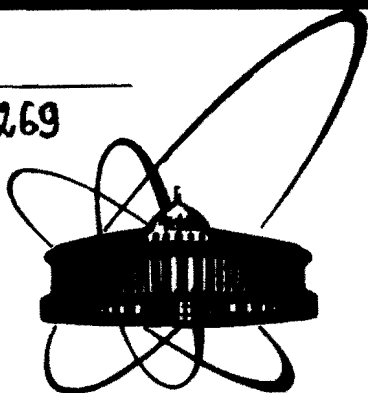


3-269



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P6-86-821**

**Ю.С.Замятнин**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ  
РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА  
ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР  
С ИСПУСКАНИЕМ НУКЛОННЫХ КЛАСТЕРОВ**

**1986**

Открытый в 1984 году спонтанный распад ядер тяжелых элементов с испусканием частиц, промежуточных по массе между  $\alpha$ -частицами и осколками деления, таких, как  $^{14}\text{C} / 1, 2 /$  и  $^{24}\text{Ne} / 3, 4 /$ , продолжает вызывать большой интерес. Об этом, например, свидетельствует число опубликованных за последние два года теоретических и экспериментальных работ, посвященных этому виду распада, которое уже достигло 30.

Интерес к этому явлению объясняется появившейся благодаря ему дополнительной возможности изучения ядерных процессов, связанных с существенной перестройкой ядра. Изучение механизма такой перестройки, которая может быть связана либо с формированием готового кластера в ядре с последующим его проникновением через потенциальный барьер /подобно  $\alpha$ -распаду/, либо с коллективным движением ядерной материи, аналогичным процессу спонтанного деления, либо носит некий промежуточный характер, безусловно представляется весьма привлекательным.

В этой связи целесообразно рассмотреть возможные эксперименты, позволяющие прояснить механизм распада и сделать выбор среди различных модельных представлений, описывающих этот процесс. В настоящей работе предпринята попытка качественного рассмотрения некоторых экспериментов, которые могут этому способствовать, трудностей их осуществления и путей их преодоления.

1. Одним из наиболее интересных направлений исследования является изучение вероятности испускания кластеров, более тяжелых, чем неон и, соответственно, распада более тяжелых исходных ядер\*. В этой области ядер расхождение в оценках, согласно различным модельным представлениям, достигает весьма значительной величины /более 4 порядков для масс распадающихся ядер  $A \geq 240 /$ , поэтому получение данных об изменении вероятности распада с увеличением заряда и массы кластера помогло бы выбрать модель, лучше согласующуюся с экспериментом.

Однако исследования, использующие изотопы элементов более тяжелых, чем уран, связаны со значительными трудностями, которые вызваны как резким возрастанием вероятности конкурирующего процесса спонтанного деления, так и сложностью получения необходимых изотопов. Рассмотрим эти трудности и возможные пути их преодоления.

---

\* Предполагается, что дочерними ядрами во всех случаях распада остаются ядра, близкие к дважды магическому  $^{208}\text{Pb}$ .

В табл.1 приведены теоретические оценки вероятности испускания кластеров и вероятность спонтанного деления <sup>5/</sup> относительно  $\alpha$ -распада для ряда изотопов элементов с  $Z > 92$ . Из таблицы видно, что кроме <sup>237</sup>Np и <sup>241</sup>Am, изучение которых уже проводилось, но распад пока не был обнаружен <sup>6,7/</sup>, наиболее целесообразным представляется изучение распада четных нейтронодефицитных изотопов Pu и Cm. Так, с одной стороны, <sup>236</sup>Pu и <sup>240</sup>Cm имеют, согласно расчетам Познару и др. <sup>8/</sup>, наименьшее значение  $\lg(T_c/T_a)$ , где  $T_a$  и  $T_c$  - парциальные периоды  $\alpha$ -распада и распада с испусканием кластера, т.е. наибольшую относительную вероятность испускания кластеров (Mg. Si).

