

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 52-17

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ
50 ГэВ НА ФОНЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКОМ
ГАММА-ТЕЛЕСКОПЕ ГАММА-400

© 2016 г. М. Д. Хеймиц*, А. М. Гальпер*, **, И. В. Архангельская*, А. И. Архангельский*,
Ю. В. Гусаков**, В. Г. Зверев*, В. В. Кадилин*, В. А. Каплин*, А. А. Леонов*,
П. Ю. Наумов*, М. Ф. Рунцо*, С. И. Сучков**, Н. П. Топчиев**, Ю. Т. Юркин*

* Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

** Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

E-mail: mcsaksik@gmail.com

Поступила в редакцию 27.07.2015 г.

При исследовании космического γ -излучения высокой энергии (>50 ГэВ) возникает задача выделения нейтрального γ -излучения на фоне потока заряженных частиц, которая затруднена наличием эффекта обратного тока. Обратный ток состоит из большого числа низкоэнергетических (~1 МэВ) частиц, родившихся в электромагнитном ливне, который развивается в калориметре γ -телескопа. В работе предложена методика режекции заряженных частиц с использованием системы антисовпадений. Предлагается метод отделения событий регистрации заряженной частицы от событий, вызванных регистрацией γ -кванта, сопровождающихся обратным током. Метод основан на различии сигналов во времени. Методика позволяет сохранять высокую эффективность регистрации γ -квантов вплоть до высоких энергий.

DOI: 10.7868/S0032816216030228

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние фундаментальных исследований по космологии, астрономии, физике частиц высоких энергий и космических лучей ставит ряд проблем, решить которые невозможно без привлечения результатов исследований по внеатмосферной γ -астрономии высокой энергии. В качестве примера достаточно упомянуть проблему природы темной материи.

Типичные γ -телескопы, работающие в области десятков мегаэлектронвольт – сотен гигаэлектронвольт (такие как ГАММА-1 [1], AGILE [2], EGRET [3] и Fermi/LAT [4]), основаны на использовании процесса конверсии и содержат три основные части: трекер для определения направления падающей частицы; калориметр для нахождения ее энергии; детектор антисовпадений, окружающий трекер, для разделения событий регистрации γ -кванта и значительно более многочисленных событий, связанных с попаданием заряженной частицы. В трекаре слой вещества с высоким атомным номером (обычно вольфрам), где рождаются электрон-позитронные пары, чередуются с позиционно-чувствительными детекторами (кремниевыми стриповыми пластинами),

определяющими направление ее движения. Самозапускающийся трекер эффективно регистрирует низкоэнергетические γ -кванты, но его использование для режекции заряженных частиц проблематично вследствие большого времени срабатывания стриповых детекторов. При регистрации γ -излучения высокой энергии можно использовать значительно более быстрые сцинтилляционные детекторы. Это позволяет различить заряженные частицы и так называемый *обратный ток* – частицы, рожденные в ливне калориметра и вернувшиеся к детектору антисовпадений. Обратный ток может существенно понизить эффективность регистрации γ -квантов при энергиях выше десятков гигаэлектронвольт.

В данной работе предложен метод использования времяпролетной системы и системы антисовпадений для выделения γ -квантов на фоне заряженных частиц в γ -телескопе, основанный на измерении времени пролета частиц между детекторами данных систем. Предложенная методика отбора событий по времени позволяет достичь высокой эффективности регистрации γ -квантов высокой энергии.

