

# Анализ эффекта тени Солнца в потоке атмосферных мюонов с помощью телескопа ANTARES

Романов Андрей,

213м группа

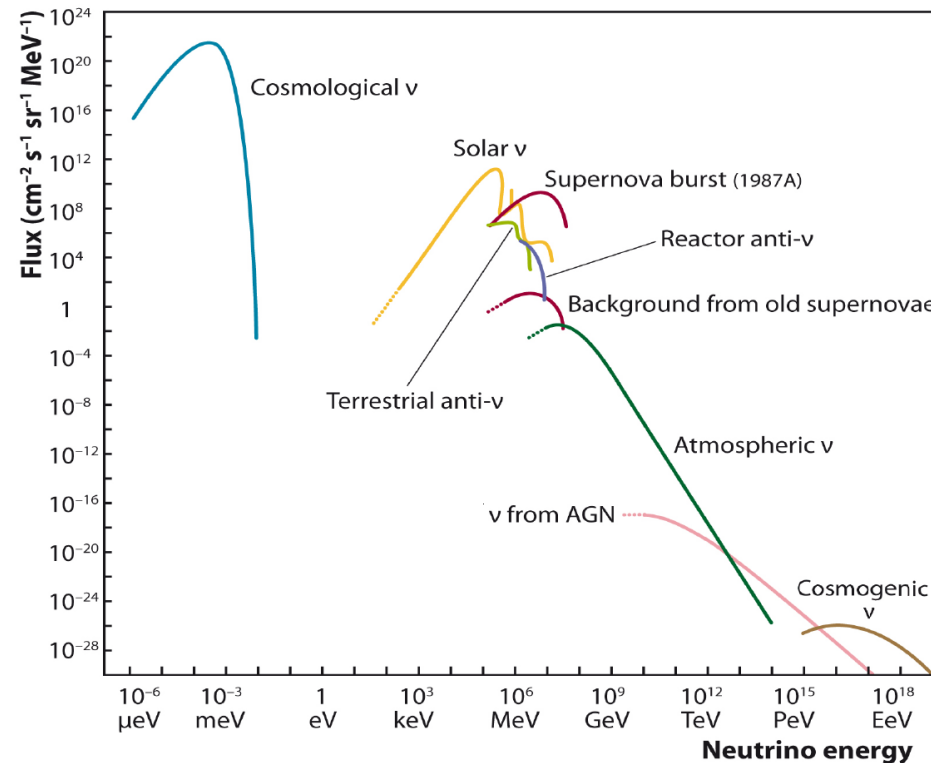
Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент Широков Е. В.

Основными источниками астрофизической информации могут быть первичные протоны, гамма-кванты и нейтрино. Однако, при энергиях, больших нескольких ТэВ, фотоны взаимодействуют с инфракрасным и микроволновым фоном, образуя электрон-позитронные пары. Протоны и электроны из-за наличия заряда подвержены влиянию магнитных полей в космическом пространстве, что не позволяет проследить их траекторию и установить их источник. Кроме того, космические магнитные поля настолько сложны и разнообразны, что распределение высокоэнергетических протонов вблизи Земли оказывается практически изотропным.

# Введение

Нейтринная астрономия является новым и уникальным методом изучения Вселенной. Поскольку нейтрино участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействиях, они могут покидать экстремально плотные ядра источников и доносить информацию о процессах, происходящих внутри. Также, из-за крайне низкого сечения взаимодействия нейтрино могут преодолевать космологические расстояния без изменения траектории. Эти свойства делают нейтрино дополнительным источником информации о процессах, происходящих во Вселенной, наряду с протонами, гамма-квантами и гравитационными волнами

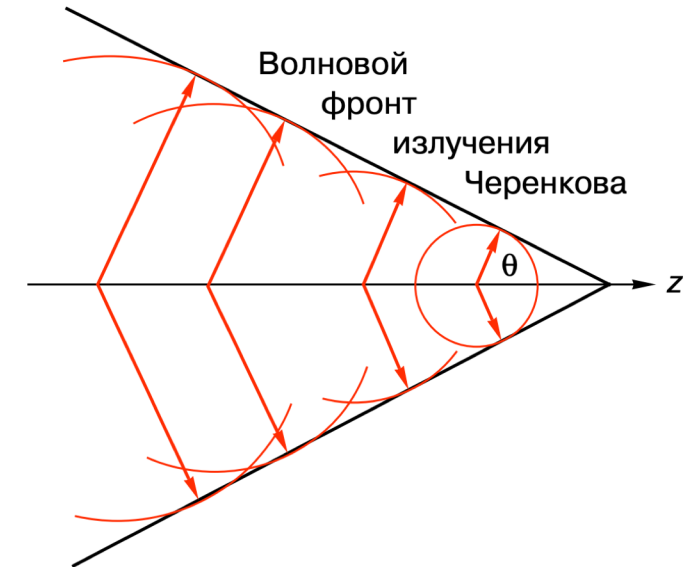


Среди возможных источников высокоэнергетических нейтрино можно выделить следующие:

- Вспышки гамма излучения
- Взрывы сверхновых
- Активные ядра галактик
- Нейтрино, связанные с распространением космических лучей
- Распад темной материи

