

Анализ пузырей Ферми по данным нейтринного телескопа АНТАРЕС

Владимир Куликовский

Обзор

- Введение – источники нейтрино
- **Основная работа: поиск излучения нейтрино в зоне пузырей Ферми**
 - Пузыри Ферми – протяжённые источники гамма излучения высокой энергии в нашей Галактике
 - Модели: если это адронный ускоритель, ожидается излучение нейтрино
 - **Цель работы: проверка существования излучения нейтрино из этого региона, используя данные АНТАРЕСа**
 - Описание детектора АНТАРЕС
 - Конструкция
 - Восстановление событий
 - Основные разработки:
 - улучшенный контроль качества данных (используя моделирование для каждого периода данных)
 - офф-зоны (оценка фона по данным)
 - оптимизация выборки событий (выбор параметров, метод оптимизации)
 - статистические методы (оптимизация, оценка значимости, расчёт пределов)
- Дополнительные слайды:
 - Описание трёх событий с наибольшей энергией
 - Контроль применимости метода офф-зон



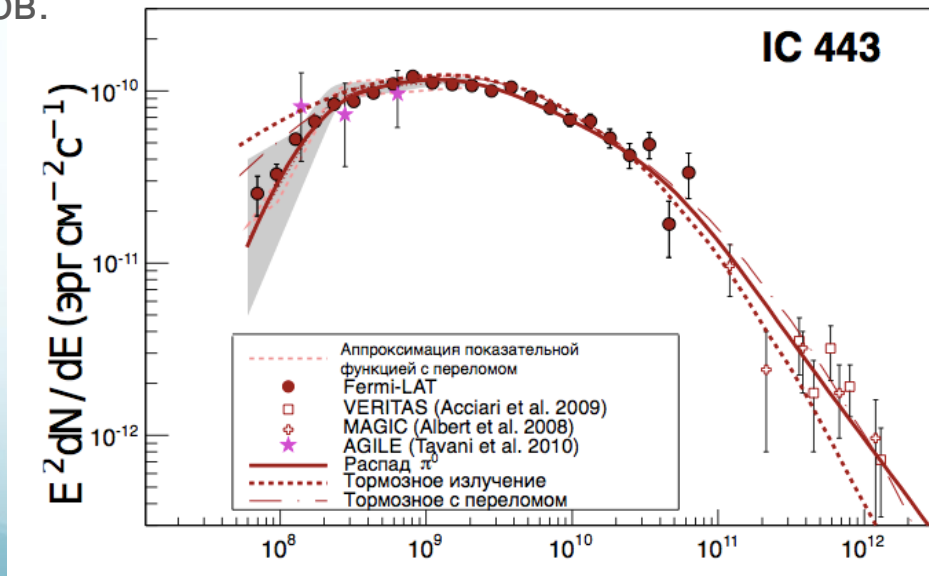
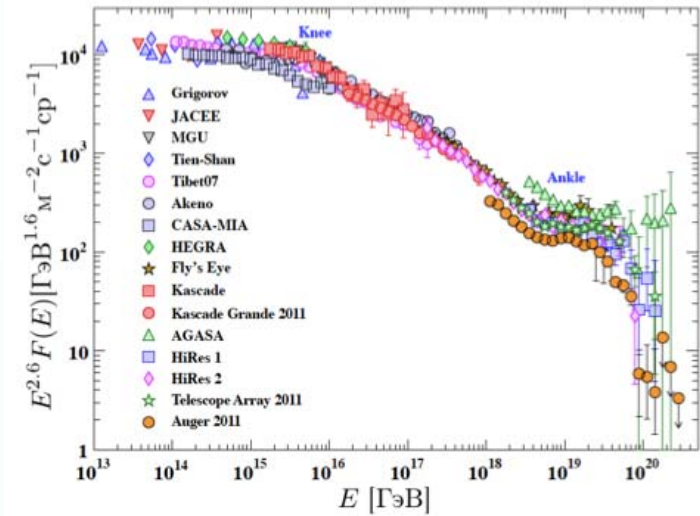
Источники нейтрино

- Наличие космических лучей высоких энергий важно, так как их взаимодействие с межзвёздным веществом или молекулярными облаками приводит к образованию мезонов.
- В частности:

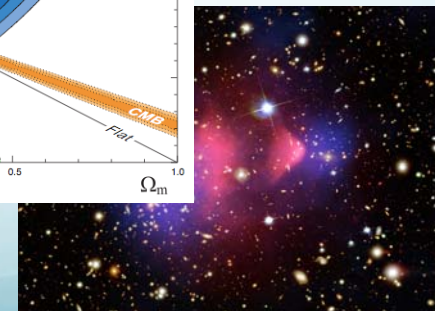
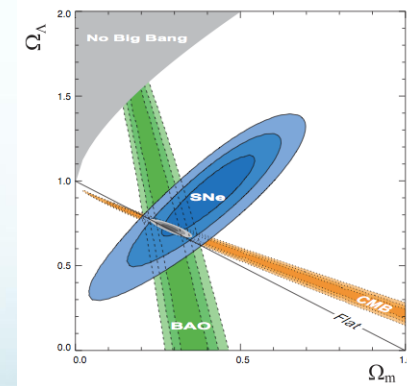
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

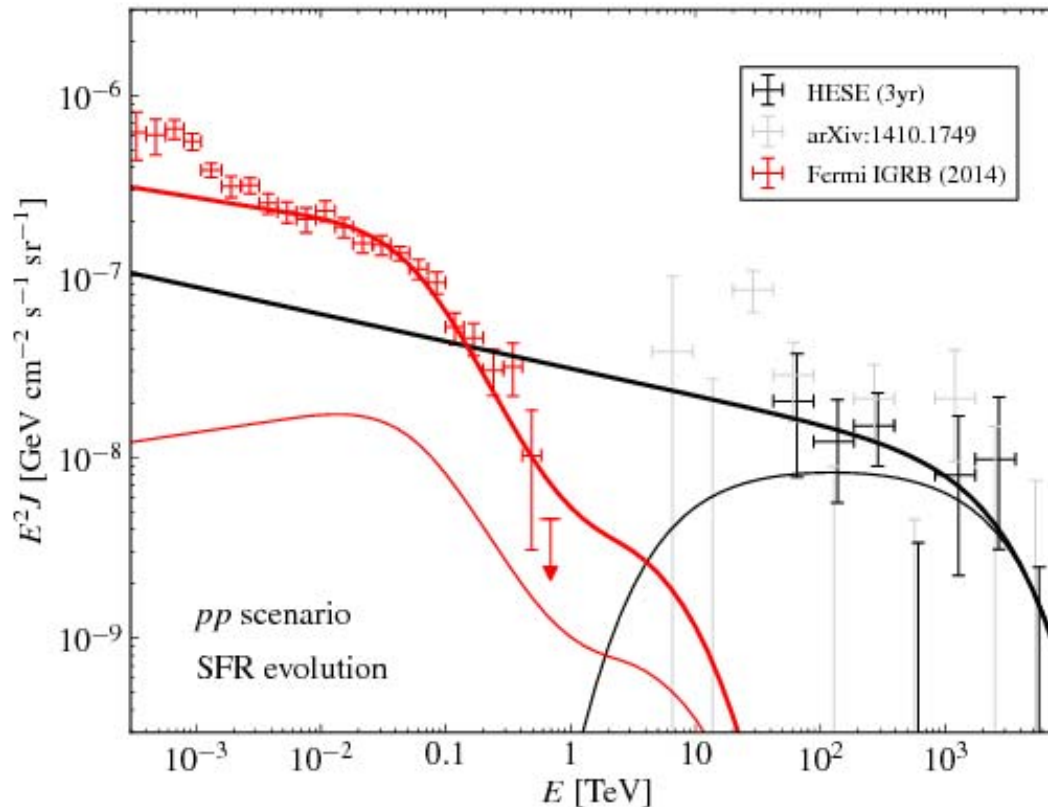
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$
- Гамма спектры остатков сверхновых (IC 443, W 44) фотируются лучше моделью с распадом пионов.



