

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P6 - 4868



Т. Морек, Р. Брода, В. Валюсь,
Х. Дростэ, В. Нойберт, С. Хойнацки

УРОВНИ ^{202}Po , ^{203}Po , ^{204}Po , ^{205}Po
И ^{206}Po

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1969

P6 - 4868

Т. Морек, Р. Брода, В. Валюсь,
Х. Дростэ, В. Нойберт, С. Хойнацки

УРОВНИ ^{202}Po , ^{203}Po , ^{204}Po , ^{205}Po
И ^{206}Po

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. В в е д е н и е

Все изотопы астатина являются радиоактивными и распадаются с довольно малым периодом полураспада. Нейтронодефицитные изотопы астатина синтезировались уже давно в реакциях с тяжелыми ионами /1,2,3,4,5,6/. В большинстве случаев был изучен только их α -распад, в результате чего определялись период полураспада данного изотопа и энергия α -перехода. Хотя изотопы астатина распадаются преимущественно путем электронного захвата, для тех из них, у которых массовое число $A < 208$, не было изучено гамма-излучение, сопровождающее этот процесс.

Самые легкие изотопы полония с возбужденными уровнями, о которых в настоящее время в литературе имеются сведения, — это нечетные изотопы ^{205}Po и ^{207}Po . Харгрэвэ и Мартин /7/ обнаружили у этих изотопов изомерные состояния. В результате поиска изомеров у нечетных изотопов Po нами был найден новый изомер в ядре ^{203}Po /14/.

Более подробная информация имеется об уровнях ядер более тяжелых изотопов полония: $^{208,209,210,211,212}\text{Po}$ /8,9,10/. Особый интерес представляет для теоретических исследований ядро ^{210}Po , у которого заполнена нейтронная оболочка ($N = 126$) и только два протона находятся выше заполненной оболочки ($Z = 82$) /18,19,20,21/. У четных ядер ^{208}Po и ^{210}Po были обнаружены уровни 0^+ , 2^+ , 4^+ , 6^+ , 8^+ , которые возникают в результате расщепления мультиплета $(h_{9/2})^2$. Они позволяют объяснить высоколежащие изомерные состояния с большим спином в ядрах ^{207}Po , ^{209}Po и ^{211}Po /23,24/.

Целью настоящей работы является исследование гамма-излучения, сопровождающего K -захват более легких изотопов астатина, чтобы получить новые сведения о систематике возбужденных уровней нейтронодефицитных изотопов полония.

2. Эксперимент

Изотопы ^{202}At и ^{203}At были получены в реакции $^{185}\text{Re}(^{22}\text{Ne}, \text{xn})^{207-x}\text{At}$. Более тяжелые изотопы, ^{204}At , ^{205}At , ^{206}At , синтезировались в реакции $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C}, \text{xn})^{209-x}\text{At}$.

Мишени облучались на выведенном пучке тяжелых ионов циклотрона У-300. Золотая мишень была изготовлена из тонкой фольги ($\approx 2 \text{ мг/см}^2$).

Мишень из ^{185}Re (85%) приготавливалась путем осаждения слоя из металлического порошка на алюминиевую фольгу толщиной $1,35 \text{ мг/см}^2$. В этом случае толщина мишени была не больше 3 мг/см^2 .

Мишень обеспечила полное торможение ядер отдачи, но была достаточно тонка для исследования кривых возбуждения и для получения довольно чистых изотопов астатина.

Мишени не подвергались химической обработке. Облученные образцы через 1,5 мин. переносились к детектору. Измерения γ -спектров проводились на $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторе объемом 13 см^3 . Спектры электронов внутренней конверсии измерялись охлаждаемым кремниевым детектором с разрешением 7 кэВ. К сожалению, в случае ^{202}At и ^{203}At применение этого счётчика оказалось невозможным из-за большого фона от позитронов, обусловленных распадом продуктов облучения алюминиевой подложки тяжелыми ионами.

В случае ^{204}At магнитным β -спектрометром, работающим непосредственно на пучке тяжелых ионов 15,16 , был измерен электронный спектр.

Для исследования совпадений между γ -квантами был использован спектрометр совпадений с разрешающим временем 100 нсек/^{25} . В качестве детекторов были применены в анализирующем тракте кристалл $\text{Ge}(\text{Li})$ (13 см^3) и в тракте, где выбирались "окна", кристалл $\text{NaI} - 2'' \times 2''$.

Определение мультипольностей γ -переходов было проведено на основании анализа отношений a_K/a_L и сравнения интенсивностей линий в γ -спектре и соответствующих линий в спектре электронов внутренней конверсии 26 .

Для определения массового числа образуемых изотопов были измерены функции возбуждения наблюдаемых гамма-линий (рис. 11,12). В случае ^{204}At и ^{205}At полученные кривые находятся в согласии с результатами работы Томаса $^{3/}$. Функция возбуждения для переходов из распада ^{202}At ($T_{1/2} = 3 \text{ мин}$) совпадает с тем, что получается для переходов в дочерних продуктах (^{202}Bi). Это подтверждает правильность определения массового числа как $A = 202$. К сожалению, используемый нами метод неприменим к слабым переходам, и поэтому идентифицированное нами число γ -переходов небольшое.

Другим способом идентификации является определение периода полураспада γ -линии, например, в случае ^{202}At и ^{204}At , период полураспада которых короче, чем более тяжелых соседних ядер.

Построенные нами схемы уровней ядер полония построены на основании баланса интенсивностей и результатов измерений γ - γ совпадений.

3. Распад ^{206}At

^{206}At был получен в реакции $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C}, 3n)^{206}\text{At}$. Небольшое сечение этой реакции из-за близости кулоновского барьера затрудняло измерение, но, с другой стороны, таким образом полученные источники были довольно чистыми по своему изотопному составу.

Определенный нами период полураспада $T_{1/2} = 33 \pm 2 \text{ мин}$ совпадает с периодом полураспада, известным из предыдущих работ $^{1,24/}$ по α -распаду ^{206}At . С таким же периодом распадаются все перечисленные в табл. 1 γ -линии.

На основании измеренного кремниевым детектором спектра электронов внутренней конверсии (рис. 3) были определены мультипольности сильнейших линий. Все они оказались $E2$ -переходами. Измерения γ - γ совпа-

Таблица 1
Переходы в ^{208}Po

E_{γ} , кэВ	255	276	385	396	446	476	526	616	699	731	922	954	960	1011	1062
I_{γ}	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	42 ± 4	3 ± 1	82 ± 8		7 ± 2	100	11 ± 2	6 ± 2				
$I_{\gamma} + I_{\alpha}$			43 ± 4			83 ± 8			100						
Мультип.	$M1+E2$		E2			E2		M1	E2						

дений (рис. 1,2) показали, что 3 основных перехода, т.е. 396, 476, 699 кэВ, образуют каскад. Согласие относительных интенсивностей переходов в прямом спектре и спектрах совпадений позволяет установить, что последовательность уровней такая, как показано на рис. 13. Эта схема очень похожа на схемы уровней ^{208}Po и ^{210}Po . На основании этого сходства мы считаем, что природа этих уровней такая же, как в ядрах ^{208}Po и ^{210}Po , т.е. мы имеем дело с переходами между уровнями $6^+ \rightarrow 4^+$, $4^+ \rightarrow 2^+$ и $2^+ \rightarrow 0^+$ расщепленного двухквартичного мультиплетта. Вероятно, что из-за малой энергии не наблюдалось перехода $8^+ \rightarrow 6^+$.

4. Распад ^{204}At

^{204}At был получен в реакции $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C}, 5n)^{204}\text{At}$.

Период полураспада этого изотопа, измеренный нами, составляет $T_{1/2} = 9,5 \pm 1,0$ мин. Это значение находится в согласии с известным по α -распаду $1,2,4/$. Предварительные данные о распаде $^{204}\text{At} \rightarrow ^{204}\text{Po}$ приведены нами в работе $13/$.

В γ -спектре (рис. 4,5) по кривым возбуждения и периоду полураспада нами найдены 10 переходов, принадлежащих распаду ^{204}At . Энергии этих переходов, их относительные интенсивности и мультипольности показаны в табл. 2.

