

10/ix-73

С 341  
X-959

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

3301/2-73



P6 - 7281

А. Хрынкевич

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
НЕКОТОРЫХ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P6 - 7281

А. Хрынкевич\*

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
НЕКОТОРЫХ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Доклад на совещании ведущих ученых  
стран-участниц ОНЯИ  
(3-5 мая 1973 г.)

---

\* Институт ядерной физики в Кракове

Вопрос о перспективах развития ядерной физики в ОИЯИ и в институтах стран-участниц, на мой взгляд, имеет больше экономический смысл, чем научный. Если мы подготавливаем перспективный план развития, нам надо учитывать два фактора. С одной стороны, выбрать те направления, которые являются перспективными, с другой, - учесть, что широта фронта работ будет определяться выделенными средствами. Поэтому, мне кажется, что задача Совещания ведущих ученых стран-участниц ОИЯИ - обсудить состояние работ в данной области ядерной физики и потом проанализировать развивающиеся направления, чтобы определить самые интересные и перспективные. Но каким фронтом мы будем развивать эти направления в ОИЯИ и в институтах стран-участниц, зависит от финансовых возможностей, от темпа строительства новых установок и т.д.

Очень тяжело и даже рискованно делать прогноз развития науки. Мы хорошо знаем из опыта, что такие прогнозы часто бывают ошибочными, и, по-моему, самая заманчивая черта науки - это та, что в ней много неожиданного. Неожиданные результаты - это, если можно так сказать, соль науки.

У меня нет способности предвидеть, каково будет развитие ядерной физики даже в ближайшее время, но я хочу показать, какие направления в области ядерной физики низких энергий являются сейчас интересными, считая, что естественным образом эти

направления будут развиваться и в дальнейшем. Думается, что большая конференция в Мюнхене, которая состоится в конце августа этого года, поможет нам определить наиболее интересные направления в области ядерной физики, и было бы очень желательно, чтобы большее число ученых от Объединенного института и институтов стран-участниц приняли участие в этой важной конференции.

Мне кажется, что ядерная физика низких энергий стала уже вполне зрелой наукой. Для меня признаком зрелости данной науки является роль, которую играют ее методы и ее приборы в других отраслях науки. Это не вопрос применения, так как даже молодая наука может вносить большой вклад в практику. Но зрелая наука — это наука, которая дает много другим научным направлениям. Получается что-то вроде перехода от эгоцентризма к альтруизму. Сегодня методы ядерной физики играют большую роль в физике твердого тела, в биологии, химии, в геологии, археологии, уже не говоря об астрофизике, так как там наряду с гравитационными процессами участвуют ядерные процессы — главный источник энергии Вселенной.

Я считаю также, что ядерная физика будет иметь большое значение в экологии. С одной стороны, она дала человечеству источник очень чистой энергии. Может быть, это звучит как парадокс. Все знают, что радиоактивные отходы могут опасно загрязнять окружающую среду. Но физики-ядерщики с самого начала знали об этой опасности и выработали эффективные методы борьбы с загрязнениями. С другой стороны, для исследования загрязнений ядерная физика

предоставляет очень много важных и интересных прецизионных методов, о которых на одном из заседаний Ученого совета по физике низких энергий интересно рассказывал Г.Н. Флеров.

В моем докладе я хочу ограничиться только физикой низких энергий "sensu stricto". Так как я ограничен во времени, то не буду говорить о релятивистской ядерной физике. Доклад по этому вопросу был сделан профессором Балдиным на одном из заседаний Ученого совета. Я также не смогу говорить о применении нейтронной физики к исследованию ядра. Этой проблеме был посвящен вступительный доклад И.М.Франка на Международной конференции в Венгрии, опубликованный как препринт ОИЯИ в конце 1972 года. Я буду говорить об исследованиях в ядерной физике при помощи заряженных частиц. Но прежде хочу сказать несколько слов о теории.

Во время дискуссии я немного покритиковал состояние теоретических работ в области ядерной физики, обращая внимание на сложность проблемы и те трудности, которые стоят перед теоретиками. Такое мнение высказывают даже сами теоретики. На очень интересной встрече в Dageryby в мае 1972 г. теоретики жаловались, что в течение последних пяти или даже более лет не сделано ничего радикально нового в теории ядра, не придумано никакого нового подхода, который позволил бы избежать чрезвычайно сложных расчетов. Джерри Браун тогда сказал: "Мы стали знать немногим больше, но имеем способности гораздо сложнее говорить об этом." В последнее время в некоторых направлениях исследований точность эксперимента намного определила точность теоретических расчетов, что ставят перед

теоретиками задачу более фундаментального подхода. Тот феноменологический подход, который еще несколько лет назад давал хорошее согласие с экспериментом, сейчас недостаточен, и нам нужны более точные теоретические расчеты.

Я — экспериментатор, и буду говорить о физике низких энергий с точки зрения экспериментатора. Для меня нет сомнения, что в будущем исследования структуры ядра будут проводиться почти исключительно на пучках ускорителей.

Что нам даст ускорители?

