядра с аномальными значениями изоспина

В нашей лаборатории изучаются проявления оболочечных эффектов при добавлении в ядра нейтронов, иными

словами — эволюция оболочечной структуры с изменением соотношения N/Z (N — число нейтронов, Z — число протонов, т.е. заряд ядра). В этих исследованиях используются радиоактивные пучки комплекса TRIUMF ISAC-II (см.⁸) и установка TIGRESS/BAMBINO,⁹ показанные на рис. 4. Низ-

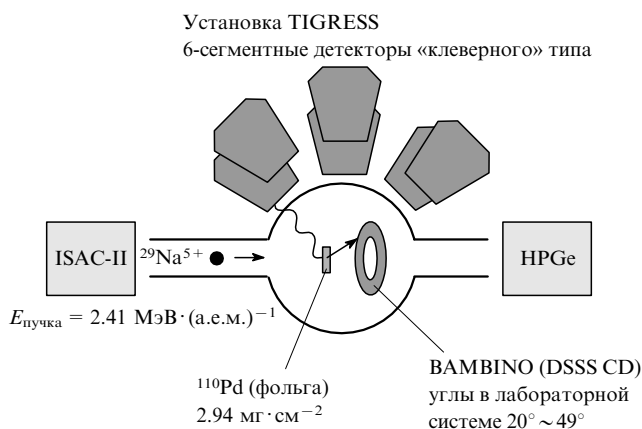


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для наблюдения кулоновского возбуждения ядер ^{29}Na . Интенсивность пучка составляла ~ 500 частиц $\cdot \text{с}^{-1}$. DSSS CD — двусторонний кремниевый стриповый кольцевой детектор.

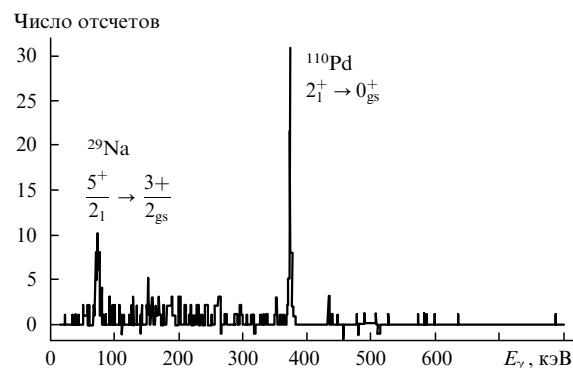


Рис. 5. Спектр γ -квантов в совпадении с рассеянной частицей, измеренный в течение 70 ч облучения мишени ^{110}Pd . Спектр демонстрирует кулоновское возбуждение ядер пучка (^{29}Na) — 72 кэВ и мишени (^{110}Pd) — 374 кэВ. Гамма-фон вычтен; gs — основное состояние.

колежащие ядерные уровни ^{29}Na исследовались при кулоновском возбуждении частиц ^{29}Na с энергией 70 МэВ, падающих на мишень ^{110}Pd . Детекторы из высокочистого германия (HPGe) «клеверной» конфигурации в составе установки TIGRESS регистрировали γ -лучи в совпадении с рассеянными частицами, которые в свою очередь регистрировались сегментированными кремниевыми детекторами установки BAMBINO. Наблюдавшийся спектр γ -излучения представлен на рис. 5. Приведенный матричный элемент перехода с первого возбужденного на основной уровень ^{29}Na оказался равным 0.237(21) еб (что соответствует приведенной вероятности перехода $B(E2) \approx 18(3)$ единиц Вайскопфа) и указывает на значительную примесь как sd-, так и pf-компонентов волновой функции. Подробнее данные эксперименты описаны в работе ¹⁰.

3. Астрофизика

Сотрудники лаборатории участвуют в экспериментах, нацеленных на углубление нашего понимания эволюции звезд и нуклеосинтеза, с использованием новой техники измерения важнейших сечений. Важной наблюдаемой характеристикой остатков от сверхновых является γ -распад изотопа ^{44}Ti . Количество ^{44}Ti , образованного в сверхновой, служит индикатором ее внутренней эволюции. Вероятность реакции $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ недавно измерялась двумя группами исследователей, причем их данные по выходу реакции различаются в 3–5 раз.^{11, 12} В LLNL использован тандемный ускоритель Центра ускорительной масс-спектрометрии (CAMS) для измерения в пучке выхода реакции $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ на толстой мишени. Выход ^{44}Ti также определялся путем низкофоновых измерений с одной из мишеней после облучения, т.е. off-line. Впервые измерено самосогласованным образом сечение реакции $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ в области энергий 2–4 МэВ, относящейся к физике сверхновых. Обнаружено, что недавние результаты переоценивают вероятность реакции более чем на 35%. Подробнее результаты экспериментов изложены в работе ¹³.

Рассматривая эволюцию звезд, мы изучаем ядра, находящиеся в точках ветвления, с использованием метода суррогатных реакций. Точка ветвления возникает там, где вероятность захвата нейтрона в s-процессе становится равной вероятности β -распада данного ядра. В частности, точку ветвления $^{153}\text{Gd}(n, \gamma)$ определяли, изучая суррогатную реакцию $^{154}\text{Gd}(p, p')^{154}\text{Gd}^*$. Прямые измерения невозможны, поскольку период полураспада ^{153}Gd составляет 241.6 сут, и соответствующая мишень имела бы активность 3.5 Ки. Мы моделировали этот подход, используя реакции $^{156}\text{Gd}(p, p')$ и $^{158}\text{Gd}(p, p')$ как суррогатные для реакций с известными сечениями — $^{155}\text{Gd}(n, \gamma)$ и $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)$. Впервые теория и эксперимент использовались для определения абсолютных сечений реакции (n, γ) в области энергий ниже 1 МэВ. Детали эксперимента представлены в работе ¹⁴.