Измерения γ - γ совпадений показали, что переходы 426, 516, 682 кэВ образуют каскад.

Учитывая их интенсивности, мы построили схему уровней, которая показана на рис. 13. Остальные переходы либо слишком слабы, чтобы их можно было обнаружить в спектре совпадений, либо следуют на уровни с большим временем жизни. Может быть поэтому не наблюдается совпадений довольно сильного перехода 609 кэВ с одним из переходов основного каскада. Это одно из свидетельств существования в ^{204}Po уровня 8^+ как самого высокого уровня двухквартичного мультиплетта с довольно большим временем жизни.

5. Распад ^{202}At

^{202}At был получен в реакции $^{185}\text{Re}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{202}\text{At}$. В γ -спектре (рис. 8), измеренном после К-захвата в ядре ^{202}At , мы обнаружили 4 перехода с $T_{1/2} = 3,0 \pm 0,5$ мин. Определенный нами период полураспада совпадает с известным из предыдущих работ $T_{1/2} = 3$ мин. Данные об энергиях и интенсивностях наблюдаемых нами переходов помещены в табл. 3. Из-за небольшой интенсивности и небольшого периода полураспада не было возможности измерить спектры совпадений и спектры электронов внутренней конверсии. Можно предполагать, что мы наблюдаем аналогичный случай каскада E2 переходов между уровнями $6^+, 4^+, 2^+, 0^+$ двухчастичного мультиплетта, как у более тяжелых чётных ядер Po.

6. Распад ^{203}At

^{203}At был синтезирован в реакции $^{185}\text{Re}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{203}\text{At}$. ^{203}At по данным, полученным при изучении его α -распада, имеет период полураспада $T_{1/2} = 7,4$ мин/3/. В зарегистрированном нами γ -спектре была обнаружена только одна относительно сильная линия с $E_\gamma = 640 \pm 1$ кэВ с таким же периодом полураспада. Энергия этого перехода очень близка к энергии изомерного M1-перехода ^{203}Po , известного по нашей предыдущей работе/14/. Маловероятным кажется, что при К-захвате ^{203}At заселяется уровень 13/2+ в ядре ^{203}Po . Чтобы получить сведения о природе γ -перехода, найденного в распаде изотопа ^{203}At , был измерен спектр электронов внутренней конверсии. Тот факт, что мы на фоновом спектре не наблюдали К-линии этого перехода, свидетельствует о том, что его мультипольность низкая. Учитывая интенсивность γ -перехода и эффективность β -спектрометра, в случае M1-перехода мы должны были бы обнаружить соответствующие линии внутренней конверсии. По расчётам Кислингера и Соренсена/22/ и по систематике уровней ожи-

Таблица 2
Переходы в ^{204}Po

E_γ	329	336	426	489	516	588	609	682	762	842
I_γ	5 ± 1	6 ± 1	66 ± 5	5 ± 1	95 ± 9	9 ± 1	21 ± 2	100	5 ± 1	9 ± 2
$I_\gamma + I_e$			68 ± 5		96 ± 9		22 ± 2	100		
мульти.			E2		E2		M1	E2		

Таблица 3
Переходы в ^{202}Po

E_γ	443	472	571	675
I_γ	62 ± 7		90 ± 9	100

дается, что уровень $13/2^+$ с уменьшением числа нейтронов опускается ниже фоонного состояния $9/2^-$. Экспериментальный результат находился бы в согласии с этими представлениями, если бы в K -захвате заселялся уровень $9/2^-$ и распадался γ -переходом на основное состояние $5/2^-$.

7. Распад ^{205}At

Впервые β -распад ^{205}At был исследован /11/ с использованием источников, полученных при выделении на масс-сепараторе ^{205}At из продуктов деления урана. Однако период полураспада был в этом случае слишком коротким, чтобы провести подробные исследования. Авторы наблюдали только переход 718 кэВ. С другой стороны, известны два γ -перехода с энергиями 160 и 707 кэВ (измеренные NaI -детектором) с изомерного уровня ^{205}Po (650 мксек) /7/. ^{205}At в наших условиях был синтезирован в реакции $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C},4n)^{205}\text{At}$. Полученные источники всегда содержали примеси ^{204}At и ^{206}At . Период полураспада последнего похож на период полураспада ^{205}At , так что идентификация γ -линии по периоду полураспада была невозможна. Анализ γ -спектра проводился по кривым возбуждения. γ -переходы, относящиеся к распаду $^{205}\text{At} \rightarrow ^{205}\text{Po}$, перечислены в табл. 4. Среди этих переходов нет изомерного перехода 160 кэВ. Чтобы убедиться, что наблюдаемый в распаде ^{205}At переход 707 кэВ и наблюдаемый в распаде ^{205}At переход 718 кэВ – одно и то же, мы возбуждали изомер ^{205}Po в реакции $^{192}\text{Os}(^{18}\text{O},5n)^{205}\text{Po}$. В измеренном $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором спектре присутствовала линия ~718 кэВ, распадающаяся с $T_{1/2} \approx 1$ мсек, что соответствует предлагаемой авторами работы /7/ схеме распада изомера ^{205}Po .

Проведенные измерения γ - γ совпадений (рис. 9) показывают, что только переход 311 кэВ совпадает с сильным переходом 718 кэВ. Измерение совпадений с другими линиями из-за небольшой их интенсивности было невозможно. Мультипольности переходов были определены с помощью спектра электронов внутренней конверсии, измеренного Si -детектором (рис. 10). Предварительная схема уровней ^{205}Po показана на рис. 14.

Таблица 4
Переходы в ^{205}Po

I_γ	311	362	449	630	667	718	1030
I_γ	15 ± 2	5 ± 2	6 ± 2	18 ± 2	31 ± 2	100	9 ± 2
$I_{\gamma+I_e}$	22 ± 2	6 ± 2	7 ± 2	19 ± 2	31 ± 2	100	
Мульти.	M1	M1+E2	M1	M1	M1+E2	E2	

8. Обсуждение результатов измерения

В настоящее время еще сравнительно мало спектроскопических данных и теоретических расчётов для возбужденных уровней нейтрондефицитных ядер в области $Z > 82$ и $N < 126$. Поэтому трудно однозначно объяснить полученные нами результаты измерений. До сих пор были довольно хорошо исследованы схемы уровней ^{208}Po и ^{210}Po /8,21/. Основным результатом этих исследований является обнаружение полос уровней положительной чётности: 0^+ , 2^+ , 4^+ , 6^+ , 8^+ . Переходы между этими уровнями – самые сильные.

Расчёты схемы уровней ^{210}Po проведены в нескольких работах /18,19,20,21/ на основе оболочечной модели. Изучая ^{209}Bi , авторы /17/ получили последовательность протонных уровней: $9/2^-$, $7/2^-$ и $13/2^-$. Мы исходили из предположения, что низковозбужденные уровни ^{210}Po связаны со всеми возможными парными комбинациями этих протонных состояний. Тогда, судя по конфигурации $(h_{9/2})^2$, можно заключить, что самые низкие уровни, уровни со спином 0, 2, 4, 6, 8, – положительной чётности. Вырождение состояний снимается при учёте протон-протонного взаимодействия. Хоффом /21/, Кимом и Расмуссеном /20/, а также Гансом и др. /19/ учитывались разные силы. Все эти расчёты дают довольно

хорошее согласие с экспериментом. В случае ^{208}Po экспериментальные данные, а также приближительные расчёты/8/ показывают качественно такую же ситуацию. На основании этой систематики уровней мы решили предложить схемы уровней четных изотопов полония (см. рис. 13). Переходы с уровней 8^+ на 6^+ не обнаружены, вероятно, из-за небольшой энергии. Несколько найденных нами переходов не включены в схему. Так как при β -распаде заселяются уровни с большим спином, можно предполагать, что у четных изотопов аstatина основное состояние имеет большой спин. Это в соответствии с правилом Нордгайма. Более сложная ситуация в случае нечетных изотопов полония. Спины основных состояний известны/12/ и отвечают предсказаниям оболочечной модели. Как видно из рис. 14, во всех этих ядрах присутствуют уровни $9/2^-$ и $13/2^+$, энергии которых уменьшаются плавно с уменьшением числа нейтронов. Такое поведение уровней в зависимости от числа нейтронов хорошо описывается моделью со спариванием и квадрупольно-квадрупольным взаимодействием/22,14/. В ядрах ^{207}Po , ^{209}Po и ^{211}Po существуют изомерные состояния с большим спином. Пекер/23,24/ интерпретирует их как трехчастичные состояния, используя двухчастичную структуру уровней соседних четных изотопов Po . С помощью этого метода можно объяснить существование изомеров в ^{207}Po и ^{209}Po , а также высоковозбужденного гипотетического изомера в ^{203}Po , учитывая наличие уровня 8^+ в четных изотопах полония. В этих ядрах два протона $(h_{9/2})^2$ дают максимально возможный вклад в спин изомерного уровня 8 .