- Распады тёмной материи





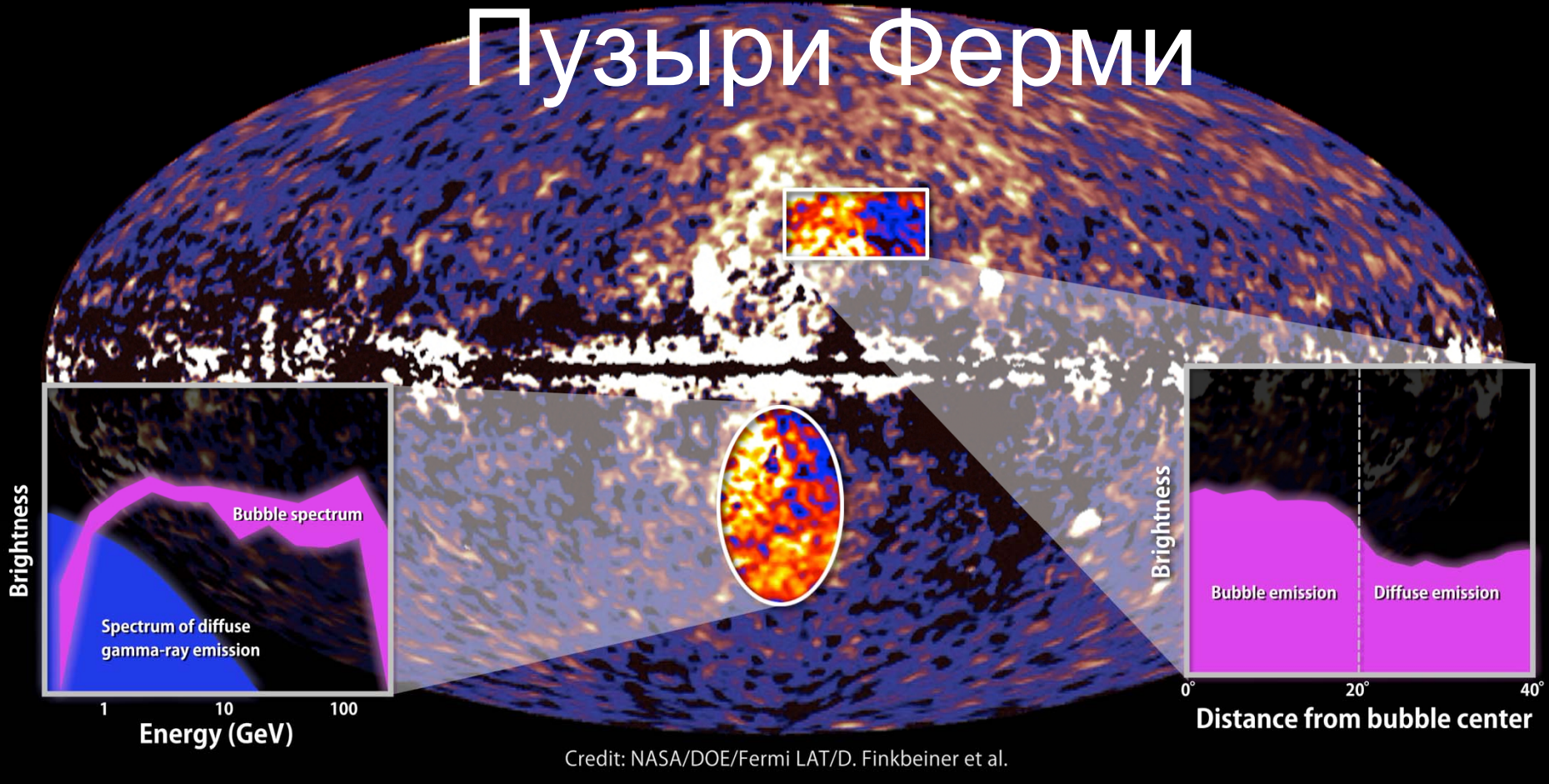
arXiv:1412.5106

arXiv:1306.3417

- pp модели источников нейтрино и гамма (интегрированный ускоритель и мишень: галактические кластеры, ускорение близи ядер активных галактик, галактики с активным звездообразованием).
- Фитирование спектра ν : $E^{-\Gamma}$, $\Gamma \leq 2.2$ и экспоненциальным обрезанием. (1)
- Гамма теряют энергию при взаимодействии с межгалактическим фоновым излучением. Их спектр рассчитанный по (2) идеально описывает данные! Все излучение γ, ν высоких энергий от адронных ускорителей?!
- рр модели не дают значительное количество гамма ГэВ-ТэВ (источники в отличие от рр не прозрачны для них!)



Пузыри Ферми



- Однородная интенсивность. Чёткие границы.
- $E^2 d\Phi_\gamma/dE \approx 3 - 6 \times 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- Расположение коррелирует с областями в микроволновом излучении (WMAP), гамма лучах (ROSAT) и радиоволнах
- Correlated with the patterns in microwaves (WMAP), X-rays (ROSAT), radio.
- Различные модели с наличием излучения нейтрино и без.



Пузыри Ферми

Галактический ветер

- Протоны из центра галактики (активный центр звездообразования) удерживаются магнитным полем.
- Взаимодействие с межзвёздным веществом, получение и распад пионов – гамма лучи. Микроволны – синхротронное излучение от вторичных электронов.
- Долгий процесс инъекции протонов – не должны быть резкие границы.
- Зоны, «насыщенные» протонами – объёмное излучение.
- Отсутствие $N\alpha$ излучения как в других галактиках с галактическим ветром.

