

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

P15-94-54

Н.А.Гундорин

О ПОДАВЛЕНИИ КОМПТОНОВСКОЙ  
ПОДЛОЖКИ ПРИ ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ  
ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ  
НА ПУЧКЕ НЕЙТРОНОВ ИБР-30

1994

О подавлении комптоновской подложки при гамма-спектроскопии осколков деления на пучке нейтронов ИБР-30

Эффективность применения метода гамма-спектроскопии осколков для изучения физики деления зависит от параметров спектрометра и определяется качеством измеряемого спектра. Возможность его улучшения путем подавления комптоновской подложки спектра с использованием «активной» защиты Ge-детектора не очевидна вследствие неблагоприятных фоновых условий на пучке нейтронов. Представлены результаты апробации такого пути. На модели спектрометра с неполной «активной» защитой в сочетании с комбинированной пассивной защитой коэффициент подавления в интервале энергий 171—367 кэВ составил  $K_{\text{red}} = 2.6 \pm 0.2$ . Предполагается возможность подавления подложки более чем на 90% в случае оптимизации размеров и конструкции спектрометра. Это позволит при использовании в модифицированном спектрометре высококачественного n-HP Ge-детектора и быстрой электроники увеличить число выделяемых гамма-линий и уменьшить погрешность определения их интенсивности до 1—3%. Таким образом может быть существенно повышена эффективность метода гамма-спектроскопии в исследованиях физики деления ядер на пучке нейтронов ИБР-30.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

On the Reduction of Compton-Underlayer in Gamma Spectroscopy of Fission Fragments in the Neutron Beam at the IBR-30 Reactor

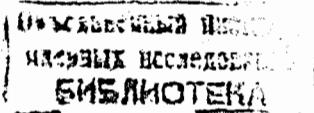
Efficiency of the gamma-spectroscopy method in investigating nuclear fission depends on the parameters of a spectrometer and the quality of a measured spectrum. Perfection of spectrum by reducing the Compton underlay with the help of an «active» shielding of the Ge detector is doubtful due to unfavorable background conditions of the neutron beam. Nevertheless, that way of spectrum improvement was tested with the results reported in this paper. With a model spectrometer with incomplete «active» and complex «passive» shielding the reduction coefficient was measured in the energy region from 171 to 367 keV to be  $K_{\text{red}} = 2.6 \pm 0.2$ . With the spectrometer's size and construction being optimized the reduction could be over 90%. Modification of the spectrometer by using a high quality n-HP Ge detector and a fast electronic system, will allow measurement of much more gamma-lines with the intensity precision of 1—3%. Thus the efficiency of gamma-spectroscopy method will be increased essentially.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

## 1. Введение

Одним из эффективных средств изучения природы ядерных взаимодействий является гамма - спектроскопия сопутствующего им излучения. Исследования спектра гамма - квантов, сопутствующих делению, не только позволяют определять интегральные характеристики гамма - излучения, такие как множественность и средняя энергия, но дают возможность также получать данные о структуре возбужденных состояний образующихся ядер-осколков. Анализируя прецизионно измеренный спектр гамма - лучей из осколков удается определять независимый выход тех из них, для которых известны схема распада и заселенность возбужденных уровней [1, 2, 3]. Успех такого анализа в значительной мере зависит от технических возможностей спектрометра и качества измеренного спектра.

Качество спектра определяется в первую очередь параметрами Ge-детектора, применяемого в спектрометре для регистрации гамма - квантов. Основные требования, предъявляемые к нему, - максимальная разрешающая способность и эффективность. В настоящее время широко применяются Ge-детекторы с энергетическим разрешением  $\Delta E = (1.8 - 1.9)$  кэВ по линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ , с относительной эффективностью  $K_{eff}^{rel} = (30 - 40)\%$  и более, производимые рядом фирм из сверхчистого германия n-типа. Эти детекторы не требуют постоянного охлаждения и отличаются повышенной радиационной стойкостью к воздействию быстрых нейтронов. Поскольку число гамма - линий различных энергий, сопутствующих делению, исчисляется тысячами, от разрешения и эффективности детектора непосредственно зависит количество выделяемых линий в спектре и, тем самым, информативность эксперимента.



