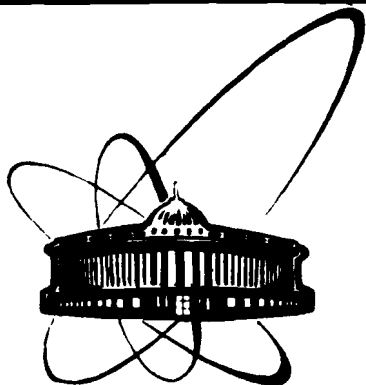


89-765



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

M 801

P6-89-765

В. А. Морозов, Э. Н. Худайбердиев*

АНАЛИЗ КРИВЫХ ЗАДЕРЖАННЫХ СОВПАДЕНИЙ
ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ
РАСПАДЕ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЯДРЕ

Направлено в Оргкомитет 40 Совещания "Ядерная спектроскопия и форма атомных ядер", Ленинград, апрель 1990 г.

*Самаркандский филиал НИИ прикладной физики
ТашГУ, Самарканд

1989

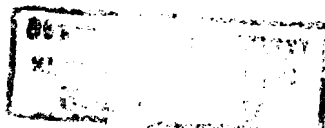
ВВЕДЕНИЕ

Измерение периода полураспада возбужденных состояний ядер требует хорошего временного и энергетического разрешения временного спектрометра. В большинстве случаев схемы распада радиоактивных ядер достаточно сложны и параметры спектрометров далеко не всегда удовлетворяют требованиям корректной постановки эксперимента по измерению времен жизни возбужденных состояний ядер, что может привести в ряде случаев к наложению нескольких временных компонент во временном спектре задержанных совпадений. В таких случаях однозначная интерпретация полученного результата существенным образом зависит от корректности обработки и чувствительности метода обработки к примесям сопутствующих компонент.

В настоящее время существуют несколько математических методов для обработки сложных временных спектров, полученных методом задержанных совпадений. При обработке результатов эксперимента с помощью этих методов схема распада исследуемого ядра в какой-то мере должна быть известна, то есть при обработке должно быть известно наличие примесных компонент (примесной компонентой назовем компоненту с меньшей интенсивностью). Поэтому при изучении ядер с неизвестной схемой распада первым этапом обработки временных спектров является оценка "экспоненциальности", то есть однокомпонентности, или "неэкспоненциальности" (многокомпонентности) временного распределения. Анализ этого вопроса посвящено несколько работ /1-6/.

Для определения времен жизни с $\tau < \tau_0$ (τ_0 — полуширина на пувысоте аппаратурной кривой мгновенных совпадений) обычно используются методы моментов. Один из примеров анализа неэкспоненциальности временного распределения при таких временах жизни приведен в работе /5/, в которой рассматривается последовательный распад двух изомерных состояний.

Для оценки экспоненциальности кривой задержанных совпадений (КЗС) при временах жизни $\tau > \tau_0$ наиболее распространенным является анализ с использованием методов свертки и наклона. В этом случае корректность обработки обычно оценивается по величине χ^2 . Как показывает опыт обработки временных спектров, значение χ^2 не всегда может быть достаточно точным критерием корректности получения до-



стоверной информации, особенно когда сопутствующие компоненты мало отличаются по времени жизни или сильно отличаются по интенсивности между собой.

Настоящая работа посвящена анализу временного распределения в некоторых частных случаях для двухкомпонентных временных распределений при параллельном или последовательном распаде возбужденных состояний ядер, когда времена жизни возбужденных состояний $\tau > \tau_0$.

ГЕНЕРАЦИЯ СПЕКТРОВ ЗАДЕРЖАННЫХ СОВПАДЕНИЙ

Временные спектры, на основе которых проводились исследования по выявлению примесных компонент, генерировались на ЭВМ ЕС-1061 и БЭСМ-6 с использованием генератора случайных чисел RANNOR из библиотеки программ SYS1 DUBNA. При этом временные спектры генерировались как свертка одного или двух экспоненциальных распределений $F(t)$ с симметричной аппаратурной временной кривой $P(t)$ в виде гауссиана с заданной шириной на полувысоте $-2\tau_0$:

$$F = F(t) \times P(t),$$

где

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{и} \quad \sigma = 0,425 \times 2\tau_0.$$

Нами были рассмотрены два случая сложного распада:

1. Распад взаимно не связанных состояний (параллельный распад, рис. 1а), который описывается формулой

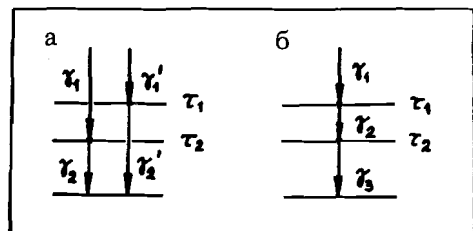


Рис. 1. Варианты распада возбужденных состояний ядер: а) параллельный распад; б) последовательный распад.

$$F(t) = \frac{N_{10}}{\tau_1} e^{-t/\tau_1} + \frac{N_{20}}{\tau_2} e^{-t/\tau_2}, \quad (1)$$

где τ_1 и τ_2 — времена жизни соответствующих состояний. Предполагается, что в канале "Старт" временного спектрометра регистрируются γ -лучи E_{γ_1} и E'_{γ_1} , а в канале "Стоп" — E_{γ_2} и E'_{γ_2} .

