

# Детекторы на основе метода меченых нейтронов

М.Г.Сапожников

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
ООО «Нейтронные технологии», Дубна*

## Аннотация

Детекторы на основе метода меченых нейтронов (ММН) получили распространение как средство обнаружения опасных веществ (взрывчатых, сильнодействующих ядовитых, наркотических, радиоактивных) скрытых в различных объектах досмотра. Дается обзор различных детекторов на основе ММН. Обсуждаются результаты их применения в составе переносных, стационарных, мобильных и порталных систем. Обсуждаются возможности применения технологии меченых нейтронов для других целей дистанционного неразрушающего контроля за элементным составом вещества.

## 1. Введение

Метод меченых нейтронов (ММН) был предложен довольно давно [1-3], но отсутствие надежных и портативных генераторов нейтронов препятствовало его распространению.

В ММН источником нейтронов служит портативный ускоритель, который ускоряет дейтроны до энергии порядка 100 кэВ (см. Рис.1). Дейтроны попадают на тритиевую мишень и рождают нейтроны с энергией 14 МэВ в реакции  $d+t \rightarrow \alpha + n$ . Эта реакция примечательна тем, что  $\alpha$ -частица и нейтрон разлетаются практически на  $180^\circ$ . Поэтому, зная направление  $\alpha$ -частицы, можно определить направление полета нейтрона. Самое замечательное свойство ММН состоит в том, что можно получить информацию и о третьей пространственной координате, направленной вдоль направления полета нейтрона. Для этого определяется время пролета, которое проходит между попаданием  $\alpha$ -частицы в альфа-детектор и приходом  $\gamma$ -кванта из объекта досмотра в соответствующий гамма-детектор. Зная время пролета, можно вычислить расстояние до той точки, из которой вылетел  $\gamma$ -квант, поскольку скорость нейтрона постоянна и равна  $v=5$  см/нс.

Обычные источники быстрых нейтронов испускают их во все стороны, как обычная лампочка испускает фотоны во все стороны. В методе меченых нейтронов объект досмотра облучается как бы набором узких нейтронных пучков, своеобразным аналогом лазерных указок (см.Рис.1).

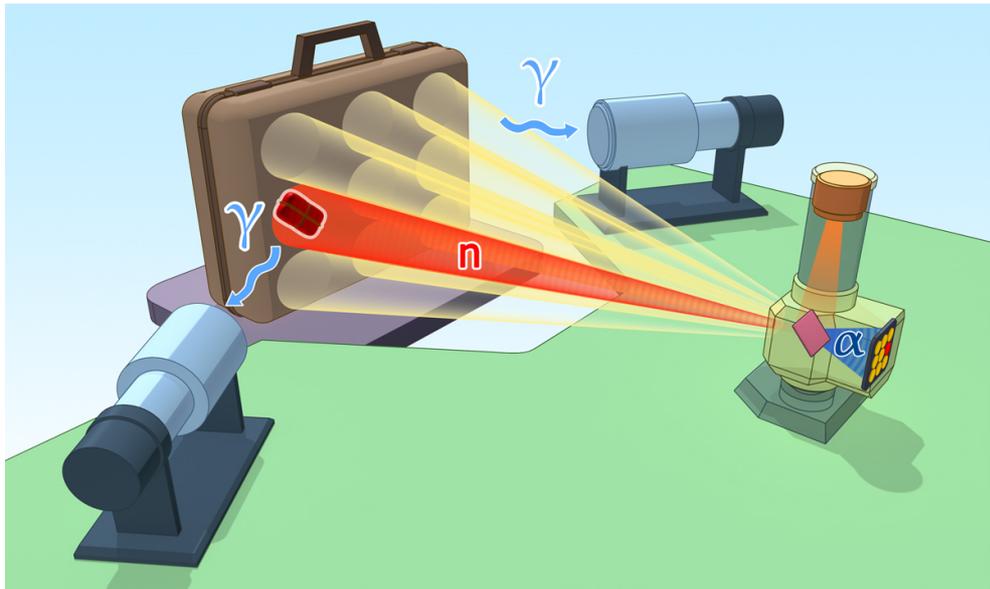


Рис.1 Метод меченых нейтронов. Справа – источник нейтронов, которые рождаются при взаимодействии дейтронов  $d$  с тритиевой мишенью  $t$ . Альфа-детектор показан в виде матрицы  $3 \times 3$ . Два гамма-детектора регистрируют характеристическое излучение из объекта досмотра.

