ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

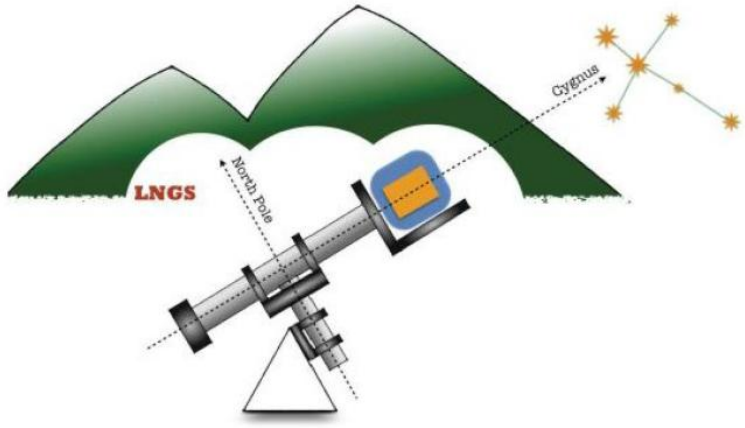
Применение быстрого метода реализации случайных процессов для расчёта фона в эксперименте LVD

Е. А. Добрынина, В. И. Гуренцов, Н. Ю. Агафонова

Представлены результаты расчёта спектров низкоэнергетического фона в Детекторе Большого Объема (LVD) (LNGS, Италия), предназначенного для поиска нейтрино от взрывов Сверхновых и регистрации мюонов космических лучей. В моделировании использовался метод реализации случайных процессов. Преимуществом нового расчета является возможность уточнения реальной концентрации содержащихся в материалах установки и в грунте радиоактивных элементов при сопоставлении результирующих расчетных и экспериментальных спектров. Приводится сравнение результатов нового моделирования с результатами моделирования при использовании программного комплекса Geant4, а также с экспериментальными данными LVD.

Актуальность

В современных подземных экспериментах проводится **изучение радиоактивного фона**, который является трудно устранимым **при поиске редких событий**. Корректное моделирование фона – необходимый этап при **разработке новых экспериментов**.



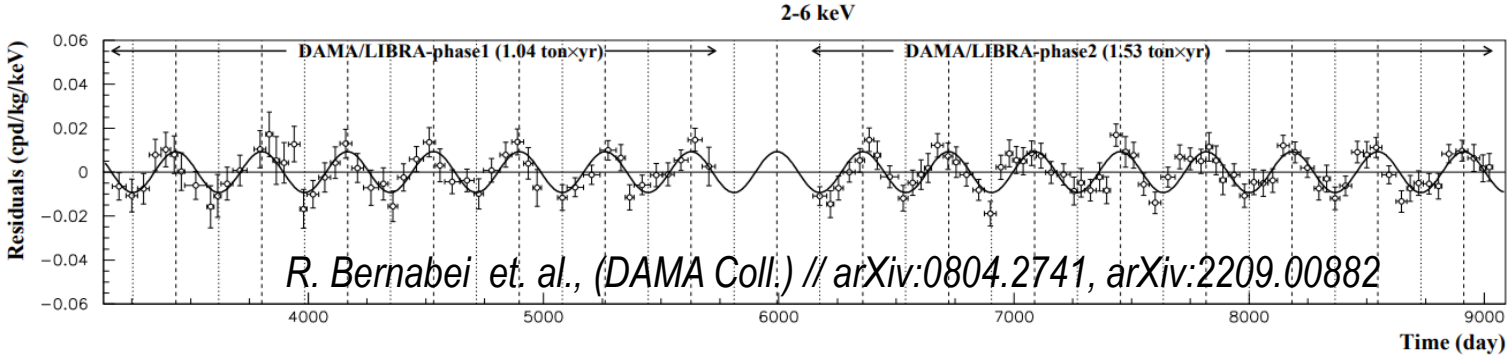
Эксперимент NEWSdm (Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement) направлен на поиск возможных частиц тёмной материи. Эксперимент должен был осуществлять прямой поиск этих частиц по их упругому взаимодействию с ядрами, измеряя направление отдачи этих ядер. В качестве детектора и мишени выступают высокоточные чувствительные эмульсионные пластины. **Детектор должен иметь постоянную пространственную ориентацию** в направлении созвездия Лебедя, что должно **обеспечить постоянный поток WIMP**.

