

31. Oganessian Yu. e.a. «Nucl. Phys.», 1976, v. A273, p. 505.
32. Flerov G. e.a. Ibid., v. A267, p. 359.
33. Волков В. В. «ЭЧАЯ», 1971, т. 2, вып. 2, с. 287.
34. Волков В. В. Там же, 1975, т. 6, вып. 4, с. 1040.
35. Карнаухов В. А. Там же, 1973, т. 4, вып. 4, с. 1018.
36. Bogdanov D. e.a. «Nucl. Phys.», 1977, v. A275, p. 229.
37. Каун К. Г. В кн.: Труды Междунар. школы-семинара по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов. ОИЯИ Д7-9734. Дубна, 1976, с. 245.
38. Флеров Г. Н. В кн.: Труды V Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1977.
39. Флеров Г. Н. Препринт ОИЯИ P7-7551. Дубна, 1973.
40. Whitehouse W., Galbraith W. «Nature», 1952, v. 169, p. 494.
41. Seaborg G. «Phys. Rev.», 1952, v. 85, p. 157.
42. Oganessian Yu. e.a. «Nucl. Phys.», 1975, v. A239, p. 157.
43. Myers W., Swiatecki W. Ibid., 1966, v. 81, p. 1.
44. Johansson S. Ibid., 1959, v. 12, p. 449.
45. Johansson S. Ibid., 1961, v. 22, p. 529.
46. Поликанов С. М. и др. «ЖЭТФ», 1962, т. 42, с. 1464.
47. Поликанов С. М. Изомерия формы атомных ядер. М., Атомиздат, 1977.
48. Флеров Г. Н., Друин В. А. В сб.: Структура сложных ядер. М., Атомиздат, 1966, с. 249.
49. Strutinsky V. «Nucl. Phys.», 1967, v. A95, p. 420; 1968, v. A122, p. 1.
50. Brack M. e.a. «Rev. Mod. Phys.», 1972, v. 44, p. 320.
51. Музычка Ю. А., Пашкевич В. В., Стругинский В. М. Препринт ОИЯИ P7-3733. Дубна, 1968.
52. Nilsson S. e.a. «Nucl. Phys.», 1968, v. A115, p. 542.
53. Nilsson S., Thompson S., Tsang S. Preprint UCRL-18531, Berkeley, California, 1968.
54. Ledergerber T., Pauli H. «Nucl. Phys.», 1973, v. A207, p. 1.
55. Randrup J. e.a. Ibid., v. A217, p. 221.
56. Randrup J. e.a. «Phys. Rev.», 1976, v. C13, p. 229.
57. Sobiczewski A. «Physica Scripta», 1974, v. 10A, p. 47.
58. Seeger P., Fowler W., Clayton D. «Astrophys. J. Suppl.», 1965, v. 11, p. 121.
59. Берлович Э. Е., Новиков Ю. Н. «Письма в ЖЭТФ», 1969, т. 9, с. 445.
60. Schramm D., Fowler W. «Nature», 1971, v. 231, p. 103.
61. Silvestro G. «Lett. Nuovo Cimento», 1969, v. 2, p. 771.
62. Kowalski M., Kuchowich B. «Phys. Lett.», 1969, v. 30B, p. 79.
63. Flerov G. In: Proc. 4th Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1972. V. 7. Vienna, IAEA, 1972, p. 471.
64. Flerov G. In: Proc. of the Intern. Conf. on Reactions between Complex Nuclei V.2, Nashville, USA, 1974, p. 459.
65. Herrmann G. Int. Rev. of Science. Ser. 2 — Inorganic Chemistry, v. 8 — Radiochemistry, p. 221, 1975. University Park Press, Baltimore.
66. Флеров Г. Н. и др. «Ядерная физика», 1977, т. 26, вып. 3, с. 449.
67. Звара И и др. Там же, с. 455.
68. Флеров Г. Н. Сверхтяжелые элементы. Докл. на Междунар. конф. по ядерной структуре. Токио, сентябрь 1977.
69. Флеров Г. Н. Препринт ОИЯИ P7-9956. Дубна, 1976.
70. Oganessian Yu. «Nukleonika», 1977, v. 22, N 1, p. 89.
71. Kalpakchieva R. e.a. JINR Preprint E7-10587, Dubna, 1977.
72. Kalpakchieva R., Oganessian Yu., Penionzhkevich Yu., Soban H. «Zeitschrift für Physik», 1977, v. A283, N 3, p. 253.
73. Карамян С. А., Меликов Ю. В., Тулинов А. Ф. «ЭЧАЯ», 1973, т. 4, вып. 2, с. 456.
74. Кузнецов В. И., Скобелев Н. К., Флеров Г. Н. «Ядерная физика», 1966, вып. 4, с. 271.
75. Bowman C., Schröder I., Dick C., Jackson H. «Phys. Rev.», 1975, v. 12C, p. 863.
76. Жучко В. Е. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1975, т. 22, с. 255.

УДК 539.163.546.794

Изомеры в миллисекундной области

Ключарев А. П., Ремаев В. В., Ракивченко Ю. Н

Ядерная изомерия привлекала внимание исследователей на всех этапах изучения структуры атомного ядра. Интерес к исследованию изомерных ядер с принципиальной стороны связан с выяснением внутриядерных причин образования долгоживущих возбужденных состояний и определением степени запрета по соответствующему каналу распада; с методической стороны изомеры являются удобным объектом экспериментального изучения процессов, которые обычно протекают в ядре за очень короткое время. Кроме того, ядро в изомерном состоянии может существовать столь долго, что не исключается возможность практического использова-

ния изомеров с особыми, заданными свойствами.

Изучение изомерных состояний и их распада сыграло важную роль в формировании современных теоретических моделей атомных ядер. Роль эта широко известна: неравномерное распределение долгоживущих изомеров по N или Z (острова изомерии) согласуется с оболочечной структурой нуклонных одночастичных уровней в ядре, обобщенная модель ядра получила обоснование в существовании сильного запрета по асимптотическим квантовым числам, открытие делящихся изомеров предоставило уникальные возможности для исследования больших

деформаций ядер и в физике деления. В настоящее время интерес к исследованию изомеров не только растет, но и переносится на более глубокие явления: поиски изомеров плотности, изомеров вращения и др.