Во-первых, доступ к высоковозбужденным состояниям, которые нельзя получить в результате бета-распада. Во-вторых, доступными становятся ядра, далекие от зоны бета-стабильности в очень широком диапазоне  $Z$  и  $N$ . В-третьих, ускорители дают нам большие импульсы отдачи ядер, что позволяет внедрить ядра отдачи в любые материалы, а это важно не только с точки зрения ядерной физики, но и с точки зрения физики твердого тела. И, наконец, если мы используем пульсирующие пучки ускорителя, то получим возможность точного измерения временных зависимостей. Я буду говорить о ядерной физике на пучках ускорителей как раз в этом порядке.

Начнем с высоковозбужденных ядерных состояний.

Как уже говорилось на совещании, в области высоковозбужденных ядерных состояний плотность уровней настолько велика, что разброс энергии ускорителей и ограниченная разрешающая способность наших детекторов не позволяет во многих случаях исследовать

индивидуальные уровни высоковозбужденного ядра. Здесь есть два возможных подхода. Один из них - статистический подход к высоколежачим уровням. Красивым примером такого статистического подхода является изучение огибающей функции бета-распада, о которой в прошлом году на школе в Алуште рассказывал Грегг Хансен. Он в течение нескольких лет занимался этой проблемой в ЦЕРНе в рамках проекта "Изольда". Словная функция  $\rho$ -распада - это распределение интенсивности бета-переходов в зависимости от энергий. Ее исследования дают много информации о возбужденных ядрах. Я не имею времени детально говорить об этом. Другой подход - использование селективных ядерных процессов, которые дают информацию об отдельных уровнях. Таким селективным процессом может быть задержанная эмиссия частиц после бета-распада. Я имел в виду протонную радиоактивность, альфа-радиоактивность или нейтронную радиоактивность определенных возбужденных уровней.

Другой класс селективных процессов - это ядерные реакции. Здесь тяжелые ионы играют существенную роль.

Итак, реакции  $(HE, xn)$  и  $(HE, f)$  дают состояния с большими угловыми моментами, что позволяет исследовать переходы из этих состояний на так называемую "край" - линию, на которой укладываются состояния с самой низкой энергией при данном значении ядерного спина. На рис. I схематически показано, как в ядре с массовым числом около 160 заселяются высокоспиновые, высокоэнергетические ядерные состояния при помощи реакций  $(\alpha, 4n)$  и  $(Ar, 4n)$ . Хорошо видно преимущество второй реакции. Высоковозбужденные ядра в течение  $\sim 10$  пикосекунд переходят на линию "край" и вдоль нее спускаются на ротационную или вибрационную полосу.

С высокоспиновыми состояниями связан очень интересный и важный вопрос моментов инерции на ротационной полосе. В этой области несколько лет назад получены очень интересные результаты. Примеров уже много, свыше десятка. На рис.2 показана зависимость момента инерции от энергии возбуждения для  $^{158}\text{Er}$  и  $^{158}\text{Dy}$ . Уже давно было известно из исследований низлежащих уровней ротационной полосы, что момент инерции постепенно возрастает. Но из рис.2 видно, что для спина порядка 10 получается изгиб, так называемый "backbending", этой кривой. Он свидетельствует о том, что что-то существенное произошло с ядром. Одно из объяснений этого явления состоит в том, что действие сил Корриолиса разбивает пары нуклонов в ядре. Получается фазовый переход из сверхтекучего в несверхтекучее состояние, и это как раз отражается в резком изменении момента инерции.

Никто не измерял в этих состояниях плотности ядра. При помощи мп-атомов или эффекта Мёссбауэра можно исследовать радиус ядра только для основных и низлежащих состояний. Было бы интересно узнать, как меняется средний радиус ядра для более высоких ротационных состояний. Но еще более интересно измерить магнитные моменты состояний в области этого фазового перехода. До сих пор удалось измерить  $g$ -факторы изотопов диспрозия до состояний со спином 10, используя так называемые переходные внутренние поля, действующие на ядра отдачи диспрозия в намагниченном гадолинии. До спина 8  $g$ -факторы одинаковы. Для спина 10 значение их как будто падает.

Говоря о реакциях с тяжелыми ионами, необходимо обратить внимание на очень интересное явление - кулоновое деление.



Под влиянием поля налетающего иона барьер деления понижается, и ядро может делиться. Сходный вопрос — это многочастичное деление ядра, примером которого является тройное деление. Сегодня много работ посвящено исследованию этих явлений.

Я хочу сказать несколько слов о кватретьных состояниях в легких ядрах. Если альфа-частица не теряет своей индивидуальности в ядре, то ее движение приводит к тому, что некоторые возбужденные состояния легких ядер являются деформированными. О том, что, по всей вероятности, такие состояния существуют, свидетельствует резонансный характер реакции с тяжелыми ионами типа ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ ), где как раз легкому ядру альфа-частица передается как целое. Эти состояния можно исследовать при помощи других реакций, таких, как ( $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) или ( $^{12}\text{C}$ ,  $^8\text{Be}$ ).

