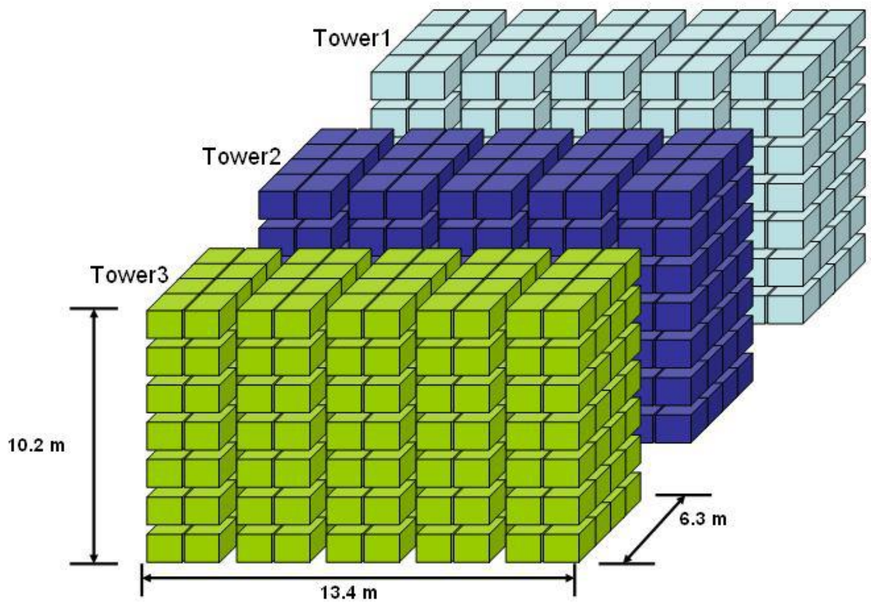
Первые результаты нового анализа экспериментальных данных по поиску взаимодействий нейтрино в детекторе LVD

В.В. Ашихмин (ИЯИ РАН) от имени коллаборации LVD

Основной задачей детектора LVD, расположенного в Лаборатории Гран-Сассо в Италии, является поиск нейтрино от гравитационных коллапсов ядер сверхновых в нашей галактике. Обычно, поиск осуществляется через анализ во временном окне 10 – 100 секунд кластеров одиночных событий от взаимодействия нейтрино или антинейтрино. Длительность нейтринной вспышки определяется в зависимости от модельных теоретических предсказаний и подбирается соответствующее скользящее временное окно для поиска событий. Проводится поиск кластеров-сгущений одиночных событий, где интервалы между событиями значительно меньше среднего значения по всему объему экспериментальных данных. Однако такой подход не охватывает все возможные кластеры, что может привести к потере сигналов. Например, при длительности временного окна 20 секунд и среднем времени между событиями 1 секунда, можно пропустить кластер множественностью 7 событий и длительностью 2 секунды. В новом подходе мы анализируем все кластеры событий множественностью от 2 до 100 событий, не привязываясь к какому-либо временному окну. В работе представлена методика такого анализа данных LVD по поиску нейтринных взаимодействий и первые результаты ее применения.

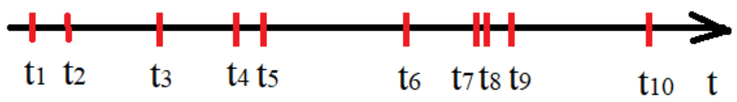


Отбор экспериментальных данных

Событием будем называть отклик детектора LVD на предполагаемое взаимодействие нейтрино (антинейтрино). Таким откликом является единичное срабатывание счётчика по высокому порогу выше 5 МэВ. В основном регистрируются фоновые события, которые имитируют взаимодействие нейтрино.

Благодаря модульной структуре детектора LVD, техническое обслуживание его счётчиков проводится без полного отключения детектора. Также в случае неисправности счётчика, его можно отключить до проведения ремонтных работ. Из-за различного количества работающих счётчиков скорость счёта фоновых событий также различна.

