

ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И КОЛИЧЕСТВА ЗВЕНЬЕВ ГАММА-ПОГЛОЩЕНИЙ И ГАММА-ИСПУСКЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР В ПРОЦЕССЕ ИХ РАСПАДА

М. Э. Долинская, Н. Л. Дорошко, В. С. Ольховский

Квантово-механический метод, который был предложен ранее для теоретического обоснования резонансного рассеяния γ -квантов, обобщен с учетом эффекта Доплера. Предложен новый алгоритм и получены выражения для определения характеристических функций распределения энергии, вероятностей и функций распада. Проведены расчеты для конкретных случаев распада возбужденных ядер ^{14}C , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{238}U и ^{232}Th при комнатной температуре с учетом эффекта Доплера и без него.

Вплоть до недавнего времени во всех известных методах ядерной хронометрии принимали во внимание времена жизни только основных состояний распадающихся ядер. Но длительность процессов ядерного излучения захватывает не только основные, но и многие возбужденные состояния синтезированных ядер, которые были сформированы. До сих пор никто также не принимал во внимание γ -поглощение, происходящее перед γ -излучением, в течение которого γ -лучи распространяются в больших объемах вещества внутри звезд, суперновых, планет. Учет этих факторов может существенно изменить окончательные результаты оценок всех временных интервалов, характеризующих эволюцию цепочек распада. В [1] на простых примерах было показано, что скорректированные должным образом показатели "ядерных часов" в ряде случаев могут соответствовать существенно меньшим значениям длительностей реальных процессов распада ядер-хронометров, а значит, и "возраста" объектов, в которых они происходят.

Для описания эволюции распада был применен квантово-механический подход [2], основанный на теореме Крылова - Фока, обобщенной на случай смешанных состояний (когда процесс распада ансамбля частиц идет одновременно с его образованием) и позволяющей в силу этого учесть вышеупомянутые факторы. Этот подход уже применялся авторами ранее в [3] для теоретического описания временного распределения γ -квантов, резонансно рассеянных ядрами ^{57}Fe в мессбауэровских экспериментах. Но, в отличие от [3], в настоящей работе был учтен доплеровский эффект, что дает возможность определять вероятности распада и времена жизни при разных температурах.

Для упрощения анализа ограничимся идеальным случаем долгоживущего возбужденного ядра, которое в определенный начальный момент времени ($t = 0$) распределено в двух состояниях (основном и первом возбужденном).

Тогда, в соответствии с [2], функции распада $L(t)$ и $L_0(t)$, характеризующие распад некоторого первоначального (первого возбужденного) и последующего (основного) состояний соответственно, представим в виде

$$L(t) = |p(t)|^2 / |p(0)|^2, \quad (1)$$

$$L_0(t) = |p_0(t)|^2 / |p_0(0)|^2, \quad (2)$$

где

$$p_0(t) = \int_0^\infty |G_0(\varepsilon)|^2 \exp(-i\varepsilon t/\hbar) d\varepsilon, \quad (3)$$

$$p(t) = \int_0^{\infty} |G(\varepsilon)|^2 \exp(-i\varepsilon t/\hbar) d\varepsilon \quad (4)$$

характеристические функции распределения энергии в основном и первом возбужденном состояниях соответственно, а

$$|G_0(\varepsilon)|^2 = \text{const} [(\varepsilon_1 - \varepsilon)^2 + \Gamma_1^2/4]^{-1} [(\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 + \Gamma_0^2/4]^{-1} \quad \text{и} \quad (5)$$

$$|G(\varepsilon)|^2 = \text{const} [(\varepsilon_1 - \varepsilon)^2 + \Gamma_1^2/4]^{-1} \quad (6)$$

вероятности распределения энергий в этих состояниях. Здесь Γ_0 и Γ_1 и ε_0 и ε_1 - ширины и энергии основного и первого возбужденного состояний соответственно.

