

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7/II-77

K-903

P1 - 10202

401/2-77

А.В.Куликов, Б.М.Понтекорво

ПОИСК РАДИОАКТИВНЫХ СВЕРХПЛОТНЫХ ЯДЕР

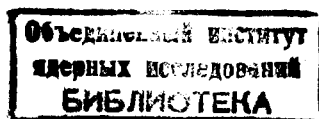
**1976**

P1 - 10202

А.В.Куликов,\* Б.М.Понтекорво

## ПОИСК РАДИОАКТИВНЫХ СВЕРХПЛОТНЫХ ЯДЕР

*Направлено в "Physics Letters"*



---

\* НИИЯФ МГУ

Куликов А.В., Понтекорво Б.М.

P1 - 10202

Поиск радиоактивных сверхплотных ядер

Результаты выполненного в Серпухове эксперимента по поиску новых долгоживущих частиц анализируются в рамках возможного существования сверхплотных ядер. Приведены верхние пределы сечений образования радиоактивных сверхплотных ядер при столкновении протонов высокой энергии с обычными ядрами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Kulikov A., Pontecorvo B.

P1 - 10202

Search for Radioactive Superdense Nuclei

The results of an experimental search for new long-lived particles performed at Serpukhov are discussed in terms of the possible existence of superdense nuclei. The upper limits of cross sections for the production of radioactive superdense nuclei in collisions of high energy protons with normal nuclei are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1976

I. В настоящее время вопрос о возможном существовании новых сверхплотных состояний ядерного вещества широко обсуждается теоретиками и экспериментаторами. Такие аномальные ядра впервые рассматривались Мигдалом<sup>/1,2/</sup> и затем рядом авторов<sup>/3,4/</sup>. В недавней статье Мигдала и др.<sup>/5/</sup> подробно обсуждался вопрос о стабильности аномальных ядер с точки зрения пионной конденсации, т.е. явления, которое могло бы обеспечить само их существование. Основным результатом анализа состоит в том, что теория недостаточно точна, чтобы сделать определенные выводы о существовании аномальных ядер. Однако можно утверждать, что при разумных значениях ядерных констант существование таких ядер вполне возможно. Можно ожидать, что между уровнями сверхплотных ядер будут иметь место  $\beta^-$  и  $\gamma$ -переходы, при этом их характерные энергии могут сильно отличаться от типичных энергий для  $\beta^-$  и  $\gamma$ -переходов в обычных ядрах. Тогда возникает возможность обнаружить аномальные ядра, наблюдая эти переходы, которые, как следует из<sup>/5/</sup>, вероятно, значительно более энергетичны, чем обычные переходы (50-100 МэВ вместо 1-10 МэВ).

Согласно <sup>15/</sup>, имеются, по крайней мере, три области, где могли бы существовать аномальные ядра:

1) область  $Z \approx A/2$ , где  $A$  — число барионов и  $Z$  — электрический заряд ядра, т.е. такая область изомерии плотности, где аномальные ядра имели бы более или менее обычные значения отношения числа протонов к числу нейтронов;

2) область  $Z \ll A$ , т.е. область нейтронных (или сильно нейтроноизбыточных) ядер;

3) область суперзаряженных ядер ( $Z$  очень велик), где п-онная конденсация связана с сильным электростатическим полем ядра.

С экспериментальной точки зрения ясно, что в соударениях нуклонов или ядер с ядрами мишени можно надеяться образовать только *i*) ядра в области  $Z \approx A/2$ , если их плотность не слишком высока, и *ii*) нейтронные ядра, если они могут существовать при достаточно малых значениях  $A$  (скажем,  $A < 15$ , поскольку очевидно, что крайне маловероятно образование более тяжелых нейтронных ядер).

В данной работе мы сообщаем об опытах, в которых, в принципе, аномальные  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивные ядра могли бы быть образованы и обнаружены.

П. На графике, где энергия, приходящаяся на один барион, отложена как функция ядерной плотности, существование сверхплотных ядер соответствовало бы минимуму при плотности  $n_1$ , большей, чем обычная ядерная плотность  $n_0$ . Сверхплотное ядро могло бы быть более тяжелым или более легким, чем соответствующее изомерное (обычное) ядро, но самопроизвольные переходы между изомерными формами должны быть сильно подавлены, так что с этой точки зрения они фактически стабильны.

Как отмечено ранее,  $\beta$ - и  $\gamma$ -переходы, типичные для сверх-

плотных ядер, вероятно, характеризуются энергетическим масштабом, отличающимся от масштаба, присущего обычным ядерным переходам. Это и является исходным пунктом данной работы.

Предположим, что на самом деле сверхплотные ядра существуют. Как можно образовать сверхплотные ядра в соударениях ядер или нуклонов с обычными ядрами? Этот вопрос в настоящее время совсем не выяснен, но общее мнение склоняется к тому, что наиболее выгодно исследовать соударения между тяжелыми ионами с энергиями несколько сотен МэВ на нуклон. Предполагается, хотя ни в коей мере не доказано, что таких соударениях в ядерном веществе может возникать ударная волна, приводящая к сжатию ядерного вещества (до  $n_1/n_0 \approx 5^{15/}$ ).