Основной проблемой **фона эксперимента NEWSdm** является учёт нейтронов, вызывающих отдачу ядер эмульсии похожую на WIMP:

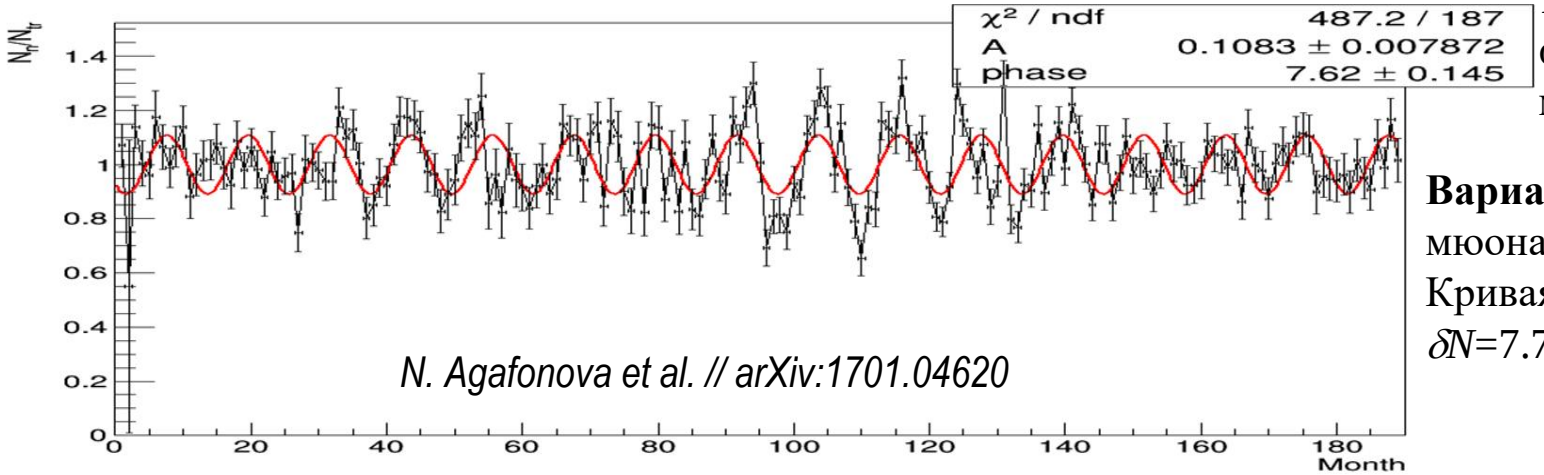
- нейтроны от внутренней радиоактивности эмульсии
- нейтроны от радиоактивности окружающей среды
- нейтроны, образованные в результате расщепления мюонов космических лучей в окружающей горной породе

Сложноустранимым фоном также являются гамма-кванты от радиоактивности окружающей среды.

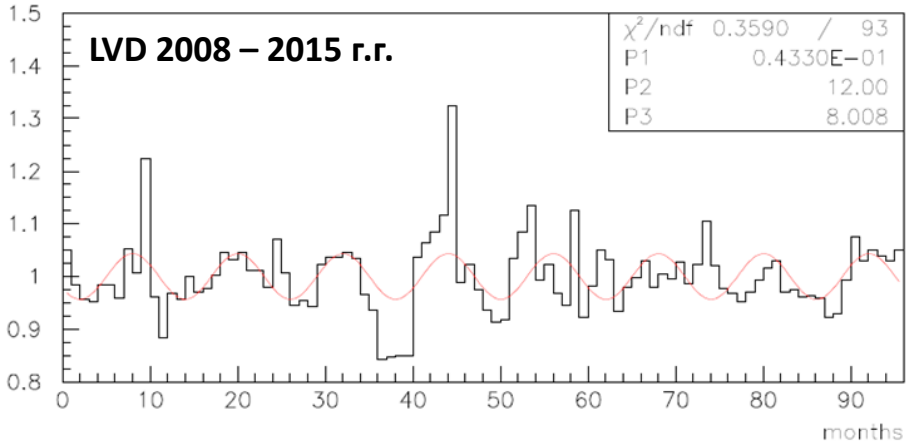
Модуль детектора NEWSdm в экспериментальном зале Гран Сассо (2019)

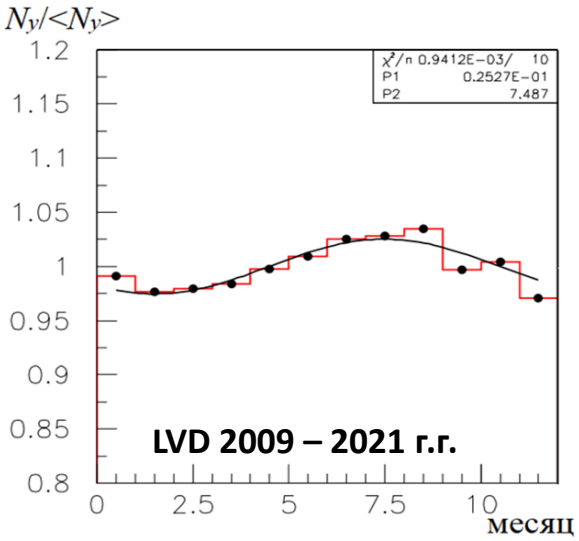


Экспериментальная скорость одиночных сцинтилляционных событий, измеренная с помощью **DAMA/LIBRA**-phase1 и DAMA/LIBRA-phase2 в интервалах энергий (2–6) кэВ, как функция времени. Наложенная кривая представляет собой косинусоидальные функциональные формы $T = A\cos\omega(t - t_0)$ с периодом $T = 2\pi/\omega = 1$ год, фазой $t_0 = 152{,}5$ дня (2 июня) и амплитудой модуляции A.