Вероятности и скорости распадов будут определяться выражениями:

$$W_0(t) = 1 - L_0(t), \quad \rho_0(t) = dW_0(t)/dt \quad (7)$$

для основного состояния и

$$W(t) = 1 - L(t), \quad \rho(t) = dW(t)/dt \quad (8)$$

для первого возбужденного состояния, а интенсивность распада

$$I(t) = \int_0^t dt' \rho_0(t') \rho(t-t') \quad (9)$$

Реальная ширина линий испускания и поглощения определяется не естественной шириной Γ , а доплеровским уширением

$$D = 2\sqrt{\varepsilon_r kT}, \quad (10)$$

которое объясняется доплеровским смещением линий, испускаемых разными атомами, из-за различия в скорости и направлении их движения. Поэтому для того, чтобы более точно определять интенсивности распада $I(t)$, а значит, и времена жизни радиоактивных ядер, поскольку

$$\langle \tau \rangle = \int t I(t) dt / \int I(t) dt, \quad (11)$$

необходимо учесть максвелловскую функцию распределения по энергии

$$f(\varepsilon) d\varepsilon = -\frac{1}{\sqrt{\pi D}} \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_r)^2}{D^2}\right) d\varepsilon,$$

где $\varepsilon_r = \varepsilon_\gamma^2 / 2\mu c^2$ - кинетическая энергия отдачи ядер после испускания или поглощения γ -квантов, ε_γ - энергия γ -квантов; D - доплеровская ширина для резонансного испускания или поглощения.

Для последующего применения будет удобнее вместо функции энергии ε использовать функцию энергии ε_γ γ -квантов, которые испускаются в течение γ -распада возбужденных состояний материнских ядер. Учтем также, что при $\Gamma_1 \gg \Gamma_0$

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_r + D. \quad (12)$$

Тогда, в соответствии с вышесказанным:

$$\left| G_0^{(1)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 = \text{const} \left[(\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 - \varepsilon_1 + \varepsilon_r - D)^2 + \Gamma_1^2/4 \right]^{-1} \left[(\varepsilon_\gamma + \varepsilon_r - D)^2 + \Gamma_0^2/4 \right]^{-1}, \quad (13)$$

$$\left| G_1^{(0)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 = \text{const} \left[(\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 - \varepsilon_1 + \varepsilon_r - D)^2 + \Gamma_1^2/4 \right]^{-1}. \quad (14)$$

Поскольку $\varepsilon \in [0; \infty)$, то $\varepsilon_\gamma \in [(D - \varepsilon_0 - \varepsilon_r); \infty)$ (см. (12)), поэтому с учетом (13) и (14), а также с учетом того, что $\exp(iA) = \cos A + i \sin A$, для $p_0(t)$ и $p(t)$ получим

$$p_0(t) = \int_{gr}^{\infty} \left| G_1^{(0)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 \cos \left[-\frac{t}{\hbar} (\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 + \varepsilon_r - D) \right] d\varepsilon_\gamma + i \int_{gr}^{\infty} \left| G_1^{(0)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 \sin \left[-\frac{t}{\hbar} (\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 + \varepsilon_r - D) \right] d\varepsilon_\gamma \quad (15)$$

$$p(t) = \int_{gr}^{\infty} \left| G_0^{(1)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 \cos \left[-\frac{t}{\hbar} (\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 + \varepsilon_r - D) \right] d\varepsilon_\gamma + i \int_{gr}^{\infty} \left| G_0^{(1)}(\varepsilon_\gamma) \right|^2 \sin \left[-\frac{t}{\hbar} (\varepsilon_\gamma + \varepsilon_0 + \varepsilon_r - D) \right] d\varepsilon_\gamma \quad (16)$$

где $gr = D - \varepsilon_0 - \varepsilon_r$.

С помощью замены $\varepsilon_\gamma = \frac{y}{y-1}$ ($\varepsilon_\gamma \in [gr; \infty) \Rightarrow y \in [tgr; 1)$, где $tgr = \frac{gr}{1+gr}$) интегралы в (15) и (16) были преобразованы в определенные и для нахождения $p_0(t)$, $p(t)$ и далее $W_0(t)$, $W(t)$ и $I(t)$ по формулам (7), (8) и (9) были использованы численные методы.

