

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

94-277

P13-94-277

И.Адам, К.Блажек¹, М.Гонусек², П.Малы¹

РАСЧЕТ АНТИКОМПТОНОВСКОГО
(Ge-VGO+NaI(Tl))-СПЕКТРОМЕТРА
(Проект прибора)

¹«Монокристаллы», Турнов, ЧР

²ИЯФ, Ржеж, ЧР

За последние двадцать лет существенным образом улучшились основные параметры антикомптоновских спектрометров, возросло их число и расширились области их применения. В таблице 1 приведены основные параметры антикомптоновских спектрометров, которые были опубликованы в работах /1-18/. От измерения простых γ -спектров ($i=1$) переходят к измерениям двух- ($i=2$) и более кратных ($\gamma-\gamma$) - совпадений. Используя антикомптоновские спектрометры, исследуют структуру ядра при бета-распаде и при ядерных реакциях. Широкая область применения антикомптоновских спектрометров потребовала улучшения их свойств и основных параметров.

Одновременное использование нескольких антикомптоновских спектрометров (в Даресбэри их число достигло 30) при изучении ядер, возбужденных в ядерных реакциях, рассмотрено в обзорной работе /19/. Необходимость применения антикомптоновской защиты вытекает из соотношения для "разрешающей силы" (resolving power) R_i

$$R_i = \left(\frac{SE_\gamma}{\Delta E_\gamma} r \right)^i, \quad (1)$$

где SE_γ - средняя разность энергий соседних γ -линий (зависит от характера возбуждения ядерных состояний и формы возбужденных ядер и для деформированных ядер, возбужденных в реакции с тяжелыми ионами, обычно принимается $SE_\gamma=60$ кэВ /19/). Энергетическое разрешение $\Delta E_\gamma=2$ кэВ для линий ^{60}Co . Указанное значение ΔE_γ - практически граница разрешающей способности Ge-детекторов, и, вероятно, в близком будущем не удастся ее существенно улучшить. На качество измерений влияют значение r , т.е. отношение интенсивности пика полного поглощения (P) к интенсивности всего спектра (T) ($r=P/T$), и кратность совпадений i . Отношение интенсивности пиков полного поглощения к суммарной интенсивности i -кратных совпадений (p_i)

Таблица 1. Антикмптоновские спектрометры - основные параметры

Ge дет.	NaI (Tl) сцинтил.	Кэф. подавл.	P/T (⁶⁰ Co)	Тел. уг.	Раб.
Объем, м.сл.	Ø x h	отвер.	компт. сп.	Ge; АКС	Ge
[см ³ , мм]	[смxсм]	[см]	⁶⁰ Co	[%]	[мср]
40 ^{a)}	22x15	7,6 ^{d)}	4,5-3,7 ^{g)}		[1]
11%, <1 ^{a)}	20x30	6,5 ^{d)}	6 ^{j)} , 10 ⁱ⁾		38 [2]
15%, <0,7 ^{a)}	25x23	8,4 ^{e)}	9,5 ^{j)}		[3]
6%, 1,5 ^{a)}	25x20	7,0 ^{e)}	7,6 ^{j)}		9 [4]
11% ^{a)}	23x20	8,7 ^{e)}	5,3 ^{j)}		90 [5]
^{a)}	25x23	8,0 ^{e)}	7-12 ^{h)}		54 [6]
10%, <0,5 ^{a)}	25x25	7,0 ^{e)}	9 ^{j)} , 14,5 ^{j)}		4 [7]
126, 1 ^{a)}	23x28	7,4 ^{e)}	8,4 ^{j)}		[8]
90, 0,22 ^{b)}	"-	"-	11,2 ^{j)}	18;65	"-
20%, 0,22 ^{b)}	30x35	7,4 ^{e)}	11,8 ^{j)}	15;60	120 [9]
25%, ^{c)}	20x25	7,0 ^{e)}	7 ^{j)}	19;51	90 [10]
25%, ^{a)}	23x25		7,2 ^{j)}		[25]
BGO + (NaI (Tl))					
23%, ^{c)}	14,5x12,5 ^{k)}	^{d)}	8,5 ^{j)}	15;44	[11]
30%, ^{c)}	13,0x12,5 ^{l)}	7,3 ^{d)}	6 ^{j)}		206 [12]
2x70+2 ^{b)}	"-	"-	11 ^{j)}		174 [12]
21%, ^{c)}	19,0x17,0 ^{m)}	7,2 ^{d)}	12,1 ^{j)}	16;53	[13]

25%, ^{c)}	16,0x15,0 ⁿ⁾	7,5 ^{d)}	10 ^{j)}	20;60	[14]
18%, 16% ^{b)}	12,5x12,0 ^{o)}	6,7 ^{d)}	9 ^{j)}	;53	[15]
^{b)}	5,5 ² x8,0 ^{p)}	^{e)}	5,2 ^{j)}	17;46	[16]
25%, ^{c)}	13,3x15,2 ^{q)}	7,1 ^{e)}	6 ^{j)}	18;52	86 [17]
25%, ^{c)}	13,5x14,5 ^{r)}	7,6 ^{f)}	12 ^{j)}	17;56	[18]

Примечание:

