

Оптимизация критериев отбора событий для наблюдения тени Луны в космических лучах методом Монте-Карло на установке Baikal-GVD

Гордеев Антон Романович

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Ольшевский А.Г.

Научный консультант: к.ф.-м.н. Храмов Е.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Физический факультет, кафедра физики элементарных частиц

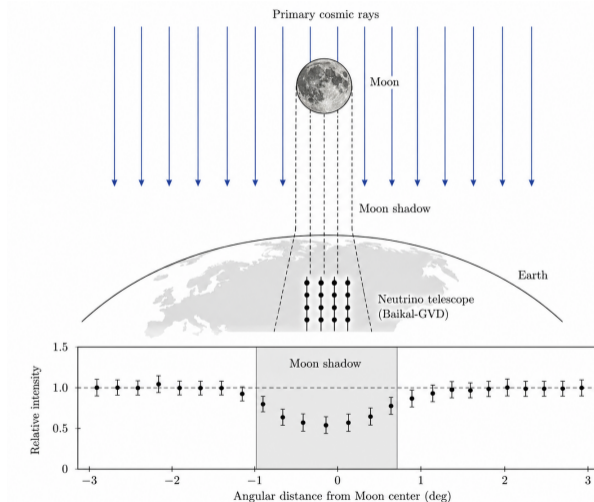
2026

Актуальность и постановка задачи

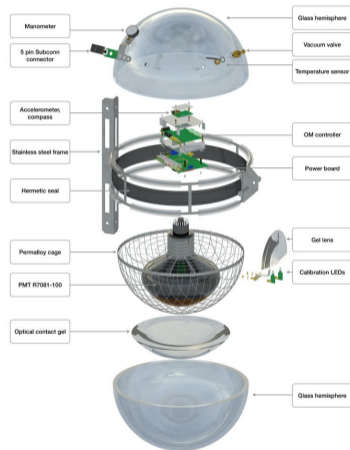
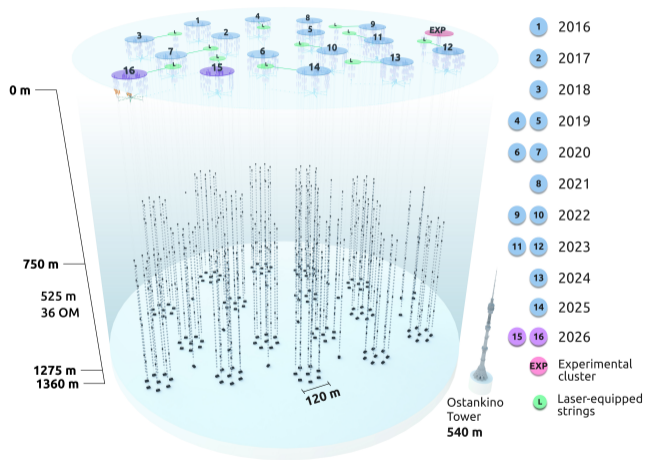
- Особенность углового распределения атмосферных мюонов - дефицит событий с направления Луны.
- Тень Луны в потоке космических лучей - естественный источник для проверки углового разрешения и точности реконструкции треков.

Задачи:

- 1 Анализ существующих подходов к поиску тени Луны.
- 2 Проверка моделирования атмосферных мюонов.
- 3 Исследование влияния критериев отбора на угловое разрешение детектора.
- 4 Оптимизация параметров отбора для достижения максимальной статистической значимости.
- 5 Оценка достижимого углового разрешения.



Нейтринный телескоп Baikal-GVD



Функция рассеяния точки и профиль тени Луны

Функция рассеяния точки (PSF) - плотность вероятности регистрации события с направлением \vec{x}_i при истинном \vec{x}_s . Угловое расстояние δ между векторами:

$$\cos \delta = \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos(\beta_1 - \beta_2),$$

где α - высота, β - азимут в горизонтальных координатах.