Вариации удельного числа нейтронов, генерированные мюонами, за 16 лет (2001-2016) наблюдений.
Кривая - $F(t) = 1 + \delta N \cdot \cos(2\pi(t - \varphi)/12.)$, где амплитуда δN=7.7%, фаза 7.2 мес (июль).





Средний темп счета установки LVD по нижнему порогу за месяц, нормированный на среднее по каждому году.

Сезонные вариации скорости счета гамма-квантов от радона, в относительных величинах, полученные методом наложения эпох.
Аппроксимация: $N_y(t) = 1 + \delta N_y/\langle N_y\rangle \times \cos(2\pi(t-\varphi_y)/T)$, $\delta N_y/\langle N_y\rangle = (3.0 \pm 1.1)\%$, $\varphi_y = (7.5\pm0.5)$ месяцев.

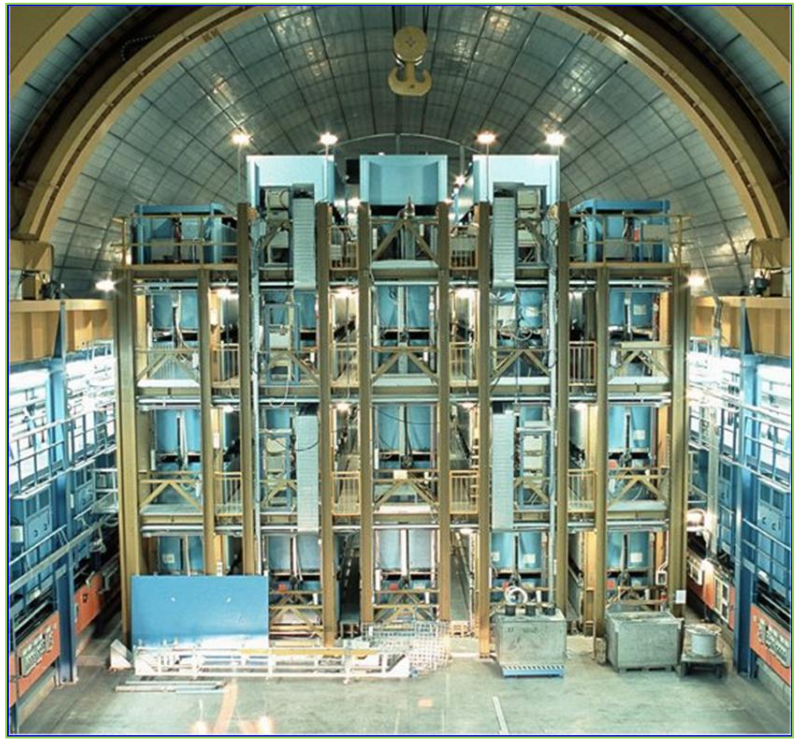
Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, И. Р. Шакирьянова, Н. А. Филимонова "Периодические вариации концентрации радона в подземной Лаборатории Гран Сассо, измеренные с помощью LVD", ЖЭТФ, 2023, том 164, вып. 3 (9), стр. 386–395

