

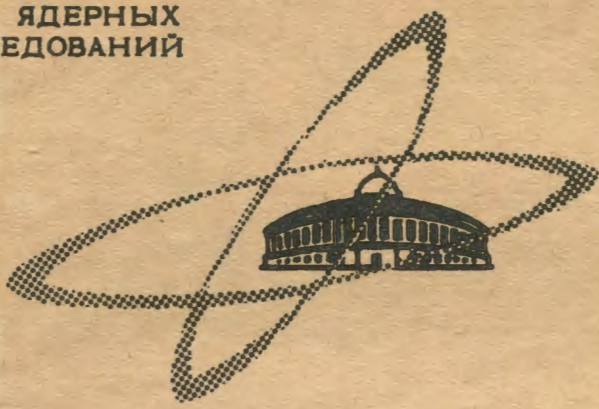
С 341.19
Г-512

Изв. АН СССР сер. физ. 1969,
i.33 №10, с.1622-1630

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

Р6 - 4452



Н.А.Головков, Ш.Гузтх, Б.С.Джелепов,
Ю.В.Норсеев, В.А.Халкин, В.Г.Чумин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АЛЬФА-СПЕКТРОВ

ИЗОТОПОВ	209 At, 85	210 At, 85	211 At, 85	211 Po 84
----------	---------------	---------------	---------------	--------------

1969

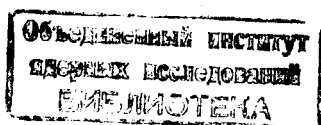
P6 - 4452

Н.А.Головков, Ш.Гузтх, Б.С.Джелепов,
Ю.В.Норсеев, В.А.Халкин, В.Г.Чумин

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АЛЬФА-СПЕКТРОВ

ИЗОТОПОВ $^{209}_{85}\text{At}$, $^{210}_{85}\text{At}$, $^{211}_{85}\text{At}$, $^{211}_{84}\text{Po}$

Направлено в Известия АН СССР



7844/1 ир.

Указанные изотопы находятся вблизи ^{208}Pb - "дважды магического ядра", имеющего 82 протона и 126 нейтронов. Все они распадаются либо с испусканием альфа-частиц, либо с захватом орбитальных электронов и испусканием нейтрино. У ^{209}At и ^{211}At были известны только основные альфа-переходы /1/, у ^{210}At и ^{211}Po наблюдались также и альфа-группы тонкой структуры /2,3/. Цель настоящей работы - поиски новых групп тонкой структуры α -спектров ^{209}At , ^{210}At , ^{211}At и ^{211}Po .

Методика исследования

Изотопы ^{209}At , ^{210}At и ^{211}At получались в реакциях глубокого расщепления тория (от 0,5 до 5,5 г) протонами с энергией 660 Мэв на внутреннем пучке синхротриклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ; облучение продолжалось от 0,5 до 4 часов. Выделение астата из облученной ториевой мишени проводилось через 7-15 часов после конца облучения по химической методике, изложенной в работе /4/. Изотоп ^{211}Po ($T_{1/2} = 0,56$ сек) получался в источнике при распаде ^{211}At ($T_{1/2} = 7,2$ часа, $\epsilon = 59\%$) и находился в равновесии с материнским изотопом. Альфа-спектрометрические источники приготавливались на

основе самопроизвольного осаждения астата из азотнокислого раствора на отполированную поверхность платины ^{15/}. Платиновая пластинка имела размеры (3+4) x (24+35) мм². Активность источников составляла 10⁵-10⁶ а -расп/сек. В источнике, помимо указанных изотопов, присутствовали продукты их распада - изотопы полония и висмута.

Исследование тонкой структуры альфа-спектров было выполнено на магнитном альфа-спектрографе, описанном в работе ^{16/}. Для калибровки спектрографа по энергии использовалась альфа-группа изотопа ²¹⁰Po (E₀ = 5304,5 ± 0,5 кэв, Вρ = 331772 ± 12 гс·см^{17/}), находившегося в том же источнике. Калибровка в каждой серии измерений повторялась, снималось от 3 до 12 калибровочных точек. Всего были измерены α - спектры шести источников. С каждым источником делалась серия экспозиций; общее время экспозиций составило 187 часов. Измерения выполнялись в энергетическом диапазоне альфа-частиц от 4,75 до 7,46 Мэв.

Результаты измерений

На рис. 1-3 показаны участки альфа-спектра; по оси абсцисс отложена энергия альфа-частиц, по оси ординат - число альфа-треков на фотопластинке в полоске шириной 0,4 мм и длиной 50 мм; вертикальные пунктирные линии означают края промеренных участков фотопластинки.

В серии, изображенной на рис. 1в, снятой через 75 дней после облучения, видны только α - группы ²⁰⁹Po(α₀), ²⁰⁸Po(α₀) и ²¹⁰Po(α₀). При более ранних экспозициях (рис. 1а и 1б) видны, кроме того, α - группы ²⁰⁹At(α₅₄₁), ²¹⁰At(α₃₉₈), ²¹¹At(α₇₄₃ и α₆₇₀). Слабые линии намечаются при энергиях 4780, 5013, 5030, 5223, 5243 и 5270 кэв, но идентифицировать их мы пока не можем.

