

Отклик кварцевого пропорционального счетчика на источники ^{37}Ar и ^{71}Ge : моделирование средствами GEANT4

Д.Н. Абдурашитов, Ю.М. Малышкин, В.Л. Матушко

технический отчет *
Троицк, ИЯИ РАН, 12.05.2015

Цель работы

Исследование отклика газового пропорционального счетчика на калибровочные источники ^{37}Ar и ^{71}Ge с точки зрения оценки факторов систематической неопределенности в эксперименте «NuMix» по поиску примеси стерильных нейтрино в распадах трития.

Схема излучения ^{37}Ar и ^{71}Ge

Для понимания методов измерения и моделирования необходимо знать, какие частицы и с какой энергией излучаются при распаде указанных изотопов.

Распад ^{37}Ar происходит путем захвата электрона с К-, L- либо M-оболочки в соотношении $L/K=0.0987$ и $M/L=0.104$ (см., напр. [1]). Это дает абсолютные доли захватов $K=0.902$, $L=0.089$ и $M=0.0093$. Выход рентгеновской флуоресценции дочернего атома Cl составляет 0.097 для вакансии на К-оболочке, и 0.00012, 0.00024 и 0.00024 для вакансий на оболочках L1, L2 и L3 соответственно. Далее, примем во внимание, что в газовом пропорциональном счетчике регистрируется только суммарное энерговыделение от всех Оже-электронов, без различения отдельных Оже-линий в каскадах. Тогда, используя указанные выше соотношения и энергии линий характеристического излучения, можно определить вероятности различных режимов полного энерговыделения. Из Табл 1 видно, что при полном поглощении в счетчике должны формироваться 2 основных пика: К-пик с энергией 2.82 кэВ и L-пик с энергией 0.27 кэВ.

В распаде ^{71}Ge электрон захватывается с К-, L- либо M-оболочки в соотношении $L/K=0.117$ и $M/L=0.0192$, что в абсолютном выражении дает доли захватов $K=0.877$, $L=0.103$ и $M=0.02$. Выход флуоресценции рентгена дочернего атома Ga составляет 0.528 для вакансии на К-оболочке, и 0.0021, 0.012 и 0.013 для вакансий на оболочках L1, L2 и

*Постоянный адрес отчета <http://www.numix.inr.ru/reports/2015/r150512.pdf>

Мода захвата	Суммарная энергия (кэВ) Оже-электронов	Энергия рентгеновского кванта, кэВ	Абсолютная доля, %
K	2.823	0.0	81.5
K	0.202	2.621	2.7
K	0.201	2.622	5.5
K	0.007	2.816	0.5
L	0.270	0.0	8.9
M	0.018	0.0	0.9

Таблица 1: Энергия, испускаемая в виде Оже-электронов и характеристического рентгеновского излучения при заполнении вакансий электронных оболочек после распада ^{37}Ar .

L3 соответственно. Принимая во внимание регистрацию суммарного энерговыделения от всех Оже-электронов, для ^{71}Ge также можно составить Таблицу 2.

Мода захвата	Суммарная энергия (кэВ) Оже-электронов	Энергия рентгеновского кванта, кэВ	Абсолютная доля, %
K	10.367	0.0	41.4
K	1.143	9.224	13.7
K	1.116	9.251	27.4
K	0.107	10.260	1.7
K	0.103	10.264	3.5
L	1.299	0.0	10.3
M	0.160	0.0	2.0

Таблица 2: Энергия, испускаемая в виде Оже-электронов и характеристического рентгеновского излучения при заполнении вакансий электронных оболочек после распада ^{71}Ge .

Следует отметить, что L-пик является на самом деле не отдельным пиком, а состоит из 3-х линий 1.299, 1.143 и 1.116 кэВ. Вклад последних двух линий зависит от вероятности поглощения сопровождающего их рентгеновского излучения в объеме пропорционального счетчика. Таким образом, ширина L-пика и его средняя энергия зависят, вообще говоря, от газовой смеси и геометрии счетчика. В случае полного вылета всех рентгеновских квантов из объема детектирования средневзвешенная энергия пика составит 1.16 кэВ.