Отличительной особенностью ММН является то, что вещество идентифицируется по его элементному составу, а не по контрасту плотности, как это происходит в рентгеновских сканерах. Быстрые нейтроны возбуждают ядра вещества в реакции неупругого рассеяния  $A(n, n'\gamma) A^*$ . Это возбуждение снимается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергетическими спектрами, характерными для разных элементов.

Пример спектра гамма-квантов для ТНТ и гексогена показан на Рис.2.

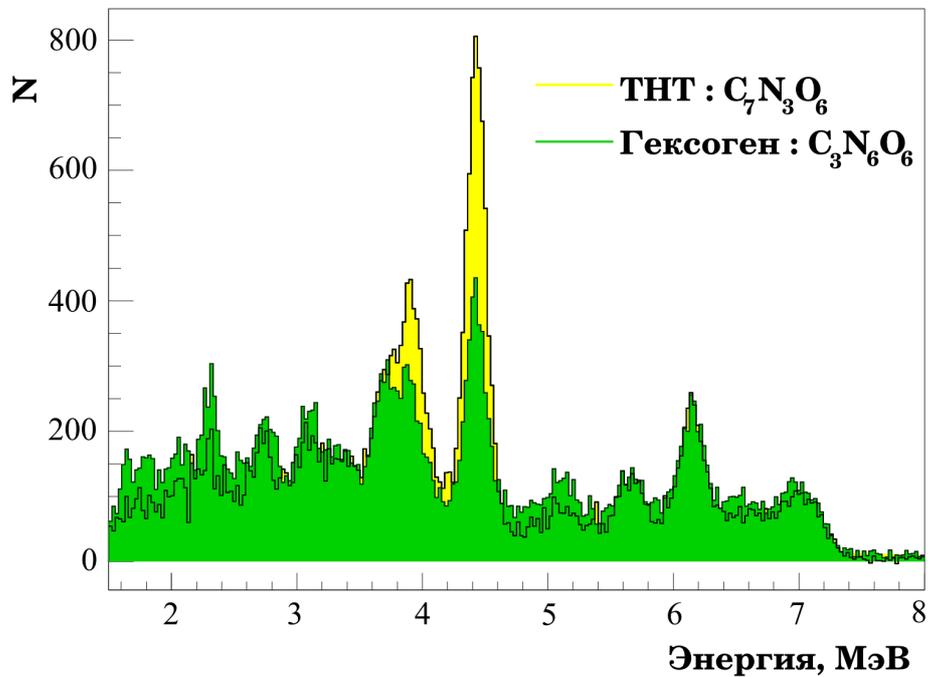


Рис.2 Энергетические спектры гамма-квантов для ТНТ (желтая гистограмма) и гексогена (зеленая гистограмма).

Видно, что энергетический спектр состоит из отдельных линий. Большой пик при энергии 4.43 МэВ отвечает углероду. В элементном составе ТНТ ( $C_7N_3O_6H_5$ ) углерода больше, чем в гексогене ( $C_3N_6O_6H_6$ ), поэтому и углеродный пик в ТНТ (желтая гистограмма) намного больше, чем в гексогене.

Идентификация взрывчатых, наркотических и других опасных веществ основана на том факте, что элементный состав опасных веществ отличается от элементного состава обычных веществ.

Необходимо подчеркнуть, что ММН не ограничен обнаружением какого-то одного вещества, например, азота. Напротив, для идентификации вещества используются линии углерода, кислорода, азота, серы, хлора, кремния и других элементов. На Рис.3 приведены спектры, получающиеся при облучении быстрыми нейтронами золота и американских долларов.