Вторая интересная реакция с тяжелыми ионами — это реакция передачи одного нуклона. Дело в том, что в реакциях с тяжелыми ионами существует такое понятие, как сохранение орбиты. Траектория вылетающего иона после реакции должна быть продолжением траектории налетающего иона, и только реакции передачи с такой величиной  $Q$ , для которой происходит это сохранение орбиты, имеют большую вероятность. Это явление называется окном  $Q$  в реакциях с тяжелыми ионами.

До сих пор я говорил о тяжелых ионах, но надо иметь в виду, что легкие частицы тоже дают очень много интересной и новой информации.

Хорошо известно, что низколежащим состояниям в ядре с изоспином  $T_z$  в изобарном ядре с  $T_z - 1$  отвечают состояния с энергией выше 10 Мэв, где плотность уровней очень высока. Их можно исследовать в реакциях, когда протон переходит в нейтрон, или наоборот. Но, кроме этих обыкновенных аналоговых состояний, можно ожидать так называемые двойные или тройные аналоговые состояния при более высоких энергиях. Для них разность компонентов  $T_z$  не 1, а 2 или больше. Их можно обнаружить, например, при помощи реакций  $(p, t)$  или  $(t, p)$ .

Если мы располагаем легкими частицами очень высоких энергий (порядка 100 Мэв), можно исследовать глубокорасположенные оболочки. В обыкновенном тяжелом ядре энергия связи нуклона на оболочке  $1s$  порядка 50 Мэв. Имея легкие частицы более высокой энергии, мы можем исследовать глуболежащие протонные или нейтронные оболочки при помощи таких реакций, как  $(p, 2p)$  или  $(p, pn)$ .

Если мы исследуем реакции типа  $(p, pd)$ ,  $(p, p\alpha)$ ,  $(\alpha, 2\alpha)$ , то можем изучать кластерную структуру ядер, выбивая из ядра целые группы нуклонов.

Последний вопрос раздела о возбужденных состояниях — это pairing bands.

Особенностью обыкновенной полосы, например ротационной, является то, что матричные элементы оператора, связывающего уровни такой полосы, очень велики. Но можно построить операторы, не сохраняющие числа частиц и связывающие состояния в разных ядрах, матричные элементы которых тоже усилены, что приводит к понятию так называемых парных ротационных или вибрационных полос.

Сейчас я перехожу к следующей части. Это проблема ядер, лежащих далеко от полосы стабильности. Что характерно для этих ядер?

Во-первых, краткие времена жизни. Во-вторых, то, что в одном эксперименте мы получаем очень много продуктов реакций, далеких от линии бета-стабильности. И тогда нам надо по первой причине быть близко к мишени, а по второй — использовать химическую или массовую сепарацию продуктов.

Какие процессы дают нам ядра, далекие от бета-стабильности? Во-первых, реакции с тяжелыми ионами: реакции ( $HI, \alpha n$ ) и реакции передачи. Их тоже можно получить как продукты деления, вызванного тяжелыми ионами. Во Вселенной существенную роль играет  $\gamma$ -процесс. Это последовательный захват ряда нейтронов, который происходит так быстро, что бета-распад не успевает произойти. Этот процесс отодвигает ядра от линии бета-стабильности.

Основные установки, в которых тяжелые ионы используются для получения ядер, далеких от зоны бета-стабильности, — это ALICE в Орсе, где ускоряется криптон; тандем-циклотроны — в Дубне, где ускоряется ксенон, Super HIAC в США и UNILAC, который строится в ФРГ. Первый масс-сепаратор на пучке ускорителя тяжелых ионов был запущен в Дубне в 1968 году, а в конце 1972 года в Окридже запущен масс-сепаратор UNISOR (University Isotope Separator Oak Ridge). Эти масс-сепараторы позволяют исследовать короткоживущие ядра, далекие от линии стабильности.

К сожалению, масс-сепаратор на пучке в Дубне не использован, как мне кажется, с полной эффективностью. С 1968 года на нем было получено не так уж много результатов.

Второй тип реакций – это окальвание и фрагментация ядер. Здесь имеется ряд работающих и проектируемых установок с масс-сепараторами на пучках:

ALICE (Orsay) 1966

Isolde (CERN)	с 1974	600 Мэв	10-15	$\mu A$
ЕННАШ (ОКЯИ)		700 Мэв	20-50	$\mu A$
LAMPF (Los Alamos) 1974		800 Мэв	1000	$\mu A$
ИРИС (ЛИЯФ)	1974 г.	1000 Мэв	2-3	$\mu A$

В области коротких времен жизни тяжелые ионы имеют преимущество, так как при работе с протонами не удалось пойти ниже, чем 0,1 сек. Но протоны высоких энергий тоже имеют преимущество. Здесь можно использовать очень толстые мишени порядка 50 г/см<sup>2</sup>. В олучае тяжелых ионов допустимая толщина мишени не превышает 10 мг/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 показано расположение установки до начала ее реконструкции.

Третий путь получения ядер, далеких от линии бета-стабильности, – это использование деления на ядерных реакторах. В этой области работают три установки: Amos (USA) 1966

Soreg 1968

Osiris (Studsвик) 1968

На установке Osiris в последнее время тоже удалось провести измерения для ядер о временами жизни примерно 0,1 секунды.