Таблица 1

Исходные ядра	Продукты распада	$\lg(T_c/T_a)$		$\lg(T_f/T_a)^{5/}$
		Познару <sup>8/</sup>	Другие оценки	
<sup>237</sup> Np	<sup>207</sup> Tl + <sup>30</sup> Mg	11,6	> 12,2 <sup>10/</sup>	> 11,7
<sup>236</sup> Pu	<sup>208</sup> Pb + <sup>28</sup> Mg	10,8	12,0-13,3 <sup>12/</sup>	9,1
<sup>238</sup> Pu	<sup>206</sup> Hg + <sup>32</sup> Si	13,1		8,7
<sup>240</sup> Pu	<sup>206</sup> Hg + <sup>34</sup> Si	12,2		7,3
<sup>242</sup> Pu	<sup>208</sup> Hg + <sup>34</sup> Si	13,3		5,3
<sup>241</sup> Am	<sup>207</sup> Tl + <sup>34</sup> Si	12,4	14,4 <sup>17/</sup>	11,4
<sup>240</sup> Cm	<sup>208</sup> Pb + <sup>32</sup> Si	11,3	15,0-16,4 <sup>12/</sup>	7,4
<sup>242</sup> Cm	<sup>208</sup> Pb + <sup>34</sup> Si	12,5		7,2
<sup>244</sup> Cm	<sup>210</sup> Pb + <sup>34</sup> Si	15,2	25,5 <sup>11/</sup>	5,9
<sup>246</sup> Cm	<sup>206</sup> Hg + <sup>40</sup> S	14,4		3,6
<sup>247</sup> Bk	<sup>207</sup> Tl + <sup>40</sup> S	12,5		~6 /при $T_f =$ $= T_f^{249}Bk/$
<sup>249</sup> Bk	<sup>203</sup> Au + <sup>46</sup> Ar	13,4		4,5
<sup>253</sup> Es	<sup>205</sup> Au + <sup>48</sup> Ca	14,0		7,1

С другой стороны, эти изотопы имеют наибольшее значение  $\lg(T_f/T_a)$ , что связано с быстрым падением  $T_a$  при уменьшении массового числа изотопа данного элемента и слабым изменением перио-

да спонтанного деления  $T_f$ . Такие значения  $\lg(T_f/T_a)$  соответствуют наименьшему фону осколков спонтанного деления. Но даже в лучшем случае (<sup>236</sup>Pu) достижение в эксперименте относительной вероятности распада  $\sim 10^{-14}$  соответствует испусканию на один кластер  $\sim 10^{14}$   $\alpha$ -частиц и  $\sim 10^5$  осколков деления. При меньших значениях  $\lg T_f/T_a$ , например, для <sup>240</sup>Cm, число осколков на один кластер будет еще больше,  $\sim 5 \cdot 10^6$ .

Если использовать для регистрации кластеров методику трековых детекторов, нечувствительных к  $\alpha$ -частицам <sup>3,4/</sup>, оказавшуюся наиболее эффективной в исследованиях такого рода, то при площади детектора  $\sim 10^3$  см<sup>2</sup> плотность треков осколков составит  $\sim 5000$  на см<sup>2</sup>. Такой фон, по-видимому, уже близок к пределу возможности регистрации кластеров. Некоторое улучшение ситуации может быть достигнуто помещением между слоем исследуемого изотопа и трековым детектором тонкой поглощающей фольги /из металла или пластика/, сильно уменьшающей пробег осколков и значительно меньше влияющей на пробег кластеров из-за большого различия их  $dE/dx$  в начале пробега.

Однако даже этот прием едва ли даст возможность проведения экспериментов с изотопами, для которых  $\lg(T_f/T_a) < 7$ . Кроме того, надо иметь в виду, что при регистрации детектором более чем  $10^7$  осколков деления может стать заметной доля продуктов тройного деления с испусканием в качестве третьей частицы ядер кислорода, неона и др., которые сходны с изучаемыми кластерами и могут осложнить их регистрацию.

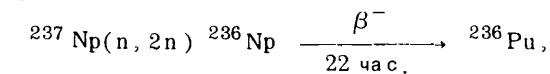
Теперь рассмотрим задачу получения требующихся для экспериментов изотопов.

Для получения нейтронодефицитных изотопов обычно используется облучение соответствующих мишеней ускоренными заряженными частицами, например, протонами, имеющими наибольший пробег в веществе мишени. Так, <sup>236</sup>Pu и <sup>240</sup>Cm могут быть получены по реакциям:



а изотоп <sup>247</sup>Bk - по реакции <sup>244</sup>Cm( $\alpha$ , p) <sup>247</sup>Bk.