Активное звездообразование

Вторичное ускорение Ферми

Распад тёмной материи

- Можно предсказать спектр, морфологию амплитуду гамма лучей
- Не производит резких граней

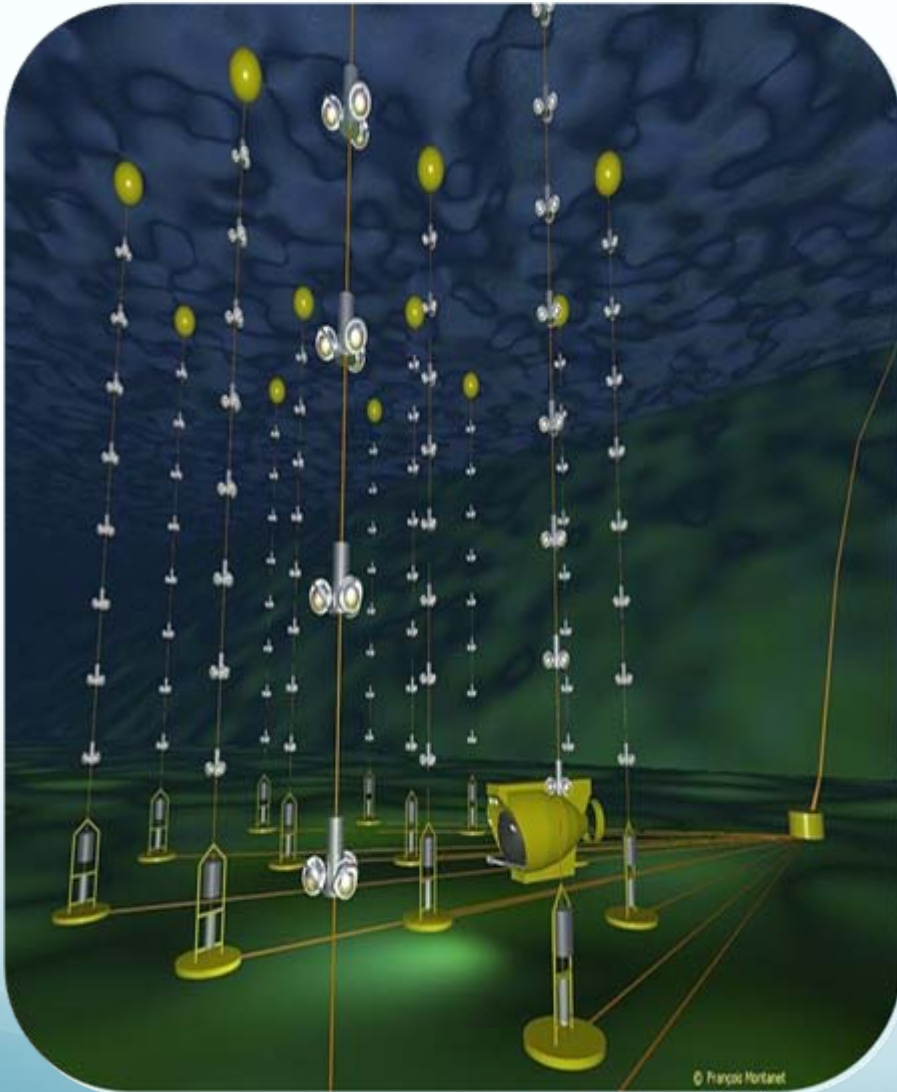
Активное ядро Галактики

- Падение материи на чёрную дыру в центре Галактики 1млн лет назад; появление джета.
- Эпизодическое – чёткие грани.
- Может произвести нужную мощность гаммы и микроволнового излучения.
- Нежелательное затемнение по краям и к основанию пузырей.
- Нестабильности по краям? (Снижаются вязкостью.)
- Отсутствие радио-«оболочки» на больших широтах.
- Мягкий спектр электронов.

Скорей всего смешанная модель. Например, пузыри, надутые джетом и заполненные электронами от распада тёмной материи или галактического ветра. Простые модели не предсказывают всей морфологии (плоская светимость, острые углы).