Кластер событий – совокупность событий, зарегистрированных подряд



Множественность кластера – количество событий в кластере

Длительность кластера – время между первым и последним зарегистрированными событиями в кластере

A priori **неизвестно** ожидаемое количество нейтрино, которое может быть зарегистрировано от следующего коллапса Сверхновой. Количество зарегистрированных нейтрино главным образом зависит от расстояния до Сверхновой. Поэтому, чтобы не потерять возможные экспериментальные результаты анализируются все кластеры множественностью от 2 до 100 событий

Процесс Пуассона — случайный процесс, описывающий моменты наступления случайных событий. Название происходит от того, что число событий в фиксированном временном окне подчиняется распределению Пуассона

Некоторые свойства процесса Пуассона:

Стационарность — распределение количества событий в интервале зависит только от длины интервала, а не от его положения во времени

Независимость приращений — количество событий в различных непересекающихся интервалах — независимые случайные величины

Отсутствие памяти процесса — вероятность наступления следующего события не зависит от времени, прошедшего с момента последнего события

Распределение времени между событиями — интервалы ожидания распределены экспоненциально, что означает, что вероятность того, что два события произойдут очень близко друг к другу, мала

Суперпозиция потоков — при объединении n независимых потоков Пуассона с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ получается поток Пуассона с интенсивностью: $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n$. Данное свойство позволяет представить набор экспериментальных данных как сумму потоков полезных и фоновых событий. Также при регистрации клсатера-кандидата можно сделать оценку фоновых событий в нём, умножив скорость счёта фоновых событий на длительность кластера.

Каналы взаимодействия нейтрино и антинейтрино в детекторе LVD

1	$\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$	(1.8 MeV)	(88%)
2	$\nu_e + {}^{12}C \to {}^{12}N + e^-$	(17.3 MeV)	(1.5%)
3	$\bar{\nu}_e + {}^{12}C \to {}^{12}B + e^+$	(14.4 MeV)	(1.0%)
4	$\nu_i + {}^{12}C \to \nu_i + {}^{12}C^* + \gamma$	(15.1 MeV)	(2.0%)
5	$\nu_i + e^- \to \nu_i + e^-$	(-)	(3.0%)
6	$\nu_e + {}^{56}Fe \to {}^{56}Co^* + e^-$	(10. MeV)	(3.0%)
7	$\bar{\nu}_e + {}^{56}Fe \to {}^{56}Mn + e^+$	(12.5 MeV)	(0.5%)
8	$\nu_i + {}^{56}Fe \to \nu_i + {}^{56}Fe^* + \gamma$	(15. MeV)	(2.0%)

$$p(k) \equiv \mathbb{P}(Y = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \qquad \mathbb{M}[X] = \frac{1}{\lambda}, \qquad \mathrm{D}[X] = \frac{1}{\lambda^2}.$$

где

- k — количество событий,
- λ — математическое ожидание случайной величины (среднее количество событий за фиксированный промежуток времени)