На рис. 2 видны альфа-группы ²⁰⁷At(α₀) ; ²⁰⁹At(α₀) ; ²¹¹At(α₀) ²¹⁰At(α₀, α₆₀, α₈₃, α₁₄₀, α₁₈₇) ; ²¹⁰Po(α₀) ; в районе 5,10-5,25 Мэв пов-

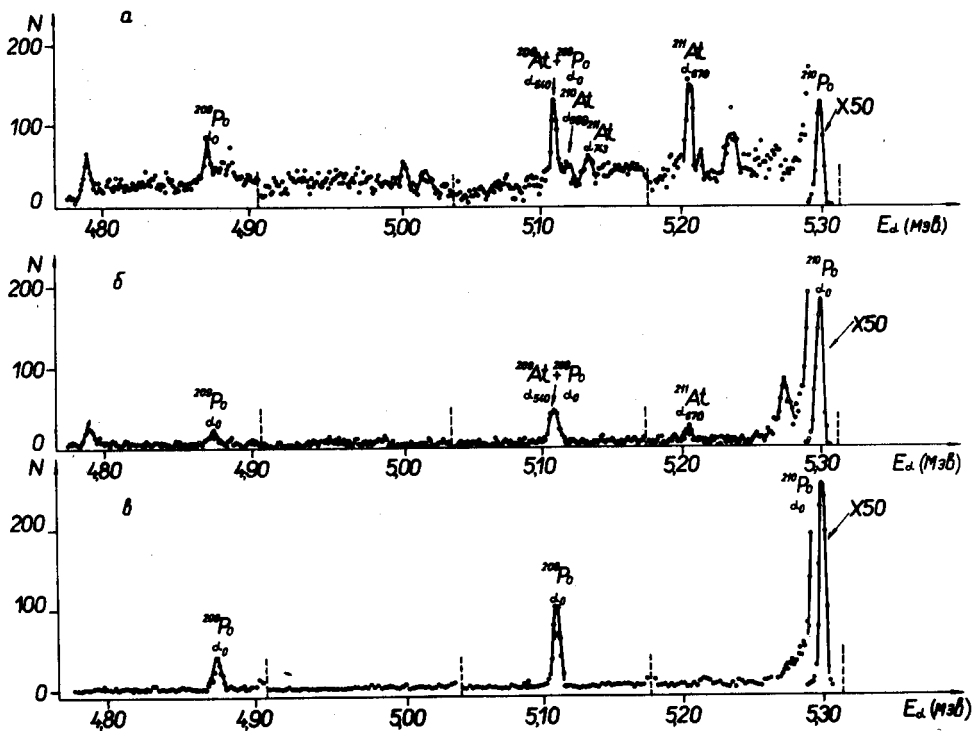


Рис.1. Участок альфа-спектра, снятый в разное время в диапазоне энергий 4,78–5,31 Мэв (источник один и тот же). а). Спектр снят через 12 часов после конца облучения, время экспозиции ($T_{\text{эксп.}}$) 8 часов, при телесном угле (Ω) 8×10^{-4} от 4π . б). Спектр снят через 29,5 часов после конца облучения; $T_{\text{эксп.}} = 8$ час., $\Omega = 8 \times 10^{-4}$ от 4π . в). Спектр снят через 75 дней после конца облучения; $T_{\text{эксп.}} = 30$ час., $\Omega = 4 \times 10^{-4}$ от 4π .