Возможно, достаточное сжатие можно получить также в нуклон-ядерных соударениях. Именно на этом основании мы представляем здесь результаты проведенных исследований.

Ш. В настоящее время некоторые опыты, предназначенные для поисков сверхплотных ядер, уже выполнены. Проводился поиск примеси сверхплотных ядер в обычном веществе (с отрицательным результатом) при попытке наблюдать протоны с энергией 600–800 МэВ, рассеянные назад с крайне высокой передачей импульса мишени<sup>17/</sup>. Получен верхний предел для примесей таких аномальных ядер в обычном веществе, равный  $10^{-8}$ . Кроме того, искали<sup>18/</sup> сверхплотные изотопы  $Rn$ , пытаясь обнаружить гамма-лучи высокой энергии, испускаемые при захвате тепловых нейтронов. Концентрация сверхплотных изотопов  $Rn$  оказалась меньше  $10^{-29}$  атомной концентрации  $Si$  на Земле.

Соударения с ядрами  $Pb$  ионов  $Ar$  с энергиями 1,1–1,6 ГэВ на нуклон исследовались<sup>19/</sup> с надеждой найти при очень малых углах

сверхплотные фрагменты, которые могли бы быть выбиты вперед в результате сжатия от ударной волны. Верхний предел сечения испускания сверхплотных фрагментов находится в области  $5 \cdot 10^{-25} -$

$10^{-33} \text{ см}^2$ . Сверхплотные ядра искали также в космическом излучении и лунном веществе <sup>/10/</sup>.

IV. В настоящей работе мы излагаем некоторые результаты, которые можно извлечь из опыта <sup>/11/</sup>, выполненного на серпуховском ускорителе с другой целью, а именно: обнаружить возможное образование новых метастабильных частиц, захваченных внутри ядер (аналогично захвату  $\Lambda$ -частиц в гиперядрах). В этом исследовании проводился поиск запаздывающего излучения высокоэнергетичных электронов, гамма-лучей и пионов от свинцовой мишени при бомбардировке её протонами с энергией 60 или 70 ГэВ. Измерения выполнялись во временных интервалах между импульсами ускорителя. Система детектирования, описанная в <sup>/11/</sup>, включала сцинтилляционные счетчики, искровые камеры, спектрометр полного поглощения и работала на линии с вычислительной машиной БЭСМ-3М. Аппаратура была чувствительна к распадам с временем жизни в интервале между  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  и 1 днем. При этом энергетический порог для электронов и гамма-лучей, соответственно, составлял  $E_e \geq 45 \text{ МэВ}$ ,  $E_\gamma \geq 60 \text{ МэВ}$ . Еще ранее мы исследовали экспериментально испускание запаздывающих гамма-лучей ( $E_\gamma \geq 60 \text{ МэВ}$ ) мишенями из *Al* и *W* при бомбардировке их протонами с энергией 70 ГэВ. Доступное измерению время жизни лежало в диапазоне  $6 \text{ ч} \leq \tau \leq 10 \text{ лет}$ .

С точки зрения предмета настоящей статьи, наши опыты представляют интерес тем, что возможное образование сверхплотных радиоактивных ядер в мишени, бомбардируемой протонами с энергией 70 ГэВ, могло бы быть обнаружено наблюдением бета-и гамма-радиоактивности с характерной энергией выше порога нашего детектора.

Конечно, при современных знаниях, открытым остается вопрос относительно того, возможны ли переходы от обычной к сверхплотной фазе ядерного вещества в соударениях высокоэнергетичных протонов с ядрами.

Приведенные в <sup>/11,12/</sup> верхние пределы сечений образования квази ядер, распадающихся с испусканием высокоэнергетичных частиц (электронов или фотонов), могут быть интерпретированы и интерпретируются нами в настоящей статье как верхние пределы сечения образования сверхплотных радиоактивных ядер для различных времен жизни  $\tau$ . Результаты приведены на рис. I. Для каждой кривой указаны вещество мишени и энергия налетающих протонов; пороги детектора электронов и гамма-лучей приведены ранее.

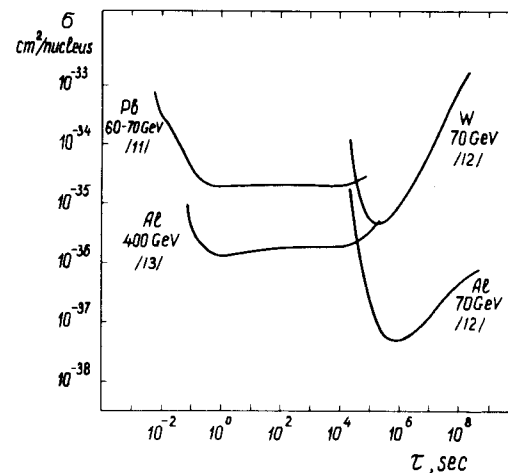


Рис. I. Верхние пределы сечения  $\sigma$  образования сверхплотных радиоактивных ядер, имеющих время жизни  $\tau$ , в столкновениях высокоэнергетичных протонов с мишенями из *Al*, *Pb* и *W*.