# Глубоководные нейтринные телескопы

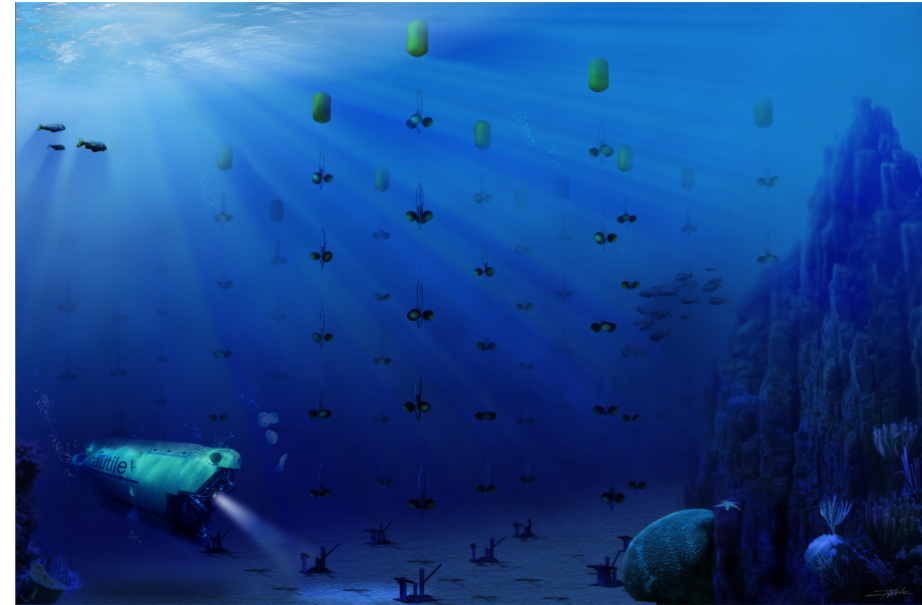
Принцип работы глубоководных нейтринных телескопов основан на регистрации излучения Вавилова-Черенкова. Нейтрино может провзаимодействовать со средой телескопа, например, с водой или льдом, рождая заряженные лептоны. При движении лептона в прозрачной среде со скоростью большей скорости света в этой среде возникает черенковское излучение, которое может быть зарегистрировано фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) телескопа.



# Глубоководные нейтринные телескопы

В настоящий момент функционируют 4 глубоководных нейтринных телескопа:

- ANTARES
- KM3NeT (сбор данных начался, при этом строительство телескопа продолжается)
- Байкальская нейтринная обсерватория (в настоящий момент интенсивно расширяется)
- IceCube (телескоп, расположенный в Антарктическом льду)



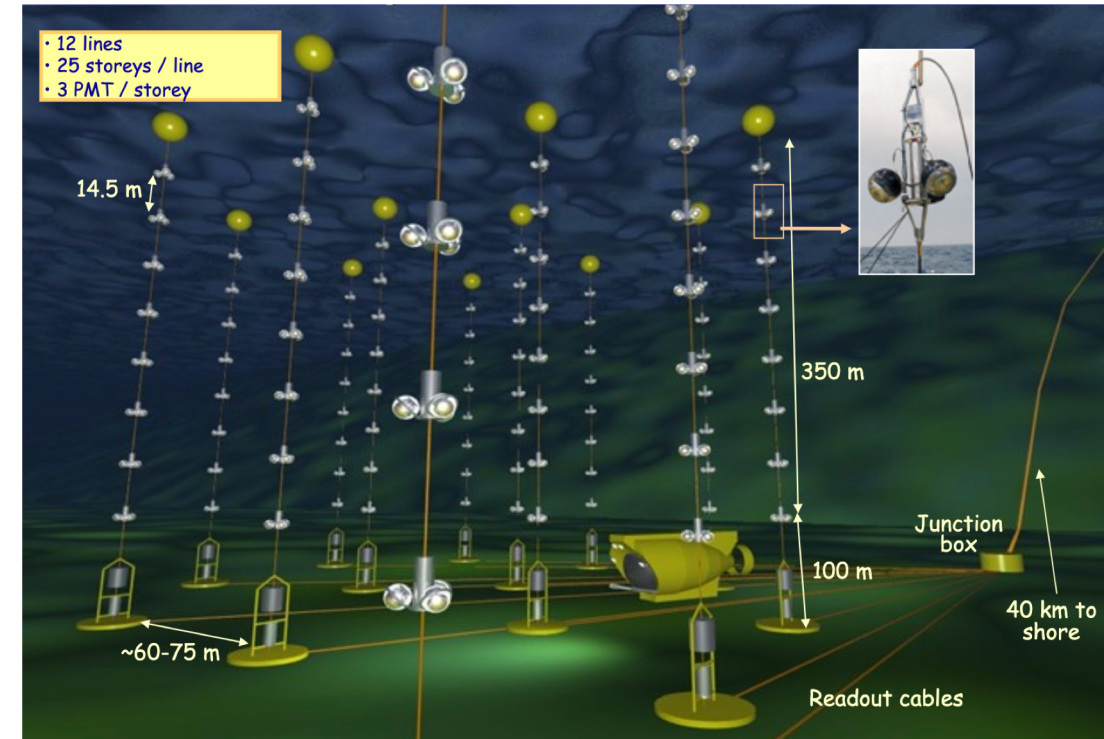
# Нейтринный телескоп ANTARES

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES работает уже более 10 лет. Он расположен в Средиземном море, в 40 км от берега Тулона (Франция). Детектор состоит из 12 вертикальных элементов, так называемых линий, оснащенных 10-дюймовыми ФЭУ, которые регистрируют черенковское излучение. Длина одной линии составляет 450 м. Каждая линия состоит из 25 этажей с тремя ФЭУ внутри стеклянных сфер - оптических модулей, устойчивых к высокому давлению.



# Нейтринный телескоп ANTARES

Самые нижние оптические модули расположены в 100 м над морским дном. Расстояние между этажами составляет 14.5 м, а расстояние между двумя соседними линиями - 65 м. ФЭУ обращены вниз на  $45^\circ$ , чтобы оптимизировать регистрацию излучения света от частиц, летящих снизу вверх. Линии подключены к распределительной коробке, которая соединяет детектор с береговой станцией через электрооптический кабель длиной около 40 км.