После перечисления процессов, которые дают нам ядра, далекие от линии стабильности, я хочу раооказать, какие физические проблемы, важные для физики ядра, можно изучать в этой области.

Во-первых, это систематика ядерных уровней для длинных цепей

изобаров или изотопов, что часто позволяет делать выводы о характере и структуре возбужденных состояний.

Второй вопрос — это альфа и протонная радиоактивность ядер, далеких от линии стабильности. Обнаружено много альфа-активных ядер — изотопов осмия, ртути, технеция. Свыше десятка протонно-радиоактивных ядер удалось уже найти в области  $A > 50$ .

Следующий вопрос — это новые области деформации. На рис. 4 показана хорошо всем известная картина, где обозначены области деформации, расположенные между магическими числами протонов и нейтронов.

Продолжая перечень исследований, которые можно проводить в области ядер, далеких от бета-стабильности, я хочу сказать несколько слов о ядерных массах. Измеряя энергии бета-переходов или альфа-перехода, можно связать массы ядер, лежащих далеко от бета-стабильности, с хорошо известными массами ядер в зоне бета-стабильности. Рисунок 5 показывает, что формулы, которые хорошо описывают массы ядер в долине бета-стабильности, в области, далекой от бета-стабильности, работают плохо. Здесь приведено сравнение экспериментальных масс изобаров  $A=182$  с расчетами по формуле Гарвей-Кельсона. Это самая лучшая массовая формула, которая употребляется для стабильных ядер, но, как видно, она катастрофически уходит от экспериментальных точек, если мы удаляемся от долины бета-стабильности.

Прямое применение масс-сепаратора удается только для легких ядер, далеких от линии стабильности. Примером этого является измерение масс  $^{210}\text{O}$  и  $^{220}\text{O}$ , проведенное группой Волкова в Лаборатории ядерных реакций в связи с программой получения и изучения

сверхтяжелых изотопов легких элементов. В реакциях передачи при соударении  $^{232}\text{Th} + \text{Ne}$  они получили для  $6 < Z < 18$  28 новых изотопов. Самыми тяжелыми из них являются  $^{21}\text{N}$ ,  $^{24}\text{O}$ ,  $^{24}\text{F}$ ,  $^{26}\text{Ne}$ ,  $^{30}\text{Mg}$ ,  $^{33}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{S}$  и  $^{42}\text{Se}$ .

Следующий вопрос - это вопрос новых магических ядер. Все дважды магические ядра, которые мы знаем до сих пор, находились на линии бета-стабильности. Интересно, например, узнать, как выглядит бета-распад дважды-магического ядра, которое удалено от линии бета-стабильности. Как раз в прошлом году (вчера об этом упоминал В.Г.Соловьев) удалось в проекте *OSIRIS* на реакторе в Штудсвике получить ядро  $^{132}_{50}\text{Sn}_{82}$ , которое с временем жизни 40 секунд распадается в сурьму. Экспериментальное значение логарифма  $\lambda t$  для бета-переходов 4,0. Теоретическое значение, не учитывая поляризации остова, 2,63. Это свидетельствует о том, что поляризация остова играет здесь существенную роль.

Следующий вопрос - это измерения спинов, электромагнитных моментов и радиусов ядер. Естественным способом измерений на пучке ускорителя, казалось бы, является использование отдачи ядра в методе магнитного резонанса в атомном пучке. Но до сих пор этим методом не удалось провести измерений для ядер с временем жизни короче 100 сек. Очень плодотворным оказался другой подход - оптическая накачка. Группа Оттена, работающая на "Изольде", измеряла магнитные моменты и изотопные сдвиги даже для ядер, живущих короче 10 сек. Были получены очень интересные и неожиданные результаты для изотопов  $\text{Hg}$ , показанные на рис.6. Здесь представлены

значения изотопного сдвига для разных изотопов ртути относительно ртути-204. Вплоть до изотопа  $^{186}\text{Hg}$  все точки укладываются очень хорошо на плавную кривую, но для последних двух легких изотопов -  $^{185}$  и  $^{183}$  - получается очень резкий спад.

Это странное явление можно бы объяснить неожиданным резким изменением деформации ядра, тогда было бы нужно, чтобы произошел скачок порядка 0,20 в величине  $\langle \beta^2 \rangle$ . Расчеты Струтинского зависимости энергии от деформации для ядер ртути показывают, что кривые имеют два минимума и что как раз в этой области меняется соотношение их глубин. Вполне возможно, что между  $^{186}\text{Hg}$  и  $^{185}\text{Hg}$  наступает переход ядра из одной ямы в другую.

Я перехожу к очень интересному вопросу об острове сверхтяжелых элементов. Уже на пути к этому острову были получены важные результаты в Лаборатории ядерных реакций. Были синтезированы новые трансплутониевые элементы: курчатовий-104 и элемент 105-й.

На этом же пути было сделано одно из самых выдающихся открытий ядерной физики последнего десятилетия - открытие изомеров формы, спонтанно делящихся изомеров. Было обнаружено неожиданное явление, состоящее в том, что деление тяжелых элементов тормозится в колоссальном соотношении:  $10^{30}$  или  $10^{35}$ . Макро-микроскопический подход Святецкого и Струтинского объяснил это. Струтинский изобрел метод расчета оболочечных поправок и показал, как можно объяснить такие неожиданные свойства. Сейчас много групп теоретиков во всем мире занимаются расчетом свойств сверхтяжелых элементов.

