Топология пространственного распределения множественных событий в LVD

Н. Ю. Агафонова, А.Б. Григорьева и LVD Коллаборация
Институт ядерный исследований РАН

План:

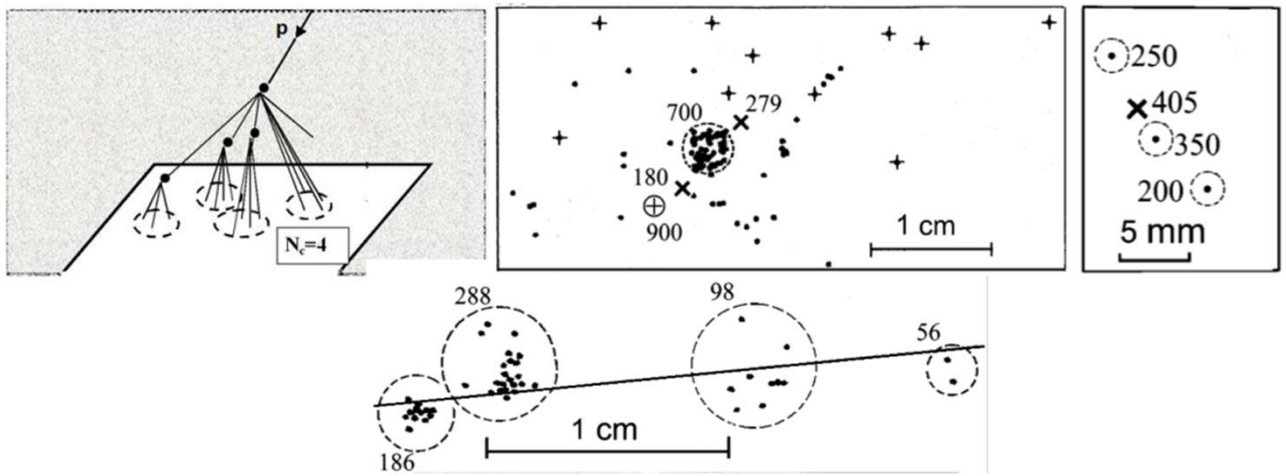
- *Компланарные события*
- *Параметры степени выстроенности*
- *Детектор LVD*
- *Реконструированные мюоны*
- *Поиск выстроенных событий в LVD*
- *Монте-Карло моделирование*
- *LVD vs M-K*

Мотивация

Высокоэнергетические мюоны формируются в Широких Атмосферных Ливнях (ШАЛ) на больших высотах и несут данные о поперечных импульсах вторичных частиц, влияющих на пространственное распределение и спектр кратности мюонов, что важно для состава ПКЛ.

В области "колена" в спектре ПКИ наблюдается интересное явление — компланарность треков. Это - выравнивание (**alignment**) кластеров соседних или изолированных частиц высокой энергии, выявленное в гамма-адронных семействах в камерах с эмульсионными пластинами при энергиях >700 ТэВ.

Компланарность проявляется как расположение частиц вдоль прямой



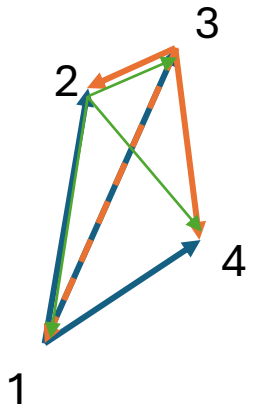
- В 1975 г. эмульсионный эксперимент на 30 км («**Страна**») зарегистрировал гамма-адронное семейство >10^{16} эВ от чистого ядерного взаимодействия.
- В эксперименте «**Памир**» (1984) в свинцово-эмульсионных камерах нашли выстроенные γ-семейства с энергией >500 ТэВ.
- Эксперименты **Echos** (1978, 1993) на «Конкорде» (~17 км) выявили странные события, включая одно с E=1586 ТэВ (~10^4 ТэВ).
- В **Pierre-Auger**, для наклонных ливней отмечено нарушение осевой симметрии мюонов;
- **MACRO** и **БПСТ** не нашли значимых выстроенных мюонных событий сверх фона, подтвердив стандартные модели.

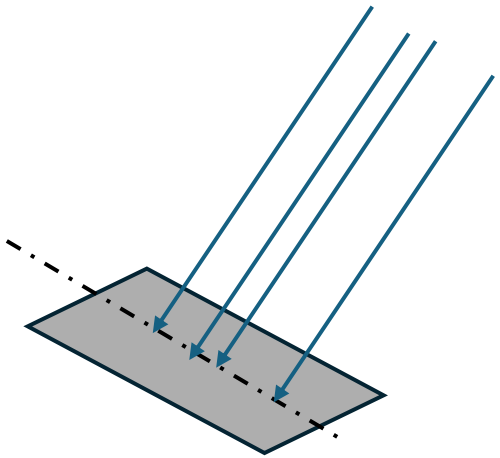
Параметры степени выстроенности

Параметр λ_N, введенный А.С. Борисовым [Сотрудничество “Памир” II. Изв. АН СССР. Сер. физ. **50**, 2125 (1986).] использовался при анализе данных эксперимента Памир.

Параметр λ_N для определения выстроенности N **точек включает в себя косинус двойного угла между векторами, образующими тройки точек**, выходящими из *k*-ой точки в *i*-ю и *j*-ю точки, а также **число таких комбинаций** троек точек в событии:

$$\lambda_N = \frac{\sum_{\neq j \neq k}^{N} \cos 2\varphi_{ij}^{k}}{N(N-1)(N-2)}$$



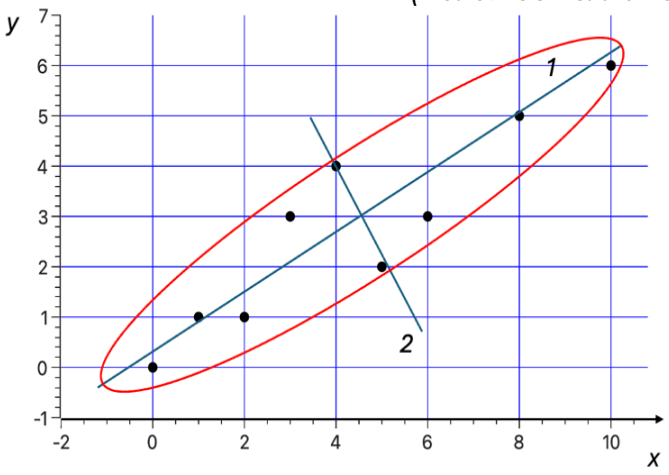


Параметр μ_N, введенный В.Ф. Якушевым [Агафонова Н.Ю. и др. ЯФ 2026], равен отношению среднеквадратичных отклонений точек от фитирующих прямых большой и малой оси эллипса рассеяния N точек пересечения треков частиц с перпендикулярной плоскостью :

$\mu_N = \beta/\alpha$.

α - среднеквадратичное отклонение всех точек (*x*, *y*) от фитирующей прямой номер *1*, (*большой оси эллипса рассеяния точек*).