В работах по гамма - спектроскопии осколков на импульсном пучке нейтронов ИБР - 30 [4] используются Ge(Li) детекторы с более скромными параметрами. Характеристики одного из них представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика германиевого детектора

Параметр	ДГДК - 110
Относительная эффективность %	12
Энергетическое разрешение 122 кэВ (кэВ FWHM)	1.4
1332 кэВ (кэВ FWHM)	2.3
Пик/Комптон	24
Рад.стойкость Флюэнс (нейтр./см <sup>2</sup> )	10 <sup>9</sup> [5]
Стоимость(на 1989г.)	30 т.руб.

Основные трудности гамма - спектроскопии на пучке нейтронов, связанные с большим количеством гамма - переходов в осколках, фоновым гамма - излучением от нейтронно - ядерных взаимодействий и естественной радиоактивностью ядра - мишени, усугубляются явлением комптоновского перераспределения гамма - квантов как в самом Ge-детекторе, так и в окружающих конструктивных материалах. Потерявшие при рассеянии часть своей энергии гамма - кванты регистрируются в более мягкой части спектра и образуют в нем сплошную подложку. В спектре с высокой подложкой именно она определяет статистическую погрешность при определении выхода гамма - линии и ограничивает точность экспериментальных данных. Уровень подложки наряду с энергетическим разрешением характеризует качество спектра, его информативность. Соотношение между числом зарегистрированных в фотопике полного поглощения и комптоновски рассеянных в детекторе гамма - квантов, составляющих подложку, в существенной степени определяется детектором и является его характеристическим параметром (Пик/Комптон). Для высококачественных детекторов он может существенно превышать приведенное в таблице 1 значение. Тем не менее, задача подавления комптоновской подложки всегда актуальна при гамма - спектроскопии осколков и требует своего решения.

## 2.Способы подавления комптоновской подложки

Один из возможных способов подавления комптоновской подложки основывается на аппаратном отборе импульсов, поступающих с Ge-детектора, по форме или времени нарастания [6]. Он позволяет уменьшить подложку на 25-50% при незначительной потере интенсивности в фотопике (5-20%) [7]. Этот способ применялся в работе [8] при гамма - спектроскопии осколков деления <sup>235</sup>U резонансными нейтронами на ИБР - 30. На рисунке 1 показаны схема спектрометра и спектр гамма - квантов осколков, измеренный в этой работе. Площадь фотопиков полного поглощения для наиболее ярких гамма - линий не превышает в нем 15% от площади подложки.

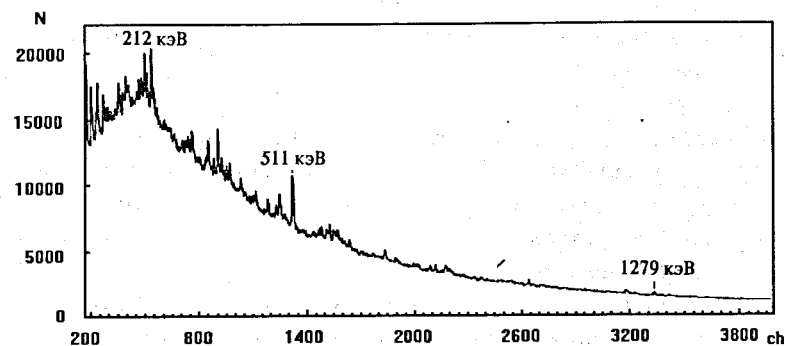
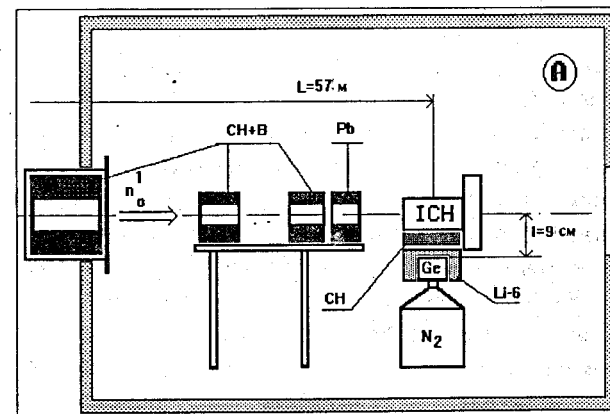