4. Нейтронно-избыточные ядра

В LLNL исследуются нейтронно-избыточные ядра — осколки деления или ядра, получаемые на установках для радиоактивных пучков. Исследования мгновенного γ -излучения осколков спонтанного деления ^{252}Cf дали возможность получить множество данных о ядерной структуре,^{15, 16} динамике деления¹⁷ и даже информацию по тройному делению.¹⁸ Исследования в пучке вынужденного деления с использованием реакции $\alpha + ^{238}\text{U}$ предоставили богатую информацию о

высокоспиновых состояниях ядер в области $A = 120$ (см.¹⁹). Обнаружение возбужденных состояний ядер ^{118}Pd и ^{120}Pd позволило глубоко понять коллективное и неколлективное поведение ядер Pd в широком диапазоне чисел нейтронов. Более того, эти данные указывают на явные различия между коллективными и неколлективными состояниями при удалении протонов из замкнутой оболочки Sn для изотопов с $N = 72$ и 74. При делении ядер ^{238}U α -частицами были обнаружены новые γ -переходы в ^{120}Pd , соответствующие низкоэнергетическому γ -излучению, ранее идентифицированному при изучении распада ^{120}Rh . Подтверждены переходы в ^{118}Pd , что частично снимает расхождения с предыдущей работой. Поиск γ -переходов для ядер ^{122}Pd результатов не принес. Систематика нейтронно-избыточных изотопов Pd указывает на примечательную симметрию уровней 2^+ в ядрах вблизи ^{114}Pd , которая в какой-то степени сохраняется вплоть до спинов 10^+ . Подробнее эти эксперименты изложены в работе ¹⁹.

Научный интерес к пучкам радиоактивных ядер стимулируется изучением ядер на путях g- и s-процессов нуклеосинтеза в ядерной астрофизике. В США Мичиганский университет был недавно выбран местом запуска комплекса нового поколения для получения радиоактивных пучков (FRIB). Он будет продолжением существующего источника фрагментированных ядер Национального сверхпроводящего циклотронного комплекса (NSCL). Комплекс FRIB будет генерировать пучки радиоактивных ядер, более удаленных от стабильности, чем доступные в настоящее время, что позволит исследовать ядра, расположенные в *terra incognita* между долиной стабильности и траекторией g-процесса.

5. Экстремальные возбужденные состояния ядер

В LLNL проводятся исследования ядер при экстремальных энергиях возбуждения и в экстремальных условиях. Недавно завершено сооружение установки управляемого термоядерного синтеза (National Ignition Facility, NIF). В NIF 192 луча лазера должны обеспечить инерционное удержание плазмы, запуск термоядерной реакции и получение энергии от слияния ядер дейтерия и трития.²⁰ Кроме демонстрации нового источника энергии, комплекс станет лабораторией для исследований в области физики плазмы, ядерной астрофизики и изучения экзотических ядер в экстремальном окружении. Устройство мишени с непрямым нагревом показано на рис. 6. Воспламенительная капсула генерирует $\sim 10^{19}$ нейтронов с энергией 14 МэВ всего за пикосекунды, создавая потоки, близкие к характерным для вспышек сверхновых ($\sim 10^{34}$ нейтронов на 1 см^2 в 1 с). Потоки нейтронов низкой энергии не так высоки, но и не незначительны. В установке NIF создаются уникальные условия для изучения возбужденных ядер. Реакции с участием возбужденных состояний могут помочь пониманию реакций с далекими от стабильности ядрами и выяснить, подавлены ли проявления оболочечной структуры в этих возбужденных состояниях.

Работы LLNL охватывают различные аспекты возбужденных состояний в плазме: исследуются эффекты заселения возбужденных состояний в цепочках реакций, происходящих в плазме под действием нейтронов, заряженных частиц и фотонов, а также механизмы заселения возбужденных состояний ядер, находящихся в плазме. Эффекты заселения изучались уже в первых пусках NIF в реакциях с ядрами ^{171}Tm , внедренными в абляторы мишеней. Это дает возможность изучать звездные процессы (n, γ) при почти звездных плотностях энергии, создаваемых в импульсе NIF. Сравне-

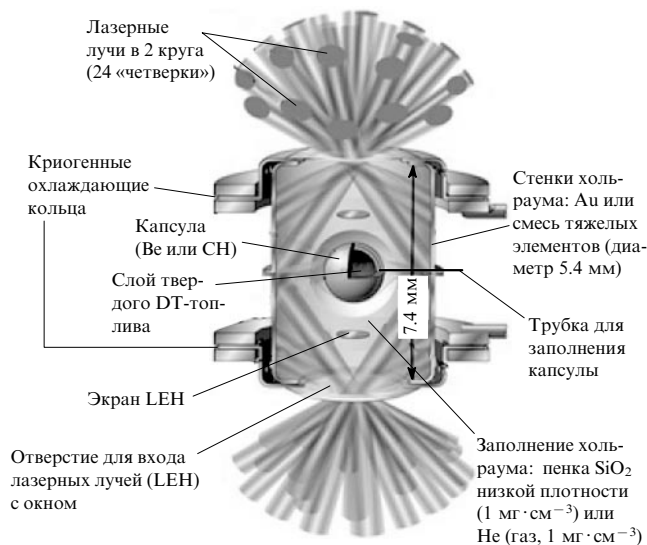


Рис. 6. Схема конструкции камеры воспламенения NIF.

Лазерные лучи входят в торцы цилиндрической полости (хольраума), превращаются в рентгеновское излучение, которое далее испаряет внешнюю часть оболочки мишени. Остаток оболочки и горючее (DT-смесь) ускоряются вовнутрь, сжимаясь приблизительно в 30 раз. При этом горючее достигает температуры и давления, достаточных для воспламенения, и, начиная от центра, топливо воспламеняется.