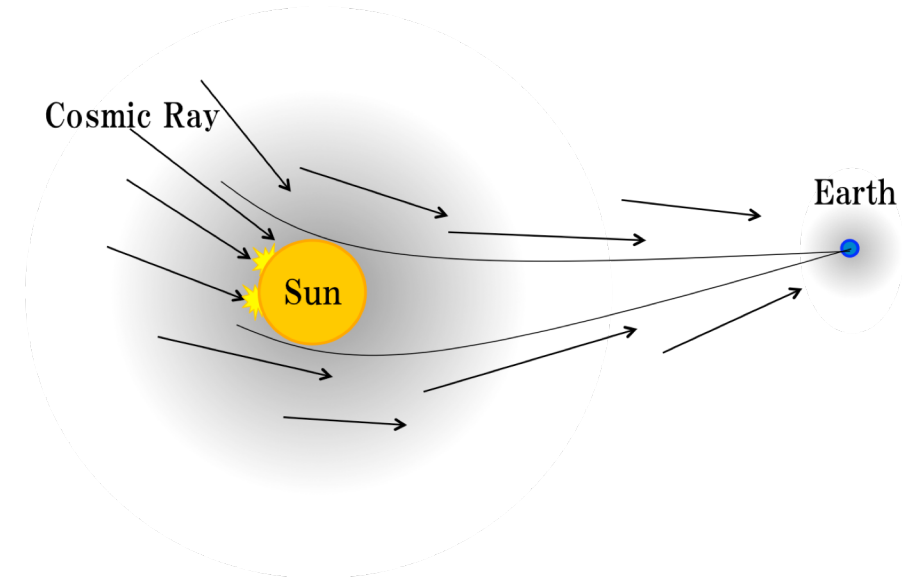




# Анализ тени Солнца

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES, в первую очередь, предназначен для обнаружения точечных источников нейтрино, поэтому необходима оценка его угловой разрешающей способности. Один из способов оценки основан на, так называемом, эффекте тени Солнца.

При взаимодействии первичных космических лучей в атмосфере рождаются вторичные атмосферные мюоны, которые могут быть зарегистрированы телескопом ANTARES. Однако, Солнце поглощает часть первичных космических лучей, что приводит к дефициту в потоке атмосферном мюонов, который, в среднем, является изотропным.



Качество восстановленных треков мюонов определяется параметром  $\Lambda$ . Также, при реконструкции траектории мюона, вычисляется угловая ошибка в определении направления его прилета -  $\beta$ . Для того чтобы определить, при каких ограничениях на параметры  $\Lambda$  и  $\beta$  чувствительность к детектированию тени Солнца максимальна, было использовано Монте Карло (МК) моделирование. Моделирование включает в себя мюонные события, которые генерируются в воде на глубине нахождения детектора с помощью пакета MUPAGE.

# Анализ тени Солнца

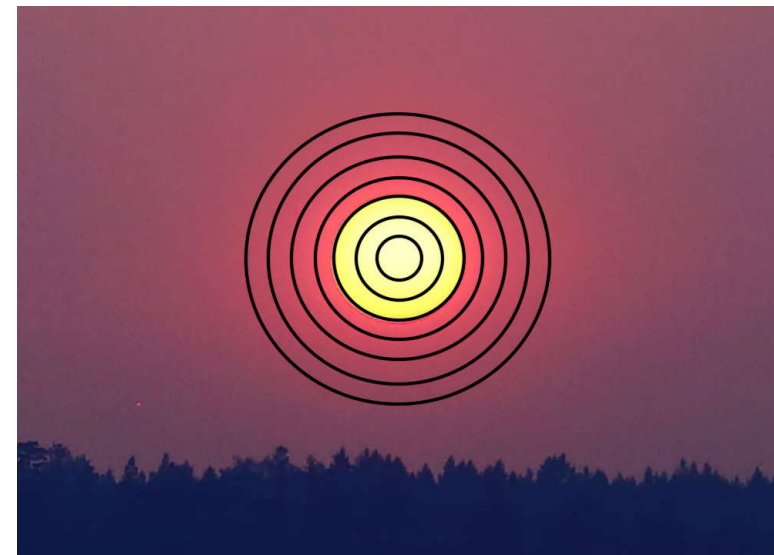
Для того чтобы моделирование осуществлялось за разумное время вычислений, статистика МК составляет 1/3 от реальной статистики. Для увеличения статистики моделирования были использованы, так называемые, дополнительные зоны. Поскольку генерация мюонов производится со всех направлений, можно использовать области неба, в которых в данный момент времени нет Солнца (эти области являются, фактически, фоновыми). Дополнительные зоны получают искусственно путем смещения положения Солнца в моделируемых данных на 2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 20 и 22 часа. Тем самым, полная статистика МК с учетом 11 дополнительных зон и зоны, содержащей реальное расположение Солнца, в 4 раза больше, чем статистика реальных данных.



# Анализ тени Солнца

Для определения ограничений на  $\Lambda$  и  $\beta$  использовался метод проверки статистических гипотез. Нулевая гипотеза  $H_0$  соответствует отсутствию эффекта тени Солнца в моделируемых данных; гипотеза  $H_1$  соответствует наличию этого эффекта. Для каждой гипотезы, строится гистограмма с распределением событий в зависимости от углового расстояния от центра Солнца. Такая гистограмма подразделяется на бины. Каждый бин соответствует концентрическому кольцу с увеличивающимся радиусом, центр которого расположен в центре Солнца. Содержимое каждого бина делится на соответствующую площадь кольца. Таким образом, получается гистограмма плотности событий.

В гистограмме, соответствующей гипотезе  $H_1$  эффект наличия тени получается путем удаления всех мюонных событий, сгенерированных внутри диска Солнца с радиусом  $0.26^\circ$ .



