

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОВРЕМЕННОГО ИСПУСКАНИЯ ДВУХ
К-ЭЛЕКТРОНОВ НА ЯДРЕ ^{123m}Te

И. Н. Вишневский, В. А. Желтоножский, Н. В. Стрильчук, С. С. Драпей

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Проведены измерения вероятности одновременного испускания двух К-электронов при внутренней конверсии γ -перехода 88,5 кэВ в распаде ^{123m}Te . В результате измерений было получено, что $P_{KK} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ для ^{123m}Te . Показано, что основным механизмом является прямое взаимодействие электронов.

Введение

Состояние электронной оболочки атома или молекулы в той или иной мере влияет на квантовые переходы в ядрах. Простейшими примерами этого являются внутренняя конверсия γ -лучей и захват ядром атомных электронов. Более тонкие эффекты возникают в высших порядках по постоянной тонкой структуры. Они связаны с тем, что кулоновское взаимодействие нуклонов с электронами атомной оболочки приводит к смешиванию электронных и ядерных состояний. В результате появляются поправки к вероятностям ядерных электромагнитных переходов и внутренней конверсии. Хотя, как правило, поправки, связанные с таким механизмом, имеют более высокий порядок малости по постоянной тонкой структуры, они могут быть значительными для переходов с малой энергией и высокой мультипольностью. Кроме того, для электромагнитных ядерных переходов, сопровождающихся ионизацией атома или возбуждением атомной оболочки, часть углового момента перехода может быть передана атомным электронам, при этом изменится мультипольный состав и энергетический спектр испущенных γ -квантов.

Такие процессы могут иметь резонансный или нерезонансный характер.

Нерезонансные процессы протекают с испусканием двух и более γ -квантов или электронов (рис. 1).

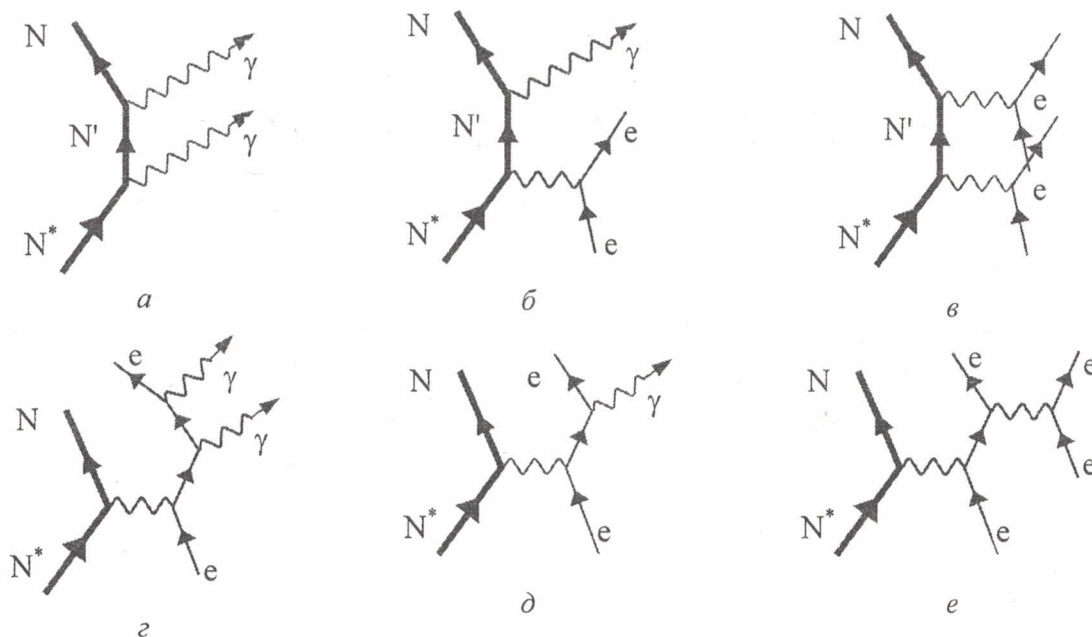


Рис. 1. Фейнмановские диаграммы для нерезонансного двухквантового процесса.

Для таких процессов экспериментальное исследование эффектов высших порядков в электромагнитных переходах было выполнено в ограниченном числе случаев [1 - 4]. Причем в половине обнаруженные эффекты были связаны с участием в превращениях орбитальных электронов (так называемый внутренний комптон-эффект, см. рис. 1 д [1, 4].

Определенный интерес представляет изучение одновременного испускания двух электронов (см. рис. 1, в, е). Это обусловлено тем, что имеющиеся экспериментальные данные довольно ограничены и их значения существенно завышены по сравнению с теоретическими расчетами.