Широкие исследования изомерии ядер были начаты работами И. В. Курчатова, в которых впервые была установлена возможность возбуждения изомерных состояний в продуктах ядерных реакций [1]. История открытия изомерии искусственно-радиоактивных ядер описана в [2], там же и в [3] обсуждалось значение пионерских работ, выполненных в тридцатые годы в лаборатории И. В. Курчатова по развитию этого направления, и, в частности, отмечалось постоянное внимание Игоря Васильевича к этим работам в институтах нашей страны.

Исследования, выполненные И. В. Курчатовым по распаду изомера ^{80m}Br , можно считать началом еще одного важного направления в современной физике ядра — спектроскопии ядер с помощью ядерных реакций. Так, в работах по изучению ^{80m}Br было показано, что важным каналом распада изомерного состояния являются радиационные переходы в ядре или внутреннего конверсия электронов, и с помощью измерения коэффициентов внутренней конверсии была определена мультипольность изомерного перехода [4].

Ядерные реакции являются наиболее универсальными, а в настоящее время и основным способом исследования структуры возбужденных состояний ядер. Однако вследствие сложности излучения, сопровождающего распад образующихся в реакциях продуктов, спектроскопия в пучке бомбардирующих частиц представляет до сих пор сложную методическую проблему. До появления прецизионных полупроводниковых детекторов излучения спектроскопические исследования были возможны только в некоторых благоприятных случаях. Например, большие сечения (n, γ)-реакции на ряде редкоземельных изотопов позволили Л. В. Грошеву с сотрудниками выполнить большой цикл исследований в этой области; легкие ядра, имеющие относительно простую схему уровней, изучали в (p, γ)- и ($p, n\gamma$)-реакциях в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ), где Моринага эффективно использовал (α, xn)-реакции для исследования нижнего вращательного состояния в деформированных ядрах.

Поиски миллисекундных изомеров были начаты в середине 50-х годов по инициативе О. И. Лейпунского. Исследования проводили в Институте химической физики АН СССР на

пучке нейтронов с энергией 14 МэВ и в ХФТИ на линейном ускорителе протонов с максимальной энергией 20,8 МэВ. Вначале основное внимание было направлено на выяснение распространенности изомеров со временем жизни 10^{-4} — 10^{-1} с и вероятности их возбуждения в ядерных реакциях.

Было обнаружено большое число изомеров в миллисекундной области времени жизни, причем некоторые из них имели высокую энергию возбуждения, а следовательно, и достаточно высокий спин. Таким образом, представилась возможность изучать свойства возбужденных состояний ядер в области малодоступной при исследовании радиоактивного распада изотопов.

Методика измерений. Для исследования ядер, имеющих период полураспада $T_{1/2} = 10^{-6} \div 1,0$ с, активационный метод или метод задержанных совпадений неприменимы. В этом случае оказался эффективным метод импульсного облучения мишеней с регистрацией исследуемого излучения в интервалах между токовыми посылками ускорителя.

В настоящей работе были использованы линейные ускорители протонов с энергией $E_p = 20,8$ МэВ и α -частиц с $E_\alpha = 38$ МэВ. Частота следования импульсов обоих ускорителей составляет 2 имп./с при длительности импульса ~ 500 мкс. Такой режим облучения мишеней обеспечивал высокую избирательность к выделению спектра распада миллисекундных изомеров из интенсивного и сложного γ -излучения, сопровождающего распад продуктов реакций с протонами и α -частицами при этих энергиях. «Мгновенное» излучение с мишени исключалось блокировкой детектора и регистрирующей аппаратуры на время облучения, а вклад от радиоактивного распада образующихся изотопов учитывали с помощью временного анализа спектров, чему способствовала величина периода полураспада фоновых активностей (> 1 с). Используемая техника позволяла изучать распад изомеров с сечением образования 1 мб и более на фоне активностей, для которых сечение возбуждения составляет 1 б.

На протонах и на пучке α -частиц были облучены все стабильные элементы от углерода до висмута, кроме благородных газов. Была получена необходимая для дальнейших исследований информация о фоновых условиях, связанных с применением различных конструктивных материалов на пути пучка вблизи детектора или с выбором химического соединения для мишеней, когда их не удавалось изготовить из чистого элемента. Кроме того, были подобра-