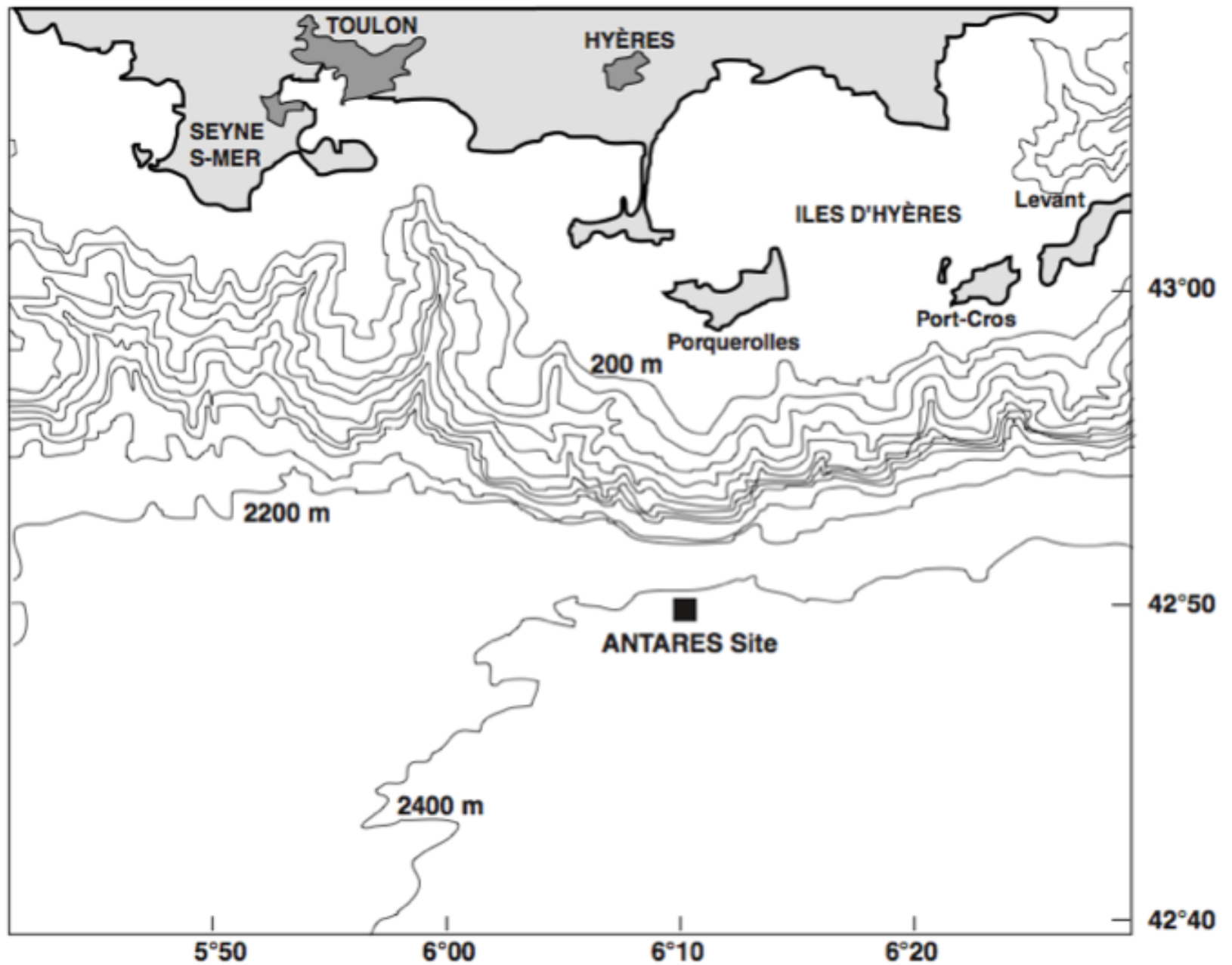


Телескоп АНТАРЕС

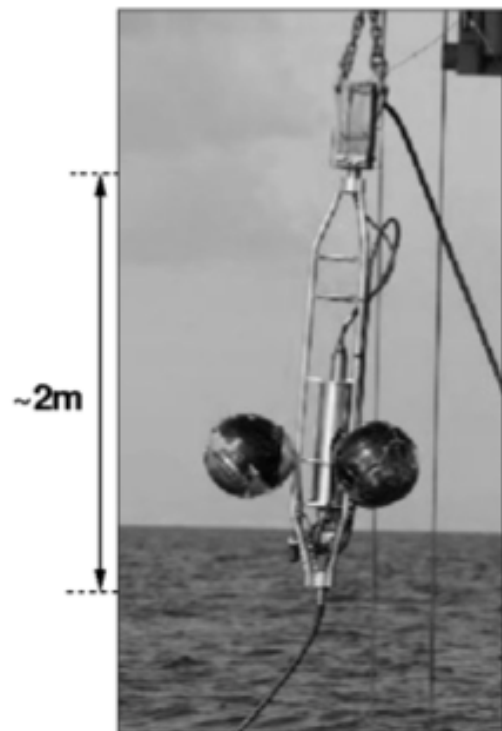


- черенковский детектор
- массив из 875 ФЭУ
- морская вода (однородная, хорошие оптические свойства)
- глубина 2475 м depth (основной фон – атмосферные мюоны)
- функционирование с 2007
- использованные данные для анализа 2008–2011 год