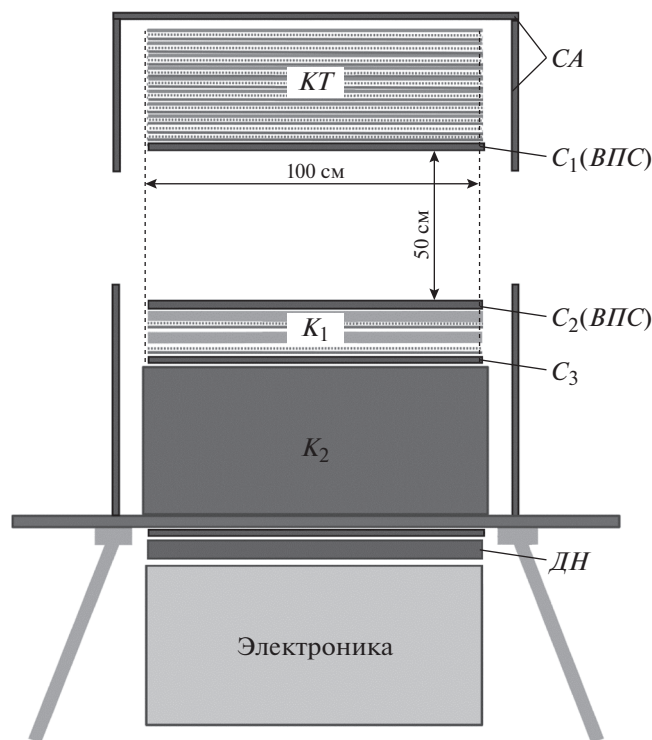


Рис. 1. Физическая схема телескопа ГАММА-400. СА – система антисовпадений; КТ – конвертер-трекер; ВПС – времяпролетная система; C_1 и C_2 – сцинтилляционные детекторы ВПС; K_1 и K_2 – части калориметра; C_3 – сцинтилляционный детектор; ДН – детектор нейтронов.

Предлагаемая методика рассмотрена применительно к γ -телескопу ГАММА-400, однако ее можно использовать и для других γ -телескопов с времячувствительными системами антисовпадений и времени пролета.

СИСТЕМЫ γ -ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400

Гамма-телескоп ГАММА-400 [5, 6] состоит из следующих систем (перечислены по направлению (сверху вниз) движения регистрируемых γ -квантов, рис. 1).

– Система антисовпадений (СА) предназначена для режекции заряженных частиц, которые при движении сверху вниз вызывают срабатывание детектора СА раньше, чем в других системах. Система антисовпадений является основным объектом исследования в данной работе и подробно описана в следующем разделе.

– В конвертере-трекере (КТ) регистрируемый γ -квант рождает электрон-позитронную пару (процесс конверсии). Траектории частиц регистрируются десятью парами стриповых детекторов. Толщина конвертера составляет около одной радиационной единицы длины.

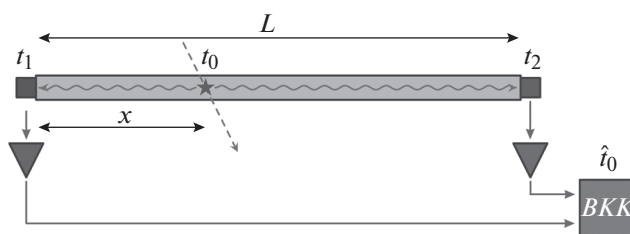


Рис. 2. Принцип действия схемы времякоординатной компенсации (ВКК).

– Времяпролетная система (ВПС) состоит из двух сцинтилляционных детекторов C_1 и C_2 с высоким, 0.6 нс, временным разрешением, расположенных на расстоянии 50 см друг от друга. Времяпролетная система позволяет определить направление движения частицы, а также оценить, произошла ли конверсия γ -кванта в КТ. Конструкции детекторов ВПС и СА аналогичны.

– В калориметре (К), состоящем из двух частей (K_1 и K_2), разбивается электромагнитный каскад, регистрация которого позволяет определить энергию падающего γ -кванта.

– Сцинтилляционный детектор C_3 предназначен для выработки триггерного сигнала, соответствующего высокоэнергетическому ливню, а сцинтилляционный детектор C_4 и детектор нейтронов ДН – для разделения адронного и электромагнитного ливней.

Рассмотрим подробнее устройство и принцип работы СА.

СИСТЕМА АНТИСОВПАДЕНИЙ

Грани системы антисовпадений в ГАММА-400 закрывают конвертер сверху и с боков. Каждая грань состоит из двух слоев параллельных полос сцинтилляционных детекторов. Полосы одного слоя смещены относительно полос другого так, что не остается прямолинейных щелей в системе. Каждый сцинтилляционный детектор представляет собой полосу быстродействующего сцинтиллирующего материала на основе полистирола, свет с противоположных торцов которого регистрируется кремниевыми фотоэлектронными умножителями (Si-ф.э.у.), преобразующими сцинтилляционные вспышки в электрические импульсы.