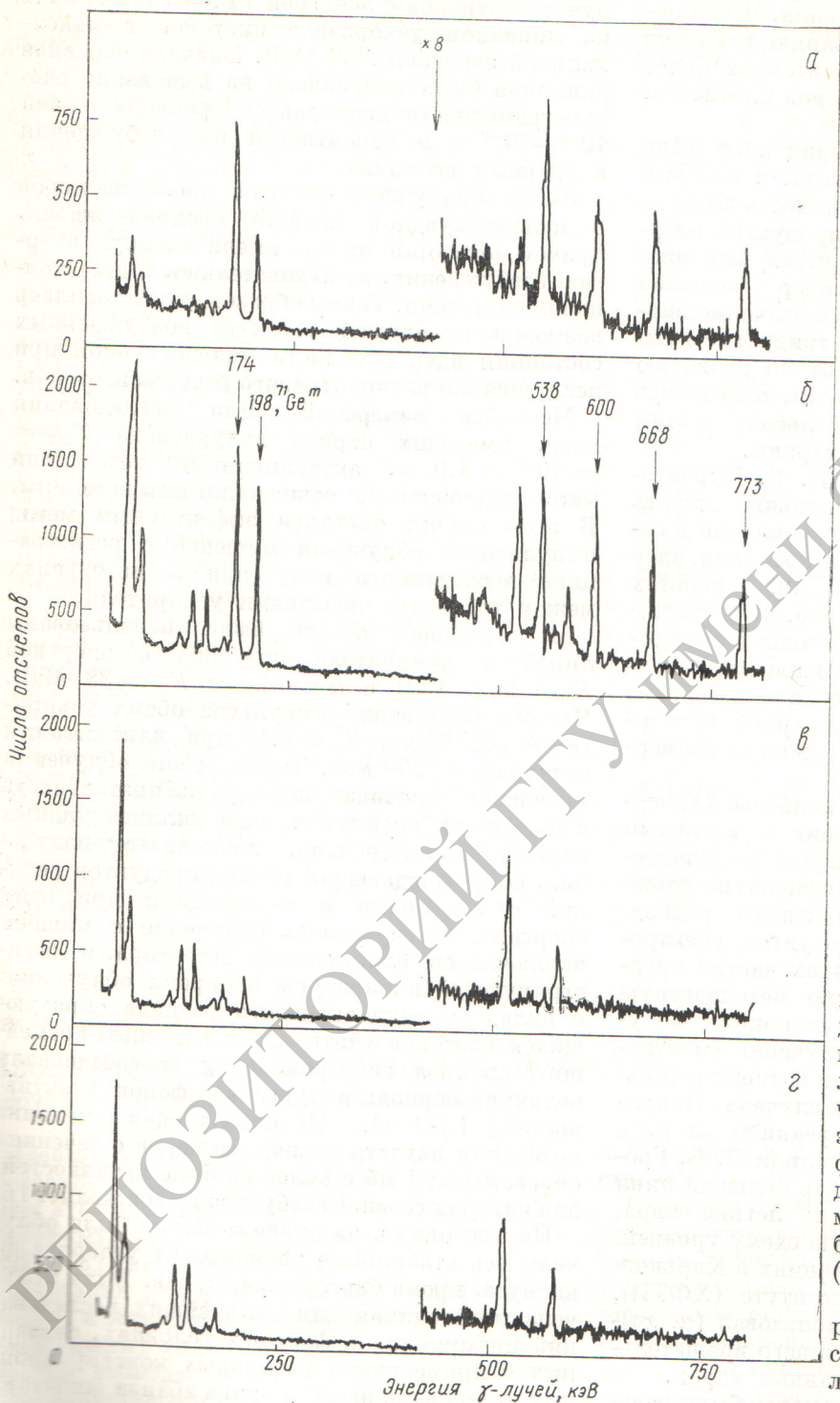


Рис. 1. Гамма-спектр распада миллисекундного изомера ^{132m}Xe ($T_{1/2} = 8,7$ мс).
Временной режим анализатора при длительности 6,4 мс (а) и 51,2 мс (б, в, г)

ны подходящие γ - и β -излучатели для энергетической калировки спектрометров. Основными реакциями возбуждения изомеров явились (p, n)-, ($p, 2n$)- и (p, pn)-реакции на протонах и ($\alpha, 2n$)- и ($\alpha, 3n$)-реакции на α -частицах.

Измерение спектра γ -лучей и электронов внутренней конверсии (ЭВК). Энергетический спектр γ -излучения исследовали с помощью скintилляционного NaI(Tl)- или полупроводникового Ge(Li)-спектрометра. Регистрирующей аппаратурой на разных этапах исследований служили одноканальный амплитудный анализатор импульсов АИ-100 (с разбиением каналов на две группы) и многомерный анализатор АИ-4096. Во всех случаях регистрацию проводили в двух или более временных интервалах. В первом интервале накапливался спектр изомерного γ -излучения плюс фон от долгоживущих активностей. Этот интервал следовал с некоторой заданной задержкой за токовым импульсом ускорителя с длительностью 2—5 периодов полураспада изомерной активности. В последующих интервалах (временных группах) регистрировали более долгоживущее излучение. Такая техника позволяла надежно исключить фоновое излучение или разделить спектры разных изомеров, одновременно возбуждающихся в мишени (рис. 1).

Спектры электронов внутренней конверсии изучали с помощью магнитных анализаторов: бета-спектрометра с улучшенной фокусировкой на пучке протонов [5] и безжелезного двухлинзового спектрометра типа «Апельсин»

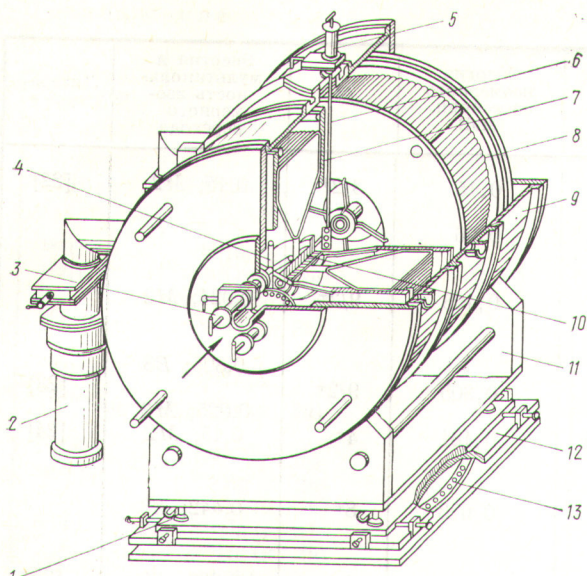


Рис. 2. Бета-спектрометр типа «Апельсин»:

1 — регулировка по высоте; 2 — диффузионные насосы; 3 — боковой вакуумный шлюз; 4, 6 — держатели мишеней; 5 — центральный вакуумный шлюз; 7 — каркасы линз; 8 — витки тороидальных линз; 9 — вакуумный кожух; 10 — защита из Рб; 11 — подставка; 12 — регулировка в горизонтальной плоскости; 13 — поворотная дорожка (стрелками указаны возможные варианты ввода пучка ускоренных частиц на мишень)

(светосила 20% от 4π) на пучке ионов гелия [6] (рис. 2). Последний спектрометр позволял измерять (e, e) - и (e, γ) -совпадения. Как и при исследовании γ -спектров, регистрацию электронов на бета-спектрометре проводили на протяжении двух временных интервалов для каждой точки спектра. Длительность экспозиции устанавливали по монитору тока пучка. Спектры ЭВК для изомеров церия приведены на рис. 3.

Периоды полураспада измеряли многоканальными временными анализаторами. При этом импульсы от гамма-детектора предварительно анализировали с помощью дифференциального анализатора, который настраивали на один из пиков в энергетическом спектре исследуемого изомера. В случае конверсионного спектра магнитный анализатор настраивали на одну из конверсионных линий.

