

Отклик пропорционального счетчика на электроны с энергиями до 10 кэВ: моделирование средствами GEANT4

Д.Н. Абдурашитов, Ю.М. Малышкин

краткий технический отчет *
Троицк, ИЯИ РАН, 05.04.2015

Цель работы

Исследование отклика газового пропорционального счетчика на электроны с энергиями 2.8 и 10.2 кэВ с точки зрения поиска примеси стерильных нейтрино в распадах трития (эксперимент «NuMix»).

Геометрия детектора и методика моделирования

Детектор — кварцевый пропорциональный счетчик цилиндрической формы с центральной анодной нитью. Торцы реальных счетчиков, изготовленных В.Янцем, выполнены в виде конуса, сводящего цилиндрические стенки к центральной оси. Внутренняя поверхность счетчика покрыта слоем пиролитического углерода, служащего катодом. По оси цилиндра протянута анодная вольфрамовая нить.

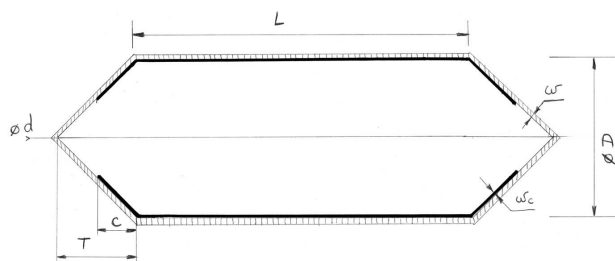


Рис. 1: Характерные размеры счетчика

В модели используется геометрия, показанная на Рис. 1; обозначения на рисунке следующие: L — длина рабочей зоны, D — внутренний диаметр, w — толщина стенки, w_c — толщина углеродной пленки, d — диаметр анодной нити, T — высота торцевого конуса (по внешней поверхности стенки), C — глубина захода углеродной пленки в конус торца. Для данной конкретной работы использованы значения:

$L=30$ мм, $D=4$ мм, $w=1$ мм, $w_c=1$ мкм, $T=5$ мм, $C=2$ мм, $d=0$ (без анодной нити). Счетчик заполнен ксеноном при давлении 1 атм. Электрическое поле не учитывается и, как следствие, торцевой эффект не моделируется. Источник — электроны определенной

*Постоянный адрес отчета <http://www.numix.inr.ru/reports/2015/r150405.pdf>

энергии, генерируются равномерно по внутреннему объему. На первом этапе выбрано два значения энергии — 2.8 кэВ для имитации К—пика ^{37}Ar и 10.2 кэВ — имитация К—пика ^{71}Ge ; по обоим изотопам есть хорошая статистика в счетчиках.

Электромагнитные взаимодействия моделируются Geant4 (v.10 patch 01) с помощью пакета моделей Livermore, использующего следующие таблицы данных: EADL (Evaluated Atomic Data Library), EEDL (Evaluated Electrons Data Library) и EPDL97 (Evaluated Photons Data Library). Разработчики заявляют о применимости моделей от 250 эВ и выше. В принципе можно использовать от 10 эВ, не рассчитывая, правда, на высокую точность. Модели Livermore работают со всеми элементами с $Z=1-100$, однако снятие возбуждения работает только для $Z>5$. Последнее ограничение обусловлено наличием данных в базе EADL. Моделируются следующие процессы: взаимодействия фотонов (комpton—эффект, рэлеевское рассеяние, фотоэффект и рождение пар), взаимодействия электронов и позитронов (тормозное излучение и ионизация), а также снятие возбуждения атомов. В ходе моделирования прослеживается судьба каждого электрона. Результатом моделирования является бинарный файл, в котором для каждого электрона зафиксированы следующие основные величины:

z, r — координаты рождения первичного электрона: z — координата вдоль оси (0 в центре), r — радиус;

e_{dep} — суммарное энерговыделение во внутреннем объеме детектора.

Дополнительно к основным параметрам выставляются следующие флаги:

f_w — флаг касания стенки первичным электроном: 1 — было хотя бы одно касание или заход в стенку, 0 — касания не было;

f_g — флаг генерации вторичного гамма (тормозное излучение либо характеристический рентген): 1 — был хотя бы один акт вторичного излучения, 0 — без излучения;

f_s — флаг вылета вторичного гамма за пределы внутреннего объема детектора: 1 — вылет есть, 0 — без вылета.

Обычная статистика — 1 млн первичных электронов. Кроме того, в отдельных файлах фиксируется генерационный спектр вторичных гамма, и спектр энерговыделения в стенке.

