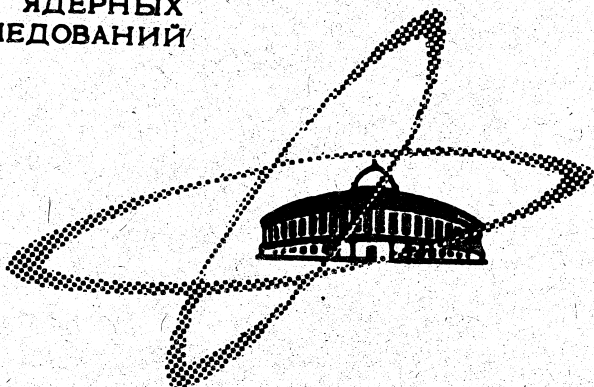


А. С. 20
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.



19/11-60
Изв. АН СССР сер. Физ.-мат. науки
1968, № 1, с. 12-14
Р6 - 4235

Р. Арльт, З. Малек, Г. Музиоль, Г. Пфреппер,
Х. Штрусный

НОВЫЕ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫЕ ИЗОТОПЫ

^{169}Hf , ^{167}Hf , ^{166}Hf и ^{166}Lu

СХЕМА РАСПАДА ^{169}Hf

1968

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P6 - 4235

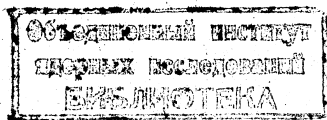
Р.Арльт, З.Малек, Г.Музиоль, Г.Фреппер,
Х.Штрусный

НОВЫЕ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫЕ ИЗОТОПЫ

^{169}Hf , ^{167}Hf , ^{166}Hf и ^{166}Lu

СХЕМА РАСПАДА ^{169}Hf

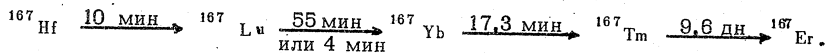
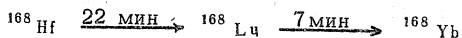
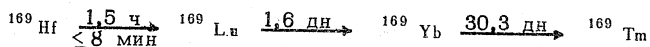
Направлено в Известия АН СССР.



4690/2 пр.

1. В в е д е н и е

Нейтрондефицитные изотопы Hf с массовым числом $A < 170$ мало изучены. К моменту начала наших исследований были известны следующие цепочки распада этих изотопов:



В цепочках распада с $A = 169$ и $A = 167$ имеются противоречия в данных о таких основных параметрах, как периоды полураспада. Изотопу ^{169}Hf в работе /1/ приписана активность, убывающая с периодом полураспада 1,5 час. Идентификация производилась по генетической связи с изотопами ^{169}Yb и ^{169}Lu . В работе /2/, где не обнаружена активность с периодом полураспада 1,5 час, высказывается предположение, что период полураспада изотопа ^{169}Hf меньше 8 мин. В работе /1/ также открыт распад изотопа ^{168}Hf . Для идентификации была использована генетическая связь с распадом изотопа ^{168}Lu , открытым в работе /3/.

Наблюдавшаяся в работе /1/ активность с периодом полураспада 10 мин во фракции Hf приписана авторами изотопу ^{167}Hf . В быстро выделенных из этой фракции дочерних продуктах Lu наблюдались компоненты β^+ -излучения с периодом полураспада 4 мин, 20 мин и 2 дня. Активность, убывающая с периодом полураспада 20 мин, является дочерней по сравнению с активностью, убывающей с периодом полураспада 10 мин.

Уже тогда известная активность, убывающая с периодом полураспада 55 мин и относящаяся к распаду изотопа ^{167}Lu /4/, в работе /1/, однако, не наблюдалась.

Настоящая работа ставилась с целью проверки основных характеристик короткоживущих нейтронодефицитных изотопов Hf. При этом выяснилось, что изотопы ^{169}Hf и ^{167}Hf ранее были идентифицированы неправильно. Поэтому мы считаем их открытыми в нашей работе.

2. Экспериментальная методика

2.1. Приготовление источников

Изотопы Hf образовывались в реакции глубокого расщепления типа $\text{Ta}(p; 2p, xn)\text{Hf}$ или были получены накоплением из материнского Ta, полученного по реакции $\text{Re}(p; 3p, xn)\text{Ta}$ или $\text{Hg}(p; 8p, xn)\text{Ta}$. В качестве мишеней использовались суспензия Ta_2O_5 , HReO_4 и HgO . Облучения проводились на внешней пучке протонов с энергией 660 Мэв синхротрон ОИЯИ. Время облучения колебалось от 2 до 20 минут. Для транспортировки мишени к месту химической обработки использовалась пневматическая почта /5/.

Окись тантала облучалась в виде суспензии (2.2) в растворе шавелевой кислоты (0,5 моль/л) /6/. Материал мишени отделялся простой фильтрацией. Благодаря энергии отдачи 30-40% образовавшейся в мишени активности переходит в водную фазу.

Гафний из смеси продуктов ядерных реакций выделялся экстракцией 0,1 моль/л раствором три-н-октиламина из смеси соляной и шавелевой кислот ($(\text{COOH})_2$ 0,1 моль/л; HCl 0,2 моль/л). Было определено, что при таких условиях экстрагируется больше 99,8% гафния и меньше 0,5% редкоземельных элементов. Для полной очистки гафния от редкоземельных элементов органическая фаза 2-3 раза промывалась раствором кислот. После накопления дочернего Lu последний вымывался из органической фазы через заданные промежутки времени (2-12 минут). Радиоактивные растворы собирались в тефлоновые сосуды, стандартно-

зированные для нашего спектрометра. Эта методика, позволяющая начать измерения спектров спустя 5 мин после конца облучения, очень удобна для получения дочерних изотопов Lu , однако, она не позволяет полностью очистить Hf фракцию от Ta , образующегося по реакции $\text{Ta}(p;p, n)\text{Ta}$. Поэтому для получения Hf в основном использовалась методика с применением HgO и HReO_4 мишеней.

Облученные окись ртути (5 г) или HReO_4 (4г) растворялись в концентрированной азотной кислоте и тантал сорбировался в течение 1 минуты на поверхности стекла /7/. После промывки азотной кислотой и водной тантал десорбировался смесью плавиковой и серной кислот и экстрагировался метилбутилкетонем /8/. Установлено, что при таких условиях (метилбутилкетон $0,4 \text{ M H F} - 6 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) переходит в органическую фазу 99,5% металла. После промывки органической фазы вышеуказанной смесью кислот в органической фазе накапливался дочерний гафний, который периодически (интервал 4-20 минут) вымывался водной фазой ($0,4 \text{ M H F} - 6 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) и переносился в тефлоновые сосуды для измерений

2.2. Измерительная аппаратура

Для измерения γ -спектров были применены:

- 1) γ -спектрометр с кристаллом Na J(Tl) размером 70 x x 50 мм и энергетическим разрешением 10,7% для линии ^{137}Cs и с 256-канальным амплитудным анализатором.
- 2) γ -спектрометр с коаксиальным Ge(Li) -детектором с чувствительным объемом 4,6 см³ и энергетическим разрешением 6 кв для линии ^{60}Co с энергией 1332 кэв и 4096-канальным амплитудным анализатором.
- 3) γ -спектрометр с коаксиальными Ge(Li) - детекторами с чувствительным объемом 10 и 6,4 см³ и энергетическим разрешением соответственно 6 и 4,5 кэв для линий изотопа ^{60}Co с энергией 1332 кэв.