Рис.1. Конфигурация спектрометра на пролетной базе L=57м реактора ИБР - 30 и спектр гамма-лучей из осколков деления <sup>235</sup>U резонансными нейтронами

Другой способ, широко применяемый в гамма-спектрометрах, предполагает использование так называемой "активной" защиты. Он сводится к окружению Ge другим детектором, эффективно регистрирующим гамма-кванты, испытавшие комптоновское рассеяние. Чаще всего для этой цели применяют детекторы на основе кристаллов NaI(Tl) или BGO, жидких или пластических сцинтилляторов. Включенный в схему антисовпадений, такой детектор позволяет исключить из спектра импульсы, соответствующие неполному поглощению энергии гамма-кванта в Ge-детекторе. Таким образом комптоновская подложка может быть подавлена в 10-15 раз практически без потерь для фотопиков полного поглощения [9, 10].

Спектрометры с такой защитой часто называют антикомптоновскими. Значительное улучшение их характеристик и повышение качества спектроскопии достигается при этом ценой усложнения спектрометра. Увеличение числа детекторов требует введения дополнительных каналов регистрации в измерительную систему. Увеличиваются также размеры спектрометра и количество используемых в нем конструкционных материалов. При проведении экспериментов на пучке нейтронов спектрометр находится в поле перерассеянных нейтронов. Источником нейтронов деления является также ионизационная камера с делящейся мишенью. Поэтому увеличение материалоемкости антикомптоновского спектрометра приводит к возрастанию интенсивности нейтронно-ядерных взаимодействий как в материалах конструкции, так и в самих сцинтилляторах. При этом увеличивается вклад фоновых гамма-линий в измеряемом спектре. Их интенсивность может быть подавлена аналогично подавлению комптоновской подложки, если нейтроны, испытавшие неупругое рассеяние в Ge-детекторе, регистрируются "защитным" детектором. Тем не менее при таком усложнении конструкции спектрометра может возникнуть необходимость в дополнительной защите его от нейтронов.

При проведении экспериментов на интенсивных нейтронных пучках не удается, как правило, добиться полного подавления фона нейтронов и интенсивность нейтронно-ядерных взаимодействий остается высокой. Так как детекторы, составляющие "активную" защиту, имеют высокую эффективность регистрации гамма-излучения, это приводит к значительной интенсивности счета в дополнительных каналах спектрометра. При этом часть информации может быть потеряна вследствие случайных совпадений импульсов от этого детектора и Ge-детектора в окне антисовпадений.

В связи с упомянутыми обстоятельствами целесообразность применения такого метода подавления подложки для улучшения качества гамма-спектроскопии осколков не является очевидной и требуется проверка его эффективности для конкретных условий эксперимента.

### 3. Оценка эффективности "активной" защиты спектрометра

Эффективность применения этого способа в гамма-спектрометре на ИБР-30 проверялась в модельном эксперименте. В качестве "активной" защиты Ge-детектора использовались три блока пластического сцинтиллятора с размерами  $20 \times 20 \times 40$  см и гамма-детектор на основе NaI(Tl)-сцинтиллятора с размерами  $\phi 15 \times 15$  см. Были проведены сравнительные измерения гамма-спектра осколков деления  $^{239}\text{Pu}$  нейтронами для трех конфигураций спектрометра: без защиты - "С", с "активной" защитой - "D" и дополнительной защитой от нейтронов - "E".