Идентификация реакций, приводящих к изомерному ядру. Изотоп, ответственный за образование наблюдаемого изомерного состояния, определяли сравнением величины выхода данной активности из мишеней, обогащенных различными изотопами исследуемого элемента. Тип реакции, приводящей к изучаемому изомеру, был установлен по порогу реакции и виду

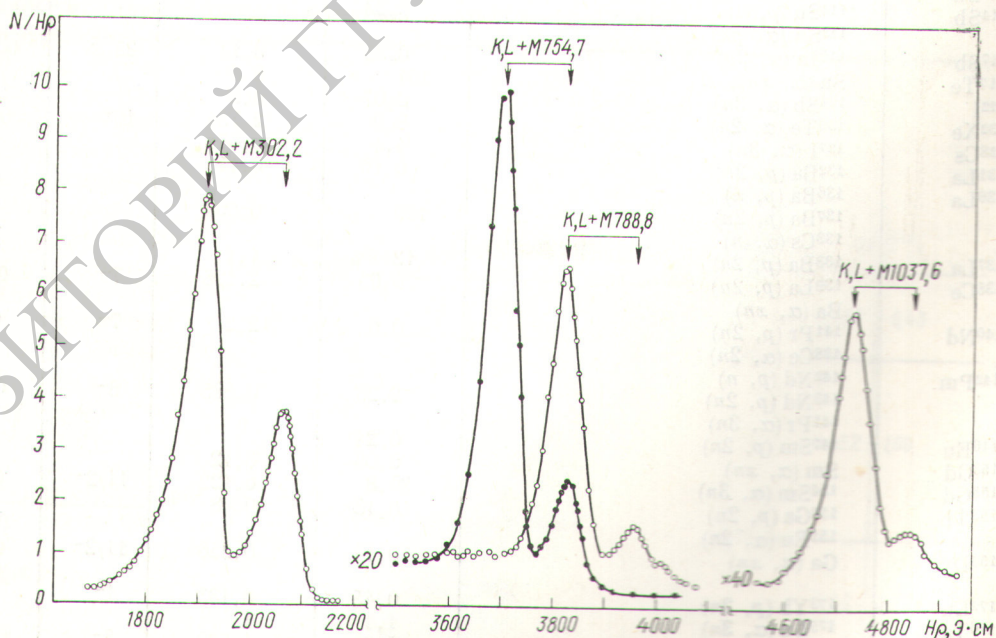


Рис. 3. Спектр ЭВК изомеров:

○ — ^{138m}Ce ($T_{1/2} = 8,6$ мс); ● — ^{139m}Ce ($T_{1/2} = 60$ с), полученный в реакции $(\alpha, 3n)$. Спектр ^{138m}Ce регистрировали во втором счетном интервале, отстоящем на 100 мс от импульса пучка и вычитали из показаний, зарегистрированных в первом счетном интервале, разном по длительности и отстоящем от токового импульса на 1 мс

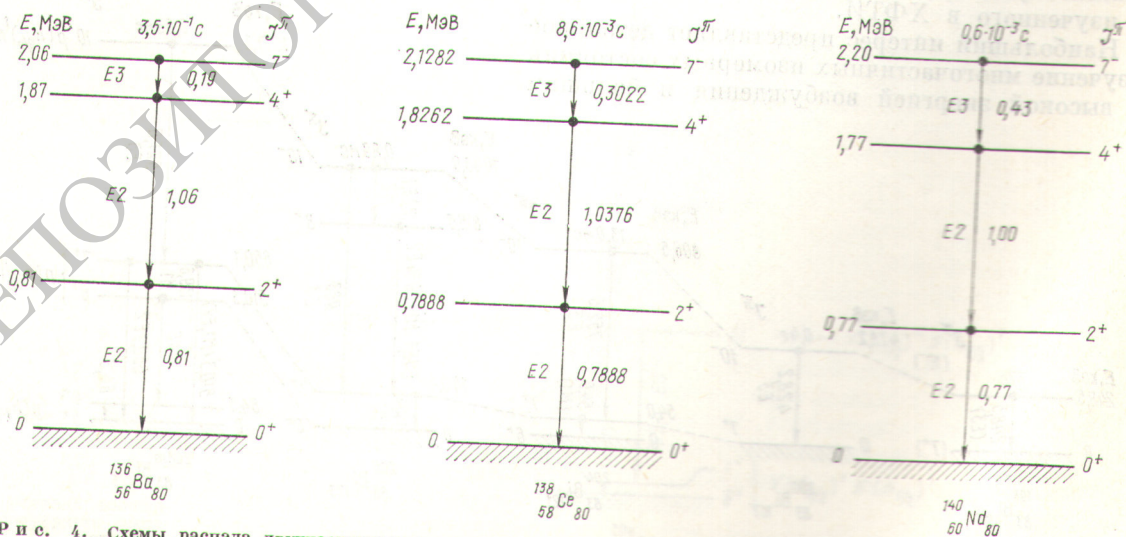
Таблица изомеров в области времени жизни $10^{-4} - 10^{-1}$ с

