

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

89 / 2-81

12/1-81

P13-80-516

М.Будзынски, В.В.Кузнецов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА
С ТОРОИДАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ $e^- - \gamma$
УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Направлено в сб. "Прикладная ядерная спектроскопия"

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении возбужденных состояний ядер как в ядерных реакциях, так и при бета-распаде целесообразным является применение эффективных методов ядерной спектроскопии, обладающих высоким разрешением и большой светосилой. В частности, бета-спектрометр с тороидальным магнитным полем^{1/1'}, имеющий большую светосилу $T \approx 20\%$ /от угла 4π / при разрешающей способности $\Delta N_p / N_p = 1,2\%$ в сочетании с $Ge(Li)$ -детекторами является хорошим прибором для исследования как характера излучения, так и схем распада. Спектры конверсионных электронов, получаемые с его помощью, не содержат фотопиков γ -излучения, в отличие от измеренных на спектрометрах с $Si(Li)$ -детекторами, что особенно существенно при работе в условиях повышенного фона. Все это, а также и сравнительно невысокие требования к размерам изображения радиоактивного источника /диаметр 10 мм/ делают бета-спектрометр с тороидальным магнитным полем приемлемым и перспективным для исследования короткоживущих ядер в режиме он-лайн, т.е. на линии протоны - мишень - масс-сепаратор - бета-спектрометр.

При использовании бета-спектрометра в режиме он-лайн можно исследовать:

а/ спектры электронов внутренней конверсии /определение значений энергии и интенсивности ЭВК и мультипольностей гамма-переходов/;

б/ спектры бета-частиц и позитронов /определение граничных энергий E_{tr} , разности масс Q_β , интенсивностей β -переходов и экспериментальных факторов формы/;

в/ спектры e^- - γ , β - γ совпадений /определение каскадных γ -переходов для построения схем распада, определение вероятностей β -распада и т.д./;

г/ e^- - γ , β - γ корреляции направлений. Из β - γ угловых корреляций, экспериментальных факторов формы при наличии других данных можно определить ядерные матричные элементы /ЯМЭ/.

Экспериментальные значения ЯМЭ можно использовать для уточнения современной теории β -распада для ядер, далеко удаленных от полосы β -стабильности;

д/ e^- - γ и β - γ возмущенные угловые корреляции /ВУК/.

На основе этих измерений можно определить электромагнитные моменты возбужденных состояний атомных ядер. В случае β - γ ВУК

можно определить не только величину, но и знак квадрупольного момента возбужденных состояний ядер.

Последний параметр может быть существенным для ядер, удаленных от полосы β -стабильности, где согласно теоретическим представлениям могут иметь место ядра в возбужденных состояниях с разной деформацией.

В результате измерений e^- - γ угловых корреляций получаем большую информацию, чем из γ - γ угловых корреляций. Измеряя e^- - γ корреляции, определяем спины и четности возбужденных состояний атомных ядер, а также тип и порядок мультипольности разряжающих их электромагнитных переходов. Можно исследовать $E0$ -переходы, аномальные коэффициенты конверсии и эффекты проникновения.

Существует много установок для измерений e^- - γ угловых корреляций. Наиболее характерные из них описаны в работах^{1,2-6/}. Первая установка e^- - γ угловых корреляций, в которой для отбора электронов по энергии использовано магнитное поле, построена в 1955 г.^{2/} Она была создана на основе бета-спектрометра с короткой линзой, с разрешением $2 \pm 3\%$. Бета-спектрометр с длинной линзой, использованной в установке e^- - γ угловых корреляций^{5/}, имеет трансмиссию 1,5% при разрешении 3%. Позднее в измерениях e^- - γ (Θ) применены бета-спектрометры с двойной фокусировкой^{6, 7/}. В работе^{8/} описана установка, построенная на базе бета-спектрометра Герхольма / $R = 1,7 \pm 4,7\%$; $2a = 1^\circ 54'$ /. Во всех этих установках для регистрации как β -частиц, так и γ -квантов используются сцинтилляционные детекторы.