Реальные спектры ^{37}Ar и ^{71}Ge

Реальные спектры энерговыделений от источников ^{37}Ar и ^{71}Ge набирались в разных кварцевых счетчиках, но с одинаковыми размерами — длина 40 мм, внутренний диаметр 4 мм. Спектр ^{71}Ge набирался в смеси $\text{Xe}+11.0\% \text{GeH}_4$ с общим давлением 703 мм рт ст при газовом усилении порядка 10^3 . Активность ^{71}Ge на момент нача-

ла измерений составляла около 300 с^{-1} . Набор осуществлялся в подземных условиях ГГНТ БНО в пассивной защите, так что фоновая составляющая в спектре пренебрежимо мала. Спектр ^{37}Ar набирался в чистом Хе с давлением около 760 мм рт ст и при газовом усилении порядка $5 \cdot 10^3$; активность ^{37}Ar на момент измерений составила 540 с^{-1} . Набор осуществлялся в Троицке, без защиты; фоновая составляющая в спектре заметна (см. Рис. 1), но ею также можно пренебречь.

Для формирования низкоуровневого сигнала с обоих счетчиков использовался зарядочувствительный предусилитель с временем спада около 30 мкс. С выхода предусилителя сигнал подавался на спектрометрический усилитель ORTEC-571 (shaping time $1 \mu\text{s}$). Спектр ^{71}Ge набирался при помощи многоканального анализатора MCA ORTEC-918A. Для набора спектра ^{37}Ar применялся метод покадровой записи событий [2] цифровым осциллоскопом на базе платы Ла-н12РС1 производства «Руднев-Шиляев».

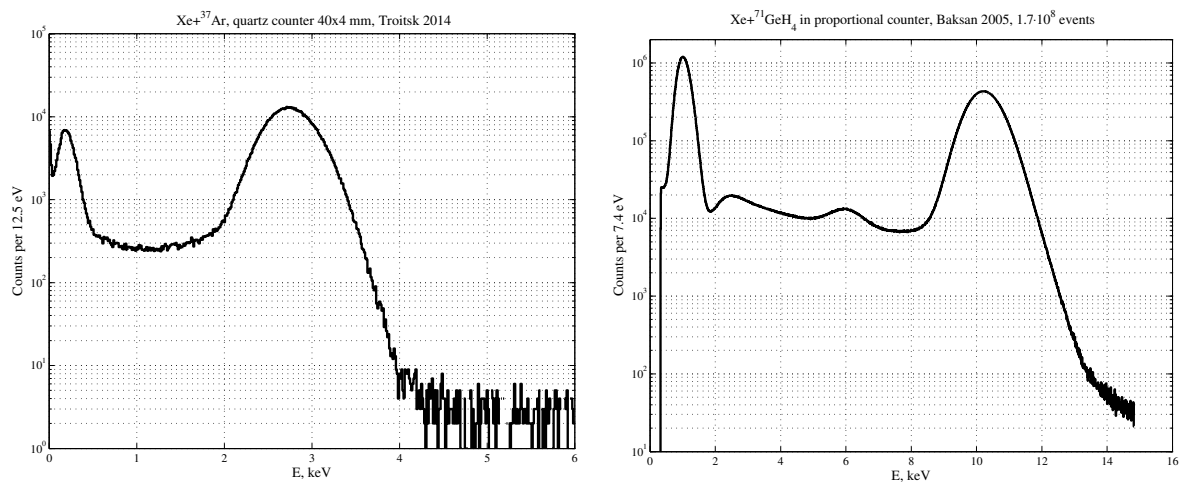


Рис. 1: Реальный отклик миниатюрного кварцевого пропорционального счетчика на источники ^{37}Ar (слева) и ^{71}Ge (справа).

На Рис. 1 представлены измеренные спектры энерговыделения в счетчиках от источников ^{37}Ar и ^{71}Ge . Статистика спектра ^{37}Ar составляет 1 млн событий; в спектре ^{71}Ge около $1.7 \cdot 10^8$ событий.