Фотоэлектронные умножители с двух торцов подключены к схеме времякоординатной компенсации (ВКК), позволяющей определить время взаимодействия частицы с веществом сцинтиллятора посредством компенсации зависимости времени регистрации вспышки от места ее возникновения [7].

Принцип действия ВКК заключается в следующем.

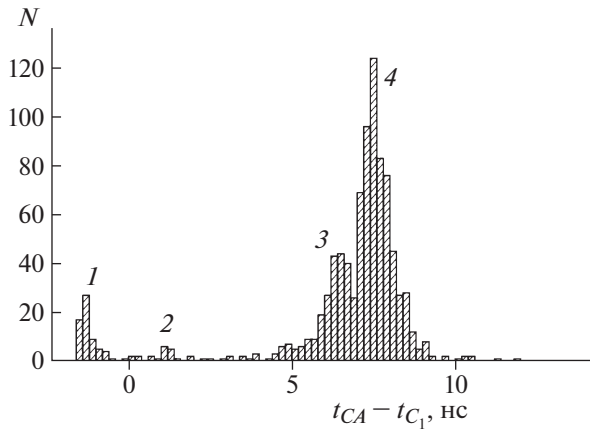


Рис. 3. Распределение разности времен срабатывания детекторов CA и C_1 при регистрации γ -кванта. 1 – взаимодействие γ -кванта в CA ; 2, 3 и 4 – обратный ток от KT , K_1 и K_2 соответственно.

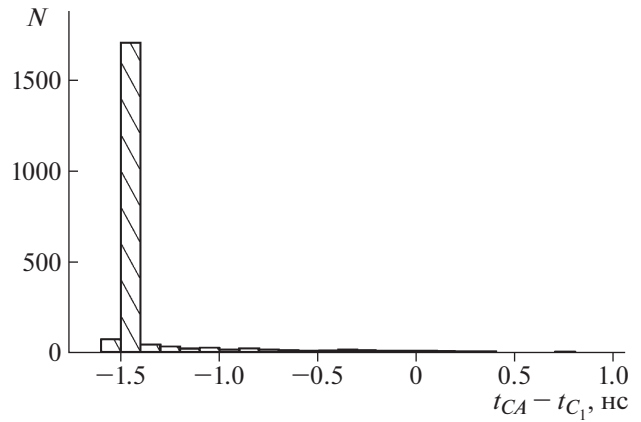


Рис. 4. Распределение разности времен срабатывания детекторов CA и C_1 при регистрации протона (масштаб горизонтальной шкалы увеличен).

Рассмотрим полосу сцинтиллятора длиной L (рис. 2). Пусть в момент времени t_0 произошло взаимодействие частицы с веществом сцинтиллятора на расстоянии x от его левого торца. При эффективной продольной скорости v распространения света от сцинтилляции в полистироле (около 0.5 скорости света в вакууме) левый фотоприемник зарегистрирует вспышку в момент времени $t_1 = t_0 + x/v$. До правого торца сцинтиллятора свет дойдет в момент времени $t_2 = t_0 + (L - x)/v$. Таким образом, по времени срабатывания обоих фотоприемников можно определить время взаимодействия, независимое от x :

$$\hat{t}_0 = \frac{1}{2} \left(t_1 + t_2 - \frac{L}{v} \right).$$

Этот метод работает ($\hat{t}_0 = t_0$) в случае единичного взаимодействия в полосе сцинтиллятора либо при условии, что время между вспышками от второй и от первой частиц $\Delta t \geq |\Delta x/v|$, где Δx – разность координат точек взаимодействия вдоль полосы. Это условие в большинстве случаев регистрации летящей вниз частицы соблюдается для детекторов CA и C_1 , находящихся на достаточно большом расстоянии от калориметра.

В работе будет рассмотрена верхняя горизонтальная плоскость системы CA .