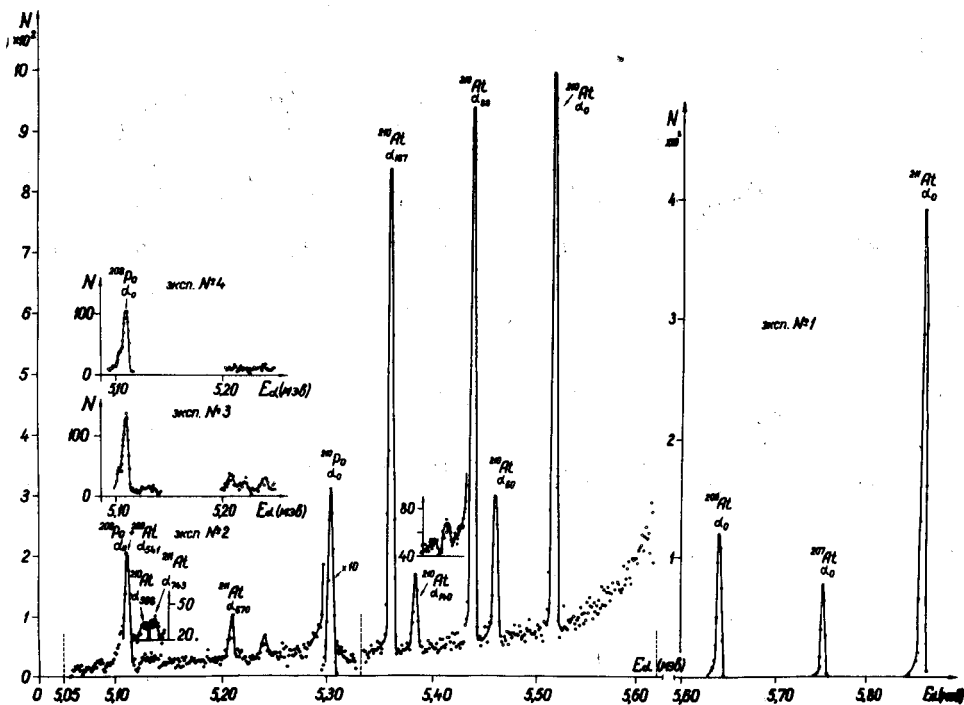


Рис.2. Участок альфа-спектра в диапазоне энергии 5,05-5,90 Мэв, снятый с одним и тем же источником. Экспозиция №1 сделана через 7 час.10 мин. после конца облучения в течение 5 мин. Время экспозиций №2,3,4 - 8 часов; на них видны распад альфа-групп ^{211}At (α_{870} , α_{748}), ^{210}At (α_{898}) и ^{209}At (α_{541}) во времени. Начало экспозиций № 2,3,4 соответственно через 19 мин, 8ч. 54 мин. и 16 ч. 56 мин после окончания эксп. №1. У всех экспозиций $\Omega = 4 \times 10^{-8}$ от 4π.

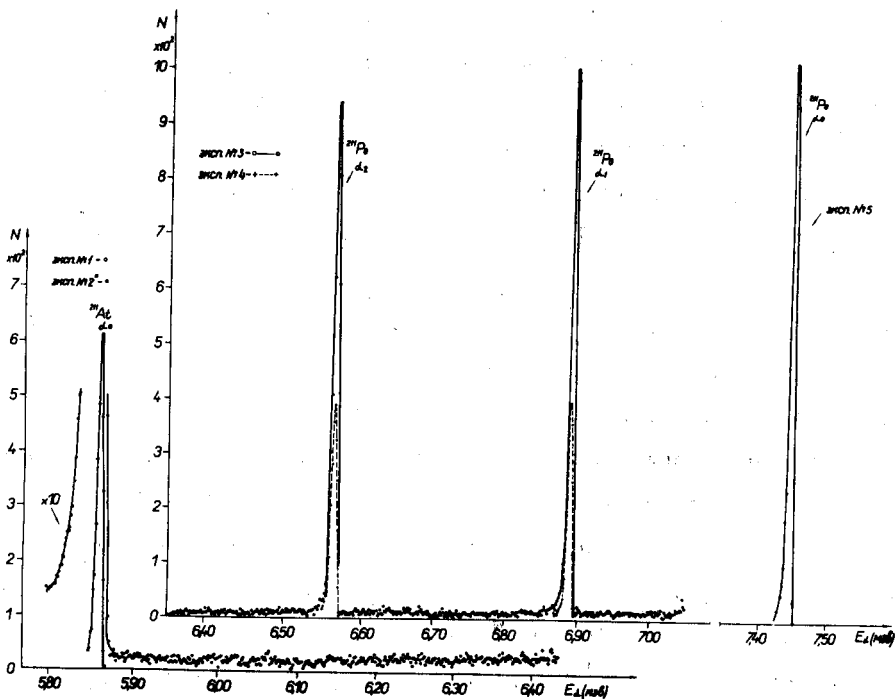


Рис.3. Участок альфа-спектра от 5,80 до 7,00 Мэв и основная альфа-группа ^{211}Po (0,56 сек). Экспозиция № 1,3,4 делались по 8 часов (эксп. №2, идентичная эксп. №1, на рис. не указана); они начинались соответственно через 16 час, 32 час, 18 мин. и 41 час, 14 мин. после конца облучения. Альфа-группы $^{211}\text{At}(\alpha_0)$ и $^{211}\text{Po}(\alpha_0)$ снимались в коротких экспозициях: времена экспозиций 10 и 15 мин., через 52 часа 14 мин. и 53 часа 10 мин после конца облучения. Эксп. №3-4 показывают распад альфа-групп $^{211}\text{Po}(\alpha_1, \alpha_2)$ во времени. Во всех экспозициях источник и телесный угол один и тот же ($\Omega = 4 \times 10^{-4}$ от 4π).

торяются те же альфа-линии, что и на рис. 1а. Между линиями изотопа ^{210}At α_{83} и α_{140} видны две слабые не идентифицированные альфа-группы с энергиями 5400 и 5418 кэв.

На рис. 3 показаны альфа-группы тонкой структуры ^{211}Po (0,56сек) и α -группа α_0 ^{211}At .

Энергии альфа-групп и периоды спадания их интенсивностей приведены в таблице 1. Идентификация большинства групп осуществлялась путем сопоставления энергии и периода полураспада альфа-групп с литературными данными. При определении погрешности энергии альфа-частиц учтены статическая погрешность измерений, точность калибровки и погрешность энергии калибровочной альфа-группы.