Градуировка γ -спектрометра по энергиям и интенсивностям производилась с помощью калибровочных препаратов ^{169}Yb , ^{133}Ba , ^{182}Ta и ^{226}Ra .

- 4) для измерения β^+ -спектра ^{169}Hf был применен антраценовый кристалл с энергетическим разрешением 14% для конверсионной линии

изотопа ^{137}Cs с энергией 624 кэв. Градуировка β -спектрометра производилась с использованием калибровочных препаратов с изотопами ^{137}Cs , ^{207}Bi , ^{144}Pr и ^{90}Y .

Измерения γ - γ -совпадений проводились с помощью кристалла $\text{NaJ}(\text{Tl})$ размером 80x80 мм и $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора с чувствительным объемом 6,3 см³ и стандартной схемой быстро-медленных совпадений с разрешающим временем $2\tau = 150$ нсек. Измерительная техника, а также методика обработки спектров подробно описаны в работе /9/.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Цепочка распада с $A = 169$

Для разрешения противоречий в данных о цепочке распада с $A = 169$ нами изучалось накопление изотопа ^{169}Lu в Hf -фракции, выделенной из танталовой мишени спустя 4 мин после конца облучения. Время облучения составляло 20 мин, время накопления - 6 мин. На рис. 1 изображена кривая распада материнского изотопа ^{169}Hf , построенная по убыванию интенсивности γ -переходов распада ^{169}Lu /4/ и ^{169}Yb /10/ с энергиями 191, 962 и 198 кэв, соответственно. По данным трех опытов период полураспада материнского изобара составляет $(5,0 \pm 0,5)$ мин. Принимая во внимание, что в Hf -фракции не содержатся примеси других элементов, в работе /11/ это период полураспада приписали изотопу ^{169}Hf .

При исследовании генетической связи нейтронодефицитных изотопов тантала с дочерними изобарами период полураспада изотопа ^{169}Ta определялся также равным $(5,0 \pm 0,5)$ мин /12/, и поэтому мы решили проверить правильность приписания периода полураспада $(5,0 \pm 0,5)$ мин изотопу ^{169}Hf в независимом опыте. Для этой цели мы провели два дополнительных опыта. В первом облучался Re , из мишени выделялась танталовая фракция и только из нее была выделена после 6-минутного накопления фракция гафния. Таким образом была обеспечена высокая степень чистоты фракции гафния от примесей тантала. γ -спектры, измеренные после выделения гафния из танталовой фракции, изображены на рис. 2.

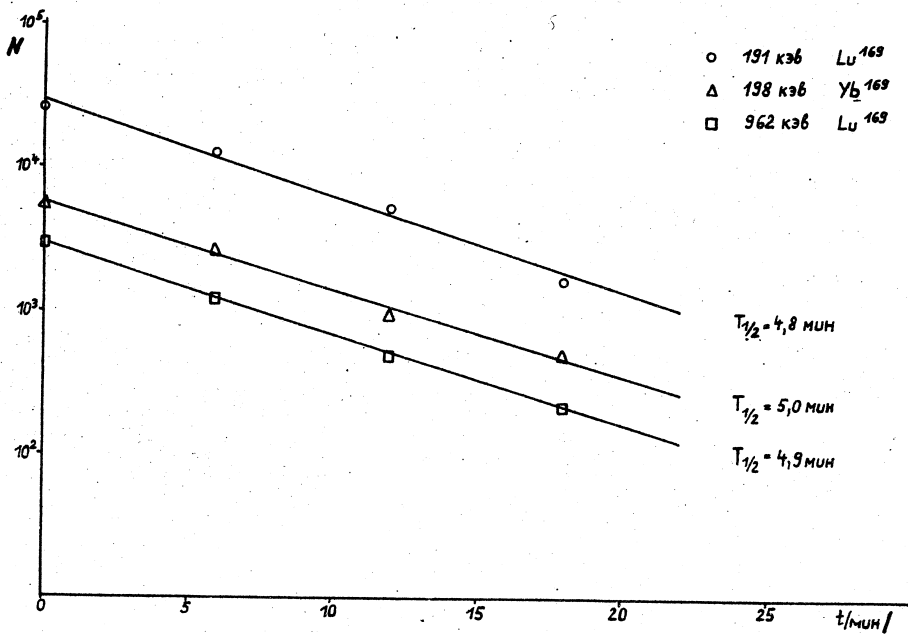


Рис. 1. Кривая распада изотопа ¹⁶⁹Ni, построенная по убыванию интенсивности гамма-переходов распада ¹⁶⁹Lu и ¹⁶⁹Yb с энергиями 191, 962 и 193 кэв, соответственно.

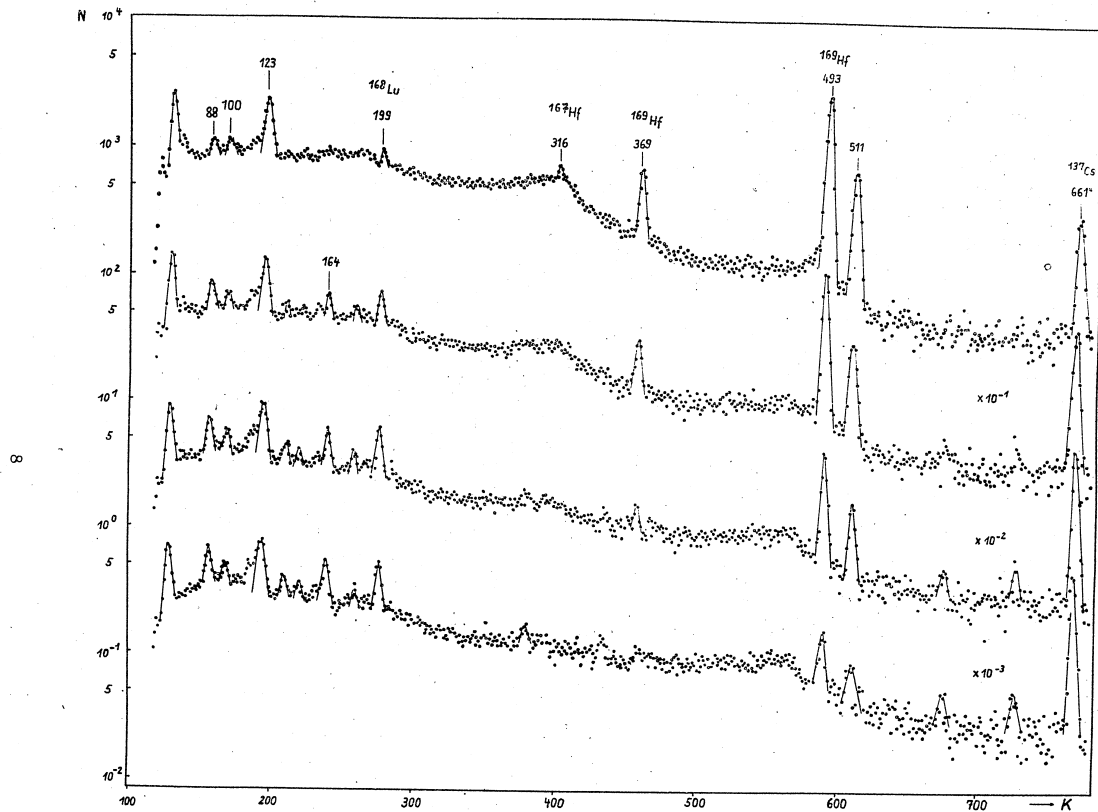


Рис. 2. Гамма-спектры фракции гафния, выделенной из фракции тантала, как функция от времени. Продолжительность измерения 2 минуты, интервал между измерениями 5,4 минуты.