В данной работе проведено исследование процесса двойной ионизации К-оболочки атома при внутренней конверсии (см. рис. 1, в, е) в распаде изомера ^{123m}Te .

Методика и результаты измерений

Изомерное состояние распадается каскадом γ -переходов (рис. 2), первый из которых γ 88 кэВ сильно конвертирован с $\alpha_K \sim 500$. В результате процесса внутренней конверсии этого перехода образуется вакансия на К-оболочке. Внезапное изменение кулоновского поля или прямое взаимодействие вылетающего конверсионного электрона с оставшимся

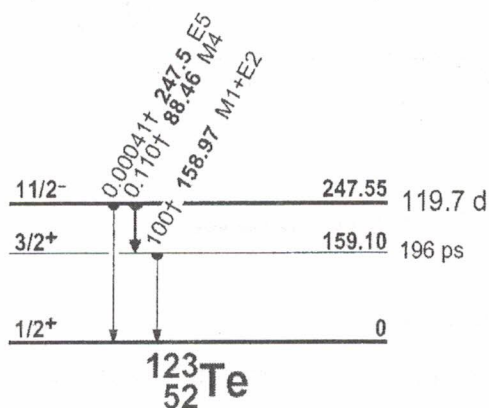


Рис. 2. Схема распада ^{123m}Te .

электроном на К-оболочке может привести к стряхиванию последнего и образованию второй вакансии. В результате заполнения этих вакансий можем наблюдать одновременный вылет двух рентгеновских лучей. Один из лучей вызван внутренней конверсией, второй – стряхиванием. Но аналогичная ситуация наблюдается, когда оба каскадных γ -перехода γ 88 кэВ и γ 159 кэВ разряжаются посредством процесса внутренней конверсии. Для исключения этого процесса необходимо измерять тройные γ -совпадения, т. е. регистрировать одновременное испускание γ 159 кэВ, рентгеновское излучение после внутренней конверсии γ 88 кэВ и рентгеновское

излучение, образующееся в результате процесса встряски. Регистрация γ 159 кэВ свидетельствует о том, что переход не конвертирован.

Измерения $\gamma\gamma$ -совпадений выполнены на сетевом спектрометре многомерных совпадений под управлением программы NetSpectrum. При этом γ 159 кэВ регистрировался большим NaI(Tl)-детектором (CANBERRA с разрешением 7 % на γ -линиях ^{60}Co), а совпадения K_α конверсии и K_α встряски определялись по суммированию линий в спектре совпадений с γ 159 кэВ. Для регистрации мягкого рентгеновского излучения использовался Гедетектор Extra Range с входным бериллиевым окном (с разрешением 1, 2 кэВ для γ 159 кэВ).

Спектрометр позволяет одновременно накапливать в памяти контроллера AIM-556 рентгеновский, γ -спектр, а также временной спектр. Кроме того, в буфер записывались события совпадений в виде показаний трех амплитудно-цифровых преобразователей. После заполнения буфера информация по локальной сети передавалась на компьютер и записывалась на диск для дальнейшей сортировки. Для уменьшения вклада случайного суммирования использовался режектор наложений с разрешающим временем ~ 200 нс.

После сортировки накопленных данных с окном, соответствующим пику мгновенных совпадений, был получен двумерный спектр $\gamma\gamma$ -совпадений, представленный на рис. 3. Ось ординат соответствует интегральному спектру, измеренному с помощью NaI детектора, абсцисс – с помощью германиевого детектора. На рисунке выделена область окна γ 159 кэВ, которая использовалась для получения спектра совпадений с γ 159 кэВ.