$$PSF \equiv S(\delta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}},$$

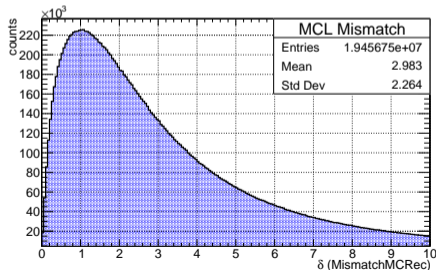
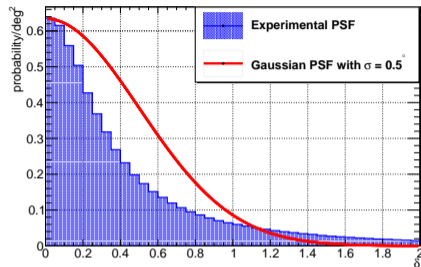
где σ - угловое разрешение, δ - угловое расстояние между первичной частицей и реконструированной.

Распределение по δ (MismatchMCRec) в гауссовой модели - распределение Релея:

$$\int_{\varphi} S(\delta) d\Omega \approx \frac{\delta}{\sigma^2} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}.$$

Теоретический профиль тени:

$$\frac{dN_{obs}}{d\Omega} = k \left(1 - \int_{|\vec{r}'| < R_{moon}} S(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\Omega' \right) \approx k \left(1 - \frac{R_{moon}^2}{2\sigma^2} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \right).$$



Псевдо-отклик детектора

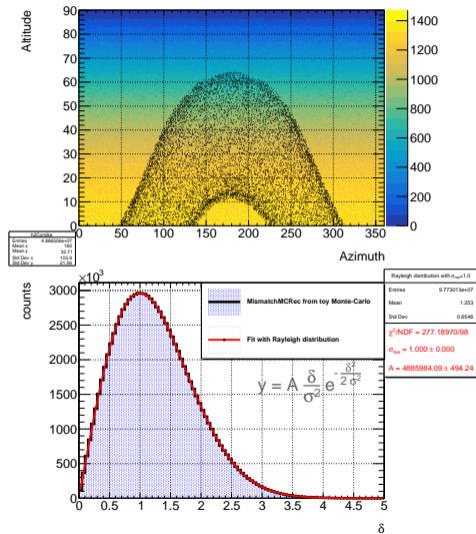
Первичные частицы (\vec{u}) - равномерное распределение ($d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$).

"Реконструированные" частицы (\vec{u}') - отклонённые в соответствии с функцией Гаусса с некоторым σ - угловое разрешение.

В гистограмму заносим угловое расстояние δ от \vec{u}' до центра Луны. Затенение, если $\delta(\vec{u}, Moon) < 0.26^\circ$.

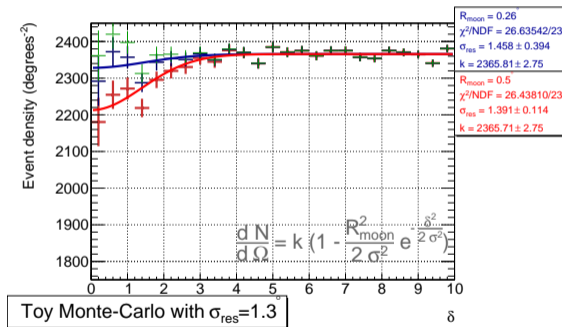
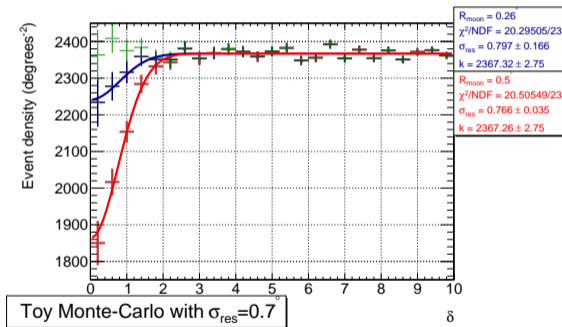
Для получения плотности событий, нормируем каждую ячейку на соответствующий телесный угол:

$$\begin{aligned}\Delta\Omega &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\delta-h/2}^{\delta+h/2} d\theta \sin\theta = \\ &= 2\pi [\cos(\delta - h/2) - \cos(\delta + h/2)].\end{aligned}$$