В дополнение к серпуховским данным, на рис. I показаны также значения верхних пределов сечения образования новых частиц, которые получены в поисковом опыте в Батавии <sup>/13/</sup>. Выполненный в Фермилаб опыт, с точки зрения темы настоящей заметки, близок к нашему, так что спекуляции относительно возможного образования сверхплотных радиоактивных ядер применимы и в этом случае.

По нашему мнению, самые существенные данные получены на  $P\bar{P}$  и  $W$  мишенях, так как в тяжелых элементах образование сверхплотных ядер априори более правдоподобно из-за самой природы явления пионной конденсации.

В заключение сделаем некоторые замечания относительно интерпретации эксперимента. Хотя в настоящее время ничего нельзя сказать о положении ядерных уровней, вероятностях  $\gamma$ -переходов и других характеристиках сверхплотных ядер, тем не менее, в ограниченной степени, можно судить о некоторых свойствах их  $\beta$ -распада.

Порог нашего детектора для  $\beta$ -лучей составлял, как отмечалось ранее, около 45 МэВ. Очень грубо можно полагать, что времена жизни ядер относительно  $\beta$ -распада пропорциональны  $E^{-5}$  ( $E$ -максимальная энергия в спектре  $\beta$ -электронов). Примем величину 2 МэВ как типичную энергию обычных  $\beta$ -переходов. Из имеющихся данных о радиоактивных элементах можно видеть, что кратчайшие времена жизни  $\tau$ , соответствующие этой энергии, составляют  $\tau \sim 10$  сек для  $A < 50$  и  $\tau \sim 100$  с для  $A > 50$ . Тогда можно ожидать, что кратчайшие времена жизни, соответствующие энергии  $E = 45$  МэВ (в случае сверхплотных ядер) будут порядка  $\tau \sim 10^{-6}$  с для  $A < 50$  и  $\tau \sim 10^{-5}$  с для  $A > 50$ . Эти значения существенно меньше, чем минимальное исследованное нами время жизни - 5 нс. Однако из ядерных данных можно видеть, что для данной энергии

2 МэВ времена жизни обычных  $\beta$ -переходов простираются от уже указанных минимальных значений до значений, на  $\sim 5$  порядков больших. Поэтому можно заключить, что 5 нс не является непременно слишком большой величиной времени жизни, если сверхплотные ядра испускают  $\beta$ -лучи с энергией 45 МэВ и, следовательно, наша аппаратура могла зарегистрировать часть соответствующих процессов  $\beta$ -распада. Конечно, уменьшение доступных исследованию времен жизни и/или снижение порога регистрации  $\beta$ -лучей было бы желательно в будущих экспериментах.

В связи с развитием ускорителей релятивистских ядер становится возможным дальнейшее применение нашего метода регистрации запаздывающих излучений высокой энергии <sup>/11,12,14/</sup> в опытах по поискам сверхплотных ядер. Появление ударных волн, способных обеспечить достаточное сжатие ядерного вещества, кажется более вероятным в соударениях двух тяжелых ядер, чем в соударениях нуклонов с ядрами.

Поэтому опыты, в которых поиски сверхплотных ядер выполняются методом регистрации запаздывающих высокоэнергетичных излучений, могут быть перспективными на ускорителях релятивистских тяжелых ионов.

В заключение нам приятно поблагодарить наших коллег Г.Алексеева, А.Зайцева, Н.Калинину, В.Круглова, В.Кузнецова, А.Купцова, Л.Неменова, Д.Хазинса, И.Чурина, вместе с которыми выполнялись опыты, а также А.Мигдала, В.Галицкого, О.Маркина, И.Мишустина, В.Карнаухова, С.Поликанова, Г.Сорокина за полезные обсуждения.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Б.Мигдал. ЖЭТФ, 61, 2209, 1971.
2. А.В.Migdal. Phys.Lett. 52B, 172, 1974.
3. T.D.Lee, G.C.Wick. Phys.Rev.D9, 2291, 1974.
4. T.D.Lee. Rev.Mod.Phys. 47, 267, 1975.
5. А.В.Migdal, G.A.Sorokin, O.A.Markin, I.N.Mishustin. "Pion Condensation and Stability of Abnormal Nuclei", preprint of the Landau Institute for Theoretical Physics, 1976.
6. M.I.Sobel et al. Nucl.Phys. 251A, 502, 1975.
7. S.Frankel et al. Phys.Rev. C13, 737, 1976.
8. R.Holt et al. Phys.Rev.Lett. 36, 183, 1976.
9. P.B.Price, J.Stevenson. Phys.Rev.Lett. 34, 409, 1975.
10. P.B.Price. Bull.Am.Phys.Soc. 20, 594, 1975.
11. Г.Д.Алексеев и др. ЯФ, 23, 1190, 1976.
12. А.В.Демьянов и др. ЯФ, 13, 786, 1971.
13. S.Frankel et al. Phys.Rev. D12, 2561, 1975.
14. В.Pontecorvo. "Evolution of Particle Physics", Academic Press Inc., New York, 1970, p.210.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 ноября 1976 года.