Определение периода полураспада по интенсивности наиболее интенсивных γ -переходов с энергией 123, 369 и 493 кэВ дало значение $(3,2 \pm 0,1)$ мин (рис. 3а)^{x/}, а γ -перехода с энергией 316 кэВ - значение $(1,8 \pm 0,7)$ мин. Для γ -переходов с энергией 158 и 182 кэВ получается значение (25 ± 2) мин, что означает их принадлежность к распаду ^{168}Hf ^{/2/}. Переходы с энергией 88 и 198 кэВ относятся к распаду ^{168}Lu , который находится в радиоактивном равновесии с изобаром ^{168}Hf (рис. 3б).

Во втором дополнительном опыте была изучена генетическая связь дочерних изобаров Hf с изотопами функции тантала, полученной только что описанным способом. Для этой цели из фракции тантала выделялись через каждые 6 мин 8 препаратов гафния, которые были сразу же измерены на γ -спектрометре. По убыванию интенсивности γ -переходов с энергией 369 и 493 кэВ 3,2-минутной активности гафния мы определили период полураспада материнского изобара. Он составляет $(5,0 \pm 0,5)$ мин.

Оба опыта показывают, таким образом, что период полураспада ^{169}Hf равен $(3,2 \pm 0,1)$ мин. Это вывод подтверждается и тем фактом, замеченным при изучении генетической связи ^{169}Ta со своими дочерними изобарами^{/12/}, что интенсивность γ -переходов с энергией 369 и 493 кэВ сначала нарастает и только потом убывает с периодом полураспада $(5,0 \pm 0,5)$ мин. Отношение интенсивностей этих γ -переходов такое же, как и во фракции гафния.

Полученные нами данные о γ -переходах, возникающих при распаде ^{169}Hf , приведены в таблице 1. Данные о наиболее интенсивных γ -переходах распада ^{169}Lu и ^{169}Yb , впервые измеренных на Ge(Li) -детекторе, приведены в таблицах 2 и 3.

В этой связи представляет интерес γ -переход с энергией 1451 кэВ и периодом полураспада интенсивности, равным ~ 30 час, который в работе^{/13/} был отнесен частично к распаду ^{169}Lu , частично - к распаду ^{170}Lu . Мы подтверждаем принадлежность этого γ -перехода к распаду ^{169}Lu , учитывая при этом результаты работ^{/13,14/} о γ -переходах при распаде ^{170}Lu и ^{165}Tm , соответственно.

^{x/} Кривые спада интенсивности γ -переходов с энергией 123 и 511 кэВ были получены после вычитания фона долгоживущих изотопов.

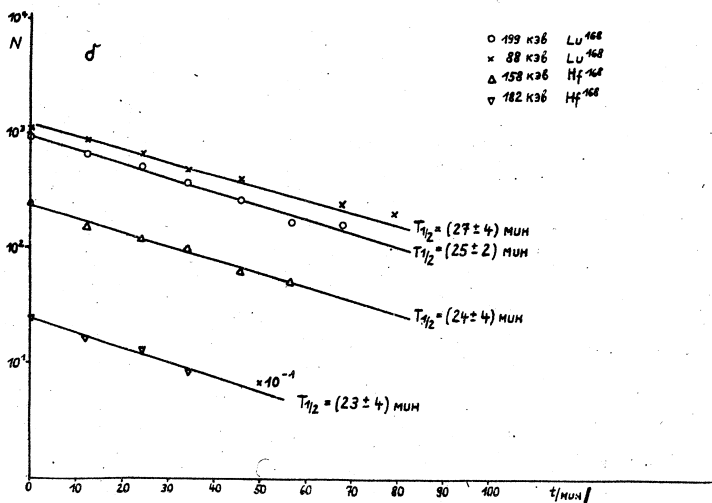
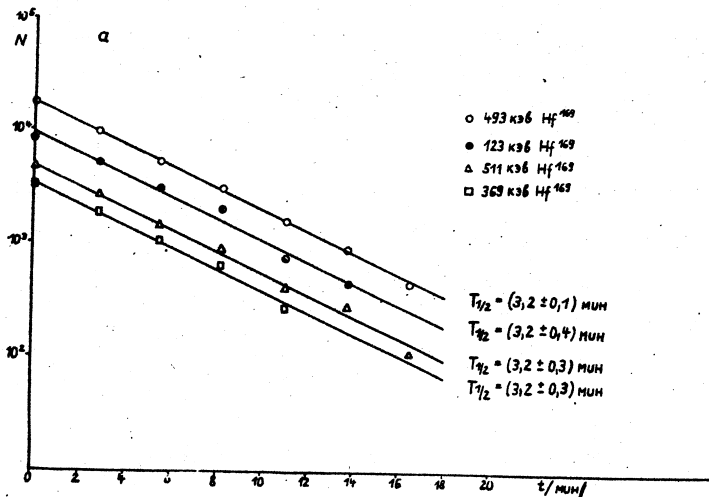


Рис. 3. а) Кривые спада интенсивности гамма-переходов распада изотопа ^{169}Hf с энергиями 123, 369, 493 и 511 кэВ. б) Кривые распада интенсивности гамма-переходов распада ^{168}Hf с энергиями 158 и 182 кэВ и ^{168}Lu с энергиями 88 и 199 кэВ, находящихся в радиоактивном равновесии.

Таблица 1

Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
распада изотопов ^{169}Hf , ^{168}Hf и ^{167}Hf

E_{γ} /кэВ/	I_{γ}	$T_{1/2}$ /мин/	Идентификация
123	7	3,2	^{169}Hf
369	13	3,2	^{169}Hf
493	100	3,2	^{169}Hf
511	27	3,2	^{169}Hf
158	100	25	^{168}Hf
182	130	25	^{168}Hf
316	-	1,8	^{167}Hf

Таблица 2

Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
распада ^{169}Lu

E_{γ} /кэВ/ /4,13/	I_{γ} (наша работа)
166	6
191	62
380	11
891	17
962	100
1376	<18
1451	36

Наконец, нами был измерен β^+ -спектр Hf -фракции, выделенный из Ta -фракции. В β^+ -спектре содержатся две компоненты, короткоживущая из которых относится, судя по периоду полураспада, составляющему $(3,2 \pm 0,1)$ мин, к распаду ^{169}Hf . Граничная энергия этой компоненты β^+ -спектра равна (1850 ± 200) кэВ (рис. 4).

Таблица 3
Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
распада ^{169}Yb

E_{γ} /кэВ/	I_{γ} (наша работа)	I_{γ} /10/
130	39	32
177	62	58
198	100	100
308	30	28

3.2. Цепочка распада с $A = 168$

Примененный метод установления генетической связи изобар позволяет контролировать химический выход, когда период полураспада одного изотопа материнской фракции известен. В нашем случае можно контролировать химический выход лютеция по известному периоду полураспада ^{168}Hf (≈ 25 мин^{1,2/}), изучая спад интенсивности γ -переходов распада ^{168}Lu /15/ с энергией 88 и 199 кэВ в последовательно выделенных препаратах (рис. 5). Определенный нами период полураспада ^{168}Hf непосредственно по спаду интенсивности γ -переходов ^{168}Hf совпадает с полученным и приведенным в литературе значением (рис. 3б).

Первые экспериментальные данные о γ -переходах распада ^{168}Hf приведены в таблице 1.