Результаты моделирования

После ряда тестов основное моделирование проведено 18 Дек 2014. Ниже приводятся распределения основных параметров по записям в выводном файле.

Распределение событий по координатам

На Рис. 2 представлены распределения событий по z , с шагом 0.1 мм; слева — электроны 2.8 кэВ, справа — 10.2 кэВ. Черная (верхняя) линия — распределение всех первичных электронов. Синяя (средняя) линия — распределение для тех электронов, которые

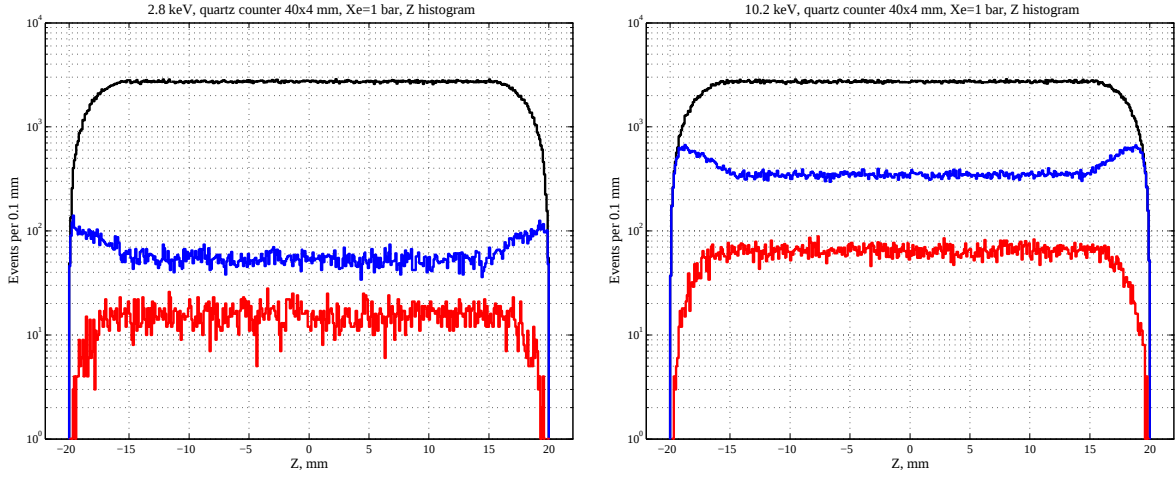


Рис. 2: Распределение событий по z , слева — 2.8 кэВ, справа — 10.2 кэВ. Верхняя линия — все первичные электроны; средняя линия — электроны, коснувшиеся стенки ($f_w=1$). Нижняя линия — электроны с генерацией вторичных γ -квантов ($f_g=1$).

в ходе замедления коснулись стенки ($f_w=1$), красная (нижняя) линия — распределение электронов, взаимодействие которых со средой привело к генерации вторичных γ -квантов ($f_g=1$). Поведение координаты z первичных электронов согласуется с представлением о том, «как это должно быть». На торцах электронов рождается меньше; с другой стороны, в торцах стенки ближе — касаний больше. Генерация излучения в первом приближении не зависит от близости стенок. Можно выделить зону, условно свободную от торцевого эффекта — это события с координатами $[-14 \text{ мм} < z < 14 \text{ мм}]$.

