

РАСПАД ^{73m}Se Decay of ^{73m}Se

Н. А. Воинова*, М. Гонсиор**, Г. И. Лизурей**, А. В. Потемпа**

Институт ядерной физики, Краков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Ленинград

(Поступила в редакцию 7 ноября 1970)

Исследован распад изомера ^{73m}Se (41 мин.). На тороидальном безжелезном бета-спектрометре измерен спектр конверсионных электронов в области энергий 20—1200 кэВ. Гамма-спектр измерялся на Ge (Li) детекторе. Определены значения коэффициентов внутренней конверсии и мультипольности 12 переходов. Из совокупности экспериментальных данных определены значения квантовых характеристик уровней ^{73}As . Проводится сравнение схемы уровней ^{73}As со схемами соседних нечётных изотопов мышьяка и с теоретическими расчётами.

The levels in ^{73}As from the decay of 41 min ^{73m}Se were investigated. The conversion electron spectra in the energy region 20–1200 keV and gamma spectra were measured. The conversion coefficients and multiplicities of 12 transitions were determined. Obtained level structure of ^{73}As is compared with data of the adjacent As isotopes and with recent theoretical calculations.

Введение

Изучение распада изомера $^{73m}_{34}\text{Se} \rightarrow ^{73}_{33}\text{As}$ (41 мин) является частью общей программы исследования изотопов мышьяка с целью выяснения свойств нечётно-протонных ядер.

Теоретические значения энергии уровней, вероятности переходов и другие свойства возбужденных состояний нечётных ядер в области $Z = 32—36$ получены в ряде работ [1—5]. В работе Иманиши и др. [5] расчеты энергии уровней и вероятностей переходов проведены в предположении о возможности появления деформации в данной области ядер. Показано, что для ^{75}As наилучшее согласие с экспериментом наблюдается именно для этой модели.

Для ^{73}As сравнение схемы уровней с теоретическими расчётами было практически невозможно из-за отсутствия сведений о квантовых характеристиках уровней.

* Адрес: Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Ленинград, СССР.

** Адрес: Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków 23, Radzikowskiego 152, Poland.

Наиболее полно распад обоих изомеров $^{73}\text{Se} \rightarrow ^{73}\text{As}$ (7,2 час. и 41 мин.) исследован Марлоу и Фаас [6]. В работе измерен гамма-спектр при помощи Ge (Li) — детектора и спектр гамма-гамма-совпадений, что позволило построить схему уровней ^{73}As , в которой были размещены все наблюдаемые гамма-переходы. Результатам работы [6] не противоречат экспериментальные данные работ [7, 8].

Исследование генетической связи изомеров [6—8] показало, что изомер с $T_{1/2} = 7,2$ час. является основным состоянием ^{73}Se . Кониным и др. [9] показано, что мультипольность изомерного перехода типа ЕЗ и квантовые характеристики изомеров ^{73}Se : $7/2^+$ (7,2 час.) и $1/2^-$ (41 мин.).

В настоящей работе проведено измерение гамма-спектра и спектра конверсионных электронов с целью определения мультипольностей переходов, сопровождающих распад короткоживущего изомера ^{73m}Se (41 мин.) и квантовых характеристик уровней в ^{73}As .

Приготовление источника

Для измерений был использован источник ^{73m}Se , получаемый по реакции $^{70}\text{Ge}(\alpha, n) ^{73}\text{Se}$ на циклотроне ИЯФ в Кракове. Энергия альфа-частиц 28,3 Мэв. Мишенью служил обогащенный до 90% металлический ^{70}Ge предварительно полученный из Ge O_2 путём нагревания в парах водорода и осажденный на танталовую подложку. Источник ^{73m}Se получался из облученной германиевой мишени методом дисцилиции в вакууме с помощью установки, описанной в работе Гонсиор и др. [10]. Подложкой служила Al-фольга толщиной 2 мг/см². Этот способ позволял быстро получать тонкие препараты Se. Кроме ^{73}Se , в источнике были обнаружены небольшие примеси ^{72}Se , ^{72}As и ^{73}As , которые образовались по реакциям: $^{70}\text{Ge}(\alpha, 2n) ^{72}\text{Se} \rightarrow ^{72}\text{As}$, $^{70}\text{Ge}(\alpha, pn) ^{72}\text{As}$ и $^{70}\text{Ge}(\alpha, p) ^{73}\text{As}$. Измерения начинались через 15—20 мин. после конца облучений.