β - среднеквадратичное отклонение точек от фитирующей прямой номер *2* *(малая ось эллипса)*, перпендикулярной фитирующей прямой номер *1*



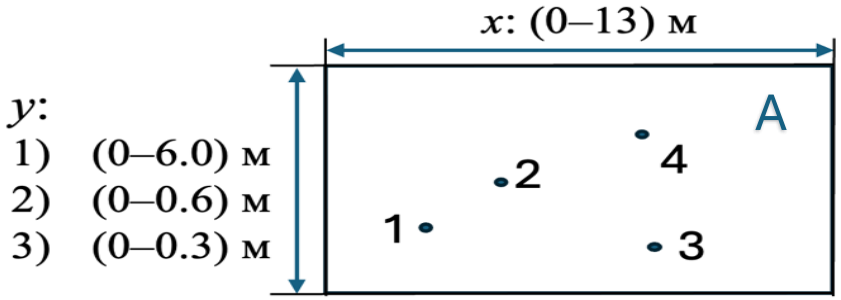
$$\mu_N = \frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{a^2+1}{\frac{1}{a^2}+1}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{-1}{a}x_i - y_i + d\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}(ax_i - y_i + b)^2}}$$

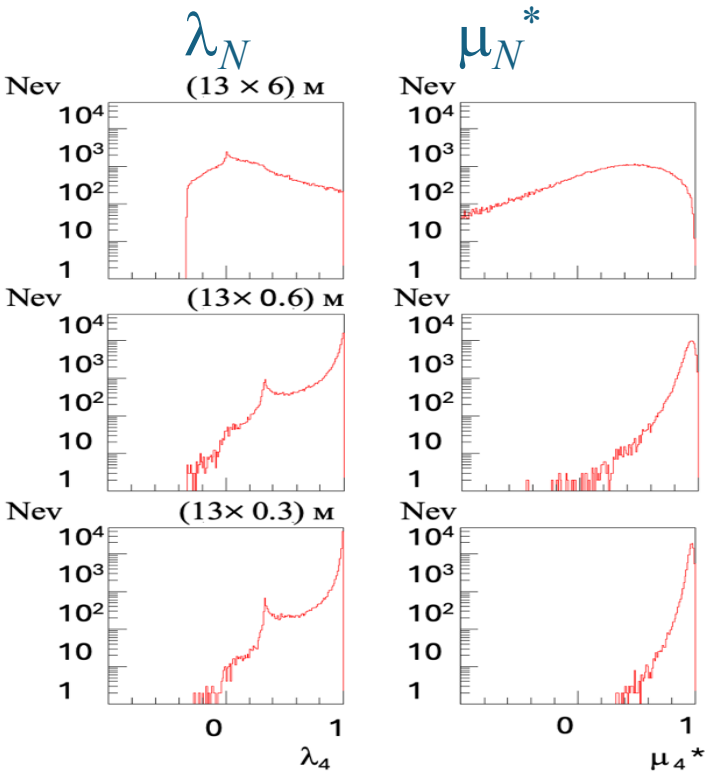
$$= |a|\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{-1}{a}x_i - y_i + d\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}(ax_i - y_i + b)^2}}.$$

$$\mu_N^* = -(2/\mu_N) + 1$$

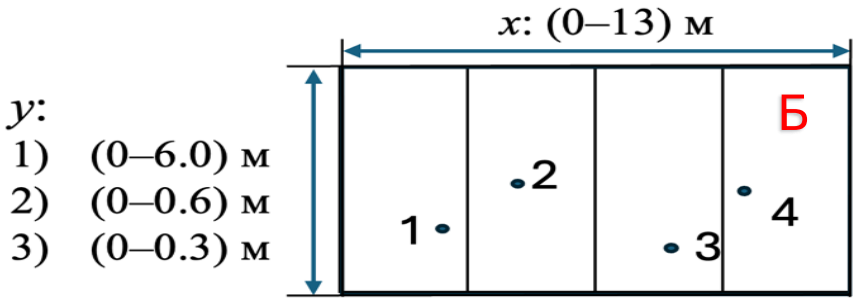
Сравнение параметров степени выстроенности

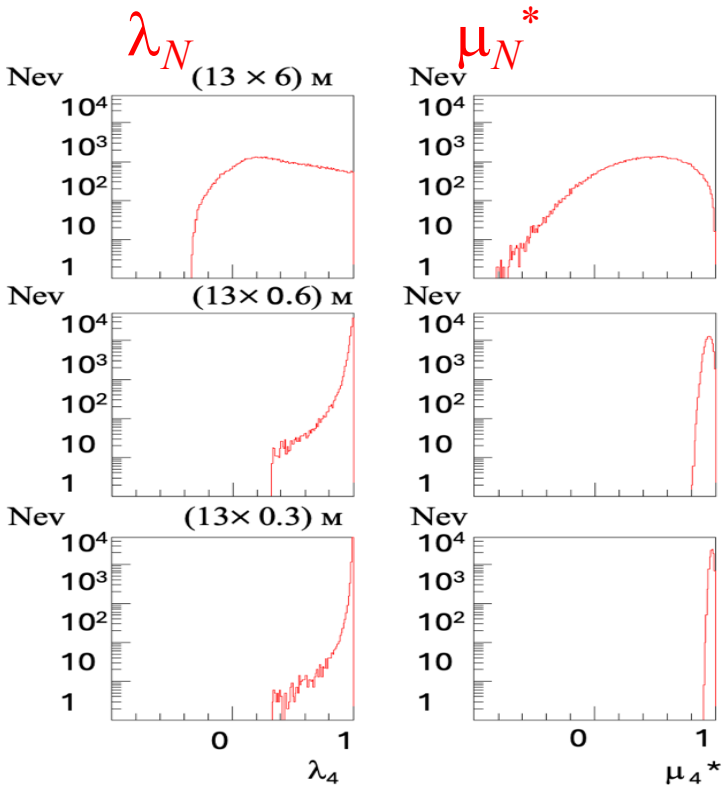
розыгрыш событий с $N = 4$ с равновероятным распределением координат точек (x_i, y_i)