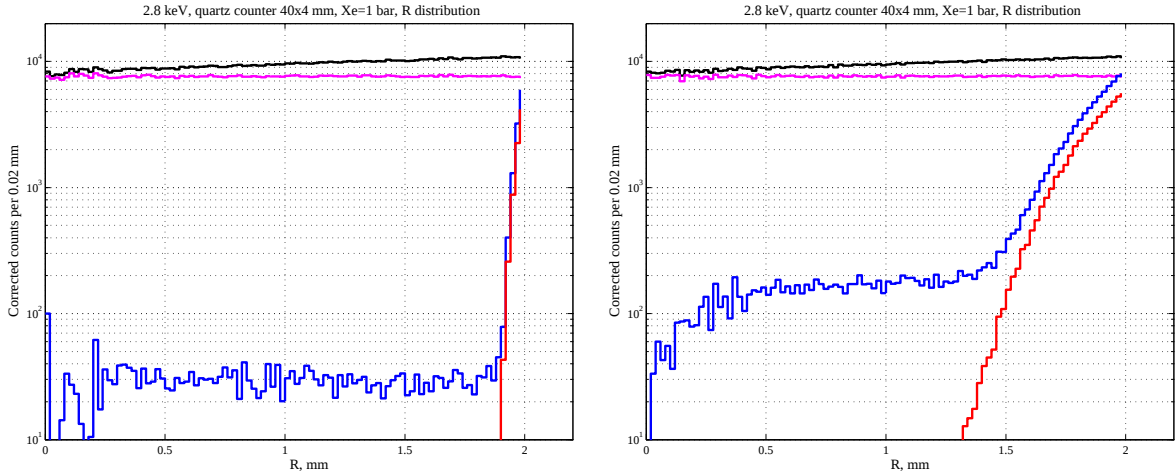


Рис. 3: Распределение событий по r . Верхняя линия — весь объем; линия ниже — бесторцевая зона ($|z| < 14 \text{ мм}$). Средняя линия — касание стенки во всем объеме ($f_w=1$), нижняя — касание стенки в бесторцевой зоне ($f_w=1, |z| < 14 \text{ мм}$).

На Рис. 3 представлены распределения событий по r , с равномерным шагом 0.02 мм (100 бинов); слева — электроны 2.8 кэВ, справа — 10.2 кэВ. Гистограммы корректиру-

ются поправкой, численно равной отношению площади кольца, вырезаемого бином, к единичной площади $ds = S/100 \sim 0.13 \text{ мм}^2$, где $S = \pi D^2/4$ — площадь поперечного сечения рабочей зоны ($D=4 \text{ мм}$). Черная (верхняя) линия — распределение всех первичных электронов; лиловая (ниже) линия — распределение в бесторцевой зоне ($|z| < 14 \text{ мм}$). Синяя линия — касание стенки во всем объеме ($f_w=1$), красная (нижняя) — касание стенки в бесторцевой зоне ($f_w=1$ одновременно с условием $|z| < 14 \text{ мм}$).

Поведение радиальной координаты r первичных электронов также согласуется с представлением о том, «как это должно быть». Отчетливо выделяются границы пристеночного эффекта в бесторцевой зоне (красные линии), которые простираются глубже в счетчик с ростом энергии электронов.

Спектры вторичного излучения

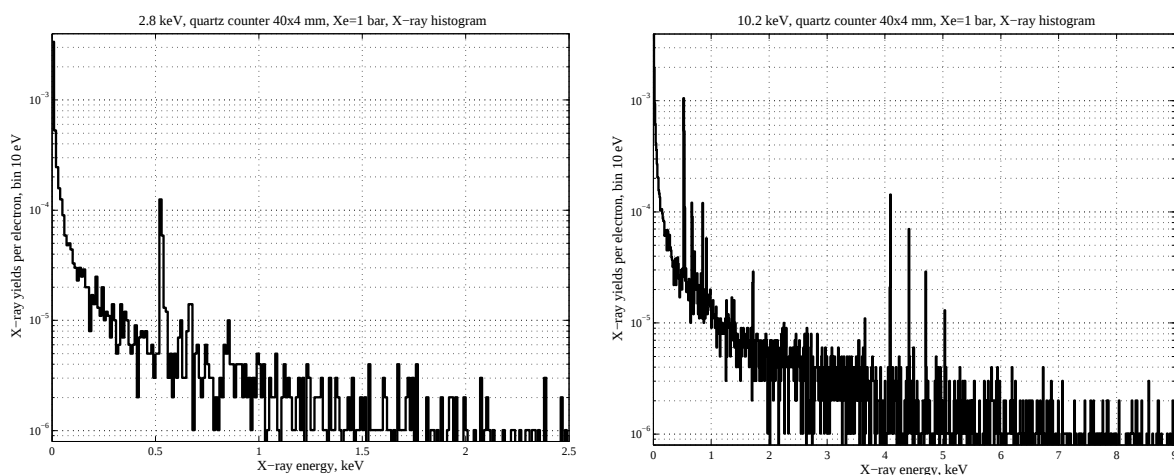


Рис. 4: Генерационные спектры вторичных γ -квантов, излученных в процессе замедления первичных электронов; слева — 2.8 кэВ, справа — 10.2 кэВ.

На Рис. 4 показаны генерационные спектры вторичных γ -квантов, излученных в процессе замедления первичных электронов. Как и прежде, слева — 2.8 кэВ, справа — 10.2 кэВ. В спектрах отчетливо наблюдается линия возбуждения кислорода 525 эВ. Энергии 10.2 кэВ электронам хватает для возбуждения линий кремния 1740 эВ и множества линий ксенона 3640, 4110, 4414, 4714, 5034 эВ. Общий фон для всех спектров — тормозное излучение. Не видно линии углерода 277 эВ, но его мало.