На рисунках 2-4 схематически показаны каждая из них вместе с используемым для сравнения участком гамма-спектра.

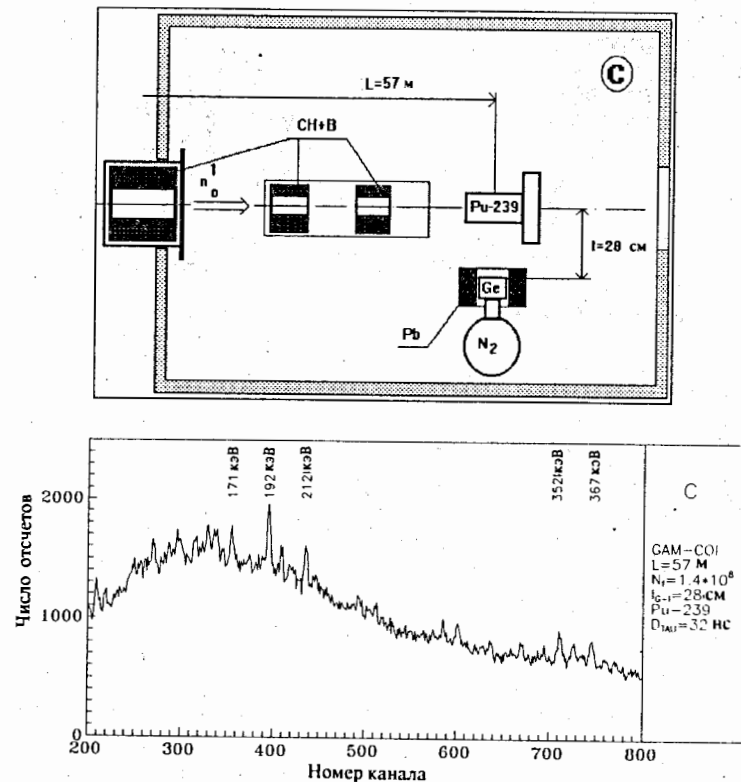


Рис.2. Исходная конфигурация спектрометра на пролетной базе  $L=57$  м реактора ИБР-30 и часть соответствующего ей спектра.

В отличие от используемой в прежних работах схемы "А" (рис. 1) расстояние между камерой деления и Ge-детектором увеличено с 9см до 28см. При этом не только возникает возможность размещения дополнительных детекторов перерассеянного гамма - излучения, но удается также по времени пролета разделить гамма - кванты из осколков от рожденных в детекторе под действием нейтронов деления и, кроме того, существенно уменьшить радиационную нагрузку на него.