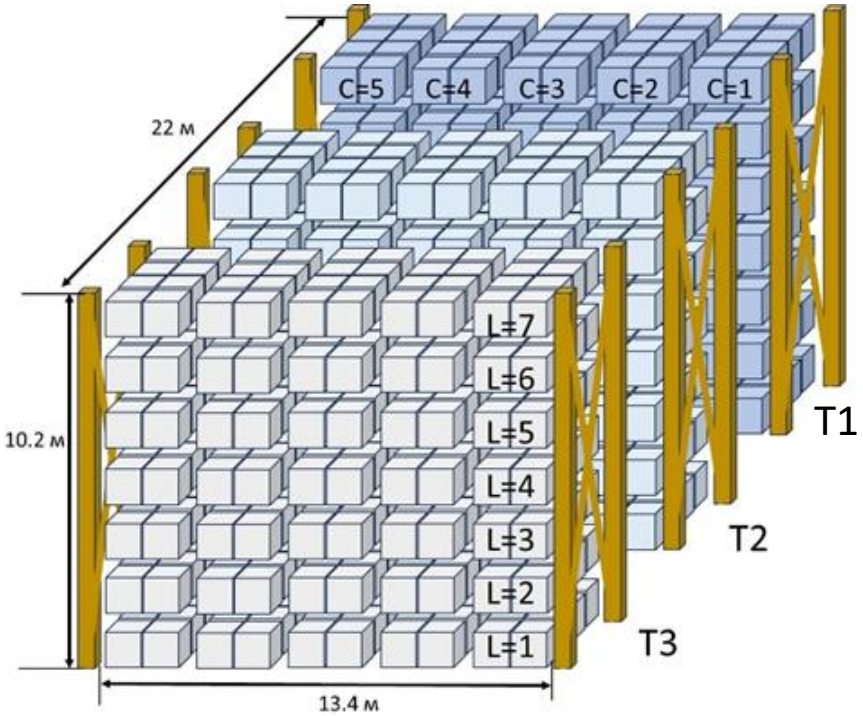
Описание детектора LVD

Установка LVD (**Large Volume Detector**) работает с 1992 года. Она находится в подземном зале Национальной лаборатории Гран Сассо INFN в горном массиве Гран Сассо в Центральной Италии под толщей скальной породы около одного километра и примерно на такой же высоте над уровнем моря.

Основная задача – поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёздных ядер в нашей Галактике.

Детектор имеет модульную структуру: счётчики помещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (портатанки). Из них набираются вертикальные колонны (7 модулей). Пять таких колонн объединяются в башню.





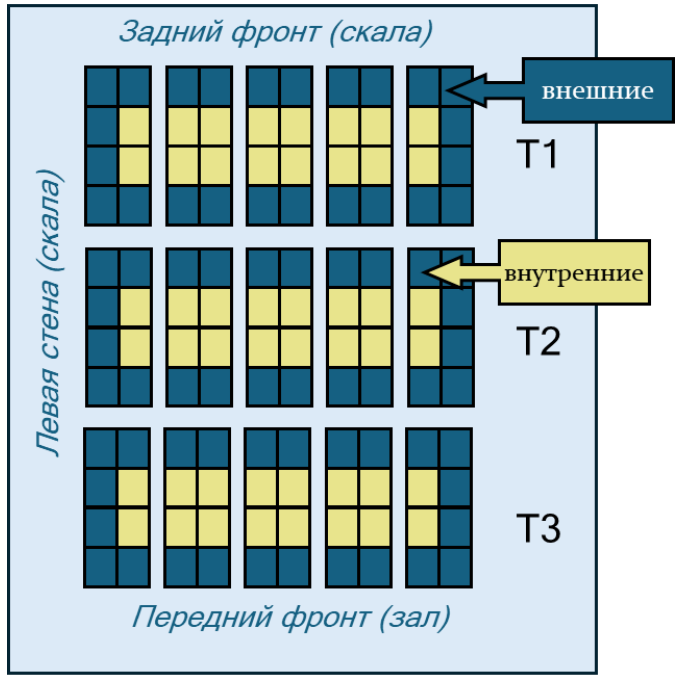
Масса железа	1020 тонн
Масса сцинтиллятора	1008 тонн
Число сцинт. счетчиков	840
Число PMTs (ФЭУ)	2520
Средняя глубина (минимальная)	3620 м в. э. 3000 м в. э.

Общий вид установки LVD и схема расположения портатанков.

Счётчики детектора LVD

840 счётчиков объёмом по 1.5 м^3 сделаны из нержавеющей стали толщиной 4 мм и заполнены сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n}, где n ≈ 9.6). Несущая конструкция из нержавеющей стали H = 20 мм.

На верхней грани установлены **три фотоумножителя** с диаметром фотокатода 15 см (ФЭУ-49Б или ФЭУ-125), включенные на совпадение.



LVD - вид сверху

Детектор состоит из **трех башен (T1, T2, T3)**.
Башня T1 расположена в тупике зала, с пяти сторон окружена грунтом.
Башня T2 с четырех сторон окружена грунтом и с двух торцов башен T1 и T3.
Башня T3 передним фронтом обращена в открытую часть зала, до ближайших стен которого больше 20 м.

Сцинтилляционные счетчики установки LVD в соответствии со своим местоположением **делятся на внутренние и внешние**. Внутренние защищены от окружающей горной породы хотя бы одним слоем внешних счетчиков.

Содержание ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в породе и материалах детектора

Концентрации ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в образцах породы зала А были измерены в 1985 году.

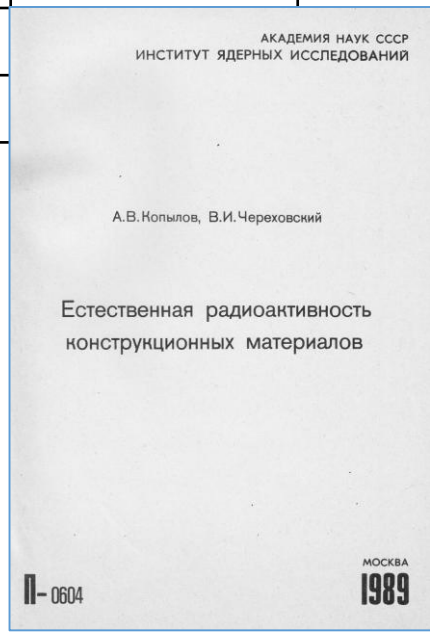
E. Belotti, M.Burashi, E. Fiorini and C. Liguori. New Measurement of rock contaminations and neutron activity in the Gran Sasso tunnel. Preprint INFN/TC-85/19 14 Ottobre 1985