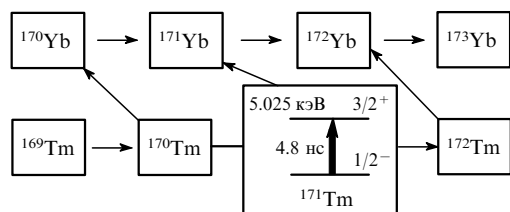


Рис. 7. Часть таблицы нуклидов, показывающая путь s-процесса вблизи Tm.

Ядра ^{170}Tm и ^{171}Tm находятся в точках ветвления s-процесса. Схема низколежащих уровней ^{171}Tm показывает присутствие «изомера» (5 кэВ), который мог бы заселяться посредством NEEC (см. текст).

ние выхода продуктов реакций с тем, что наблюдается в экспериментах на ускорителях, прояснило бы различие в протекании реакции в сильно различающихся средах. Траектория s-процесса вблизи ^{171}Tm показана на рис. 7. Ядра ^{170}Tm и ^{171}Tm — это точки ветвления s-процесса. Расчеты показали, что вероятности для некоторых реакций (n, γ) вблизи ядер на пути s-процесса повышаются на 20–40% (рис. 8)²¹ в результате наличия возбужденных состояний, или «изомеров». Если бы удалось измерить сечения реакций (n, γ) в среде, близкой к звездной, на ядрах, находящихся в точках ветвления, их можно было бы затем использовать как «термометры» для определения температур внутри звезд.

Другой аспект исследований касается механизма заселения возбужденных состояний в горячей плазме и включает изучение процессов обратной внутренней конверсии, известных как возбуждение ядер путем захвата электрона (NEEC).²² В качестве примера вновь возьмем ^{171}Tm . Высокий

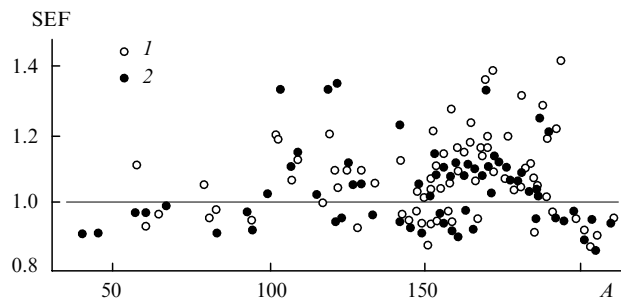


Рис. 8. Факторы усиления s-процесса (SEF) как функция массы различных ядер.¹⁷

Отметим, что в области $A = 170$ они достигают величин 1.2–1.4. 1 и 2 — данные из разных литературных источников.

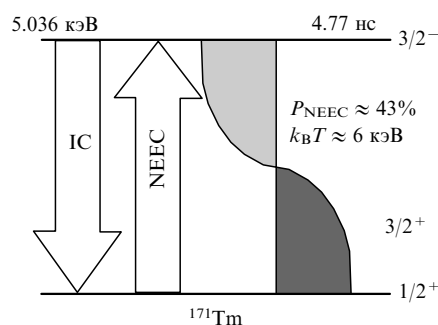


Рис. 9. Схема низколежащих уровней ^{171}Tm показывает процессы внутренней конверсии (IC) и ядерного возбуждения путем электронного захвата (NEEC), соединяющие первое возбужденное (5 кэВ) и основное состояния.

Расчетная вероятность (P) заселения первого возбужденного уровня путем NEEC при температурах, типичных для NIF, составляет 43%.

поток электронов в плазме NIF может заселять уровень 5 кэВ (время жизни 4.8 нс) в ^{171}Tm , как показано на рис. 9. Меняя параметры плазмы в имплозии, можно изучать вероятность заселения таких возбужденных состояний в среде, близкой к звездной материи.

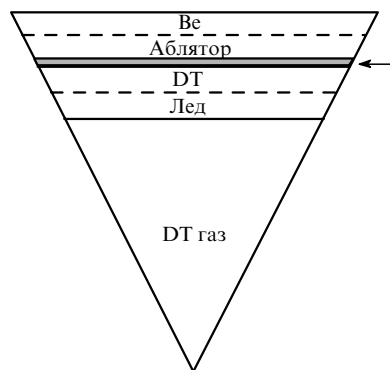


Рис. 10. Схематический разрез мишени NIF.

Размещение примеси показано серым цветом и стрелкой. Аблятор и зона расположения дейтериево-тритиевого льда показаны не в масштабе, а увеличены, чтобы выделить зону примеси.

Наконец, если энергия возрастает, приближаясь к энергии отделения нейтрона на верхнем крае ядерной потенциальной ямы, одночастичные уровни перестраиваются, что может изменить степень влияния ядерной структуры на реакции. Такая ситуация может дать понимание протекания ядерных реакций на нейтронно-избыточных ядрах, далеких от линии стабильности.

Поведение мишеней NIF будет отслеживаться с помощью различных быстрых методов детектирования: по испусканию нейтронов, рентгеновских и γ -лучей; радиохимические методики будут применяться для измерения асимметрии оболочки, распределения и перемешивания топлива, оценки величины поверхностной плотности (ρR).²³ В настоящее время разрабатываются радиохимические диагностики, основанные на внесении в мишени NIF соответствующих нуклидов с последующим измерением выходов радионуклидов на примесях. Предпочтительным считается

внесение примеси во внутреннюю часть аблятора, в непосредственной близости от дейтериево-третиевого топлива (рис. 10). Эта часть аблятора не разлетается во время фазы имплозии, а потому примесь оказывается между оболочкой и топливом вблизи области с высоким потоком. Количество примеси, вносимой в аблятор, невелико (порядка $10^{14} - 10^{15}$ атомов), чтобы не возмущать процесс имплозии. Какая примесь вносится, зависит от того, какая планируется диагностика и какая используется ядерная реакция. Например, чтобы определить количество материала аблятора, которое смешивается с топливом вследствие гидродинамических нестабильностей в процессе имплозии, могут использоваться реакции с заряженными частицами ввиду более коротких пробегов последних в горячей плотной плазме. Из-за коротких пробегов только в материале, находящемся в контакте с горящим топливом, который и является источником заряженных частиц, желаемые реакции пойдут с высоким выхо-