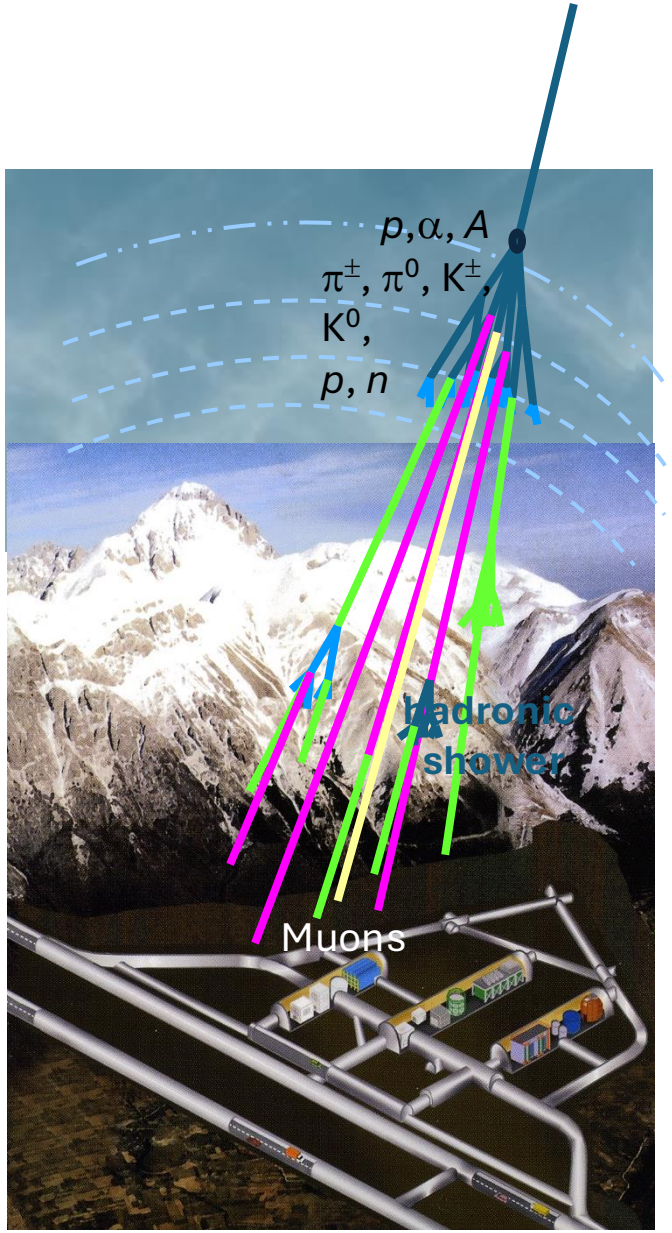


розыгрыш событий с $N = 4$ в разделенном на зоны прямоугольнике (заведомо выстроенные события)



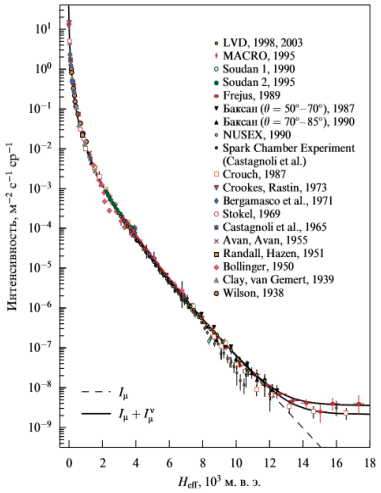


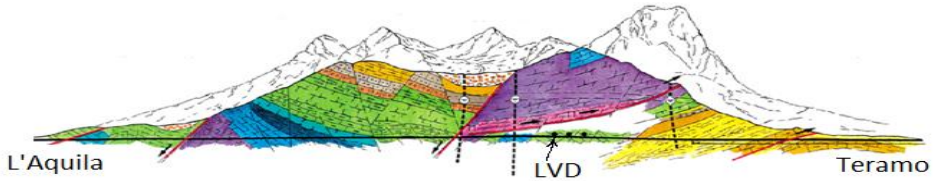
Large Volume Detector @ LNGS



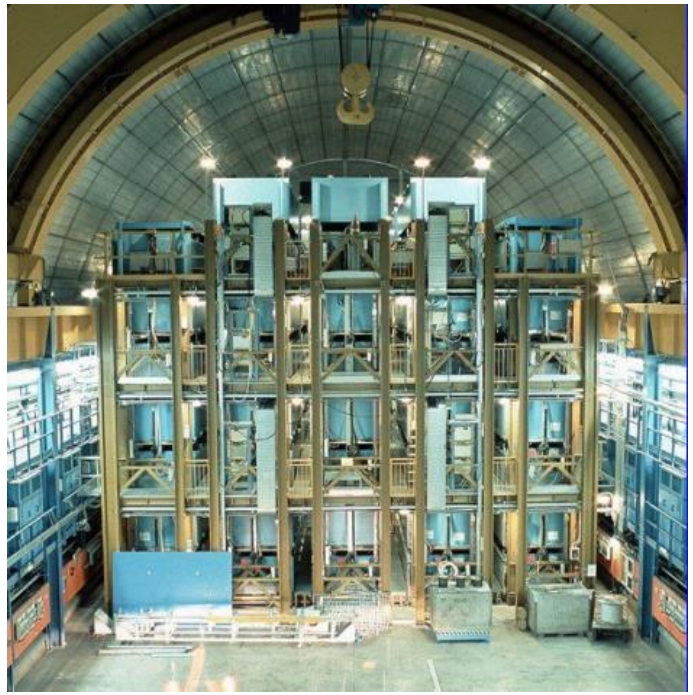
Основная цель эксперимента LVD – поиск нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей галактике

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$





размер 22м×13м×10м
M_{Fe}=1020 т, M_{sc}=1008 т
Число моддулей=840
<H> = 3620 м в.э.
$\langle E_\mu \rangle$ = 280 ГэВ
$E_{s.l.}$ = 1.3 ТэВ
$CR_\mu \sim 120$ ч$^{-1}$
ε_{th} = 4 МэВ



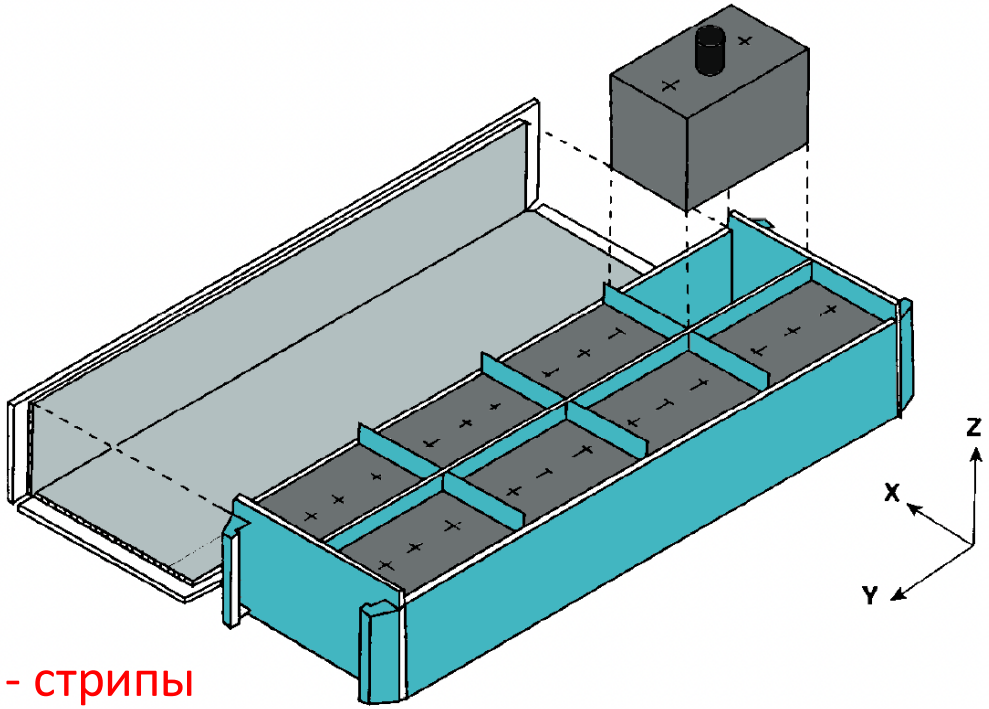
Детектор LVD расположен в Национальной лаборатории LNGS на глубине 3650 м в.э.
LVD сконструирован для поиска нейтрино и регистрации мюонов космических лучей и продуктов их взаимодействия в веществе.