На рис.7 показаны последние теоретические оценки времен жизни сверхтяжелых элементов. Как ни странно, теоретики разных групп, работающих в разных странах мира, дают результаты, сходные между собой. На рисунке приведены изохроны - кривые для определенных времен жизни для спонтанного деления, для альфа- и бета-распадов. В последней части рисунка изображено полное время жизни с учетом всех трех типов распада. Получается, как видно, остров, который имеет самый высокий пик для нуклида в районе  $Z = 110$  и  $N = 184$ .

Единственный путь получения сверхтяжелых элементов в лаборатории - это использование тяжелых ионов. Г.Н.Флеров, лаборатория которого является ведущей в мире в этом направлении, указывает два способа применения тяжелых ионов для получения сверхтяжелых элементов.

Первый способ - это асимметричное деление промежуточного ядра, создаваемого в процессе соударения двух тяжелых ядер. На рис.8 показаны результаты облучения урана ксеноном. К осознанию, в области, где можно было бы ожидать получения сверхтяжелых элементов, эффективность сечения очень резко падает. По всей вероятности, это происходит за счет так называемого "каскадного" деления, когда получаемое в результате первичного деления ядро еще раз делится на более легкие осколки. Это серьезная трудность, которую не так просто преодолеть. Второй способ - использование реакций  $(H^1, \chi^i)$ . Но здесь тоже есть свои трудности, на которые указывают теоретики. Одна из них - узкий предел допустимых деформаций получаемого ядра. Из рис.9 видно, что энергетическая яма для нулевых квадрупольной ( $\epsilon_2$ ) и гексадекапольной ( $\epsilon_4$ )



деформаций очень узка, а это значит, что сверхтяжелый элемент нужно получить в сферическом состоянии. Если он деформирован, то перейдет в другое состояние и будет делиться.

Вторая трудность — это процессы диссипации, на которые обратил внимание Святецкий и которые подробно обсуждал Струтинский на одном из семинаров в ЛЯРе.

Третья трудность на пути к острову сверхтяжелых элементов — это большая вероятность того, что оболочечные поправки, стабилизирующие ядро в основном состоянии, не приводят к стабилизации при переходе к более высоким возбуждениям. Если так, то ядро сверхтяжелого элемента нужно получать крутым и низковозбужденным. Только в таком случае есть надежда, что сверхтяжелый элемент будет устойчивым.

Остается вопрос существования сверхтяжелых элементов в природе. Ожидается, что сверхтяжелые элементы могут получаться при взрывах сверхновых или при взрывах центров галактик в результате  $r$ -процесса.

Например, в Дос-Аламосе плутоний-244 с временем жизни 80 миллионов лет, был недавно открыт в земных породах. Почему тогда до сих пор не удалось обнаружить сверхтяжелый элемент? Может быть, потому, что существует блокировка процесса  $r$  на пути к острову стабильности. Предполагаемая теоретиками блокировка изображена на рис.10. К острову стабильности можно пойти через очень узкий мостик между двумя изохронами времен жизни относительно спонтанного деления  $10^{-10}$  года (0,003 сек). Но не исключено, что этот путь блокируется индуцированным делением ( $n, f$ ), захватом нейтрона ( $n, \gamma$ ), и конкурирующий  $r$  процесс не в состоянии перейти или обойти эту преграду.

В конце этой части своего доклада хочу вспомнить вопрос, который уже давно поставил Уиллер. Нет ли другой устойчивой формы ядерной материи, кроме шарообразной совокупности нуклонов? По мнению Уиллера, другая форма устойчивого ядра — торроид. Его можно получить, как считают сейчас некоторые теоретики и экспериментаторы, при помощи тяжелых ионов. Если большие ядра бомбардировать, например, ядрами азота с энергией 50 Мэв на нуклон или выше, то из тяжелого ядра можно выбить центр и получить торроидальное ядро, но это уже фантастика.

Сейчас я перехожу к последнему разделу доклада. Это вопрос об использовании ядра отдачи и изучении временных зависимостей при помощи пульсирующих пучков.

Первый вопрос — это измерение времен жизни продуктов ядерных реакций. Если в нашем распоряжении пульсирующий пучок, то можно измерять непосредственно времена жизни продуктов реакции, снимая экспоненциальную кривую их распада после появления ступка частиц из ускорителя. Этот метод хорошо работает в области времен жизни выше нескольких наносекунд.

В течение последних лет были разработаны новые методы измерений времен жизни, в которых используются большие скорости ядер отдачи, в особенности при работе на пучках тяжелых ионов. Я имею в виду применение эффекта Доплера, которое стало возможным вследствие развития техники германиевых детекторов с хорошей энергетической разрешающей способностью.