- a) Ge (Li)-детектор характеризуется рабочим объемом [см³] или эффективностью регистрации ⁶⁰Co [%] по отношению к эффективности NaI (Tl) с диаметром 7,6 см и высотой 7,6 см. Толщина мертвого слоя на поверхности детектора дана в мм.
- b) HPGe-детектор р-типа, остальное то же самое, как в а).
- b') Три Ge-кристалла, размещенные друг за другом в одном криостате. Первый планарный кристалл (Ø 48 мм, толщина 11 мм), за ним следуют два коаксиальных детектора р-типа (объем каждого 70 см³).
- b'') Два коаксиальные HPGe-детектора р-типа в одном криостате.
- c) HPGe-детектор п-типа. Объем или эффективность указаны таким же образом, как в а). Мертвые слои на поверхности меньше 0,3 мкм.
- d) Аксиально-симметричная геометрия. Ось защитного сцинтиллятора и ось Ge-детектора совпадают с направлением пучка γ-излучения.
- e) Аксиально не симметричная геометрия. Ось Ge-детектора параллельна оси защитного кристалла, которая перпендикулярна направлению пучка γ-излучения.
- f) Аксиально-симметричная геометрия (ось Ge совпадает с осью защитного детектора) с отверстием для γ-излучения с боковой стороны.
- g) Коэффициент подавления комптоновского спектра измерялся в области от 2,5 МэВ до 3,2 МэВ в реакции ¹⁰B(α, pγ) (энергии зарегистрированных γ-квантов равны 3090 кэВ, 3685 кэВ и 3854 кэВ).
- h) Коэффициент подавления комптоновского спектра (с_γ) в области от 150 кэВ до 1100 кэВ измерялся в эксперименте на пучке.
- i) Максимальное значение с_γ для ⁶⁰Co в области E_γ от 400 кэВ до 900 кэВ.

- j) Среднее значение $c_{\text{с}}$ для ^{60}Co в области от 100 кэВ до 1100 кэВ.
 к) Антикмптоновская защита состоит из 6 оптически изолированных кристаллов BGO и переднего NaI(Tl)-кристалла толщиной $t=3$ см.
 л) Антикмптоновская защита состоит из 8 оптически изолированных кристаллов BGO и переднего NaI(Tl), $t=3$ см.
 м) Антикмптоновская защита состоит из 6 оптически изолированных кристаллов BGO.
 н) Антикмптоновская защита состоит из 8 кристаллов BGO, и следующие 4 кристалла BGO заполняют пространство за Ge-детектором (внутренний диаметр 2,2 см и внешний диаметр 7,4 см). Длина каждого из этих 4 кристаллов равна 6 см. На передней стенке имеется NaI(Tl)-сцинтиллятор с $t=5$ см.
 о) Антикмптоновская защита состоит из 8 оптически изолированных кристаллов BGO.
 п) Антикмптоновская защита состоит из 16 BGO-кристаллов, оптически изолированных.
 q) Антикмптоновская защита создана из 7 оптически изолированных BGO-кристаллов.
 r) Аналогично тому, что, в п), кроме того, что пространство за Ge-детектором заполнено 6 BGO-кристаллами и на передней стенке спектрометра имеются BGO-кристаллы с $t=3$ см.

представляет отношение полезной информации к всей информации, полезной и бесполезной (фону, балласту). Оно дается отношением

$$P_i = r_i^4 \quad (2)$$

Статистическая точность (a) при измерении интенсивности i -кратных совпадений (N_{iP}) может быть получена при регистрации числа N_i совпадений, которое дано соотношением

$$N_i = \frac{(1 + \sqrt{1 - P_i})^2}{a^2 P_i} \quad (3)$$

где $a = K/\sqrt{N_{iP}}$, $K=1,2,3$, $N_{iP} = N_i - N_{iB}$, N_{iB} - фон. Из соотношения (3) вытекает, что N_i является чувствительной функцией параметра P_i .

Обозначим r_0 отношение P/T для Ge-детектора без антикомптоновской защиты. Это отношение можно увеличить до значения r_1 , используя антикомптоновскую защиту

$$r_1 = \frac{1}{1 + \frac{1}{c_{\text{с}}} \left(\frac{1}{r_0} - 1 \right)} \quad (4)$$

где $c_{\text{с}}$ - среднее значение коэффициента подавления комптоновского непрерывного спектра (C). Обычно значение $c_{\text{с}}$ вычисляется для спектра ^{60}Co в области энергий от 100 кэВ до 1100 кэВ. Качество антикомптоновской защиты иногда характеризуется максимальным значением коэффициента подавления $c_{\text{с}}$ (макс.), которое обычно для ^{60}Co имеет место в области энергий от 400 кэВ до 900 кэВ. Следующей характеристикой Ge-детекторов и антикомптоновских спектрометров является отношение пик/комpton (P/C), которое также вычисляется для γ -спектра ^{60}Co . Здесь P - высота линии 1332 кэВ и C - среднее значение высоты комптоновского плато в области энергии

от 1040 кэВ до 1096 кэВ (см., например, /12/). Значение Р/С зависит также от энергетического разрешения ΔE_γ .

Число i -кратных совпадений в сек (n_i) при регистрации каскада, состоящего из m переходов, q одинаковыми Ge-детекторами с эффективностью регистрации ϵ и телесным углом ω дается соотношением

$$n_i = I (\epsilon \omega)^i \frac{m! q!}{(m-i+1)! (q-i+1)!} \quad (5)$$

где I равно числу событий/сек в мишени (или числу распадов/сек). Величина n_i сильно зависит от значения телесного угла (см. формулу (5)). Определение телесного угла ω для антикомптоновского спектрометра дано в работе /8/ как отношение площади отверстия перед Ge-детектором к квадрату расстояния между Ge-детектором и мишенью (или РА источником). Расширение γ -линий, соответствующее доплеровскому сдвигу энергии γ -квантов, примерно равно

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma \frac{\bar{v}}{c} \Delta \delta \cos \bar{\phi} \quad (6)$$

где v - скорость ядра отдачи. Значение \bar{v} изменяется в интервале $(v-\Delta v, v+\Delta v)$, $\Delta \delta$ - интервал углов, в котором движется ядро отдачи, $\bar{\phi}$ - интервал углов между скоростью ядер отдачи и направлением γ -квантов, зарегистрированных Ge-детектором. В реакции с тяжелыми ионами имеем типичные значения: $v/c = 0,03$, $\Delta \delta = 5^\circ$ и $\Delta v/v = 0,2$ для мишени толщиной 1 мг/см² (см. /20/). Используя эти значения и полагая, что $E_\gamma = 1$ МэВ и $\omega = 2,3 \times 10^{-3}$, получим ухудшение энергетического разрешения из-за эффекта Доплера. Оно равно $\Delta E_\gamma = 6,9$ кэВ для $\phi = 90^\circ$ и $\Delta E_\gamma = 6,4$ кэВ для $\phi = 0^\circ$.