Однако количество накопленных таким образом ядер в лучшем случае может составлять  $\sim 10^{14}$  в сутки, что при разумных времени облучения мишени и времени экспонирования детектора не дает возможности обнаружить распад с испусканием кластеров, если его относительная вероятность  $< 10^{-13}$ . В связи с этим имеет смысл рассмотреть другие возможности получения нейтронодефицитных изотопов, в частности, <sup>236</sup>Pu. Одной из таких возможностей может быть облучение <sup>237</sup>Np в высокопоточном реакторе на быстрых нейтронах. В этом случае <sup>236</sup>Pu образуется по реакции



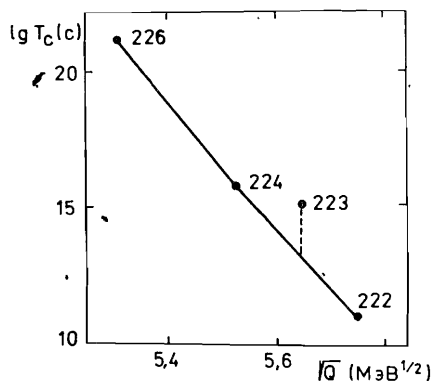
причем скорость его накопления может достигать  $\sim 10^{15}$  ядер в сут-

ки, но при этом параллельно идет накопление  $^{238}\text{Pu}$  по реакции  $^{237}\text{Np}(\text{n}, \gamma)$  на тепловых и медленных нейтронах.

Поэтому более перспективной следует считать реакцию  $^{237}\text{Np}(\gamma, \text{n})^{236}\text{Np}$ , приводящую к образованию тех же продуктов, но без образования  $^{238}\text{Pu}$ . Для этой цели может быть использовано тормозное излучение линейного ускорителя электронов. Преимуществами этой реакции, по сравнению с реакциями на заряженных частицах, являются: возможность применения мишеней большей массы, вследствие более высокой проникающей способности тормозного излучения; более высокое сечение реакции, особенно в области гигантского резонанса; большие токи электронов, достижимые на линейных ускорителях. Все это в совокупности приводит к тому, что скорость накопления  $^{236}\text{Pu}$  в этом случае может достигать  $\sim 10^{16}$  ядер в сутки, а чувствительность эксперимента - величины  $\sim 10^{-15}$ .

2. Вторым важным направлением исследований механизма распада является изучение роли структурных факторов и их влияния на вероятность распада, на что впервые было указано в работе Кадменского и др.<sup>9/</sup> С этой целью целесообразно проведение таких экспериментов, как изучение влияния четности распадающегося ядра на вероятность распада, определение вероятности конкурирующих способов распада ядра с испусканием различных кластеров, определение вероятности распада на возбужденные уровни дочернего ядра. Результаты подобных экспериментов могли бы установить, насколько велика аналогия с ролью структурных факторов, имеющих место при  $\alpha$ -распаде.

Имеющиеся экспериментальные данные, хотя и немногочисленные, дают основание считать, что структура ядра, например, его четность, влияет на испускание кластеров. Так, если использовать зависимость  $\lg T_c$  от энергии распада  $Q$ , аналогичную закону Гейгера - Неттола для  $\alpha$ -распада, то можно обнаружить, что вероятность испускания  $^{14}\text{C}$  и  $^{24}\text{Ne}$  ядрами с нечетным  $Z$  или  $N$  ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{233}\text{U}$ ), связанная с изменением спина или четности ядра в основном состоянии, меньше, чем для четно-четных ядер, распад которых соответствует облегченными  $0^+ \rightarrow 0^+$  переходам. Например, для распада  $^{223}\text{Ra}(1/2^+) \rightarrow ^{209}\text{Rb}(9/2^+) + ^{14}\text{C}$  /см.рис./ фактор запрета равен  $\sim 100$ . Оценка аналогичной величины при испускании