Этаж



буй

L12

IL07

~480m

14.5m
100m

кабель

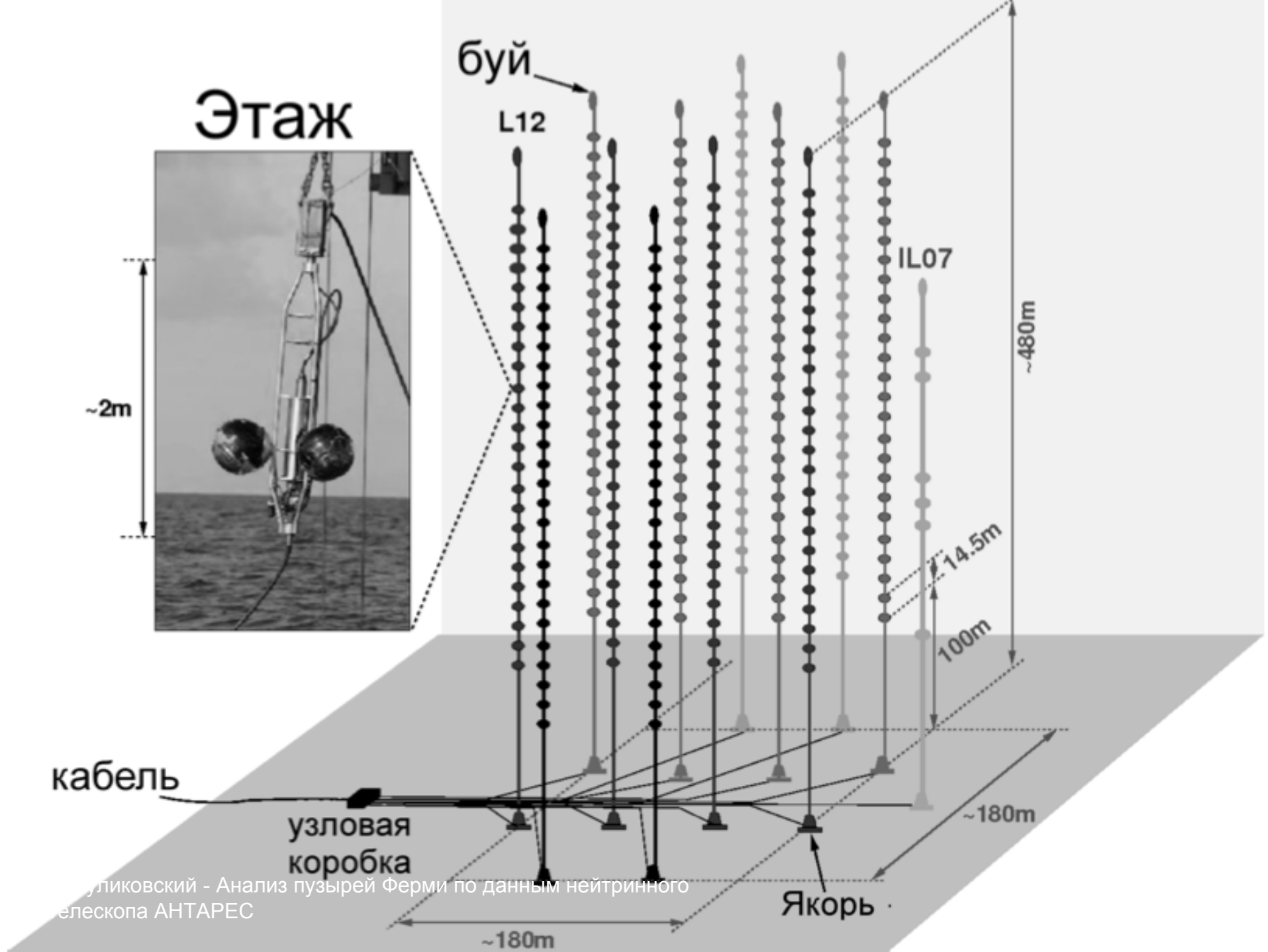
узловая
коробка

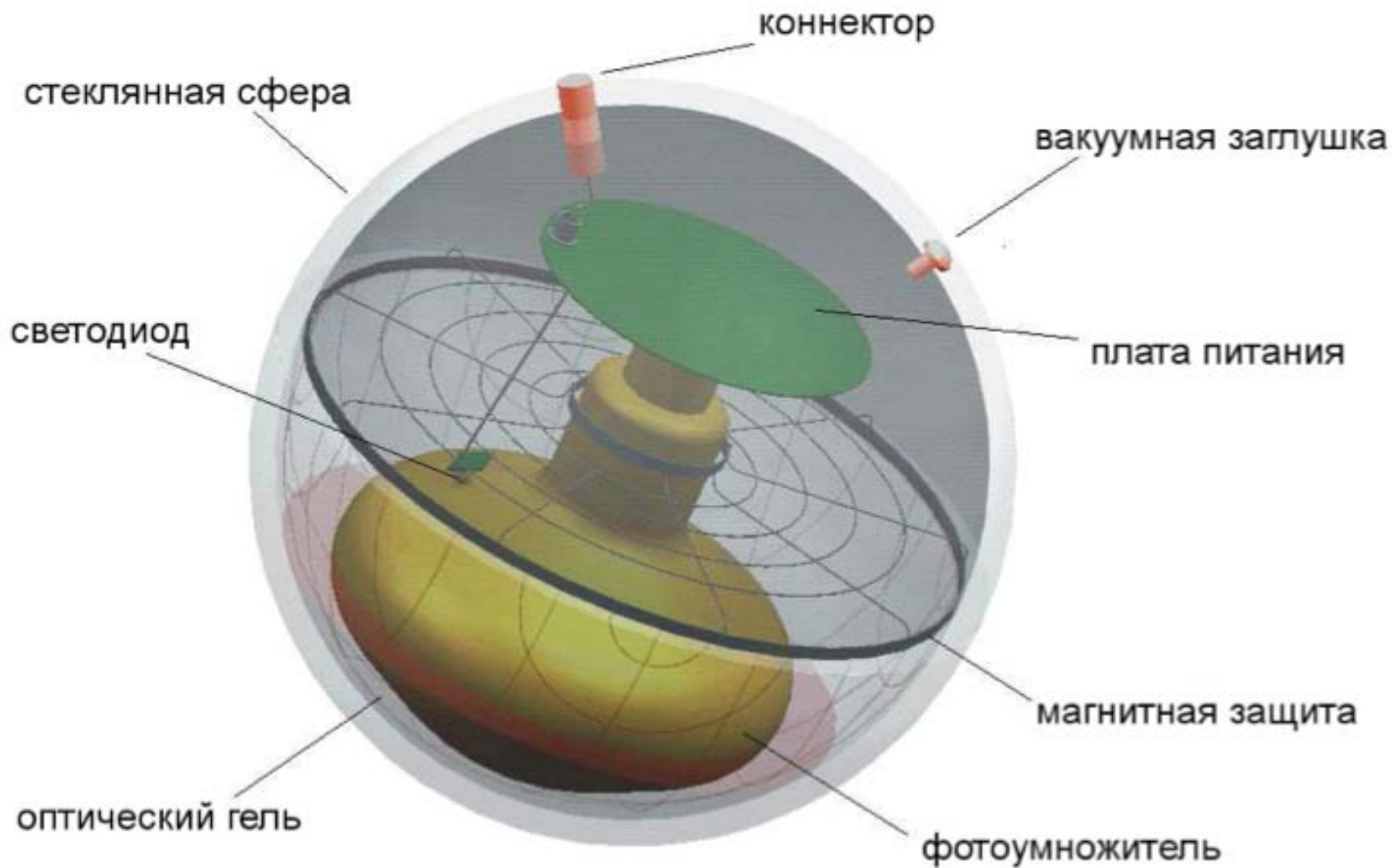
~180m

Якорь

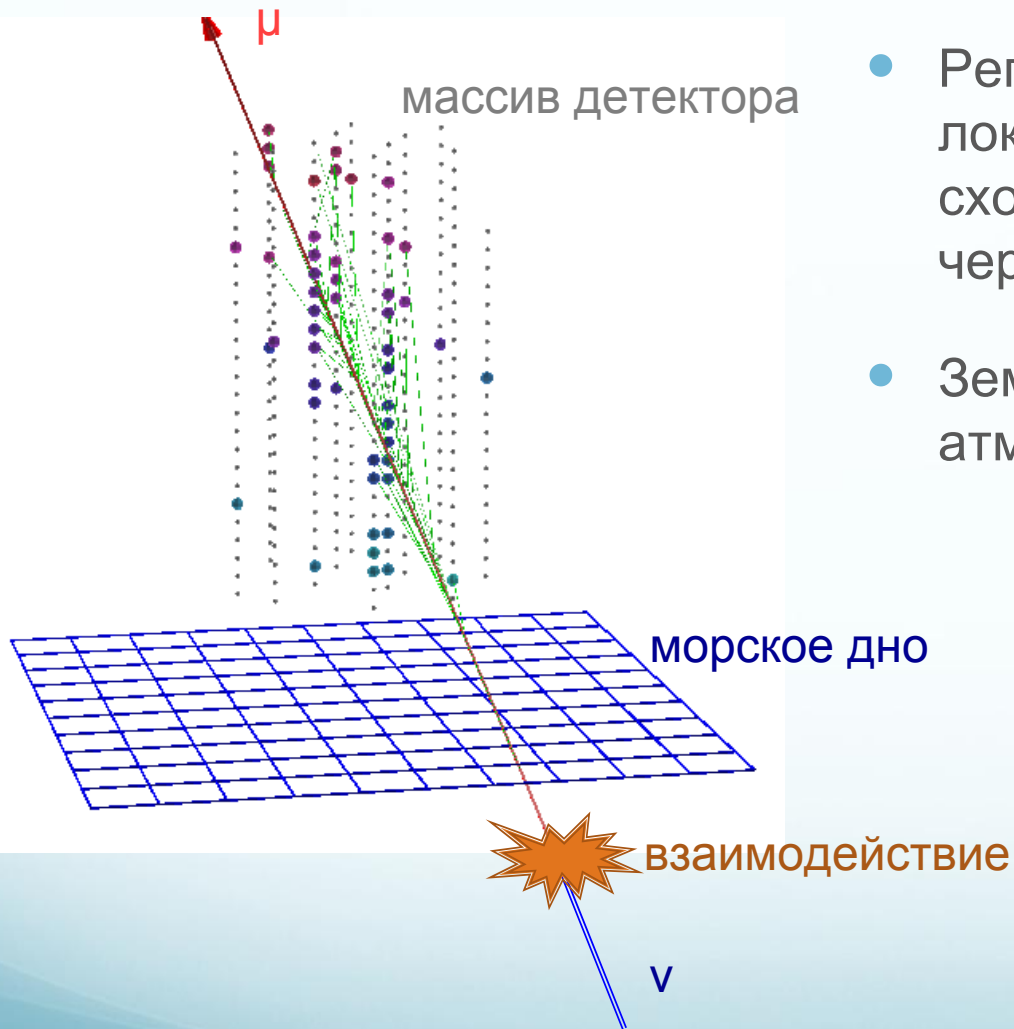
~180m

Куликовский - Анализ пузырей Ферми по данным нейтринного телескопа АНТАРЕС

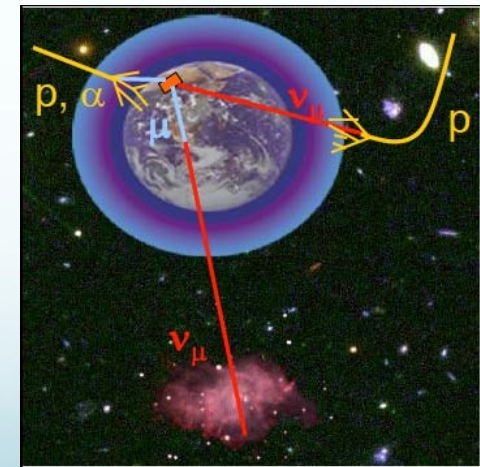




Принцип регистрации

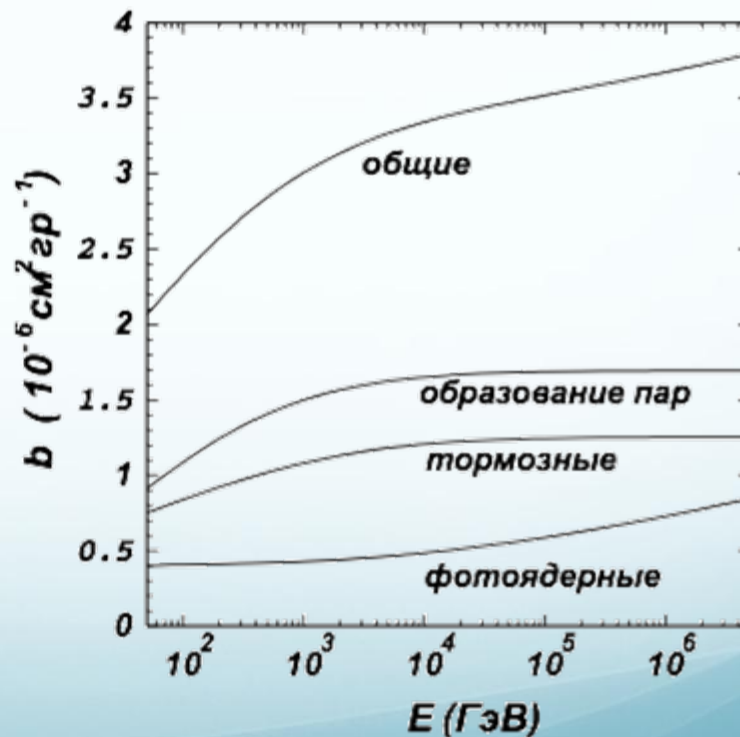
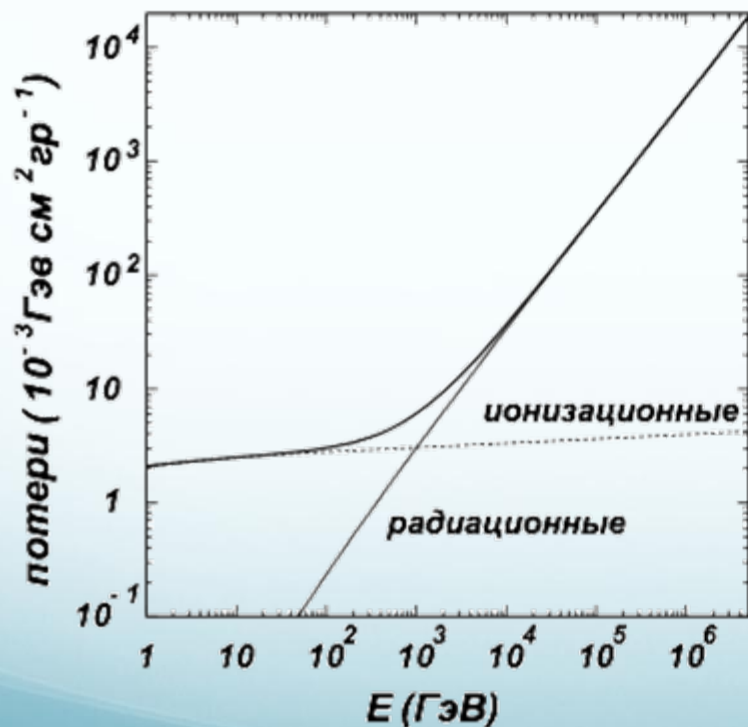


- Регистрация основана на локальных совпадениях, схожих с фронтом черенковского излучения
- Земля является щитом от атмосферных мюонов



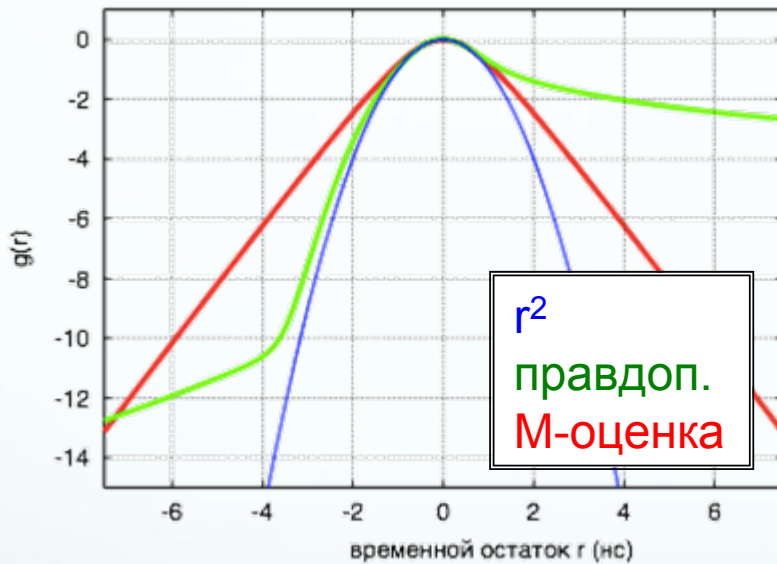