Аппаратура для измерений

Спектр конверсионных электронов был измерен при помощи тороидального безжелезного бета-спектрометра [11]. Измерения проводились в двух режимах: при максимальной светосиле 20% соответствующее значение разрешения составляло 1% и при наилучшем разрешении 0,3% соответствующее значение светосилы составляло 7%. Спектр регистрировался автоматически 512-канальным амплитудным анализатором типа NTA, используемым как многоканальный счётчик. Время измерения каждой точки составляло 1—10 сек. Калибровка спектрометра по энергии и интенсивности осуществлялась с помощью источников ^{75}Se и ^{137}Cs .

Гамма-спектр ^{73m}Se измерялся на Ge(Li) детекторе объёмом 13 см³ с разрешением 3,5 кэв на гамма-линии 662 кэв ^{137}Cs . Калибровка детектора по энергии и определение его эффективности проводились с использованием препаратов ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{65}Zn и ^{76}Se .

Результаты измерений

Для исследования конверсионного спектра ^{73}mSe было сделано 6 облучений, с каждым источником проводилось 3—5 серий измерений во всём диапазоне энергий. Весь исследуемый диапазон энергий был разделён на три интервала: области энергий 20—200 кэв, 200—700 кэв и 600—1200 кэв. Одна из серий измерений спектра конверсионных электронов ^{73}mSe приведена на рис. 1—4. По оси абсцисс отложено значение номера канала амплитудного анализатора NTA-512, которое линейно зависит от $\beta\rho$. В области энергий выше 700 кэв не было обнаружено кон-