Один вариант метода состоит в изучении формы гамма-линии, испускаемой ядром отдачи, тормозящимся в толстой мишени. Так как время торможения ядра в твердом теле примерно  $10^{-12}$  —  $10^{-13}$  сек.,

а в газе  $10^{-9} \cdot 10^{-10}$  сек., измерения можно проводить в диапазоне времен жизни  $10^{-8} - 10^{-14}$  сек. Чтобы определить время жизни, мы должны знать, как меняется скорость ядра во времени. Это сложный вопрос, так как до сих пор нет полной теории процесса торможения. На рис. II показана форма гамма-линии для перехода  $86\text{I}$  кэв в  $117\text{Sn}$ . Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую, отвечающую времени жизни  $0.8 \cdot 10^{-12}$  сек.

На рис. I2 показан принцип второго варианта метода доплеровского смещения. Здесь ядра отдачи с тонкой мишени вылетают в вакуум и останавливаются в стоппере, расстояние до которого можно менять. Часть ядер испускает гамма-кванты на лету в вакууме, а часть - после остановки в стоппере. Мы получаем две смещенные линии. Если уменьшать расстояние от мишени до стоппера, то возрастает линия, которая соответствует неподвижным ядрам в стоппере, а испускаемая ядрами на лету уменьшается. Измеряя отношение интенсивности обеих гамма-линий в зависимости от расстояния между мишенью и стоппером, можно получить время жизни ядра отдачи. На рис. I3 приведен пример такого измерения.

Другой способ измерения времен жизни - это использование эффекта теней в кристалле. Доступный здесь диапазон времен жизни определяется временем пролета продукта ядерной реакции между атомными цепями в кристалле. Так что этим методом можно в принципе измерять времена жизни  $10^{-16} - 10^{-18}$  сек.

Сейчас я перехожу к измерениям на пучках ускорителей электромагнитных моментов возбужденных состояний ядер. Эта тематика сама близка моему сердцу, но у меня нет времени на ней подробно останавливаться.

На рис. 14 показано, какие методы работают для разных интервалов времени жизни возбужденных ядерных состояний.

В случае магнитных моментов ограничение измерений со стороны коротких времен жизни определяется максимальной интенсивностью доступных магнитных полей. Так, например, в эффекте Мёсбауэра зеемановское расщепление должно быть больше, чем естественная ширина гамма-линии. Это значит, что для коротких времен жизни нужно использовать очень большие магнитные поля. Для пико-секундного диапазона времен жизни нужны поля в несколько сотен мегагаусс. Это в тысячу раз больше, чем самые большие поля, достижимые в сверхпроводящих магнитах. К счастью, природа, которая создала короткоживущие ядерные состояния, создала также большие поля для измерений их магнитных моментов. Я имел в виду переходные магнитные поля, действующие на ядра в намагниченной ферромагнитной фольге. В такой фольге ядро отдачи рассеивает на своем пути поляризованные электроны, что создает короткодействующие (переходные) магнитные поля на ядре примерно 10 мегагаусс и выше. Еще большие магнитные поля могут действовать на ядра ионов, вылетающих с меньшей скоростью в вакуум или в газ. Если сильно ионизированный атом имеет только один электрон  $1S$ , то магнитное поле на ядре определяется формулой  $16.7 \cdot 10^4 Z^3$  гаусс, что в случае семикратно ионизированного кислорода дает 85 мегагаусс. Если бы кому-нибудь удалось получить 91-кратный ион урана с одним  $1S$  электроном, то поле на ядре достигло бы колоссального значения 140 гигагаусс. Использование переходных полей и полей, действующих на ядра отдачи в вакууме или газе, только начинается, но уже полученные результаты показывают перспективность этого направления.

И, наконец, буквально несколько слов об использовании тяжелых ионов для проверки законов электродинамики. Я ограничусь одним только примером. Из уравнения Дирака вытекает, что связанные состояния электронов в атоме расположены в области от  $-m_0 c^2$  до  $m_0 c^2$ . Если увеличивать  $Z$ , то в случае точечных ядер для  $Z=137$ , а если учесть размеры ядра, то для  $Z \approx 169$ , энергия связи электрона  $\mathcal{E}$  становится такова, что он погружается в континуум отрицательных энергий. (рис.15). Это может также произойти при соударении двух тяжелых ядер, для которых  $Z_1 + Z_2 = 169$ . Если при этом будет создана дырка в К-оболочке, соударение будет сопровождаться рождением электронной пары. Электрон из континуума заполнит дырку, а позитрон улетит, и его можно будет обнаружить.

Это все, что я хотел сказать о состоянии и перспективах развития некоторых актуальных вопросов экспериментальной ядерной физики.

Я вполне согласен с выводом, что ядерная физика в ОИЯИ должна развиваться широким фронтом. Но, как я уже сказал, ширина фронта зависит от финансовых возможностей, и нам нужно выбрать самые интересные и перспективные направления при заданной широте фронта. Большое значение для будущего развития ядерной физики имеет повышение энергии пучков с возможностью ее планового изменения, повышения интенсивности пучков, а также возможность использования большого набора ускоряемых частиц, начиная с протонов и кончая самыми тяжелыми ионами, вплоть до урана.

Нет сомнения, что в ядерной физике, кроме того, о чем я говорил, есть другие чрезвычайно интересные, большие области исследований.