Геометрия детектора и методика моделирования

Геометрия детектора и методика моделирования те же, что и в отчете [3]; кратко напомним основные размеры и параметры. Детектор представляет собой кварцевый пропорциональный счетчик цилиндрической формы; длина рабочей зоны 40 мм, внутренний диаметр 4 мм, толщина стенки 1 мм. Счетчик заполнен ксеноном при давлении 1 атм; источники ^{37}Ar и ^{71}Ge распределены равномерно по объему. Электромагнитные взаимодействия моделируются Geant4 (v. 10.1) с помощью пакета моделей Penelope, использующего таблицы данных EADL, EEDL и EPDL97. Электрическое поле не учитывается и, как следствие, искажение отклика, обусловленное изменением газового усиления на торцах (торцевой эффект), в модели не воспроизводится.

Результатом моделирования является ROOT-файл, в котором для каждого распада фиксируется, среди прочего, суммарное энерговыделение во внутреннем объеме детектора. Распределение полного энерговыделения по энергии зависит от состава газа и геометрии счетчика; именно это распределение приводится ниже в качестве модельного спектра. Статистика по событиям составляет 1 млн распадов для каждого источника.

Систематическое искажение модельного спектра

Для сравнения модельных спектров с реальными необходимо учесть систематическое искажение отклика. Факторы систематического воздействия на отклик цилиндрических газовых счетчиков хорошо известны. Подробно о систематическом искажении отклика можно узнать в работе [4], раздел 7; здесь мы коротко изложим содержание раздела.

Основной вклад в искажение отклика счетчика вносит разброс измеряемых амплитуд сигналов, обусловленный в первую очередь статистическим разбросом числа n ион-электронных пар первичной ионизации. Исторически этот разброс характеризуется параметром R (энергетическое разрешение), который по определению равен отношению ширины на $1/2$ высоты (full width at half maximum, f.w.h.m.) отклика счетчика на линию к энергии линии: $R = \frac{f.w.h.m.}{E}$. Отклик счетчика на электроны с энергией 5.9 кэВ в лучшем случае обладает разрешением $R_{5.9} = \frac{2.34}{14} \sim 16\%$; для энергии 18 кэВ разрешение составит около 10%.

Значительный вклад в систематику обусловлен формированием подложки в спектре за счет изменения газового усиления на торцах (торцевой эффект), и характеризуется долей D событий, ушедших в подложку. Специальная конструкция счетчика (конусная форма торцов) и достаточная длина (~ 200 мм при диаметре 4 мм) позволяет довести долю торцевого эффекта до величины порядка $\sim 1\%$. В данной работе принято, что подложка имеет прямоугольную форму.

При высокой скорости счета начинают играть роль случайные совпадения (наложения) событий. Доля неразличимых наложений C прямо пропорциональна произведению скорости счета и длительности сигнала. Запись формы каждого сигнала обеспечивает снизить вклад неразличимых наложений, искажающих конечный амплитудный спектр, до величины $\sim 0.1\%$.

Результаты моделирования

Первая попытка моделирования сразу выявила тот факт, что **Geant4** текущей версии формирует нефизические пики в отклике. Впоследствии выяснилось, что это связано с ошибкой в коде, найденной совсем недавно одним из пользователей **Geant4**; этот же пользователь предложил и решение проблемы в виде патча [5]. Ниже приводятся «неправильный» и «правильный» отклики, а также описание физической сути исправления кода.

Модельный отклик до исправления кода

На Рис. 2 представлены модельные отклики (красная линия) счетчика на источники ^{37}Ar и ^{71}Ge , полученные текущей версией **Geant4**, до исправления кода. Отклики сбиты в бины по 50 эВ и представлены на фоне реальных спектров (черная линия). Для сравнения модельные отклики вручную искажены соответствующей систематикой: $R=25\%$ на 2.8 кэВ, $D=6\%$, $C=0.01\%$ — для ^{37}Ar , и $R=13.5\%$ на 10.4 кэВ, $D=5\%$, $C=0.5\%$ — для ^{71}Ge . Шкала энергий и интенсивность тоже подбирались вручную, чтобы хотя бы примерно подогнать модельный отклик под реальный; искаженный отклик показан синей линией.