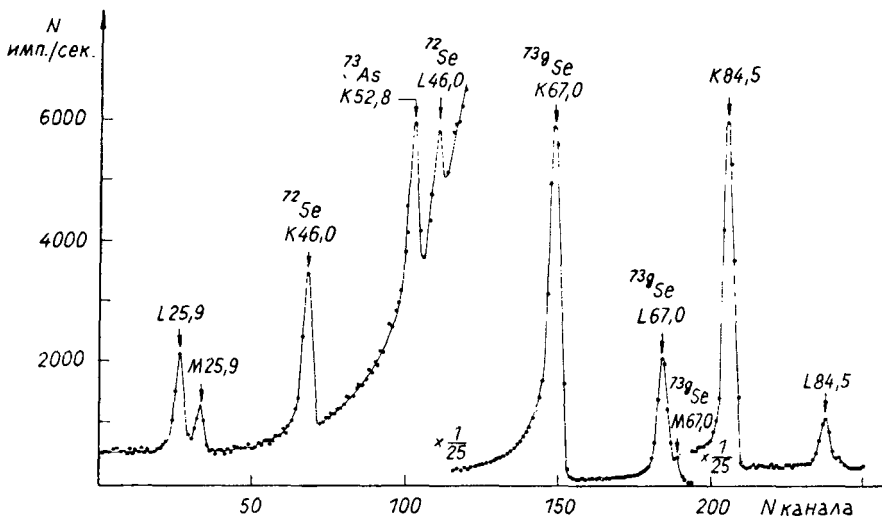


Рис. 1. Спектр конверсионных электронов в области энергии 20—85 кэв

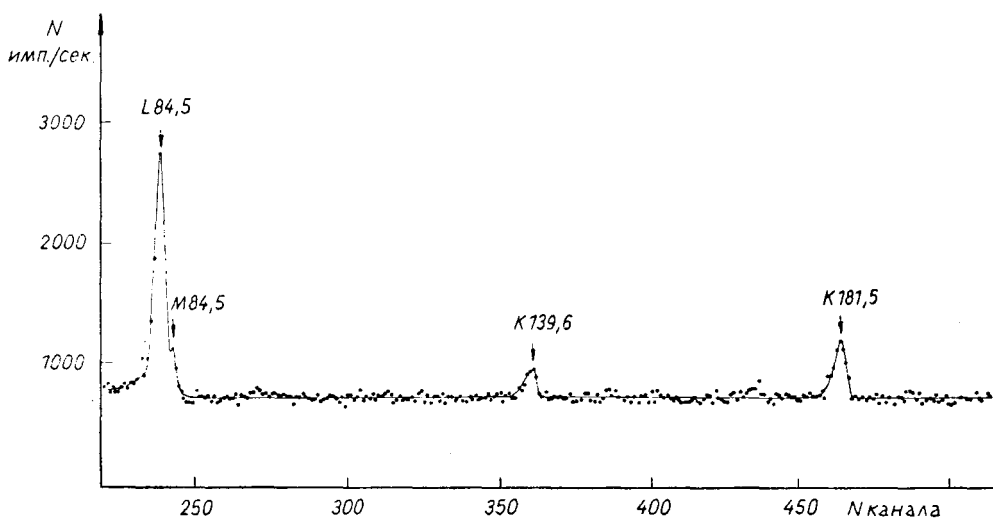


Рис. 2. Спектр конверсионных электронов в области энергии 80—200 кэв

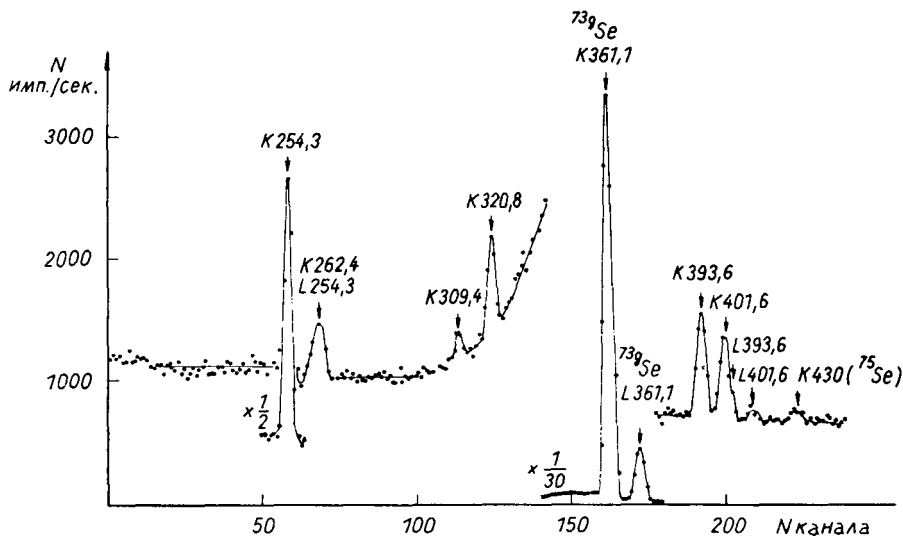


Рис. 3. Спектр конверсионных электронов в области энергии 200—440 кэв

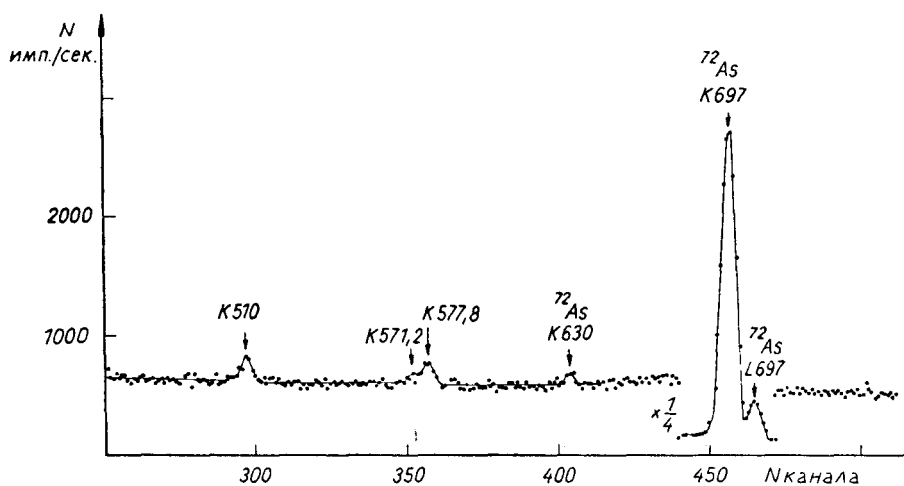


Рис. 4. Спектр конверсионных электронов в области энергии 440—700 кэв

версионных линий, принадлежащих ^{73m}Se , поэтому эта область энергий на рисунках не приведена.