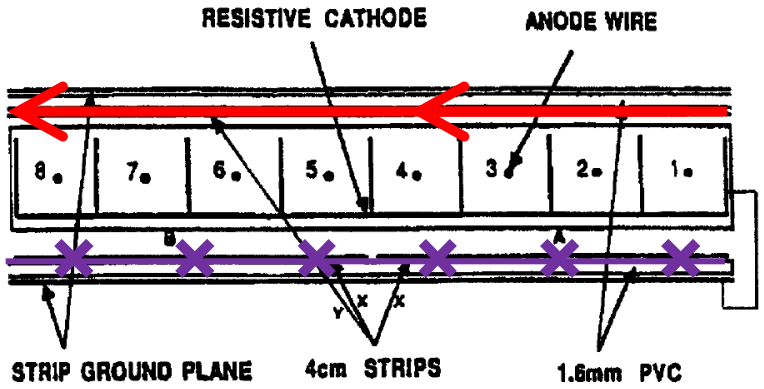
Трековая система LVD

- Использовалась до 2002 года.
- Отключена по соображениям безопасности, поскольку содержала аргон.
- Прикреплена к днищу и сбоку железного портатанка.
- Портатанк содержит восемь модулей-счетчиков.

Стриммерные камеры:

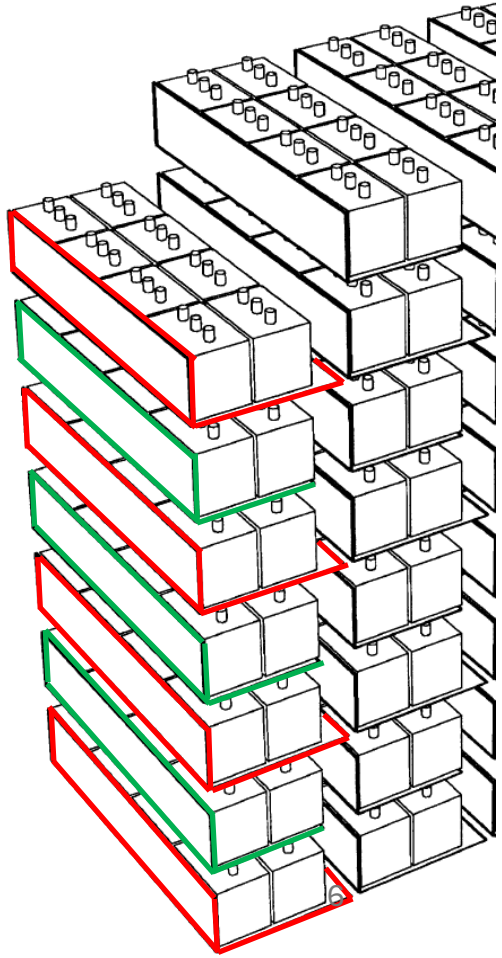
- 8 ячеек сечением 1 см^2,
- толщина стенок 1 мм
- Длина - 6.3 м
- Анод – проволока диаметром 100 мкм, покрытая серебром
- Катод – стенки ячеек, покрытые графитовой краской
- Газ: 88% CO_2, 10% изобутан, 2% Ar
- Два слоя, сдвинутые на 0.5 см





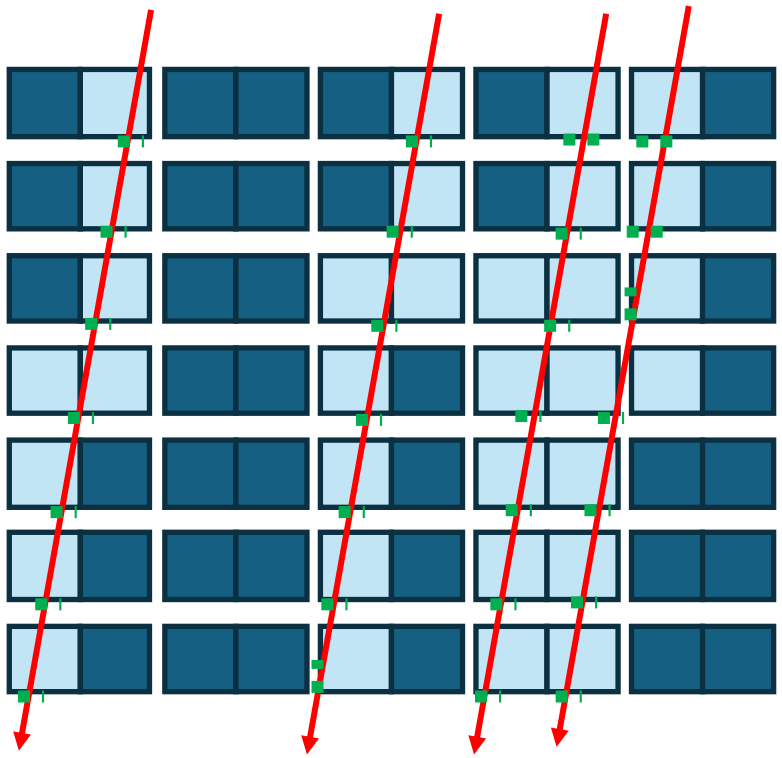
Y - стрипы

X или Z - стрипы

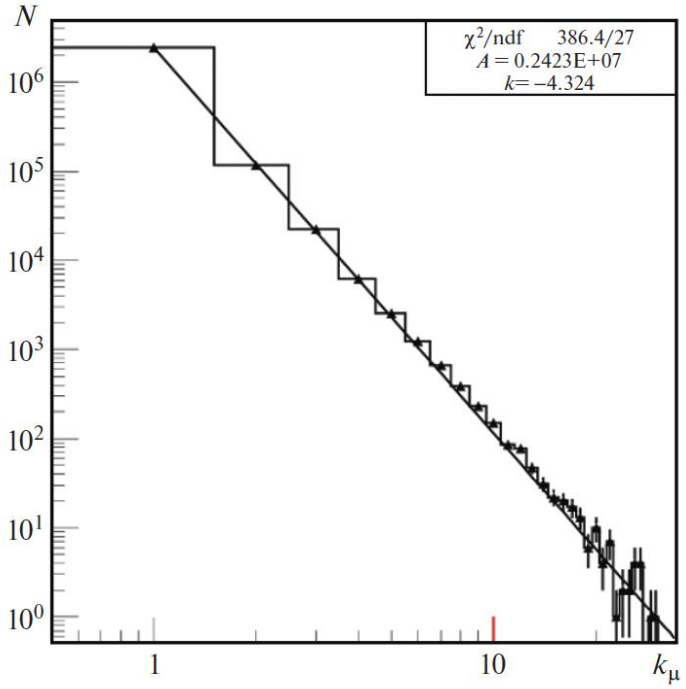


Реконструкция множественных мюонов

Реконструированные данные архива мюонов включают 2 424 826 одиночных мюонов и 151 090 мюонных групп [1998-2002].