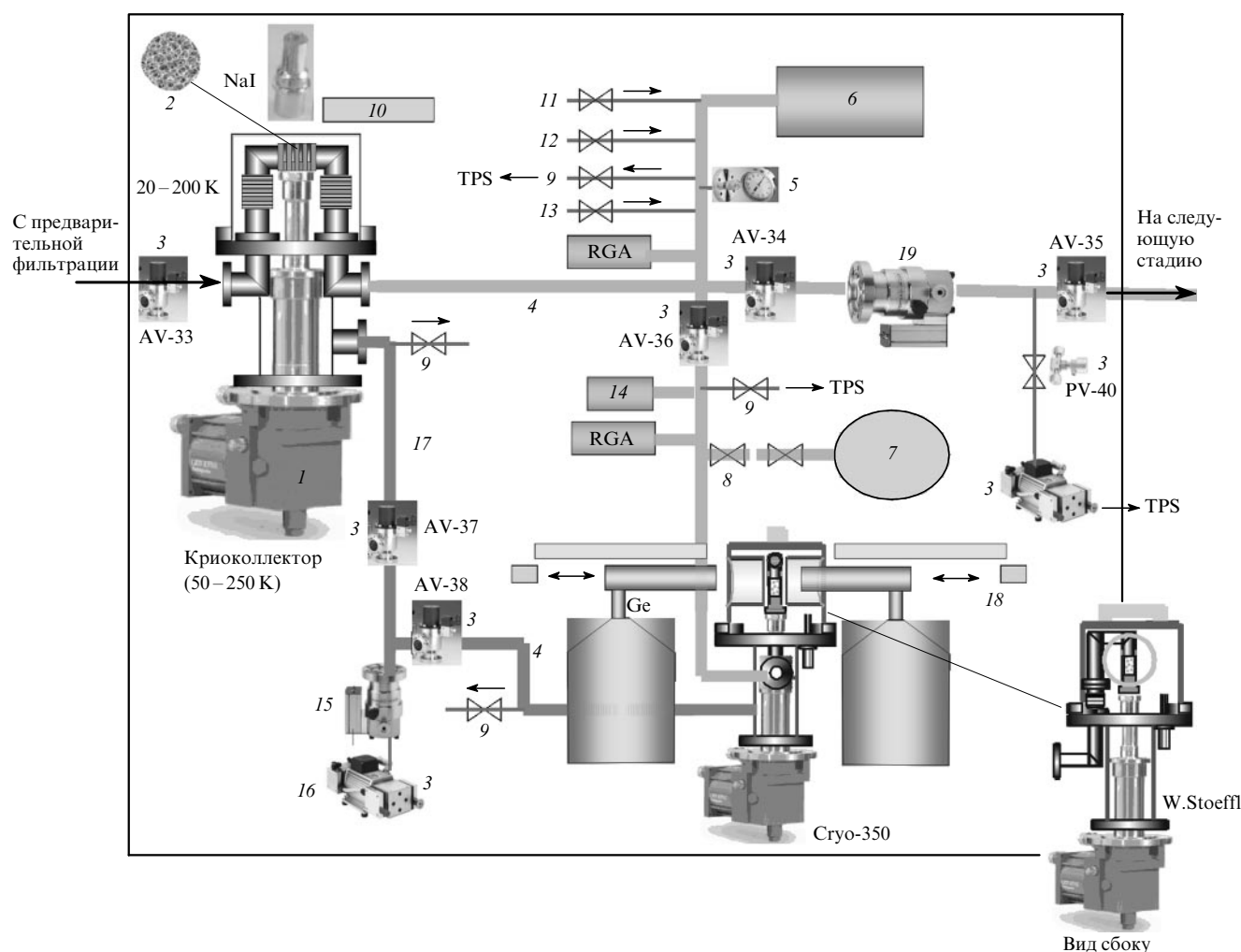


Рис. 11. Схема скоростной автоматизированной системы отбора проб газов (RAGS) для NIF.

В ней используется криогенное разделение и очистка инертных газов; задействованы 3 или 4 модуля, каждый из которых работает при температурах, необходимых для сбора различных инертных газов (показана система сбора ксенона). Не показана система предварительной фильтрации, которая удаляет водяной пар и иные, не инертные газы и расположена между мишенной камерой и данной системой. В систему может быть впрыснут гелий для обеспечения потока газа.

1 — 2-ступенчатая криоголовка; 2 — трубка, заполненная медной пенкой; 3 — ксеноновые ловушки; 4 — трубка 1.5 дюйма, гибкая; 5 — простой манометр; 6 — дополнительное оборудование, возможно масс-спектрометр; 7 — отделяемая ловушка; 8 — ручное управление (Nupro); 9 — выпуск газа; 10 — свинцовый экран; 11 — напуск He; 12 — напуск N₂; 13 — клапан; 14 — холодный катод; 15 — турбонасос, вакуумная изоляция; 16 — без TPS, чистый; 17 — независимая вакуумная криоизоляция; 18 — верхние направляющие; 19 — турбонасос. RGA — анализатор остаточного газа; TPS — система очистки от трития.