Изомер	Реакция	$T_{1/2}$, мс	Энергия изомерного состояния, МэВ	J π	Энергия и мультиполь- ность изо- мерного перехода	Литера- тура *
^{43}Sc	$^{41}\text{K} (\alpha, 2n)$	0,45	0,15	3/2 ⁺	0,15; M2	[22]
^{46}V	$^{40}\text{Ca} (\alpha, p)$					
^{71}Ge	$^{46}\text{Ti} (p, n)$	1,0	0,96			
	$^{71}\text{Ga} (p, n)$					
	$^{72}\text{Ge} (p, pn)$					
	$\text{Zn} (\alpha, xn)$					
^{75}As	$^{69}\text{Ga} (\alpha, pn)$	22,4	0,198	9/2 ⁺	0,024; M2	
	$^{72}\text{Ge} (\alpha, \alpha n)$					
	$^{76}\text{Ge} (p, 2n)$					
	$^{75}\text{As} (p, p')$					
^{78}Br	$^{75}\text{As} (\alpha, \alpha')$	17,1	0,305	9/2 ⁺	0,305; E3	[23]
$^{88m_1}\text{Y}$	$^{75}\text{As} (\alpha, n)$	0,145	0,181	4 ⁺	0,025; M2	
	$^{88}\text{Sr} (p, n)$				0,15; M2	[24]
	$^{89}\text{Y} (p, pn)$					
	$\text{Rb} (\alpha, xn)$					
	$^{86}\text{Sr} (\alpha, pn)$	14,8	0,673	8 ⁺	0,442; E3	
$^{88m_2}\text{Y}$	$^{89}\text{Y} (\alpha, \alpha n)$					
^{90}Nb	$^{87}\text{Rb} (\alpha, 3n)$					
	$^{90}\text{Zr} (p, n)$	0,3	0,393	1 ⁺	0,393; E3	[25]
	$^{89}\text{Y} (\alpha, 3n)$	6,5	0,382	1 ⁺	0,256; E3	
^{101}Tc	$^{98}\text{Mo} (\alpha, p)$					
^{103}Ru	$^{100}\text{Mo} (\alpha, n)$	0,8	0,19	5/2 ⁻	0,19; M2	[22]
	$^{104}\text{Ru} (\alpha, \alpha n)$	1,8	0,21			[22]
^{109}In	$^{107}\text{Ag} (\alpha, 2n)$					
^{114}In	$^{114}\text{Cd} (p, n)$	215	2,11	19/2 ⁺	0,68; M3	[26]
	$\text{Cd} (\alpha, xn)$	42	0,5	8 ⁻	0,311; E3	[24]
^{115}Sn	$^{116}\text{Sn} (\alpha, \alpha n)$	0,155	0,725	11/2 ⁻	0,107; M2	[27]
^{114}Sb	$^{114}\text{Sn} (p, n)$					
	$^{112}\text{Sn} (\alpha, pn)$	0,23				
^{117}Sb	$^{115}\text{In} (\alpha, 2n)$					
^{117}Te	$\text{Sn} (\alpha, xn)$	0,35	3,13	25/2 ⁺	0,058; M2	[28]
^{122}I	$^{121}\text{Sb} (\alpha, 3n)$	101	0,3			[29]
^{132}Xe	$^{130}\text{Te} (\alpha, 2n)$	0,07	0,5			
^{128}Cs	$^{127}\text{I} (\alpha, 3n)$	8,9	2,754	10 ⁺	0,537; E3	[30]
^{131}La	$^{132}\text{Ba} (p, 2n)$	4,4	0,071			
^{136}La	$^{136}\text{Ba} (p, n)$	0,16	0,17			
	$^{137}\text{Ba} (p, 2n)$					
	$^{133}\text{Cs} (\alpha, n)$	100	0,096			
^{137}La	$^{138}\text{Ba} (p, 2n)$					
^{138}Ce	$^{139}\text{La} (p, 2n)$	12	1,1	7 ⁻	0,302; E3	
	$\text{Ba} (\alpha, xn)$	8,65	2,126			
^{140}Nd	$^{141}\text{Pr} (p, 2n)$					
^{142}Pm	$^{138}\text{Ce} (\alpha, 2n)$	0,6	2,2	7 ⁻	0,43; E3	
	$^{142}\text{Nd} (p, n)$					
	$^{143}\text{Nd} (p, 2n)$					
^{146}Eu	$^{141}\text{Pr} (\alpha, 3n)$	2,28	0,885	8 ⁻	0,435; E3	
^{153}Gd	$^{147}\text{Sm} (p, 2n)$					
^{155}Gd	$\text{Sm} (\alpha, xn)$	0,24				
^{153}Tb	$^{154}\text{Sm} (\alpha, 3n)$	0,08	0,12			
	$^{154}\text{Ga} (p, 2n)$	30,8	0,122	11/2 ⁻	0,014; E1	[31]
	$^{151}\text{Eu} (\alpha, 2n)$	0,18	0,08			[31]
^{159}Dy	$\text{Ga} (\alpha, xn)$	0,14	0,356	11/2 ⁻	0,118; M1	
					0,218; E2	[32]
^{172}Lu	$^{173}\text{Yb} (p, 2n)$				0,09; M1	
^{176}Ta	$^{175}\text{Lu} (\alpha, 3n)$	0,45	0,133	1 ⁻	0,07; E1	
^{180}W	$^{181}\text{Ta} (p, 2n)$	1,1	1			
	$\text{Hf} (\alpha, xn)$	5,6	1,530	8 ⁻	0,39; E1	
^{183}Re	$^{181}\text{Ta} (\alpha, 2n)$	0,82	1,907	25/2 ⁺	0,194; E2	[33]
^{187}Os	$\text{W} (\alpha, xn)$	0,24	0,157	5/2 ⁺	0,157; M2	[34]

Продолжение

Изотоп	Реакция	$T_{1/2}$, мс	Энергия изомерного состояния, МэВ	J^π	Энергия и мультипольность изомерного перехода	Литература*
^{187}Ir	$^{188}\text{Os} (p, 2n)$ $^{185}\text{Re} (\alpha, 3n)$	30	0,187	$9/2^-$	0,187; $E3$ 0,077; $M2$	[35]
^{188}Ir ^{189}Ir	$^{187}\text{Re} (\alpha, 3n)$ $^{190}\text{Os} (p, 2n)$ $^{187}\text{Re} (\alpha, 2n)$	4,0 13,4	0,372	$11/2^-$	0,72; $M2$ 0,258; $E3$ 0,63; $M2$	
$^{192m1}\text{Au}$	$^{191}\text{Ir} (\alpha, 3n)$	32,5	0,135	5^+	0,103; $E3$ 0,06; $E3$	
$^{192m2}\text{Au}$ $^{194m1}\text{Au}$	$^{191}\text{Ir} (\alpha, 3n)$ $^{193}\text{Ir} (\alpha, 3n)$	164 600	0,431 0,092	11^- 5^+	0,011; $M2$ 0,056; $E3$ 0,07; $E3$ 0,382; $E3$	
$^{194m2}\text{Au}$ ^{199}Tl	$^{193}\text{Ir} (\alpha, 3n)$ $^{200}\text{Hg} (p, 2n)$ $^{197}\text{Au} (\alpha, 2n)$	39,2 27,8	0,46 0,749	11^- $9/2^-$	0,011; $M2$ 0,056; $E3$ 0,07; $E3$ 0,382; $E3$	
^{201}Tl	$^{201}\text{Hg} (p, n)$ $^{202}\text{Hg} (p, 2n)$	1,8	0,93	$9/2^-$	0,23; $M2$ 0,6; $E3$	
$^{204m1}\text{Bi}$ $^{204m2}\text{Bi}$	$^{203}\text{Tl} (\alpha, 3n)$ $^{203}\text{Tl} (\alpha, 3n)$	13	0,806 2,793	10^-	0,752; $E3$ 0,275; $E3$ 0,905; $E3$	
^{206}Bi ^{207}Bi	$^{205}\text{Tl} (\alpha, 3n)$ $^{205}\text{Tl} (\alpha, 2n)$	1,07 0,89 0,2	1,044 2,1	10^- $21/2^+$	0,743; $E3$ 0,456; $E3$ 0,58; $E3$	
$^{205m1}\text{Po}$ $^{205m2}\text{Po}$	$^{204}\text{Pb} (\alpha, 3n)$ $^{204}\text{Pb} (\alpha, 3n)$	57 0,64	1,46 0,88	$19/2^-$ $13/2^+$	0,161; $M2$	

