

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P1-85-340

С.А.Авраменко, М.Х.Аникина, Г.Л.Варденга,
Н.Н.Воробьева, А.И.Голохвастов, Б.А.Кулаков,
Ю.Лукстиныш, С.А.Хорозов

- **ПОИСК МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР
ПО ЗАПАЗДЫВАЮЩЕМУ ИСПУСКАНИЮ ПРОТОНОВ**

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики" и на
II Международную конференцию по ядро-
ядерным столкновениям, Висби, Швеция, 1985 г.

1985

Вопрос о существовании ядерных изомеров плотности и, в частности, сверхплотных ядер, поднятый в 1946 г. ^{/1/}, стал особенно интересным после работы А.Б.Мигдала ^{/2/}, где был указан конкретный механизм /образование пионного конденсата/, который мог бы привести к существованию таких объектов. Впоследствии был предложен еще ряд механизмов, приводящих к возможности существования ядерных изомеров плотности или формы /см., например, ^{/3-8/}/. Из довольно широкого круга экспериментов, весьма разнообразных как по принципу поиска изомерных состояний ядер, так и по методике, мы выделим только эксперимент группы В.А.Карнаухова ^{/7/}, к которому описываемый нами весьма близок. Авторы ^{/7/} искали ядра, находящиеся в метастабильном состоянии, по кратной эмиссии запаздывающих нейтронов, сопровождающей переход ядра из метастабильного состояния в основное. В нашем эксперименте была предпринята попытка зарегистрировать такой переход по множественному испусканию протонов. Регистрация протонов позволяет включить в зону поиска метастабильные состояния с временем жизни $\tau > 10^{-7}$ с /в ^{/7/} $\tau \geq 1$ с/.

Эксперимент проводился на выведенном пучке ядер кислорода /энергия 1 ГэВ/нуклон/ синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Преимущество ядерных пучков в экспериментах по поиску изомеров плотности обусловлено тем, что в ядро-ядерных столкновениях уплотнение ядерной материи ожидается существенно большим /см., например, ^{/8/}/, чем в протон-ядерных взаимодействиях.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

Основной регистрирующей частью установки были 8 сцинтилляционных счетчиков со сцинтилляторами на основе полистирола, симметрично расположенные вокруг свинцовой мишени /20x40x0,2мм³/. Сцинтилляторы имели форму диска диаметром 50 мм и толщиной 1 мм. Расстояние от центра мишени до центра сцинтилляторов составляло 42 мм. Для всех счетчиков была проверена однородность /независимость амплитуды сигнала от места попадания частицы в сцинтиллятор / и энергетическое разрешение. Было проведено также специальное исследование ^{/9/} использованных сцинтилляторов для определения зависимости световыхода от плотности ионизации. Некоторые результаты исследования характеристик использованных в эксперименте счетчиков приведены также в ^{/10/}.

На рис.1 представлено отношение средней амплитуды сигналов от протонов с энергией E к средней амплитуде сигнала от быстро-

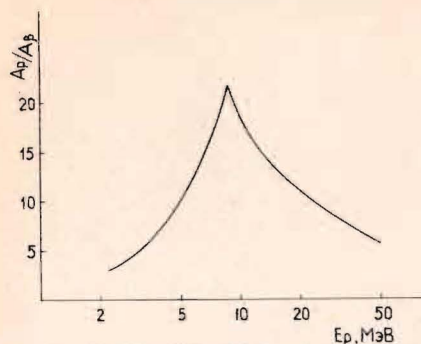


Рис.1. Отношение амплитуд сигналов от протонов с энергией E и электронов с энергией ~ 1 МэВ при перпендикулярном падении на сцинтиллятор толщиной 1 мм.

го ~ 1 МэВ/ электрона, проходящего через сцинтиллятор толщиной 1 мм перпендикулярно поверхности. Видно, что в интервале энергий протонов от 5 до 25 МэВ отношение указанных амплитуд ≥ 10 . Пороги дискриминаторов были установлены на уровне, в 7,5 раз превосходящем амплитуду сигнала от электрона, перпендикулярно падающего на сцинтиллятор. С учетом энергетического разрешения и однородности счетчиков это обеспечивает регистрацию протонов, попавших в сцинтиллятор, с энергиями от 5 до 25 МэВ практически со 100-процентной эффективностью при резком /приблизительно на 3 порядка/ подавлении эффективности регистрации электронов. Стабильность амплитудного режима работы установки контролировалась с помощью альфа-источников /площадь ~ 2 мм²/, наклеенных на все рабочие сцинтилляторы. При этом сигналы от альфа-частиц из-за зависимости световых выхода сцинтиллятора от плотности ионизации были в ~ 4 раза ниже порога регистрирующей электроники и, следовательно, не создавали фона.