Спин нечетного нейтрона складывается со спином этой пары, в результате чего мы получаем максимальный спин в случаях $^{209}\text{Po}(17/2^-)$, $^{207}\text{Po}(19/2^-)$ и $^{203}\text{Po}(21/2^-)$. Последний случай особенно интересен, так как до сих пор неясно: существует ли/6/ или не существует/5/ второе изомерное состояние ($T_{1/2} = 29$ мин) в ^{203}Po , распадающееся путем испускания α -частиц. Наши результаты по исследованию уровней ^{202}Po дают повод для поиска этого изомера.

Мы признательны академику Г.Н.Флерову за поддержку и большое внимание к работе.

Авторы благодарят профессора З.Вильгельми за постоянный интерес к работе, доктора Я.Жилича за ценные замечания и группу эксплуатации циклотрона У-300 за обеспечение четкой работы ускорителя.

Л и т е р а т у р а

1. R.W.Hoff, F.Asaro, I.Perlman. *Journ.Inorg.Nucl.Chem.*, 25, 1303 (1963).
2. W.Treytl, K.Valli. *Nucl.Phys.*, A97, 405 (1963).
3. T.D.Thomas, G.E.Gordon, R.M.Latimer, G.T.Seaborg. *Phys.Rev.*, 126, 1805 (1962).
4. Thoresen. *Journ.Inorg.Nucl.Chem.*, 26, 1341 (1964).
5. E.Tielsch-Cassel. *Nucl.Phys.*, A100, 425 (1967).
6. Y.Le Beyec, M.Lefort. *Arkiv for Fysik*, 36, 183 (1967).
7. C.K.Hargrove, W.M.Martin. *Canad.Journ. of Phys.*, 40, 964 (1962).
8. W.Treytl, E.K.Hyde, T.Yamazaki. *Nucl.Phys.*, A117, 481 (1968).
9. T.Yamazaki, E.Mathias. *Phys.Rev.*, 175, 1476 (1968).
10. S.G.Prussin, J.M.Hollander. *Nucl.Phys.*, A110, 176 (1968).
11. T.D.Thomas, M.Nauman. *PPAD647d. Princeton*, 1968.
12. S.Axtensten, C.M.Olsmats. *Arkiv for Fysik*, 19, 461 (1961).
13. Т.Морек и др. Препринт ОИЯИ, Р6-4494, Дубна, 1969.
14. Т.Морек и др. Препринт ОИЯИ, Р6-4553, Дубна, 1969.
15. Z.Wilhelmi et al. *Preprint*, E6-4593, Dubna, 1969.
16. A.K.Alexander et al. *Preprint*, E6-4278, Dubna, 1969.
17. R.Woods et al. *Phys.Rev.Lett.*, 19, 453 (1967).
18. S.I.Drozdov. *Nucl.Phys.*, 37, 652 (1962).
19. P.S.Ganas, B.Mc Kellar. *Phys.Rev.*, 175, 1409 (1968).
20. Y.E.Kim, J.O.Rasmussen. *Nucl.Phys.*, 47, 184 (1963).
21. R.W.Hoff et al. *Phys.Rev.*, 109, 447 (1958).
22. R.A.Sorensen. *Nucl.Phys.*, 25, 647 (1961);
L.S.Kisslinger, R.A.Sorensen. *Rev.Mod.Phys.*, 35, 853 (1963).
23. Л.К.Пекер. *Известия АН СССР, сер.физ.*, 28, 302 (1964).
24. Л.К.Пекер. В кн. "Структура сложных ядер", стр. 319, Атомиздат, 1966.

25. Т.Вальчак и др. Препринт ОИЯИ, 13-4025, Дубна, 1968.
 26. R.S.Hager, E.C.Seltzer. Nuclear Data, A4 1 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
 22 декабря 1969 года.

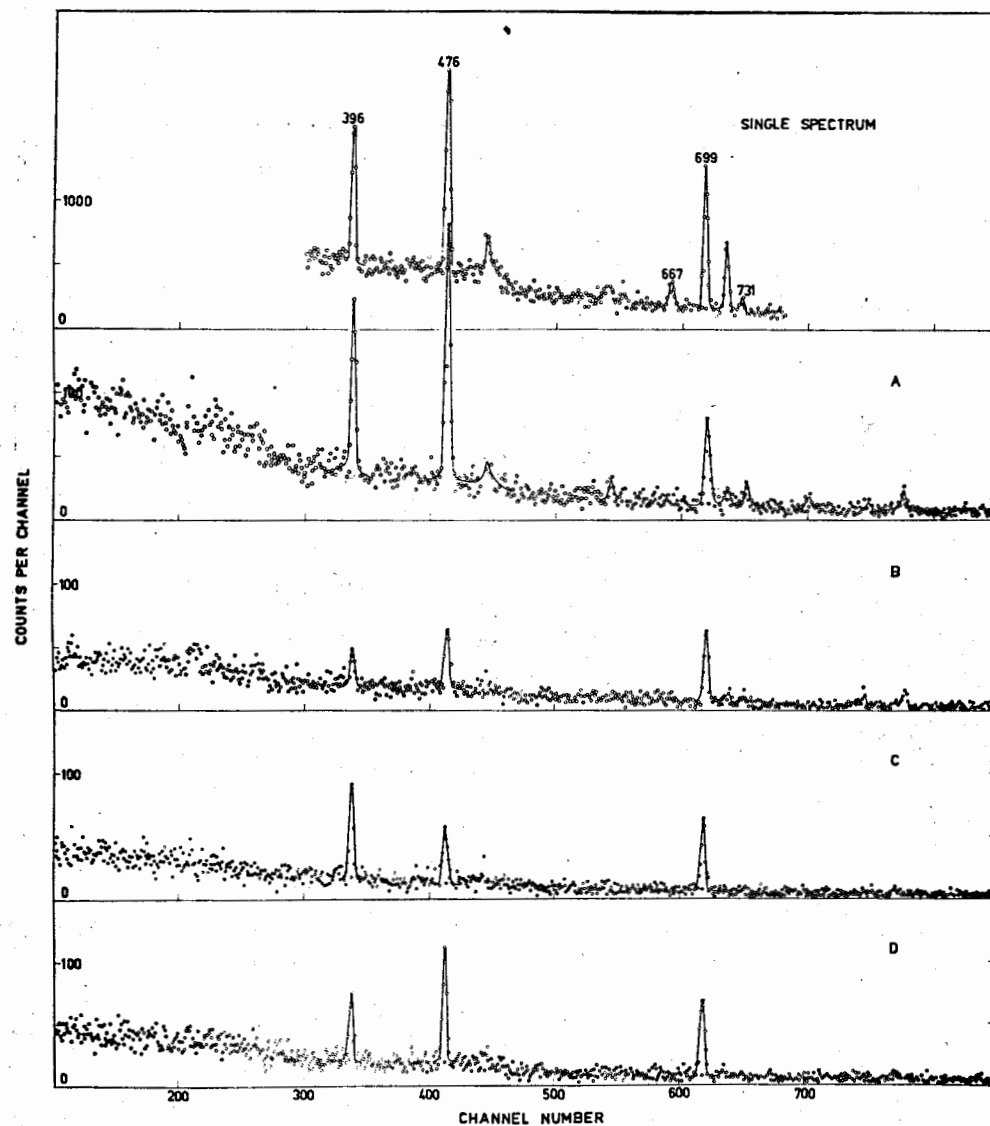


Рис. 1. Ge(Li) гамма-спектр ^{206}At . А, В, С, D - спектры совпадений. Окно выбиралось в тракте с детектором NaI. А - спектр совпадений с γ -линией 699 кэв, В - спектр совпадений с комptonовским фоном, С - спектр совпадений с γ -линией 476 кэв, D - спектр совпадений с γ -линией 396 кэв.