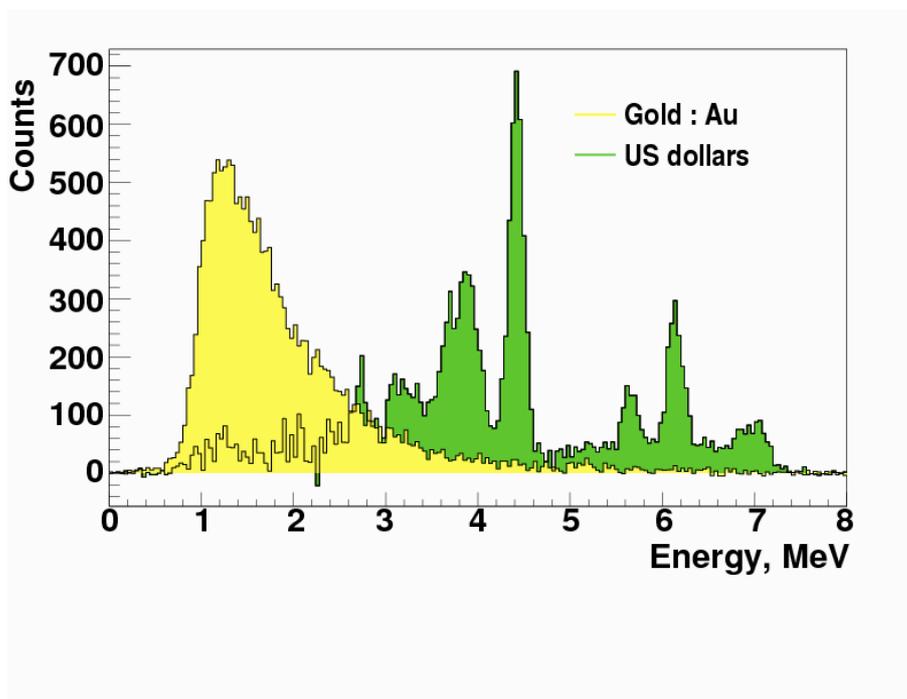


Рис.3 Энергетические спектры гамма-квантов для золота (желтая гистограмма) и американских долларов (зеленая гистограмма).

Возможности ММН по обнаружению различных элементов позволяет использовать его не только, для обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков, но и для контроля за качеством угля, цемента, поисков нефти (нейтронный каротаж). Одним из наиболее экстравагантных применений ММН является его использования для определения жирности молодых ягнят *in vivo* – этот опыт выполнили новозеландские ученые [4]. Они показали, что радиационная доза, которую получили ягнята при облучении мечеными нейтронами, намного меньше, чем при облучении обычными радиоактивными источниками. В этом проявляется еще одно замечательное качество ММН – практически отсутствует наведенная активность в объекте досмотра.

Дело в том, что быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ не так сильно взаимодействуют с веществом, как тепловые или медленные нейтроны. При сертификации детектора взрывчатки ДВИН-1 на основе ММН специалистами Роспотребнадзора были выполнены измерения, которые показали, что при типичном акте обследования, который занимает не более 10 мин, отсутствует наведенная активность как в объекте досмотра, так и в окружающей среде.

## 2. Детекторы взрывчатых веществ на основе ММН

В настоящее время на основе ММН разработан целый ряд детектирующих систем, обеспечивающих досмотр различных объектов – от забытых вещей до морских контейнеров и крупногабаритных транспортных средств.

Лидером по продажам является переносной детектор взрывчатых веществ ДВИН-1 (Рис.4), который производится ООО «Нейтронные технологии» в г.Дубне (см. доклад Ю.Н.Рогова на этой конференции [5]).



Рис.4 Переносной детектор взрывчатых веществ ДВИН-1.

Переносной детектор ДВИН-1 был разработан для нужд Комплексной Программы по обеспечению безопасности населения на транспорте, утвержденной постановлением Правительства РФ от 30.06.2010. Она предусматривает оснащение постов инструментального досмотра на входах на станции всех метрополитенов России переносными комплексами обнаружения взрывчатых веществ на основе метода быстрых меченых нейтронов.

В настоящее время 76 детекторов ДВИН-1 поставлены на вокзалы Северо-Кавказской, Октябрьской железной дороги, Казани и Владивостока, а также на станции метрополитенов Москвы, Санкт-Петербурга, Казани и Новосибирска.

Детектор ДВИН-1 использует нейтронный генератор ИНГ-27 с 9-канальным альфа-детектором производства ВНИИА им. Н.Л.Духова. Интенсивность генератора составляет  $I=5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ . Используется один гамма-детектор на основе кристалла ВГО диаметром 76 мм.