В таблице 2 приведены данные об альфа-группах изотопов ^{209}At , ^{210}At , ^{211}At и ^{211}Po . Для энергии возбужденных состояний дочерних ядер указаны литературные значения, за исключением уровня 541кэв ^{205}Bi и уровня 140 кэв ^{206}Bi , которые впервые предлагаются в данной работе; для них указаны значения, вытекающие из α -спектра. Для относительных интенсивностей альфа-групп каждого изотопа даны средние значения, полученные по разным сериям измерений. Парциальные периоды полураспада альфа-групп определены по относительным интенсивностям, полученным в настоящей работе, с использованием данных /1,8/ о периодах полураспада и долях альфа-распада. Доля альфа-распада изотопа ^{210}At определена по интенсивности альфа-распада дочернего изотопа ^{210}Po ; из трех серий измерений получено значение $(0,175 \pm 0,020) \%$.

Коэффициенты запрета (F) альфа-переходов рассчитаны по формуле Таагепера и Нурмия /9/.

ТАБЛИЦА I
Идентификация альфа-групп, присутствующих в альфа-спектре

№ пп	Данная работа		Данные других работ		Идентификация
	Е _α (кэВ)	T _{1/2}	Е _α (кэВ)	T _{1/2}	
I.	7450 ± 3	7,1 ± 0,2 ч	7448,0 ± 1,9 /7/	} 7,2I * ч /I/	2II _{Po} α ₀
2.	6892,5 ± 2,5	7,0 ± 0,3 "	6890,7 ± 2,5 /14/		" α ₁
3.	6570,0 ± 2,5	7,0 ± 0,3 "	6569 /17/		" α ₂
4.	5866 ± 2	7,2 ± 0,2 "	5868 ± 3 /7/	7,2I " /I/	2II _{At} α ₀
5.	5759 ± 3	2 "	5756 ± 8 /7/	106 мин /8/	207 _{At} α ₀
6.	5647 ± 2	5,2 ± 0,3 "	5648 ± 4 /7/	5,4I ч /8/	209 _{At} α ₀
7.	5524,0 ± 1,5	7,9 ± 0,5 "	5526 /17/	8,3 ч. /I/	210 _{At} α ₀
8.	5465,0 ± 1,5	7,7 ± 0,6 "	-	-	" α ₁
9.	5442,0 ± 1,5	7,5 ± 0,6 "	5444 /17/	8,3 " /I/	" α ₂
10.	5386 ± 1	8,3 ± 0,6 "	-	-	" α ₃
11.	5377 ± 1	4,7	5379 ± 4 /16/	3,5 " /16/	204 _{Po} α ₀ * *
12.	5361 ± 1	8,1 ± 0,5 "	5362 /17/	8,3 " /I/	210 _{At} α ₁
13.	-	большой	5304,5 ± 0,5 /7/	138,4д /I/	210 _{Po} α ₀ калибр.
14.	5223 ± 1,5	-	5224 ± 5 /16/	8,8 д /I/	206 _{Po} α ₀ * *
15.	5210 ± 1,5	7,1 ± 0,6 "	-	-	211 _{At} α ₁
16.	5141 ± 2	} 7,9 ± 1,5 "	-	-	" α ₂
17.	5131 ± 2		-	-	" α ₅
18.	5116 ± 2	5,4 ± 0,5 " + большой	5118 ± 5 /16/	-	210 _{At} α ₅
19.	4883 ± 3	большой	4883 ± 8 /7/	103 г. /I/	209 _{At} α ₁ , 208 _{Po} α ₀ 209 _{Po} α ₀