дом. Примеры таких реакций: $^{127}\text{I}(\text{d}, 2\text{n})^{127}\text{Xe}$, $^{79}\text{Br}(\text{d}, 2\text{n})^{79}\text{Kr}$ и $^{18}\text{O}(\alpha, \text{n})^{21}\text{Ne}$, хотя, поскольку ^{21}Ne стабилен, в последней могут быть трудности с фоном. Продукты этих реакций — инертные газы, которые можно собрать путем откачки мишенной камеры, используя скоростную автоматизированную систему отбора газов (RAGS) (рис. 11) после имплозии. Разрабатываются также способы сбора твердых образцов.²⁴ Оба метода сбора образцов будут необходимы не только для целей диагностики, но и в перечисленных выше экспериментах.

6. Физика нейтрино

В LLNL ведутся работы по изучению фундаментальных свойств нейтрино в ультранизкофонных экспериментах, в которых детектируются редкие распады. Чтобы ответить на вопросы о том, имеет ли шкала масс нейтрино инверсную или нормальную иерархию, являются ли нейтрино майорановскими частицами (т.е. являются ли они античастицами по отношению к самим себе, отличающимися от антинейтрино только спиральностью (ν_R и ν_L) рис. 12) и нарушается ли закон сохранения лептонного числа, продолжается поиск безнейтринного двойного β -распада ^{130}Te на установке CUORICINO — сборке болометров из TeO_2 (см. ²⁵) в Национальной лаборатории Гран Сассо в Италии. Свидетельств этого редкого вида распадов не обнаружено, установлен предел для периода полураспада $T_{1/2}(^{130}\text{Te}) \geq 3.0 \cdot 10^{24}$ лет. Для повышения чувствительности эксперимента в ~ 20 раз в установку CUORE (в Италии) собирается большее число болометров из TeO_2 .

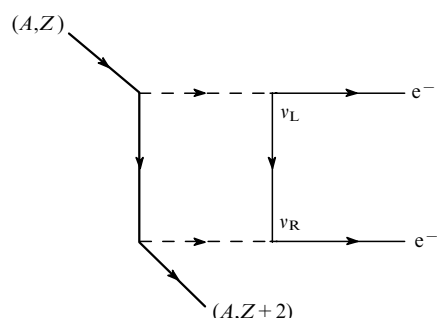


Рис. 12. Фейнмановская диаграмма для процесса безнейтринного двойного β -распада.

7. Сверхтяжелые элементы

Уже на протяжении более 25 лет развивается продуктивное сотрудничество ОИЯИ (Дубна) и LLNL, направленное на изучение ядерных и химических свойств сверхтяжелых (СТ) элементов. Еще в 1950-х гг. Ливерморская группа по изучению тяжелых элементов начала фундаментальные исследования ядерного распада, спектроскопии и химии СТ-элементов. В 80-е гг. XX в. было обнаружено сосуществование двух мод деления в спонтанном делении ряда тяжелых актинидных ядер. Это «бимодальное деление» стало вызовом для ядерной теории и привело к фундаментальным изменениям в моделях, описывающих строение ядра.^{26, 27} Сотрудничество ученых ОИЯИ и LLNL началось в 1989 г. В начале 90-х гг. XX в. результатом нашей совместной работы стало подтверждение существования предсказанной незадолго до того области ядер, повышенная стабильность которых обусловлена их формой, причем сильнее всего

эффект проявляется вблизи числа нейтронов 162 и числа протонов 108.^{28–30} В конце 1998 и в 1999 г. вместе с нашими российскими коллегами мы выполнили эксперименты, в которых впервые наблюдался «остров стабильности» СТ-элементов.^{31–33} Существование этого «острова» ядер с $N \sim 184$ и $Z \sim 114$ длительное время предсказывалось теорией, и он был целью многих экспериментов в течение последних 30 лет. Необычная стабильность этих ядер обусловлена близостью к ядрам с заполненными нуклонными оболочками, приводящими к сферической форме ядер. Этот же эффект сообщает дополнительную стабильность ядрам вблизи свинца, в частности дважды магическому ^{208}Pb . Результат совместной работы — открытие элементов 113, 114, 115, 116 и 118, а также 30 новых изотопов (см. обзор ³⁴).

Мы продолжаем совместные исследования области ядер вблизи «острова стабильности». Недавно был выполнен эксперимент по синтезу 120-го элемента с использованием реакции $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$ — захватывающая попытка продолжить использование реакций «горячего» слияния с пучком ядер тяжелее ^{48}Ca . Результатом этого опыта стал предел сечения образования 120-го элемента; подробные результаты обсуждаются в работе ³⁵. Недавно был поставлен эксперимент с реакцией $^{48}\text{Ca} + ^{226}\text{Ra}$ с целью получения изотопов Hs, и наблюдались несколько распадных цепочек-кандидатов.³⁶

Действительно, в изучении свойств наиболее тяжелых элементов достигнут впечатляющий прогресс, и здесь уместно упомянуть некоторые другие эксперименты. Спектроскопические исследования изотопов ^{254}No и ^{256}Rf позволили впервые идентифицировать состояния, построенные на уровнях, которые определяют стабильность сферических ядер, лежащих выше $Z = 114$ (см. ^{37–39}). Кроме того, результаты совместных работ Дубна – Ливермор по элементам 112 и 114 были недавно воспроизведены в экспериментах, проведенных в GSI (Германия),⁴⁰ PSI (Швейцария) – Дубна⁴¹ и LBNL (США).⁴² Наконец, объединенными усилиями ОИЯИ, LLNL и ORNL (Национальная лаборатория в Оак-Ридж) готовится эксперимент, нацеленный на синтез 117-го элемента в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ и намеченный на осень 2009 г. Изотоп ^{249}Bk нарабатывается в ORNL на высокопоточном изотопном реакторе (HFIR) и там же химически очищается. Сам эксперимент строго ограничен по времени, поскольку ^{249}Bk имеет период полураспада всего 330 дней.