Большое количество переходов в каскаде (от $m=15$ до $m=25$, т.е. большое значение множественности переходов) вместе с практически одновременным вылетом нейтронов (например, число нейтронов $\nu=4$) влияет отрицательно на величину коэффициента подавления комптонов-

ского спектра из-за уменьшения интенсивности пика полного поглощения вследствие паразитных совпадений остальных каскадных γ -переходов или нейтронов в детекторах антикомптоновской защиты. Подробный анализ этого явления сделан в работе /5/ сравнением вычисленной интенсивности паразитных совпадений P_γ или P_ν в реакции $^{166}\text{Er} (^{16}\text{O}, 4n\gamma) ^{178}\text{Os}$, используя соотношения

$$P_\gamma = \Omega (m-1) \epsilon_\gamma a_\gamma / 4\pi,$$

$$P_\nu = \Omega (\nu-1) \epsilon_\nu a_\nu / 4\pi,$$

где Ω - телесный угол детекторов антикомптоновской защиты. Уменьшение интенсивности паразитных совпадений требует уменьшения телесного угла Ω . Эффективность регистрации гамма-квантов (или нейтронов) обозначим ϵ_γ (или ϵ_ν). Коэффициент ослабления интенсивности гамма-квантов (или нейтронов) слоем вольфрама перед антикомптоновской защитой обозначим a_γ (или a_ν). Параметры ϵ_i ($i=\gamma$ или ν) и a_i сильно зависят от энергии γ -квантов и от используемого сцинтиллятора. Например, в работе /21/ регистрировали нейтроны, возникающие в реакции $^{181}\text{Ta} (\alpha, xn\gamma)$ ($E_\alpha = 90$ МэВ), детекторами NaI(Tl) и ВГО одинаковых размеров. В ВГО-кристалле зарегистрировано на 11% больше нейтронов, чем в NaI(Tl)-кристалле. Необходимый объем антикомптоновской защиты из ВГО примерно в 10 раз меньше, чем объем NaI(Tl)-кристалла, поэтому в первом случае регистрируется в 9 раз меньше паразитных нейтронов, чем во втором.

Несмотря на значительные усилия, направленное на подавление паразитных совпадений с использованием NaI(Tl), интенсивность пика полного поглощения уменьшилась в среднем на 18% (из них в 2% были ответственны случайные совпадения, в 8% - взаимодействие нейтронов с защитным кристаллом NaI(Tl) и остальные 8% были обязаны взаимодействию γ -квантов с тем же кристаллом).

Мертвое время схемы совпадений (P [%]), которое связано со

случайными совпадениями, в первом приближении дано соотношением ^{16/}

$$P = 2\tau I ,$$

где τ - разрешающее время совпадений и I - число зарегистрированных импульсов в сек в одном кристалле сцинтилляционной защиты, когда она состоит из нескольких оптически изолированных сцинтилляторов. Разрешающее время τ в антикомptonовских спектрометрах бывает обычно достаточно большое, например, $\tau=400$ нс, чтобы были зарегистрированы все случаи совпадения в Ge-детекторе и в сцинтилляционной защите. Поэтому выгодно уменьшить значение I разделением защиты на несколько частей.

Геометрическое размещение Ge-детектора и защитного сцинтиллятора по отношению к направлению пучка γ -квантов может быть симметричное (оси входного отверстия для γ -квантов и колодца для Ge-детектора в сцинтилляторе защиты совпадают с осью сцинтилляционного кристалла) или не симметричное (ось входного отверстия для γ -квантов и ось колодца для Ge-детектора взаимно перпендикулярные). Преимущество симметричного перед не симметричным размещением состоит в том, что можно компактно разместить большое число антикомptonовских спектрометров. Хотя симметричное размещение имеет и значительные недостатки: коэффициент подавления, близкий к 1 для комptonовски рассеянных γ -квантов в направлении вперед или назад; значение c_{γ} уменьшается для γ -квантов с ростом энергии (поскольку угловое распределение комptonовски рассеянных γ -квантов имеет все более высокий и узкий максимум в направлении вперед) и интенсивность пиков двойного вылета подавлена лишь частично из-за двух противоположных отверстий в защите.

На основе всех выше рассмотренных критериев и ввиду современных возможностей производства BGO-кристаллов (ограничение их размеров) и их стоимости мы предложили конструкцию антикомptonовского

спектрометра, указанную на рис. 1 и 2. Наше предложение основано на расчетах коэффициента подавления комptonовского непрерывного спектра методом Монте-Карло (см. ^{122/}). Математический аппарат метода Монте-Карло, который применялся для γ -спектрометров, достаточно подробно рассмотрен в работах ^{123, 24/}.

Большинство расчетов нами сделано для реального Ge(Li)-детектора (с эффективностью 6%, $\Delta E_{\gamma}=2,25$ кэВ и $P/C=20$ для $E_{\gamma}=1332$ кэВ). Мы использовали несколько упрощенную форму Ge(Li)-детектора: это цилиндр с диаметром 40 мм, высотой 50 мм, внешним мертвым слоем (n-типа) толщиной 1,5 мм и внутренним мертвым объемом (p-ядро) в виде цилиндрика диаметром 14 мм и высотой 40 мм, его ось совпадает с осью Ge(Li)-кристалла. Детектор Ge(Li) помещен в чехол из алюминия с толщиной стены 2 мм. Этот паразитный слой мы учитывали прибавлением к внешнему n-мертвому слою дополнительно 1 мм германия, аналогично работе ^{122/}. В конечном счете, мы работали с внешним паразитным слоем Ge(Li) толщиной 2,5 мм.