* - в равновесии с 211_{At}

** - Эти линии не видны на приведенных рисунках, но они проявились при наиболее благоприятных для них экспозициях.

ТАБЛИЦА 2

Данные об альфа-группах изотопов ^{209}At , ^{210}At , ^{211}At и ^{211}Po

Альфа-излучатель		Энергия альфа-групп (кэВ)	Энергия сост. дочерн. ядра (кэВ)	Относительная интенсивность альфа-групп		Парциальный период альфа-групп (час)	Коэффициент запрет F
Изотоп	α -группы			Данной работы	Литер. данных		
^{209}At	α_0	5647 ± 2	0	100	100 /3/	$(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$3,2 \pm 5$ 45 ± 30
	α_1	5116 ± 2	541 ± 3	$0,10 \pm 0,05$	-	$(1 \pm 0,7) \cdot 10^5$	
^{210}At	α_0	$5524,0 \pm 1,5$	0	100	100 /2/	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^4$	870 ± 120
	α_1	$5465,0 \pm 1,5$	$59,9 /1/$	26 ± 2	-	$(6 \pm 2) \cdot 10^4$	1600 ± 500
	α_2	$5442,0 \pm 1,5$	$82,9 /1/$	95 ± 6	97 /2/	$(1,6 \pm 0,4) \cdot 10^4$	330 ± 80
	α_3	5386 ± 1	140 ± 2	14 ± 2	-	$(1,1 \pm 0,4) \cdot 10^5$	1200 ± 400
	α_4	5361 ± 1	$167 /1/$	83 ± 6	115 /2/	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^4$	150 ± 30
	$\alpha_{(5)}$	5131 ± 2	$398,3 /1/$	$1,2 \pm 0,4$	-	$(1,0 \pm 0,6) \cdot 10^6$	350 ± 200
^{211}At	α_0	5866 ± 2	0	100	100 /2/	$17,3 \pm 0,2$	$45,8 \pm 0,5$
	α_1	$5210,0 \pm 1,5$	$669,5 /1/$	$(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	-	$(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^5$	148 ± 35
	α_2	5141 ± 2	$742,5 /1/$	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	-	$(4 \pm 2) \cdot 10^5$	200 ± 100
^{211}Po	α_0	7450 ± 3	0	100	100 /2/	$0,56 \pm 0,04 \text{ сек}$	1480 ± 110
	α_1	$6892,5 \pm 2,5$	$569,6 /1/$	$0,57 \pm 0,05$	$0,50 /2/$	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^2 \text{ сек}$	3170 ± 630
	α_2	$6570,0 \pm 2,5$	$897,3 /1/$	$0,59 \pm 0,05$	$0,53 /2/$	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^2 \text{ сек}$	189 ± 38
	$\alpha_{(3)}$	$5880 - 6430$	-	$2 \cdot 10^{-3}$	-	-	-

Обсуждение

Изотоп ^{209}At ($T_{1/2} = 5,4$ часа)

В работе ^{/3/} была сделана попытка обнаружить тонкую структуру альфа-распада ^{209}At . Она была безуспешной; в работе ^{/3/} указан верхний предел интенсивности α -групп тонкой структуры; 2,5% интенсивности основного перехода.

В настоящей работе наблюдалась α -группа с энергией 5116 ± 2 кэВ. В экспозиции, снятой через 75 дней после облучения, эту группу естественно считать главной α -группой ^{208}Po ($T_{1/2} = 2,93$ года ^{/1/} $E_{\alpha} = 5118 \pm 5$ ^{/7/}). Однако в более ранних экспозициях эта группа была более интенсивна, чем следует для линии $^{208}\text{Po}(\alpha_0)$, причем интенсивность зависела от времени. После вычитания доли, принадлежащей ^{208}Po , остаток оказался спадающим с периодом $5,4 \pm 0,5$ часа и был приписан ^{209}At , у которого $T_{1/2} = 5,41$ часа ^{/8/}; интенсивность группы - $(0,10 \pm 0,05)\%$ от интенсивности главной группы ^{209}At (5647 кэВ).

Об уровнях возбуждения дочернего ядра ^{205}Bi пока нет никаких сведений. Спин основного состояния ^{205}Bi измерен ^{/1/}; $I = 9/2$ (такой же, как и у ^{201}Bi , ^{203}Bi и ^{209}Bi ^{/22/}); по модели оболочек это состояние $h_{9/2}$. Величина коэффициента запрета (табл.2) основного α -перехода ^{209}At позволяет предположить, что у основного состояния $^{209}_{85}\text{At}$ также $I^{\pi} = 9/2^{-}$. У соседнего $^{211}_{85}\text{At}$ спин измерен ^{/22/} и равен $9/2$.

Первые возбужденные состояния у нечетных изотопов $^{207, 209, 211}_{83}\text{Bi}$ имеют энергию более 400 кэВ и предполагаемые квантовые характеристики $I^{\pi} = 7/2^{-}$ - (состояния $f_{7/2}$).

Естественно предположить, что найденная нами α -группа ^{209}At с $E_{\alpha} = 5116$ кэВ направлена на уровень 541 кэВ ($7/2^{-}$) ^{205}Bi . Хотя

интенсивность α -группы 5116 кэв в тысячу раз меньше интенсивности главной группы, ее коэффициент запрета близок к коэффициенту запрета главной группы.

Предполагаемая схема распада изображена на рис. 4.

Изотоп ^{210}At ($T_{1/2} = 8,3$ часа)

Хофф ^{/2/}, изучая тонкую структуру изотопа ^{210}At на магнитном альфа-спектрографе, обнаружил три альфа-группы, возникающих при распаде ^{210}At ; их энергии и интенсивности: 5519 кэв (32%), 5437 кэв (31%) и 5355 кэв (37%). Кроме перечисленных, нами были найдены еще три ранее не известные более слабые линии с энергиями 5465; 5386 и 5131 кэв, у которых период спадания интенсивности совпадает с периодом ранее известных групп.

Альфа-группы, указанные в работе ^{/2/}, определяют возбужденные уровни ^{206}Bi ($T_{1/2} = 6,3$ д) с энергиями 82 и 164 кэв. Найденные нами α -группы указывают на существование уровней с энергиями $59,0 \pm 2,0$; 140 ± 2 и 401 ± 4 кэв.