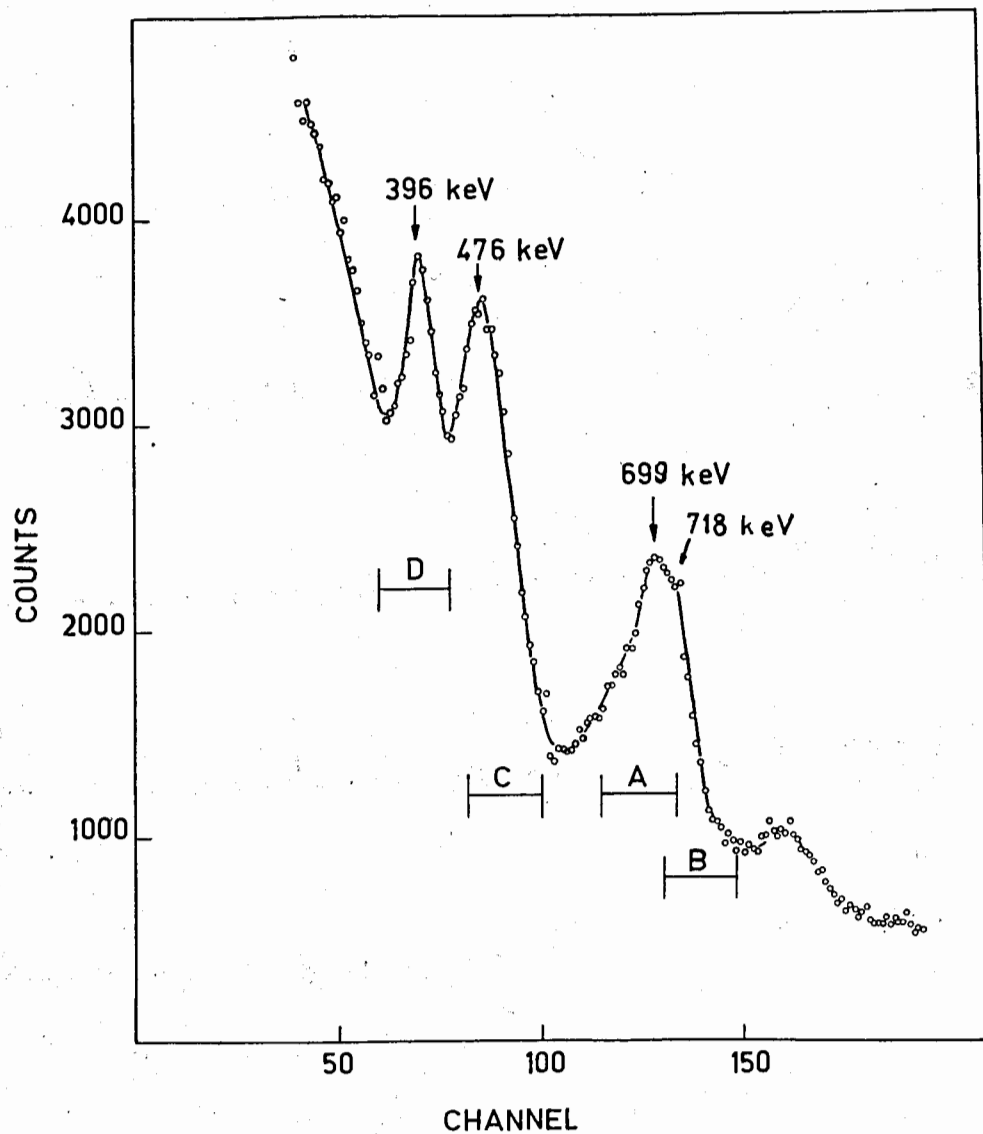


Рис. 2. NaI γ -спектр ^{206}At . A, B, C - окна для измерений совпадений.

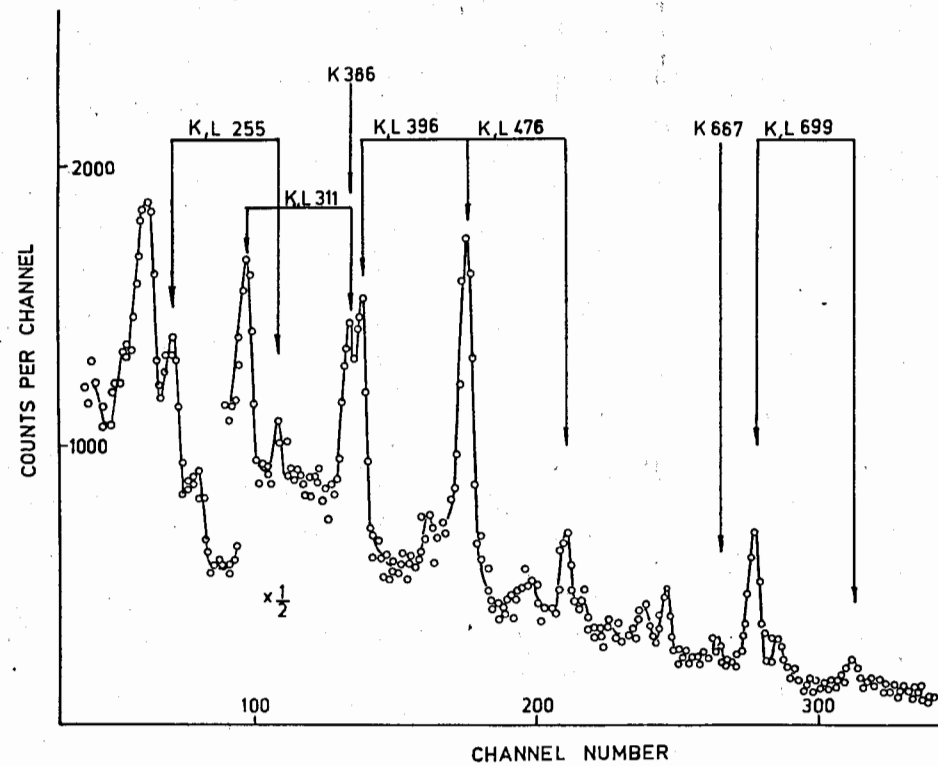


Рис. 3. Спектр электронов внутренней конверсии ^{206}At , измеренный кремниевым детектором.