На рис. 3 и 4 представлены результаты исследования влияния на коэффициент подавления c_{γ} части защиты из BGO-кристаллов при регистрации γ -квантов с энергией 1332 кэВ. Для этой энергии γ -квантов влияние изменения длины защиты (см. рис. 3) на значение $c_{\gamma}(E_{\gamma})$ в области энергии от 200 кэВ до 800 кэВ незначительно. Несколько больше это влияние проявляется в области низких энергий, около 100 кэВ. Существенно изменяется значение c_{γ} (см. рис. 4) для энергии первичных γ -квантов, равной 1332 кэВ, с изменением диаметра BGO-и NaI(Tl)-кристаллов во всей области энергии от 100 кэВ до 1100 кэВ. Зависимость $c_{\gamma}(E_{\gamma})$ от энергии рассчитывалась с шагом 20 кэВ и полученные результаты усреднялись проведением через них плавной кривой. На рис. 5 приводятся средние значения коэффициента подавления для разных диаметров защитных сцинтилляторов в зависимости от

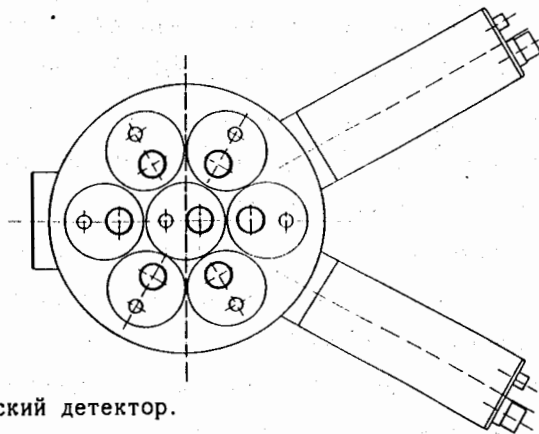
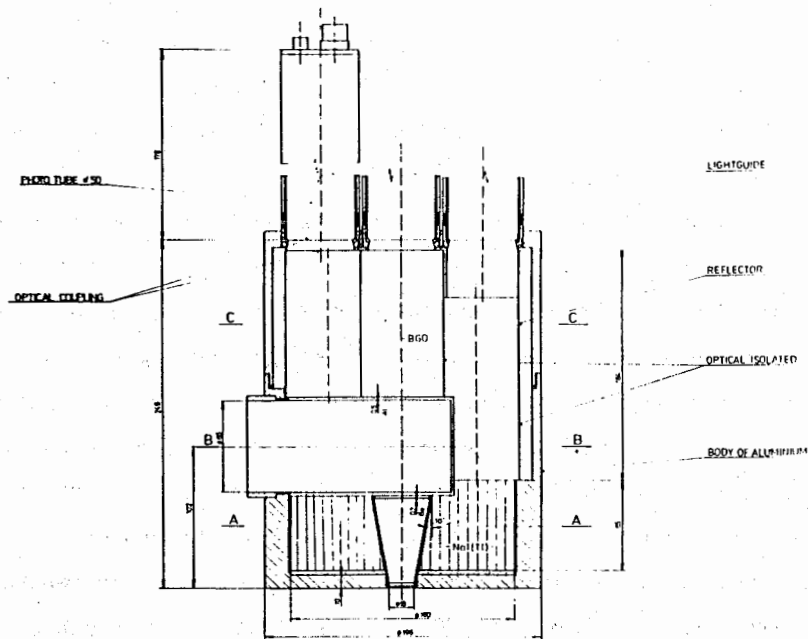


Рис. 1. Антикмптоновский детектор.

- а) Сечение детектора в плоскости оси детектора и оси колодца для Ge-кристалла. В-В - плоскость с осью колодца для Ge-кристалла. Гамма-излучение попадает на Ge-детектор через коническое отверстие в NaI(Tl)-кристалле.
- б) Задняя стенка антикмптоновского детектора с разъемами семи фотоумножителей от BGO-кристаллов и двух фотоумножителей от двух половин NaI(Tl)- кристалла.

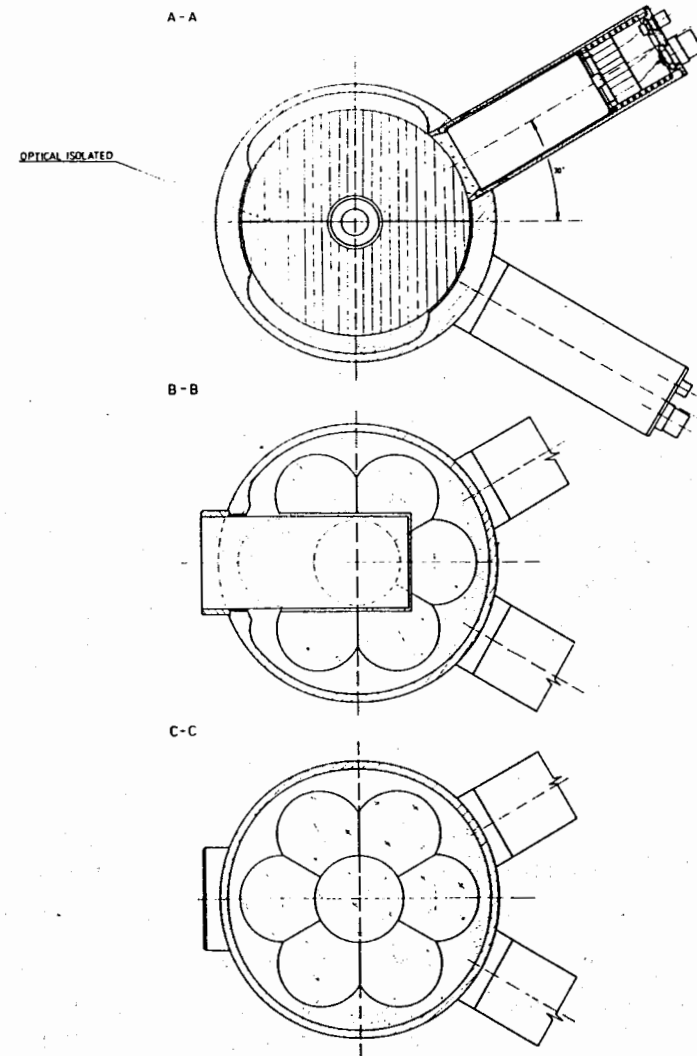


Рис. 2. Сечения антикмптоновского детектора. А-А - сечение по переднему NaI(Tl)-кристаллу, диаметр 160 мм, высота 40 мм. В середине показано входное окно для γ -излучения. В-В - сечение в оси колодца для Ge-детектора. С-С - сечение семи BGO-кристаллов с диаметром 60 мм. Внешние кристаллы имеют вид "цветков ромашки".