Место взятия пробы	**^{232}Th**	**^{238}U**	**^{40}K**	**^{214}Bi**
Зал А N1, Бк/кг (инфильтрат)	8.8 ±0,3	84.7 ±8,4	224 ±6	41.9 ±0.6
Зал А N2, Бк/кг (инфильтрат)	7.7 ±0,4	66.8 ±7.1	256 ±13	41.7 ±0.9
Зал А N3, Бк/кг (инфильтрат)	9.5 ±0.4	122 ±13	264 ±13	56,6 ±1.4
Зал А N4, предел на 95% у. д. (обычный, основной грунт)	**<0.5**	**<8**	**<5**	1.0±1.2
Зал В, Бк/кг	0.25 ±0.08	5.2 ±1.3	5.1 ±1.3	4.2 ±0.3
Зал С, Бк/кг	0.27 ±0.10	8.2 ±1.7	2.9 ±1.4	5.1 ±0.2

Содержание ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в основных конструкционных материалах счетчика установки LVD.

А.В. Копылов, В.И. Череховский "Естественная радиоактивность конструкционных материалов", П-0604, АН СССР ИЯИ, 1989, 11с.

	^{238}U, г/г	**^{232}Th, г/г**	**^{40}K, г/г**
стекло ФЭУ-49Б	$(6.4\pm1.8)\times10^{-7}$	$(11\pm3)\times10^{-7}$	$(4.9\pm1.0)\times10^{-4}$
нерж. сталь	$<9.7\times10^{-9}$	$(2.9\pm2.3)\times10^{-9}$	
сцинтиллятор	$\leq10^{-10}$		


АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В.Копылов, В.И.Череховский

Естественная радиоактивность конструкционных материалов

П-0604

МОСКВА 1989

Российские счетчики-модули LVD: T1+T2
строительство с 1989 года
набор данных с 1992 года по настоящее время

Итальянские счетчики-модули LVD (железо и сцинтиллятор): **T3**
строительство с 1998 года
набор данных с 2000 по настоящее время

В ходе реконструкции **LNGS в 2005-2006 годах пол зала А был покрыт новым бетоном толщиной 30 см и слоем водостойкой смолы.** Измерения показали, что активность нового бетона на порядок выше, чем у обычной породы LNGS. Поэтому в 2007 г. вновь были проведены новые измерения потока γ-квантов на площадке эксперимента GERDA.

Расчет фоновых событий детектора LVD в области 0 – 5 МэВ методом реализации случайных процессов

В. И. Гуренцов Планирование эксперимента и обучение компьютерных программ. Препринт ИЯИ РАН 1169/2006

Бета-распад ядра представляет собой **случайную последовательность событий**. В расчётах использовались подробные схемы распада изотопов ^{208}Tl, ^{214}Bi и ^{40}K с учётом всех уровней возбуждения ядер. В моделировании также учитывалось энергетическое разрешение детектора и пороги регистрации.

Бета распад ядра ^{208}Tl

В моделировании учитывалось:

- энергетическое разрешение детектора
- пороги регистрации (разные для T1 и T3)
- различия в конструкции T1 и T3
- варьировалась концентрация радиоактивных изотопов в материалах конструкции детектора и в грунте

Расчет спектров регистрируемых в LVD гамма-квантов от естественной радиоактивности:

1. Гамма-кванты от радиоактивных примесей в элементах конструкции детектора: радиоактивность сцинтиллятора, железа и ФЭУ (внутренние счётчики).

2. Гамма-кванты от радиоактивности грунта, окружающего детектор: потолок, пол, стены боковые и фронтальные (внешние счётчики).

3. Гамма-кванты от радона в воздухе: между портатанками, между башнями и стенами (внешние и внутренние счётчики).

Предположения в расчёте:

- β-электрон и γ-квант рождаются в одной точке (сцинтиллятор, Fe-конструкция, ФЭУ).
- Равновероятны все направления движения.

Гамма-квант:

- Сечения рассеяния/поглощения: таблицы [*Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. Справочник. Перев. с англ. М.: Атомиздат, 1973, 256 с*].
- Энергия: распределение определяется формулой Клейна-Нишины-Тамма, используется генератором для реализации энергии комптоновского электрона.