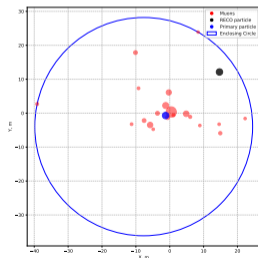
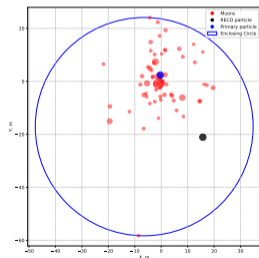
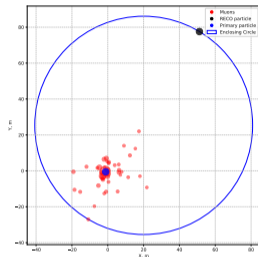
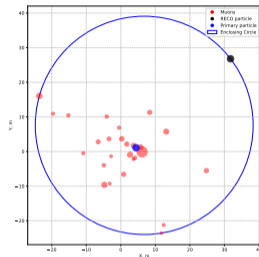


Псевдо-отклик детектора

Результаты моделирования псевдо-отклика детектора. Зелёные точки - фон, синие - затенение с $R_{moon} = 0.26^\circ$, красные - затенение с $R = 0.5^\circ$. Угловое разрешение $\sigma_{res} = 0.7^\circ$ и $\sigma_{res} = 1.3^\circ$.



- 1 Анализ геометрии мюонной группы.
- 2 Многомерный анализ с помощью машинного обучения (BDT).
- 3 Оптимизация с помощью тестовой статистики λ (оценка значимости отклонения фоновой гистограммы H_0 и H_1 с учётом эффекта затенения).
- 4 Оптимизация критериев с помощью многомерных гистограмм.



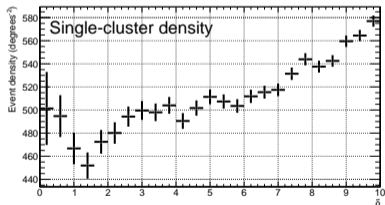
Однокластерные события: критерии и проблема

Оптимальные критерии:

- Угловая ошибка реконструкции $\beta = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varphi^2 \cdot \sin^2 \theta} < 0.32$
- $Q/NDF < 6.5$

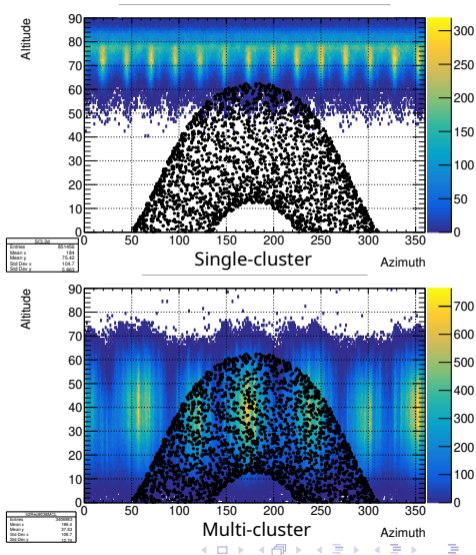
Медиана $MismatchMCR_{rec} \approx 1.7^\circ$, ожидаемая статистическая значимость 0.69σ .

Проблема: Малое число затенённых событий (20 штук при экспозиции 40 лет для 8 кластеров), рост плотности событий в зависимости от δ :



Причина: реконструированные треки преимущественно вблизи зенита, тогда как Луна поднимается не выше 66° .

Решение: мультикластерные данные.



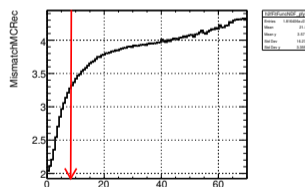
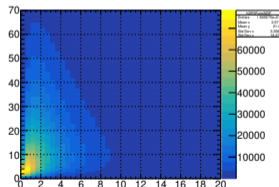
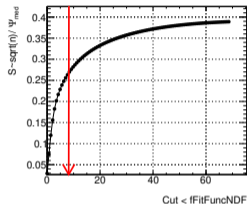
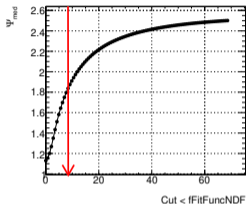
Мультикластерные события: метод многомерных гистограмм

8-мерная гистограмма ($MismatchMCRec + 7$ переменных реконструкции).