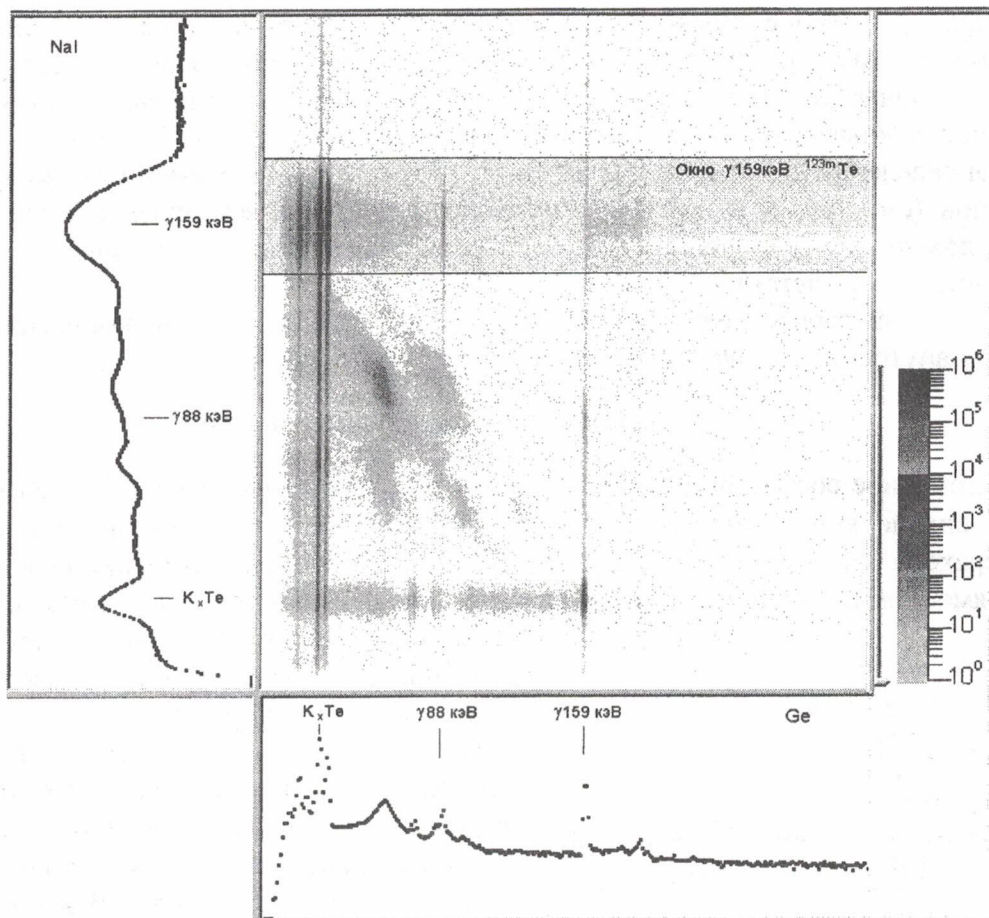


Рис. 3. Двумерный спектр совпадений.

На рис. 4, а представлен одиночный γ -спектр и спектр совпадений с γ 159 кэВ. В одиночном спектре видны пики суммирования $K_{\alpha}Te + K_{\alpha}Te$, соответствующие случаю, когда оба каскадных γ -луча конвертированы, и пики суммирования γ 159 + $K_{\alpha}Te$.

В спектре совпадений в основном наблюдаются γ 88 кэВ и рентгеновское излучение, связанное с конверсией γ 88 кэВ. Участок спектра с пиком суммирования $K_{\alpha}Te + K_{\alpha}Te$ показан на рис. 4, б. Этот пик соответствует двойной ионизации К-оболочки. Кроме этого, в пик суммирования могут давать вклад случайные совпадения с γ 159 кэВ и случайное суммирование $K_{\alpha} + K_{\alpha}$. Вклад от случайных совпадений определяется из соотношения интенсивностей линии γ 159 кэВ в спектре совпадений и в одиночном спектре. Так как линия γ 159 кэВ не может совпадать сама с собой, то пик γ 159 + γ 159 обусловлен только случайным суммированием. Из соотношения интенсивностей γ 159 + γ 159 и γ 159 можно определить вероятность случайного суммирования и соответственно вклад его в пик суммирования $K_{\alpha} + K_{\alpha}$. После вычитания вкладов конкурирующих процессов, которые составляют порядка 1 % для случайных совпадений и 3 % для случайных суммирований, получена интенсивность линии $K_{\alpha} + K_{\alpha}$, обусловленная встражкой К-электрона.

Для расчета вероятности двойной ионизации К-оболочки необходимо знать абсолютную эффективность (ϵ_{abs}) Ge-детектора для K_{α} -лучей. Ее определили из соотношения интенсивностей линий γ 159 + K_{α} и γ 159 кэВ по формуле

$$N_{\gamma 159 + K_{\alpha}} = N_{\gamma 159} \cdot \omega_K \cdot \frac{\alpha_K}{\alpha_T} \cdot \epsilon_{abs},$$

где ω_K – флуоресцентный выход рентгеновского излучения; α_K и α_T – коэффициент конверсии на К-оболочке и полный коэффициент конверсии соответственно. Величина абсолютной эффективности для данной геометрии измерения составляет $(30 \pm 1) \%$.