Событие из 4-х мюонов



Распределение числа событий по кратности реконструированных мюонов. Кривая представляет собой приближение в форме $f(x) = Ax^{-k}$, где $k = 4.32$.

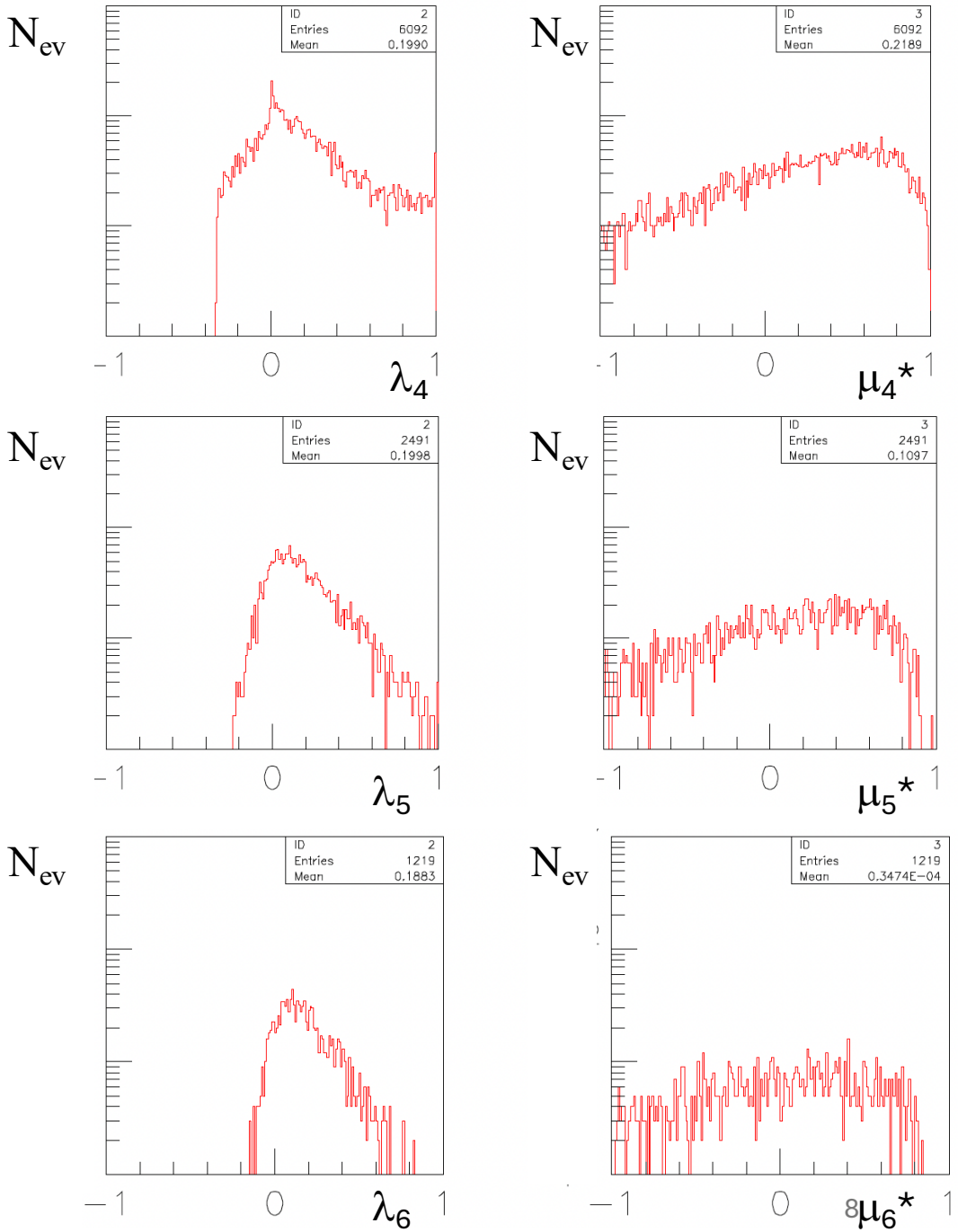
Число зарегистрированных мюонных событий LVD с кратностью более 4.

кратность k_μ	Число событий
4	6092
5	2491
6	1219
7	657
8	382
9	228
10	149
>11	356