2. Распад состояний, связанных последовательными ядерными переходами (последовательный распад, рис. 1б). Если при этом в канале "Старт" регистрируется переход E_{γ_1} , а в канале "Стоп" — E_{γ_3} , то этот процесс описывается следующим выражением:

$$F(t) = \frac{N_{10}}{\tau_1 - \tau_2} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}). \quad (2)$$

Если же при регистрации E_{γ_1} в канале "Старт" E_{γ_2} и E_{γ_3} регистрируются в канале "Стоп", то распад описывается формулой

$$F(t) = \frac{N_{10}}{\tau_1(\tau_1 - \tau_2)} [(2\tau_1 - \tau_2)e^{-t/\tau_1} - \tau_1 e^{-t/\tau_2}]. \quad (3)$$

Спектры, соответствующие первому случаю — формула (1), генерировались для различных соотношений интенсивностей компонент при следующих параметрах:

$$2\tau_0 = 0,5 \text{ нс}, \quad \tau_1 = 1,0 \text{ нс}, \\ \tau_2 = 1,0; 1,1; \dots; 2,0 \text{ нс}.$$

Отношения интенсивностей $I_2/I_1 = N_{20}/N_{10}$ были взяты равными 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 ($I_1 = 10^5$). Число точек во временном спектре принималось равным 300. Заметим, что временная шкала может быть взята и в относительных единицах. Усредненный фон случайных совпадений составлял приблизительно 20 отсчетов на канал.

Временные спектры, соответствующие формулам (2) и (3), генерировались в двух вариантах: при $\delta < 1$ и $\delta > 1$, где $\delta = \tau_2/\tau_1$, при следующих параметрах:

$$N_{10} = 2 \cdot 10^6, \quad 2\tau_0 = 0,5 \text{ нс}.$$

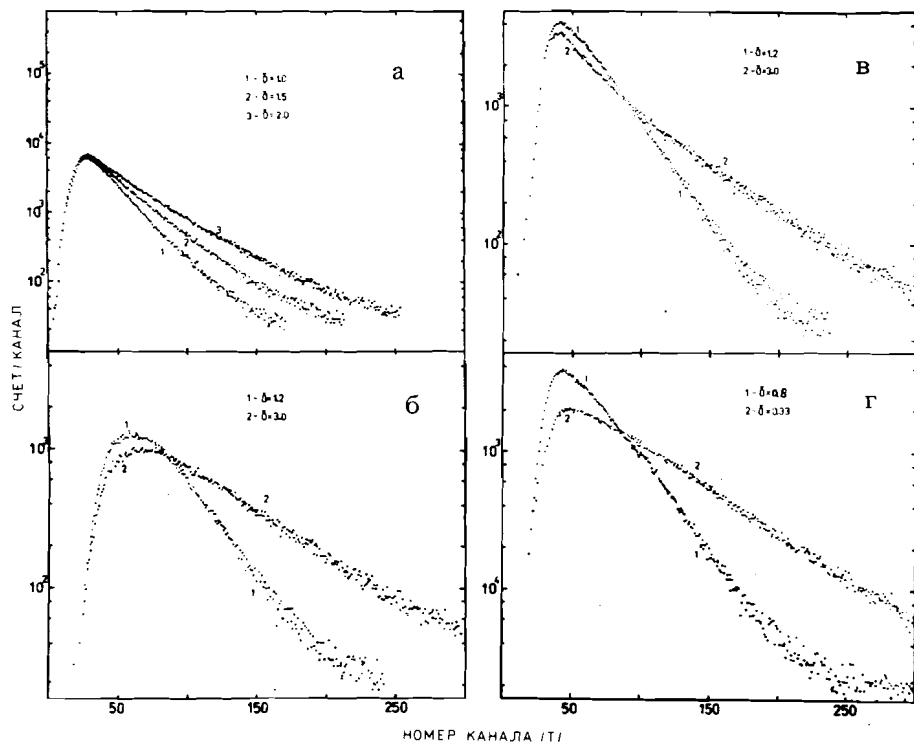


Рис. 2. Временные спектры, полученные при генерации по формуле (1) — а, по формуле (2) — б и по формуле (3) — в, г.

1. $\tau_1 = 1,0$ нс, $\tau_2 = 1,2; 1,4; \dots; 3,0$ нс ($\delta = 1,2 \div 3,0$).
2. $\tau_1 = 1,2; 1,4; \dots; 3,0$ нс; $\tau_2 = 1,0$ нс ($\delta = 0,83 \div 0,33$).