* Ссылки даны на работы, в которых изотоп не обнаружен, а только изучен в ХФТИ.



Р и с. 4. Схемы распада двухчастичных изомерных состояний в четво-четных ядрах с числом нейтронов 80

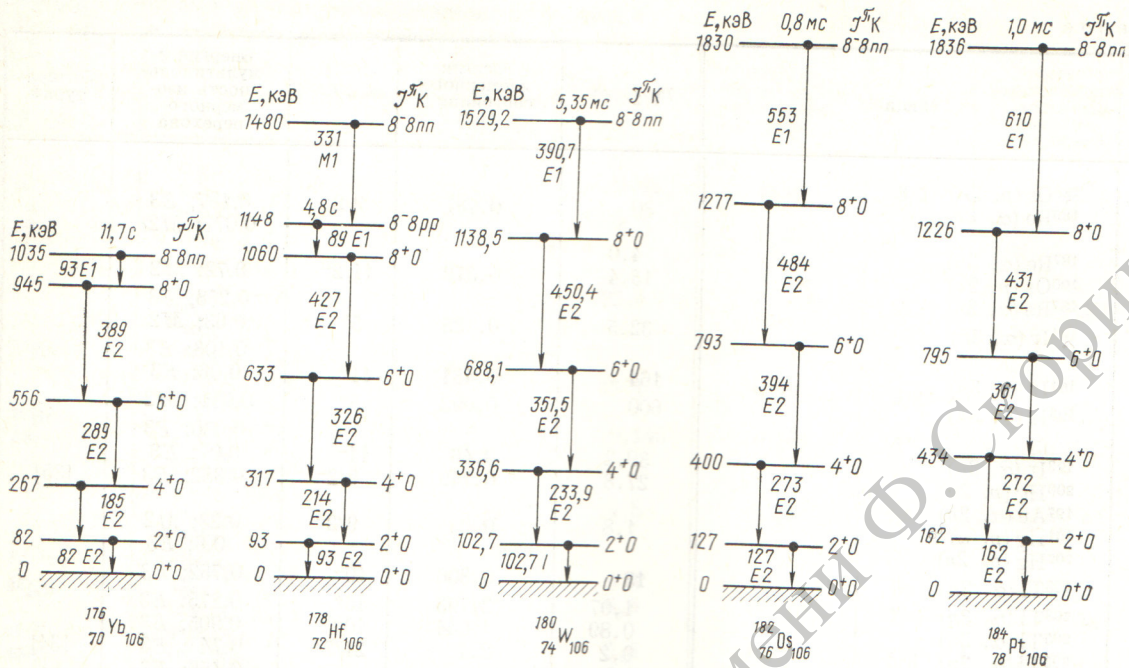


Рис. 5. Схемы распада двухчастичных изомерных состояний в четно-четных деформированных ядрах с числом нейтронов 106

функции возбуждения данной активности. Для некоторых изомеров порядковый номер элемента Z определяли по энергии рентгеновского K -излучения (методом поглощения в фильтрах [7]) или по разности энергий K - и L -конверсионных линий в спектре электронов.

В таблице суммированы результаты исследований ядерных изомеров со временем жизни миллисекундного диапазона, обнаруженного и изученного в ХФТИ.

Наибольший интерес представляет детальное изучение многочастичных изомерных состояний с высокой энергией возбуждения и большим

значением спина в связи с проблемой остаточного взаимодействия нуклонов в атомном ядре.

Проведенный анализ полученного экспериментального материала и результаты исследований других авторов позволили установить некоторые закономерности для отдельных групп ядер, примеры которых показаны на рис. 4—8.

Изомеры ^{136m}Ba [9], ^{138m}Ce и ^{140m}Nd [10] относятся к редкой группе изомеров в четно-четных