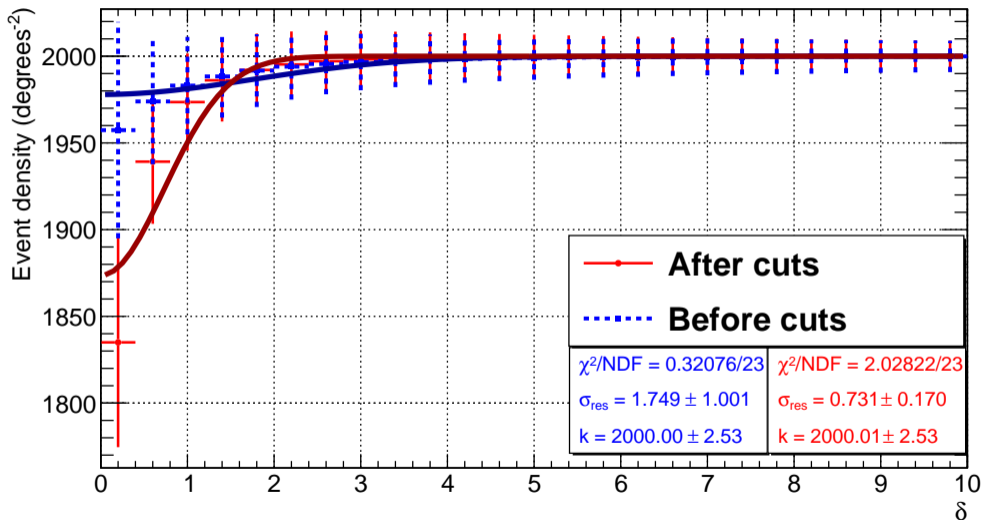
Оптимизированные критерии:

- $CovMatrixStatus = 3$
- $\beta < 0.275$
- $Q/NDF < 8.5$
- $HotStringDist < 9$
- $Mismatch_{SCMC} < 20$
- $\log(PHit_{30}^{min}) > -3$
- $TRes_{30}^{med} < 8$
- $NHits_{22m}/NHits > 0.05$

Критерии оставляют 5.2 % статистики и уменьшают среднее значение $MismatchMCRec$ с 2.2 до 1.4, при этом медианное значение изменяется с 2.4 до 1. Ожидаемое угловое разрешение до критериев составляет $\sigma_{res} = 1.749^\circ \pm 1.001^\circ$, после критериев $\sigma_{res} = 0.73^\circ \pm 0.17^\circ$.



Результат моделирования тени для мультикластерных данных



- 50 итераций сдвига времени.
- Метод усреднения фона из соседних регионов относительно положения Луны ($\pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$ по азимуту).
- Фиксация константы плотности событий k из усреднённого фона.
- Сравнение гипотез χ^2 тестом: H_0 - изотропный фон, H_1 - фон + тень.

Используемые модели:

$$\frac{dN_{background}}{d\Omega} = k,$$

$$\frac{dN_{ANTARES}}{d\Omega} = k \left(1 - \frac{R_{moon}^2}{2\sigma_{res}^2} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{res}^2}} \right),$$