Арбман ^{/19/} изучал распад $^{206}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Bi}$ ($T_{1/2} = 8,8$ дня); он нашел 33 перехода между уровнями ^{206}Bi и среди них переходы с энергиями 59,9; 82,9 и 140,6 кэв, которые могут быть направлены на основное состояние ^{206}Bi , а также переходы с энергиями 106,1 и 338,4 кэв, которые могут быть уложены между указанными уровнями ^{206}Bi . Кроме того, в этой работе наблюдалась электронная линия с энергией 168,2 кэв, которая может быть интерпретирована как $K_{258,7}$; переход с такой энергией точно укладывается между уровнями 398,3 и 140,6 кэв. Все эти переходы указаны на схеме (рис. 5); если размещение переходов на рис. 5 правильно, то энергии уровней имеют значения, приведенные слева.

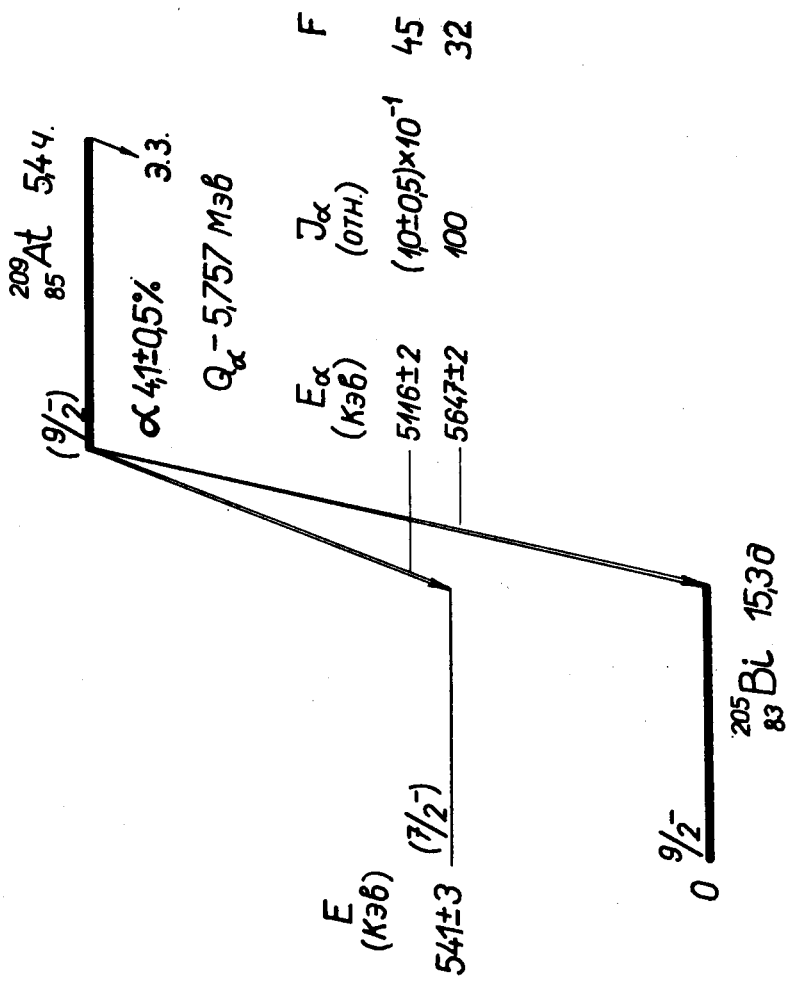


Рис.4. Схема альфа-распада ^{209}At .

При распаде $^{206}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Bi}$ возбуждаются многие уровни, не указанные на рис. 5. Среди них наиболее низко лежат уровни 230,7 кэв ($3^+, 4^+$) и 512,8 кэв (4^+); мы не наблюдали их возбуждения при распаде ^{210}At (α -группа, направляющаяся на уровень 230,7 кэв, перекрывается с группой α_0 ^{210}Po).

Спин основного состояния ^{206}Bi измерен: $I^\pi = 6^+$. Согласно расчетам Вальборна ^{/20/}, у состояния с энергией 59,9 кэв $I^\pi = 4^+$, а у состояния 398,3 кэв $I^\pi = 3^+$.

Коэффициенты запрета F для разных групп имеют отличающиеся значения (рис. 5 и табл. 2).

Изотоп ^{211}At ($T_{1/2} = 7,21$ часа)

Из работы Хоффа ^{/2/} известна основная альфа-группа с энергией 5862 кэв; уточненное значение энергии - 5868 кэв ^{/7/}. Мы обнаружили, помимо этой, еще две группы тонкой структуры альфа-спектра ^{211}At с энергиями 5210 и 5141 кэв; эти линии отнесены к изотопу ^{211}At по периоду полураспада. С добавлением энергии ядерной отдачи разность их энергий и энергии основного перехода $668 \pm 2,5$ и 739 ± 3 кэв - точно совпадает с энергиями возбуждения первого и второго уровней 669,8 и 742,9 кэв ^{/21/207} Bi , которые известны из распада ^{207}Po ($T_{1/2} = 5,7$ часа).