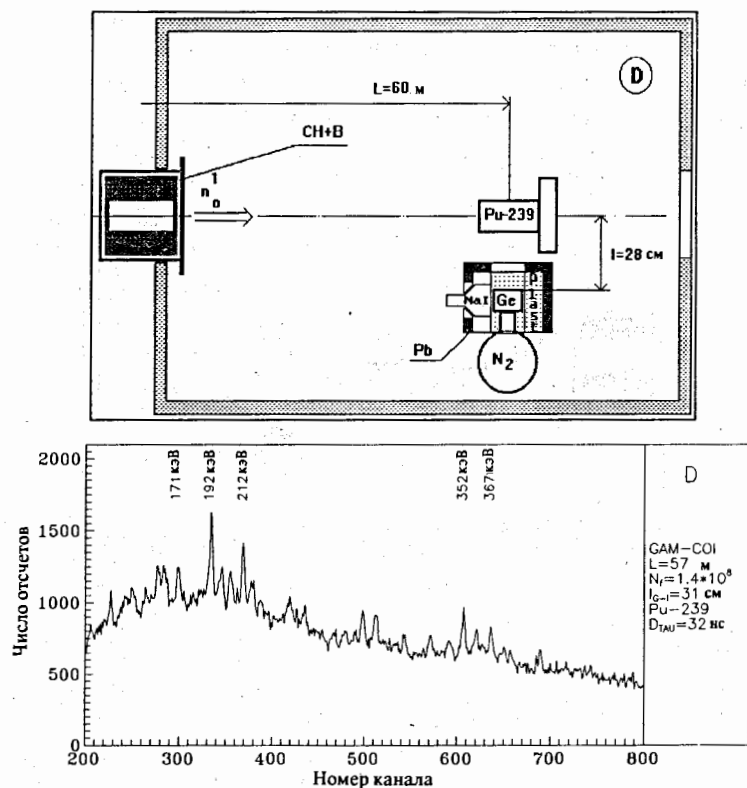


Рис.3 Конфигурация спектрометра с "активной" защитой и часть соответствующего спектра

"Активная" защита PLAST и NaI, показанная в разрезе на рисунках 3 и 4, является частичной, так как охватывает не более (0.65 - 0.7) полного телесного угла. Это связано с использованием в качестве "защитных" имеющихся блоков пластического сцинтиллятора прямоугольной формы и стандартного NaI(Tl)-детектора.

Для ответа на вопрос о целесообразности применения этого способа подавления подложки и оценки его эффективности такой неполной защиты, по-видимому, достаточно. Нет необходимости также в оптимизации геометрии, конструкции спектрометра и его пассивной защиты. В конфигурации "D" пассивной защитой от гамма - фона служит свинец Pb толщиной 5см.

Конечная конфигурация "E" (рис.4) дополнена защитой спектрометра от нейтронного фона, состоящей из пластин борированного полиэтилена СН(В) толщиной 5см.

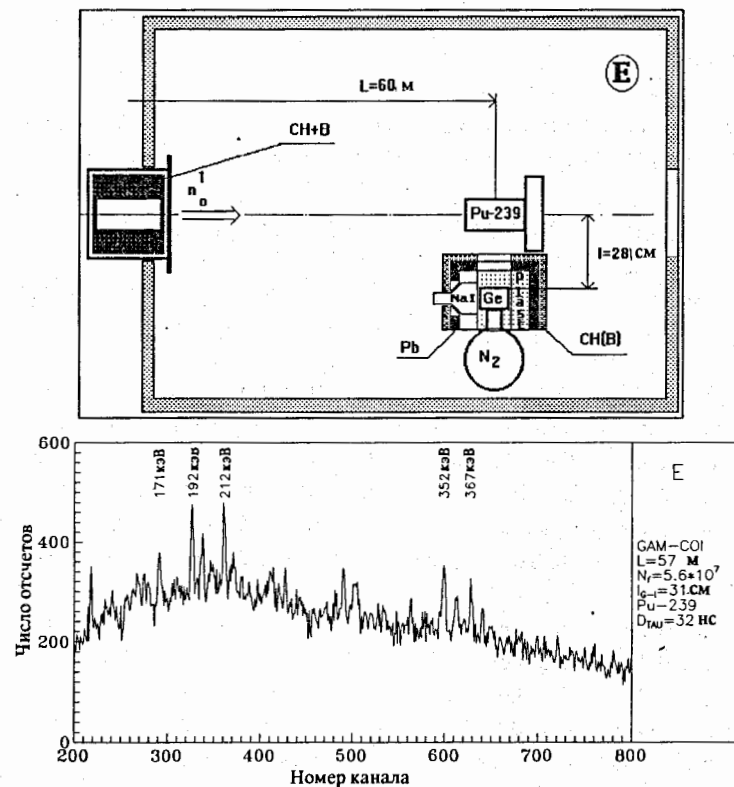


Рис.4 Конфигурация спектрометра с дополнительной защитой от нейтронов и участок соответствующего гамма - спектра.