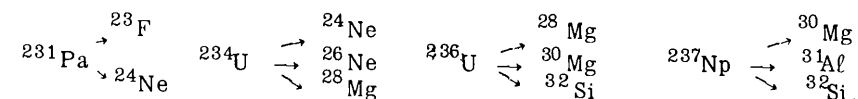


которых соответствует облегченными  $0^+ \rightarrow 0^+$  переходам. Например, для распада  $^{223}\text{Ra}(1/2^+) \rightarrow ^{209}\text{Rb}(9/2^+) + ^{14}\text{C}$  /см.рис./ фактор запрета равен  $\sim 100$ . Оценка аналогичной величины при испускании

Рис. Зависимость парциального периода  $T_c$  распада изотопов радия с испусканием  $^{14}\text{C}$  от энергии распада  $Q$ . • - экспериментальные значения  $T_c$ , полученные в работах /1,2,7,14-17/.

нии  $^{24}\text{Ne}$ , проведенная в работе /10/, показала, что фактор запрета равен 11 для  $^{231}\text{Pa}$  и  $\geq 19$  для  $^{233}\text{U}$ . Однако круг исследованных ядер пока ограничен указанными примерами, и весьма желательно его расширить. С этой точки зрения представляют интерес эксперименты по изучению распада  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  с испусканием того же кластера  $^{24}\text{Ne}$ .

Другим возможным направлением исследований может быть сравнение вероятностей испускания разных кластеров одним и тем же изотопом, например, в таких распадах, как



Эти эксперименты могли бы дать как сравнение вероятностей испускания кластеров разной массы и заряда (Ne, Mg, Si), не выходя за рамки облегченных переходов ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ), так и соотношение вероятностей испускания кластеров разной четности ( $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ). Существенно, что эти соотношения будут получены в одном эксперименте, что всегда предпочтительно.

Для успешного выполнения таких экспериментов наиболее подходящими случаи распада, при которых вероятности различных способов распада - одного порядка. Это требует регистрации меньшего суммарного числа актов распада, чем тогда, когда вероятности различаются на несколько порядков. Для выбора объектов исследования, с этой точки зрения, могли бы помочь предварительные теоретические оценки. Имеющиеся для этой цели данные содержатся в табл.2. Как видно из таблицы, проведение экспериментов, реализующих приведенные выше примеры, является вполне возможным. При этом следует заметить, что отдельная регистрация кластеров одного элемента, соседних по массе ( $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Ne}$ ), требует применения иной методики, чем трековые детекторы, которые имеют плохое разрешение по массе регистрируемых частиц.

По-видимому, иные методы регистрации, имеющие лучшее энергетическое разрешение, потребуются и для экспериментов по обнаружению и определению вероятности распада на возбужденные уровни дочернего ядра. Так, например, уменьшение кинетической энергии кластера  $^{24}\text{Ne}$  на 1 МэВ приводит к уменьшению его пробега в лавсане на 0,7 мкм, что меньше разрешающей способности трековой методики, а возбуждение более высоких уровней маловероятно.

В то же время, наряду с уменьшением вероятности распада при уменьшении энергии испускаемого кластера, можно предположить, что в тех случаях, когда переход на основное состояние связан с большим изменением спина ядра или изменением его четности, переход на возбужденный уровень может оказаться более структурно облегченным, что в определенной степени компенсирует уменьше-

В табл.1 приведены теоретические оценки вероятности испускания кластеров и вероятность спонтанного деления <sup>5/</sup> относительно  $\alpha$ -распада для ряда изотопов элементов с  $Z > 92$ . Из таблицы видно, что кроме <sup>237</sup>Np и <sup>241</sup>Am, изучение которых уже проводилось, но распад пока не был обнаружен <sup>6,7/</sup>, наиболее целесообразным представляется изучение распада четных нейтронодефицитных изотопов Pu и Cm. Так, с одной стороны, <sup>236</sup>Pu и <sup>240</sup>Cm имеют, согласно расчетам Познару и др. <sup>8/</sup>, наименьшее значение  $\lg(T_c/T_\alpha)$ , где  $T_\alpha$  и  $T_c$  - парциальные периоды  $\alpha$ -распада и распада с испусканием кластера, т.е. наибольшую относительную вероятность испускания кластеров (Mg. Si).