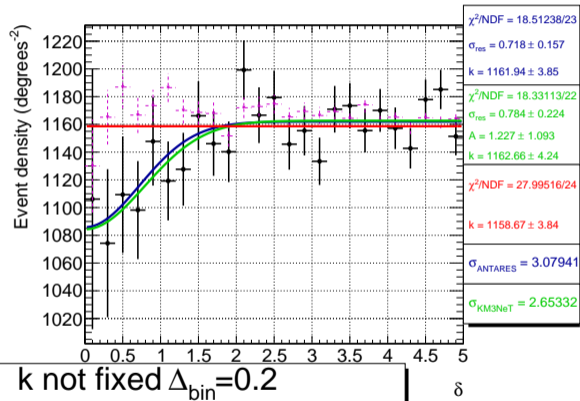
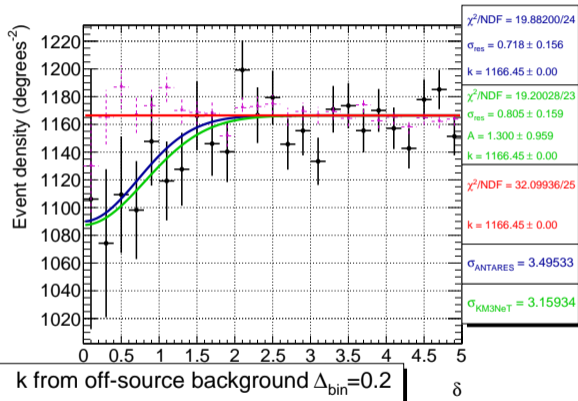
$$\frac{dN_{KM3NeT}}{d\Omega} = k \left(1 - A \frac{R_{moon}^2}{2\sigma_{res}^2} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{res}^2}} \right),$$

где k - плотность фоновых событий, σ_{res} - угловое разрешение, коэффициент A - "глубина тени". Её KM3NeT вводит для учёта колебания радиуса Луны и отклонения экспериментальной функции рассеяния точки (PSF) детектора от гауссовой модели.

Результаты:

- Наилучший диапазон δ : $[0^\circ, 5^\circ]$, ширина бина: $\Delta_{bin} = 0.2^\circ$.
- **ANTARES**: $\sigma_{res} = 0.72 \pm 0.16^\circ$, значимость 3.5σ .
- **KM3NeT**: $\sigma_{res} = 0.81 \pm 0.16^\circ$, значимость 3.15σ .
- Оценка из симуляции: $\sigma_{res} = 0.73 \pm 0.17^\circ$.
- Значимость согласно методу тестовых статистик λ : 3.16σ .
- 258 затенённых событий.

Результаты аппроксимации



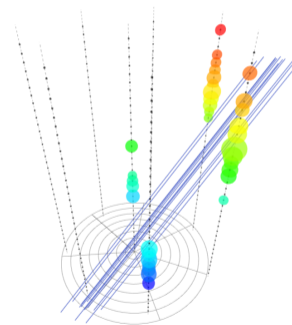
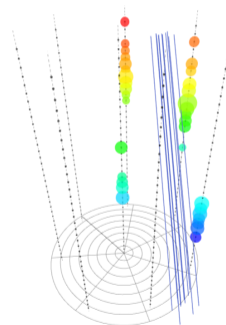
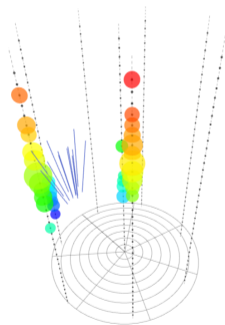
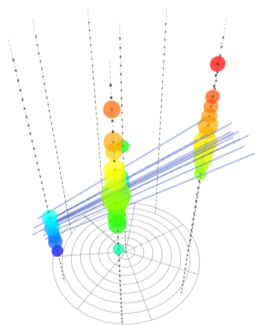
- 1 Разработаны и протестированы несколько методов отбора событий.
- 2 Для однокластерных событий показана невозможность наблюдения тени Луны методом анализа плотности событий из-за геометрического распределения треков.
- 3 Для мультикластерных событий получены оптимизированные критерии, обеспечившие:
 - угловое разрешение $\sim 0.7^\circ$,
 - сохранение 5.2% статистики.
- 4 Разработан оптимальный метод оценки статистической значимости.
- 5 Статистическая значимость регистрации тени Луны оценена на уровне $3.0 - 3.5\sigma$.

Планы:

- Двумерный анализ для поиска смещения тени.
- Увеличение статистики Монте-Карло данных (до 16 кластеров).
- Поиск оптимальных критериев на увеличенной статистике (большее число переменных и сгущение сетки).
- Применение методики к поиску тени Солнца.
- Применение на экспериментальных данных.
- Учёт систематических погрешностей (влияние ошибок временной калибровки и системы позиционирования).
- Разработка метода для поиска тени в однокластерных данных.