При сравнении приведенных на рисунках участков спектра наблюдается некоторое изменение его формы и уменьшение подложки при отсутствии заметных потерь в пиках полного поглощения для конфигураций спектрометра с "активной" защитой.

Для количественной оценки эффекта подавления подложки полученные в измерениях на пучке нейтронов спектры обрабатываются с помощью программы UPEAK в интервале энергий от 170кэВ до 370кэВ, показанном на рисунках. Полученное по результатам фитирования отношение площади пика к площади фоновой подложки на участке, равном утроенной величине ширины пика на полувысоте (FWHM), характеризует качество спектра (P/B). Коэффициент подавления подложки  $K_{red}$  вычисляется на основе сравнения значений параметра (P/B) для различных конфигураций спектрометра.

В таблице 2 приведены результаты для 14 наиболее значимых гамма-линий этого интервала и усредненные по ним значения коэффициентов подавления.

Таблица 2. Отношение P/B и коэффициенты подавления подложки  $K_{red}$  в гамма - спектре для различных конфигураций спектрометра

E <sub>γ</sub> кэВ	Конфигурация спектрометра						
	A		C		D		E
	P/B %	P/B %	$K_{red}^{C/A}$	P/B %	$K_{red}^{D/C}$	P/B %	$K_{red}^{E/C}$
171	7 ± 0.4	12 ± 0.4	1.7 ± 0.1	10 ± 0.6	0.8 ± 0.1	14 ± 4	1.2 ± 0.3
181	3 ± 0.2	5 ± 0.4	1.7 ± 0.2	4 ± 0.6	0.8 ± 0.1	14 ± 4	2.8 ± 0.8
192	15 ± 0.4	25 ± 0.4	1.7 ± 0.1	25 ± 0.7	1 ± 0.1	36 ± 5	1.4 ± 0.2
199	6 ± 0.4	10 ± 0.5	1.7 ± 0.1	13 ± 0.6	1.3 ± 0.1	20 ± 4	2.0 ± 0.4
204	6 ± 0.4	8 ± 0.5	1.3 ± 0.1	10 ± 0.6	1.3 ± 0.1	17 ± 4	2.1 ± 0.5
212	10 ± 0.4	16 ± 0.4	1.6 ± 0.1	19 ± 0.7	1.2 ± 0.1	31 ± 4	1.9 ± 0.3
217	5 ± 0.4	4 ± 0.5	0.8 ± 0.1	6 ± 1.2	1.5 ± 0.4	14 ± 4	3.5 ± 1.1
219	1 ± 0.4	4 ± 0.5	4 ± 1.7	6 ± 1.1	1.5 ± 0.3	14 ± 4	3.5 ± 1.1
329	5 ± 0.4	7 ± 0.6	1.4 ± 0.2	9 ± 0.6	1.3 ± 0.1	17 ± 6	2.4 ± 0.9
342	2 ± 0.3	5 ± 0.6	2.5 ± 0.5	6 ± 0.7	1.2 ± 0.2	20 ± 5	4.0 ± 1.1
352	12 ± 0.4	17 ± 0.6	1.4 ± 0.1	21 ± 0.5	1.2 ± 0.1	33 ± 5	1.9 ± 0.3
358	8 ± 0.4	12 ± 0.6	1.5 ± 0.1	15 ± 0.7	1.3 ± 0.1	30 ± 5	2.5 ± 0.4
362	3 ± 0.3	5 ± 0.7	1.7 ± 0.3	8 ± 0.7	1.6 ± 0.3	19 ± 5	3.8 ± 1.1
367	10 ± 0.4	13 ± 0.6	1.3 ± 0.1	16 ± 0.7	1.2 ± 0.1	33 ± 5	2.5 ± 0.4
Усредненный коэффициент подавления подложки			1.7 ± 0.1		1.2 ± 0.1		2.6 ± 0.2