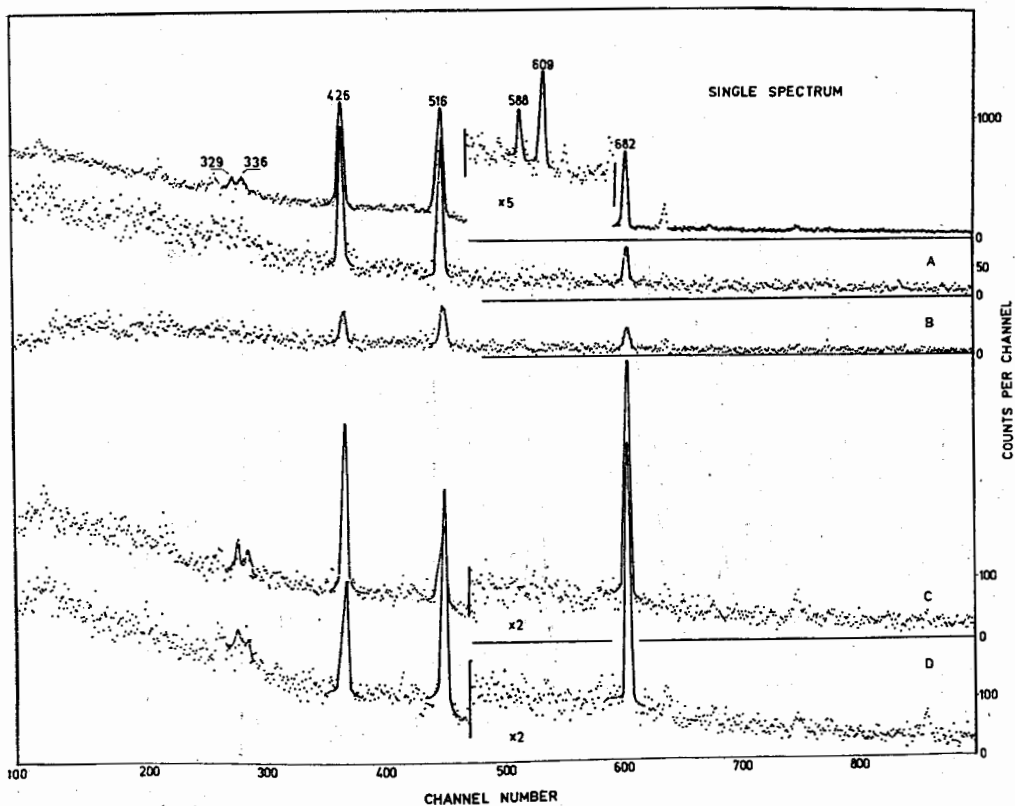


Рис. 4. Ge(Li) γ -спектр ^{204}At . А, В, С, D - спектры совпадений. Окно выбиралось на тракте с детектором NaI. А - спектр совпадений с линией 682 кэВ; В - спектр совпадений с комптоновским фоном, С - спектр совпадений с линией 516 кэВ, D - спектр совпадений с линией 426 кэВ.

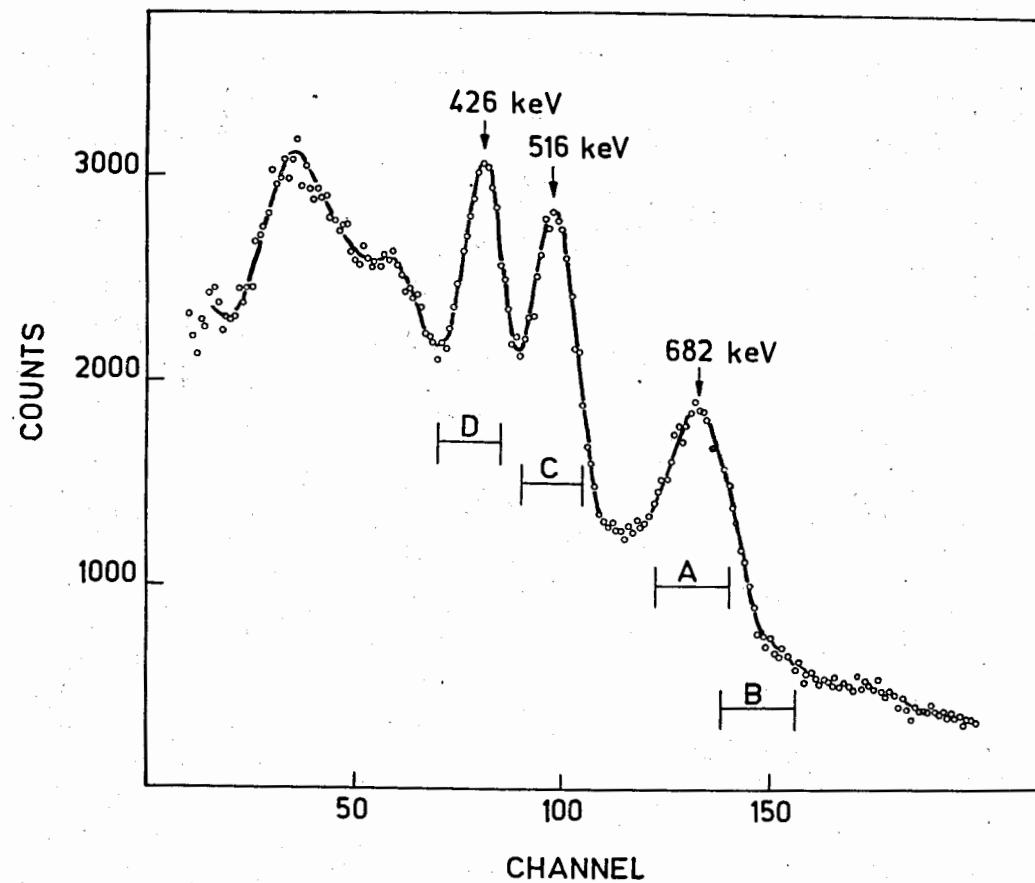


Рис. 5. NaI γ -спектр ^{204}At , А, В, С, D - окна для измерений совпадений.

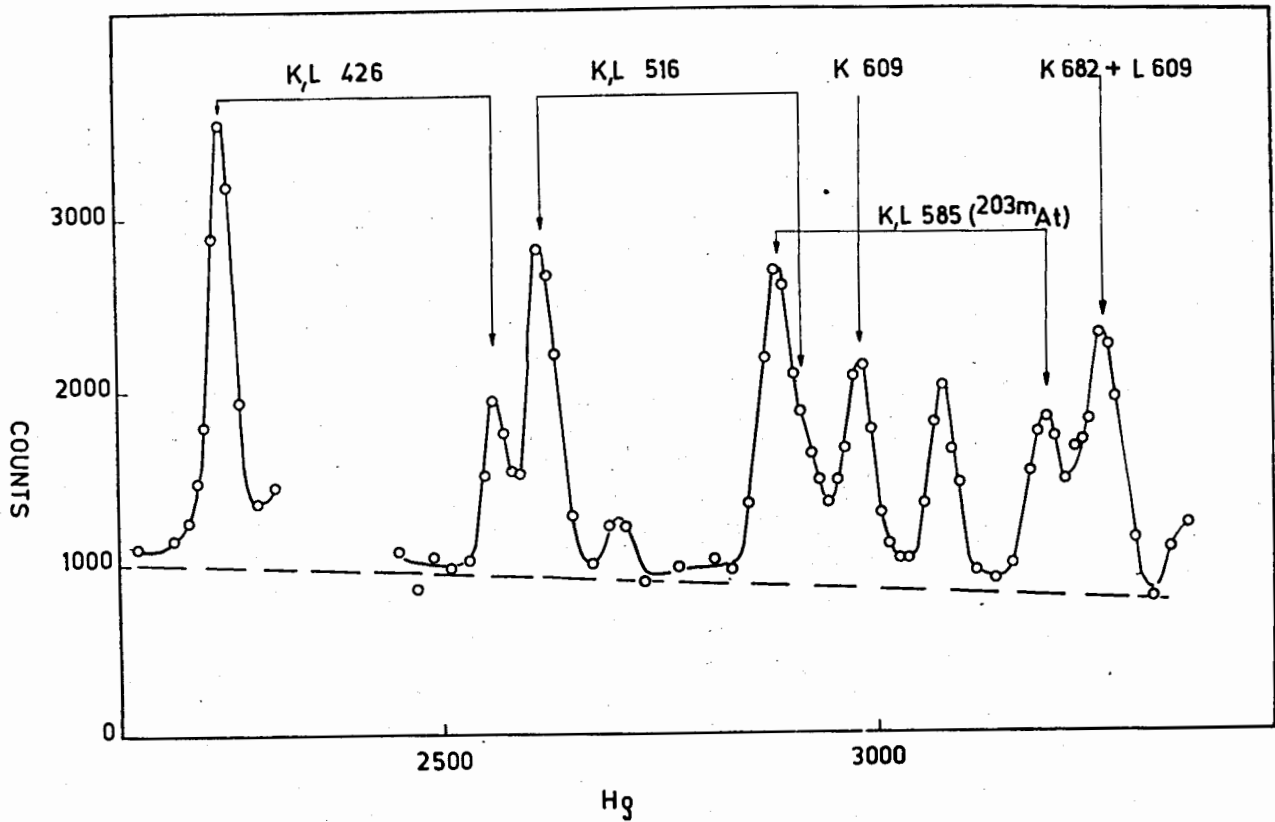


Рис. 6. Спектр электронов внутренней конверсии ^{204}At , измеренный магнитным β -спектрометром "на пучке" в перерывах между импульсами пучка. Видна линия из распада 108 мсек изомера $^{203\text{m}}\text{At}$.