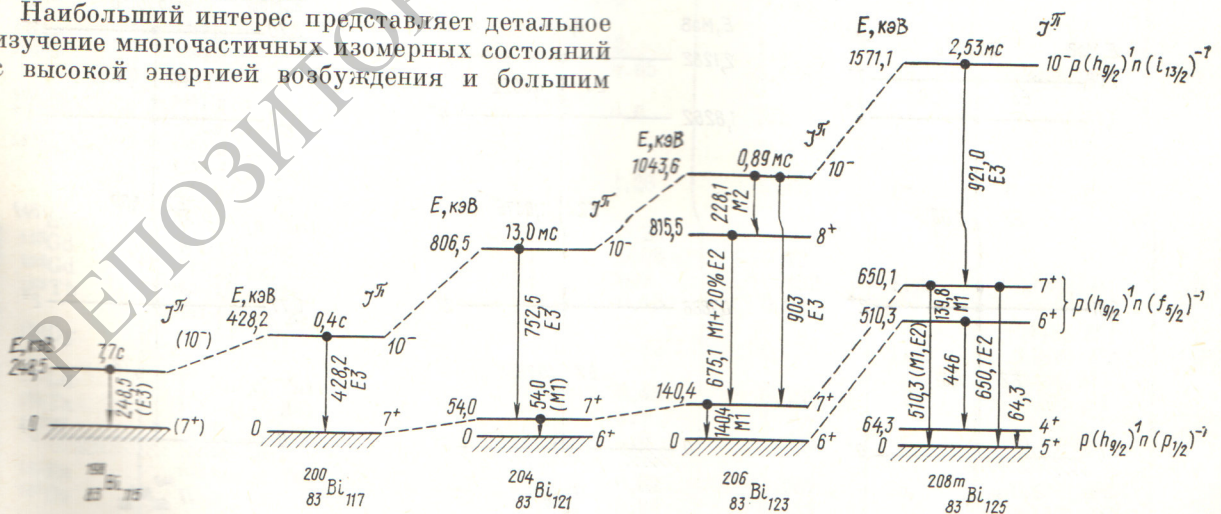
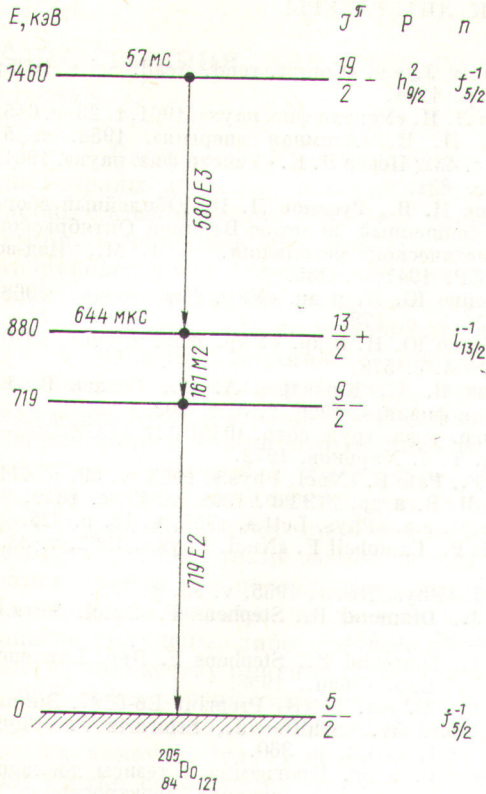
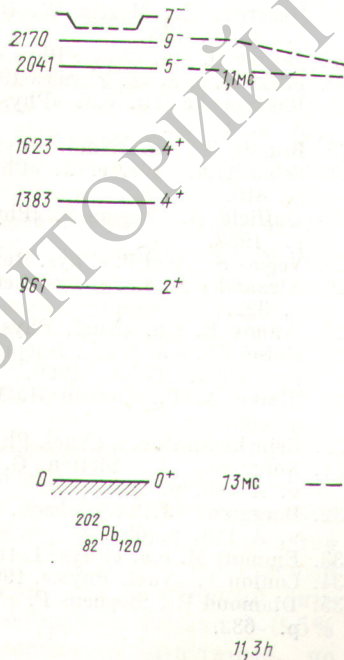


Рис. 6. Схемы распада двухчастичных изомерных состояний 10^- в нечетно-нечетных изотопах висмута



Р и с. 7. Схема распада изомерных состояний в ядре ^{205}Po

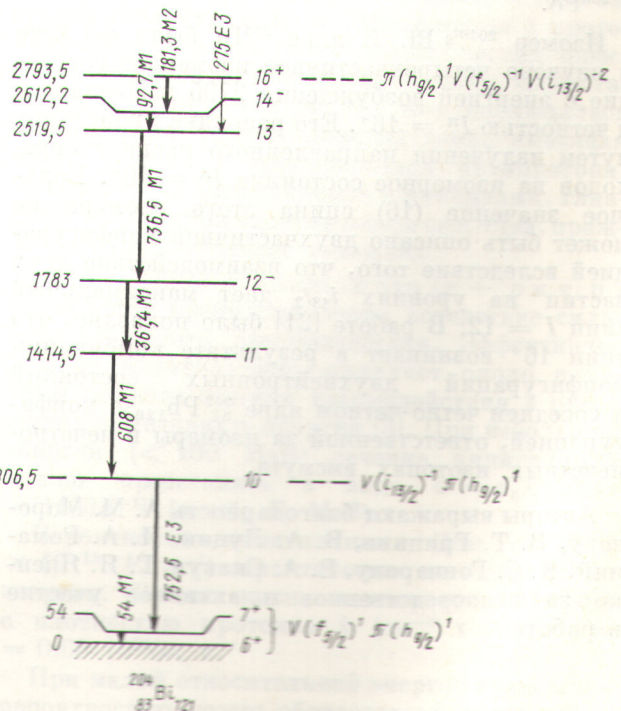


Р и с. 8. Схема распада высоко-спинового (16^+) изомерного состояния в ядре ^{204}Bi

ядрах. Они имеют относительно большую энергию возбуждения изомерного состояния ~ 2 МэВ, значение спина и четности $I^\pi = 7^-$ и распадаются электрическим октупольным переходом на коллективные уровни 4^+ (см. рис. 4). Появление таких уровней в четно-четных ядрах обусловлено разрывом пары нейтронов или протонов с образованием двухчастичного состояния. В этой области массовых чисел большой спин ядра может возникнуть в результате разрыва нейтронной пары, находящейся в состоянии $h_{11/2}$, когда один нейтрон переходит на уровень $d_{3/2}$. В этом случае спин изомерного состояния определится конфигурацией $n_1 (h_{11/2}) n_2 (d_{3/2})$.

Изомеры ^{176m}Yb [11], ^{178m}Hf [12], ^{180m}W [13], ^{182m}Os [14] и ^{184m}Pt [15] также относятся к группе двухчастичных состояний в четно-четных деформированных ядрах, образующихся разрывом нейтронной пары. Спин и четность изомерного уровня у них 8^- при $K = 8$, переход из которого на вращательную полосу основного состояния осуществляется излучением типа $E1$ сильнозаторможенным запретом по квантовому числу K (см. рис. 5).

Изомеры ^{204m}Bi и ^{206m}Bi . В нечетно-нечетных изотопах висмута с массовыми числами 204 и 206 в реакциях с α -частицами были обнаружены и изучены изомерные состояния со спином



и четностью $I^\pi = 10^-$, которым удалось приписать частично-дырочную конфигурацию $p (h_{9/2})^1 n (i_{13/2})^{-1}$. На рис. 6 кроме изомеров висмута представлены схемы распада изомеров ^{198m}Bi , ^{200m}Bi , ^{208m}Bi [16]. В работе [17] также были обнаружены изомерные состояния в ^{194m}Bi и ^{196m}Bi со значениями $I^\pi = 10^-$.