Благодаря прогрессу в развитии технологии изготовления полупроводниковых детекторов стало возможным создание на их основе установок для измерения e^- - γ угловых корреляций, например^{7/}.

Однако измерения угловых корреляций являются продолжительными и трудоемкими, и поэтому, естественно, ведутся работы по увеличению скорости счета совпадений путем увеличения числа детекторов. Так, в установке, описанной в работе^{8/}, число детекторов увеличено до трех /2 линзовых бета-спектрометра и спектрометр со сцинтилляционным детектором γ -квантов/. При помощи этой установки можно измерять γ - e_1^- , γ - e_2^- и e_1^- - e_2^- угловые корреляции. Оба бета-спектрометра имеют разрешение 0,7% при трансмиссии 0,5%. Регистрация совпадений производится на механических счетчиках. Установка^{9/} содержит три спектрометра с Ge(Li)-детекторами и один с Si(Li)-детектором. Для накопления информации используется ЭВМ "Минск-22". При помощи этой установки можно измерять e^- - γ угловые корреляции [2Ge(Li)+Si(Li)] и γ - γ угловые корреляции [3Ge(Li)]. Для измерений e^- - γ и e^- - e^- угловых корреляций была создана 4-детекторная установка^{10/}. Она содержит 3 бета-спектрометра типа спектрометра Герхольма и 2 спектрометра с NaJ(Tl)-детекторами.

Только одна установка /1/ для измерений e^- -угловых корреляций работает в режиме он-лайн, в ней используется линзовый бета-спектрометр / $T = 1,7\%$, $R = 1,7\%$ / с $Si(Li)$ -детектором для регистрации электронов и спектрометр с $Ge(Li)$ -детектором для регистрации γ -лучей.

2. ИЗМЕРЕНИЯ e^- -У УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ "В ПРОСТРАНСТВЕ"

Функция γ - γ угловой корреляции принимается в качестве стандарта, отражающего "геометрию" корреляционного процесса. Модифицируя ее соответствующим способом, можно представить угловые корреляции разных типов ядерного излучения. В общем случае функция угловой корреляции имеет вид

$$W(k_1, k_2, t) = \sum_{k_1 k_2} \sum_{N_1 N_2} A_{k_1}(\gamma) A_{k_2}(\gamma) G_{k_1 k_2}^{N_1 N_2}(t) \times \quad /1/$$

$$\times \sqrt{(2k_1+1)(2k_2+1)} Y_{k_1}^{N_1}(\theta_1, \phi_1) Y_{k_2}^{N_2}(\theta_2, \phi_2),$$

где $A_{k_1}(\gamma)$, $A_{k_2}(\gamma)$ - корреляционные коэффициенты для каскада

$J_1 \xrightarrow{\gamma(1)} J \xrightarrow{\gamma(2)} J_f$; $Y_k^N(\theta, \phi)$ - сферические шаровые функции

/сферические гармоники/; $G_{k_1 k_2}^{N_1 N_2}(t)$ - фактор возмущения. Угловые координаты, используемые в формуле /1/, показаны на рис.1.

Если вместо одного из γ -квантов регистрируется электрон внутренней конверсии перехода, то коэффициент корреляции содержит электронный параметр $b_k^q(L, L', e^-)$ и коэффициент конверсии $a^q(L)$ находится на q -й оболочке / $q = K, L_I, L_{II} \dots$ и т.д./ . Тогда

$$A_k(e_1^-) = \frac{1}{1 + \delta(e_1^-)^2} [b_k^q(L_1 L_1', e_1^-) F_k(L_1 L_1', J_1 J) + (-1)^{L_1 - L_1'} \delta(e_1^-) \times \quad /2a/$$

$$\times b_k^q(L_1 L_1', e_1^-) F_k(L_1 L_1', J_1 J) + \delta^2(e_1^-) b_k^q(L_1' L_1', e_1^-) \times$$

$$\times F_k(L_1' L_1', J_1 J)],$$

$$A_k(e_2^-) = \frac{1}{1 + \delta(e_2^-)^2} [b_k^q(L_1 L_2', e_2^-) F_k(L_2 L_2' J J) + 2\delta(e_2^-) b_k^q(L_2 L_2', e_2^-) \times \\ \times F_k(L_2 L_2' J J) + \delta^2(e_2^-) b_k^q(L_2' L_2', e_2^-) F_k(L_2' L_2' J J)],$$