* * *

Многие области исследований, кратко охарактеризованные в этом обзоре, взаимосвязаны. Все они сосредоточены на объяснении и лучшем понимании ядра и ядерных реакций — на формировании нашего знания о ядрах химических элементов. Работы Менделеева, направленные на систематизацию химических элементов и, следовательно, на понимание основных закономерностей природы, сегодня находят свое продолжение в наших исследованиях физики и химии новых тяжелых элементов, в наших усилиях по разработке полного фундаментального описания ядер путем изучения экзотических ядер в экзотических условиях, а также в исследованиях свойств нейтрино.

Обзор подготовлен при поддержке Департамента энергетики США Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в соответствии с контрактом DE-AC52-07NA27344. Работа получила частичную финансовую поддержку лабораторной программы научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ LLNL по проекту 04-ERD-085.

Литература

1. http://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt.html
2. R. Tribble (chair). *The Frontiers of Nuclear Science*. NSAC Long Range Plan, 2007
3. I.-Y. Lee. *Nucl. Phys. A*, **520**, 641 (1990)
4. M.W. Simon, D. Cline, C.Y. Wu, R.W. Gray, R. Teng, C. Long. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **452**, 205 (2000)
5. J.-L. Salicio, S. Drissi, M. Gasser, J. Kern, H.G. Börner, G.G. Colvin, K. Schreckenbach, R.W. Hoff, R.W. Loughheed. *Phys. Rev. C*, **37**, 2371 (1988)
6. A.B. Hayes, D. Cline, K.J. Moody, C.Y. Wu, J.A. Becker, M.P. Carpenter, J.J. Carroll, D. Gohlke, J.P. Greene, A.A. Hecht, R.V.F. Janssens, S.A. Karamian, T. Lauritsen, C.J. Lister, R.A. Macri, R. Propri, D. Seweryniak, X. Wang, R. Wheeler, S. Zhu. *Laser Phys.*, **17**, 745 (2007)
7. A.M. Hurst, C.Y. Wu, M.A. Stoyer, D. Cline, A.B. Hayes, S. Zhu, M.P. Carpenter, K. Abu Saleem, I. Ahmad, J.A. Becker, C. Chiara, J.P. Greene, R.V.F. Janssens, F. Kondev, T.L. Lauritsen, C.J. Lister, G. Mukherjee, S.V. Rigby, D. Seweryniak, I. Stefanescu. *Phys. Rev. C* (2009) (in the press)
8. R.E. Laxdal. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **204**, 400 (2003)
9. H.C. Scraggs, C.J. Pearson, G. Hackman, M.B. Smith, R.A.E. Austin, G.C. Ball, A.J. Boston, P. Bricault, R.S. Chakrawarthy, R. Churchman, N. Cowan, G. Cronkhit, E.S. Cunningham, T.E. Drake, P. Finlay, P.E. Garrett, G.F. Grinyer, B. Hyland, B. Jones, J.R. Leslie, J.-P. Martin, D. Morris, A.C. Morton, A.A. Phillips, F. Sarazin, M.A. Schumaker, C.E. Svensson, J.J. Valiente-Dobón, J.C. Waddington, L.M. Watters, L. Zimmerman. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **543**, 431 (2005)
10. A.M. Hurst, C.Y. Wu, J.A. Becker, M.A. Stoyer, C.J. Pearson, G. Hackman, M.A. Schumaker, C.E. Svensson, R.A.E. Austin, G.C. Ball, D. Bandyopadhyay, C.J. Barton, A.J. Boston, H.C. Boston, R. Churchman, D. Cline, S.J. Colosimo, D.S. Cross, G. Demand, M. Djongolov, T.E. Drake, P.E. Garrett, C. Gray-Jones, K.L. Green, A.N. Grint, A.B. Hayes, K.G. Leach, W.D. Kulp, G. Lee, S. Lloyd, R. Maharaj, J.-P. Martin, B.A. Millar, S. Mythili, L. Nelson, P.J. Nolan, D.C. Oxley, E. Padilla-Rodal, A.A. Phillips, M. Porter-Peden, S.V. Rigby, F. Sarazin, C.S. Sumithrarachchi, S. Triambak, P.M. Walker, S.J. Williams, J. Wong, J.L. Wood. *Phys. Lett. B*, **674**, 168 (2009)
11. H. Nassar, M. Paul, I. Ahmad, Y. Ben-Dov, J. Caggiano, S. Ghelberg, S. Goriely, J.P. Greene, M. Hass, A. Heger, A. Heinz, D.J. Henderson, R.V.F. Janssens, C.L. Jiang, Y. Kashiv, B.S. Nara Singh, A. Ofan, R.C. Pardo, T. Pennington, K.E. Rehm, G. Savard, R. Scott, R. Vondrasek. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 041102 (2006)
12. C. Vockenhuber, C.O. Ouellet, L.-S. The, L. Buchmann, J. Caggiano, A.A. Chen, H. Crawford, J.M.D'Auria, B. Davids, L. Fogarty, D. Frekers, A. Hussein, D.A. Hutcheon, W. Kutschera, A.M. Laird, R. Lewis, E.O'Connor, D. Ottewell, M. Paul, M.M. Pavan, J. Pearson, C. Ruiz, G. Ruprecht, M. Trinczek, B. Wales, A. Wallner. *Phys. Rev. C*, **76**, 035801 (2007)
13. S.A. Sheets, J.T. Burke, N.D. Scielzo, R.D. Hoffman, E.B. Norman, L. Phair, D. Bleuel, J.L. Fisker, A.M. Hurst, S. Tumey, T.A. Brown, P.G. Grant, M.A. Stoyer. *Astrophys. J.*, (2009) (in the press)