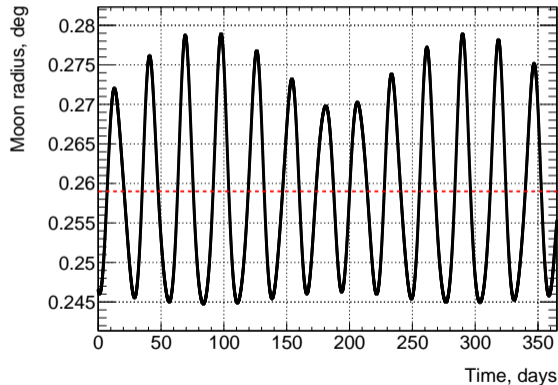
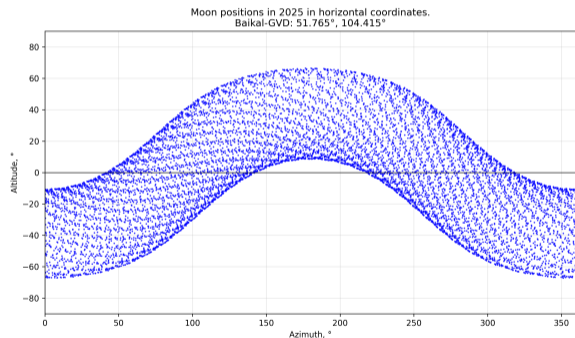
Спасибо за внимание!

Васкис: цепочка модерирования атмосферных мюонов

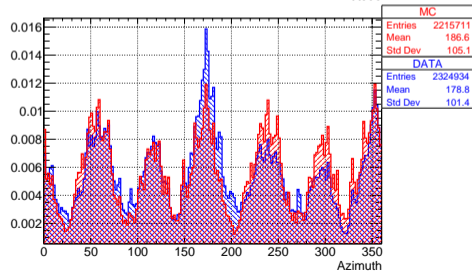
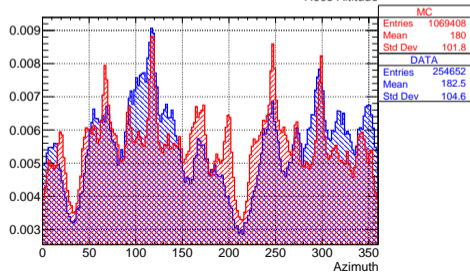
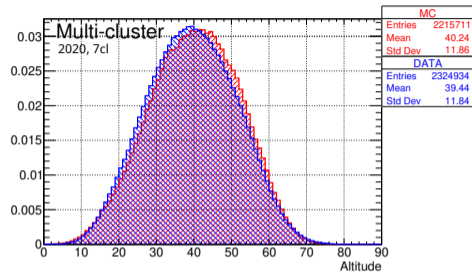
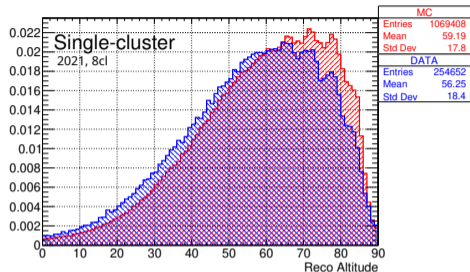


Васкурс: движение Луны

Используется модернизированный для учёта параллакса пакет ROAst. Радиус Луны $R_{moon} = 0.259^\circ \pm 0.011^\circ$, в дальнейшем используется $R_{moon} = 0.26^\circ$.



Ваккурс: используемые Монте-Карло данные



Гистограммы H_0 - без тени и H_1 - с тенью Луны.

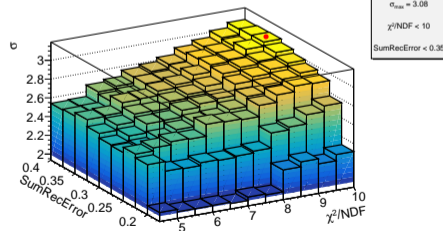
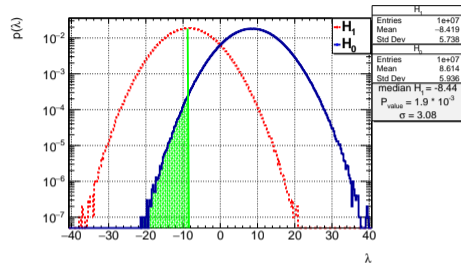
$$\lambda = -2 \ln \frac{L_{H_1}}{L_{H_0}} = 2 \sum_{i=1}^k [n_i \ln \frac{\nu_i}{\mu_i} + \mu_i - \nu_i],$$

где ν_i, μ_i - число событий в бине гистограммы H_0 и H_1 соответственно. Число n_i генерируется 10^7 раз в соответствии с распределением Пуассона со средним значением ν_i, μ_i .