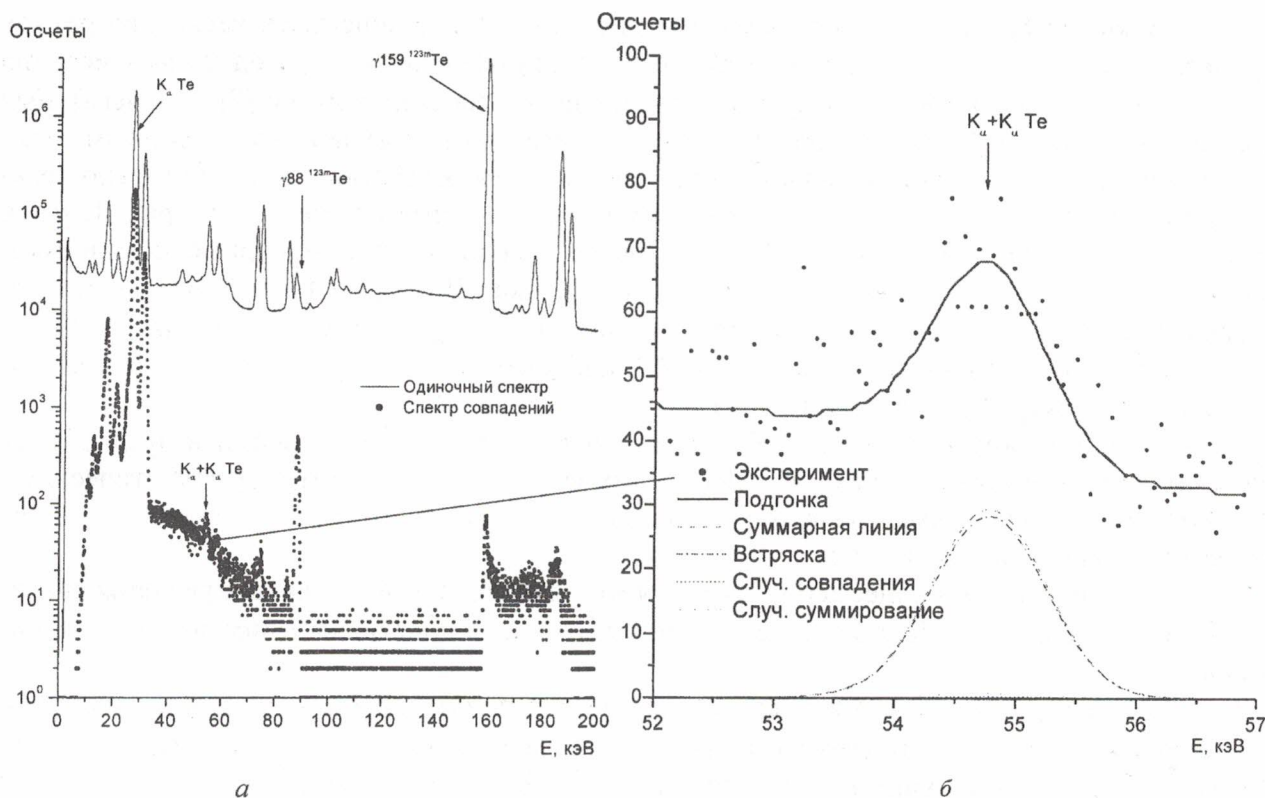


Рис. 4. Одиночный спектр и спектр совпадений при распаде ^{123m}Te (а) и участок спектра с линией суммирования $K_\alpha \text{ Te} + K_\alpha \text{ Te}$ (б).

Вероятность двойной ионизации P_{KK} определяется из соотношения

$$N_{K_\alpha + K_\alpha} = N_{K_\alpha}^{coin} \cdot \omega_K \cdot P_{KK} \cdot \varepsilon_{abs},$$

где $N_{K_\alpha + K_\alpha}$ - интенсивность пика суммирования в спектре совпадений; $N_{K_\alpha}^{coin}$ - интенсивность рентгеновской линии в спектре совпадений.

Из данных наших измерений величина вероятности $P_{KK} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$.

Обсуждение

Одновременное испускание двух К-электронов может происходить через виртуальное промежуточное состояние (ядерный КК-процесс, см. рис. 1, в) или в результате процессов рассеяния в атомных оболочках (электронный КК-процесс, см. рис. 1, е).

Теоретические оценки можно сделать, используя экспериментальные данные о “ядерной” и “электронной” модах в $K\gamma$ -процессе. Результаты измерений в работе [5] для ^{137m}Ba показывают, что “ядерный” $K\gamma$ -процесс идет в основном мультипольностью $M1 - E3$. При этой комбинации переходов нами было получено, что для “ядерной” моды $P_{KK}/P_K \sim 10^{-7}$. Как видно, эта величина на три порядка занижена по сравнению с экспериментом. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемый нами процесс в ^{123m}Te обусловлен электронной модой.