Некоторые характерные временные спектры для параллельного и последовательного распадов показаны на рис. 2.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ РАСПАД

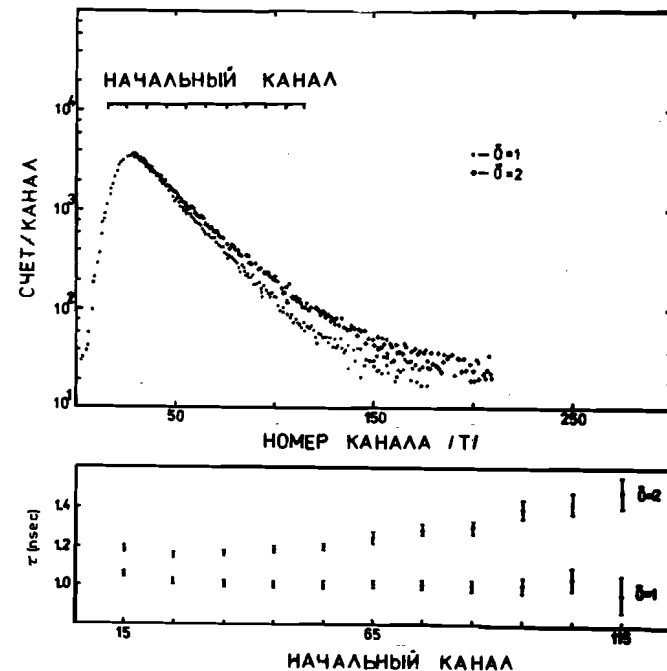
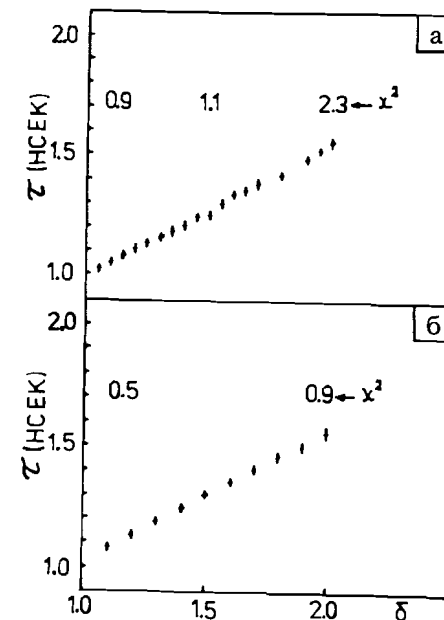
На рис. 3а представлены результаты обработки двухкомпонентных спектров задержанных совпадений с помощью программы POSITRONFIT^{/7/} для случая параллельного распада возбужденных состояний ядер для различных значений δ при $I_2/I_1 = 1$. Обработка производилась в предположении, что временное распределение является однокомпонентным. Видно, что по полученному значению χ^2 трудно предположить о наличии второй компоненты. Такие же результаты получены

Рис. 3. Результаты обработки двухкомпонентных спектров задержанных совпадений ($\tau_1, \tau_2 > 2\tau_0$) в однокомпонентном представлении с помощью программы POSITRONFIT (а) и UPEAK (б).

и при обработке этих спектров по программе UPEAK^{/8/}, в основе которой лежит обработка по методу наклона без учета собственного временного разрешения спектрометра (рис. 3б).

В дальнейшем обработка каждого спектра задержанных совпадений сводилась к процедуре определения τ при вариации начального канала обработки — $N_{н.к.}$. Обработка спектра начиналась с 15 канала спектра. Шаг изменения начального канала обработки спектра составлял 10 каналов. Ранее подобный подход в обработке временных спектров проводился в работе^{/9/} для оценки влияния вычитаемого

Рис. 4. Результаты обработки спектров задержанных совпадений с вариацией начального канала обработки для однокомпонентного ($\delta = 1$) и двухкомпонентного ($\delta = 2$) спектров в случае параллельного распада.