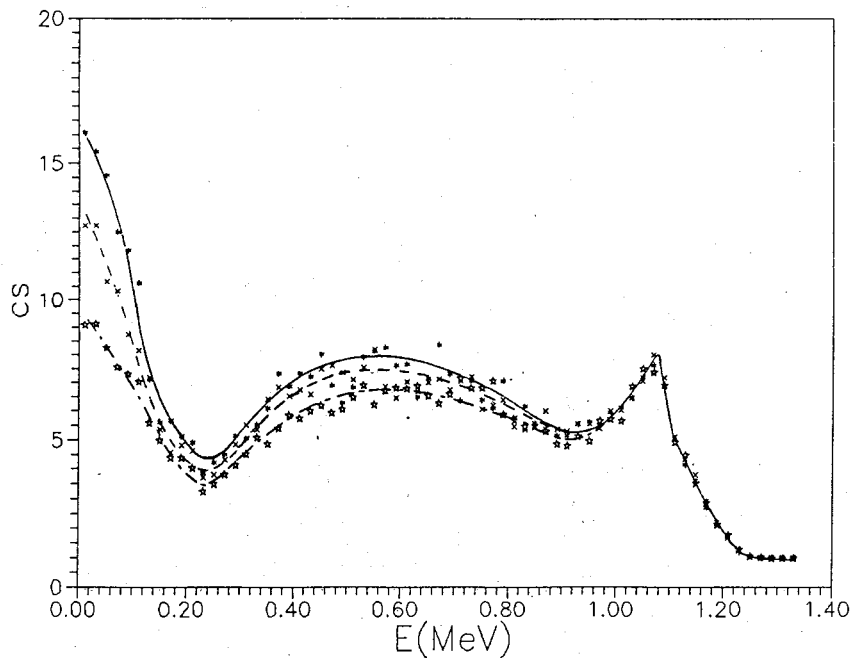


Рис.3 Зависимость коэффициента подавления $c_s(E_\gamma)$ от высоты ВГО-кристаллов. Первичные γ -кванты с энергией 1332 кэВ регистрировались "реальным" Ge(Li)-детектором (см. текст). Длина кристаллов бралась равной 131 мм (—), 111 мм (---) и 91 мм (-·-). Внешний диаметр был всегда равен 160 мм.

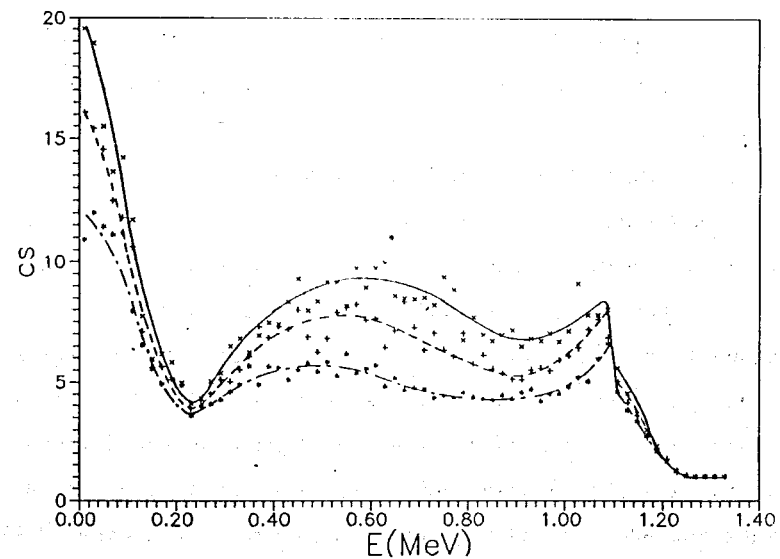


Рис.4 Зависимость коэффициента подавления $c_s(E_\gamma)$ от внешнего диаметра антикомptonовской защиты. Он был равен 190 мм (—), 160 мм (---) и 130 мм (-·-). Длина кристаллов была равна всегда 131 мм. Расчеты сделаны для "реального" Ge(Li)-детектора.

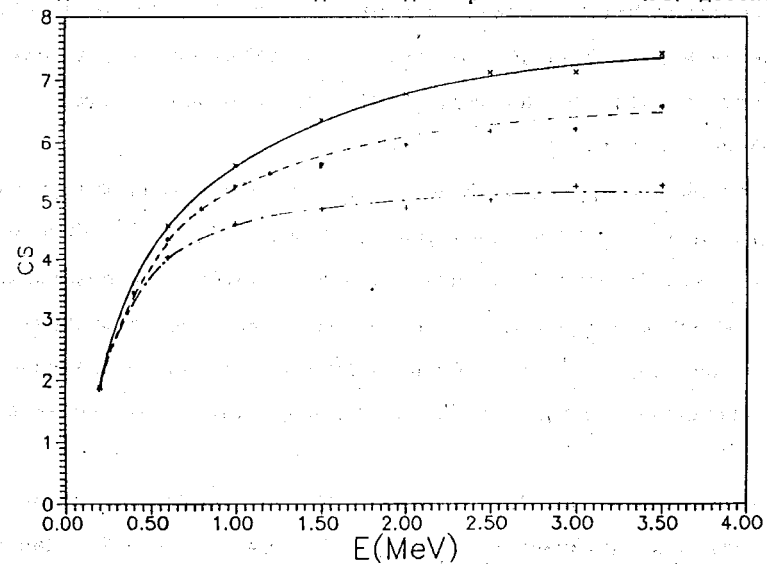


Рис.5 Средние значения коэффициента подавления c_s в зависимости от энергии первичных γ -квантов для внешнего диаметра защиты: 130 мм (-·-), 160 мм (---) и 190 мм (—) для "реального" Ge(Li)-детектора.