14. N.D. Scielzo, J.E. Escher, J.M. Allmond, M.S. Basunia, C.W. Beausang, L.A. Bernstein, D.L. Bleuel, J.T. Burke, R.M. Clark, F.S. Dietrich, P. Fallon, J. Gibelin, B.L. Goldblum, S.R. Leshner, M.A. McMahan, L.G. Moretto, E.B. Norman, L. Phair, E. Rodriguez-Vieitez, S.A. Sheets, I. Thompson, M. Wiedeking. *Phys. Rev. C* (2009) (in the press)
15. Y.X. Luo, S.J. Zhu, J.H. Hamilton, J.O. Rasmussen, A.V. Ramayya, C. Goodin, K. Li, J.K. Hwang, D. Almeded, S. Frauendorf, V. Dimitrov, J. Zhang, X.L. Che, Z. Jang, I. Stefanescu, A. Gelberg, G.M. Ter-Akopian, A.V. Daniel, M.A. Stoyer, R. Donangelo, J.D. Cole, N.J. Stone. *Phys. Lett. B*, **670**, 307 (2009)
16. K. Li, J.H. Hamilton, A.V. Ramayya, S.J. Zhu, Y.X. Luo, J.K. Hwang, C. Goodin, J.O. Rasmussen, G.M. Ter-Akopian, A.V. Daniel, I.Y. Lee, S.C. Wu, R. Donangelo, J.D. Cole, W.C. Ma, M.A. Stoyer. *Phys. Rev. C*, **78**, 044317 (2008)
17. Г.С. Попеко, Г.М. Тер-Акопян, Дж. Гамильтон, Дж. Кормики, А.В. Даниель, Ю.Ц. Оганесян, А.В. Рамая, Дж.К. Хван, А. Сандулеску, А. Флореску, В. Грайнер, Дж. Климан, М. Морак, Дж. Расмуссен, М.А. Стойер, Дж.Д. Коул. *Изв. АН. Сер. физ.*, **63**, 879 (1999)
18. G.M. Ter-Akopian, A.V. Daniel, A.S. Fomichev, G.S. Popeko, A.M. Rodin, Yu. Ts. Oganessian, J.H. Hamilton, A.V. Ramayya, J. Kormicki, J.K. Hwang, D. Fong, P. Gore, J.D. Cole, M. Jandel, J. Kliman, L. Krupa, J.O. Rasmussen, I.Y. Lee, A.O. Macchiavelli, P. Fallon, M.A. Stoyer, R. Donangelo, S.-C. Wu, W. Greiner. *Ядерная физика*, **67**, 1885 (2004)
19. M.A. Stoyer, W.B. Walters, C.Y. Wu, D. Cline, H. Hua, A.B. Hayes, R. Teng, R.M. Clark, P. Fallon, A. Goergen, A.O. Macchiavelli, K. Vetter, P. Mantica, B. Tomlin. *Nucl. Phys. A*, **787**, 455 (2007)
20. J.D. Lindl. *Inertial Confinement Fusion*. Springer-Verlag, New York, 1998
21. Z.Y. Bao, T. Beer, F. Käppeler, F. Voss, K. Wisshak, T. Rauscher. *At. Data Nucl. Data Tables*, **76**, 70 (2000)
22. G. Gosselin, P. Morel. *Phys. Rev. C*, **70**, 064603 (2004)
23. M.A. Stoyer, C.J. Cerjan, K.J. Moody, R.D. Hoffman, L.A. Bernstein, D.A. Shaughnessy. LLNL-TR-405043 (2008)
24. S.L. Nelson, D.A. Shaughnessy, K.J. Moody, M.A. Stoyer, S.N. Liddick, G.P. Grim, U. Greife. LLNL-ABS-409698 (2009)
25. C. Arnaboldi, D.R. Artusa, F.T. Avignone III, M. Balata, I. Bandac, M. Barucci, J.W. Beeman, F. Bellini, C. Brofferio, C. Bucci, S. Capelli, L. Carbone, S. Cebrian, M. Clemenza, O. Cremonesi, R.J. Creswick, A. de Waard, S. Di Domizio, M.J. Dolinski, H.A. Farach, E. Fiorini, G. Frossati, A. Giachero, A. Giuliani, P. Gorla, E. Guardincerri, T.D. Gutierrez, E.E. Haller, R.H. Maruyama, R.J. McDonald, S. Nisi, C. Nones, E.B. Norman, A. Nucciotti, E. Olivieri, M. Pallavicini, E. Palmieri, E. Pasca, M. Pavan, M. Pedretti, G. Pessina, S. Pirro, E. Previtali, L. Risegari, C. Rosenfeld, S. Sangiorgio, M. Sisti, A.R. Smith, L. Torres, G. Ventura, M. Vignati. *Phys. Rev. C*, **78**, 035502 (2008)
26. J.F. Wild, E.K. Hulet, R.W. Loughheed, K.J. Moody, B.B. Bandong, R.J. Dougan, A. Veck. *J. Alloys Compd.*, **213**, 86 (1994)
27. E.K. Hulet, J.F. Wild, R.J. Dougan, R.W. Loughheed, J.H. Landrum, A.D. Dougan, P.A. Baisden, C.M. Henderson, R.J. Dupzyk, R.L. Hahn, M. Schädel, K. Sümmerner, G.R. Bethune. *Phys. Rev. C*, **40**, 770 (1989)
28. Yu.A. Lazarev, Yu.V. Lobanov, Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, F. Sh. Abdullin, G.V. Buklanov, B.N. Gikal, S. Iliev, A.N. Mezentsev, A.N. Polyakov, I.M. Sedykh, I.V. Shirokovsky, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, Yu.S. Tsyganov, V.E. Zhuchko, R.W. Loughheed, K.J. Moody, J.F. Wild, E.K. Hulet, J.H. McQuaid. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 624 (1994)
29. Yu.A. Lazarev, Yu.V. Lobanov, Yu. Ts. Oganessian, Yu.S. Tsyganov, V.K. Utyonkov, F. Sh. Abdullin, S. Iliev, A.N. Polyakov, J. Rigol, I.V. Shirokovsky, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, G.V. Buklanov, B.N. Gikal, V.B. Kutner, A.N. Mezentsev, I.M. Sedykh, D.V. Vakarov, R.W. Loughheed, J.F. Wild, K.J. Moody, E.K. Hulet. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 1903 (1995)