# Анализ тени Солнца

Предполагая, что совокупность событий в каждом бине соответствует распределению вероятности Пуассона, рассчитываются статистические функции  $\lambda_1$  и  $\lambda_0$ , соответствующие двум гипотезам:

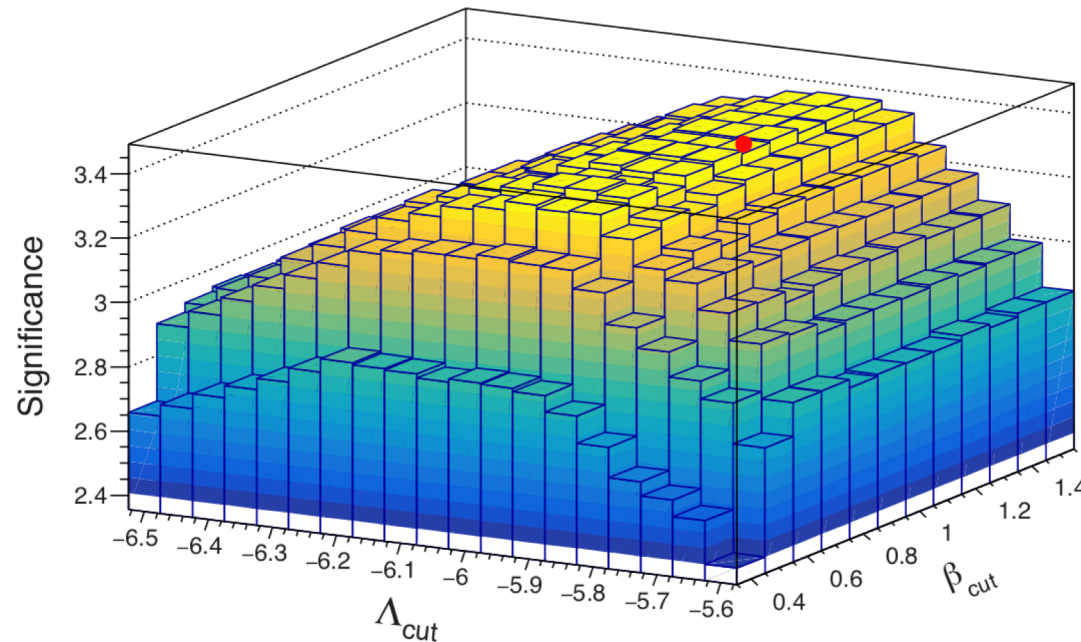
$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^{N_{bins}} \left[ \frac{(n_i^1 - \mu_i)^2}{\sigma_{\mu,i}^2} - \frac{(n_i^1 - \nu_i)^2}{\sigma_{\nu,i}^2} \right],$$
$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_{bins}} \left[ \frac{(n_i^0 - \mu_i)^2}{\sigma_{\mu,i}^2} - \frac{(n_i^0 - \nu_i)^2}{\sigma_{\nu,i}^2} \right],$$

где  $\mu_i$  ( $\nu_i$ ) – количество событий в  $i$ -ом бине для гипотезы  $H_1$  ( $H_0$ );  
 $n_i^1$  ( $n_i^0$ ) – количество событий, получаемых путем генерации случайных чисел, подчиняющихся распределению Пуассона со средним значением  $\mu_i$  ( $\nu_i$ );  
 $\sigma_{\mu,i}^2$  ( $\sigma_{\nu,i}^2$ ) – погрешность в  $i$ -ом бине бине для гипотезы  $H_1$  ( $H_0$ );

# Анализ тени Солнца

Проверка статистических гипотез была проведена для различных наборов ограничений на  $\Lambda$  и  $\beta$ , чтобы определить - какой набор ограничений максимизирует чувствительность детектора к обнаружению тени Солнца. Было обнаружено, что чувствительность практически постоянна для ограничений:  $-6. \leq \Lambda_{cut} \leq -5.9$  и  $0.6^\circ \leq \beta_{cut} \leq 1.5^\circ$ .