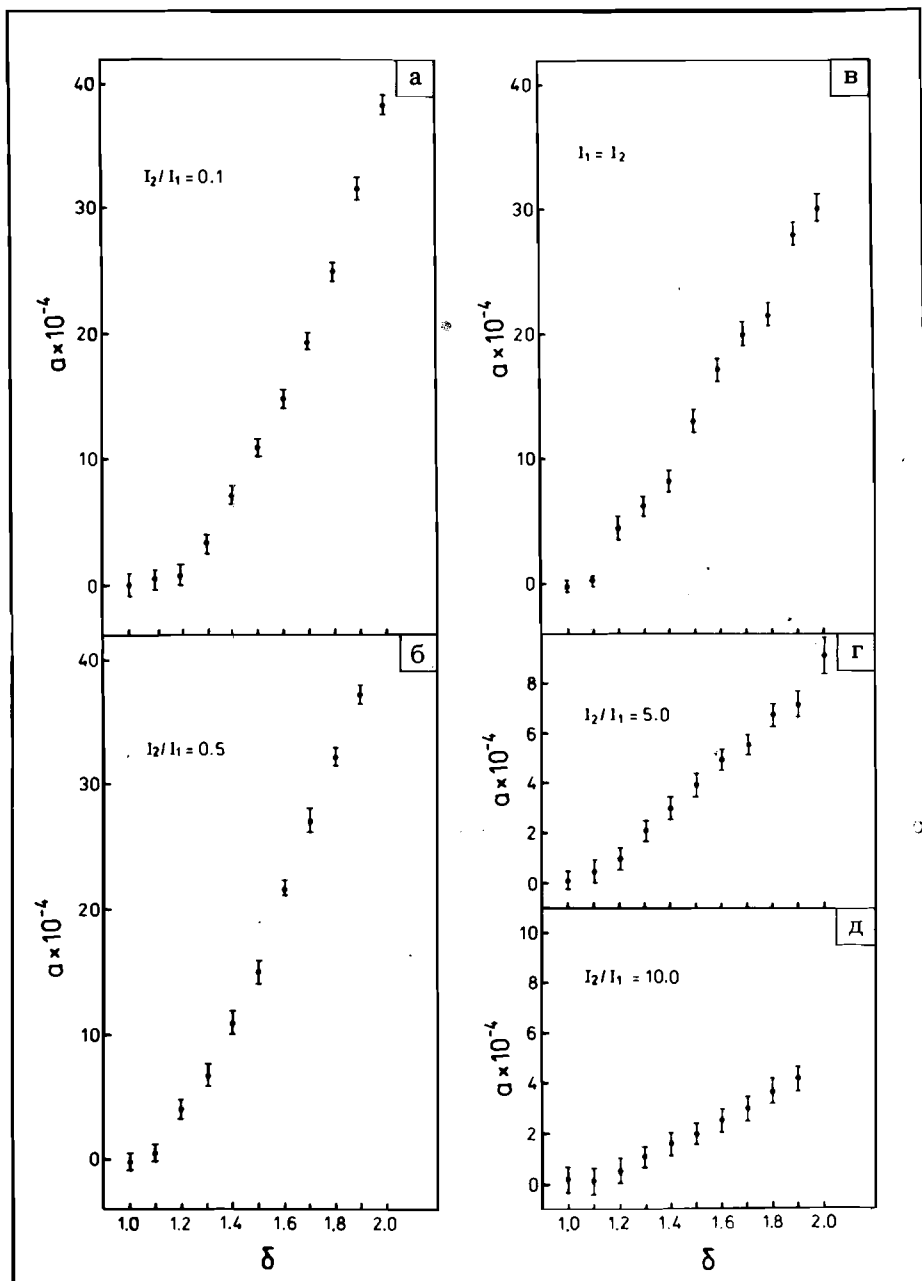
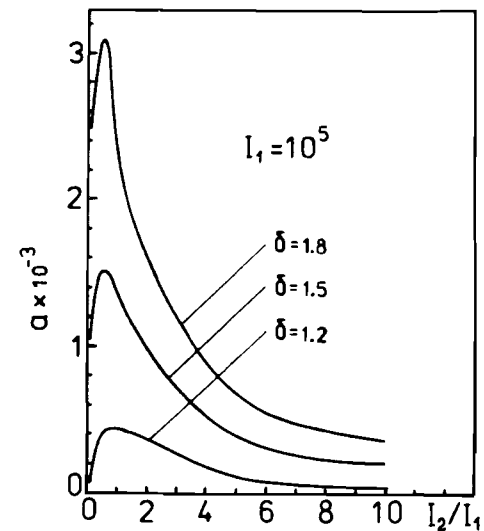


Рис. 5. Зависимость параметра неэкспоненциальности a от δ для разных значений I_2/I_1 .

Рис. 6. Зависимость значения a от отношения интенсивностей I_2/I_1 .



фона на конечный результат. В работе ^{2/} таким же способом была исследована зависимость полученного значения времени жизни τ для разных методов обработки от интервала обрабатываемого участка временного спектра.

При обработке мы ограничились тем диапазоном временного спектра, где отношение эффект/фон > 3 . Результаты обработки с вариацией начального канала обработки спектра показывают, что для однокомпонентного спектра ($\delta = 1$) наблюдается постоянное плато в зависимости $\tau = f(N_{н.к.})$ (рис. 4), что согласуется с результатами работы ^{2/}. Заметим, что при такой обработке для двухкомпонентных спектров полученное значение τ возрастает по мере роста номера начального канала обработки (рис. 4). Такое поведение результатов повторяется при обработке спектров для разных вариантов соотношений τ_2/τ_1 и I_2/I_1 . Необходимо отметить, что полученное значение τ всегда ближе к значению более интенсивной компоненты при $I_2 \neq I_1$. Таким образом, уже по виду зависимости $\tau = f(N_{н.к.})$ можно судить о наличии, по крайней мере, двух компонент в КЗС.

Более объективный вывод о неэкспоненциальности КЗС можно получить путем подгонки полученной зависимости $\tau = f(N_{н.к.})$ линией регрессии $\tau = aN_{н.к.} + b$, которая в случае двухкомпонентной КЗС показывает явную корреляцию между значениями τ и номером $N_{н.к.}$ при $\delta \neq 1$. Наклон линии характеризуется параметром a , который можно считать параметром неэкспоненциальности. Для случая параллельного распада значения параметра a в зависимости от значения δ при разных значениях I_2/I_1 приведены на рис. 5. Анализ зависимости $a = f(I_2/I_1)$ показывает, что чувствительность метода достигает максимума при отношении интенсивностей компонент $I_2/I_1 \approx 1$ (см. рис. 6).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ РАСПАД

Обработка временных спектров, генерированных по формулам (2) и (3), проводилась аналогичным образом с помощью программы POSITRONFIT. Обработка КЗС проводилась, начиная с 15 канала.