Остается неясной ситуация для ^{202}Bi , у которого до сих пор не обнаружено изомерного состояния с такими же характеристиками несмотря на то, что в ядре ^{201}Pb существует нейтронно-дырочное состояние $n (i_{13/2})^{-1}$.

Изотоп ^{205m}Po [18]. Трехчастичное изомерное состояние в ядре ^{205}Po с $T_{1/2} = 57$ мс изучено в реакции $^{204}\text{Pb} (\alpha, 3n) ^{205m}\text{Po}$. Это состояние с энергией возбуждения 1460 кэВ, спином и четностью $I^\pi = 19/2^-$ разряжается электрическим окупольным переходом на уровень 880 кэВ ($I^\pi = 13/2^+$), который является одночастичным изомерным состоянием с конфигурацией $n (i_{13/2})^{-1}$ [19].

Трехчастичные изомерные состояния в нечетных изомерах полония обусловлены комбинацией двухпротонного возбуждения остова ядра полония с однеитронными возбуждениями, известными в соответствующих изотопах свинца (изотопах полония). Такие состояния известны у ^{205}Po , ^{207}Po , ^{209}Po и ^{211}Po [20]. На рис. 7 приведена схема распада состояний в ^{205}Po .

Изотоп $^{204m_2}\text{Bi}$. В ядре ^{204}Bi было открыто и изучено четырехчастичное изомерное состояние с энергией возбуждения 2795 кэВ, спином и четностью $I^\pi = 16^+$. Его разрядка происходит путем излучения направленного каскада переходов на изомерное состояние $I^\pi = 10^-$. Большое значение (16) спина этого изомера не может быть описано двухчастичной конфигурацией вследствие того, что взаимодействие двух частиц на уровнях $i_{13/2}$ дает максимальный спин $I = 12$. В работе [21] было показано, что спин 16^+ возникает в результате комбинации конфигураций двухнейтронных состояний в соседнем четно-четном ядре $^{202}\text{Pb}_{120}$ с конфигурацией, ответственной за изомеры в нечетно-нечетных изотопах висмута.

Авторы выражают благодарность А. М. Морозову, В. Т. Грицине, В. А. Луцик, И. А. Романский, К. С. Гончарову, Е. А. Скакун, Г. Я. Яценко за непосредственное и активное участие в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurtchatov J. e. a. «Compt. rend. Acad. Sci.», 1935, v. 200, p. 1201.
2. Русинов Л. И. «Успехи физ. наук», 1961, т. 23, с. 615.
3. Русинов Л. И. «Атомная энергия», 1958, т. 5, вып. 5, с. 432; Пекер Л. К. «Успехи физ. наук», 1961, т. 23, с. 631.
4. Курчатов И. В., Русинов Л. И. Юбилейный сборник, посвященный 30-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Ч. 1. М., Изд-во АН СССР, 1947, с. 285.
5. Ракивненко Ю. Н. и др. «Укр. физ. журн.», 1968, т. 13, № 3, с. 478.
6. Ракивненко Ю. Н. и др. «Укр. физ. журн.», 1970, т. 15, № 4, с. 578.
7. Грицына В. Т., Ключарев А. П., Ремаев В. В. «Ядерная физика», 1966, т. 3, с. 993.
8. Библиогр. указ. труд. сотр. ФТИ АН УССР 1930—1971 гг. Т. 1. Харьков, 1972.
9. Ruddy F., Pate V. «Nucl. Phys.», 1965, v. 69, p. 471.
10. Ремаев В. В. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 43, с. 1649.
11. Vergnes M. e. a. «Phys. Lett.», 1965, v. 18, p. 325.
12. Fettweis P., Campbell E. «Nucl. Phys.», 1962, v. 33, p. 272.
13. Softky I. «Phys. Rev.», 1955, v. 98, p. 736.
14. Burde J., Diamond R., Stephens F. «Nucl. Phys.», 1966, v. 85, p. 481.
15. Burde J., Diamond R., Stephens F. Rep. Lawrence Radiation Lab. Chem., 1965.
16. Hagemann U. e. a. JINR, Preprint E6-6597. Dubna, 1972; Alford W., Schiffer J., Schwartz J. «Phys. Rev.», 1971, v. C3, p. 860.
17. Хойнацки С. и др. Программа и тезисы докладов XXIII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. М., «Наука», 1973, с. 115.
18. Hargrove C., Martin W. «Canad. J. Phys.», 1972, v. 40, p. 964.
19. Jonson B. e. a. «Nucl. Phys.», 1971, v. A174, p. 225.
20. Focke B. e. a. «Z. Phys.», 1973, Bd 259, N 3, S. 269.
21. Rakivnenko Yu. e. a. «Phys. Lett.», 1973, v. 44B, N 5, p. 62.
22. Brandt K. e. a. «Nucl. Phys.», 1964, v. 59, p. 33.
23. Schardt A., Welker J. «Phys. Rev.», 1955, v. 99, p. 810.
24. Duffield R., Vegors S. «Phys. Rev.», 1958, v. 112, p. 1958.
25. Vegors S., Axel P. «Phys. Rev.», 1956, v. 101, p. 1067.
26. Alexander K. e. a. «Phys. Lett.», 17, 322, 1965, v. 17, p. 322.
27. Ivanov E. e. a. «Nucl. Phys.», 1964, v. 54, p. 177.
28. Heiser Ch. e. a. В сб.: Ядерная спектроскопия и теория ядра. Дубна, 1969.
29. Дёмин А. Г., Розман И. М. ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 2067.
30. Brinckman H. e. a. «Nucl. Phys.», 1967, v. A 96, p. 318.
31. Borggreen J., Sletten G. «Nucl. Phys.», 1970, v. A 143, p. 255.
32. Borggreen J., Gjaldbaek. «Nucl. Phys.», 1968, v. A 113, p. 659.
33. Emmott M. e. a. «Phys. Lett.», 1966, v. 20, p. 56.
34. Conlon T. «Nucl. Phys.», 1967, v. A 100, p. 545.
35. Diamond R., Stephens F. «Nucl. Phys.», 1963, v. 45, p. 632.