Принцип регистрации

- Черенковское излучение – равномерное излучение вдоль траектории под определённым углом. Для восстановления траектории.
- Ионизационные потери – равномерные, практически не зависят от энергии. Длина траектории пропорциональна энергии мюона.
- Радиационные потери – стохастические, пропорциональны энергии. Количество фотонов на длину траектории пропорционально энергии.

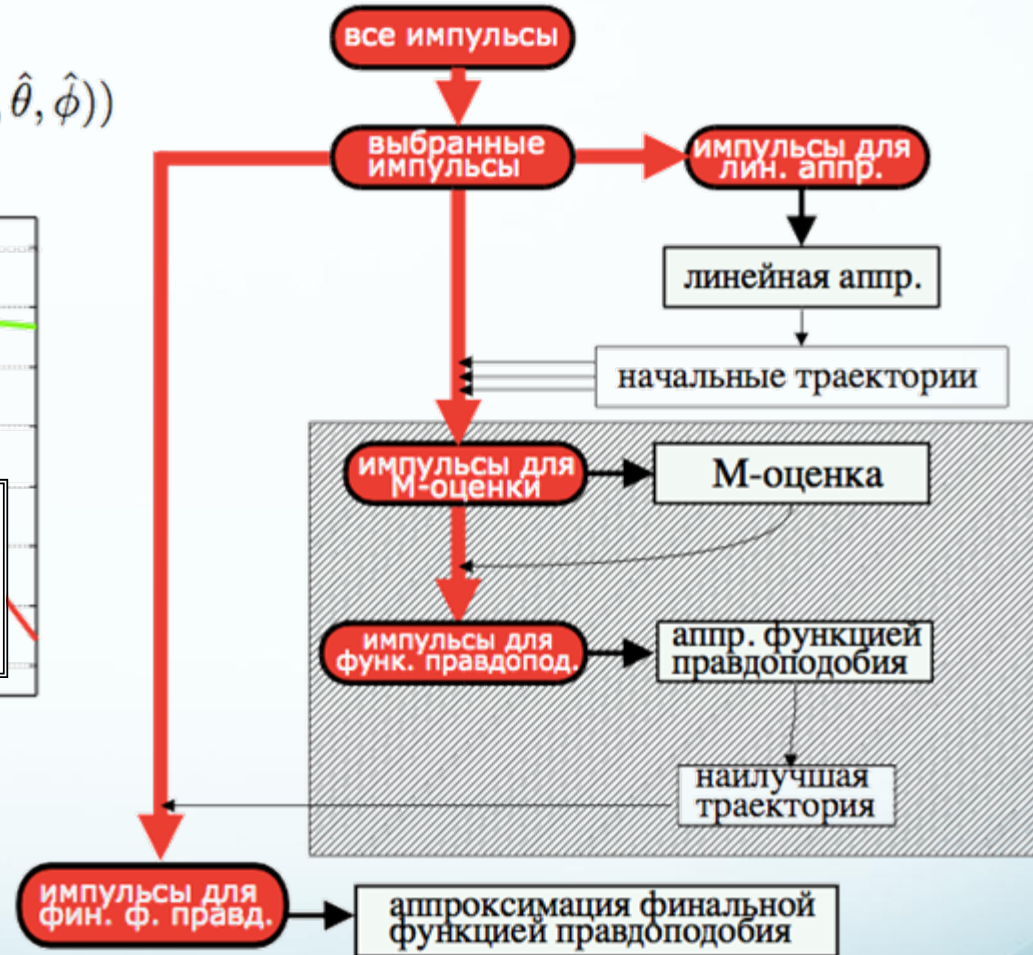


Реконструкция траектории

$$r_i = t_i - t_i^p(\vec{p}, \theta, \phi) \quad Q = \sum_{i=1}^{N_{\text{hits}}} g(r_i(\vec{p}, \hat{\theta}, \hat{\phi}))$$