В спектре конверсионных электронов наблюдались линии от 12 переходов по энергии совпадающих с известными из литературы переходами ^{73}Se [6, 7]. Их интенсивность спадала с периодом полураспада ~ 41 мин. Значения относительных интенсивностей конверсионных линий даны в таблице I; энергии переходов приведены по работе [6], так как погрешность определения энергий в этой работе наименьшая.

ТАБЛИЦА I

Интенсивности конверсионных линий и мультипольности переходов

№ №	Е, кэв [6]	I_l , отн.	I_γ , отн. [6]	α_i , эксп.	Мультипольность переходов
1	2	3	4	5	6
1	L26,5	1600 ± 400	—	$L/M = 4,0 \pm 1,0$	E3
	M26,5	400 ± 80		(4,29 теор)	
2	K84,5	1300 ± 50	79 ± 4	$1,31 \cdot 10^{-1}$	M1
	(L + M) 84,5	220 ± 40		$(2,2 \pm 0,5) 10^{-2}$	
3	K139,6	29 ± 4	$2,4 \pm 1,2$	$(9,6 \pm 4,8) 10^{-2}$	M1 + E2
4	K181,5	56 ± 5	12 ± 3	$(3,7 \pm 1,0) 10^{-2}$	M1 + E2
5	K254,3	100	100	$(8,0 \pm 0,8) 10^{-3}$	M1 (+E2)
6	K262,4 + L254,3	19 ± 2			
	L254,3	10,5			
	K262,4	$8,5 \pm 1,2^1)$	$4,8 \pm 1,0$	$(1,4 \pm 0,4) 10^{-2}$	M1 + E2
7	K309,4	$6,8 \pm 1,0$	$6,2 \pm 1,9$	$(8,7 \pm 3,0) 10^{-3}$	M1 + E2
8	K320,8	$19,6 \pm 1,0$	36 ± 4	$(4,3 \pm 0,5) 10^{-3}$	M1
9	K393,6	30 ± 2	69 ± 3	$(3,5 \pm 0,4) 10^{-3}$	M1 + E2
10	K401,6 + L393,6	24 ± 2			
	393,6	3,0			
	K401,6	$21 \pm 3^2)$	54 ± 3	$(3,1 \pm 0,5) 10^{-3}$	M1 + E2
11	K510	$11,3 \pm 1,3$	(1680 ± 200)	$(5,4 \pm 0,8) 10^{-5}$	—
12	K571,2 + K577,8	$14,6 \pm 2,7$			
	K571,2	$3 \pm 1,8$	$10,1 \pm 0,8$	$(2,9 \pm 1,5) 10^{-3}$	(E2, E1 + M2)
	K577,8	$10,8 \pm 2,2$	43 ± 3	$(2,1 \pm 0,5) 10$	(E2, E1 + M2)
	K361,1	4800 ± 200	$2100 \pm 250^3)$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	M2
	L361,1	570 ± 40		$(1,28 \pm 0,20) 10^{-3}$	

Примечание: ¹⁾ 254,3 кэв и ²⁾ 393,6 кэв: Значения интенсивностей конверсионных линий вычислены по мультипольности переходов; ³⁾ Наши данные

Погрешность значений относительных интенсивностей линий L26,5 и M26,5 кэв ($\sim 25\%$) определяется в основном погрешностью эффективности детектора спектрометра в данной области энергий. Линии K262,4 + 254,3 и K401,6 + 393,6 кэв не разделяются в спектре, поэтому интенсивности линий K262,4 и K393,6 кэв вычислены на основании мультипольности переходов 254,3 и 393,6 кэв, соответственно. Переход 510 кэв по периоду полураспада отнесён нами полностью к ^{73m}Se .

В исследуемом спектре ^{73}Se наблюдались также конверсионные линии от самых сильных переходов ^{73}Se (7,2 час.) 67,0 и 361,1 кэв.

Результаты измерения гамма-спектра в сравнении с данными работ [6, 7] приведены в таблице II. Из таблицы II видно, что результаты трёх работ в пределах погрешности согласуются друг с другом. Наиболее полной и точной является работа [6], и при определении коэффициентов конверсии использовались результаты этой работы.