В таблицу 2 включены данные об отношении пик/подложка для гамма - спектра из осколков деления <sup>239</sup>Pu нейтронами ИБР - 30, измеренного спектрометром с конфигурацией "А" [11] при подавлении подложки по форме импульса. В этих измерениях применялся Ge(Li)-детектор меньшего объема, с характеристическим отношением Пик/Комтон для спектра <sup>60</sup>Co 17 - 19, что несколько меньше, чем для детектора, использованного при измерениях в других конфигурациях, параметры которого приведены в таблице 1. Но даже с учетом этого обстоятельства, полученный при переходе к конфигурации "С" коэффициент подавления  $K_{red}^{C/A} = 1.7 ± 0.1$  свидетельствует о ее преимуществах, связанных, очевидно, с уменьшением вклада фона от перерасеяния нейтронов на конструктивных элементах ионизационной камеры и парафиновом блоке СН, использованном для смягчения спектра нейтронов деления и снижения, тем самым, радиационной нагрузки на детектор. Уменьшение телесного угла при удалении детектора от камеры снижает число нейтронов деления, попадающих в детектор, и также способствует снижению подложки.

Величина коэффициента подавления для конфигурации "D", при использовании "активной" защиты спектрометра, составила лишь  $K_{red}^{D/C} = 1.2 ± 0.1$ . Это говорит об обоснованности опасений, связанных с неблагоприятными фоновыми условиями, и серьезности сомнений в целесообразности применения этого метода при спектрометрии осколков на пучке нейтронов.

Тем не менее, применение дополнительной защиты спектрометра от нейтронов борированным полиэтиленом в конфигурации "Е" приводит к существенному увеличению коэффициента подавления:  $K_{red}^{E/C} = 2.6 ± 0.2$ . Это означает, что ожидаемые трудности не носят принципиального характера и могут быть преодолены методами пассивной защиты спектрометра.

Если учесть, что используемая в проведенном модельном эксперименте "активная" защита была частичной и охватывала не более (0.65-0.7) от полного телесного угла, можно ожидать, что при построении полной защиты коэффициент подавления окажется не менее 10 -12, что согласуется с данными работ [9, 10]

Решение должным образом задач оптимизации конструкции спектрометра, его геометрии, комбинированной защиты от гамма - излучения и нейтронов, а также выбор наиболее эффективных сцинтилляторов для использования в качестве "активной" защиты, по-видимому, приведут к увеличению коэффициента подавления подложки.

#### 4. Заключение

Результаты проведенных в работе измерений спектра гамма - квантов из осколков деления  $^{239}\text{Pu}$  нейтронами для различных конфигураций спектрометра на пучке реактора ИБР- 30 и сравнения качества получаемых спектров позволяют сделать следующие выводы.

1. Применяемая в прежних исследованиях спектра гамма - лучей деления конфигурация спектрометра неоптимальна с точки зрения качества получаемого спектра, его информативности и требует модификации.

2. В связи с неблагоприятными фоновыми условиями использование "активной" защиты спектрометра в отсутствие дополнительной защиты от нейтронов не дает ожидаемого подавления комптоновской подложки.

3. Применение полной "активной" защиты в сочетании с комбинированной пассивной защитой от гамма - излучения и нейтронов - наиболее эффективный способ повышения качества спектра, обеспечивающий подавление комптоновской подложки в нем более чем на 90%.

Таким образом в модельном эксперименте подтверждается высокая эффективность применения "активной" защиты и целесообразность ее использования при гамма - спектроскопии осколков деления на пучке нейтронов.