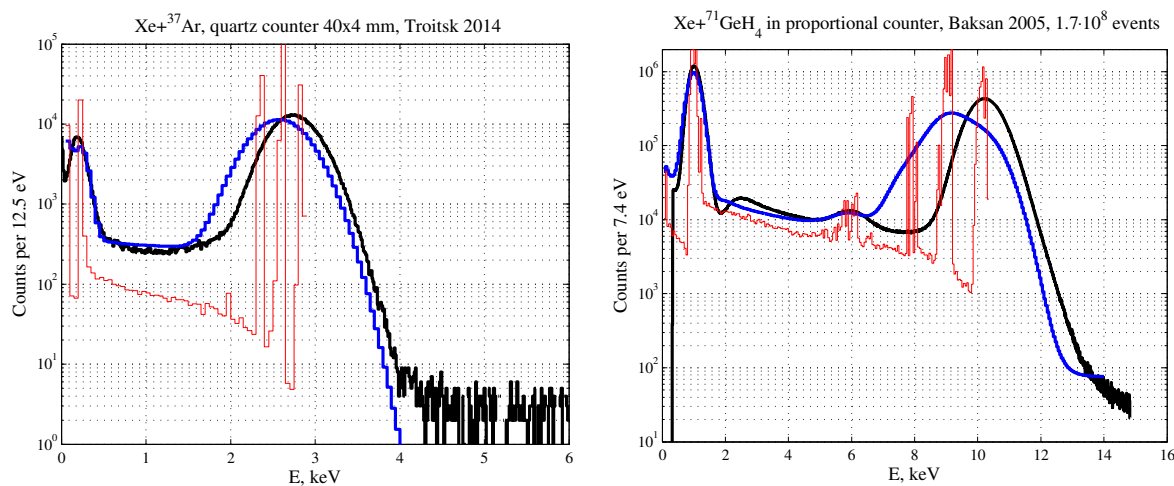


Рис. 2: Модельный отклик пропорционального счетчика на фоне реальных спектров ^{37}Ar (слева) и ^{71}Ge (справа); отклик получен «неправильной» версией **Geant4**, до исправления кода. Черная линия – реальный спектр, красная – исходный модельный отклик, синяя – отклик после сглаживания.

Сразу следует отметить наличие группы из 3-х Оже-линий в неискаженном модельном отклике в области К-пики для обоих изотопов, что явно не соответствует действительности. В спектре ^{37}Ar эти линии остались бы неразрешенными, и сглаженный отклик был бы практически неотличим от реального. Однако разрешения счетчика явно хватает, что увидеть линии в спектре ^{71}Ge , если бы они были. Таким образом, уже на первом этапе моделирования стало ясно, что текущая версия **Geant4** каким-то способом искажает энергосодержание при заполнении вакансий на электронных оболочках дочерних элементов. Такой вывод, в частности, подтверждался тем, что эти же группы линий наблюдаются в спектре первичного излучения ^{37}Ar и ^{71}Ge , еще до трассировки в объеме счетчика (на рисунке не показаны). Кроме того, в модельном отклике не удалось воспроизвести промежуточный пик в области 2.5 кэВ, наблюдаемый в реальном спектре.

Исправление кода Geant4

В ходе общения с рабочей группой **Geant4** один из разработчиков посоветовал нам обратить внимание на сообщение пользователя В. Suerfu [5]. Буквально в конце марта

текущего 2015 года Suerfu сообщил о найденной ошибке в коде и выложил в общий доступ исправление **Geant4** в части снятия возбуждения электронных оболочек элементов. Суть его исправления сводится к следующему.

Когда в результате электронного захвата либо ионизации на К- либо L-оболочке образуется вакансия, она быстро заполняется электроном с вышележащих оболочек, где, в свою очередь, тоже образуется вакансия. Эта вакансия также быстро заполняется, и процесс приобретает характер каскада. В случае, когда разница энергий уносится только рентгеновским квантом, процесс грубо можно описать как перемещение одной вакансии на верхние оболочки. Текущая версия кода **Geant4** правильно отслеживает это перемещение, учитывая все известные вероятности переходов.