Энергия в сцинтилляторе:

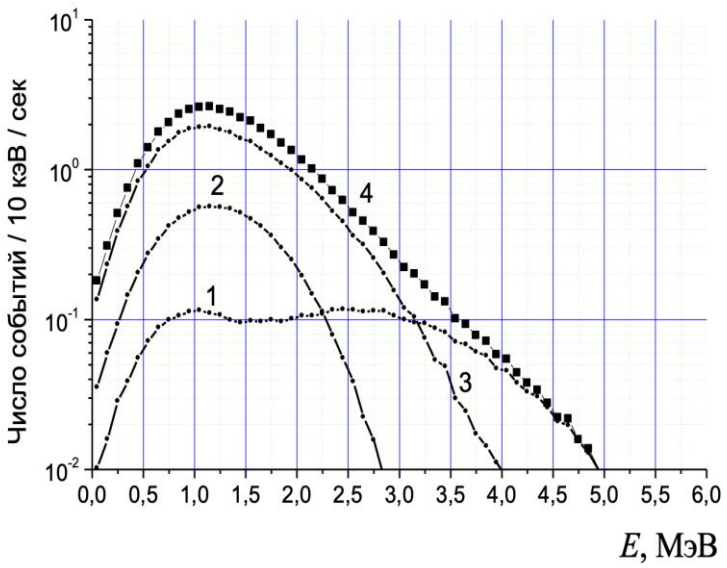
- реализуется генератором нормального распределения с дисперсией, полученной при измерении энергетического разрешения детектора. .

Распады: подробные схемы ^{208}Tl, ^{214}Bi, ^{40}K [*Richard B. et all. Table of Isotopes. Version 1.0. March, 1996*].

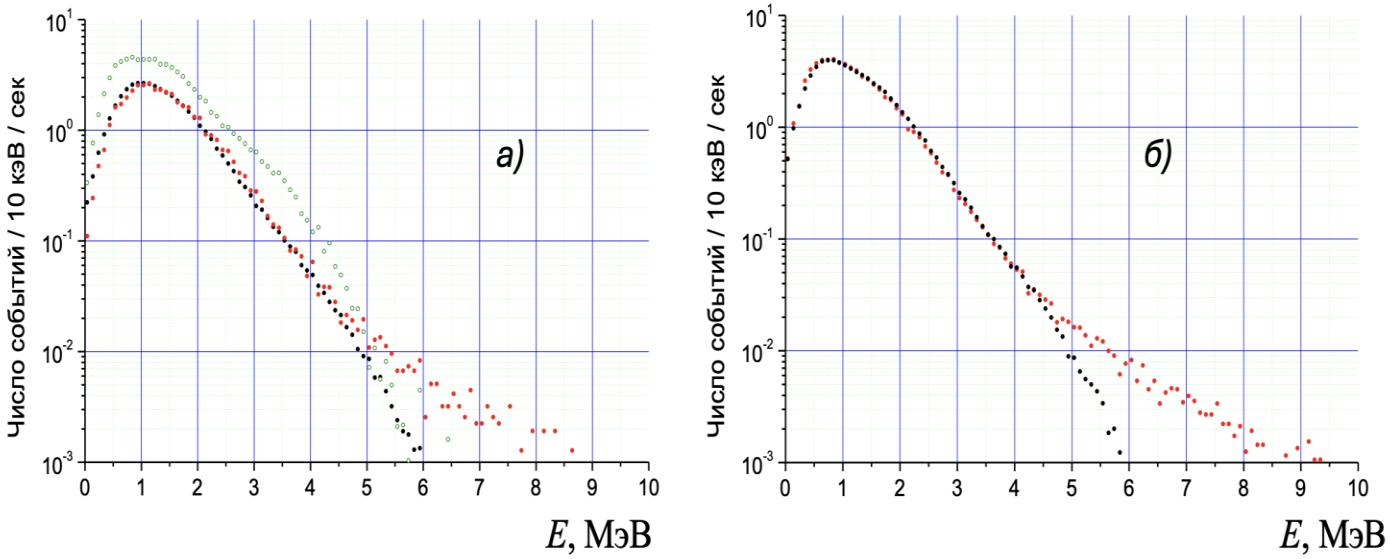
Скорость счета гамма-квантов от радиоактивных примесей в материалах детектора

В моделировании рассчитывалась энергия, оставленная (выделенная) гамма-квантами в сцинтилляторе **внутренних** счетчиков от распадов изотопов ядер ^{208}Tl, ^{214}Bi и ^{40}K содержащихся в виде примесей в железе, ФЭУ и сцинтилляторе. Суммарные спектры зависят от **соотношения** концентрации радиоактивных изотопов.

Расчетный спектр сравнивался с экспериментальным и методом минимизации среднеквадратичного отклонения формы энергетических спектров при варьировании концентрации примесей и порога регистрации **определялось их наилучшее согласие**. Сравнение расчётных и экспериментальных спектров позволило **скорректировать концентрации содержащихся в материалах установки и в грунте радиоактивных элементов**.



Расчётные спектры после коррекции концентраций радиоактивных изотопов для внутренних счётчиков первой башни LVD :
1) Tl-208, 2) K-40, 3) Bi-214, 4) суммарный спектр.