Медиана $p(\lambda|H_1)$ - критическое значение. Статистическая значимость:

$$\sigma = \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - p_{value}),$$

где $\text{erf}^{-1}(x)$ - обратная функция ошибок.



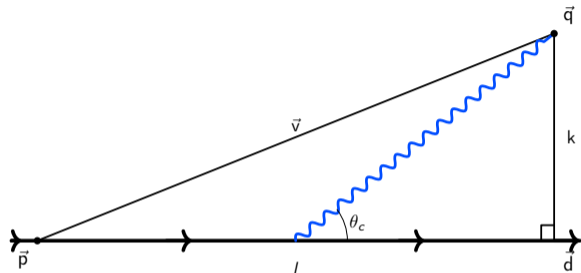
$$Q(x, y, z, \theta, \phi, t_0) = \chi_t^2 + Q_r.$$

$$\chi_t^2 = \sum_i \frac{(t_i^{exp} - t_i^{th})^2}{\sigma^2},$$

где t_i^{exp} - время обнаружения i -го сигнала, t_i^{th} - соответствующее ожидаемое время для прихода прямого черенковского излучения, σ - точность измерения времени (3 нс).

Q_r может иметь разный вид в зависимости от типа анализа. В данной работе используется следующее определение:

$$Q_r = \omega \frac{N_{Hits} - 6}{Q_{sum}} \sum_i \frac{a_0 q_i}{\sqrt{a_0^2 + q_i^2}} \sqrt{d_1^2 + r_i^2},$$

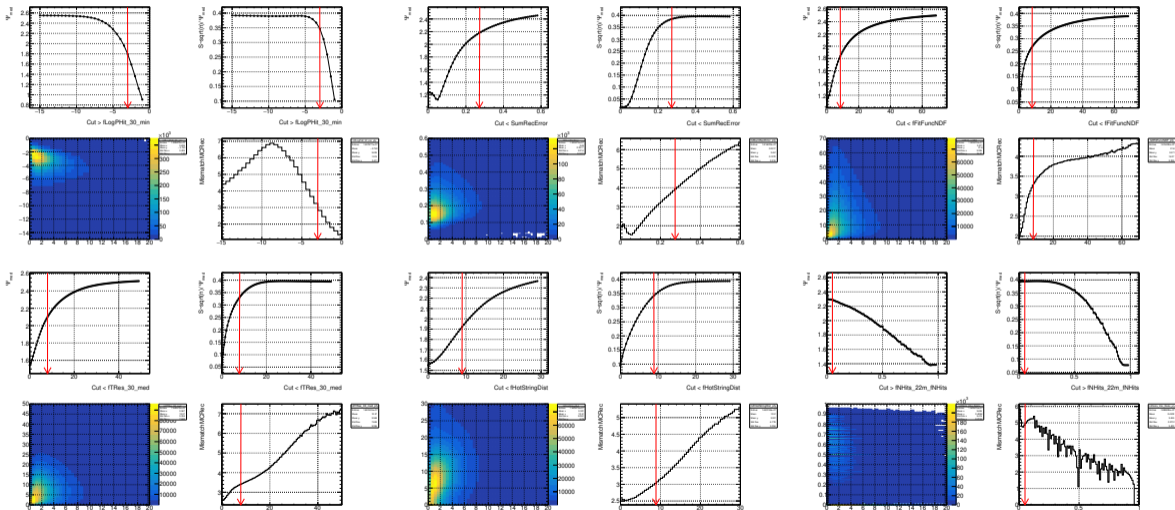


\vec{d} - направление движения мюона, p - контрольная точка, q - оптический модуль, k - расстояние до трека, θ_c - черенковский угол, $\vec{v} = \vec{q} - \vec{p}$.