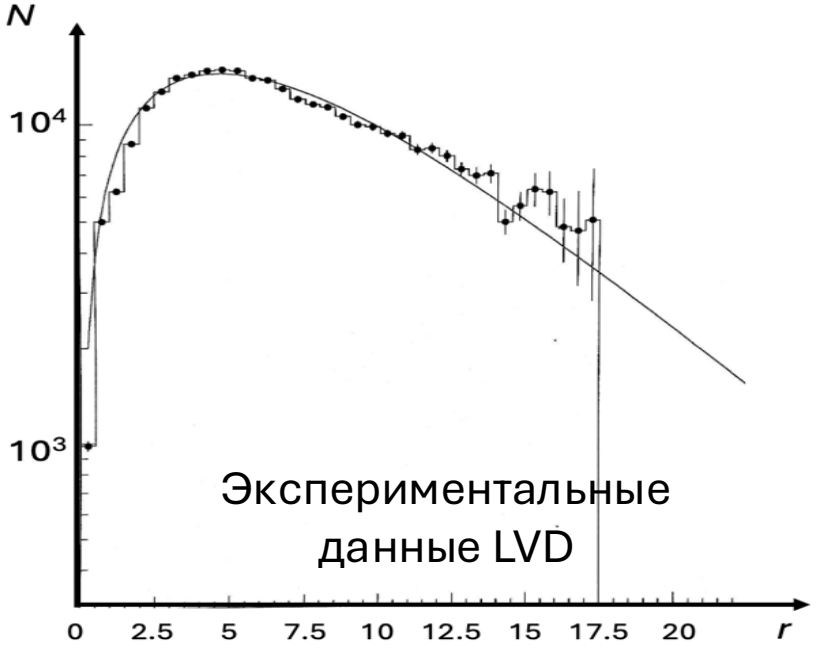
Поиск выстроенных событий в LVD

Число мюонов в группах число событий в зависимости от порога выстроенности

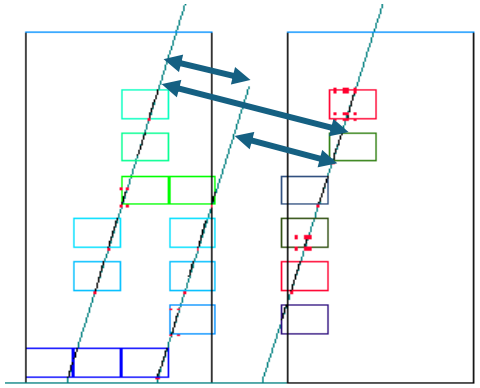
k_μ	Events	Alignment parameter	$\lambda_N > 0.5$ $\mu_N^* > 0.5$	$\lambda_N > 0.6$ $\mu_N^* > 0.6$	$\lambda_N > 0.7$ $\mu_N^* > 0.7$	$\lambda_N > 0.8$ $\mu_N^* > 0.8$	$\lambda_N > 0.9$ $\mu_N^* > 0.9$
4	6092	λ_N	1021	748	556	367	201
		μ^*	1899	1418	961	507	174
5	2491	λ_N	277	156	94	52	20
		μ^*	520	351	189	76	9
6	1219	λ_N	80	36	11	6	2
		μ^*	172	107	53	16	1
7	657	λ_N	23	10	7	2	0
		μ^*	54	23	7	1	0
8	382	λ_N	7	2	1	0	0
		μ^*	22	8	3	0	0
9	228	λ_N	5	1	1	1	0
		μ^*	13	4	1	0	0
10	149	λ_N	3	1	0	0	0
		μ^*	1	0	0	0	0
>11	356	λ_N	0	0	0	0	0
		μ^*	3	1	0	0	0

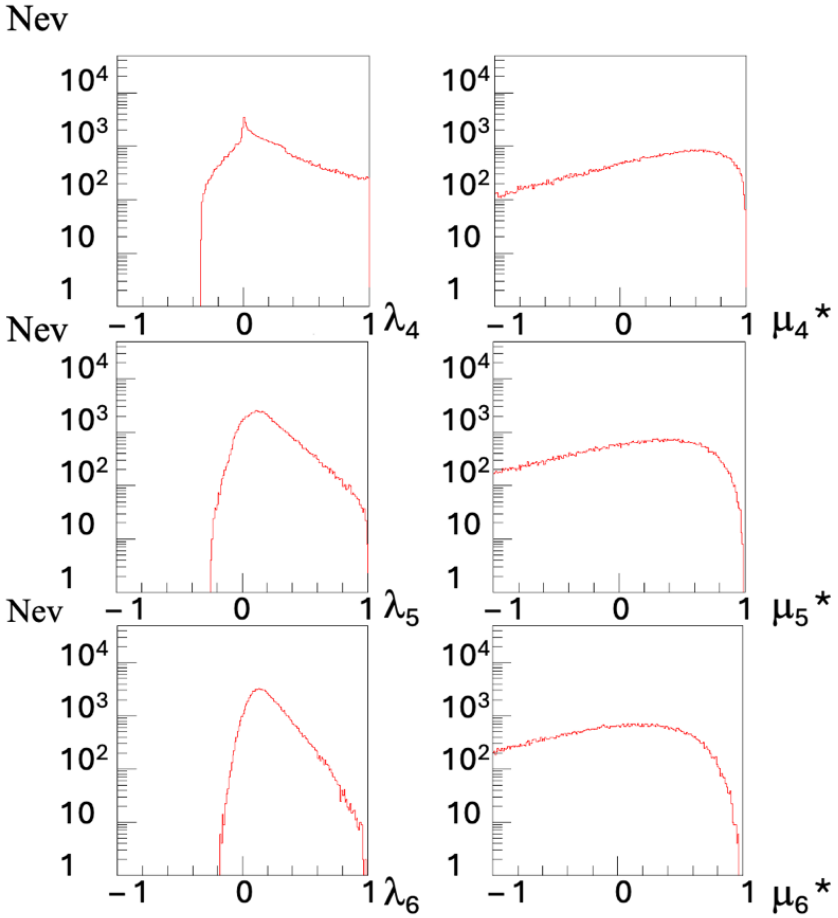


Монте-Карло моделирование



- координаты случайно выбрасывались в соответствии с законом f(r),
- события с различными N (множественными мюонами в группе),
- вычислялись параметры λ_N и μ_N^*
- 10^6 событий

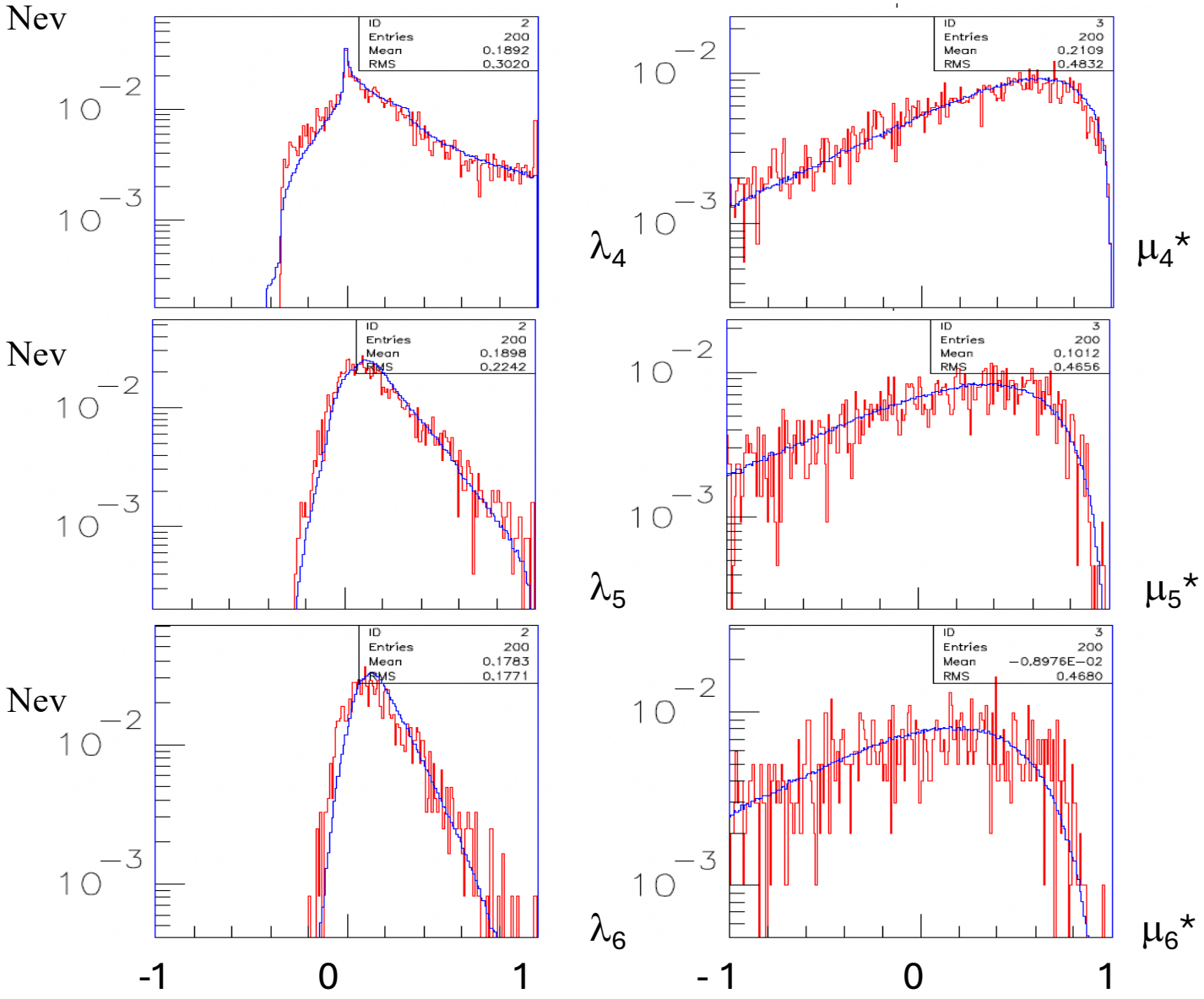




Используя координаты треков реальных мюонов, зарегистрированных в LVD, получена декогерентная кривая (или кривая раздвижения) – распределение мюонных пар по расстоянию между мюонами.
Это распределение было аппроксимировано с помощью функции
$f(r) = A \times r/R^2 \times \exp(-r/R)$, where $A = 0.181 \times 10^6$, $R = 4.63$.