энергии первичных γ -квантов. С увеличением их энергии от 500 кэВ до 3500 кэВ растет влияние изменения диаметра защитного сцинтиллятора на значение c_{γ} .

Внешняя защитная часть антикомптоновского спектрометра состоит из 7 BGO-кристаллов (\varnothing 60 мм, длина 135 мм) и NaI(Tl)-сцинтиллятора (\varnothing 160 мм, толщина 40 мм), который имеет входное коническое отверстие для γ -излучения (внешний диаметр отверстия 18 мм, внутренний 45 мм) (см. рис.1). Сечение С-С через BGO-сцинтилляторы имеет вид "ромашки". Такая форма максимальным образом использует BGO-сцинтилляторы, поскольку суммарная площадь сцинтилляторов увеличивается на 57,7% по сравнению с площадью круга с диаметром 120 мм. Отдельные BGO-кристаллы взаимно оптически изолированы слоем алюминия толщиной 0,1 мм. В передней части BGO-кристаллов имеется цилиндрическое отверстие диаметром 65 мм (или 77 мм) для Ge-детекторов с эффективностью 6% (или 20%).

Передний NaI(Tl) может быть разделен на две половины, которые оптически изолированы друг от друга и снабжены фотоумножителями. В этом случае антикомптоновскую защиту возможно использовать и как парный спектрометр.

Второй конструкционный вариант, без собственных фотоумножителей для NaI(Tl), более компактен. Однако в работе ^{12/} было установлено, что экспериментальное значение коэффициента подавления вблизи комptonовской грани ниже по сравнению с расчетом Монте-Карло. Авторы работы ^{12/} объясняют этот дефицит плохой трансмиссией сцинтилляционных импульсов из NaI(Tl)-кристалла через BGO-кристаллы.

Нами было исследовано влияние отдельных частей антикомптоновской защиты на величину $c_{\gamma}(E_{\gamma})$ для ⁶⁰Co (см. рис.6 и 7). Центральный BGO-кристалл влияет на подавление комptonовского спектра в об-

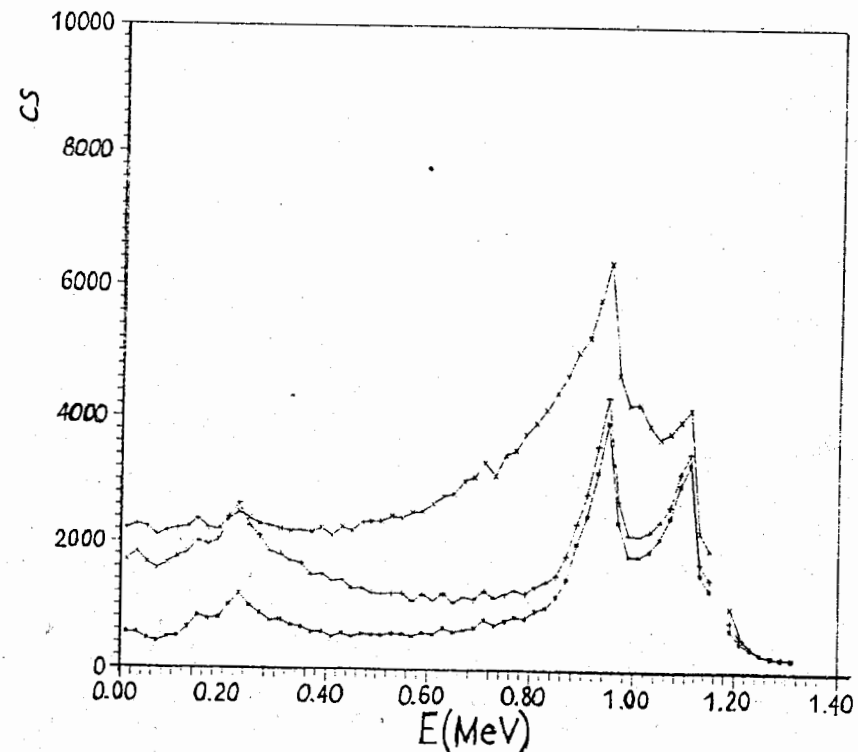


Рис.6 Влияние частей BGO-защиты на коэффициент подавления. Длина кристаллов бралась 131 мм и внешний диаметр 160 мм. "Реальный" Ge(Li)-детектор. Показаны комptonовские спектры ⁶⁰Co без пиков полного поглощения, когда защита состояла из центрального BGO-кристалла (x), внешних кристаллов BGO (+) и всех кристаллов (*).

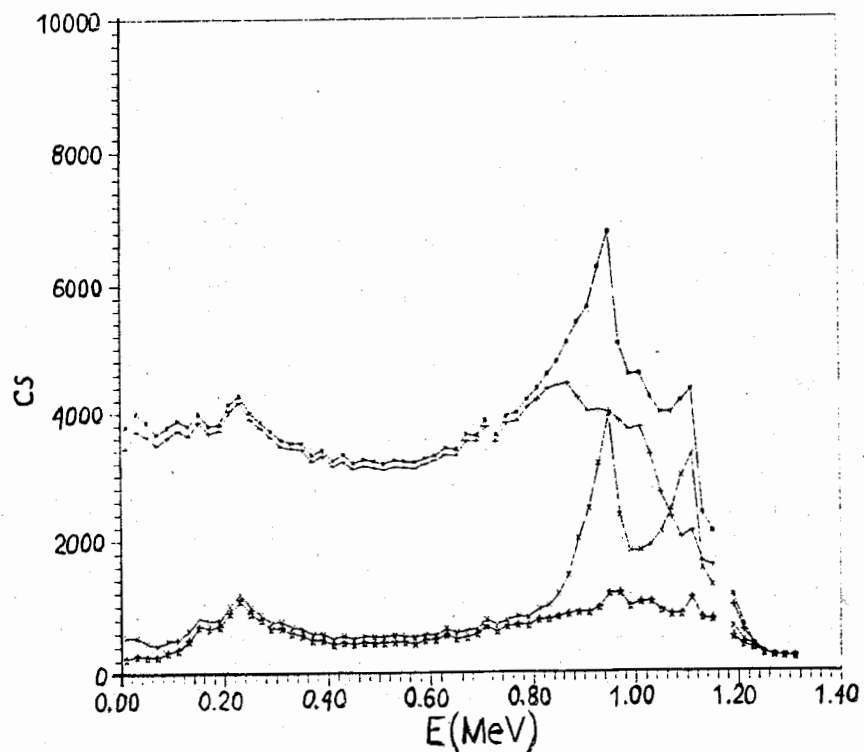


Рис. 7 Влияние BGO-кристаллов (x), NaI(Tl)-кристалла (+) и BGO+NaI(Tl) защиты (*) на коэффициент подавления. Остальные условия, как на рис. 6. Показан и спектр измеренный без антикомptonовской защиты (*).