Значения спина и четности уровня 742,9 кэв - $7/2^-$ и возможные значения для уровня 669,8 кэв ($7/2^-$; $9/2^-$ или $11/2^-$) приведены в работе ^{/21/}. Схема распада показана на рис. 5.

Изотоп ^{211}Po ($T_{1/2} = 0,56$ сек)

Альфа-распад изотопа ^{211}Po исследован в работах ^{/2,11/}. При измерениях с помощью ионизационной камеры было обнаружено три

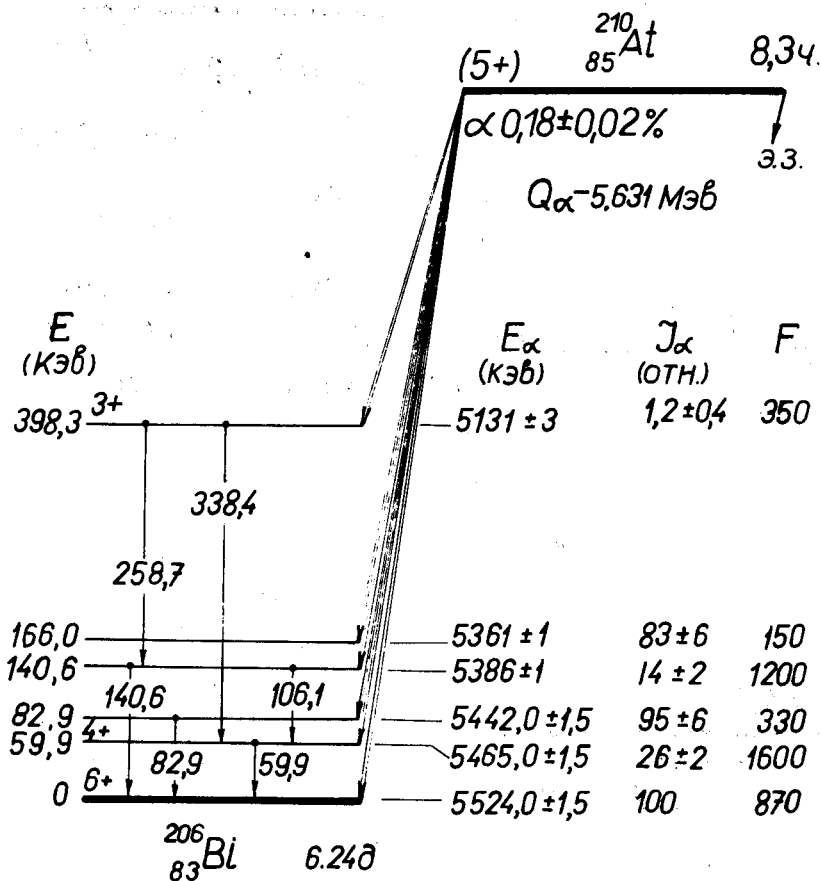


Рис.5. Схема альфа-распада ^{210}At .