По заказу ФСБ РФ был изготовлен стационарный детектор взрывчатых веществ, в котором используется нейтронный генератор ИНГ-27 повышенной интенсивности  $I=1 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$  со встроенным 64-канальным альфа-детектором производства ОИЯИ (см. доклад В.Л.Рапацкого [6]). Регистрирующую часть установки обеспечивают два гамма-детектора ВГО диаметром 100 мм (см. Рис.5).



Рис 5. Общий вид стационарной системы для идентификации ВВ.

Стационарная установка эксплуатируется в Межрегиональном центре по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ.

Более мощный детектор был разработан по заказу ФСБ РФ для досмотра заминированных автомобилей (см. доклад А.Б.Садовского [7]). В нем используется нейтронный генератор ИНГ-27 с интенсивностью  $I=1 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ , 64-канальный альфа-детектор производства ОИЯИ и 6 гамма-детекторов (см. Рис.6).



Рис 6. Детектор для досмотра заминированных автомобилей.

Высокая проникающая способность быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ позволяет использовать ММН для досмотра крупногабаритных транспортных средств. По заказу ФСБ РФ был создан нейтронный портал, позволяющий проводить досмотр морских

контейнеров толщиной 260 см и транспортных фур высотой до 4 м (см. доклад Р.А.Салмина [8]). Обследование ведется двумя модулями досмотра, расположенными по разным сторонам портала. В составе каждого модуля досмотра модифицированный нейтронный генератор ИНГ-27 с повышенной интенсивностью  $I=2 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ , 64-канальный альфа-детектор производства ОИЯИ и 24 гамма-детектора (см. Рис.7).



Рис 7. Нейтронный портал для досмотра крупногабаритных транспортных средств.

### 3. Детекторы ММН для поиска опасных объектов под водой

Высокая проникающая способность быстрых нейтронов делает возможным их использование для обследования опасных объектов под водой. Преимущества ММН были убедительно показаны в ходе работ по проекту UnCoSS [9,10]. Для изучения специфики использования детекторов ММН под водой нами была создана экспериментальная установка, показанная на Рис.8 [11].



Рис 8. Нейтронный модуль досмотра для работы под водой.

Основу ее составил модуль досмотра переносного детектора ДВИН-1. Модуль досмотра был помещен в герметичный ударопрочный ящик. С помощью гибкого гофрированного шланга модуль досмотра соединялся с системой управления. Модуль

досмотра размещался на платформе, имеющей направляющие для крепления исследуемых объектов. Ввиду положительной плавучести модуля в нижней части платформы был размещен балласт. Погружение модуля в водный бассейн осуществлялось с использованием лебедки.

Эксперименты показали, что основные особенности работы под водой состоят в повышении загрузки гамма-детекторов и изменению характера временного спектра гамма-квантов (см. доклад А.В.Рогачева [11]). Тем не менее, удалось увидеть все основные линии спектра взрывчатого вещества.

#### 4. Детекторы ММН для поиска алмазов

Специалисты АК “АЛРОСА” сделали нам интересное предложение рассмотреть возможность нахождения алмазов в кимберлитовой породе с помощью ММН. В настоящее время при промышленной добыче алмазов исходное сырье дробится до средних размеров порядка 50 мм, затем перемалывается практически до уровня песка, а затем облучается рентгеновскими лучами с целью обнаружения алмазов по их люминесценции.

Основным недостатком этого процесса является то, что в процессе дробления и перемалывания разрушаются наиболее ценные крупные алмазы, массой от 5 карат и выше.

Интересно было бы осуществить отбор породы с крупными алмазами перед дроблением. Для этого идеально подходит ММН – он позволяет обнаружить алмаз по его элементному составу – углероду. Спектр углерода очень прост – в нем доминирует одна линия с энергией 4.43 МэВ (см. обсуждение Рис.2). Задача сводится к обнаружению избытка углерода в куске породы, причем благодаря ММН можно точно определить все три координаты местоположения алмаза.