где

$$\delta(e_1^-) = \delta(\gamma_1) \sqrt{\frac{\alpha(L_1)}{\alpha(L_1')}} \quad /3a/$$

$$\delta(e_2^-) = \delta(\gamma_2) \sqrt{\frac{\alpha(L_2)}{\alpha(L_2')}} \quad /36/$$

Коэффициенты $b_k^q(LL', e^-)$ и $\alpha_k^q(L)$ приведены в таблицах работ /12, 13/.

В случае переходов, когда $b_k^q(LL', e^-) > 1$ и $\alpha_k^q(L) \gg 1$, исследование e^- -у угловых корреляций является более выгодным, чем γ -у угловых корреляций. В этом случае за счет большей, чем в γ -у угловых корреляциях, анизотропии, с одной стороны, точность экспериментальных результатов повышается, с другой - значительно сокращается время измерений, что очень важно для таких трудоемких измерений, особенно при исследовании короткоживущих изотопов. Следует обратить внимание на то, что метод e^- -у угловых корреляций является единственным для исследования каскадов, в которых один из переходов - сильно конвертированный ($\alpha_k^q(L) \gg 1$).

Функцию e^- -у угловой корреляции можно записать следующим образом:

$$W(\theta, \phi, t) = \sum_{k_1 k_2} \sum_{N_1 N_2} A_{k_1}(\gamma) A_{k_2}(e^-) G_{k_1 k_2}^{N_1 N_2}(t) \sqrt{(2k_1 + 1)(2k_2 + 1)} \times \\ \times Y_{k_1}^{N_1*}(\theta_1, \phi_1) Y_{k_2}^{N_2}(\theta_2, \phi_2). \quad /4/$$

Зависимость от углов содержит только члены $Y_k^N(\theta, \phi)$. Сферические шаровые функции являются собственными функциями оператора орбитального углового момента. Они характеризуют угловое распределение частиц, обладающих орбитальным моментом k , а проекция на ось квантования равна N ($k=0, 1, 2; N=k, k-1, k-2, \dots, -k$). Функции для $k=0 \div 5$ даны в работе /14/, ряд из которых /для $k=0, 1, 2$ / приведен ниже:

$$Y_0^0(\theta, \phi) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}, \quad Y_1^1(\theta, \phi) = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2\pi}} \sin\theta e^{i\phi},$$

$$Y_1^0(\theta, \phi) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{\pi}} \cos\theta, \quad Y_1^{-1}(\theta, \phi) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2\pi}} \sin\theta e^{-i\phi},$$

$$Y_2^2(\theta, \phi) = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin^2\theta e^{i2\phi} = \frac{1}{8}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} (1 - \cos 2\theta) e^{i2\phi},$$

$$Y_2^1(\theta, \phi) = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \cos\theta \sin\theta e^{i\phi} = -\frac{1}{4}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin 2\theta e^{i\phi}, \quad /5/$$

$$Y_2^0(\theta, \phi) = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{5}{\pi}} (3\cos^2\theta - 1) = \frac{1}{8}\sqrt{\frac{5}{\pi}} (1 + 3\cos 2\theta),$$

$$Y_2^{-1}(\theta, \phi) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \cos\theta \sin\theta e^{-i\phi} = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin 2\theta e^{-i\phi},$$

$$Y_2^{-2}(\theta, \phi) = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin^2\theta e^{-i2\phi} = \frac{1}{8}\sqrt{\frac{15}{2\pi}} (1 - \cos 2\theta) e^{-i2\phi}.$$

Используя аналитическую формулу $Y_k^N(\theta, \phi)$,^{14/} можно вычислять функцию угловой корреляции /в пространстве/ для разного набора углов (θ, ϕ) . До сих пор измерения угловых корреляций проводились в более простом и удобном варианте - "в плоскости", т.е. при $\theta = 90^\circ$:

$$W(\theta, t) = \sum_{k_1 k_2} \sum_{N_1 N_2} A_{k_1}(y) A_{k_2}(e^-) G_{k_1 k_2}^{N_1 N_2}(t) P_k(\cos\theta). \quad /6/$$