Когда же разница энергий уносится не рентгеновским квантом, а Оже-электроном, на вышележащей оболочке образуются две вакансии. Анализируя код, Suerfu заметил, что и в этом случае **Geant4** отслеживает перемещение только одной вакансии, как бы забывая о второй. При этом неизбежно возникающий дисбаланс по энергии вынужденно корректируется апостериори. Для этого непосредственно в коде формируется т.наз. «локальное энерговыделение», не связанное с вторичными частицами, величина которого приравнивается возникшему дисбалансу. Это чисто программная ошибка, которую долго никто не замечал.

Suerfu предложил исправление кода, в котором отслеживаются все вакансии, и выложил его на форум для общего пользования. Мы немедленно воспользовались предложенным исправлением.

Модельный отклик после исправления кода

На Рис. 3 представлены модельные отклики (красная линия) счетчика на источники ^{37}Ar и ^{71}Ge , полученные версией **Geant4** после исправления кода от Suerfu. Как и на Рис. 2, отклики сбиты в бины по 50 эВ и представлены на фоне реальных спектров (черная линия). Для сравнения модельные отклики вручную искажены теми же систематическими факторами: $R=25\%$ на 2.8 кэВ, $D=6\%$, $C=0.01\%$ — для ^{37}Ar , и $R=13.5\%$ на 10.4 кэВ, $D=5\%$, $C=0.5\%$ — для ^{71}Ge . Шкала энергий и интенсивность тоже подбирались вручную, хотя в этом случае подогнать модельный отклик под реальный оказалось легко; искаженный отклик показан синей линией.

Из приведенного рисунка видно, что после исправления **Geant4** воспроизводит весь реальный спектр, включая все видимые особенности. Так, подложка между К- и L-пиками, имеющая в реальном спектре ^{71}Ge характерный наклон в логарифмической шкале, наблюдается и в модельном спектре. Ее природа уже выяснена при моделировании отклика на электроны (см. отчет [3]). Такое поведение обусловлено пристеночными событиями, когда первичный электрон частично или полностью уходит в стенку, выводя часть своей энергии из процесса ионизации в рабочем газе. В частности, в данном случае подложку формирует первичный Оже-электрон типа KLL с энергией 8 кэВ, частично уходящий в стенку. Когда этот электрон полностью уходит в стенку, для регистрации остается только энергия, высвобождаемая при заполнении именно 2-х вакансий на L-оболочке дочернего галлия; в сумме это примерно 2.3 кэВ. Этот пик отлично воспроизведен в модельном спектре, с ярко выраженным провалом между ним и L-пиком.