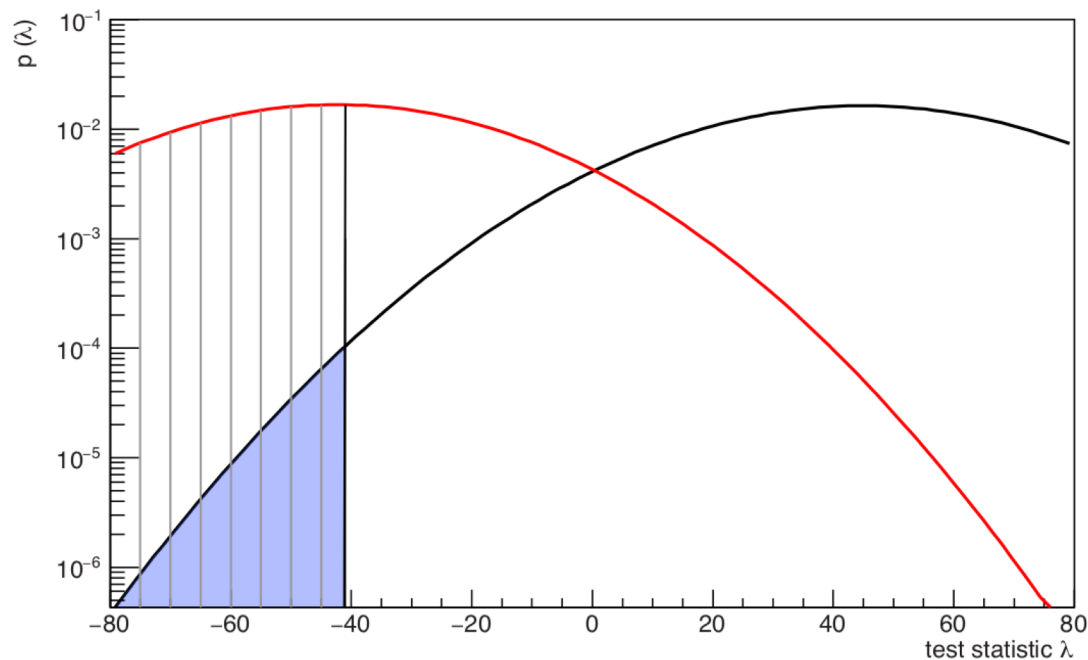
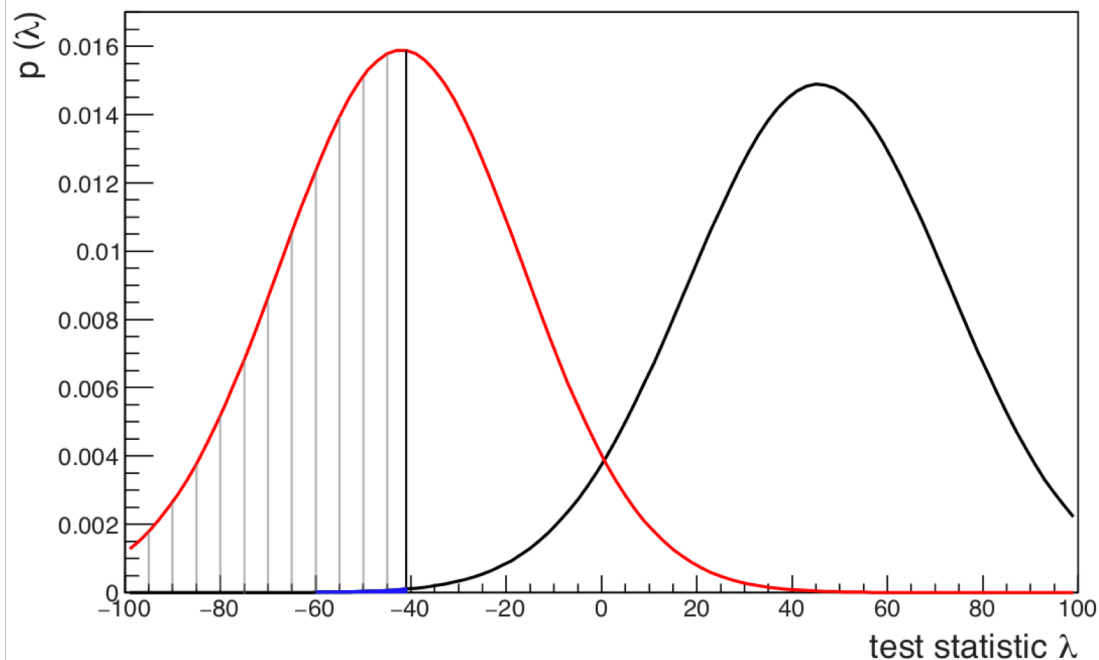
В этом пространстве ограничений был выбран конкретный набор:  $\Lambda_{cut} = -5.9$  и  $\beta_{cut} = 1.1^\circ$ . Для этого набора ограничений плотность мюонов вдали от Солнца (в фоновой области) - изотропна, что является важным фактором в оценки статистической значимости результатов



# Анализ тени Солнца

На данных графиках показаны распределения статистических функций  $\lambda_1$  и  $\lambda_0$  (красная и черная кривая, соответственно). Заштрихованная область представляет 50% псевдо-экспериментов, которые соответствуют гипотезе  $H_1$  (наличие тени Солнца).

Синяя область ниже распределения  $\lambda_0$  соответствует вероятности того, что эффект тени Солнца, на самом деле, является флуктуацией. Значение этой вероятности равно  $7.4 \times 10^{-4}$ , соответствующая статистическая значимость составляет  $3.4\sigma$ .



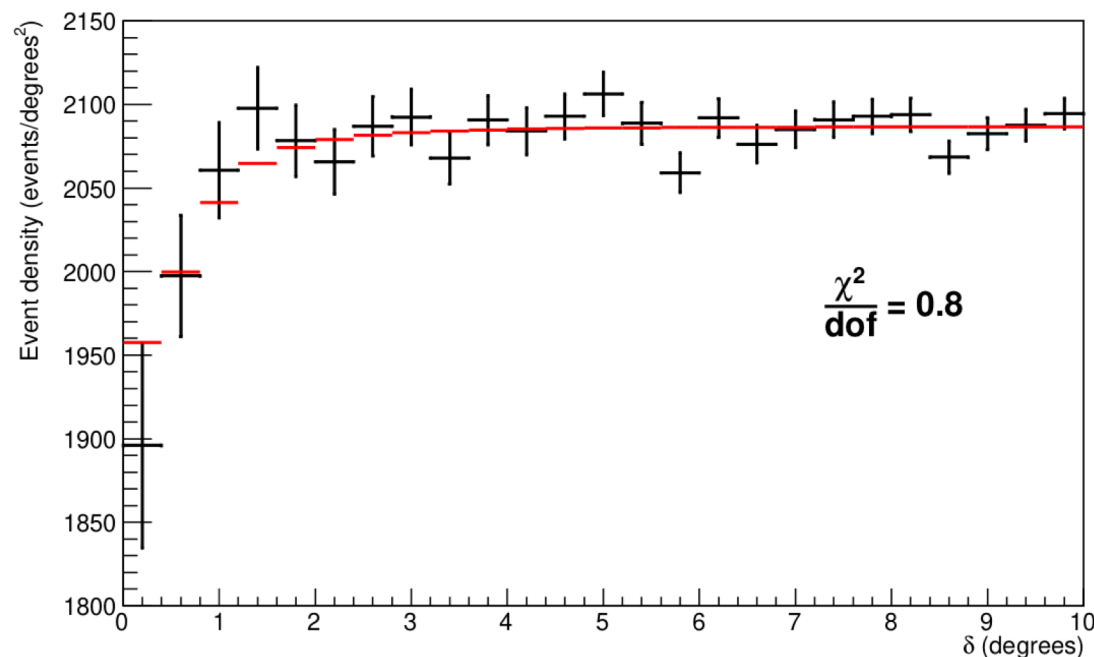
Для анализа эффекта тени Солнца были отобраны события, зарегистрированные телескопом ANTARES в период с 2008 по 2017 год, которые удовлетворяют ограничениям на параметры качества восстановленных треков, полученным выше. Всего было отобрано  $1.5 \times 10^6$  событий. Гистограмма распределения событий для реальных данных строилась также, как гистограмма событий для данных МК моделирования, описанная выше в процедуре проверки статистических гипотез.