Как отмечалось во введении, данные о КК-процессах достаточно противоречивы. Еще несколько лет тому назад Исозуми [6] утверждал, что существует большое несоответствие между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными по образованию двух вакансий в атомной К-оболочке при электромагнитных переходах в ядрах. Хотя некоторые теоретические и экспериментальные результаты не были включены в анализ, проведенный в [6], их учет не меняет выводов, сделанных в статье. В большинстве случаев в расчетах имеет место недооценка амплитуды эффекта в несколько раз.

Можно отметить, что диаграмма (см. рис. 1, е) может описывать несколько разных процессов. Можно рассматривать этот процесс как двухквантовый переход из-за изменения кулоновского поля ядра во время процесса внутренней конверсии γ -лучей [7] (встряска). Был предложен подход [8], при котором вся энергия перехода поглощается электронным облаком, разделяясь между К-электронами вследствие их взаимодействия, т. е. его можно трактовать как процесс внутренней конверсии внутреннего комптон-эффекта (см. рис. 1, д, е). Однако вероятности при таких, казалось бы, разных подходах оказались примерно одними и теми же. Для ядра ^{123m}Te согласно теоретическим оценкам $P_{KK} \approx (3 - 4) \cdot 10^{-5}$. Как видно, это существенно отличается от экспериментальных значений: $P_{KK} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ для ^{123m}Te .

Одним из возможных решений этой проблемы является учет “прямого” взаимодействия К-электрона с соседним К-электроном, предлагаемый в работе [9]. Взаимодействием в конечном состоянии (ВКС) между испускаемыми электронами в предыдущих расчетах пренебрегалось. Однако учет ВКС снимает несоответствие между теоретическими результатами и экспериментальными данными, что свидетельствует о преобладающем механизме для исследуемого ядра.

Вероятность P_{KK} -процесса с учетом прямого взаимодействия в наших расчетах равна: $P_{KK} = 5 \cdot 10^{-4}$ для ^{123m}Te . Как видно, согласие в пределах точности эксперимента достаточно хорошее.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что при одновременном испускании двух К-электронов в процессе внутренней конверсии γ -лучей доминирующим является “прямой” процесс, при котором один из электронов на К-оболочке взаимодействует с соседним электроном на этой же оболочке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ljubicic A. et al.* // Phys. Rev. - 1970. – Vol. C3. - P. 824.
2. *Beusch W.* // Helv. Phys. Acta. – 1960. – Vol. 33. - P. 363.
3. *Kramp J. et al.* // Nucl. Phys. – 1987. – Vol. A474. - P. 412.
4. *Желтоножский В. А. и др.* Изучение двойного распада ^{137m}Ba . - Киев, 1989. – 19 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-89-13).
5. *Бондарьков М. Д. и др.* // Измерительная техника. – 1997. - № 10. - С. 57.
6. *Isozumi Y.* // Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research. – 1989. - Vol. A280. - P. 151.
7. *Sachs R. G.* // Phys. Rev. - 1940. – Vol. 57. - P. 194.
8. *Листенгартен М.А.* // Вестник ЛГУ. Сер. физ. и хим. – 1962. - № 16. - С. 142.
9. *Drukarev E. G.* // Z. Phys. - 1997. – Vol. A359. - P. 133.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОЧАСНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДВОХ К-ЕЛЕКТРОНІВ НА ЯДРІ ^{123m}Te

І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, М. В. Стрільчук, С. С. Драпей

Проведено вимірювання ймовірності одночасного випромінювання двох К-електронів при внутрішній конверсії γ -переходу 88,5 кеВ у розпаді ^{123m}Te . У результаті вимірювання було отримано, що $P_{KK} = (6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$. Показано, що основним механізмом є пряма взаємодія електронів.

INVESTIGATION OF SIMULTANEOUS EMISSION OF TWO K-ELECTRONS ON ^{123m}Te NUCLEI

I. N. Vishnevsky, V. A. Zheltonozhsky, N. V. Strilchuk, S. S. Drapey

Measurements of probability of simultaneous emission of two K-electrons at internal conversion of γ -transition with energy 88.5 keV in ^{123m}Te decay have been carried out. As a result of measurements it was obtained that $P_{KK} = (6.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$. It has been shown that direct electron interaction is the main mechanism.

Поступила в редакцію 14.11.02,
после доработки – 22.01.03.