В таблицах I и II даны значения интенсивностей линий присутствующего в исследуемом источнике долгоживущего изомера ^{73g}Se : K, L361,1 и γ 361,1 кэв,

ТАБЛИЦА II

Интенсивности гамма-лучей

№ №	<i>E</i> кэВ [6]	Наши данные	Муррей и др. [7]	Марлоу и др. [6]
1	2	3	4	5
1	84,5	71—10	92 ± 7	79 ± 4
2	139,6	—	—	$2,4 \pm 1,2$
3	181,5	20 ± 6	17 ± 4	12 ± 3
4	254,3	100	100	100
5	262,4	—	—	$4,8 \pm 1,0$
6	309,4	—	—	$6,2 \pm 1,9$
7	320,8	33 ± 7	42 ± 3	36 ± 4
8	393,6	69 ± 10	84 ± 6	69 ± 3
9	401,6	54 ± 10	64 ± 4	54 ± 3
10	510	—	—	1680 ± 200
11	571,2	—	—	$10,1 \pm 0,8$
12	577,8	63 ± 15	46 ± 4	41 ± 3
13	769,8	12 ± 4	$8,3 \pm 1,5$	$5,4 \pm 1,8$
14	850,5	7 ± 2	12 ± 2	$9,9 \pm 1,3$
15	1078,1	24 ± 5	29 ± 2	25 ± 2
16	361,1	2100 ± 250	—	—

соответственно. Эти значения были использованы для определения абсолютных значений коэффициентов конверсии переходов ^{73m}Se . Интенсивности К, L361,1 и γ 361,1 кэВ были приведены по времени к началу измерений конверсионного и гамма-спектров ^{73m}Se , соответственно.

Мультипольности переходов

Абсолютные значения коэффициентов внутренней конверсии переходов ^{73m}Se вычислены в предположении, что переход 84,5 типа M1.

Сравнение экспериментальных и теоретических значений КВК демонстрируется на рис. 5. Выводы о мультипольности переходов приведены в последней колонке таблицы I. Видно, что почти все наблюдаемые переходы типа M1+E2. Для перехода 26,5 кэВ дано отношение $L/M = 4,0 \pm 1,0$, что хорошо согласуется с теоретическим значением (4,29) для E3-переходов в согласии с измерениями работы [9].

При определении абсолютных значений КВК учтены только статистические ошибки и погрешность к калибровке спектрометров. Небольшая примесь E2-компоненты в переходе 84,5 кэВ приведёт к увеличению коэффициентов конверсии, что существенно не изменит выводов о мультипольности переходов. Но по этой причине погрешность может быть больше приведённой в таблице I. Большая примесь E2-компоненты в переходе 84,5 кэВ кажется маловероятной.

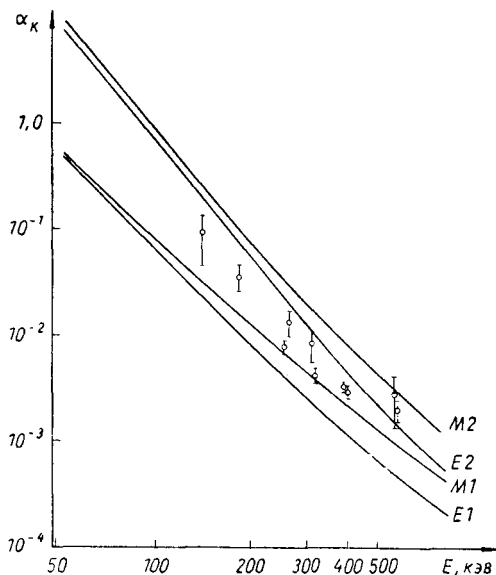


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений коэффициентов К-конверсии с теоретическими [12]

Следует отметить, что другие предположения о мультипольности перехода 84,5 кэВ (типа E1 и др.) приводят к противоречиям в схеме уровней ^{73}As . Кроме того, полученные нами результаты (табл. I) в пределах погрешностей не противоречат значениям α_i , вычисленным в предположении, что переход 361,1 кэВ (^{73}gSe) типа M2 [8].

Схема распада ^{73m}Se

Как уже отмечалось, квантовые характеристики короткоживущего изомера ^{73m}Se равны $1/2^-$ и долгоживущего ^{73}gSe — $7/2^+$ [6—9]. Схемы распада ^{73m}Se предложены в двух работах [6, 7] и несколько различаются между собой.