# Анализ тени Солнца

Для того чтобы оценить количество событий, которые будут отсутствовать в данных из-за эффекта тени Солнца, использовалась функция рассеяния точки (ФРТ), полученная путем МК моделирования.

Поскольку Солнце не является точечным источником, ФРТ была свернута со ступенчатой функцией размером  $0.26^\circ$ , которая отражает наличие конечного размера Солнца. Затем, ФРТ была нормализована к гистограмме с реальными данными. Значение  $\chi^2/dof$  между данными и нормализованной ФРТ составляет 0.8. На графике представлены обе полученные гистограммы.



# Анализ тени Солнца

Ожидаемое число событий, которые будут отсутствовать в данных из-за эффекта тени, оценивалось путем вычисления площади ФРТ в области, соответствующей тени. В результате, предполагаемое количество поглощенных событий на один градус составляет  $N_{abs} = 118.5$ . Чтобы оценить угловое разрешение детектора, гистограмма с реальными данными была аппроксимирована следующей функцией:

$$f(\delta) = \frac{dN}{d\delta^2} = k \left( 1 - \frac{A_{data}}{\sigma_{res}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{res}^2}} \right)$$

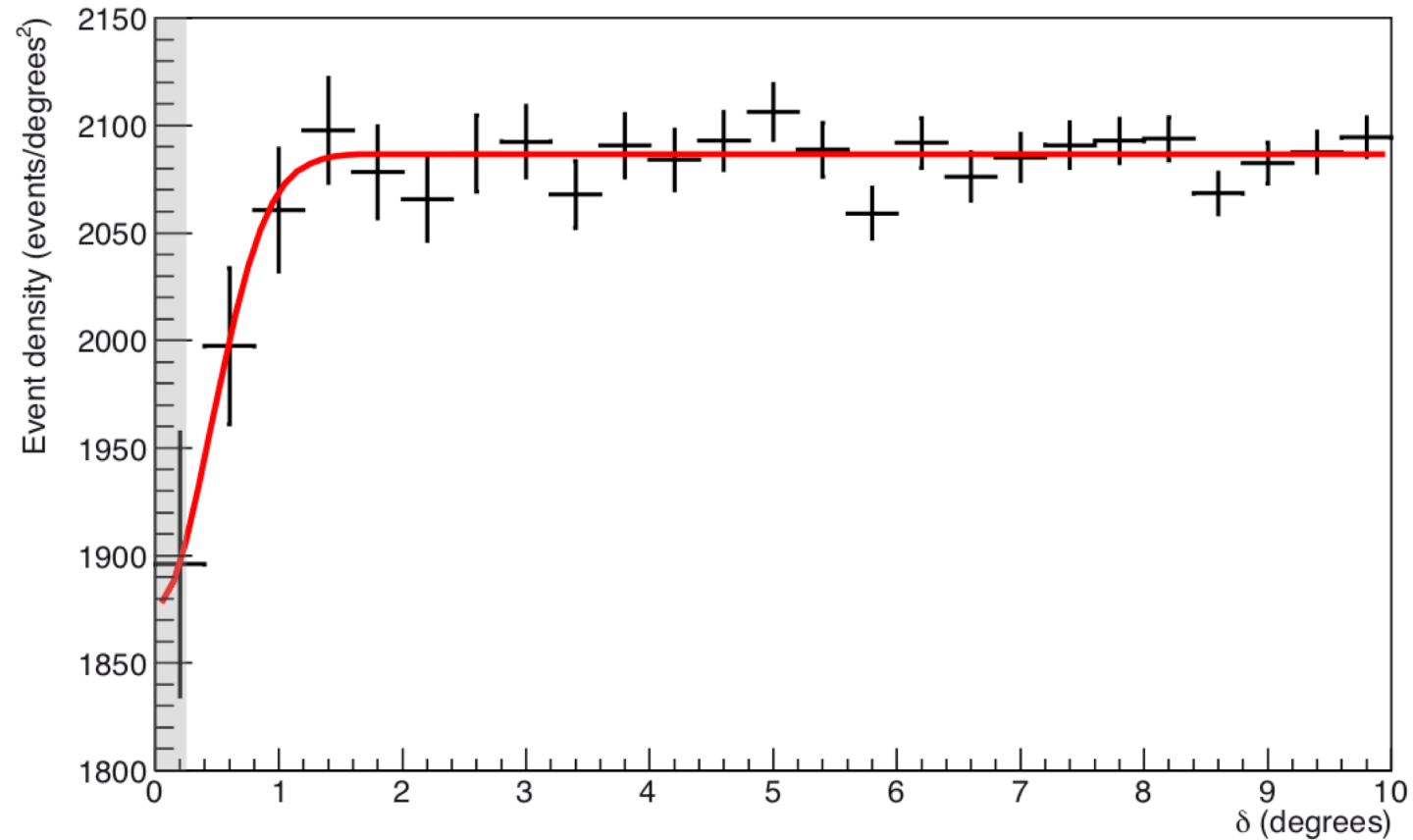
где  $k$  – средняя плотность событий в случае отсутствия эффекта тени,  $\delta$  – угловое расстояние от центра Солнца,  $\sigma_{res}$  – угловая разрешающая способность телескопа и  $A_{data} = \frac{N_{abs}}{\sqrt{\pi/2k}}$ , чтобы

$$\int_0^{\infty} (k - f(\delta)) d\delta = N_{abs}$$

Таким образом, количество поглощенных событий в данных равно количеству поглощенных событий, полученному из ФРТ.