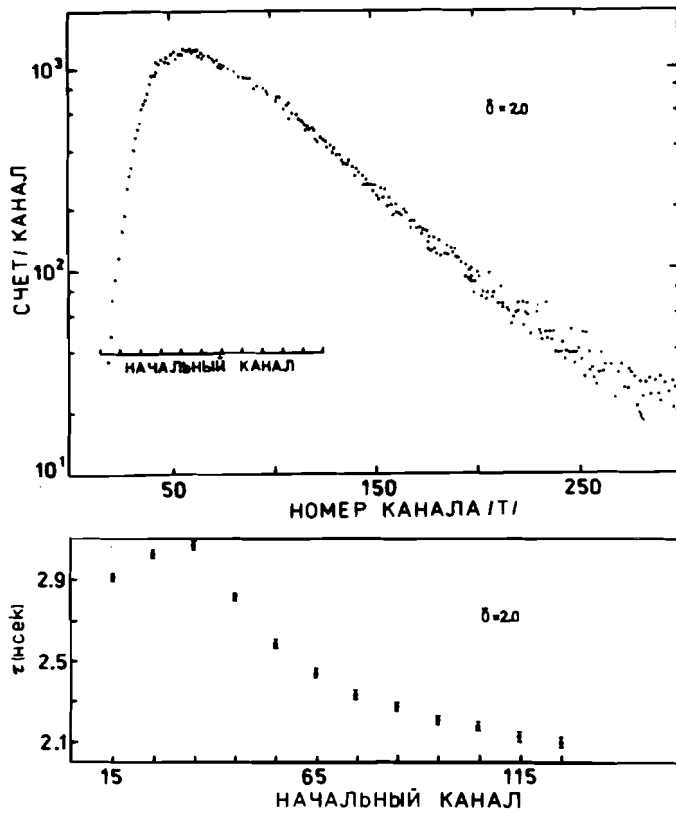


Рис. 7. Результаты обработки спектра задержанных совпадений, генерированного по формуле (2).

При этом получаются большие значения χ^2 , что свидетельствует о необоснованности предположения об однокомпонентном характере распада. Начиная с 45 ÷ 65 каналов (в зависимости от величины δ) спектр становится экспоненциальным ($\chi^2 \leq 1,1$).

Для спектров, соответствующих формуле (2), подгонка полученной зависимости $\tau = f(N_{н.к.})$ (рис. 7) прямой линией показывает, что параметр a отрицательный и его значения уменьшаются как при уменьшении $\delta < 1$, так и при увеличении $\delta > 1$ (рис. 8, кривая 1).

Для спектров, генерированных по формуле (3) — рис. 9, 10, наблюдается характерная для этих спектров зависимость $a = f(\delta)$ — рис. 8, кривая 2. Для спектров с $\delta < 2$ параметр неэкспоненциальности отрицательный и уменьшается с уменьшением δ . При $\delta = 2$ (рис. 11) спектр становится "однокомпонентным" ($a = 0$), что следует и из формулы (3). В дальнейшем по мере увеличения δ ($\delta > 2$) идет рост параметра неэкспоненциальности в область положительных значений.

Рис. 8. Зависимость параметра неэкспоненциальности a от δ для спектров задержанных совпадений, генерированных по формуле (2) — кривая 1 и по формуле (3) — кривая 2.

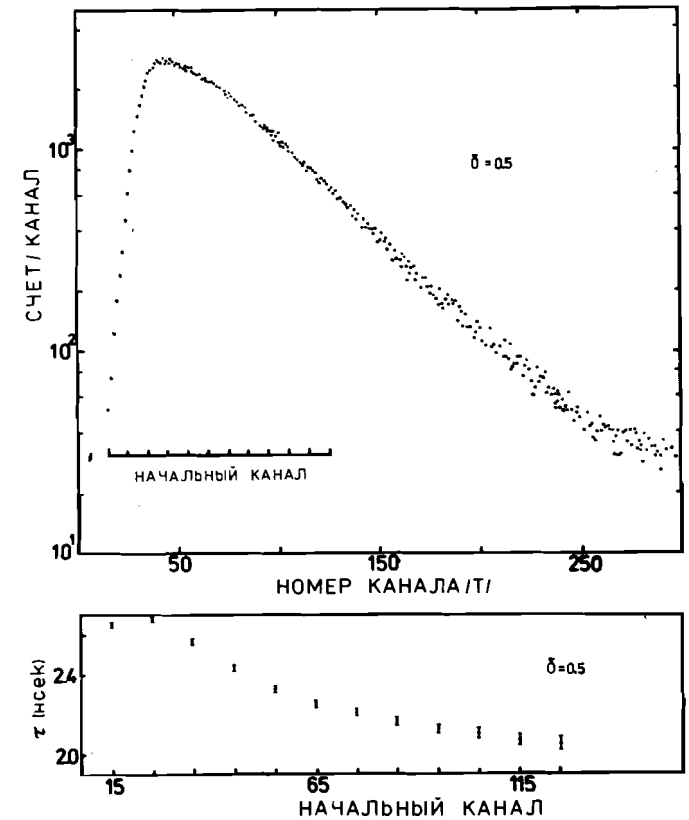
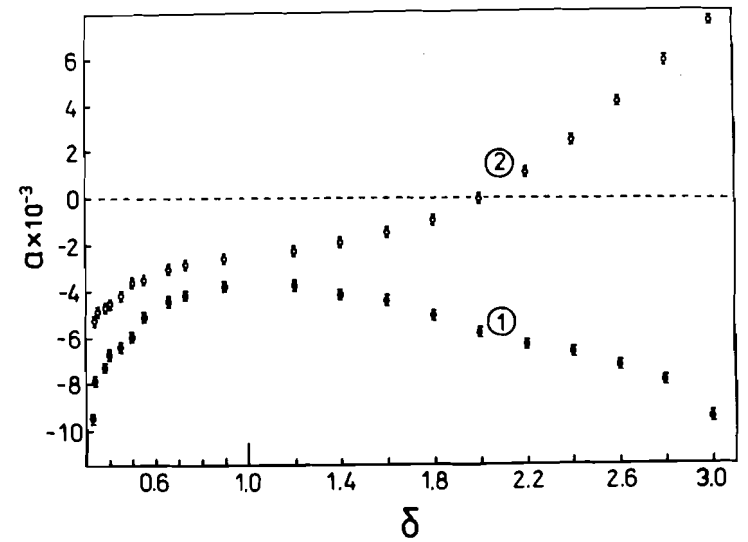


Рис. 9. Результаты обработки спектра задержанных совпадений, генерированного по формуле (3) ($\delta = 0,5$).