Таблица 1

Исходные ядра	Продукты распада	$\lg(T_c/T_\alpha)$		$\lg(T_f/T_\alpha)^{5/}$
		Познару <sup>8/</sup>	Другие оценки	
<sup>237</sup> Np	<sup>207</sup> Tl + <sup>30</sup> Mg	11,6	> 12,2 <sup>10/</sup>	> 11,7
<sup>236</sup> Pu	<sup>208</sup> Pb + <sup>28</sup> Mg	10,8	12,0-13,3 <sup>12/</sup>	9,1
<sup>238</sup> Pu	<sup>206</sup> Hg + <sup>32</sup> Si	13,1		8,7
<sup>240</sup> Pu	<sup>206</sup> Hg + <sup>34</sup> Si	12,2		7,3
<sup>242</sup> Pu	<sup>208</sup> Hg + <sup>34</sup> Si	13,3		5,3
<sup>241</sup> Am	<sup>207</sup> Tl + <sup>34</sup> Si	12,4	14,4 <sup>17/</sup>	11,4
<sup>240</sup> Cm	<sup>208</sup> Pb + <sup>32</sup> Si	11,3	15,0-16,4 <sup>12/</sup>	7,4
<sup>242</sup> Cm	<sup>208</sup> Pb + <sup>34</sup> Si	12,5		7,2
<sup>244</sup> Cm	<sup>210</sup> Pb + <sup>34</sup> Si	15,2	25,5 <sup>11/</sup>	5,9
<sup>246</sup> Cm	<sup>206</sup> Hg + <sup>40</sup> S	14,4		3,6
<sup>247</sup> Bk	<sup>207</sup> Tl + <sup>40</sup> S	12,5		~6 /при $T_f =$ $= T_f^{249}\text{Bk}/$
<sup>249</sup> Bk	<sup>203</sup> Au + <sup>46</sup> Ar	13,4		4,5
<sup>253</sup> Es	<sup>205</sup> Au + <sup>48</sup> Ca	14,0		7,1

С другой стороны, эти изотопы имеют наибольшее значение  $\lg(T_f/T_\alpha)$ , что связано с быстрым падением  $T_\alpha$  при уменьшении массового числа изотопа данного элемента и слабым изменением перио-

да спонтанного деления  $T_f$ . Такие значения  $\lg(T_f/T_\alpha)$  соответствуют наименьшему фону осколков спонтанного деления. Но даже в лучшем случае (<sup>236</sup>Pu) достижение в эксперименте относительной вероятности распада  $\sim 10^{-14}$  соответствует испусканию на один кластер  $\sim 10^{14}$   $\alpha$ -частиц и  $\sim 10^5$  осколков деления. При меньших значениях  $\lg T_f/T_\alpha$ , например, для <sup>240</sup>Cm, число осколков на один кластер будет еще больше,  $\sim 5 \cdot 10^6$ .

Если использовать для регистрации кластеров методику трековых детекторов, нечувствительных к  $\alpha$ -частицам <sup>3,4/</sup>, оказавшуюся наиболее эффективной в исследованиях такого рода, то при площади детектора  $\sim 10^3$  см<sup>2</sup> плотность треков осколков составит  $\sim 5000$  на см<sup>2</sup>. Такой фон, по-видимому, уже близок к пределу возможности регистрации кластеров. Некоторое улучшение ситуации может быть достигнуто помещением между слоем исследуемого изотопа и трековым детектором тонкой поглощающей фольги /из металла или пластика/, сильно уменьшающей пробег осколков и значительно меньше влияющей на пробег кластеров из-за большого различия их  $dE/dx$  в начале пробега.

Однако даже этот прием едва ли даст возможность проведения экспериментов с изотопами, для которых  $\lg(T_f/T_\alpha) < 7$ . Кроме того, надо иметь в виду, что при регистрации детектором более чем  $10^7$  осколков деления может стать заметной доля продуктов тройного деления с испусканием в качестве третьей частицы ядер кислорода, неона и др., которые сходны с изучаемыми кластерами и могут осложнить их регистрацию.

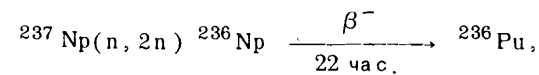
Теперь рассмотрим задачу получения требующихся для экспериментов изотопов.