3.3. Цепочка распада с $A = 167$

В двух опытах с трехминутным временем облучения танталовой мишени выделялась фракция Hf через 4 минуты после конца облучения и измерялся ее γ -спектр на сцинтилляционном γ -спектрометре. При этом наблюдался γ -переход с энергией 310 кэВ, интенсивность которого убывает с периодом полураспада ≈ 2 мин. Для более точной

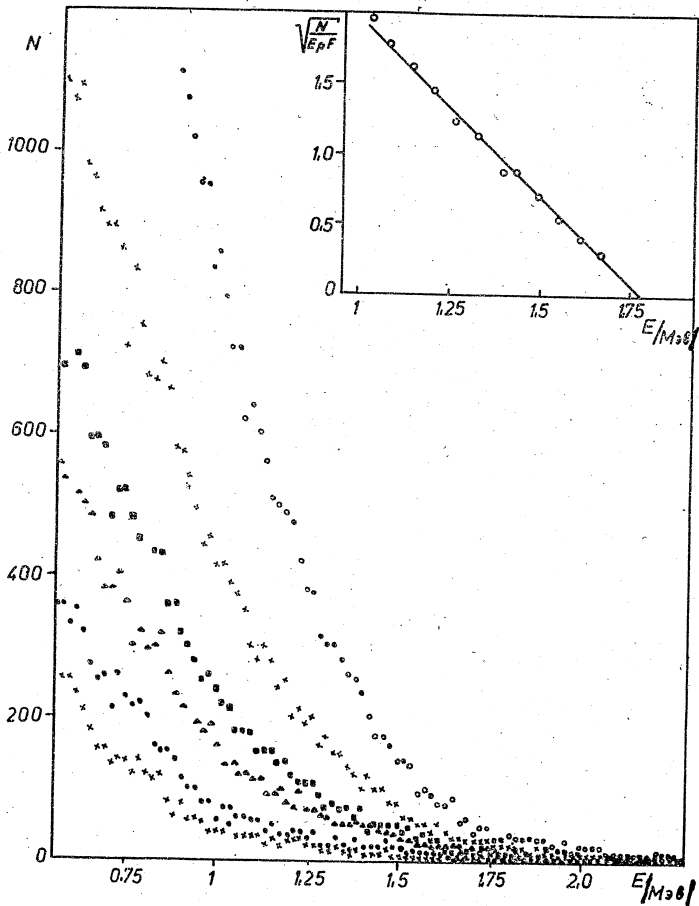


Рис. 4. β^+ -спектр фракции гафния; время измерения 4 мин, интервал между измерениями 4,5 мин; график Ферми-Кюри β^+ -спектра ^{169}Hf .

оценки периода полураспада был применен метод экстраполяции кривых распада дочерних изотопов на момент химического выделения, находящихся в выделенных через равные промежутки накопления источников. Наиболее оптимальными параметрами опыта являлись: время облучения мишени - 3 мин, время накопления 2 мин и выделение 4-х источников Lu. Полученный период полураспада изотопа ^{167}Hf составляет $(1,9 \pm 0,2)$ мин (рис. 6а).

Правильность приписания периода полураспада $(1,9 \pm 0,2)$ мин распада ^{167}Hf проверялась так же, как в случае цепочки распада с $A = 169$, с использованием препаратов гафния, выделенных из танталовой фракции. Спад интенсивности γ -перехода с энергией 318 кэВ во фракции Hf происходит по этим измерениям с периодом полураспада $\approx 1,8$ мин (рис. 6б). Материнским по отношению к этой активности является распад с периодом ~ 3 мин, т.е. распад ^{167}Ta /12/.

Данные о γ -переходах, возникающих при распаде ^{167}Lu и ^{167}Yb , приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4
Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
распада ^{167}Lu

E_{γ} (кэВ) /4/	I_{γ} (наша работа)
213	30
239	100
278	35
318	13
401	24

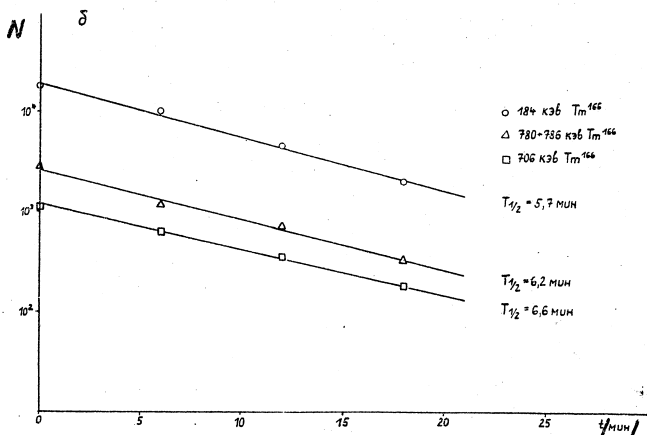
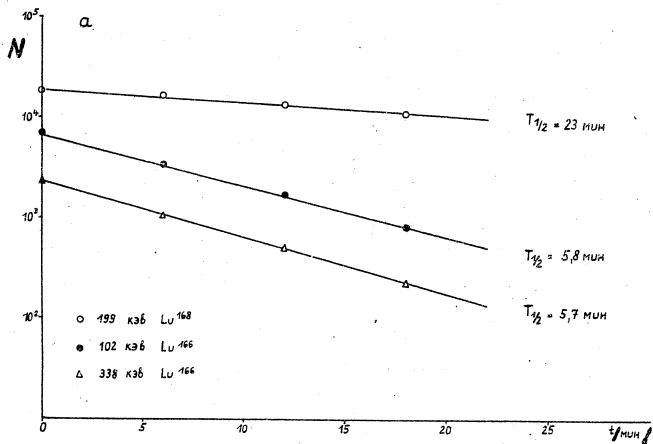


Рис. 5. а) Кривые распада изотопов ^{168}Lu и ^{166}Lu , построенные по убыванию интенсивности гамма-переходов 199 кэВ изотопа ^{168}Lu и 102 и 338 кэВ изотопа ^{166}Lu . б) Кривые распада изотопа ^{166}Tm , построенные по убыванию интенсивности гамма-переходов распада изотопа ^{166}Tm с энергией 184, 706 и 780 + 786 кэВ.