Сложность задачи состоит в малой массе скрытого вещества - на уровне 1 г и малых пространственных размерах, которое оно занимает - порядка нескольких мм. Для этого требуются меченые пучки нейтронов предельно малых размеров. Этим требованиям отвечает альфа-детектор, разработанный в ОИЯИ [6], который имеет рекордно малый размер пикселя – 4x4 мм. На Рис. 9 показан спектр куска кимберлита, в который вставлен имитатор алмаза массой 1.78 г. Для сравнения тонкой линией показан спектр кимберлита без алмаза.

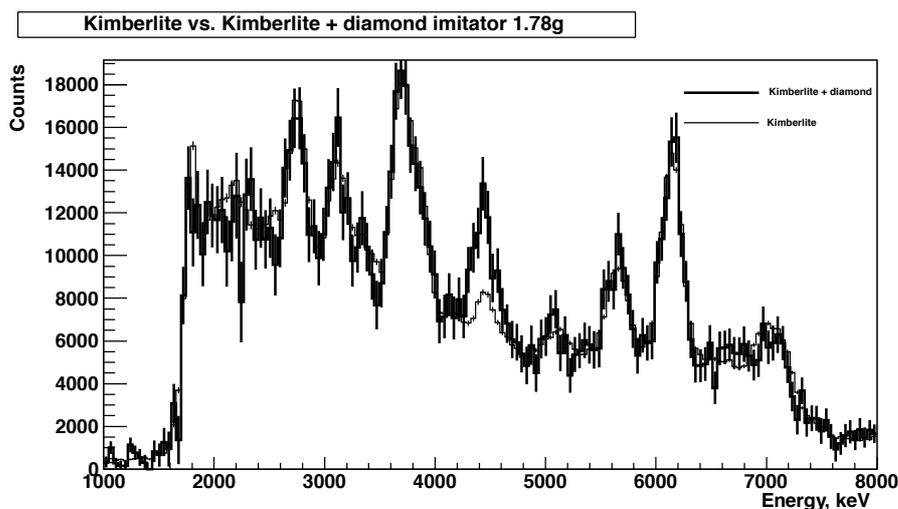


Рис 9. Энергетический спектр гамма-квантов при облучении куска кимберлита с имитатором алмаза массой 1.78 г (толстая линия). Для сравнения тонкой линией показан спектр кимберлита без алмаза.

Хорошо видно, что оба эти спектра совпадают во всей области энергий за исключением района линии углерода 4.43 МэВ. Было показано, что на основе этого эффекта можно разработать алгоритм обнаружения областей с повышенным содержанием углерода, который распознает алмазы массой в районе 1 г в кусках кимберлитовой породы.

## 5. Нейтронный блокпост

Интересным представляется использование детекторов ММН для стационарных систем досмотра легковых автомобилей. Нами была рассчитана радиационная обстановка для стационарной системы, показанной на Рис. 10.

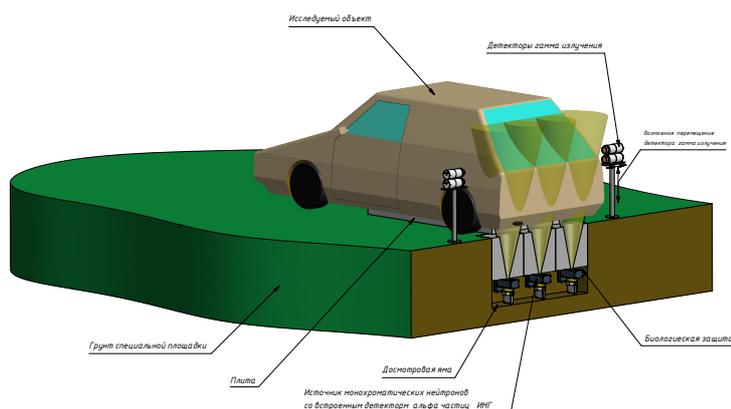


Рис 10. Стационарная система досмотра легковых автомобилей.

Меченые нейтронные пучки создаются несколькими генераторами, размещенными в специальной полости в земле. Гамма-детекторы устанавливаются по бокам досматриваемого автомобиля. Для усиления биологической защиты используется бетонная плита. Расчеты показали, что такая система позволяет за время в несколько минут просмотреть багажник автомобиля и установить, находятся ли в нем взрывчатые вещества или наркотики. Причем радиационный фон во время такого обследования будет настолько мал, что водителю не нужно выходить из автомобиля. Такой «нейтронный блокпост» может быть установлен на главных транспортных магистралях в местах размещения постов ГАИ.