ЭФФЕКТ ОБРАТНОГО ТОКА

Гамма-квант рождает в телескопе электромагнитный ливень. Основная часть ливня развивается в калориметре. Чем больше энергия регистрируемого γ -кванта, тем больше в ливне рождается частиц, в том числе тех, которые направляются вверх, в сторону, противоположную направлению движения регистрируемого γ -кванта. Поток

таких частиц называется обратным током [8]. Он состоит в основном из γ -квантов с энергией ~ 1 МэВ. Этот поток, имеющий мягкий спектр, “засоряет” детекторы, расположенные в верхней части γ -телескопа, и имитирует регистрацию заряженной частицы. Срабатывание CA под воздействием обратного тока запрещает регистрацию γ -излучения; при высокой энергии эффективность регистрации падает до нуля. Для решения этой проблемы предлагается метод режекции заряженных частиц по времени срабатывания CA .

МЕТОДИКА ВРЕМЕННОГО ОТБОРА

Рассмотрим следующее событие. Гамма-квант проходит сверху вниз CA без взаимодействия и рождает e^-e^+ -пару в KT . Пара продолжает движение вниз. Заряженные частицы вызывают сигнал в сцинтилляторе C_1 , а затем в C_2 и попадают в калориметр, в котором развивают ливень. В результате ливня рождается обратный ток, частицы которого вызывают сигнал в CA .

В случае регистрации γ -телескопом (в направлении сверху вниз) заряженной частицы CA срабатывает, как только частица проходит через нее, – небольшая задержка определяется лишь временем распространения света в сцинтилляторе. В случае же регистрации γ -кванта сигнал в CA возникает на несколько наносекунд позже момента прохождения через нее γ -кванта. Задержка объясняется тем, что как C_1 от CA , так и калориметр от C_1 отстоят в пространстве примерно на полметра, в результате время, требуемое на прохождение частиц до калориметра, образование каскада с обратным током и возвращение частиц обратного тока к CA , составляет несколько наносекунд.

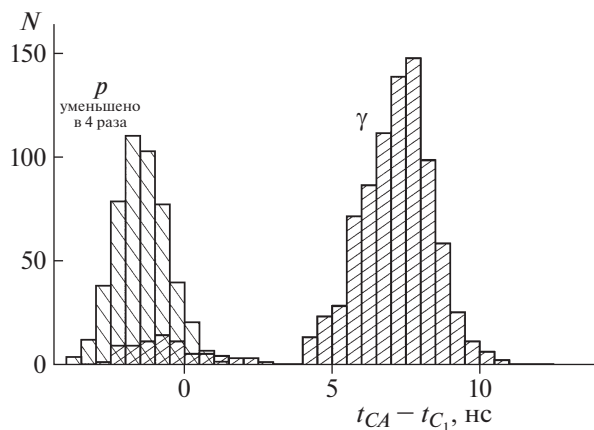


Рис. 5. Нормально размытые распределения разности времен срабатывания детекторов CA и C_1 . Стандартное отклонение размытия равно пифагоровой сумме временных разрешений CA и C_1 . Для удобства сравнения высоты столбиков “протонной” гистограммы уменьшены в четыре раза.

Детекторы CA и $ВПС$ имеют временное разрешение $\Delta t \approx 0.6$ нс, как будет показано ниже.

Было проведено моделирование регистрации прибором γ -кванта с энергией 100 ГэВ методом Монте-Карло. В качестве времени срабатывания детектора принималось минимальное из всех времен срабатывания составляющих его полос. Время срабатывания полосы определялось с помощью математической модели схемы $ВКК$.

Были отобраны события, в которых сигналы в детекторах указывают на конверсию в $КТ$. По отобранным событиям построено распределение разности времен срабатывания детекторов CA и C_1 (рис. 3). На гистограмме можно видеть четыре выделяющихся пика:

- 1 (–1.5–0 нс) – соответствует взаимодействию γ -кванта в веществе детектора CA ;
- 2 (0–3 нс) – соответствует обратному току от конвертера;
- 3 (4–7 нс) и 4 (7–10 нс) – это обратный ток от двух частей калориметра K_1 и K_2 соответственно.

В случае регистрации заряженной частицы остается лишь левый пик, так как при этом первой всегда срабатывает CA , что показано результатом моделирования протонов, приведенным на рис. 4. Природа “хвостов” – многократное взаимодействие в CA (ранний обратный ток либо δ -электроны). В таких случаях метод $ВКК$ дает заниженное значение времени: $\hat{t}_0 < t_0$.