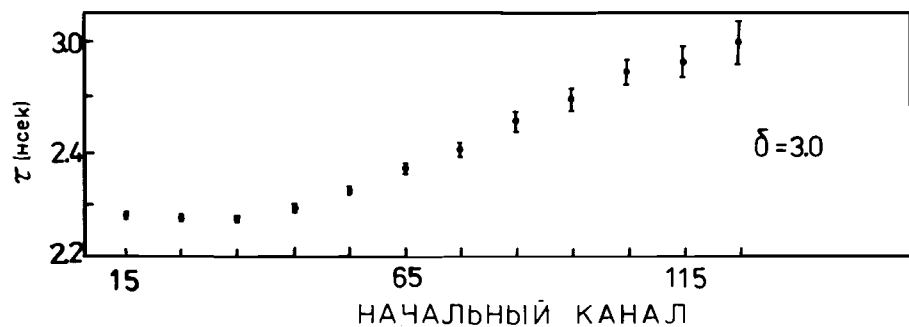
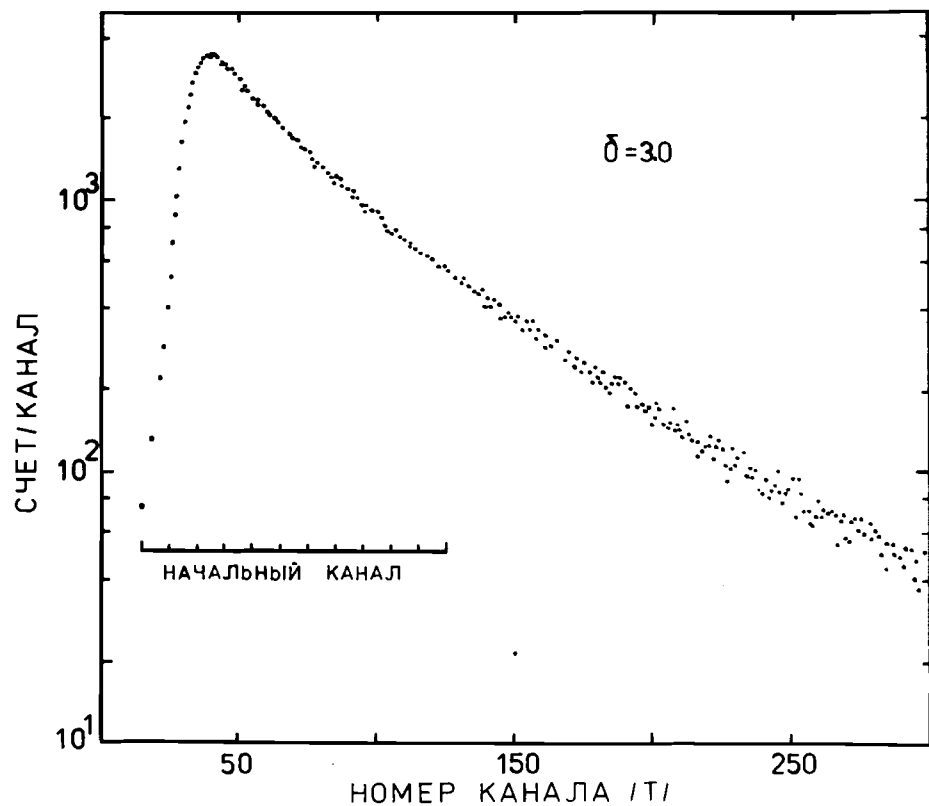


Рис. 10. Результаты обработки спектра задержанных совпадений, генерированного по формуле (3) ($\delta = 3,0$).