ласти энергий меньше 400 кэВ, периферийные BGO-кристаллы - на область энергий от 400 кэВ до 800 кэВ и передний NaI(Tl)-кристалл - на область энергий от 850 кэВ до 1150 кэВ. Суммарная нагрузка от комптоновски рассеянных γ -квантов распределяется между отдельными защитными кристаллами в следующем отношении: каждый из 6 периферийных BGO-кристаллов имеет загрузку, равную 10,7%, центральный BGO-кристалл - 25,2% и NaI(Tl) - 12,6%.

Отношение интенсивности пика полного поглощения к интенсивности всего спектра (P/T) мы рассчитали для Ge(Li)-детектора (вышеуказанных размеров) без и с антикомptonовской защитой для первичных γ -квантов с энергией от 200 кэВ до 3500 кэВ (см. рис. 8). Существенным образом повышается значение P/T для антикомptonовского спектрометра уже от энергий первичных γ -квантов, равных 400 кэВ.

Влияние внешних мертвых слоев Ge(Li)-детектора на величину коэффициента подавления весьма существенно и подробно исследовалось в работах /4, 8/. В работе /8/ сделано заключение, что среднее значение c_s увеличится на 50% при уменьшении толщины внешнего мертвого слоя с 1 мм на 0,3 мкм (типичное значение для сверхчистого Ge-детектора n-типа). Поэтому мы провели расчет и для Ge-детектора с размерами, указанными выше, однако, в предположении, что мертвый n-слой имеет толщину 0,3 мкм и в центре детектора имеется отверстие диаметром 13,2 мм с толщиной внутреннего p-слоя 0,4 мм. Наконец, мы рассчитали коэффициент подавления для сверхчистого Ge-детектора n-типа с эффективностью 30%, $\Delta E_\gamma = 1,9$ кэВ, P/C=60 для $E_\gamma = 1332$ кэВ, который был использован в работе /12/. Внешний диаметр этого детектора равен 49,4 мм, высота 59,3 мм, p-сердцевина имеет диаметр 8 мм и высоту 39 мм. Мертвый слой p-типа имеет толщину 0,4 мм и создает стенку p-сердцевины. Толщину n-мертвого слоя (= 0,3 мкм) мы не учитывали.

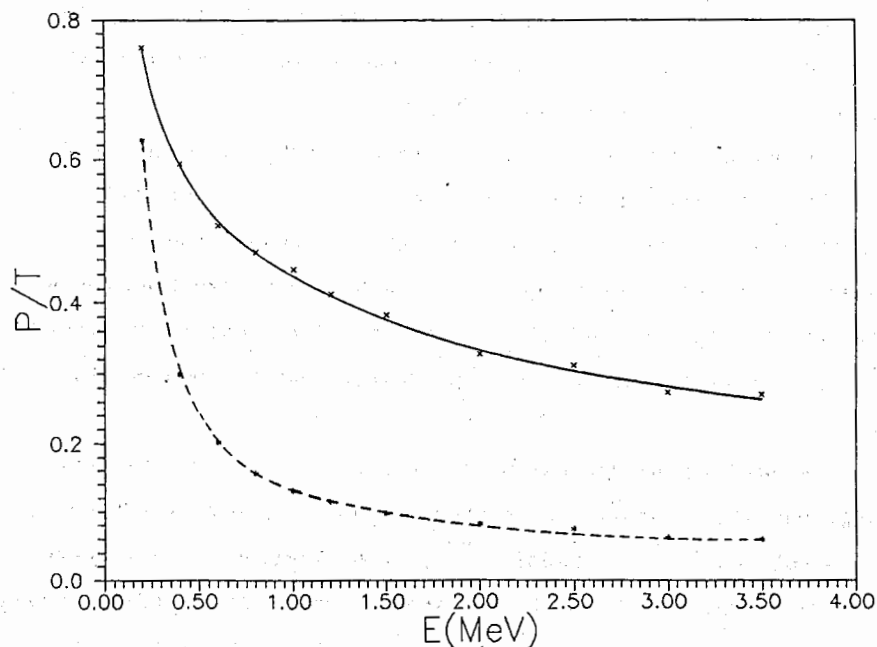


Рис.8 Отношение интенсивностей пиков полного поглощения (P) к интенсивности всего спектра (T) без (---) и с антикомptonовской защитой (—) в зависимости от энергий первичных γ -квантов.

Функция отклика для этих трех детекторов для энергии 1332 кэВ и предлагаемая антикомptonовская защита приведены на рис.9, где для сравнения дана и функция отклика для Ge(Li)-детектора с антикомptonовской защитой из NaI(Tl)-сцинтиллятора (кривая 4) (см. /22/). Основные характеристики антикомptonовского спектрометра из BGO+NaI(Tl) кристаллов представлены в таблице 2.

Предполагаем, что в экспериментах на пучке расстояние между мишенью и Ge-детектором будет 10 см, что соответствует относительно большому значению телесного угла $\omega=120$ миллистерадиана. Компактность антикомptonовской защиты из BGO+NaI(Tl) позволяет разместить три таких спектрометра в одной плоскости при сохранении $\omega=120$ мср для каждого из них.