Для получения нейтронодефицитных изотопов обычно используется облучение соответствующих мишеней ускоренными заряженными частицами, например, протонами, имеющими наибольший пробег в веществе мишени. Так, <sup>236</sup>Pu и <sup>240</sup>Cm могут быть получены по реакциям:



а изотоп <sup>247</sup>Bk - по реакции  $^{244}\text{Cm}(\alpha, p) ^{247}\text{Bk}$ .

Однако количество накопленных таким образом ядер в лучшем случае может составлять  $\sim 10^{14}$  в сутки, что при разумных времени облучения мишени и времени экспонирования детектора не дает возможности обнаружить распад с испусканием кластеров, если его относительная вероятность  $< 10^{-13}$ . В связи с этим имеет смысл рассмотреть другие возможности получения нейтронодефицитных изотопов, в частности, <sup>236</sup>Pu. Одной из таких возможностей может быть облучение <sup>237</sup>Np в высокопоточном реакторе на быстрых нейтронах. В этом случае <sup>236</sup>Pu образуется по реакции



причем скорость его накопления может достигать  $\sim 10^{15}$  ядер в сут-

ки, но при этом параллельно идет накопление  $^{238}\text{Pu}$  по реакции  $^{237}\text{Np}(\text{n}, \gamma)$  на тепловых и медленных нейтронах.

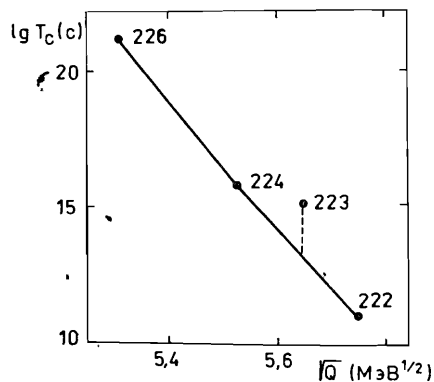
Поэтому более перспективной следует считать реакцию  $^{237}\text{Np}(\gamma, \text{n})^{236}\text{Np}$ , приводящую к образованию тех же продуктов, но без образования  $^{238}\text{Pu}$ . Для этой цели может быть использовано тормозное излучение линейного ускорителя электронов. Преимуществами этой реакции, по сравнению с реакциями на заряженных частицах, являются: возможность применения мишеней большей массы, вследствие более высокой проникающей способности тормозного излучения; более высокое сечение реакции, особенно в области гигантского резонанса; большие токи электронов, достижимые на линейных ускорителях. Все это в совокупности приводит к тому, что скорость накопления  $^{236}\text{Pu}$  в этом случае может достигать  $\sim 10^{16}$  ядер в сутки, а чувствительность эксперимента - величины  $\sim 10^{-15}$ .

2. Вторым важным направлением исследований механизма распада является изучение роли структурных факторов и их влияния на вероятность распада, на что впервые было указано в работе Кадменского и др.<sup>/9/</sup> С этой целью целесообразно проведение таких экспериментов, как изучение влияния четности распадающегося ядра на вероятность распада, определение вероятности конкурирующих способов распада ядра с испусканием различных кластеров, определение вероятности распада на возбужденные уровни дочернего ядра. Результаты подобных экспериментов могли бы установить, насколько велика аналогия с ролью структурных факторов, имеющих место при  $\alpha$ -распаде.

Имеющиеся экспериментальные данные, хотя и немногочисленные, дают основание считать, что структура ядра, например, его четность, влияет на испускание кластеров. Так, если использовать зависимость  $\lg T_c$  от энергии распада  $Q$ , аналогичную закону Гейгера - Неттола для  $\alpha$ -распада, то можно обнаружить, что вероятность испускания  $^{14}\text{C}$  и  $^{24}\text{Ne}$  ядрами с нечетным  $Z$  или  $N$  ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{233}\text{U}$ ), связанная с изменением спина или четности ядра в основном состоянии, меньше, чем для четно-четных ядер, распад

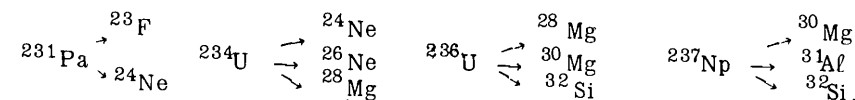
которых соответствует облегченным  $0^+ \rightarrow 0^+$  переходам. Например, для распада  $^{223}\text{Ra}(1/2^+) \rightarrow ^{209}\text{Pb}(9/2^+) + ^{14}\text{C}$  /см.рис./ фактор запрета равен  $\sim 100$ . Оценка аналогичной величины при испуска-

Рис. Зависимость частичного периода  $T_c$  распада изотопов радия с испусканием  $^{14}\text{C}$  от энергии распада  $Q$ . • - экспериментальные значения  $T_c$ , полученные в работах /1,2,7,14-17/.