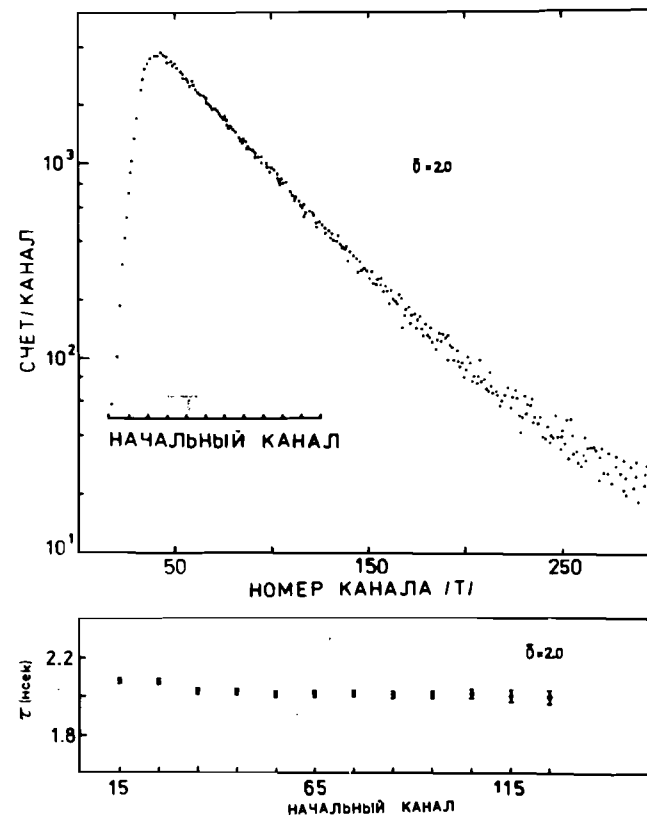


Рис. 11. Результаты обработки спектра задержанных совпадений, генерированного по формуле (3) ($\delta = 2,0$).

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КЭС

Методом e^- - γ совпадений^{/10/} были измерены времена жизни двух последовательно распадающихся изомерных состояний в ^{169}Tm , возбуждаемых при распаде ^{169}Yb . В качестве примера применения метода анализа КЭС с вариацией начального канала обработки нами было обработано два временных спектра, полученных при распаде уровней с энергиями 379 и 316 кэВ.

1. Кривая задержанных совпадений К93 ("Старт") $\gamma > 50$ кэВ ("Стоп") показана на рис. 12. В этом случае регистрируются совпадения К93-КХ, дающие мгновенные совпадения, К93- γ 63 кэВ, определяющие время жизни изомера $E = 379$ кэВ с $T_{1/2} = 50$ нс ($\tau = 72$ нс)^{/11/} и

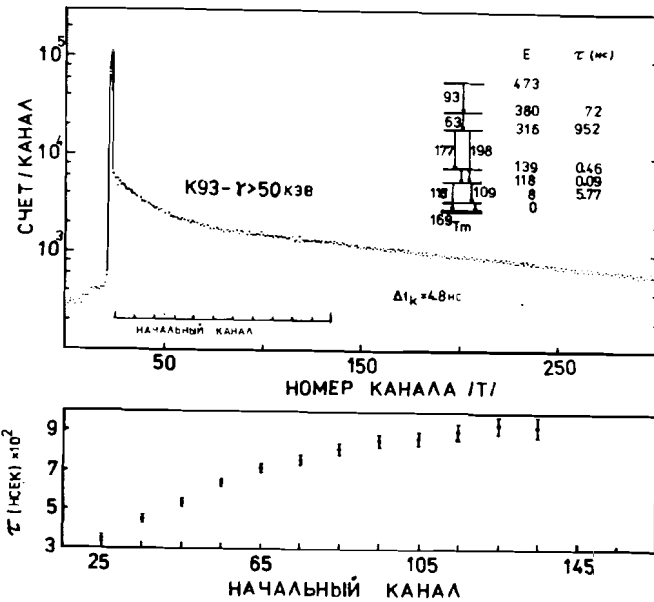


Рис. 12. Временной спектр K93- $\gamma > 50$ кэВ в ^{169}Tm .

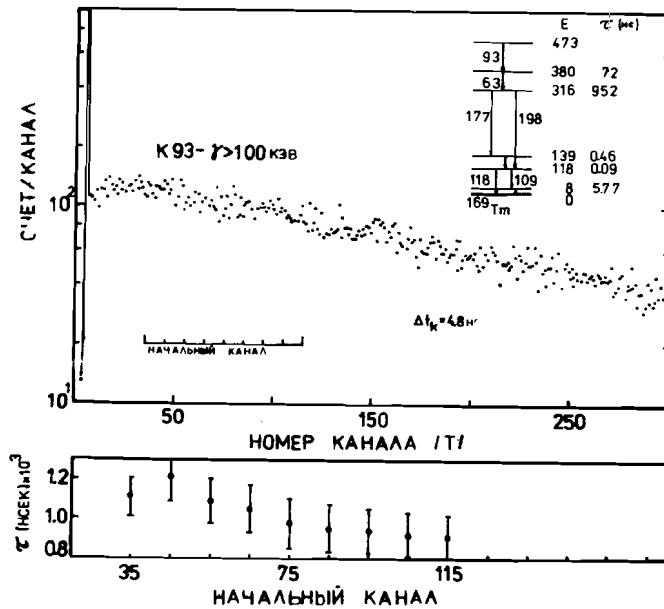


Рис. 13. Временной спектр K93- $\gamma > 100$ кэВ в ^{169}Tm .

K93- γ (177; 198), определяющие накопление и распад состояния $E = 316$ кэВ с $T_{1/2} = 660$ нс ($\tau = 952$ нс)^{11/}. При обработке этого спектра с помощью программы POSITRONFIT получены результаты, хорошо согласующиеся с литературными данными: $T_{1/2} = 49$ (1) нс и 625 (20) нс ($\chi^2 = 1,16$). С помощью этой программы невозможно обнаружить, что в ядре происходит последовательный распад двух изомеров. Дополнительный анализ КЗС с вариацией начального канала обработки дает параметр неэкспоненциальности $a = 5,6$ (1), который хотя и не исключает параллельного распада изомеров, но допускает также возможность интерпретации полученного временного распределения как обусловленного последовательным распадом изомерных состояний с $\delta > 2$.