# Анализ тени Солнца

Значение угловой разрешающей способности из аппроксимации:  $\sigma_{res} = 0.45^\circ \pm 0.12^\circ$ .



# Анализ тени Солнца

Статистическая значимость результатов оценивалась с помощью метода проверки гипотез. Для гипотезы  $H_0$  предполагается, что эффект тени отсутствует, поэтому гистограмма распределения мюонов сравнивается с функцией  $\frac{dN}{d\delta^2} = k$ , соответствующее значение  $\chi^2$ :  $\chi_0^2 = 34.19$ .

Гипотеза  $H_1$  соответствует наличию эффекта тени в данных, и гистограмма аппроксимируется функцией, используемой для нахождения разрешающей способности. Из этой аппроксимации получается значение  $\chi_1^2 = 17.82$ . Затем, вычисляется статистическая функция  $\lambda$ :  $\lambda = \chi_1^2 - \chi_0^2$ . Функция  $-\lambda$  следует распределению  $\chi^2$  с одной степенью свободы. Это позволяет оценить статистическую значимость обнаружения тени Солнца: значение  $-\lambda$  составляет 16.37, соответствующее значение вероятности (p-value) равно  $1.5 \times 10^{-5}$ . Статистическая значимость составляет **3.9 $\sigma$** .

# Анализ тени Солнца

Центр тени может быть смещен из-за воздействия магнитного поля Солнца на первичные космические лучи. Для исследования данного эффекта было построено двумерное распределение мюонов, в центре которого расположен центр Солнца. Затем, данная гистограмма была аппроксимирована полиномом второй степени – функцией, описывающей фон.

Функция, описывающая наличие сигнала (тени Солнца) получается путем вычитания из полинома двумерной функции Гаусса:

$$f_{sh}(x, y) = p_2(x, y) - \frac{A_{sh}}{2\pi\sigma_{res}^2} \exp\left(-\frac{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}{2\sigma_{res}^2}\right)$$

где  $(x_s, y_s)$  – координаты центра тени Солнца;

$A_{sh}$  - амплитуда дефицита в потоке мюонов, вызванного эффектом тени;

$\sigma_{res}$  - фиксированное значение угловой разрешающей способности, найденное выше.

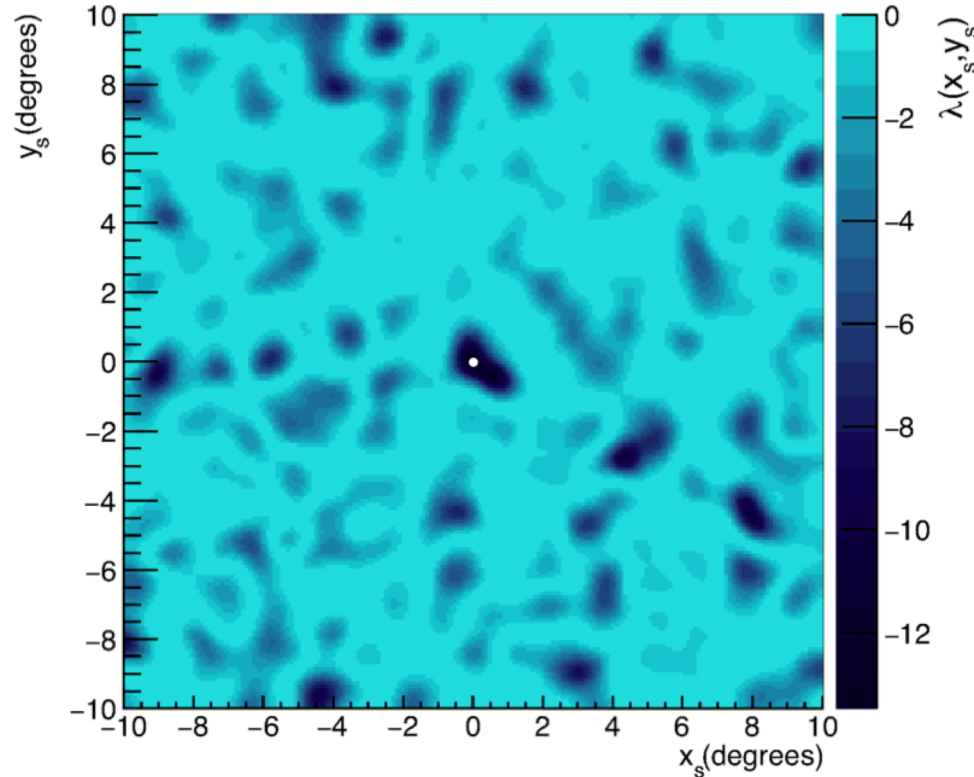
# Анализ тени Солнца

Для оценки возможного смещения, положение центра тени Солнца  $(x_s, y_s)$  предполагается в различных точках двумерной гистограммы, с шагом  $0.1^\circ$ . Реальное расположение центра Солнца - точка  $(0^\circ, 0^\circ)$ .