нии  $^{24}\text{Ne}$ , проведенная в работе /10/, показала, что фактор запрета равен 11 для  $^{231}\text{Pa}$  и  $\geq 19$  для  $^{233}\text{U}$ . Однако круг исследованных ядер пока ограничен указанными примерами, и весьма желательно его расширить. С этой точки зрения представляют интерес эксперименты по изучению распада  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  с испусканием того же кластера  $^{24}\text{Ne}$ .

Другим возможным направлением исследований может быть сравнение вероятностей испускания разных кластеров одним и тем же изотопом, например, в таких распадах, как



Эти эксперименты могли бы дать как сравнение вероятностей испускания кластеров разной массы и заряда (Ne, Mg, Si), не выходя за рамки облегченных переходов ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ), так и соотношение вероятностей испускания кластеров разной четности ( $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ). Существенно, что эти соотношения будут получены в одном эксперименте, что всегда предпочтительно.

Для успешного выполнения таких экспериментов наиболее подходящими случаи распада, при которых вероятности различных способов распада - одного порядка. Это требует регистрации меньшего суммарного числа актов распада, чем тогда, когда вероятности различаются на несколько порядков. Для выбора объектов исследования, с этой точки зрения, могли бы помочь предварительные теоретические оценки. Имеющиеся для этой цели данные содержатся в табл.2. Как видно из таблицы, проведение экспериментов, реализующих приведенные выше примеры, является вполне возможным. При этом следует заметить, что раздельная регистрация кластеров одного элемента, соседних по массе ( $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Ne}$ ), требует применения иной методики, чем трековые детекторы, которые имеют плохое разрешение по массе регистрируемых частиц.

По-видимому, иные методы регистрации, имеющие лучшее энергетическое разрешение, потребуются и для экспериментов по обнаружению и определению вероятности распада на возбужденные уровни дочернего ядра. Так, например, уменьшение кинетической энергии кластера  $^{24}\text{Ne}$  на 1 МэВ приводит к уменьшению его пробега в лавсане на 0,7 мкм, что меньше разрешающей способности трековой методики, а возбуждение более высоких уровней маловероятно.

В то же время, наряду с уменьшением вероятности распада при уменьшении энергии испускаемого кластера, можно предположить, что в тех случаях, когда переход на основное состояние связан с большим изменением спина ядра или изменением его четности, переход на возбужденный уровень может оказаться более структурно облегченным, что в определенной степени компенсирует уменьше-

Таблица 2

Исходное ядро	Испускаемый кластер	lg(T <sub>c</sub> /T <sub>α</sub> )		
		Познару <sup>/8/</sup>	Кадменский <sup>/10/</sup>	Другие работы
<sup>231</sup> Pa	<sup>23</sup> F	12,8		11,55 <sup>/11/</sup>
	<sup>24</sup> Ne	10,0		{ 10,0-11,1 <sup>/12/</sup> 11,0 <sup>/13/</sup>
<sup>238</sup> U	<sup>24</sup> Ne	10,7	12	
	<sup>25</sup> Ne	10,9	12,4	{ 10,2 <sup>/11/</sup> 9,6 <sup>/13/</sup>
	<sup>28</sup> Mg	12,2	12,1	
<sup>234</sup> U	<sup>24</sup> Ne	11,9	13,2	
	<sup>26</sup> Ne	12,3	12,85	{ 11,75 <sup>/11/</sup> 11,8 <sup>/13/</sup>
	<sup>28</sup> Mg	10,6	11,1	
<sup>235</sup> U	<sup>24</sup> Ne	12,0		
	<sup>25</sup> Ne	12,0	13,4	
	<sup>26</sup> Ne	12,3	12,5	
	<sup>28</sup> Mg	11,2		
	<sup>29</sup> Mg	11,3		
	<sup>30</sup> Mg	12,3	11,7	
	<sup>32</sup> Si	11,8		
<sup>236</sup> U	<sup>28</sup> Mg	12,1		
	<sup>30</sup> Mg	12,1	12,0	
	<sup>32</sup> Si	12,1		
	<sup>34</sup> Si	13,1		
<sup>237</sup> Np	<sup>30</sup> Mg	11,6	12,2	
	<sup>31</sup> Al	12,9		
	<sup>32</sup> Si	11,6		