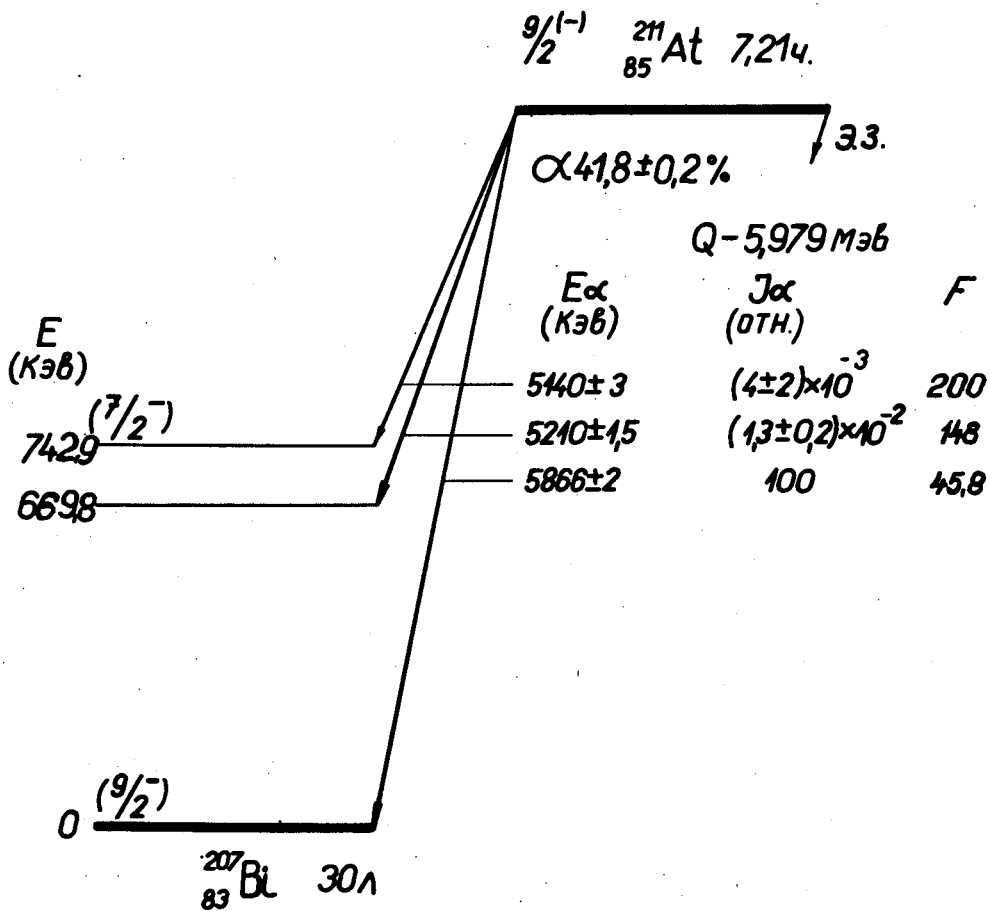


Рис.6. Схема альфа-распада ^{211}At .

альфа-группы тонкой структуры с энергиями 6,90 Мэв (0,57%), 6,57 Мэв (0,48%) и 6,34 Мэв (0,07%). Хофф ^{12/} нашел две первых линии - 6,895 Мэв (0,5%) и 6,569 Мэв (0,53%), но не нашел третьей и указал, что нет альфа-групп, составляющих по интенсивности 0,02% от основной группы в диапазоне энергий от 6,26 до 6,57 Мэв.

В дальнейших работах ^{12,13,14/} удавалось обнаружить только первую альфа-группу тонкой структуры ²¹¹ Po.

В нашей работе в альфа-спектрах линий тонкой структуры ²¹¹ Po (0,56 сек) 6892 и 6570 кэв четко проявились, верхний предел интенсивности линий в интервале 5,88-6,43 Мэв $\approx 2 \cdot 10^{-3}\%$.

Расчеты, проведенные в работе ^{15/}, показали, что ожидаемая интенсивность альфа-группы для перехода на возбужденный уровень ²⁰⁷ Bi с энергией 1633,1 кэв ($E_{\alpha} \approx 5845$ кэв), равна $(3-50) \cdot 10^{-5}\%$ от основной группы; в наших измерениях обнаружить ее было невозможно из-за того, что она находится на спаде очень интенсивной основной альфа-линии ²¹¹ At ($E_{\alpha} = 5866$ кэв).

Л и т е р а т у р а

1. C.M.Lederer, J.M.Hollander and J.Perlman. Table of Isotopes. J.Wiley and Sons. N.Y., 1967.
2. R.W.Hoff. Report UCRL-2325 (1953).
3. J.P.Hummel. Report UCRL-3456 (1956).
4. Ю.В. Норсеев. Кандидатская диссертация. ОИЯИ-ЛГУ (1965).
Б.Н. Беляев, Ван Юн-юй, Е.Н. Синотова, Л. Нэмэт и В.А. Халкин. Радиохимия, 2, 603 (1960).
5. Ю.В. Норсеев, Чао Тао-нань, В.А. Халкин. Радиохимия, 3, 487 (1966).

6. Н.А. Головков, К.Я. Громов, Ю.Н. Денисов, Б.С. Джелепов, Ж.Желев, С.А. Ивашкевич, В.М. Лачинов, Б.Махмудов, В.И. Прилипко, Ю.И.Су-сов, В.Г. Чумин, П.Т. Шишлятников. Препринт ОИЯИ Р13-3340, Дубна, 1967.
7. A.H.Wapstra. Nucl. Phys., 57, 48 (1964).
8. Л. Гуэтх, Ш. Гуэтх, Э. Дароци, Б.С. Джелепов, Ю.В. Норсеев, В.А. Халкин. Препринт ОИЯИ Р6-4079, Дубна 1968.
9. R.Taagepera and M.Nurmia. Ann. Acad. Sci. Fennicae ser. A VI Physica 78 (1961).
10. E.Arbman and P.A.Tove. Arkiv för Fys. 13, 61 (1957).
11. H.M.Neuman and J.Pertman. Phys. Rev., 81, 958 (1951).
12. C.R.Cothen and R.D.Connor. Bull.Am.Phys.Soc.,10,83 (1965),
13. W.F.Davidson, C.R.Cothen and R. D.Connor. Can. J. of Phys. 45, 2295 (1967).
14. R.J.Valen, V.Nedovessov, G.Bastin-Scoffier. Nucl. Phys., 35, 232 (1962).
15. H.D.Zeh and H.J.Mang. Nucl. Phys., 29, 529 (1962).
16. E.Tielsch-Cassel. Nucl. Phys., A100, 425 (1967).
17. Nucl. Data Sheets, 5, 115 (1963).
18. F.Asaro. Report UCRL-2180 (1953).
19. E.Arbman. Nucl. Phys., 3, 625 (1957).
20. S.Wahlborn. Nucl. Phys., 3, 644 (1957).
21. E.Arbman, J.Burde and T.R.Gerholm. Arkiv Fys. 13, 501 (1958).
22. И. Линдгрен. Приложение №1 к книге "Возмущенные угловые корреляции" Атомиздат 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1969 года.