Затем, для каждого смещения центра тени вычисляется статистическая функция  $\lambda$ :  $\lambda(x_s, y_s) = \chi_{Sun}^2 - \chi_{NoSun}^2$ , где  $\chi_{NoSun}^2$  - значение  $\chi^2$ , полученное из аппроксимации гистограммы полиномом второй степени (функцией, описывающей фон). Это значение является константой для всех точек гистограммы.  $\chi_{Sun}^2$  - значение, полученное из аппроксимации функцией, описывающей сигнал.

# Анализ тени Солнца

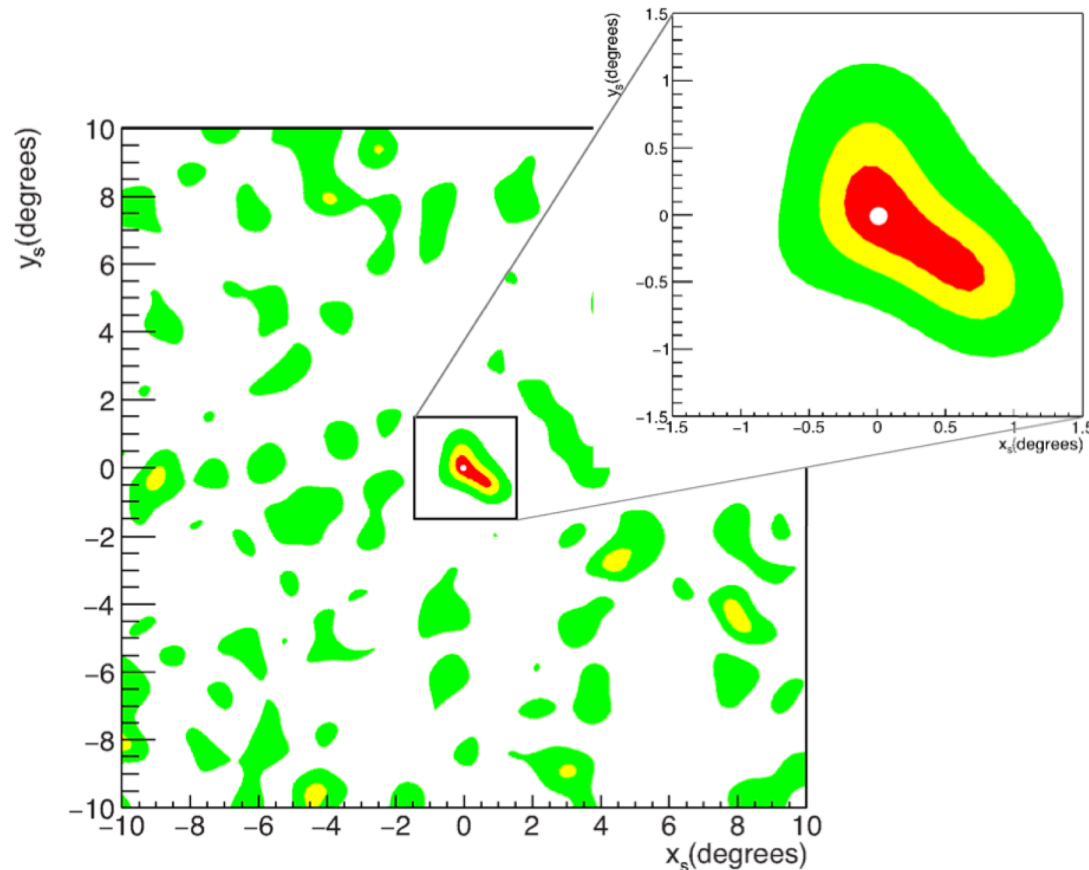
Ниже показано распределение статистической функции  $\lambda(x_s, y_s)$ .



Минимальное значение этой функции было найдено в точке  $(0^\circ, 0^\circ)$ :  $\lambda_{min} = -13.48$ . В каждой точке гистограммы  $-\lambda(x_s, y_s)$  следует распределению  $\chi^2$  с одной степенью свободы. Тем самым, можно вычислить статистическую значимость детектирования тени Солнца, используя данный двумерный подход. Значение  $\lambda_{min}$  соответствует значению вероятности (p-value) равному  $2.4 \times 10^{-4}$ . Статистическая значимость составляет **3.5 $\sigma$** .

# Анализ тени Солнца

На данном графике представлено распределение интервалов, построенных вокруг точки  $(0^\circ, 0^\circ)$ , в которой функция  $\lambda(x_s, y_s)$  принимает наименьшее значение. Интервалы соответствуют уровням доверия:  $\lambda(x_s, y_s) \leq \lambda_{cut} = \lambda_{min} + Q$ , где  $Q$  - это квантиль, соответствующий распределению  $\chi^2$  с двумя степенями свободы (в данном случае, это  $x_s$  и  $y_s$ ) и определенному уровню доверия. Используемые уровни доверия: {68.27%, 95.45%, 99.73%}.





# Заключение

- Одной из основных целей телескопа ANTARES является поиск точечных источников нейтрино. В связи с этим, крайне важно корректно оценить угловую разрешающую способность детектора.
- В данной работе представлено исследование эффекта тени Солнца в потоке атмосферных мюонов с помощью нейтринного телескопа ANTARES. Анализ основан на данных телескопа, зарегистрированных в период с 2008 по 2017 гг.
- Эффект тени Солнца был исследован с помощью двух взаимодополняющих подходов, которые позволили определить угловую разрешающую способность детектора. Полученное значение разрешающей способности составляет  $0.45^\circ \pm 0.12^\circ$ . Статистическая значимость результатов -  $3.9\sigma$ . Также, было установлено, что центр тени совпадает с истинным расположением центра Солнца.