## 6. Совершенствование нейтронных генераторов

Развитие детекторов на основе ММН невозможно без существования надежных и качественных нейтронных генераторов. Российским компаниям, создающим детекторы на основе ММН, сильно повезло с существованием мощного разработчика нейтронных генераторов - Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л.Духова. На сегодняшний день ни одна компания в мире не способна выполнить в короткие сроки такой объем поставок портативных нейтронных генераторов со встроенными альфа-детекторами типа ИНГ-27, какой был выполнен ВНИИА им. Н.Л.Духова в 2011 г., когда за год было произведено более 70 генераторов ИНГ-27. Причем надо отметить, что в нашей практике было всего лишь два случая отказа ИНГ-27 на стадии сборки детектора. Регламентные работы, выполняемые нами сейчас в различных городах страны показывают, что все 76 ИНГ-27 исправно работают.

Дальнейшее совершенствование технологии ММН диктует свои требования к повышению различных качеств нейтронных генераторов со встроенными альфа-детекторами. Прежде всего, использование систем ММН в различных производственных процессах с круглосуточной работой просто невозможно без повышения ресурса нейтронных генераторов. Необходимо повысить ресурс работы ИНГ-27 до нескольких тысяч часов.

Другой важный параметр, который необходимо улучшить, это зона досмотра. В существующих ИНГ-27 она составляет 30х30 см на расстоянии 60 см. Это мало для большинства практических применений. Например, с такой зоной досмотр типичного багажа пассажиров необходимо производить в несколько приемов.

Наконец, практика требует повышения гранулярности альфа-детектора и уменьшения временного разрешения системы  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений. Оба эти требования необходимы для повышения надежности обнаружения скрытого вещества. Альфа-детектор должен обеспечивать, по крайней мере, 256 меченых пучков, а временное разрешение системы  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений должно быть на уровне 1 нс.

Сдерживающим элементом для развития ММН является высокая цена нейтронного генератора. Это приводит к тому, что детекторы на основе ММН являются почти в два раза дороже других технических средств для обеспечения транспортной безопасности.

## 7. Заключение

Технология ММН получила в последнее время широкое развитие. Созданы различные типы детекторов на основе ММН: портативные, стационарные, детекторы для досмотра заминированных автомобилей, системы для досмотра крупногабаритных транспортных средств. На вокзалы и метрополитены страны поставлены 76 портативных детекторов ДВИН-1. Разрабатываются различные модификации детектора, например, для поиска алмазов или для работы в подводных условиях.

Прогресс в технологии ММН был бы невозможен без существования надежных портативных нейтронных генераторов, создаваемых ВНИИА им. Н.Л.Духова.

Автор выражает большую благодарность Оргкомитету конференции за приглашение участвовать в таком представительном и хорошо организованном мероприятии.

Отдельную благодарность хотелось бы принести Е.П. Боголюбову, В.И. Рыжкову, Ю.К.Преснякову, Т.О.Хасаеву, А.С.Чуприкову и Д.И.Юркову за многолетнее плодотворное сотрудничество.

## Литература

1. L.I.Ussery et al., Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
2. E.Rhodes et al., SPIE, v. 2092, p. 288 (1993); E.Rodes et al., IEEE Trans. Nucl. Science, 39 (1992) 1041-1045.
3. A.Beyerle, J.P.Hurley, L.Tunnell, Nucl.Instr.Meth. A299 (1990) 458.
4. S.Mitra, J.E.Wolff, R.Garrett, C.W.Peters, Asia Pacific J.Clin.Nutr. 4 (1995) 187.
5. Ю.Н.Рогов, доклад на этой конференции.
6. В.Л.Рапацкий, доклад на этой конференции.
7. А.Б.Садовский, доклад на этой конференции.
8. Р.А.Салмин, доклад на этой конференции.
9. В.Валкович, доклад на этой конференции.
10. V. Valkovic, et al., Nuclear Instruments & Methods In Physics Research A (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.096>