Спектры **от радиоактивных примесей в материалах конструкции** первой (а) и третьей башни (б) LVD: зелёные точки – спектр по исходным данным концентраций, чёрные – по данным после коррекции концентраций, красные – эксперимент.

	Цепи Маркова	Geant4
Т 1 (внутр.)	44 (92%)	48 (76%)
Т 3 (внутр.)	62 (92%)	45 (77%)
Т 1 (внеш.)	44 (14.3%)	37 (14%)
Т 3 (внеш.)	62 (18.7%)	34.1(15%)

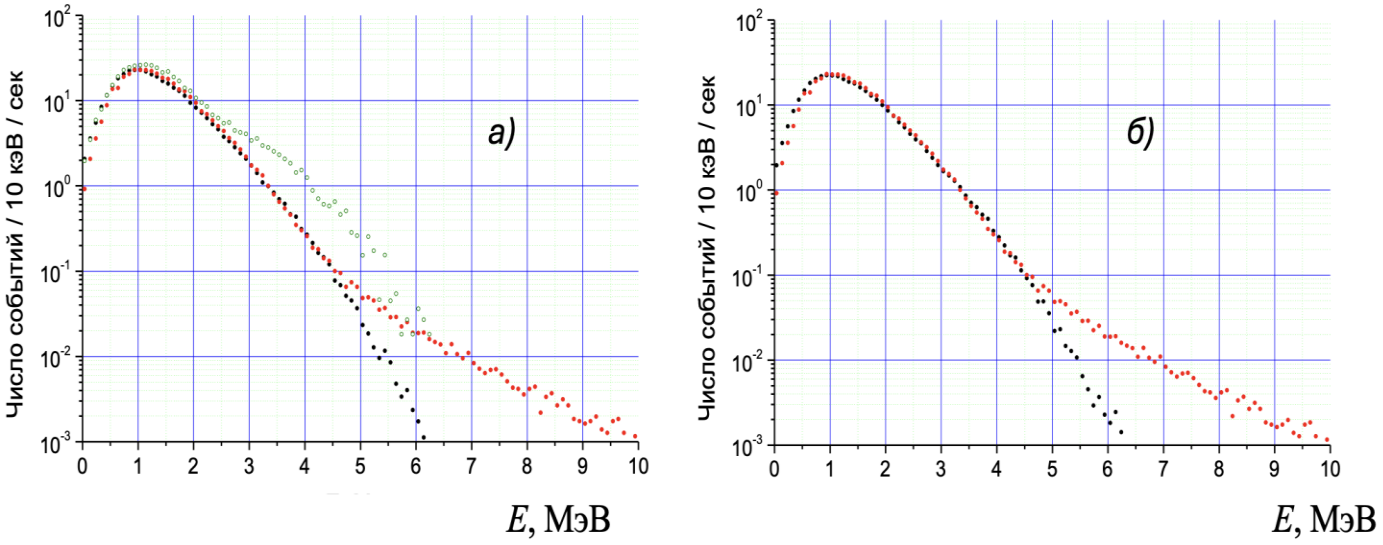
Скорость счёта LVD, **обусловленная содержанием радиоактивных элементов в конструкции детектора**, событий/сек /счётчик, (процент от полного числа событий).

Скорость счета гамма-квантов от радиоактивности скального грунта

Внешние счётчики LVD изготовлены из таких же конструкционных материалов, что и внутренние, поэтому фон, обусловленный радиоактивными примесями, будет одинаков.

Скорость счёта внешних счётчиков установки выше в несколько раз из-за регистрации потока гамма-квантов от естественной радиоактивности окружающего грунта.

Методом минимизации среднеквадратичного отклонения расчетной формы энергетических спектров гамма-квантов от экспериментального спектра LVD **проведено уточнение величины потока гамма-квантов от скального грунта**. Скорректированная величина потока гамма-квантов от ^{214}Bi оказалась разной для первой и третьей башен. Это результат неоднородности состава окружающего скального грунта и бетона.



Спектры **от радиоактивности скального грунта** на первой (а) и третьей (б) башне LVD: зелёные точки – спектр по исходным данным для потока гамма-квантов от скального грунта, чёрные – спектр по уточнённой величине потока гамма-квантов, красные – эксперимент.