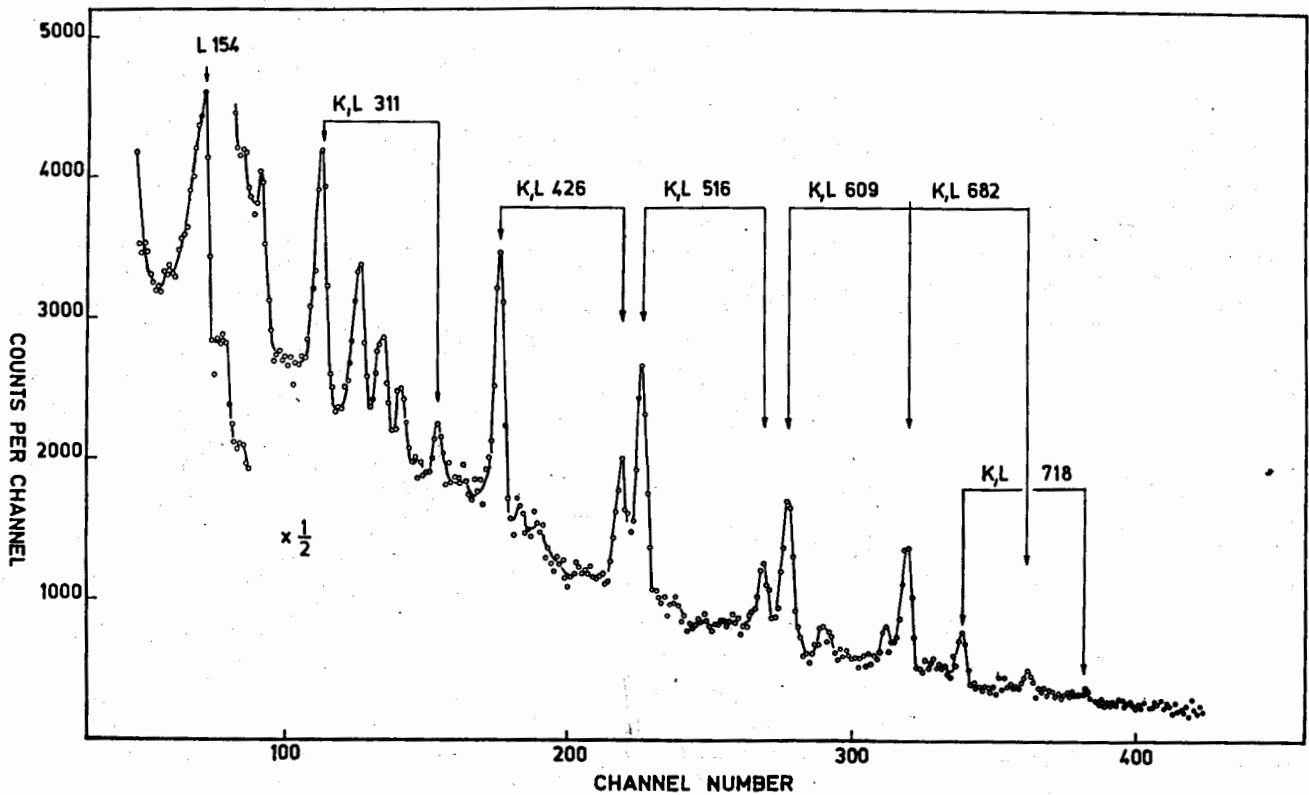


Рис. 7. Спектр электронов внутренней конверсии ^{204}At , измеренный кремниевым детектором.

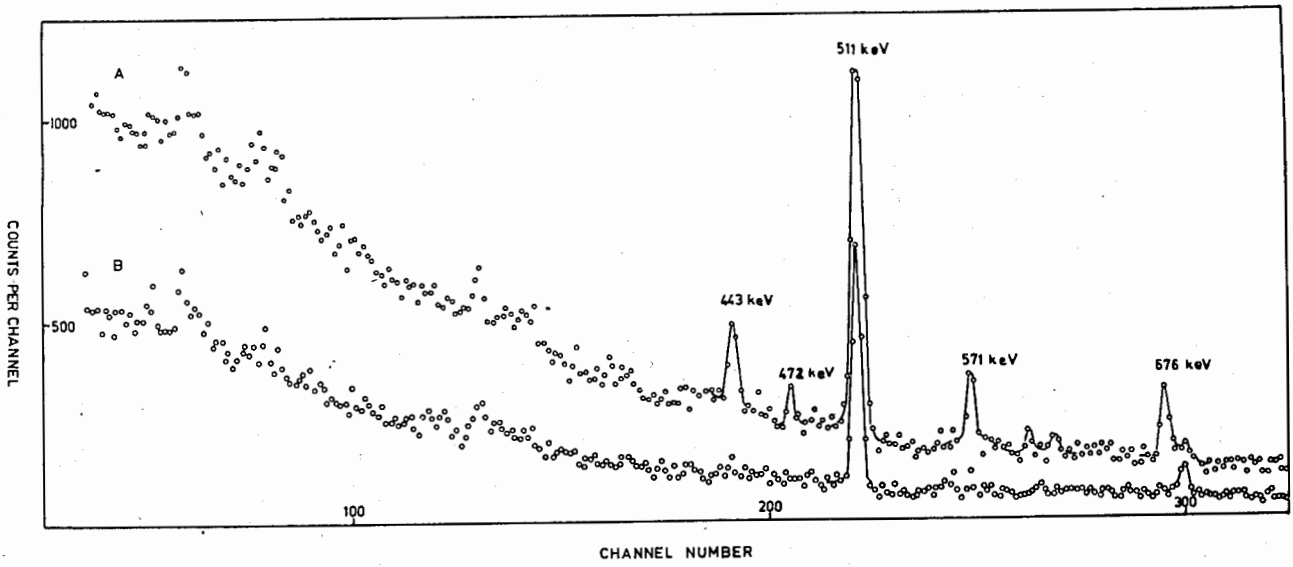


Рис. 8. Ge (Li) γ -спектр ^{202}At .