В работе [6] проведены измерения гамма-спектра и спектра гамма-гамма-совпадений при помощи Ge(Li)-детекторов объемом 20 см³ и 30 см³ и кристалла NaJ(Tl). В работе [7] измерен только гамма-спектр на Ge(Li)-детекторе 20 см³. Марлоу и Фаас [6] наблюдали все гамма-переходы, обнаруженные в работе Муррей и др. [7], за исключением 833,3 и 900,1 кэВ и, кроме того, большое количество слабых переходов, которые в работе Муррей и др. [7] не были обнаружены. Кажется маловероятным, чтобы переходы такой большой интенсивности как $3,8 \pm 0,6$ (833,3 кэВ) и $1,5 \pm 0,8$ (900,1 кэВ) могли быть не замечены в работе Марлоу и Фаас [6]. Не исключено, что переход 833,3 кэВ принадлежит распаду ^{72}As , который возникает в источнике ^{73}Se в качестве примеси. Вопрос о принадлежности переходов 833,3 и 900,1 кэВ распаду ^{73m}Se нуждается в дополнительном исследовании. За исключением этих двух переходов, все остальные могут быть размещены в схеме, предложенной Марлоу и Фаас [6], на основании баланса энергий и интенсивностей

гамма-переходов и измерений гамма-гамма-совпадений. Эта схема является более полной и обоснованной, чем схема, предложенная в работе Муррей и др. [7] только на основании энергетического баланса.

К настоящему времени известны квантовые характеристики трёх уровней ^{73}As : основного состояния — $3/2^-$, первого возбуждённого уровня 67 кэВ — $5/2^-$ и уровня 428 кэВ — $9/2^+$ [6—8]. Квантовые характеристики остальных уровней до

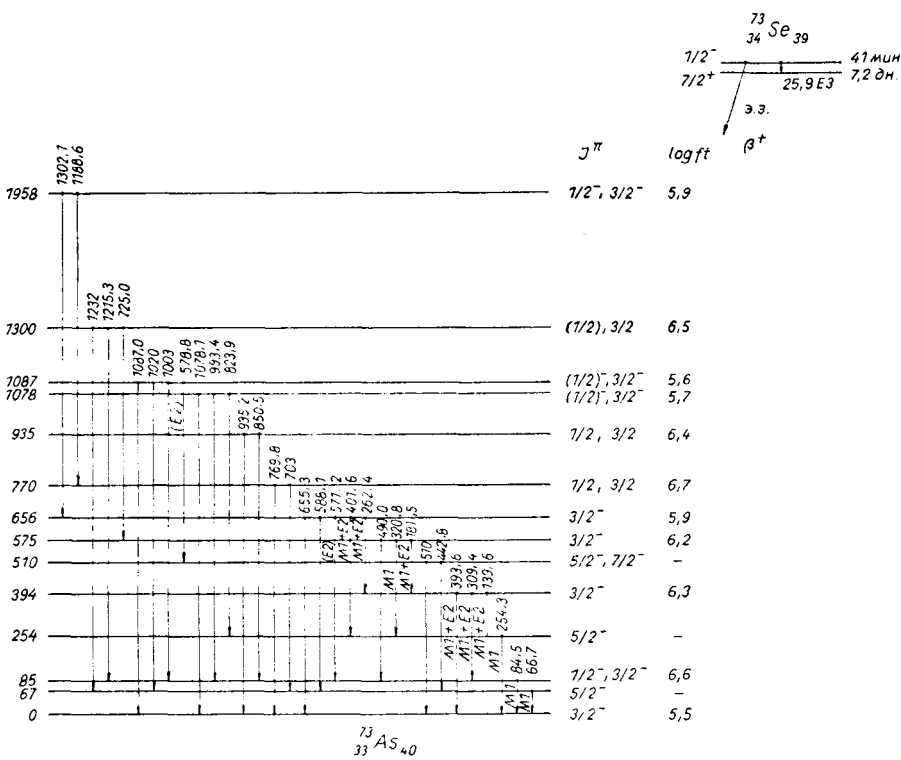


Рис. 6. Схема распада ^{73m}Se

сих пор не были известны. Используя полученные в нашей работе значения мультипольностей переходов, $\log ft$ и интенсивности гамма-переходов из работы [6], мы определили возможные значения спинов и чётностей уровней ^{73}As , возникающих при распаде короткоживущего изомера ^{73m}Se . Схема распада ^{73m}Se представлена на рис. 6. Для большинства уровней значения J^π определены неоднозначно, и для получения однозначных результатов необходимо измерение мультипольности слабых переходов, не наблюдаемых в нашей работе.