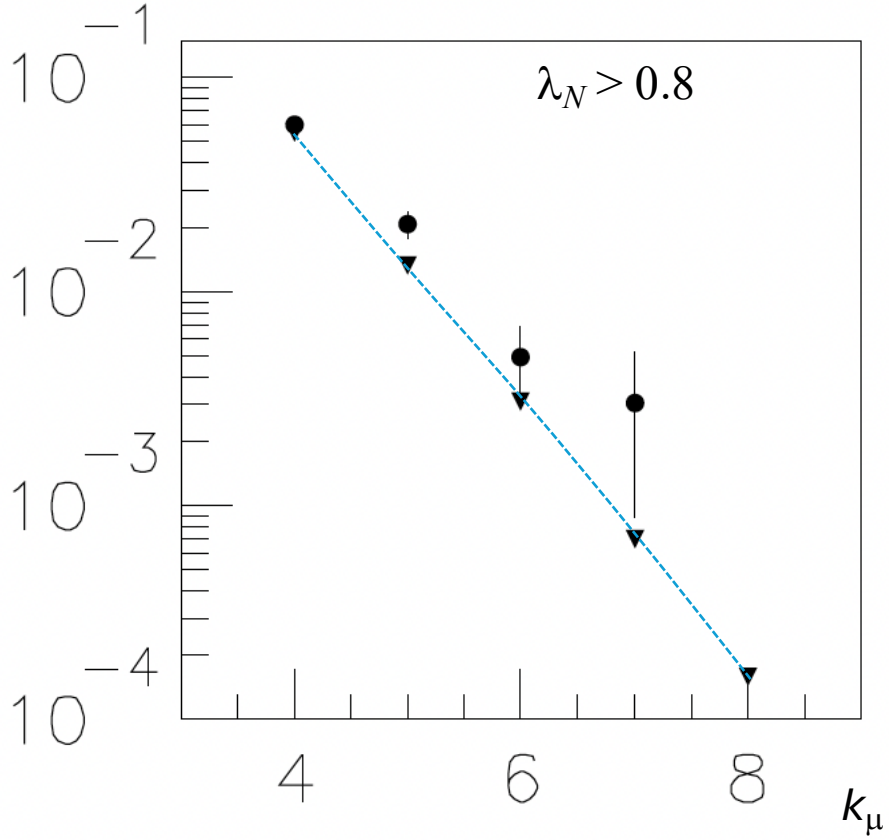
LVD эксперимент vs М-К моделирование

распределения по параметрам выстроенности λ_N и μ_N^* для зарегистрированных в LVD групп мюонов и для разыгранных Монте-Карло событий



LVD эксперимент vs М-К моделирование

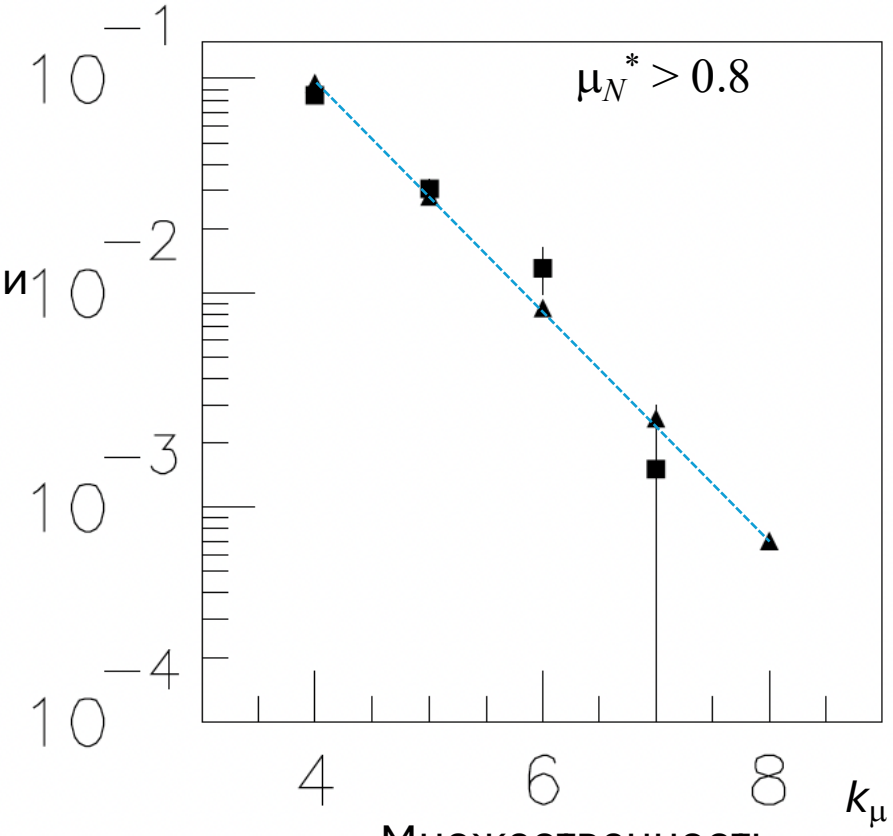
$N_{alignment}/N_{tot}$



Множественность мюонов в событии

сравнение в числе выстроенных экспериментальных и смоделированных событий для групп разной множественности