Энерговыделение в счетчике

На Рис. 5 представлены спектры энерговыделения в счетчике. Черной (верхней) линией показано полное энерговыделение, без отборов. Синяя (средняя) линия отображает энерговыделение в бесторцевой зоне ($|z| < 14 \text{ мм}$); красная (нижняя) линия — дополнительный отбор событий касания стенки ($|z| < 14 \text{ мм}$ при условии $f_w=1$). На спектре 10.2 кэВ наблюдаются пики, связанные с вылетом вторичных гамма. Красная линия —

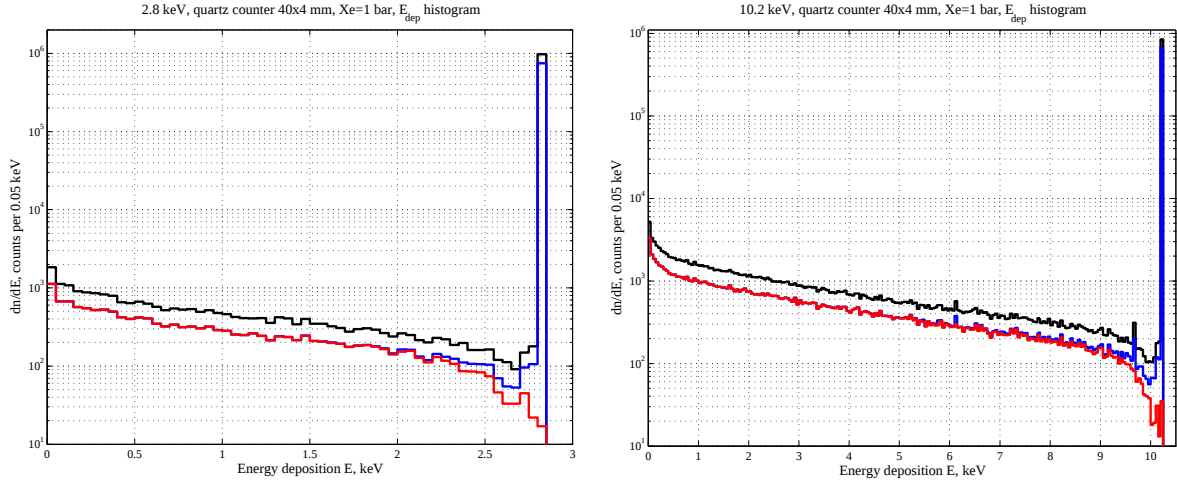


Рис. 5: Спектры энерговыведения в счетчике. Верхняя линия — полное энерговыведение, без отборов. Средняя линия — бесторцевая зона ($|z| < 14$ мм); нижняя линия — касание стенки в бесторцевой зоне ($|z| < 14$ мм и $f_w = 1$).

пристеночный эффект в чистом виде, практически без вклада в пик полного поглощения.

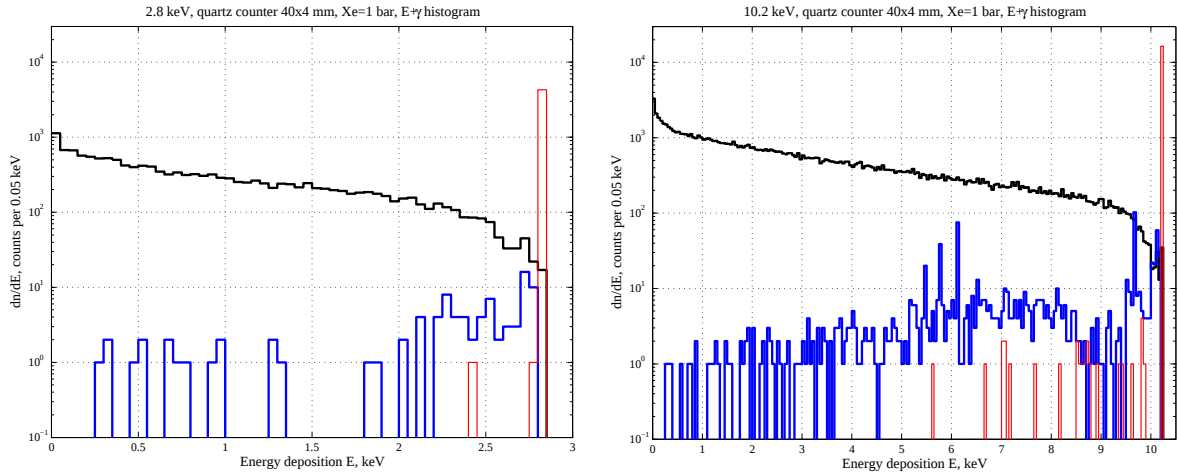


Рис. 6: Спектры энерговыведения при наличии вторичного γ -излучения. Верхняя линия — пристеночные события в бесторцевой зоне ($|z| < 14$ мм и $f_w = 1$); средняя линия — бесторцевая центральная зона с вылетевшими вторичными γ ($|z| < 14$ мм, $f_w = 0$ и $f_g = f_s = 1$); тонкая нижняя линия — без вылета излучения ($|z| < 14$ мм, $f_g = 1$ и $f_w = f_s = 0$).