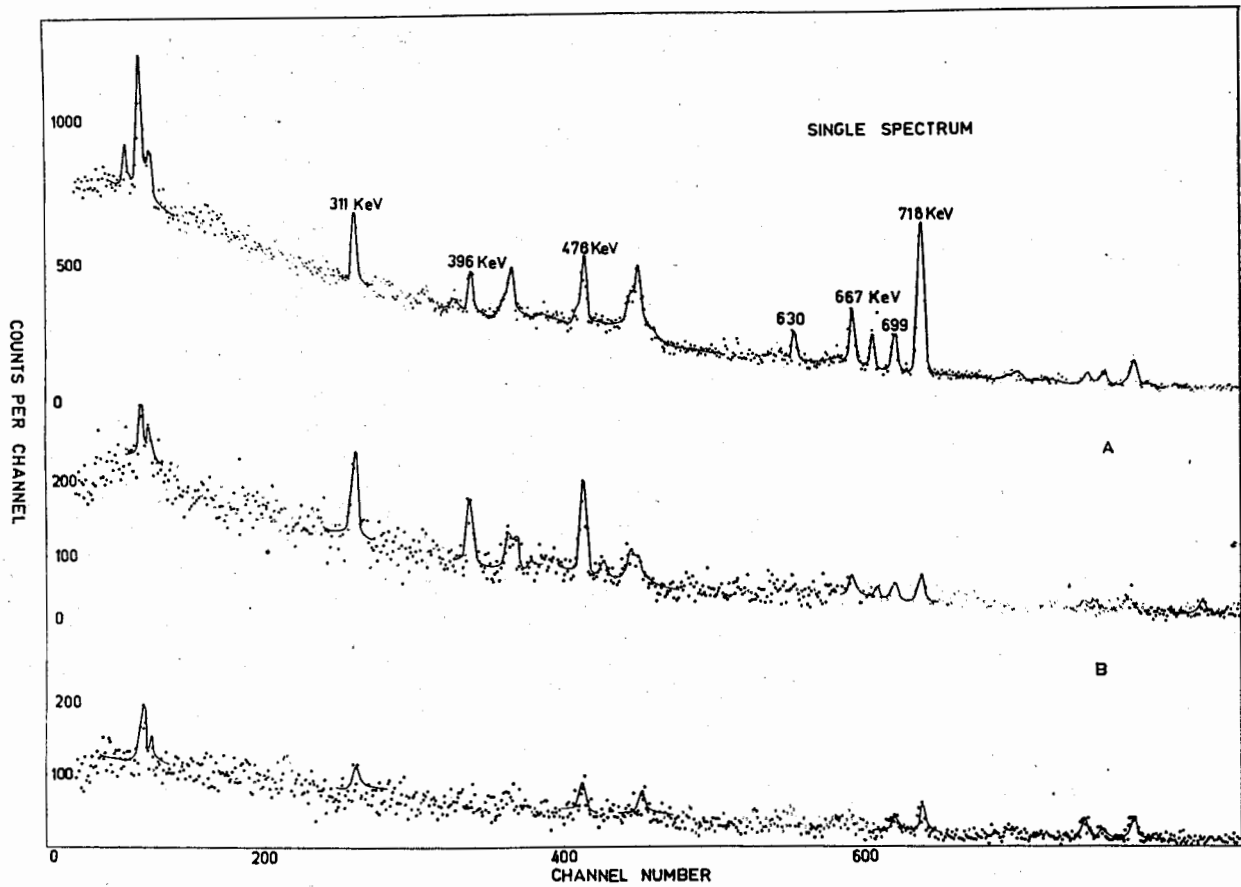


Рис. 9. Ge(Li) γ -спектр ^{208}At . А, В - спектры совпадений. Окно вы-
биралось на тракте с детектором NaI . А - спектр совпадений
с линией 718 кэв, В - спектр совпадений с комptonовским фоном.

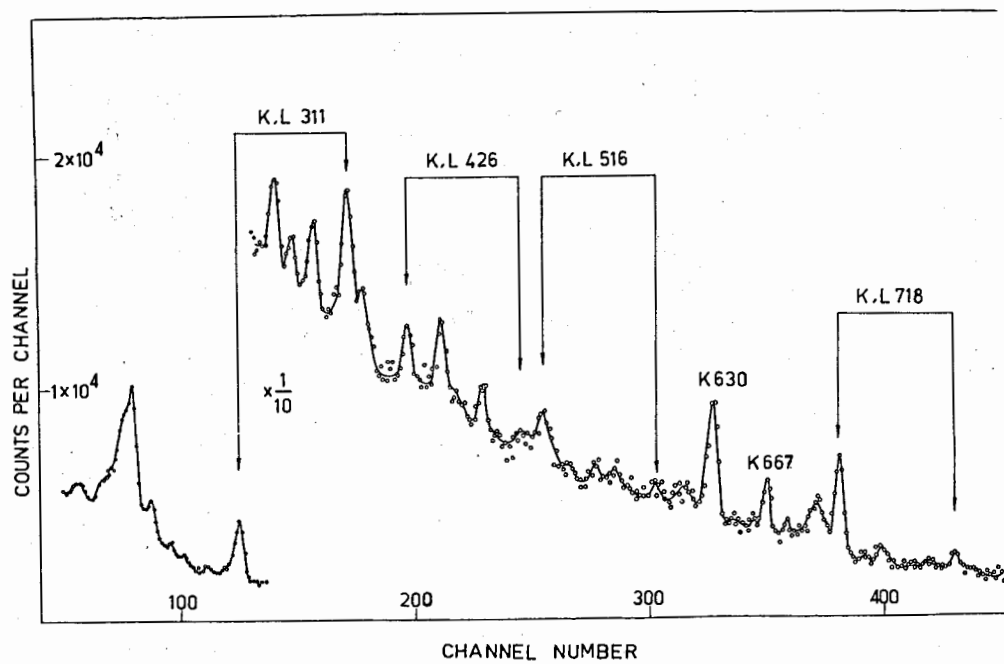


Рис. 10. Спектр электронов внутренней конверсии ^{205}At , измеренный кремниевым детектором.

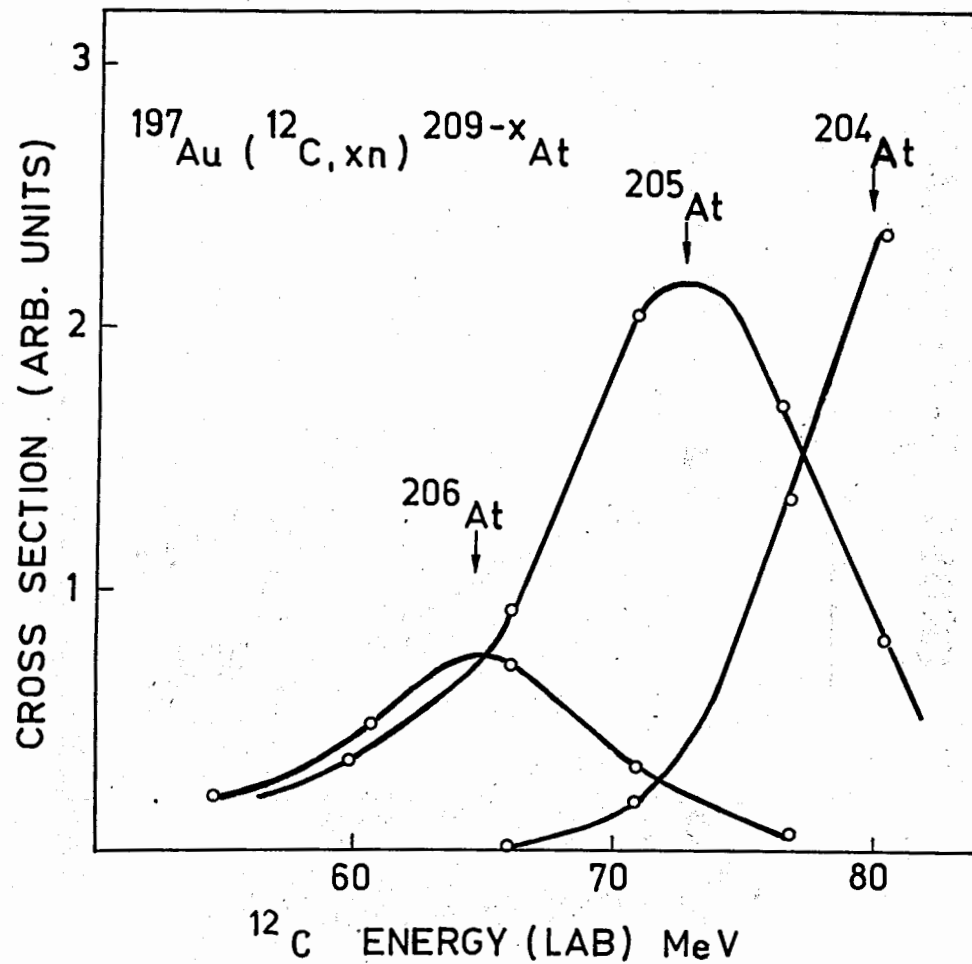


Рис. 11. Функции возбуждения для реакции $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C}, xn)^{209-x}\text{At}$.