В гистограммах не учтено собственное временное разрешение детекторов CA и C_1 . Размытием данных гауссовым ядром со стандартным отклонением $\sigma = \delta t \oplus \delta t = \delta t \sqrt{2} \approx 0.85$ получены гистограммы, изображенные на рис. 5. Подобную

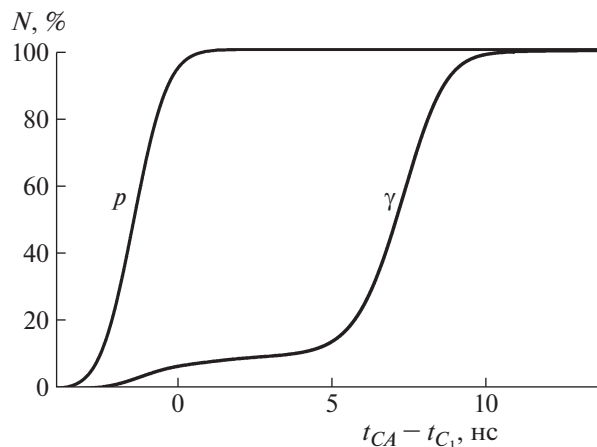


Рис. 6. Функции распределения интервала между срабатываниями C_1 и CA . Значения N по оси ординат соответствуют доле частиц, для которых интервал меньше соответствующего значения t по оси абсцисс. Отображены события как для протонов, так и для γ -квантов.

картину следует ожидать в настоящем приборе. Как видно, события двух классов довольно хорошо различаются, даже будучи размытыми.

Кумулятивные графики (рис. 6) показывают, что, если по прошествии времени $t_{th} \approx 3$ нс после срабатывания C_1 исключить из схемы антисовпадений детектор CA , события с обратным током от калориметра надежно идентифицируются и классифицируются как γ -кванты. Вычисления показывают, что при $t_{th} > 2.9$ нс примесь протонов в отобранных γ -квантах не превышает 10^{-5} , причем потеря полезных событий составляет 10%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения фактического временного разрешения сцинтилляционного детектора с использованием в качестве фотоприемников кремниевых фотоэлектронных умножителей (Si-ф.э.у.) было проведено экспериментальное исследование макета детектора.

Схема эксперимента представлена на рис. 7. На каждом торце сцинтилляционной полосы длиной 35 см размещен Si-ф.э.у. марки НАМА-MATSU MPPC S10985 100С. Возле боковой поверхности полосы помещался коллимированный β -источник ^{90}Sr , который через промежуточное ядро ^{90}Y излучает электроны с энергией 2.283 МэВ.

Напротив β -источника располагался ф.э.у. марки XP2020, регистрировавший сцинтилляцию с близкого расстояния. Фотоэлектронный умножитель формировал сигнал $Старт$. Сигналы с Si-ф.э.у. поступали на схему $ВКК$, которая форми-

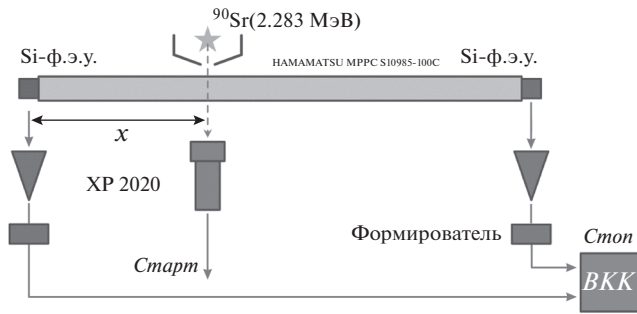


Рис. 7. Схема экспериментального исследования макета.

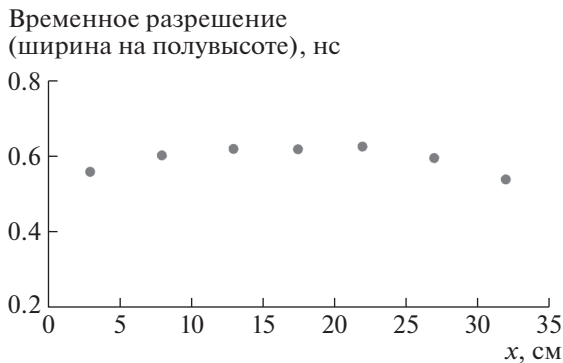


Рис. 8. Зависимость временного разрешения от положения источника.