Сигналы с выхода дискриминаторов поступали на мажоритарную схему совпадений с временем разрешения 10 нс. Записывалось число срабатываний с кратностью $n \geq 3$ и $n \geq 4$, а также /для контроля/ $n \geq 1$ и $n \geq 2$.

При поиске метастабильных состояний ядер с временем жизни в интервале от $\sim 10^{-7}$ до ~ 1 с использовался режим работы аппаратуры, в дальнейшем для краткости называемый "режим между банчами". Выведенный пучок имеет микроструктуру, обусловленную тем, что в кольце ускорителя частицы сгруппированы в сгустки. При этом временной интервал между "банчами" равен 400 нс /для энергии ускоряемых ядер 1 ГэВ/нуклон/, полная ширина "банча" на половине высоты около 40 нс¹¹. Поэтому в использованном нами "режиме между банчами" аппаратура на время прохождения сгустка частиц через установку блокировалась на 260 нс и, следовательно, "живое" время составляло около трети полного.

Второй режим - "между циклами" - использовался для поиска распадов метастабильных состояний ядер, имеющих времена жизни в интервале от ~ 1 до $\sim 10^5$ с. На время прохождения пучка аппаратура блокировалась / ~ 1 с /, а в промежутке между циклами / ~ 8 с / блокировка снималась.

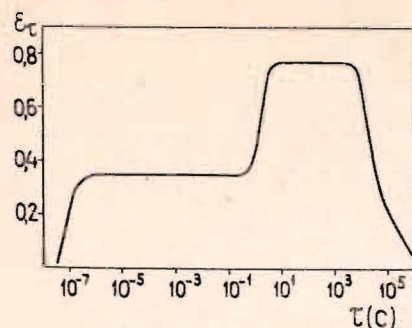


Рис.2. Зависимость вероятности регистрации распада от времени жизни τ метастабильного состояния /"временная" эффективность/.

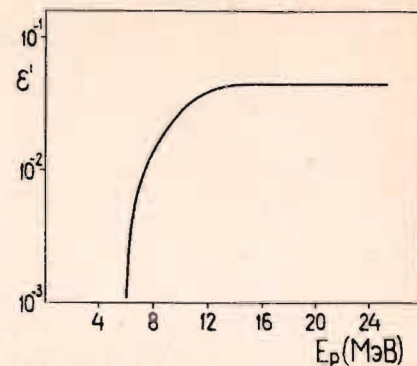


Рис.3. Зависимость вероятности регистрации протона одним счетчиком от энергии протона.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВКИ

Эффективность установки, то есть вероятность регистрации распада некоторой системы /ниже мы уточним это понятие/, естественно распадается на произведение "временной" и "пространственной". "Временная" эффективность есть вероятность распада системы с временем жизни τ в "живое" время. Эта составляющая полной эффективности определяется режимом записи информации и легко рассчитывается. Ее зависимость от времени жизни τ системы представлена на рис.2. Ниже обсуждается "пространственная" эффективность, для краткости называемая просто эффективностью.

Под эффективностью ϵ_k установки мы будем понимать вероятность одновременного срабатывания K сцинтилляционных счетчиков при распаде в мишени метастабильной системы. Ясно, что ϵ_k существенно зависит от числа протонов, испущенных в процессе распада и от их энергетического спектра. На рис.3 приведена зависимость вероятности срабатывания одного счетчика в зависимости от энергии протона, рассчитанная методом статистических испытаний. При этом точка вылета протона разыгрывалась равномерно по объему мишени, энергетические потери в мишени и экране /слой светоизолирующей бумаги/ учитывались по программе STOPW¹²/ счетчик считался сработавшим, если в сцинтиллятор попадал протон с энергией от 5 до 25 МэВ. Видно, что, начиная с энергий протонов ≥ 10 МэВ, вероятность срабатывания счетчика практически постоянна и определяется средним телесным углом.

Таким образом, эффективность ϵ_k /нас в основном интересует $K=3$ / зависит от числа и энергетического спектра испущенных протонов. Для того чтобы представить результаты эксперимента

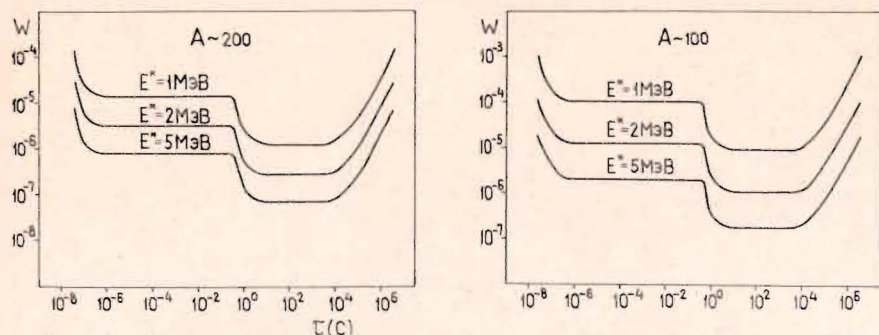


Рис. 4. Верхняя граница вероятности образования метастабильных ядер с энергией возбуждения E^* и временем жизни τ в неупругих взаимодействиях ядер кислорода и свинца.