ние проницаемости кулоновского барьера. Обнаружение распада на возбужденные уровни и измерение их вероятности в зависимости от спина и четности позволит судить о том, какую роль при испускании кластеров играет та или иная перестройка структуры ядра. Наиболее подходящими дочерними ядрами для таких экспериментов

могут быть четно-нечетные <sup>207</sup>Tl и <sup>209</sup>Pb, образующиеся при распаде <sup>223</sup>Ra, <sup>231</sup>Pa, <sup>233</sup>U, <sup>237</sup>Np.

Приведенные в работе примеры показывают, что видна достаточно широкая программа исследований нового вида распада ядер, осуществление которой может способствовать лучшему пониманию путей протекания сложных процессов перестройки ядра. Однако ряд описанных выше экспериментов требует применения более точных методов регистрации частиц и определения их параметров, чем трековые детекторы, обладающих в то же время сравнимой с ними светосилой и эффективностью.

Автор выражает глубокую благодарность Л.Б.Пикельнеру за поддержку работы и В.И.Фурману - за полезные дискуссии и ценные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rose H.J., Jones G.A. Nature, 1984, 307, p.245.
2. Александров Д.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, с.152.
3. Сэндулеску А. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, № 5-84, с.5, 1984.
4. Warwick S.W. et al., Phys.Rev.C., 1985, 31, p.1984.
5. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Атомиздат, М., 1976, с.129.
6. Третьякова С.П. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, № 13-85, с.34, 1985.
7. Hourani E. et al. Phys.Lett., 1985, 160B, p.375.
8. Poenaru D.N. et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1986, 34, p.423.
9. Кадменский С.Г. и др. Сообщение ОИЯИ, P4-85-368, Дубна, 1985.
10. Кадменский С.Г. и др. В сб.: Труды Международной школы по структуре ядра /Алушта, 14-22 окт. 1985 г./, ОИЯИ, Д4-85-851, Дубна, 1985, с.385.
11. Рубченя В.А. и др. Изв.АН СССР, сер.физ. 1986, 50, с.1016.
12. Грашин А.Ф., Ефименко А.Д. Ядерная физика, 1986, 43, с.1330.
13. Shi Yi-Jin, Swiatecki W.J. Nucl.Phys., 1985, A438, p.450.
14. Price P.V. et al. Phys.Rev.Lett., 1985, 54, p.297.
15. Gales S. et al. Phys.Rev.Lett., 1984, 53, p.759.
16. Kutschera W. et al. Phys.Rev.C., 1985, 32, p.2036.
17. Warwick S.W. et al. Phys.Rev.C., 1986, 34, p.326.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 декабря 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D12-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды X Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Замятнин Ю.С.

P6-86-821

Перспективы изучения радиоактивного распада тяжелых ядер с испусканием нуклонных кластеров

Рассмотрены возможные эксперименты, направленные на выяснение механизма спонтанного распада ядер тяжелых элементов с испусканием частиц, промежуточных по массе между  $\alpha$ -частицами и осколками деления, и способствующие выбору модельных представлений, описывающих этот процесс. Обсуждены трудности осуществления таких экспериментов и возможные пути их преодоления.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С. Виноградовой

Zamaytnin Yu.S.

P6-86-821

Prospects for the Investigation of Radioactive Decay of Heavy Nuclei with the Nucleon Clusters Emission

Some experiments are discussed aimed at clarifying a mechanism of heavy element nucleus spontaneous decay with emission of particles which mass is intermediate between  $\alpha$ -particle and fission fragments. These experiments could provide a possibility for choosing different models describing this process. The difficulties of performance of such experiments and possible ways of their overcoming are discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986