ровала сигнал *Смон*. По распределению интервалов между сигналами *Старт* и *Смон* определено временное разрешение (полная ширина на полувысоте FWHM). На рис. 8 показана зависимость временного разрешения от расстояния между источником и левым торцом сцинтиллятора.

Таким образом, достигнуто временное разрешение 0.6 нс, что вполне удовлетворительно для эффективного отбора событий, сопровождающихся обратным током, на фоне событий, связанных с регистрацией заряженных частиц.

Возможность создания детекторов с достаточным для реализации метода временным разрешением экспериментально показана в [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод использования детекторов с высокой временной разрешающей способностью для разделения событий, связанных с регистрацией заряженных частиц и высокоэнергетических γ -квантов, образующих обратный ток, вызывающий сигнал в *СА*, позволяет отделять γ -кванты от заряженных частиц (преимущественно протонов) без существенного снижения эффективности регистрации γ -квантов. Для γ -телескопа ГАММА-400 эффективность регистрации γ -квантов высокой энергии составляет не менее 90%. Экспериментально показана возможность реализации этого метода с помощью сцинтилляционных детекторов с использованием для регистрации сцинтилляций кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Рис. 8. Зависимость временного разрешения от положения источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akimov V.V., Balebanov V.M., Belousov A.S., Blokhintsev I.D., Veselova G.V., Dobrijan M.B., Kalinkin L.F., Kovalenko S.V., Kozlov V.D., Leikov N.G., Mordvov N.K., Nagornih Y.I., Nesterov V.E., Prilutsky O.F., Prohin V.L. et al. // Space Science Reviews. 1988. V. 49. P. 111.
2. Tavani M., Barbiellini G., Argan A., Boffelli F., Bulgarelli A., Caraveo P., Cattaneo P.W., Chen A.W., Cocco V., Costa E., D'Ammando F., Del Monte E., De Paris G., Di Cocco G., Di Persio G. et al. // Astron. Astrophys. 2009. V. 502. P. 995; 10.1051 / 0004-6361/ 200810527. 2008. arXiv: 0807.4254v1
3. Kanbach G., Bertsch D.L., Favale A., Fichtel C.E., Hartman R.C., Hofstadter R., Hughes E.B., Hunter S.D., Hughlock B.W., Kniffen A., Lin Y.C., Mayer-Hasselwander H.A., Nolan P.L., Pinkau K., Rothermel H., Schneid E., Sommer M., Thompson D.J. // Space Science Reviews. 1988. V. 49. P. 69.
4. Atwood W.B., Abdo A.A., Ackermann M., Anderson B., Axelsson M., Baldini L., Ballet J., Band D.L., Barbiellini G., Bartelt J., Bastieri D., Baughman B.M., Bechtol K., Bedere D., Bellardi F. et al. // Astrophys. J. 2009. V. 697. P. 1071; . doi 10.1088/0004-637X/697/2/1071
5. Topchiev N.P., Galper A.M., Bonvicini V., Adriani O., Aptekar R.L., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Bergstrom L., Berti E., Bigongiari G., Bobkov S.G., Bogomolov E.A., Boezio M., Bonghi M., Bonechi S. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79. P. 417. doi 10.3103/S1062873815030429
6. Ginzburg L., Kaplin V.A., Runtsso M.F., Topchiev N.P., Fradkin M.I. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2009. V. 73. P. 664. doi 10.3103/S1062873809050402
7. Rothermel H. // Nucl. Instrum. and Methods. 1976. V. 137. P. 219. doi 10.1016/0029-554X(76)90332-3
8. Гальпер А.М., Каплин В.А., Леонов А.А., Наумов П.П., Наумов П.Ю., Рунцо М.Ф., Федотов С.Н., Хеймиц М.Д., Шаранов М.П., Юркин Ю.Т. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. № 5. С. 257. doi 10.1134/S2079562914030014
9. Каплин В.А., Рунцо М.Ф., Топчиев Н.П., Фрадкин М.И. // Труды научной сессии МИФИ. 2008. № 9. С. 150.