Сравнение с теорией

На рис. 7 приведена схема уровней ^{73}As , возникающих при распаде обоих изомеров ^{73}Se . Квантовые характеристики уровней ^{73}As из распада ^{73g}Se определены на основе $\log ft$ и соотношения интенсивностей гамма-переходов из работы

[6]. На том же рисунке для сравнения приведены результаты теоретических расчётов по работам Кисслингера и Соренсона [1], Кумара и др. [2, 4] и Иманиши и др. [5].

Из сравнения видно, что расчёты Кисслингера и Кумара [4] лучше всего воспроизводят схему самых нижних уровней ^{73}As . Однако экспериментальное значение энергии уровня $9/2^+$ на ~ 200 кэВ ниже теоретического, а уровни с квантовыми

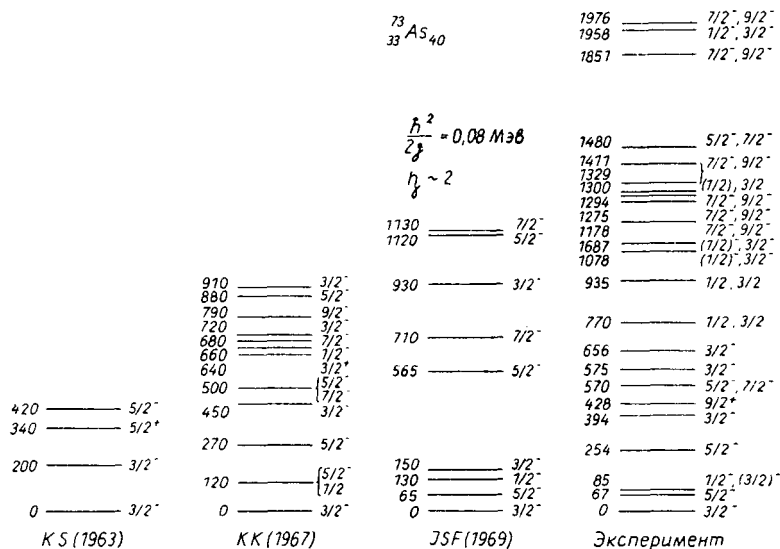


Рис. 7. Сравнение экспериментальных значений энергии ^{73}As с теоретическими по работам Кисслингера и Соренсона (к) [1], Кисслингера и Кумара (КК) [4] и Иманиши и др. (JSF) [5]

характеристиками $5/2^-$, $7/2^-$ и $9/2^-$ экспериментально наблюдаются на 400—500 кэВ выше, чем ожидается по этим расчётам.

Расчёты Иманиши и др. [5] значительно хуже согласуются с экспериментом. В этой работе проведён учёт деформации ядра. Энергии уровней ^{73}As рассчитываются в зависимости от параметра деформации η для двух значений момента инерции $\hbar^2/2J = 0,06$ и $0,08$ МэВ. Значения $\hbar^2/2J$ взяты по аналогии с соседними изотопами мышьяка, поскольку экспериментальные данные об энергии и квантовых характеристиках уровней ^{73}As к моменту проведения расчётов отсутствовали и для ^{75}As не было возможности определить экспериментальные значения параметров $\hbar^2/2J$ и η . Не исключено, что если провести расчёт схемы уровней ^{73}As с учётом полученных экспериментальных данных, согласие с опытом будет значительно лучше.

На рис. 8 приведены схемы уровней соседних изотопов мышьяка ^{71}As [13], ^{73}As (по данным этой работы), ^{75}As [14] и ^{77}As [15]. Наименее исследованными являются схемы ^{71}As и ^{77}As . В схемах изотопов ^{37}As , ^{75}As и ^{77}As проявился уровень $9/2^+$. Любопытно отметить, что распад $7/2^+ \rightarrow 9/2^+$ ^{73}As характеризуется очень малым зна-

чением $\log ft = 5,0$ [6], характерными для переходов между уровнями — членами спин-орбитального дублета.

Из анализа экспериментальных данных по четырём изотопам мышьяка ясно, что для того, чтобы сделать общие выводы об этой группе нечётных ядер, необходимо провести теоретические расчёты по работе [5] для ^{73}As и исследовать более детально изотопы ^{71}As и ^{77}As .