		Первый уровень	Седьмой уровень	Правая боковая стенка	Левая боковая стенка	Задняя торцевая стенка	Передняя торцевая стенка
T1 (внеш.)	эксперимент	379	288	304	302	315	164
	расчёт	389	296	317	311	318	165
T3 (внеш.)	эксперимент	394	428	423	292	215	265
	расчёт	372	412	399	294	208	257

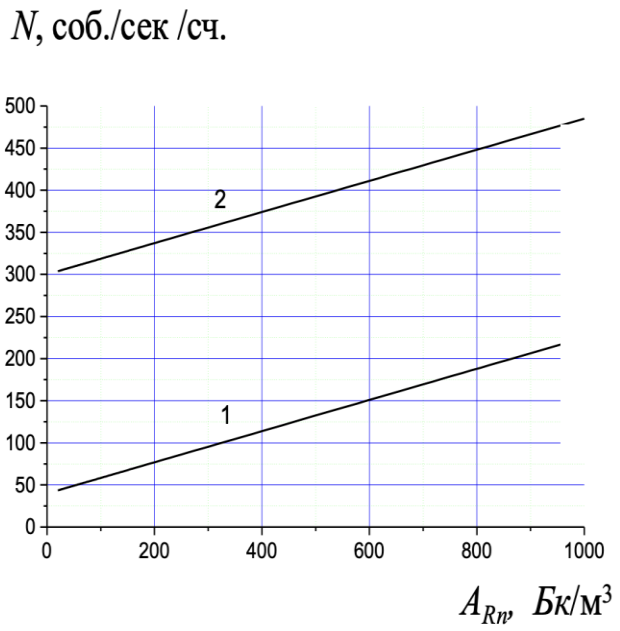
Интегральная скорость счета гамма-квантов внешних счётчиков LVD (событий/сек/счётчик), с учетом средней интегральной внутренней радиоактивности материалов детектора.

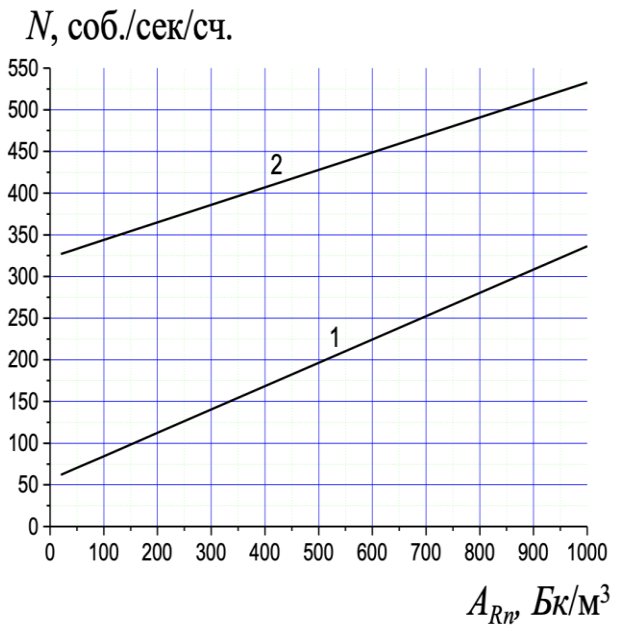
Скорость счёта гамма-квантов от радона в воздухе

Расчёт скорости счета в LVD, обусловленных содержанием газа **радона в атмосфере подземного зала** эксперимента проводился отдельно для внешних и внутренних счётчиков. Концентрации радона в зале LVD бралась равной 20 Бк/м^3.

	Цепи Маркова	Geant4	Эксперимент
Т 1 (внутр.)	3.6 (7.5%)	5.7 (9%)	(2.6±0.2) (6.2±0.5)%
Т 3 (внутр.)	5.6 (8.2%)	5.9 (10%)	(4.0±0.5) (5.7±0.7)%
Т 1 (внеш.)	3.8 (1.2%)	9.0 (3.5%)	(4.7±0.4) (1.9±0.2)%
Т 3 (внеш.)	4.2 (1.3%)	10.2 (4.5%)	(6.7±0.4) (2.2±0.2)%

Скорость счёта (событий/сек /счетчик) и процентное отношение к полной скорости счёта в счётчике LVD **от радона** при концентрации равной 20 Бк/м^3.





Зависимость полной скорости счёта 1 – внутренних и 2 – внешних счётчиков LVD с учётом активности радона. Слева – первая башня, справа – третья башня.

Вклад в полное число событий в LVD от радона в воздухе можно определить, закладывая в расчет различную концентрации в нем радона.

Заключение

Основным результатом моделирования случайных процессов низкоэнергетичных событий в LVD является определение величин скорости счёта детектора, обусловленных радиоактивными примесями в материалах конструкции, содержанием радиоактивных элементов в окружающем грунте, а также радиоактивным газом радоном присутствующем в атмосфере подземного зала.

Сравнение расчётных и экспериментальных спектров позволило скорректировать концентрации содержащихся в материалах установки и в грунте радиоактивных элементов.

Очень важным результатом является определение величины постоянного вклада от радона в общую скорость счёта.

Преимущества расчёта с использованием **метода реализации случайных процессов**:

- происходит быстрее по времени по сравнению с моделированием с помощью комплекса Geant4
- даёт возможность визуально контролировать промежуточные результаты
- при сопоставлении расчётных и экспериментальных спектров позволяет уточнять реальные концентрации содержащихся в материалах установки и в грунте радиоактивных элементов

Спасибо за внимание!