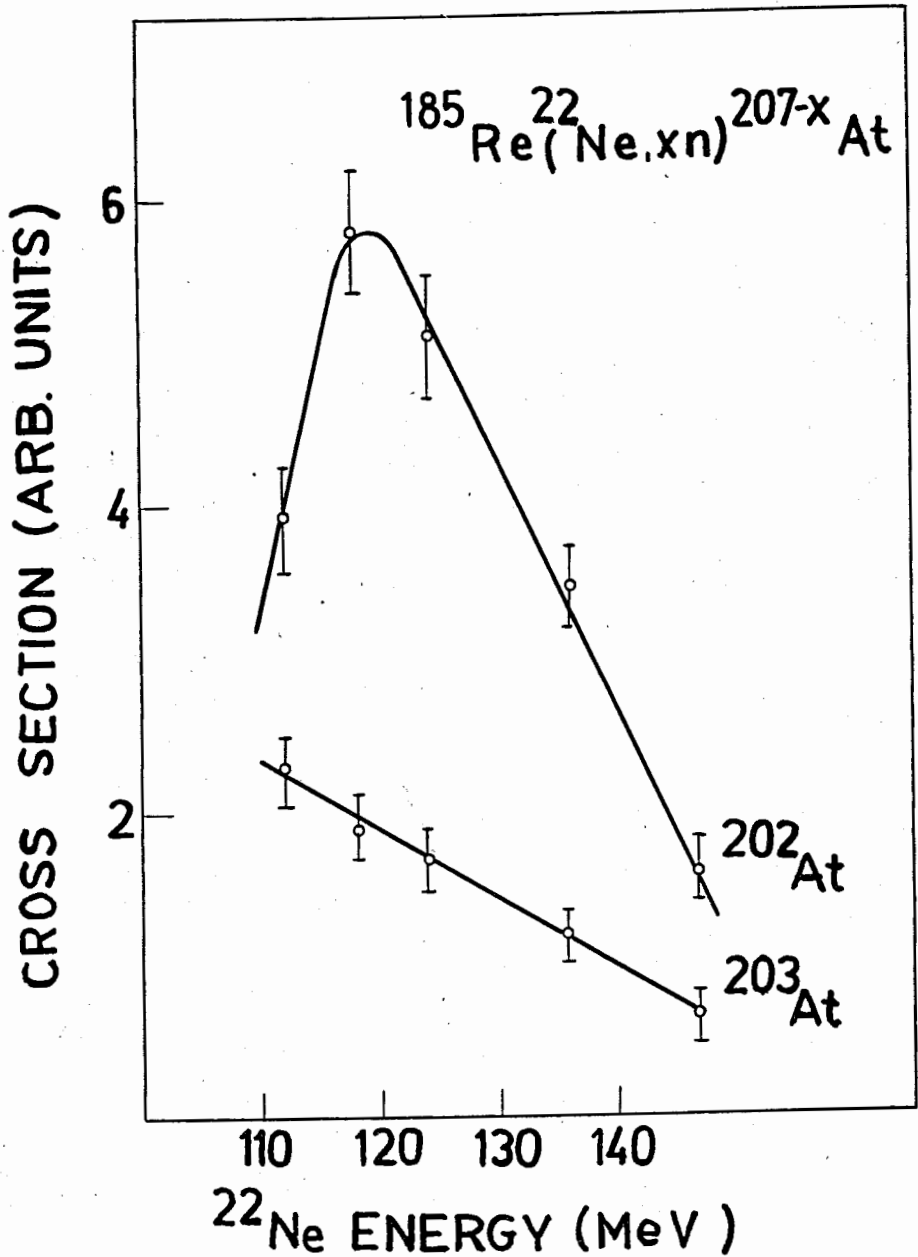


Рис. 12. Функции возбуждения для реакции $^{185}\text{Re}(^{22}\text{Ne}, xn)^{207-x}\text{At}$.

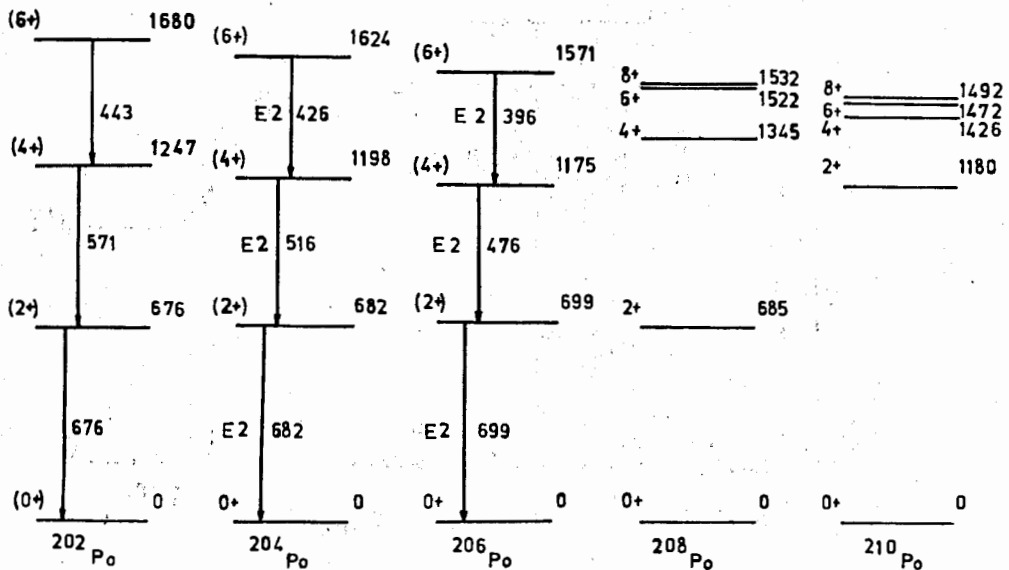
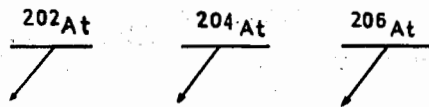


Рис. 18. Схемы уровней чётных изотопов полония.

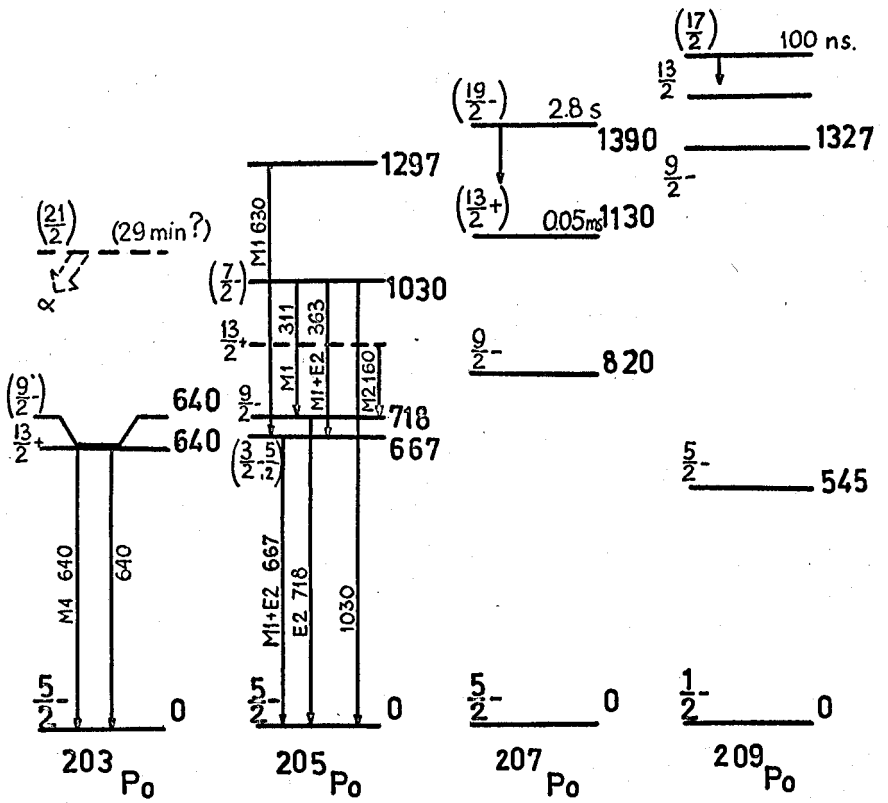


Рис. 14. Схемы уровней нечётных изотопов полония.