Мне кажется, что три направления ядерной физики заслуживают особого внимания:

- физика тяжелых ионов;
- релятивистская ядерная физика;
- физика экзотических атомов (мю-атомы, мезоатомы и др.).

План развития Объединенного института должен учитывать планы институтов стран-участниц, чтобы избежать дублирования работ, а также полнее использовать установки в странах-участницах для проведения совместных работ. С другой стороны, мне кажется, что для стран-участниц очень важно, чтобы Объединенный институт своим авторитетом поддерживал разумные проекты в их институтах. В особенности я имею в виду строительство в наших странах новых ускорителей, которых у нас (кроме СССР) очень мало по сравнению с другими странами Европы.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 июня 1973 года.

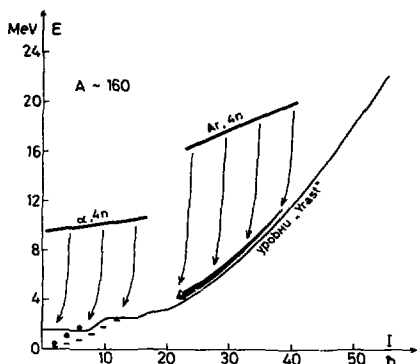


Рис. 1 Возбуждение высокоспиновых состояний

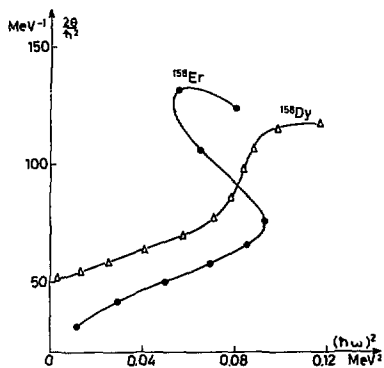


Рис. 2 Странное поведение момента инерции

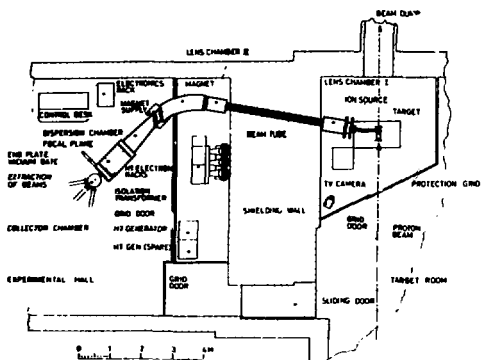


Рис. 3 Расположение установки "Изол'да" (1971)