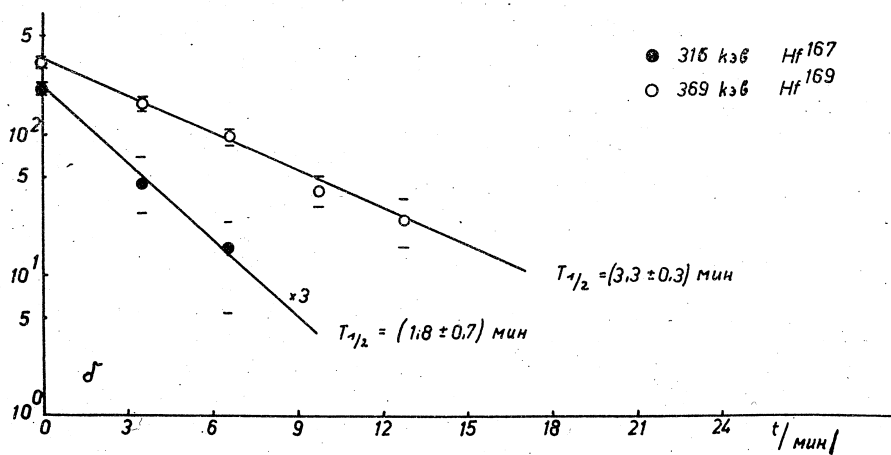
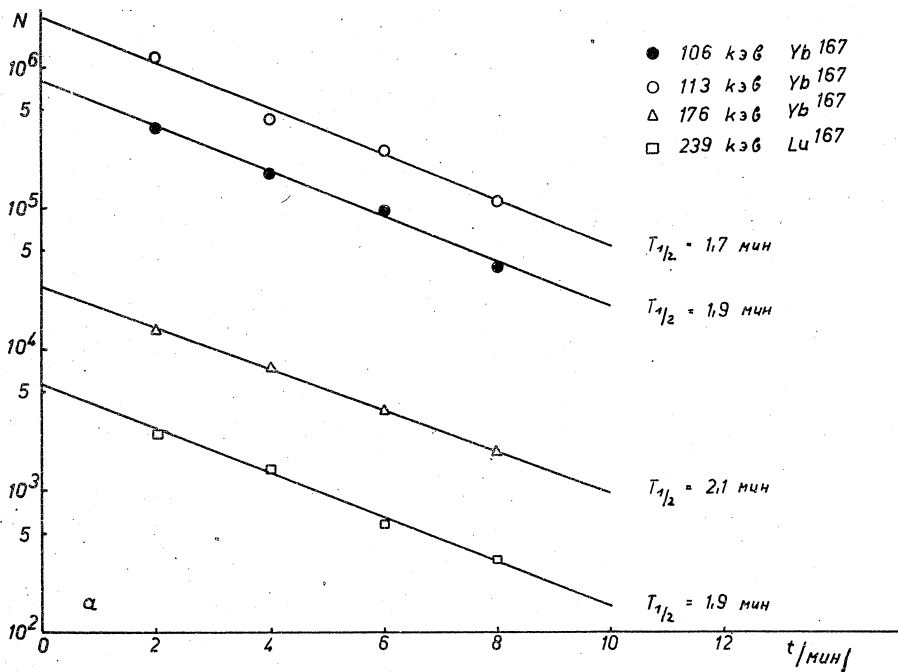


Рис. 6. а) Кривые распада изотопа ^{167}Hf , построенные по убыванию интенсивности гамма-переходов распада ^{167}Yb с энергией 106, 113 и 176 кэВ, а также гамма-перехода распада изотопа ^{167}Lu с энергией 239 кэВ. б) Кривые спада интенсивности гамма-перехода ^{167}Hf с энергией 316 кэВ и гамма-перехода ^{169}Hf с энергией 369 кэВ.

Таблица 5
 Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
 распада ^{167}Yb

E_γ (кэВ) /4,16/	I_γ (наша работа)	I_γ /16/	I_γ /17/
106	150	230	200
113	358	630	290
132	14	18,5	15
142	13	-	11
176	100	100	100

3.4. Цепочка распада с $A = 166$

Наличие изотопа ^{166}Hf во фракции Hf было показано по генетической связи с изотопом ^{166}Tm . Для идентификации был измерен γ -спектр четырех препаратов с дочерними продуктами Lu, выделенными из

Hf -фракции 4 раза подряд в одном опыте через каждые 4 мин после конца облучения, которое составляло в первом случае 10 минут, во втором - 20 минут. Измерения начались спустя 30 часов после конца облучения, т.е. измерялся γ -спектр изотопа ^{166}Tm /18,19,20/. Измерения

γ -спектров проводились на детекторах типа Ge(Li) с чувствительным объемом $4,6 \text{ см}^3$ в случае препаратов от 10-минутных облучений и 10 см^3 - от 20-минутных облучений.

Результаты измерений γ -спектров даны в таблице 6. Все найденные нами в этих измерениях γ -переходы известны /18,19,20/. По убыванию интенсивности γ -переходов ^{166}Tm с энергией 184, 215, 672 ± 674, 691, 706, 780 ± 786 и 2052 кэВ мы определили период полураспада изотопа ^{166}Hf , экстраполируя эти кривые убывания на момент выделения продуктов распада Lu (рис. 5б). Он составляет $(6,0 \pm 0,5)$ мин.

Для идентификации изотопа ^{166}Lu по генетической связи с материнским изотопом ^{166}Hf были измерены γ -спектры (рис. 7) сразу же после быстрого выделения четырех препаратов Lu, полученных из очи-

Таблица 6

Энергии и относительные интенсивности γ -переходов
распада ^{166}Tm

E_γ (кэВ)	I_γ (наша работа)	I_γ /18/	I_γ /19/	I_γ /20/
184	58	-	-	58
215	18	-	-	19
460	20	-	-	10
595 } 599 }	16	13	-	-
672 } 674 }	31	12	43	30
691	27	24	-	25
706	39	37	48	39
708 } 787 }	100	100	100	100
876	24	15	-	12
1178	<37	29	31	28
1275	56	58	52	46
1376	17	19	19	20
1867	23	14	11	11
2054	63	63	47	47
2081	16	22	-	17

шенной Hf -фракции после 6-минутных интервалов накопления. Определенный по интенсивности γ -переходов с энергией 102,228 и 338 кэВ в этих препаратах период полураспада материнского изотопа Hf составляет $(5,8 \pm 0,2)$ мин (рис. 5а). Это значение совпадает в пределах погрешностей со значением периода полураспада изотопа ^{166}Hf . Спад интенсивностей гамма-переходов с энергией 102, 228, и 338 кэВ равен $(3,3 \pm 0,2)$ мин (рис. 8).