компактно, мы выбрали следующий путь. Предположим, что переход из метастабильного состояния в основное совершается в два этапа - туннельный переход, в результате которого образуется "обычное" возбужденное ядро с энергией E^* на нуклон и последующий распад возбужденного равновесного состояния /7/. Последний процесс можно рассматривать в рамках модели испарения.

Средняя множественность испаренных протонов принималась равной $\langle n_p \rangle = 1,8 \cdot E^*$ и $\langle n_p \rangle = 1,3 \cdot E^* / E^*$ в МэВ/ для ядер с $A \sim 200$ и ~ 100 соответственно. Энергетический спектр протонов считался максвелловским с температурой $T \approx \sqrt{10 \cdot E^*} / T$ и E^* в МэВ/. Кулоновский потенциал V_k , приводящий к смещению максвелловского спектра, рассчитывался по формуле $V_k = k \cdot \eta(T) \cdot V_0$, где $V_0 = Z/R$ /Z - заряд ядра, R - сумма радиусов ядра и протона/, множитель $k = 0,7$ учитывает эффект подбарьерного прохождения, а $\eta(T) = (1 - T^2/T_{\text{крит}}^2)$ с $T_{\text{крит}} = 9$ МэВ - зависимость кулоновской энергии от температуры ядра. Связь между E^* , $\langle n_p \rangle$, T и V_k , а также численные значения параметров k и $T_{\text{крит}}$ взяты из /13,14/. Распределение испущенных протонов по множественности принималось пуассоновским. Более точные расчеты /13/ показывают, что оно уже пуассоновского, однако на результаты расчета эффективности для $E^* \geq 2$ МэВ это обстоятельство сильно не влияет.

Еще раз отметим, что принятая схема, не являясь принципиально важной для интерпретации эксперимента, позволяет выразить эффективность ϵ_k как функцию одного параметра E^* .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

За время работы /20 ч/ на пучке через установку было пропущено $3,7 \cdot 10^{10}$ ядер кислорода с энергией 1 ГэВ/нуклон /средняя интенсивность $5 \cdot 10^8$ ядер/цикл/. Вероятность неупругого взаимодействия ядра кислорода в мишени с учетом сечения неупругого

взаимодействия /15/ и распределения интенсивности пучка по поверхности мишени /угол между плоскостью мишени и пучком 6° / равна $0,47 \cdot 10^{-2}$. При этом в режиме "между циклами" не было зарегистрировано ни четырехкратных, ни трехкратных совпадений, а в режиме "между банчами" их число равно 1 и 5 соответственно. Эти отсчеты могут быть обусловлены /11/ наличием на уровне 10^{-6} от полного числа частиц в пучке "междубанчевых" частиц /т.е. частиц, "вывалившихся" из ускоряемого сгустка/. Ввиду невозможности корректного учета этого источника фона, нижняя граница вероятности образования метастабильных состояний ядер с временами жизни $10^{-7} - 10^{-1}$ с была соответственно увеличена. Окончательные данные для максимальной вероятности /при уровне достоверности 90%/ образования метастабильных состояний с $A \sim 200$ и ~ 100 в зависимости от их времени жизни τ и энергии E^* возбуждения на нуклон приведены на рис.4. Приведенные границы рассчитаны по зарегистрированному числу тройных совпадений.

Представляет также интерес оценка вероятности образования сравнительно легких изомеров плотности / $A \sim 20 \div 40$ /. В теоретических работах /5,6/ обосновывается существование метастабильных состояний легких ядер с плотностью в $15 \div 30$ раз меньшей, чем у "обычных" ядер, и энергиями возбуждения на нуклон $5 \div 10$ МэВ. Если бы такие сверхразреженные ядра существовали, они могли бы объяснить эффект аномального увеличения сечений неупругого взаимодействия быстрых фрагментов /"аномалонов", см. обзор /16/ и ссылки в нем/. Вполне естественно считать, что в нашей постановке эксперимента такие сверхразреженные ядра тоже могли бы образовываться как продукты фрагментации ядра-мишени. Вопрос об эффективности регистрации их распадов /при переходе из метастабильного состояния в основное/ довольно сложен, поскольку к легким ядрам испарительная модель неприменима /13/. На основании приведенных в литературе данных /13/ можно ожидать, что для ядер с $A \sim 20 \div 40$ и энергиями возбуждения $5 \div 10$ МэВ на нуклон вероятность вылета трех протонов с энергиями ≥ 8 МэВ не меньше 0,1. Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что вероятность образования сверхразреженных ядер с указанными выше характеристиками в неупругих ОРb взаимодействиях с временем жизни $4 \cdot 10^{-8} < \tau < 4 \cdot 10^{-1}$ с не превосходит $4 \cdot 10^{-6}$, а с временем жизни $4 \cdot 10^{-1} < \tau < 4 \cdot 10^5$ с - $3 \cdot 10^{-7}$ соответственно. Для объяснения же эффекта "аномалонов" нужны существенно большие /на несколько порядков/ вероятности образования метастабильных ядер.