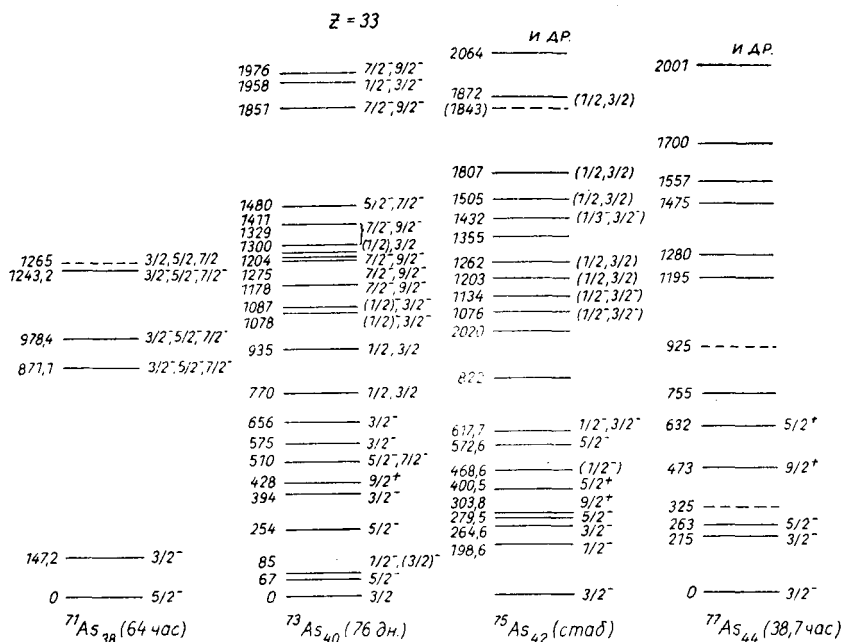


Рис. 8. Схемы уровней ^{71}As [13], ^{73}As , ^{75}As [14] и ^{77}As [15]

Авторы хотят выразить благодарность д-р М. Рыбицкой и д-ру Е. Гольчевскому за помощь при измерении спектра гамма-лучей. Авторы искренне благодарят проф. Д. Каминкера, д-ра Е. Григорьеву и д-ра Л. Пекера за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. S. Kisslinger, R. A. Sorensen, *Rev. Mod. Phys.*, **35**, 853 (1963).
- [2] M. Baranger, K. Kumar, *Phys. Rev. Letters*, **17**, 1146 (1966); *Nuclear Phys.*, **A92**, 608 (1967).
- [3] W. Sholz, F. B. Malik, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **12**, 66 (1967).
- [4] L. S. Kisslinger, K. Kumar, *Phys. Rev. Letters*, **19**, 1239 (1967).
- [5] N. Imanushi, M. Sakisaka, F. Fukusawa, *Nuclear Phys.*, **A125**, 626 (1969).
- [6] K. W. Marlow, A. Faas, *Nuclear Phys.*, **A132**, 339 (1969).
- [7] G. Murray, W. J. K. White, J. C. Willmott, R. F. Entwistle, *Nuclear Phys.*, **A130**, 563 (1969).
- [8] *Nuclear Data B*, v. 1 № 6 (1966).
- [9] J. Konijn, B. Klank, D. L. Spenny, R. A. Ristinen, *Nuclear Phys.*, **A138**, 577 (1969).

- [10] M. Gąsior, H. I. Lizurej, H. Niewodniczański, A. W. Potempa, *Report No 584/PL*, IFJ, Kraków 1967; *Nukleonika*, **13**, 635 (1968) (in Polish).
- [11] M. Gąsior, *Postępy Techniki Jądrowej*, **9-10**, 859 (1964) (in Polish).
- [12] R. S. Hager, E. C. Seltzer, *Nuclear Data*, v. 4, № 1-2 (1968).
- [13] L. Broman, B. Rosner, *Nuclear Phys.*, **A114**, 237 (1968);
Ulrich Frhr. v. Himdelhausen, *Z. Phys.*, **225**, 125 (1969).
- [14] T. Paradellis, S. Hontzeas, *Nuclear Phys.*, **A131**, 378 (1969).
M. Gąsior, H. Niewodniczański, A. Potempa, *Report No 492/PL*, IFJ, Kraków 1966;
R. Morch, O. Shahal, *Phys. Rev.*, **188**, 1765 (1969);
- [15] *Nuclear Data B*, v. 1, № 4 (1966).