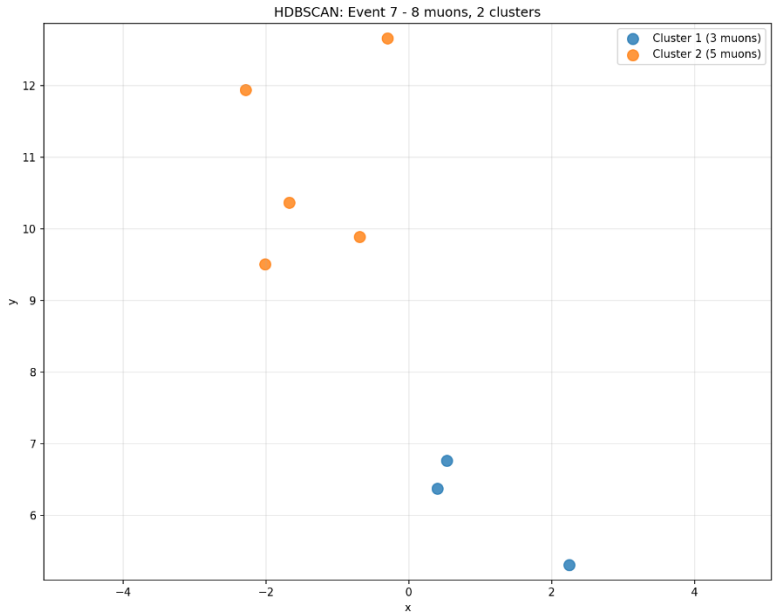
$N_{alignment}/N_{tot}$

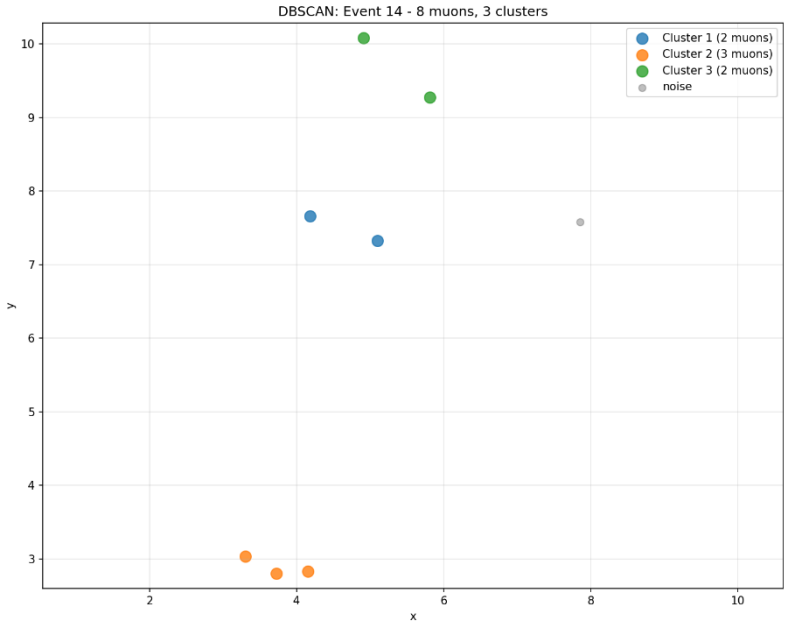


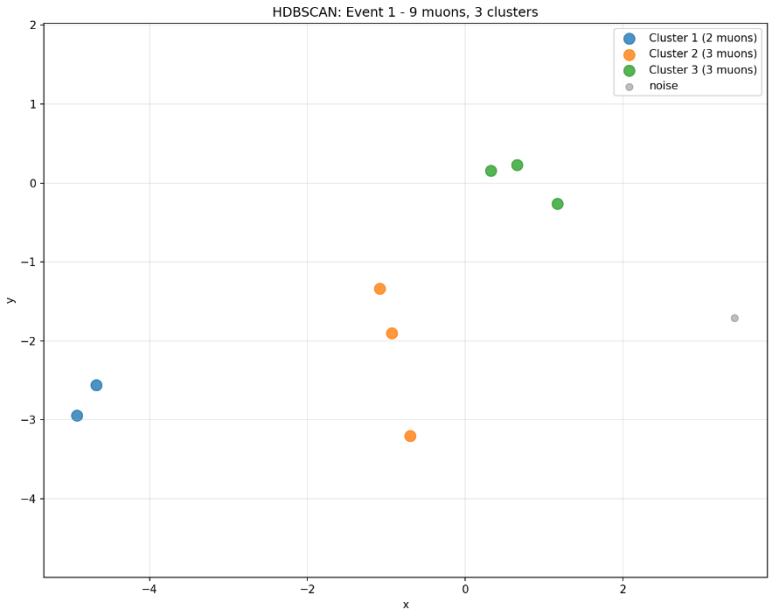
Множественность мюонов в событии

Точки с ошибками – эксперимент
Треугольники – смоделированные события

Исследование топологии экспериментальных многомюонных событий

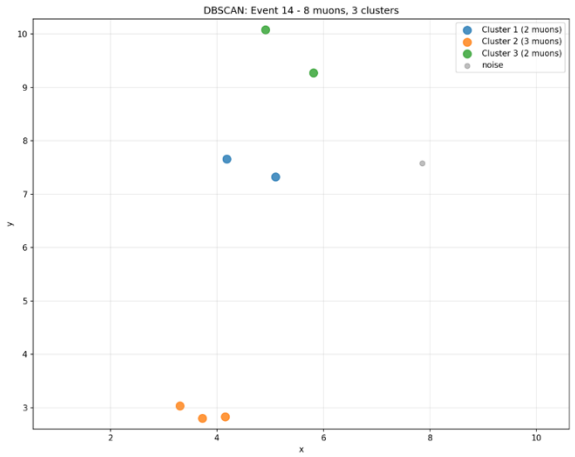






Объединение треков в кластеры (сгущения)

Заключение



Наши следующие шаги:

1. Проверить большие зенитные углы (больше 70 градусов). Энергия таких многомюонных событий больше.

2. Посмотреть выстроенность на расстояниях больше 5 метров. Выстроенность на малых расстояниях может теряться (размываться) рассеянием в грунте.

3. Объединить треки в кластеры для поиска выстроенности в кластерах.

4. Применить моделирование с помощью CORSIKA и FANSY 2.0 для разделения событий по типу взаимодействия. В эксперименте LVD разделить события на широкие и узкие мюонные группы (см. постер MH-#36).

(multi-cluster topology) — это особый тип структуры мюонного пучка (bundle), при котором мюоны на детекторе MACRO группируются не в одну общую область, а в **два или более четко разделенных пространственных скопления (кластера)**.

Простыми словами: вместо того чтобы мюоны "падали" ровным облаком вокруг оси ливня, они собираются в отдельные "кучки", разнесенные друг от друга на десятки метров.

Спасибо!

Спасибо

При анализе событий в гамма-адронных ливнях на поверхности и атмосферных мюонов под землей, часто используется мера линейной выстроенности треков или каскадов параметр
$\lambda N = Sumk\ (\cos(2\phi ij\ ))/N\ (N-1)(N-\ 2)$, где $\cos(2\phi ij\ )$ – косинус двойного угла между вектором, который образуют тройки точек событий на плоскости перпендикулярной углу падения частиц.
Мы представляем новый параметр компланарности $\mu N = 1 - 2\alpha/\beta$, в котором α и β вычисляются как среднеквадратичных отклонения треков от полуосей эллипса, образующих совокупность точек треков частиц.
Проведен поиск компланарных событий в много-мюонных реконструированных группах, зарегистрированных Детектором Большого Объема LVD, находящимся в Лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия) на глубине 3600 м в.э. Анализировались события с множественностью от 4 до 10 на двух башнях детектора в период с 1999 по 2002 год.
Приводится сравнение экспериментально найденных событий с выстроенностью >0.8 с моделированием случайно выстроенных событий методом Монте-Карло.
Проводилось выявление субструктур и топологии внутри мюонных групп высокой множественности (>10) для понимания динамики процессов первичного взаимодействия космических лучей.