На основании разработанного алгоритма были сделаны расчеты для конкретных случаев распада возбужденных β -активных ядер ^{14}C , ^{40}K и ^{87}Rb и α -активных ядер ^{238}U и ^{232}Th при комнатных температурах с учетом эффекта Доплера и без него (в последнем случае для $p_0(t)$ и $p(t)$ следует использовать не (15) и (16), а (3) и (4)).

Результаты расчетов приведены в таблице.

Элемент	Время жизни возбужденных ядер τ , годы		
	Табличные значения	С учетом эффекта Доплера	Без учета эффекта Доплера
^{14}C	8304	7800	7470
^{238}U	$6.475 \cdot 10^9$	$4.98 \cdot 10^9$	$4.80 \cdot 10^9$
^{232}Th	$2.04 \cdot 10^{10}$	$1.55 \cdot 10^{10}$	$1.48 \cdot 10^{10}$
^{40}K	$1.85 \cdot 10^9$	$1.53 \cdot 10^9$	$1.50 \cdot 10^9$
^{87}Rb	$6.88 \cdot 10^{10}$	$5.35 \cdot 10^{10}$	$4.85 \cdot 10^{10}$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что времена жизни, рассчитанные с учетом эффекта Доплера и без него, как и следовало ожидать, отличаются между собой незначительно, но оба значения τ , рассчитанные в рамках данного подхода, существенно

меньше их табличных значений, полученных экспериментально. Это дает право сделать предположение, что и возраст объектов, вычисленный методами ядерной хронометрии на основе табличных значений времен жизни ядер-хронометров, значительно превышает реальный.

Разработанный метод позволяет проводить аналогичные расчеты для разных ядер и при разных температурах, что делает возможным его практическое применение в ядерной хронометрии, например для более точного определения возраста астрофизических тел и времени распада радиоактивных отходов, а также для оценки числа звеньев γ -поглощений и γ -испусканий ядер-хронометров в процессе их распада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Olkhovsky V.S., Grantsev V.I.* Is it essential for nuclear chronometry of astro-fysical processes to consider the decay peculiarities of radioactive nuclei from the excited states? – Kyiv, 1998. – 8 p. – (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-98-1).
2. *Ольховский В.С.* Обобщение теоремы Крылова – Фока и разрешение давидовского парадокса распадающихся систем // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1985. – Т. - 49, № 5. - С. 938 - 944.
3. *Дорошко Н.Л., Ольховский В.С., Проконец Г.А.* Квантово-теоретическое объяснение временного распределения γ -квантов, резонансно рассеянных ядрами ^{57}Fe // Там же. – 1990. - Т. 54, № 5. - С. 988 - 990.

ОЦІНКА ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК І КІЛЬКОСТІ ЛАНОК ГАММА-ПОГЛИНАНЬ ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАНЬ РАДІОАКТИВНИХ ЯДЕР У ПРОЦЕСІ ЇХНЬОГО РОЗПАДУ

М. Е. Долінська, Н. Л. Дорошко, В. С. Ольховський

Квантово-механічний метод, який було запропоновано раніше для теоретичного обґрунтування резонансного розсіяння γ -квантів, узагальнено з урахуванням ефекту Доплера. Запропоновано новий алгоритм та отримано вирази для визначення характеристичних функцій розподілу енергії, ймовірностей та функцій розпаду. Проведено розрахунки для конкретних випадків розпаду збуджених ядер ^{14}C , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{238}U і ^{232}Th при кімнатній температурі з урахуванням ефекту Доплера і без нього.

EVALUATION OF THE TEMPORARY CHARACTERISTICS AND THE NUMBER OF THE STEPS OF THE GAMMA-ABSORPTION AND GAMMA-EMISSIONS OF THE RADIOACTIVE NUCLEI IN THEIR DECAY PROCESS

M. E. Dolinska, N. L. Doroshko, V. S. Olkhovsky

Quantum-mechanical method, which was proposed earlier for the theoretical description of the resonance scattering of the γ -quantum, was generalizing with Doppler effect usase. New algorithm elaborated and equations for the definition of the characteristic functions for the energy distribution, decay probability and decay functions obtained. The calculations have been performed for the concrete case of decay exited nuclei ^{14}C , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{238}U and ^{232}Th under room temperature taking into account Doppler's effect and without it.