В заключение нужно подчеркнуть, что существенное повышение разрешающей силы спектрометров γ -излучения невозможно без использования антикомptonовских спектрометров и многократных совпадений. Использование BGO-кристаллов для антикомptonовской защиты существенно повышает значение телесного угла для Ge-детекторов и ввиду этого и эффективность совпадений при большом значении фактора подавления комptonовского спектра. Применение BGO-кристаллов в антикомptonовской защите весьма выгодно и ввиду существенного понижения паразитных совпадений с нейтронами.

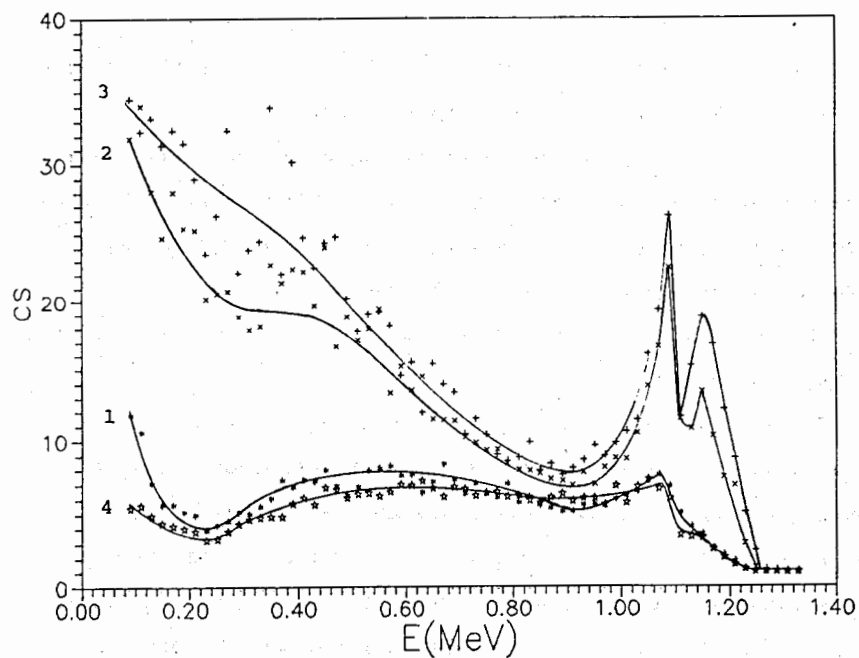


Рис. 9 Коэффициент подавления комптоновского спектра для $E_{\gamma} = 1332$ кэВ.

- 1 - ВГО+NaI(Tl), "реальный" Ge(Li)-детектор.
- 2 - ВГО+NaI(Tl), размеры Ge-детектора такие же, как и в случае 1, однако без внешнего мертвого n-слоя.
- 3 - ВГО+NaI(Tl), сверхчистый Ge-детектор n-типа, его размеры даны в тексте.
- 4 - NaI(Tl) защита (см. /22/), "реальный" Ge(Li)-детектор.

Таблица 2.

Рассчитанные значения отношения пиков к суммарному спектру ^{60}Co без и с антикомptonовской защитой (АКЗ) и коэффициент подавления комптоновского спектра (c_s).

Спектрометр	E_{γ} [кэВ]	P/T	c_s
Ge(Li)	661	0,18	
Ge(Li)+АКЗ	661	0,50	4,6
Ge(Li)	1173	0,11	
Ge(Li)+АКЗ	1173	0,42	5,5
Ge(Li)	1332	0,11	
Ge(Li)+АКЗ	1332	0,40	5,6
Ge(Li)	2754	0,07	
Ge(Li)+АКЗ	2754	0,32	6,2
HPGe(6%)	1332	0,16	
HPGe(6%)+АКЗ	1332	0,68	11,6
HPGe(30%)	1332	0,24	
HPGe(30%)+АКЗ	1332	0,81	13,4

Литература

1. Alexander T.K. et al. Nucl. Instr. Meth. 65 (1968) 169.
2. Lindblad T. Nucl. Instr. Meth. 154 (1978) 53.
3. Konijn J. et al. Nucl. Instr. Meth. 109 (1973) 83.
4. Адам и др. Прикладная ядерная спектроскопия, вып. 11 (1982) стр. 26.
5. Dracoulis G.D. Nucl. Instr. Meth. 187 (1981) 413.
6. Herges P., Klapdor H.V. Nucl. Instr. Meth. 187 (1981) 415.
7. Beetz R. et al. Nucl. Instr. Meth. 145 (1977) 353.
8. Aarts H.J.M. et al. Nucl. Instr. Meth. 172 (1980) 439.
9. Aarts H.J.M. et al. Nucl. Instr. Meth. 177 (1980) 417.
10. Byrne A.P., Dracoulis G.D. Nucl. Instr. Meth. A234 (1985) 281.
11. Alba R. et al. Nucl. Instr. Meth. A271 (1988) 553.
12. Michel C. et al. Nucl. Instr. Meth. A251 (1986) 119.
13. Moszynski M. et al. Nucl. Instr. Meth. A280 (1989) 73.
14. Nolan P.J. et al. Nucl. Instr. Meth. A236 (1985) 95.
15. Emling H. et al. Nucl. Instr. Meth. A249 (1986) 320.
16. Olin A. et al. Nucl. Instr. Meth. 222 (1984) 463.
17. Hildigsson L. et al. Nucl. Instr. Meth. A252 (1986) 91.
18. Simpson J. et al. Nucl. Instr. Meth. A269 (1988) 209.
19. Sharpey-Schafer J.F., Simpson J. Prog. Part. Nucl. Phys. 21 (1988) 293.
20. Aleonard M.M. et al. "EUROGAM". Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg 1990.
21. Lieder R.M. et al. Nucl. Instr. Meth. A220 (1984) 363.
22. Адам и др. Сообщение ОИЯИ, P13-94-276, Дубна, 1994.
23. Rejs V., Honusek M. Preprint Technische Hogeschool Twente, October 1981.
24. Grosswendt B. Waibel E. Nucl. Instr. Meth. 131 (1975) 143.
25. Chung C. et al. Nucl. Instr. Meth. A243 (1986) 102.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июня 1994 года.