На Рис. 6 показаны спектры энерговыведения в счетчике при наличии вторичного γ -излучения. Черной (верхней) линией показано полное энерговыведение в бесторцевой зоне для пристеночных событий ($|z| < 14$ мм и $f_w = 1$), безотносительно испускания вторичных гамма (f_g принимает любое значение); черная линия на этом рисунке является аналогом красной линии на Рис. 5. Синяя (средняя) линия отображает энерговыведение в бесторцевой центральной зоне ($|z| < 14$ мм и $f_w = 0$) для событий с вторичным γ -излучением, вылетевшим за пределы рабочей зоны счетчика ($f_g = 1$ при условии $f_s = 1$). Красная тонкая (нижняя) линия — то же, что и синяя (средняя) линия, но без вылета

излучения ($|z| < 14$ мм, $f_g=1$ и $f_w=f_s=0$). На спектре 10.2 кэВ отчетливо видно, что пики энерговыделения в области 6 и 9.7 кэВ наблюдаются только для событий с вылетом вторичных γ -квантов.

Численные оценки

В Табл. 1 представлены соотношения различных режимов энерговыделения, полученных в результате моделирования. Соотношения представлены в процентном выражении.

Энергия первичного электрона	Бесторцевая зона, всего 763380 событий			Весь объем счетчика, всего 1 млн событий		
	f_w	f_g	f_s/f_g	f_w	f_g	f_s/f_g
2.8 кэВ	1.97	0.58	2.29	1.50	0.44	2.29
10.2 кэВ	12.70	2.38	5.95	9.69	1.81	5.95

Таблица 1: Вероятности реализаций различных режимов, выраженные в %.

Обозначения и смысл величин следующие. Столбец f_w — события с касанием стенки по отношению ко всем событиям в указанной зоне. Столбец f_g — события с излучением по отношению ко всем событиям в указанной зоне. Столбец f_s/f_g — события с вылетом излучения по отношению ко всем событиям с излучением в указанной зоне.

Обсуждение

С точки зрения проведения эксперимента «NuMix» по поиску примеси стерильных нейтрино при регистрации распада трития в пропорциональном счетчике самый главный вывод заключается в заметной доле подложки за счет пристеночного эффекта. Эта доля оказывается на уровне 13% для энергий электронов 10 кэВ в ксеноне; для тритиевых электронов с максимальной энергией 18 кэВ следует ожидать еще больший вклад пристеночного эффекта. Этот факт вынуждает пересмотреть некоторые подходы к геометрии счетчика и требования к газовой смеси. К примеру, увеличение диаметра счетчика в 5 раз (до 20 мм) и давления ксенона в 4 раза должно подавить подложку в 20 раз.

С другой стороны, наклонная форма подложки одинакова для обеих энергий электронов. Это дает основания для выработки механизма искажения спектра в аналитическом виде, с целью дальнейшего использования его в процессе фитирования экспериментальных гистограмм.

Следует также отметить, что указанный характерный наклон подложки воспроизводится в реальных спектрах от ^{37}Ag и ^{71}Ge в счетчиках. В дальнейших работах это будет проиллюстрировано наглядным образом.

Другой важной вывод заключается в том, что наблюдается высокая (порядка 2% для 10 кэВ) интенсивность генерации вторичного излучения на ксеноне. Однако, почти все излучение (около 94%) поглощается в счетчике, не искажая энерговыделение. Увеличение диаметра счетчика и давления рабочего газа, как можно ожидать, приведут к подавлению процессов вылета вторичного излучения за пределы рабочего объема.

В настоящий момент ведется подготовка к моделированию отклика пропорционального счетчика на распад изотопов ^{37}Ar и ^{71}Ge . Результаты ожидаются в ближайшее время.

Заключение

В заключение авторы отчета выражают признательность В.Матушко за внимательное прочтение и критический разбор проведенной работы.

25 февраля 2015 г.

Отчет составил:

Д.Н.Абдурашитов