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ e^- -УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Установку для измерения e^- -угловых корреляций $W(\theta, \phi)$ можно создать на базе бета-спектрометра с тороидальным магнитным полем. В течение многих лет исследования по программе ЯСНАПП свойств нейтронодефицитных изотопов проводились в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Этот бета-спектрометр является

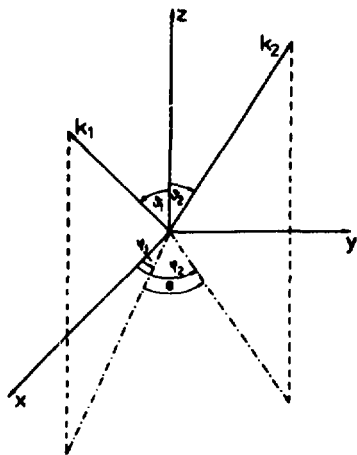


Рис.1. Направление вылета излучения при распаде ядер.

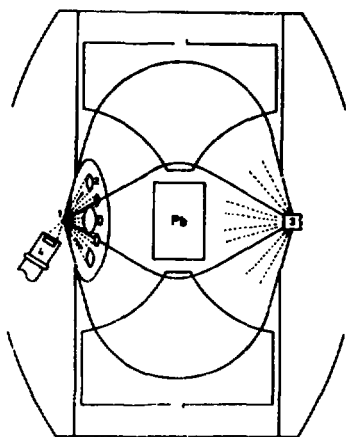


Рис.2. Схематическое расположение деталей в камере бета-спектрометра при измерениях $e^- \gamma$ угловых корреляций: 1 - радиоактивный источник, 2 - диафрагмы, 3 - расположение Si(Li) -детекторов, 4 - Cs(Li) - детектор.

надежным и стабильным в эксплуатации прибором, за многие годы на нем исследовались спектры электронов внутренней конверсии переходов, $e^- \gamma$ совпадений, позитронов и β -частиц.

Чтобы обеспечить возможность исследования короткоживущих изотопов вплоть до 0,1 с, необходимо создать лентопротяжное устройство для сбора радиоактивных ядер в районе источника - фокуса бета-спектрометра. Установка лентопротяжного устройства не изменит основных параметров бета-спектрометра - разрешающей способности и трансмиссии прибора. Для осуществления возможности измерения $e^- \gamma$ угловых корреляций предлагаем поставить несколько детекторов в районе фокуса бета-спектрометра, а на пути пролета электронов /в любом месте, в частности, вблизи детекторов/ - дополнительные диафрагмы /рис.2/. Диафрагмы необходимы для выделения пучков электронов под определенными углами в пространстве и для точного определения телесных углов регистрируемых электронов. Предлагается использование спектро-

метра для измерения $e^- - \gamma$ угловых корреляций при 8 позициях детекторов электронов. Телесный угол выбирается равным $2\alpha = 15^\circ$. При осуществлении измерения $e^- - \gamma$ угловых корреляций из-за отбора электронов по телесным углам трансмиссия снизится, но будет не меньше 4,2% в сумме для 8 положений детекторов электронов /для каждого из них $\sim 0,5\%$ / от угла 4π . Для регистрации электронов можно использовать сцинтилляционные детекторы со световодами или Si(Li)-детекторы с размерами $S = 2 \times 10 \text{ мм}^2$, расположенные на цилиндре диаметром 15 мм.

Этот вариант измерений $e^- - \gamma$ угловых корреляций осуществляется без наличия какого-либо механического движения детекторов во время эксперимента, причем обеспечивается одновременная регистрация спектров совпадения γ -лучей с электронами для нескольких положений детекторов электронов. При этом ухудшается энергетическое разрешение до $\Delta H_p / H_p = 1,5 \div 2\%$.