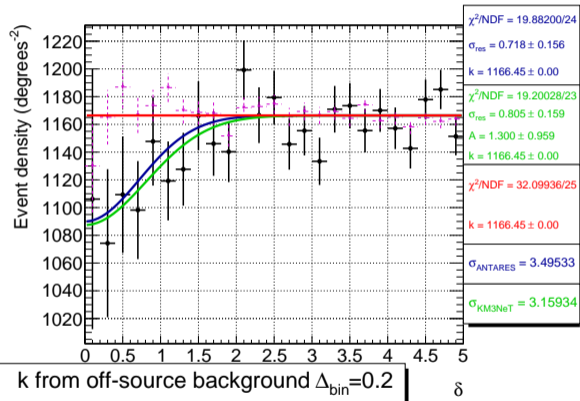
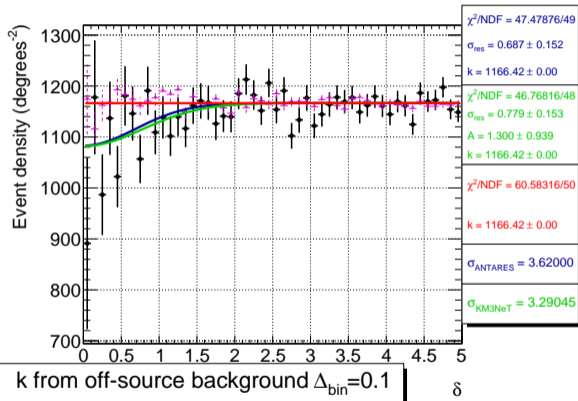
$$t_{theor} = t_0 + \frac{1}{c} \left(l - \frac{k}{\tan \theta_c} \right) + \frac{1}{v_g} \left(\frac{k}{\sin \theta_c} \right),$$

где t_0 - время пересечения мюоном контрольной точки, v_g - групповая скорость света в байкальской воде.

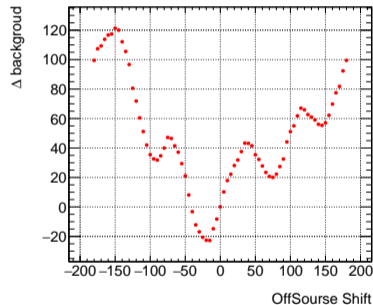
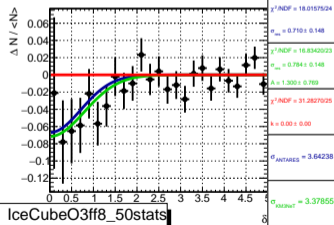
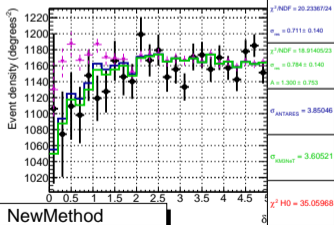
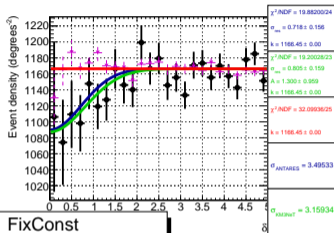
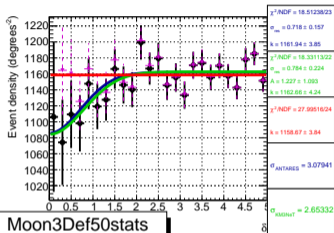
Васкурс: критерии для мультикластерных данных

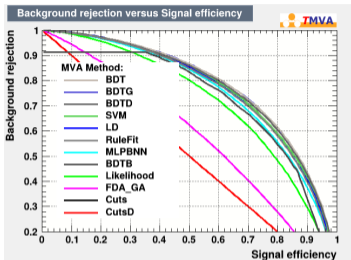


Вакциры: сравнение ширин бина



Ваккурс: усреднённый фон





TMVA training: Signal (MismatchMCREc < 1, 50k events), Background (>1, 50k events). Optimal classifier: Boosted Decision Trees (BDT) with 850 trees.