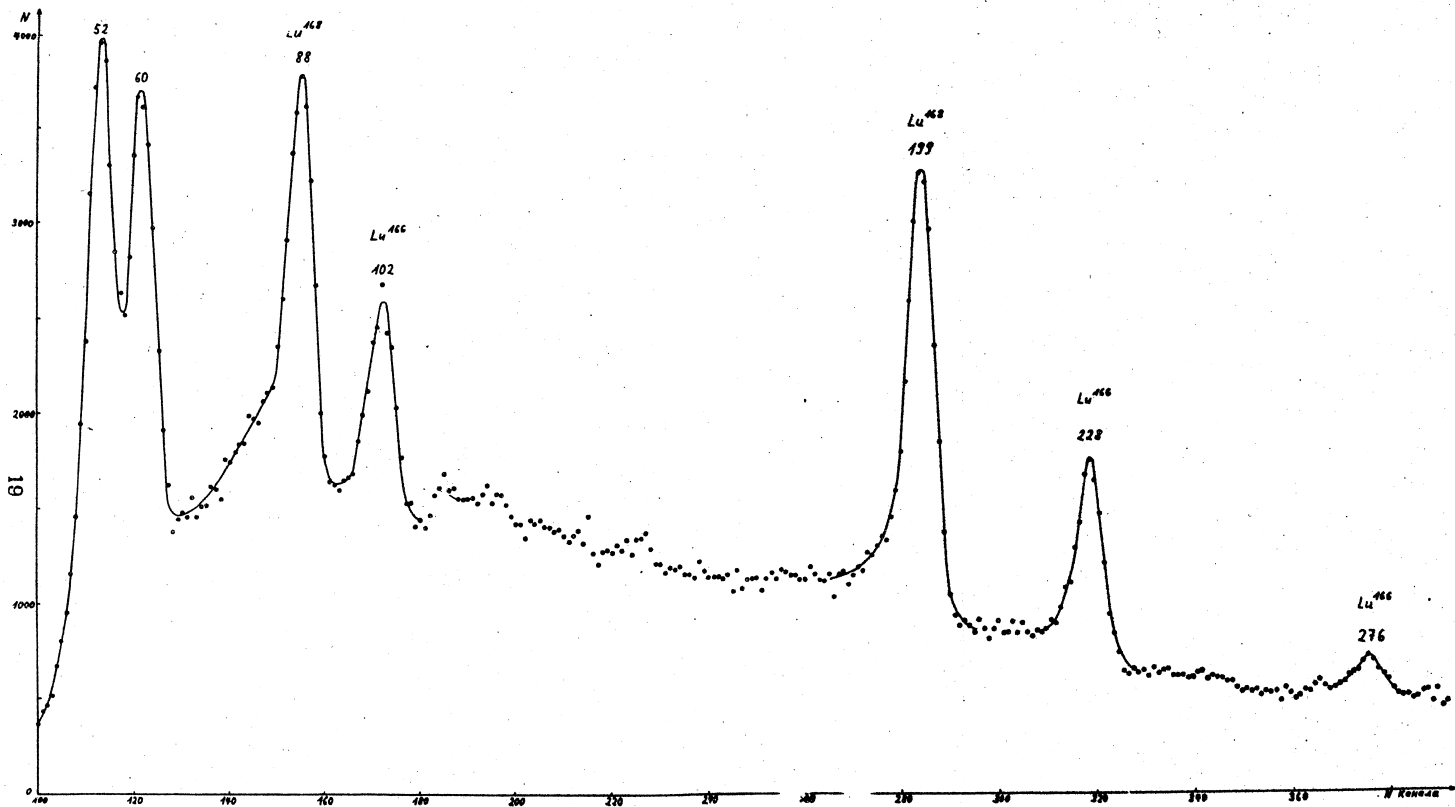


Рис. 7. Гамма-спектр дочернего Lu в области энергий от 40 до 290 кэв, измеренный сразу же после выделения из Hf (накопление 6 мин) с помощью детектора типа Ge(Li) с чувствительным объемом 10 см³.

Активность, убывающая с $T_{1/2} = (3,3 \pm 0,2)$ мин, является дочерней по отношению к активности с $T_{1/2} = (5,8 \pm 0,2)$ мин, т.е. к распаду изотопа ^{166}Hf . Поэтому можно предполагать, что она принадлежит к распаду изотопа ^{166}Lu . Это предположение подтверждается также тем фактом, что гамма-переходы с энергией 102, 228, 338 и 428 кэВ, наблюдавшиеся нами (табл. 7), разряжают ротационные уровни изотопа ^{166}Yb при 102 кэВ (2^+), 330 кэВ (4^+), 669 кэВ (6^+) и 1096 кэВ, возбуждаемые в реакции $^{159}\text{Tb}(^{11}\text{B}, 4\text{ n})^{166}\text{Yb}$ /21/. Для решения вопроса о заселенности

Таблица 7

Энергия и интенсивности гамма-переходов, возникающих при распаде ^{166}Lu .

E_{γ} (кэВ)	I_{γ}
102 ± 1	60
228 ± 1	100
276 ± 1	25
338 ± 1	60
369 ± 1	41
(429)	5
511	≈ 230
(629)	11
(812)	18
(831)	17
(958)	15
(1028)	15
(1293)	-

этих уровней при бета-распаде ^{166}Lu нами были измерены гамма-гамма-совпадения перехода с энергией 102 кэВ с остальным гамма-спектром. При этом наблюдаются совпадения с гамма-переходом 228 кэВ и с аннигиляционным излучением ($I_{\gamma 511} : I_{\gamma 228}$ совп. ≈ 1:0,9). Совпадения с гамма-переходами с энергиями 338 и 428 кэВ мы не могли измерить из-за условий опыта.

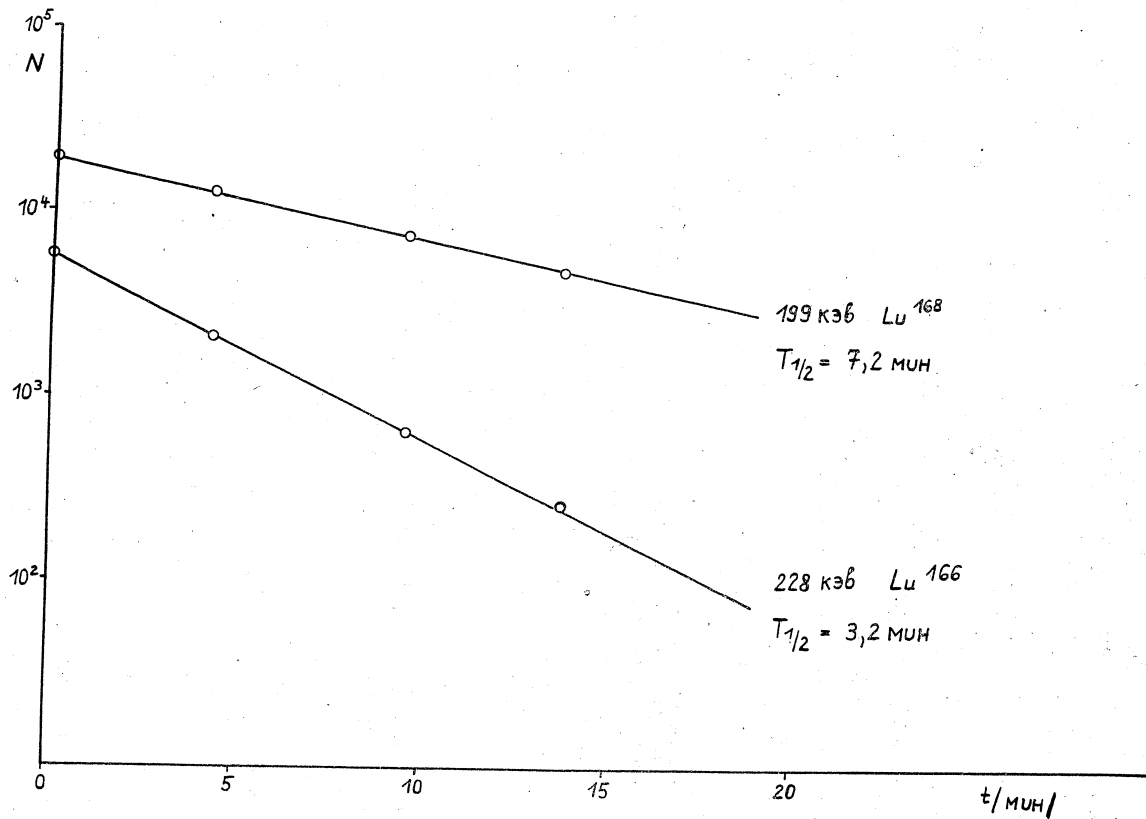


Рис. 8. Кривые спада интенсивности гамма-переходов изотопов ^{168}Lu и ^{166}Lu с энергиями 199 и 228 кэв, соответственно.

Интересно заметить, что в препаратах, выделенных из танталовой фракции, гамма-переходы из цепочки с $A = 166$ не наблюдались, что позволяет оценить верхний предел периода полураспада ^{166}Ta : $T_{1/2} \lesssim 1$ мин.