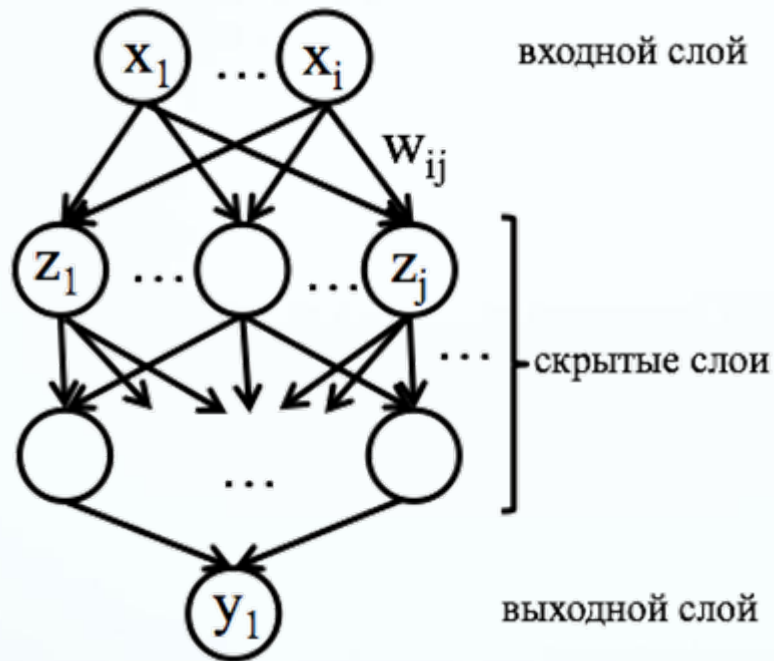
- Многоэтапное фитирование для большей устойчивости и борьбы с фоном.



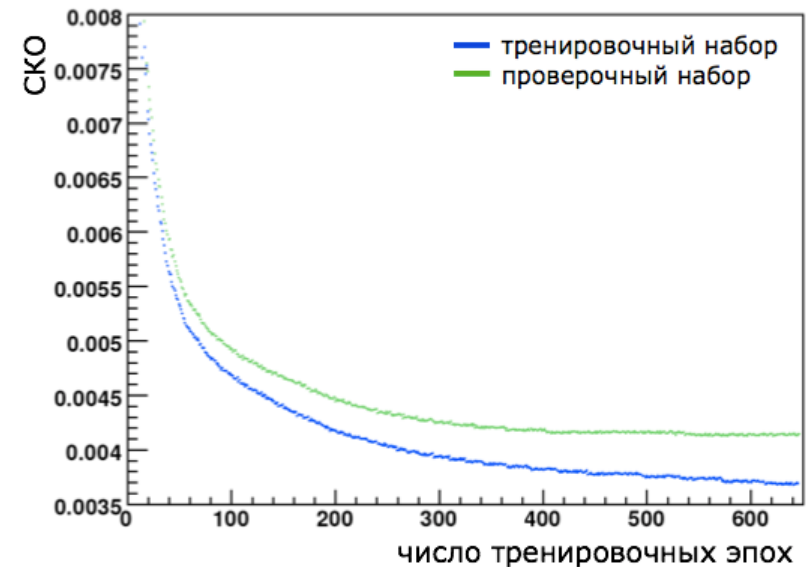
$$\Lambda = \frac{\mathcal{L}}{N_{\text{импульсов}} - 5} + 0.1 \times (N_{\text{траекторий}} - 1)$$



Реконструкция энергии



$$\text{СКО} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k^{\text{ИНС}} - y_k^{\text{истина}})^2$$



- Параметры без известной траектории: суммарный заряд, продолжительность события по времени, среднеквадратичное отклонение по времени от первого импульса...
- Параметры с известной траекторией – среднее, среднеквадратичное распределения временных остатков, заряда, расстояния до траектории. Количество импульсов в цилиндрические разбиениях по 20 м.



Реконструкция событий

- Траектории восстанавливаются по зарегистрированным фотонам (фитирование функцией правдоподобия). На выходе фитирования:
 - направление,
для выбора восходящих событий из определенной части неба;
 - **качество восстановленной траектории Λ ,**
для отделения фона от неправильно восстановленных мюонов;
 - оценка угловой ошибки β ,
 $\beta < 1^\circ$ для нейтрино, чтобы обеспечить необходимую точность местоположения;
 - число фотонов, использованное в фитировании, n_{hits} ,
 $n_{hits} > 10$;
 - два фитирования χ^2 : прямая линия ($tchi2$), точечный источник ($bchi2$),
 $tchi2 < bchi2$ для отбрасывания точечных событий (каскадов).
- **Реконструкция энергии.** Искусственные Нейронные Сети.
Для выделения сигнала из атмосферных нейтрино



Схема анализа

- Определение части неба для оценки фона (офф-зона).
- Оптимизация выборки событий (без использования данных!):
 - Наибольшая вероятность регистрации сигнала? Или
 - Наилучшие верхние пороги если сигнал не был увиден?
- Применение к данным. Сигнал был увиден?
 - Да (значимость $> 3/5 \sigma$)
Утверждать очевидность/открытие!
 - Нет (значимость $\ll 3 \text{ sigma}$)
Устанавливать верхний предел на поток нейтрино.



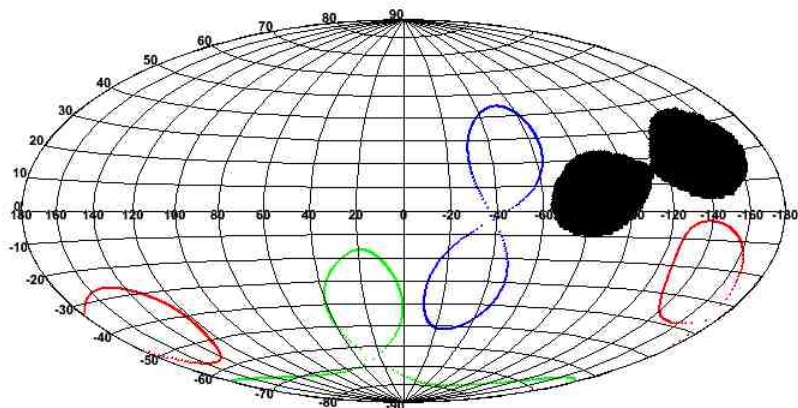
Метод офф-зон

- Не основывается на моделировании фона для измерения уровня сигнала.
- Моделирование используется только для:
 - оптимизации выборки событий (слепой метод),
 - оценки потоков нейтрино (пределы).