Мы благодарны В.А.Карнаухову и В.Д.Тонееву за ценные советы при планировании и обработке эксперимента, А.Ф.Новгородову за помощь в проведении эксперимента, Ю.Хеннигеру за предоставленные программы STOPOW, а также Н.Н.Графову и В.П.Садилу за помощь в подготовке и эксплуатации установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feenberg E. and Primakoff H. Phys.Rev., 1946, 70, p.980.
2. Мигдал А.Б. ЖЭТФ, 1971, 61, с.2209, /см.также А.Б.Мигдал "Фермионы и бозоны в сильных полях", "Наука", М., 1978/.
3. Lee T.D. and Wick G.C. Phys.Rev., 1974, D9, p.2291.
4. Wong C.Y. Annals of Phys., 1973, 77, p.279.
5. Ходель В.А. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, с.265.
6. Schulz H., Ropke G. and Schmidt M. Z.Phys.A., 1983, 310, p.139.
7. Авдеев С.П. и др. ЯФ, 1982, 36, с.315.
8. Гудима К.К., Тонеев В.Д. ЯФ, 1980, 31, с.1455.
9. Воробьева Н.Н. и др. ОИЯИ, 13-84-375, Дубна, 1984.
10. Голохвастов А.И., Лукстиньш Ю., Хорозов С.А. ОИЯИ, Б1-1-84-496, Дубна, 1984.
11. Волков В.И. и др. ОИЯИ, Б1-9-83-248, Дубна, 1983.
12. Хеннигер Ю., Хорлбек Б. ОИЯИ, 10-83-366, Дубна, 1983.
13. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. "Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами", Атомиздат, М., 1972.
14. Dostrovsky I., Rabinowitz P. and Bivins R. Phys. Rev., 1958, 111, p.1659.
15. Аникина М.Х. и др. ЯФ, 1983, 38, с.149.
16. Карманов В.А. УФН, 1983, 141, с.525.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 мая 1985 года

Вниманию организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.
Theoretical physics.
Experimental techniques and methods.
Accelerators.
Cryogenics.
Computing mathematics and methods.
Solid state physics. Liquids.
Theory of condensed matter.
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

JINR Rapid Communications will be issued regularly.



Авраменко С.А. и др.
Поиск метастабильных состояний ядер
по запаздывающему испусканию протонов

P1-85-340

Проведен поиск метастабильных состояний ядер с энергией возбуждения несколько МэВ на нуклон. Такие ядра могли бы быть изомерами плотности/сверхплотные ядра/, изомерами формы или образовываться по ряду других причин. Эксперимент проводился с пучком ядер кислорода (1 ГэВ/нуклон) и мишенью из свинца. Регистрировались протоны с энергиями от 5 до 25 МэВ, которые могли бы излучаться при переходе ядра из метастабильного состояния в нормальное. Установлено, что вероятность образования метастабильных состояний ядер в неупругих ОРb взаимодействиях не превосходит 10^{-6} для времени жизни $10^{-7} \div 1$ с/ и 10^{-7} для времени жизни $1 \div 10^5$ с/.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод Л.И. Барабаш

Avramenko S.A. et al.
A Search for Metastable States of Nuclei
by Means of Delayed Proton Emission

P1-85-340

A search for metastable states of nuclei with an excitation energy of several MeV per nucleon has been performed. Such nuclei could be either density isomers (superdense nuclei) or form isomers, or they could be produced for a variety of other reasons. The experiment has been carried out with a beam of oxygen nuclei (1 GeV/nucleon) and a lead target. The protons with energies from 5 up to 25 MeV were detected. They could be emitted when the nucleus tunnels from metastable state to normal one. It has been found that the production probability of metastable states of nuclei in inelastic O¹⁶Pb interactions does not exceed 10^{-6} (for lifetimes of 10^{-7} - 1s) and 10^{-7} (for lifetimes of 1 - 10^5 s).

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985