4. Обсуждение результатов и выводы

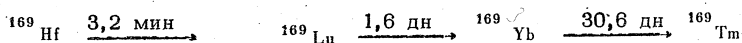
Относительно цепочки распада с массовым числом $A > 169$ результаты наших опытов доказывают, что период полураспада изотопа ^{169}Hf не 1,5 часа (такой активности мы вообще не наблюдали), а меньше 8 минут: $T_{1/2} = (3,2 \pm 0,1)$ мин, т.е. соответствует оценке, сделанной в работе ^{/2/}. Значение периода полураспада изотопа ^{168}Hf , полученное в работах ^{/1,2/}, также подтверждается нашими измерениями:

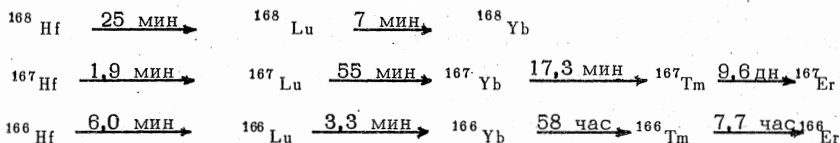
$$T_{1/2} = (25 \pm 2) \text{ мин.}$$

Наши результаты по изучению цепочки распада с $A=167$ показывают, что авторы работы ^{/1/} не наблюдали указанные ими изотопы ^{167}Hf и ^{167}Lu . Иначе они должны были наблюдать активность, убывающую с периодом полураспада 55 мин, т.е. распад ^{167}Lu ^{/4/}. Из сравнения наших данных и данных работы ^{/1/} можно сделать вывод, что авторы работы ^{/1/} наблюдали распад изобар с $A = 166$ вместо предполагаемого ими распада изобар с $A = 167$. Тогда найденная ими активность, убывающая с периодом полураспада 20 мин, возможно, относится к распаду изомерного состояния ^{166m}Yb ($T_{1/2} = 18$ мин) ^{/22/}.

На основании анализа генетической связи с изобарами ^{166}Hf и ^{166}Yb мы предполагаем, что активность в Lu-фракции, убывающая с периодом полураспада $(3,3 \pm 0,2)$ мин, относится в изотопу ^{166}Lu . Такой вывод оправдывается анализом γ -спектра, ибо возникающие γ -переходы с энергией 102, 228, 338, и 428 кэВ были найдены также при разрядке ротационных уровней изотопа ^{166}Yb , полученного в реакции $^{159}\text{Tm} (n, 4n) ^{166}\text{Yb}$ ^{/21/}.

Цепочки распада короткоживущих изотопов гафния имеют (с учётом наших результатов) следующий вид:





На основании полученных экспериментальных данных можно предложить схему распада ${}^{169}\text{Hf}$ (рис. 8). При построении этой схемы нами учитывались балансы энергий и интенсивностей. Значение отношения K/β^+ , взятое из теоретических расчётов для разрешенных переходов $^{10/}$, составляет $\sim 3,5$, что в пределах ошибок совпадает с отношением интенсивностей между γ -переходами с $E_\gamma = 369-493$ кэв и γ -переходом с $E_\gamma = 511$ кэв. Поэтому можно предполагать, что почти весь бета-распад ${}^{169}\text{Hf}$ направлен на уровень с энергией 493 кэв. Это предположение хорошо совпадает с теоретическим значением полной энергии β^+ -распада $Q_{\beta^+} = 3556$ кэв $^{23/}$. Как известно $^{24/}$, основное состояние ${}^{169}\text{Lu}$ имеет квантовые характеристики $7/2^+ / 404/$. Уровень с энергией 123 кэв можно интерпретировать как первое ротационное состояние основной полосы. Этот вывод подтверждается полученным для параметра $\hbar^2/2J$ значением, равным 13,7 кэв (таблица 8). Значение величины $\log ft$ для распада

Таблица 8
Значение параметра $\hbar^2/2J$ нечётных изотопов в Lu

Ядро	$7/2^+ / 404/$
${}^{169}\text{Lu}$	13,7 кэв
${}^{171}\text{Lu}$	13,6 кэв
${}^{173}\text{Lu}$	-
${}^{175}\text{Lu}$	12,6 кэв
${}^{177}\text{Lu}$	13,5 кэв

на уровень при 493 кэв составляет 4,5, что свидетельствует о незадержанном разрешенном переходе. В районе деформированных ядер с $N = 97$ возможен такой переход только между нильссоновскими состояниями $5/2^- [523] \rightarrow 7/2^- [523]$. Уровень с энергией 493 кэв имеет, таким

образом, квантовые характеристики $7/2^- [523]$, и гамма-переходы с энергиями 493 и 369 кэВ должны быть типа $E1$ с $\Delta K = 0$. Для проверки квантовых характеристик уровня с энергией 493 кэВ мы сопоставили экспериментальные отношения приведенных интенсивностей гамма-переходов $\eta = B(E1, I_i K_i \rightarrow I_F + 1, K_F) / B(E1, I_i K_i \rightarrow I_F K_F)$ с отношениями, полученными по правилам Алага (см. табл. 9). Хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений η подтверждает сделанный вывод о квантовых характеристиках уровня при 493 кэВ ($7/2^- [523]$) и, таким образом, основного состояния ^{169}Lu ($5/2^- [523]$). Кроме того, это хорошее согласие означает, что влияние взаимодействий между вращательными и частичными движениями на отношение приведенных вероятностей достаточно мало.

Таблица 9

Экспериментальные и теоретические отношения приведенных

интенсивностей гамма-переходов типа $E1, \Delta K = 0$

$$\eta = \frac{B(E1, I_i K_i \rightarrow I_F + 1 K_F)}{B(E1, I_i K_i \rightarrow I_F K_F)}$$

между нильссоновскими состояниями $7/2^- [523] \rightarrow 5/2^- [523]$

Ядро	I_i	η эксп.	η теор.
^{163}Ho	7/2	0,17	0,29
^{165}Ho	7/2	0,27	0,29
^{169}Lu	7/2	0,32	0,29

Сделанный вывод хорошо вписывается в систематику этих нильссоновских состояний для распада нечётных изотопов с $N = 97$ (рис. 9).