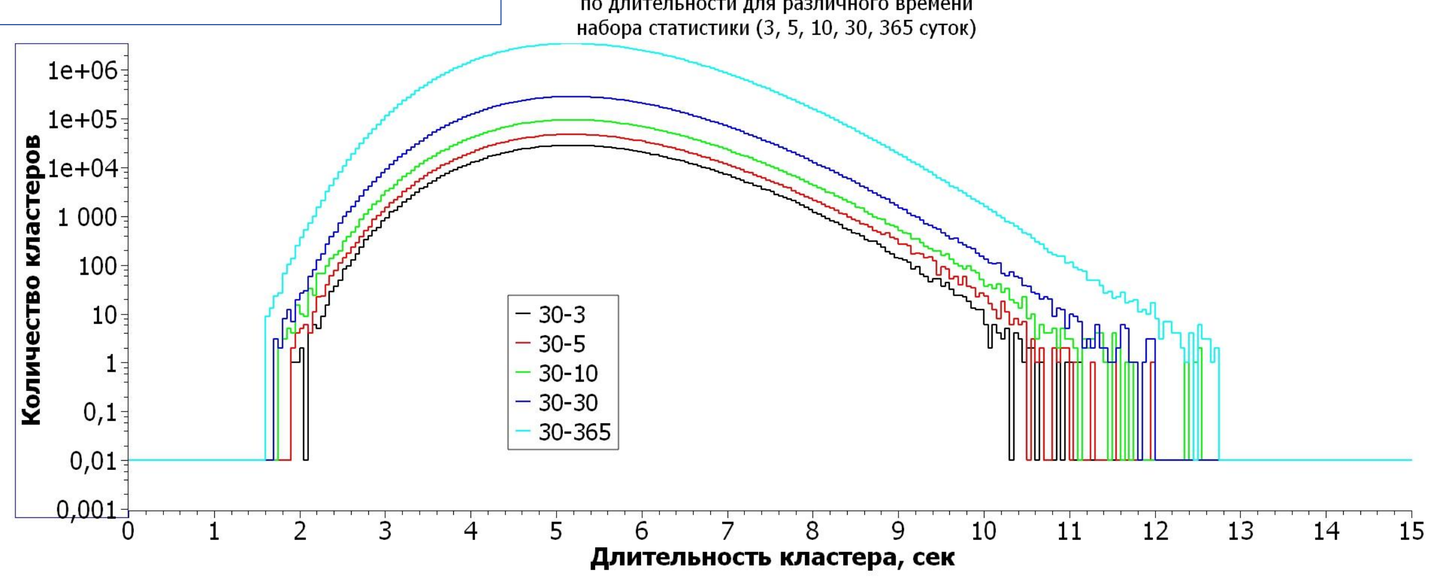
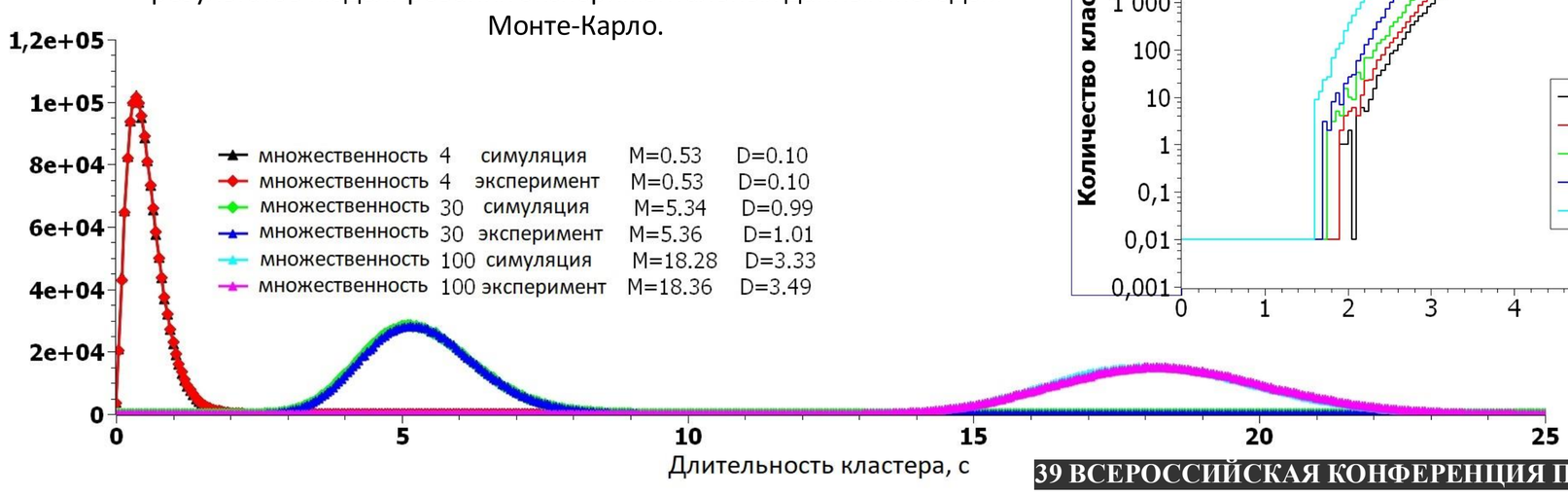
$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \qquad \mathbb{M}[X] = \frac{1}{\lambda}, \qquad \mathrm{D}[X] = \frac{1}{\lambda^2}.$$

На основе изложенной методики были проанализированы экспериментальные данные, накопленные в детекторе LVD за 2025 год. Кластеры-кандидаты со среднем временем образования фоном более года не обнаружены. В дальнейшем будет проведён анализ всех данных детектора LVD.

Для моделирования Пуассоновского процесса необходимо и достаточно получить набор случайных чисел, распределённых по экспоненциальному закону с заданной интенсивностью. Интенсивность определяется из экспериментальных данных и является средним временем между событиями. Точность определения интенсивности возрастает при увеличении общего количества событий в экспериментальных данных.

В анализе экспериментальных данных предполагается, что события являются точечными, т. е. для моделирования времени регистрации события достаточно прибавить случайное число, разыгранное по экспоненциальному закону ко времени регистрации предыдущего события. Таким образом, можно получить последовательность значений времени регистрации событий достаточно большой длительности для определения параметров отбора кластеров событий

Распределения кластеров множественностью 30 по длительности для различного времени набора статистики (3, 5, 10, 30, 365 суток)



Пример распределения по длительности кластеров для кластеров множественностью 4, 30 и 100 событий, соответственно. Распределения получены из экспериментальных данных и из результатов моделирования экспериментальных данных методом Монте-Карло.