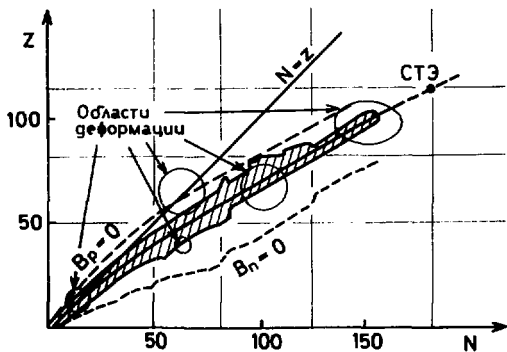


Рис. 4 Области деформации



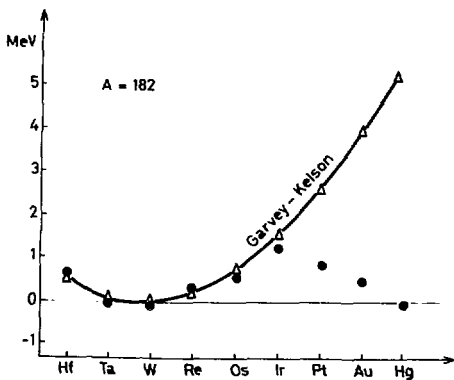


Рис. 5 Поведение масс изобаров, далеких от линии бета-стабильности

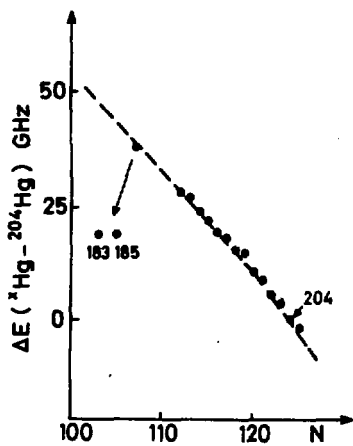


Рис. 6 Изотопные сдвиги ядер  $\text{Hg}$

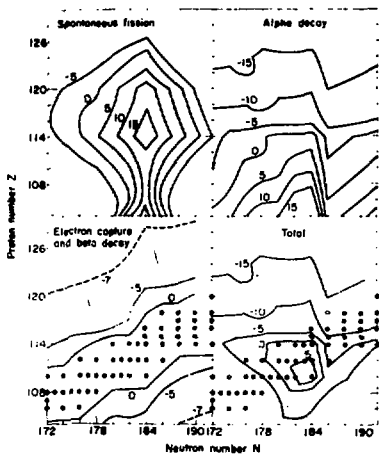


Рис. 7 Времена жизни сверхтяжелых элементов

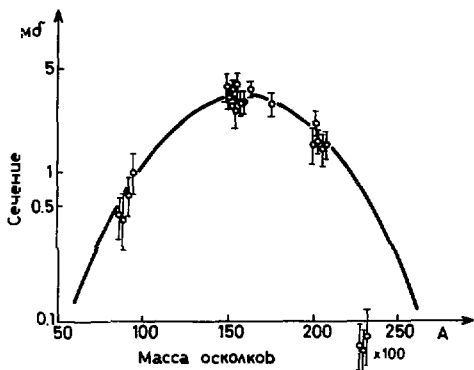


Рис. 8 Сечение деления при облучении урана ксеноном

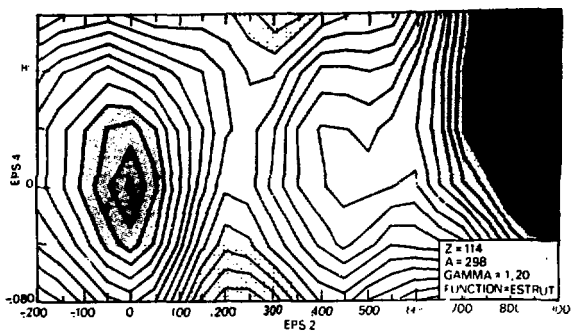


Рис. 9 Поверхности потенциальной энергии для ядра  $^{298}_{114}$

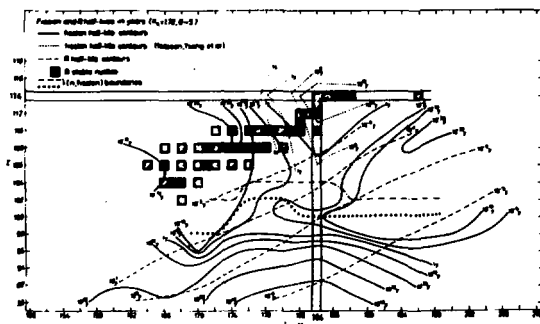


Рис.10 Блокировка пути к острову стабильности

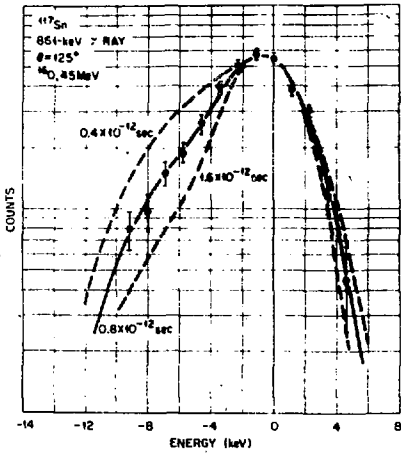


Рис. II Форма гамма-линии, испускаемой ядрами отдачи в толстой мишени

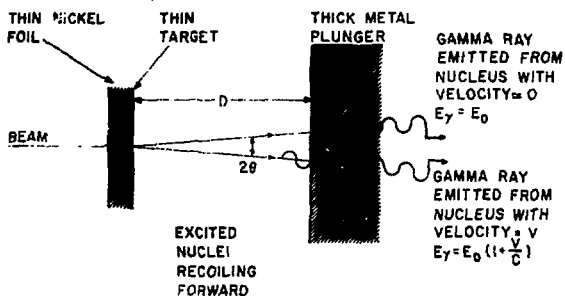


Рис. 12 Принцип измерения времени жизни методом доплеровского смещения

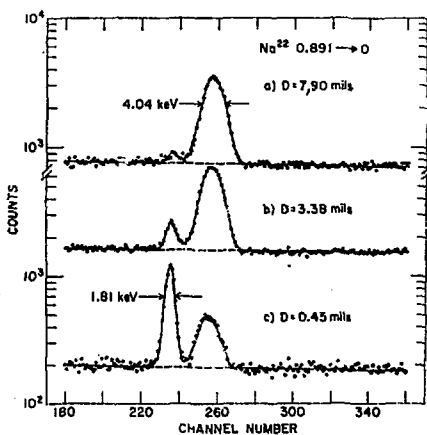


Рис.13 Доплеровское смещение и изменение интенсивности гамма-линии

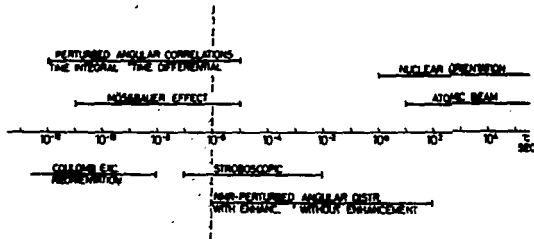


Рис.14 Интервалы применения разных методов измерений электромагнитных моментов ядер

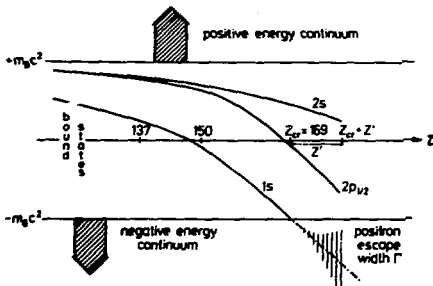


Рис.15 Энергия связи электронов в сверхтяжелых ядрах