Измерения $e^- - \gamma$ угловых корреляций можно проводить с использованием электроники, созданной по блок-схеме рис.3. Блок-схема составлена в основном из стандартных блоков электроники, разработанных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

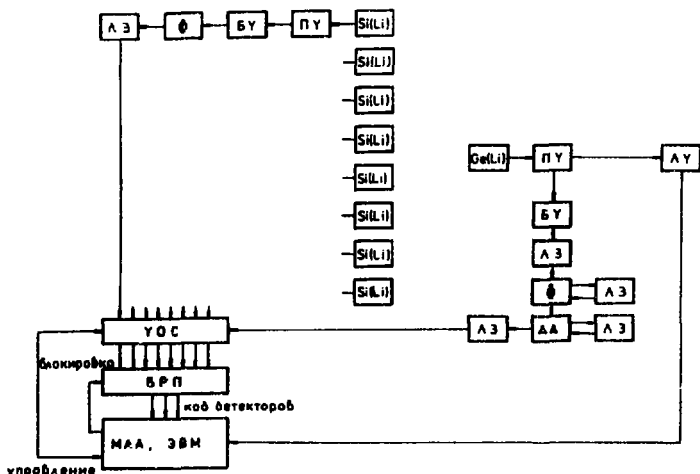


Рис.3. Блок-схема электроники для измерений $e^- - \gamma$ угловых корреляций: ПУ - предусилитель, БУ - быстрый усилитель, Ф - формирователь, ЛЗ - линия задержки, УОС - устройство отбора совпадений, БРП - блок разделения памяти, М.А.А. - многоканальный анализатор амплитуды, ЛУ - линейный усилитель, ДД - дискриминатор длительности.

Анализ измерений будет достаточно трудоемким, что обусловлено сложностью аналитической формы сферических шаровых функций, а также самой постановкой эксперимента. Поэтому обработку и накопление экспериментальных результатов следует вести с использованием ЭВМ.

Измерения e^- - γ угловых корреляций "в пространстве" до сих пор не проводились. Задача эта является новой и может быть очень эффективной для исследования ядер, удаленных от полосы бета-стабильности. Измерения e^- - γ угловых корреляций с использованием бета-спектрометра с тороидальным магнитным полем могут быть существенным дополнением в исследованиях, намеченных по программе ЯСНАПП. Этот многодетекторный вариант /рис.3/ является с методической стороны довольно простым для осуществления, так как эффективность регистрации e^- - γ совпадений является одинаковой для всех измеряемых точек функции угловой корреляции.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить профессора К.Я.Громова и М. Гасиора за ценные замечания при обсуждении этой проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов К.Я. и др. В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия. Атомиздат, М., 1978, 8, с.59; Гасиор М. и др. ОИЯИ, Дб-7094, Дубна, 1973, с.167.
2. Goldberg N., Frankel S. Phys.Rev., 1955, 100, p.1350.
3. Gerholm T.R., Petterson B.-G. Nucl.Instr. and Meth., 1959, 4, p.107.
4. Yamazaki T. Nucl.Phys., 1963, 44, p.353; Sakai M., Ikegami H., Yamazaki T. Nucl.Instr. and Meth., 1960, 9, p.154.
5. Autman S. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1970, 82, p.13.
6. Kukoc A., Marinkov L. Nucl.Instr. and Meth., 1965, 37, p.77.
7. Будзынски М. и др. ОИЯИ, P13-13021, Дубна, 1980.
8. Falk F. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1967, 49, p.240.
9. Алдущенков А.В., Воинова Н.М. Препринт ФТИ-347, Л., 1971; Воинова Н.М. и др. Изв.АН СССР, сер.физ., 1976, 42, с.2278.
10. Kleinheinz P. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1965, 32, p.1.
11. Westerberger L. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1975, 128, p.61.
12. Hager R.S., Seltzer E.C. Nuclear Data, 1968, A4, p.397.
13. Hager R.S., Seltzer E.C. Nuclear Data, 1968, A4, p.68.
14. Варшалович Д.А., Москалев А.Н. Квантовая теория углового момента. "Наука", Л., 1975, с.115.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июля 1980 года.