2. Временной спектр K93 ("Старт")- $\gamma > 100$ кэВ ("Стоп") показан на рис. 13. Он соответствует регистрации совпадений K93- γ (177; 198). Обработка данного спектра с помощью программы POSITRONFIT не позволяет получить достаточно малое значение χ^2 ($\chi^2 > 2,5$). Проведенный анализ с вариацией начального канала обработки дает параметр неэкспоненциальности $a = -4,8$ (39). Отрицательное значение параметра a свидетельствует о последовательном распаде изомеров.

В таком случае, принимая во внимание результат обработки спектра совпадений K93- $\gamma > 50$ кэВ, мы приходим к выводу, что короткоживущий изомер с $T_{1/2} = 49$ нс в ^{169}Tm находится по энергии выше, чем изомер с $T_{1/2} = 625$ нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный метод анализа временных спектров задержанных совпадений при $\tau_1 > \tau_0$ способствует выявлению в ряде случаев "неэкспоненциальности" временного распределения и дает возможность более корректной обработки результатов временных измерений методом задержанных совпадений. Более детальный анализ КЗС по величине параметра неэкспоненциальности a позволяет установить некоторые особенности схемы распада возбужденных состояний исследуемого ядра. Уже по характеру $\tau \sim f(N_{н.к.})$ в ряде случаев можно судить о виде распада регистрируемого излучения (параллельный или последовательный) и корректно выбрать вид функции свертки для дальнейшей обработки КЗС.

1. Параметр неэкспоненциальности $a > 0$ может быть как при параллельном, так и при последовательном двухкомпонентном распаде. При этом если распад последовательный, то $\tau_2 > 2\tau_1$ и $E^*(\tau_1) > E^*(\tau_2)$.

2. Параметр неэкспоненциальности $a < 0$ позволяет установить, что наблюдается последовательный двухкомпонентный распад.

3. Значение параметра неэкспоненциальности $a \approx 0$ соответствует чистому однокомпонентному распаду или параллельному двухкомпонентному распаду, когда интенсивность одной компоненты намного больше интенсивности другой. Если $a \approx 0$, то не исключается также возможность последовательного двухкомпонентного распада с $\delta = 2(\tau_2 = 2\tau_1)$.

Рассмотренный вид анализа кривых задержанных совпадений при изучении времени жизни возбужденных состояний ядер может быть распространен и на анализ распада основных и изомерных состояний радиоактивных нуклидов.

Анализ КЗС с большим числом компонент в принципе не отличается от анализа двухкомпонентных временных распределений.

Авторы благодарны В.Б.Злоказову и М.И.Фоминых за оказанное содействие при выполнении данной работы и В.Н.Абросимову за помощь при измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bostrom L., Olsen B. — NIM, 1966, v.44, p.61.
2. Olsen B., Bostrom L. — NIM, 1966, v.44, p.65.
3. Gardner D.G. et al. — J. Chem. Phys., 1959, v.31, p.978.
4. Sparrman P., Falk F. — Ark. fur Fysik, 1966, Bd.32, No.24, p.447.
5. Sundstrom T. — NIM, 1962, v.16, p.153.
6. Weaver R.S., Bell R.E. — NIM, 1960, v.9, p.149.
7. Kirkegaard P., Eldrup M. — Comp. Phys. Comm., 1972, v.3, p.240.
8. Zlokazov V.B. — Comp. Phys. Comm., 1978, v.13, p.389.
9. Neal W.R., Kraner H.W. — Phys. Rev., 1965, v.B137, p.1164.
10. Абросимов В.Н. и др. — Препринт ОИЯИ Р6-86-675, Дубна, 1986.
11. Lederer C.M., Shirley V.S. — Table of Isotopes (ed. A.Wiley), Interscience Publication, New York, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 ноября 1989 года.

Морозов В.А., Худайбердиев Э.Н.

Р6-89-765

Анализ кривых задержанных совпадений при параллельном и последовательном распаде изомерных состояний в ядре

Проводится анализ временного распределения для двухкомпонентных кривых задержанных совпадений при параллельном или последовательном распаде изомерных состояний ядер, когда времена жизни возбужденных состояний $\tau_i > \tau_0$. Обработка временных спектров проводится с вариацией начального канала обработки. Анализ величины параметра неэкспоненциальности двухкомпонентных временных спектров позволяет в ряде случаев установить вид распада, определить наличие примесной компоненты во временном спектре, корректно выбрать вид функции свертки для дальнейшей обработки временных спектров.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод И.В.Кронштадтовой

Morozov V.A., Khudaiberdiev Eh.N.

Р6-89-765

Analysis of Delayed Coincidences Curves at Parallel and Successive Decay of Isomeric States of Nucleus

Analysis of time distribution for two-component curves of delayed coincidences at parallel or successive decay of isomeric states of nuclei, while lifetimes of excited states are $\tau_i > \tau_0$ is presented. The unfolding of time spectra is performed with variation of the initial channel of the procedure. The analysis of the value of the nonexponential parameter of two-component time spectra allows in some cases to determine the type of decay, to specify the existence of additional component in time spectrum, to appoint correctly the function for further unfolding of time spectra.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989