30. Yu.A.Lazarev, Yu.V.Lobanov, Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, J.Rigol, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, G.V.Buklanov, B.N.Gikal, V.B.Kutner, A.N.Mezentsev, K.Subotic, J.F.Wild, R.W.Lougheed, K.J.Moody. *Phys. Rev. C*, **54**, 620 (1996)
31. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3154 (1999)
32. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, O.V.Ivanov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. C*, **62**, 041604 (2000)
33. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, O.V.Ivanov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed. *Ядерная физика*, **63**, 1769 (2000)
34. Yu.Ts.Oganessian. *J. Phys. G*, **34**, R165 (2007)
35. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, A.N.Mezentsev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, S.N.Dmitriev, R.A.Henderson, K.J.Moody, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk. *Phys. Rev. C*, **79**, 024603 (2009)
36. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, A.N.Mezentsev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, R.A.Henderson, K.J.Moody, J.M.Kenneally, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, S.L.Nelson, P.A.Wilk. *Phys. Rev. C* (2009) (in the press)
37. R.-D.Herzberg, P.T.Greenlees, P.A.Butler, G.D.Jones, M.Venhart, I.G.Darby, S.Eeckhaudt, K.Eskola, T.Grahn, C.Gray-Jones, F.P.Hessberger, P.Jones, R.Julin, S.Juutinen, S.Ketelhut, W.Korten, M.Leino, A.-P.Leppänen, S.Moon, M.Nyman, R.D.Page, J.Pakarinen, A.Pritchard, P.Rahkila, J.Sarén, C.Scholey, A.Steer, Y.Sun, Ch.Theisen, J.Uusitalo. *Nature (London)*, **442**, 896 (2006)
38. S.K.Tandel, T.L.Khoo, D.Seweryniak, G.Mukherjee, I.Ahmad, B.Back, R.Blinstrup, M.P.Carpenter, J.Chapman, P.Chowdhury, C.N.Davids, A.A.Hecht, A.Heinz, P.Ikin, R.V.F.Janssens, F.G.Kondey, T.Lauritsen, C.J.Lister, E.F.Moore, D.Peterson, P.Reiter, U.S.Tandel, X.Wang, S.Zhu. *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 082502 (2006)
39. H.B.Jepesen, I.Dragojević, R.M.Clark, K.E.Gregorich, M.N.Ali, J.M.Allmond, C.W.Beausang, D.L.Bleuel, M.Cromaz, M.A.Deleplanque, P.A.Ellison, P.Fallon, M.A.Garcia, J.M.Gates, J.P.Greene, S.Gros, I.Y.Lee, H.L.Liu, A.O.Macchiavelli, S.L.Nelson, H.Nitsche, J.R.Pavan, L.Stavsetra, F.S.Stephens, M.Wiedeking, R.Wyss, F.R.Xu. *Phys. Rev. C*, **79**, 031303 (2009)
40. S.Hofmann, D.Ackermann, S.Antalic, H.G.Burkhard, V.F.Comas, R.Dressler, Z.Gan, S.Heinz, J.A.Heredia, F.P.Heßberger, J.Khuyagbaatar, B.Kindler, I.Kojouharov, P.Kuusiniemi, M.Leino, B.Lommel, R.Mann, G.Münzenberg, K.Nishio, A.G.Popeko, S.Saro, H.J.Schött, B.Streicher, B.Sulignano, J.Uusitalo, M.Venhart, A.V.Yeremin. *Eur. Phys. J. A*, **32**, 251 (2007)
41. R.Eichler, N.V.Aksenov, A.V.Belozarov, G.A.Bozhikov, V.I.Chepigin, R.Dressler, S.N.Dmitriev, H.W.Gäggeler, V.A.Gorshkov, F.Haenssler, M.G.Itkis, V.Ya.Lebedev, A.Laube, O.N.Malyshv, Yu.Ts.Oganessian, O.V.Petruschkin, D.Piguet, P.Rasmussen, S.V.Shishkin, A.V.Shutov, A.I.Svirikhin, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, M.Wegrzecki, A.V.Yeremin. *Nucl. Phys. A*, **787**, 373 (2007)
42. L.Stavsetra, K.E.Gregorich, J.Dvorak, P.A.Ellison, I.Dragojevic, M.A.Garcia, H.Nitsche. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 132502 (2009)

NUCLEAR PHYSICS AND HEAVY ELEMENT RESEARCH AT LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY (USA)

M.A.Stoyer, L.E.Ahle, J.A.Becker, L.A.Bernstein, D.L.Bleuel, J.T.Burke, D.Dashdorj, R.A.Henderson, A.M.Hurst, J.M.Kenneally, S.R.Lesher, K.J.Moody, S.L.Nelson, E.B.Norman, M.Pedretti, N.D.Scielzo, D.A.Shaughnessy, S.A.Sheets, W.Stoeffl, N.J.Stoyer, M.Wiedeking, P.A.Wilk, C.Y.Wu
Lawrence Livermore National Laboratory
Livermore, 94551 CA, USA, Fax +1(925)422-1370

This paper highlights some of the current basic nuclear physics research at Lawrence Livermore National Laboratory (USA). The work at LLNL concentrates on investigating nuclei at the extremes. The Experimental Nuclear Physics Group performs research to improve our understanding of nuclei, nuclear reactions, nuclear decay processes and nuclear astrophysics; this is an expertise utilized for important laboratory national security programmes and for world-class peer-reviewed basic research.

Bibliography — 42 references.

Received 26th May 2009