На сглаженном модельном спектре ^{71}Ge наблюдается также пик в области 6 кэВ,

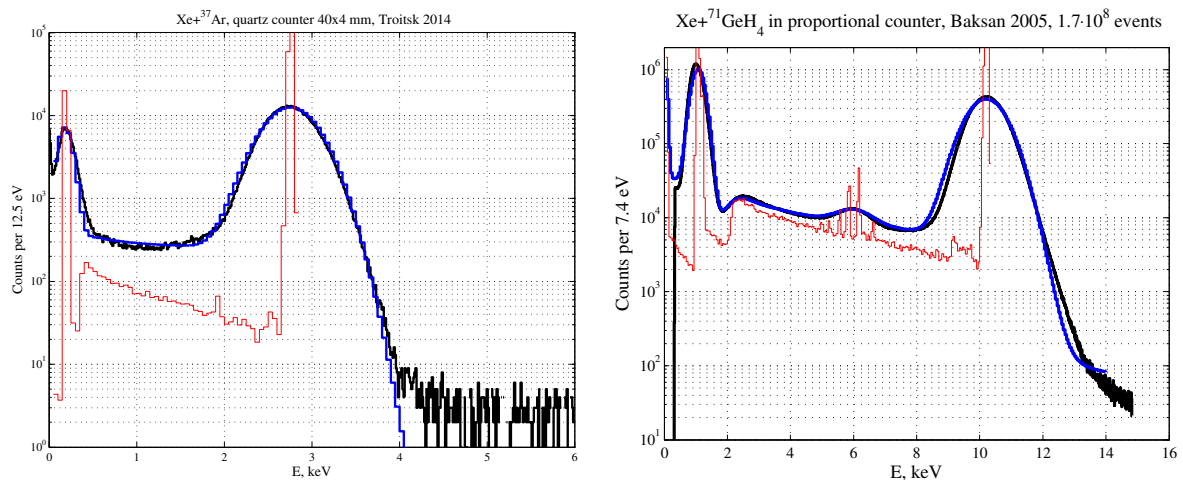


Рис. 3: Модельный отклик пропорционального счетчика на фоне реальных спектров ^{37}Ar (слева) и ^{71}Ge (справа); отклик получен «правильной» версией **Geant4**, после исправления кода. Черная линия – реальный спектр, красная – исходный модельный отклик, синяя – отклик после сглаживания.

сформированный несколькими линиями вторичного характеристического рентгеновского излучения. Это излучение испускается при заполнении вакансий на L-оболочке ксенона, возникающих при взаимодействии первичного излучения с рабочим газом счетчика. Пик формируется в событиях, когда вторичное излучение покидает объем счетчика, унося с собой энергию, примерно равную энергии связи L-оболочки ксенона – в среднем около 4 кэВ. Такой же пик наблюдается и в реальном спектре; исторически такие пики имеют название «пик вылета». Энергии излучения ^{37}Ar не хватает для возбуждения L-оболочки ксенона, но хватает для возбуждения кремния кварцевой стенки; на этом спектре виден соответствующий пик вылета на энергии примерно 2 кэВ.

Обсуждение

Даже с учетом ручной подгонки можно утверждать, что модельный отклик практически идеально воспроизводит реальный спектр, как для ^{37}Ar , так и для ^{71}Ge . Воспроизведены не только основные K- и L-пики, с правильным соотношением интенсивностей. Для ^{71}Ge воспроизведены также специфические особенности спектра, включая наклонную подложку и паразитные пики.

Следует отметить, что предложенный Suerfu патч не был сразу принят разработчиками **Geant4** как очевидное исправление ошибки кода. Наши реальные спектры для ^{37}Ar и ^{71}Ge в пропорциональном счетчике дают убедительное подтверждение достоверности исправления. Мы обратились в рабочую группу **Geant4** с рекомендацией включить патч от Suerfu в ближайший релиз; в настоящий момент идет обсуждение технических деталей такого включения.

Следует также отметить, что до недавнего времени в широких научных кругах устойчиво бытовало мнение, что **Geant4** плохо воспроизводит энергосодержание в области низких (порядка кэВ) энергий. Особенно это относится к экспериментам прямого

поиска частиц темной материи по ядрам отдачи. Решение проблемы неправильного отслеживания заполнения электронных вакансий в **Geant4** может изменить ситуацию.

Заключение

Полученные результаты дают основания ожидать достоверного моделирования отклика пропорционального счетчика. С точки зрения измерения спектра электронов от трития один из самых главных выводов проделанной работы: основные факторы систематического воздействия на отклик пропорционального счетчика поддаются практически полному контролю.

12 мая 2015 г.

Отчет составил:

Д.Н.Абдурашитов

Список литературы

- [1] C.M. Lederer and V.S. Shirley, «Table of isotopes», Wiley, 7th edition (1978), ISBN-13: 978-0471041801
- [2] Д.Н. Абдурашитов, В.Н. Гаврин, В.В. Горбачев и др., «Метод измерения больших скоростей счета детекторов ионизирующего излучения с высокой точностью», Приборы и техника эксперимента №.2 (2006), 1–6
- [3] Д.Н. Абдурашитов, Ю.М. Малышкин, «Отклик пропорционального счетчика на электроны с энергиями до 10 кэВ: моделирование средствами **GEANT4**», отчет от 05.04.2015 (<http://www.numix.inr.ru/reports/2015/r150405.pdf>)
- [4] Д.Н. Абдурашитов, А.И. Берлев, Н.А. Лиховид и др., «Поиск примеси стерильных нейтрино при регистрации распадов трития в пропорциональном счетчике: новые возможности», Ядерная физика т.78 №.3–4 (2015), 294–306
- [5] B. Suerfu, сообщение на форуме пользователей Geant4 от 23.03.2015 (http://bugzilla-geant4.kek.jp/show_bug.cgi?id=1727)