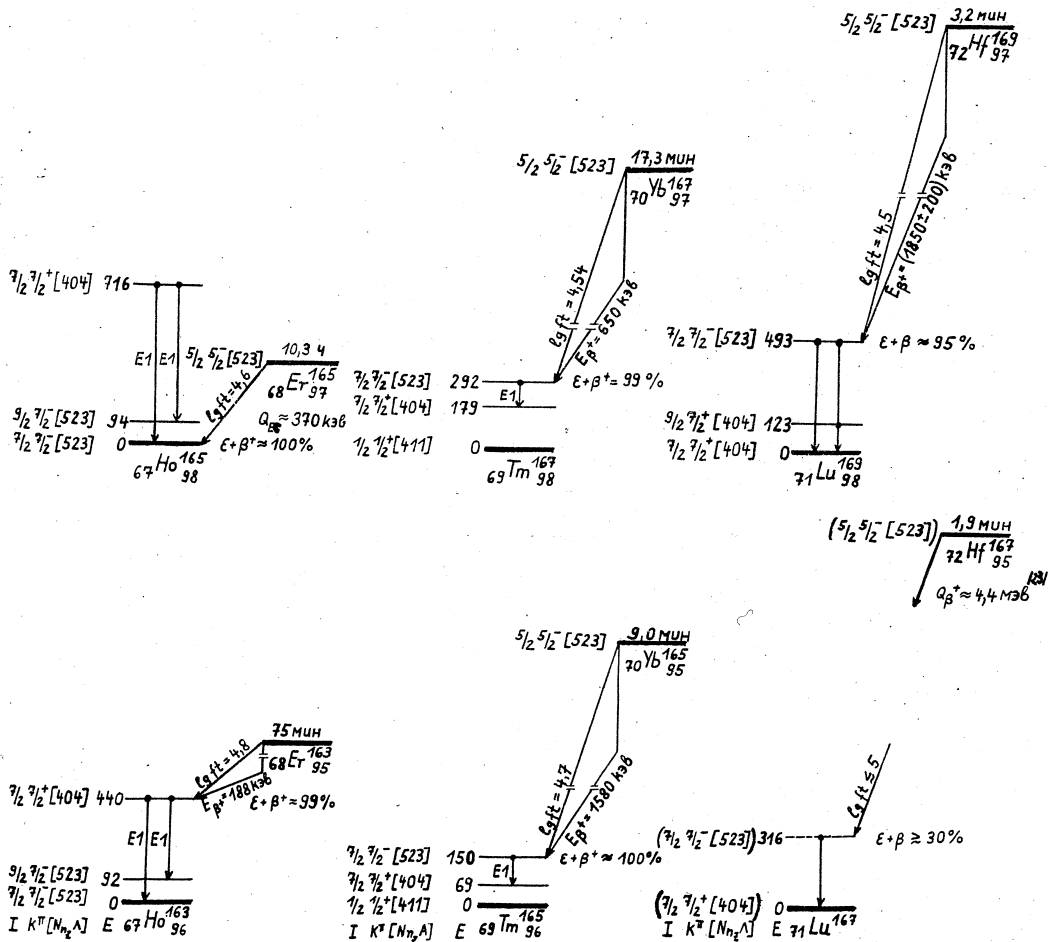


Рис. 9. Фрагменты схем распада изотопов с $N = 97$ и $N = 95$ для Hf, Yb и Er.

Из систематики нильссоновских состояний в нечётных изотопах с $N = 95$ (рис. 9) можно сделать заключение о квантовых характеристиках основного состояния ^{167}Hf и возбужденного состояния ^{167}Lu , на которое направлена основная часть β^+ -распадов ^{167}Hf . Гамма-переход с энергией 316 кэВ — единственный и причём очень интенсивный переход, относящийся к распаду ^{167}Hf . Он может разряжать возбужденный уровень ^{167}Lu с такой энергией. Значение величины $\log ft$ для бета-распада на такой уровень ≤ 5 , что указывает на незадержанный разрешенный переход.

В согласии с характеристиками состояний в соседних изотопах можно ожидать для основного состояния ^{167}Hf характеристики $5/2^- [523]$ и для возбужденного состояния при 316 кэВ — $7/2^- [523]$.

Некоторые выводы можно также сделать о найденном в этой работе распаде ^{166}Lu , при котором заселяются состояния основной ротационной полосы ^{166}Yb вплоть до значения спина 6 или 8. Отсюда следует, что спин состояния, распадающегося с периодом полураспада $(3,3 \pm 0,2)$ мин, должен быть ≥ 4 . Судя по балансу интенсивностей гамма-переходов и результатам измерения гамма-гамма-совпадений, нельзя, однако, исключить возможность того, что часть β^+ -распада ^{166}Lu направлена на уровни при 102 кэВ (2^+) или 330 кэВ (4^+). Для заселения этих уровней спин исходного состояния должен иметь достаточно низкое значение. При высоком значении спина распад запрещается также по квантовому числу K на эти состояния с $K = 0$. Поэтому можно предполагать ^{/11/}, что активность ^{166}Lu , распадающаяся с периодом полураспада $(3,3 \pm 0,2)$ мин, относится к изомерному состоянию этого ядра. Для решения этого вопроса необходимо проведение дополнительных измерений.

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить И.Звольского за предоставление гамма-спектрометра с $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором с чувствительным объемом $4,6 \text{ см}^3$, А.Н.Синаева — за техническую помощь на различных этапах экспериментов, а также К.Ф.Александера и К.Я.Громова за интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

1. E.R.Merz, A.A.Caretto. Phys. Rev., 122, 1558 (1961).
2. B.Harmatz, T.H.Handley. Nucl. Phys., 81, 481 (1966).
3. R.G. Wilson, M.L.Pool. Phys. Rev., 118, 227 (1960).
4. Б.С.Джелелов, Л.К.Пекер, В.О.Сергеев. Схемы распада радиоактивных ядер $A > 100$. Москва, 1963.
5. Р.Арльт, Б.Быстров, Г.Музиоль, П.Пфреппер, Х.Штрусный. Препринт ОИЯИ, 13-3922, Дубна 1968.
6. З.Малек, Г.Пфреппер. Препринт ОИЯИ 12-4013, Дубна 1968.
7. В.М.Вдовенко, Л.К.Лазарев, Я.С.Хворостин. Радиохимия 1, 364 (1959).
8. А.И.Бусев, В.Г.Типцова, В.М.Иванов. "Практическое руководство по аналитической химии редких элементов" Москва 1966, стр. 393.
9. Р.Арльт, С.Кадыкова, А.Калинин, В.Моисеева, Г.Музиоль, М.Омельяненко, Ю.Прокофьев, Б.Семенов, А.Синаев, Н.Чистов, Х.Штрусный. Г.Эльснер. Препринт ОИЯИ Р6-3773, Дубна 1968.
10. C.M.Lederer, J.M.Hollander, I.Perlman. Table of Isotopes, New York 1967.
11. R.Arlt, Z.Malek, G.Musiol, G.Pfreppeper, H.Strusny. International Symposium on Nuclear Structure Contributions, Dubna 1968, D-3893 p.41.
12. Р. Арльт, З.Малек, Г.Музиоль, Х.Штрусный. Препринт ОИЯИ, Р6-4234, Дубна 1968.
13. Н.А.Бонч-Осмоловская, Я.Врзал, Е.П.Григорьев, Н.Г.Зайцева, Я.Липтак, В.Г.Тишин, Я.Урбанец. Препринт ОИЯИ Р6-3452, Дубна, 1967.
14. Т.Кушарова, В.Звольска, М.Вейс. Материалы 8-го совещания по ядерной спектроскопии нейтронодефицитных изотопов, изомерии ядер и теории ядра. Дубна, 6 июля 1965.
15. R.Arlt, Z.Malek, G.Musiol, G.Pfreppeper, H.Strusny. International Symposium on Nuclear Structure - Contributions, Dubna 1968, D-3893 p.40.
16. К.Я.Громов, А.С.Динагулян, А.Т.Стригачев, В.С.Шпинель. Ядерная физика, т. 1, вып. 3, 384 (1965).

17. P.Paris, Journal de Physique 28 (1967) 388.
18. П.Бедросян, Я.Врзал, Я.Липтак, Ф.Молнар, В.А.Морозов, Я.Урбанец. Программа и тезисы докладов XVI ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Москва, 26 января - 3 февраля 1966 г.
19. Н.А.Бонч-Осмоловская, Б.С.Джелепов, Программа и тезисы докладов XVI ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра. Москва, 26 января - 3 февраля 1966 г.
20. J.Żylicz, M.H.Jorgensen, O.B.Nielsen, O.Skilbreid. Nucl. Phys., 81, 88 (1966).
21. F.S.Stephens, N.L.Lark, R.M.Diamond. Nucl. Phys., 63, 82 (1965).
22. Р.Арлт, Ж.Желев, В.Г.Калинико́в, З.Малек, Г.Музиоль, Н.Ненов, Г.Пфреппер, З.Усманова, Х.Штрусный. Программа и тезисы докладов XVIII ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Рига, 25 января - 2 февраля 1968 г.
23. N.Zeldes, A.Grill, A.Simievic. Mat. Fys. Skr. Dan. Vid. Selsk. 3 no 5, (1967).
24. В.Harmatz, Т.H.Handley and J.W.Mihelich Phys. Rev., 119, 1345 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
29 декабря 1968 года.