Поскольку погрешность экспериментальных данных о независимом выходе осколков деления резонансными нейтронами, получаемых до настоящего времени на ИБР - 30 с использованием метода гамма - спектроскопии, составляет (5 - 25)%, а круг идентифицируемых осколков ограничен величиной их выхода не менее 1%, эта методика по своим возможностям уступает спектрометру по времени - пролета осколков [12] или двойной ионизационной камере [13], обеспечивающих определение выхода широкого круга осколков с погрешностью (1 - 2)%.

Существенного расширения возможностей методики можно добиться путем модификации спектрометра : использованием испытанного в работе метода "активной" защиты, применением высококачественного Ge-детектора и повышением быстродействия спектрометрического канала. Достигнутое при этом увеличение числа идентифицируемых осколков и уменьшение погрешности определения их выхода до (1 - 3)% существенно расширит перспективы использования метода гамма - спектроскопии осколков и поднимет его конкурентноспособность.

Автор пользуется приятной возможностью поблагодарить А.В. Стрелкова за содействие при использовании пластических скintилляторов, Л.Б.Пикельнера за полезные обсуждения и Ю.И.Колгина за помощь в работе.

#### Литература

- [1] John W., Guy F.W. and Wesolowski J.J., Phys. Rev. C2, 1970, p.1451.
- [2] Cheifetz E., Wilhelmy J.B., Jard R.C. and Thompson S.G., Phys. Rev. C4, 1971, p. 1913.
- [3] Богдзель А.А., Гундорин Н.А., Дука - Зойоми А., Климан Я., Криштиак Й. - Изучение зависимости выхода гамма-лучей от массы и заряда осколков деления  $^{236}\text{U}$ , Дубна, 1987, Препринт ОИЯИ Р3-87-862.
- [4] Gundorin N.A., Popov A.B., Dao Anh Minh, Kliman J., Polgorski V., Duka - Zolyomi A. Gohs U., Proceedings of the Second International Symposium on Nuclear Excited States, Łódź, 1992, p. 181.
- [5] Kraner H.W., Pehl R.H., Haller E., IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, v. NS-22, pp.149-159.
- [6] Богдзель А.А., Дука - Зойоми А., Климан Я., Пресперин В. Использование дискриминации по времени нарастания импульса для улучшения параметров Ge(Li) - спектрометров, Дубна, 1982, Препринт ОИЯИ Р13-82-737.
- [7] Климан Я. Исследование выхода гамма-квантов из одиночных осколков деления при делении U-235 резонансными нейтронами, 1988, УДК 539.173.4, Дубна.
- [8] Антонов С.А., Богдзель А.А., Гундорин Н.А., Дука - Зойоми А., Климан Я., Криштэк Д., Островной А.И., Островная Т.М., Попов А.Б., Пресперин В., Тишин В.Г., Ширикова Н.Ю. Методика многомерных измерений и анализа выхода продуктов деления ядер резонансными нейтронами, Дубна, 1985, Сообщение ОИЯИ 13-85-701.
- [9] Konijn J., Goudsmit P.F.A. and Lingeman E.W.A., Nucl. Instr. Meth., 1973, v. 109, pp. 83-92.
- [10] Beetz R., Posthumus W.L., De Boer F.W.N., Maarleveld J.L., Van Der Schaaf A., and Konijn J., Nucl. Instr. Meth., 1977, v. 145, pp.353-357.
- [11] Bogdzel A.A., Gundorin N.A., Popov A.B., Polgorský V., Kliman J., Krištiak J., Gohs U., Duka - Zolyomi A., In: Proceedings of the International Workshop "Dynamical Aspects of Nuclear Fission", Smolenice, Czechoslovakia, pp. 305-311, 1992.
- [12] Oed A., Geltenbort P., Brissot R., Gönnerwein F., Perrin P., Aker E. and Engelhardt D., Nucl. Phys. 219, 1984, p. 569.
- [13] Knitter H.- H. and Budtz - Jørgensen C., Proc. Knoxville Conf., NBSSpec. Publ. 947, 1980, p. 594.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 февраля 1994 года.