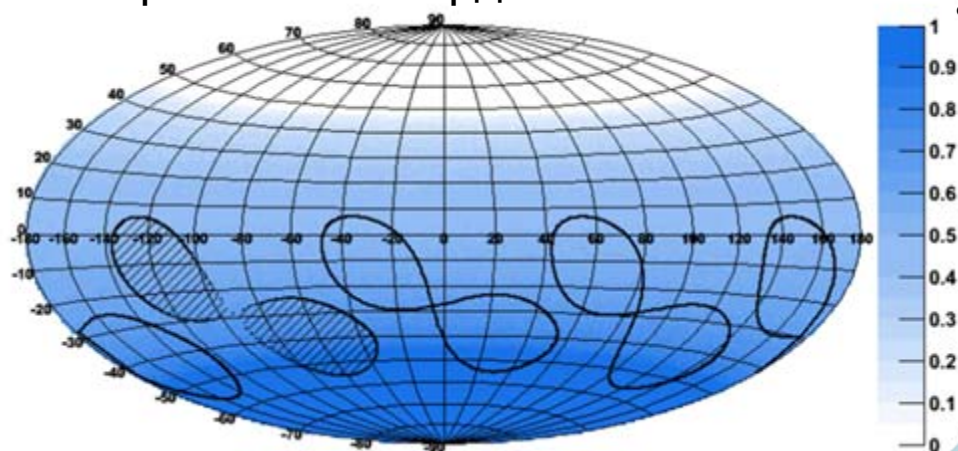
Метод офф-зон

местные координаты



- Зона пузырей Ферми (чёрная) движется в местных координатах со временем.
- Офф-зоны следуют за он-зоной в местных координатах, для достижения одинаковой средней эффективности детектора.
- При таком определении офф-зоны зафиксированы на небе.
- Можно выбрать 3 непересекающиеся офф-зоны.

экваториальные координаты

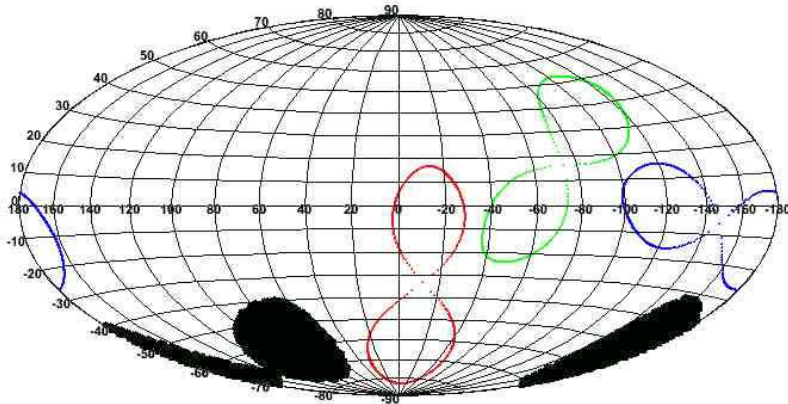


**Проверка на данных и моделировании:
Не обнаружено различий
между зонами в пределах
стат. флуктуаций.**



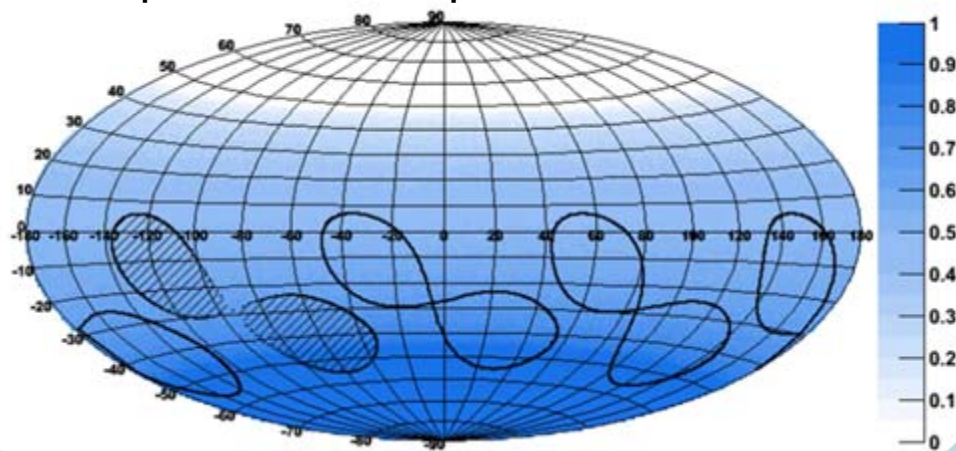
Метод офф-зон

местные координаты



- Зона пузырей Ферми (чёрная) движется в местных координатах со временем.
- Офф-зоны следуют за он-зоной в местных координатах, для достижения одинаковой средней эффективности детектора.
- При таком определении офф-зоны зафиксированы на небе.
- Можно выбрать 3 непересекающиеся офф-зоны.

экваториальные координаты



**Проверка на данных и моделировании:
Не обнаружено различий
между зонами в пределах
стат. флуктуаций.**



Моделирование

- Поток атмосферных нейтрино моделируется согласно Argaval et al. (1996) «модель группы Бартола»
- Неопределённость атмосферного потока 20%-30.
- Сигнал моделируется согласно измеренному потоку гамма лучей (Villante & Vissani, 2008):

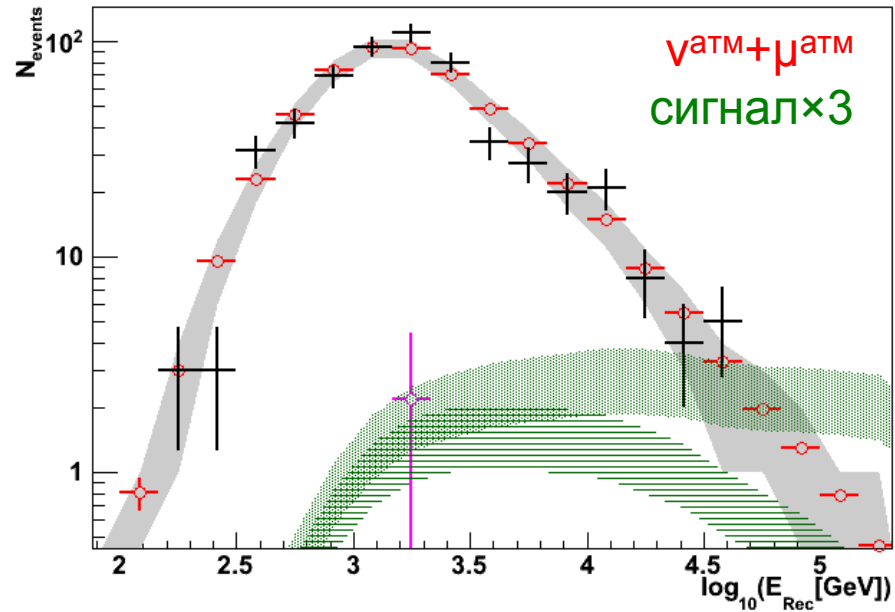
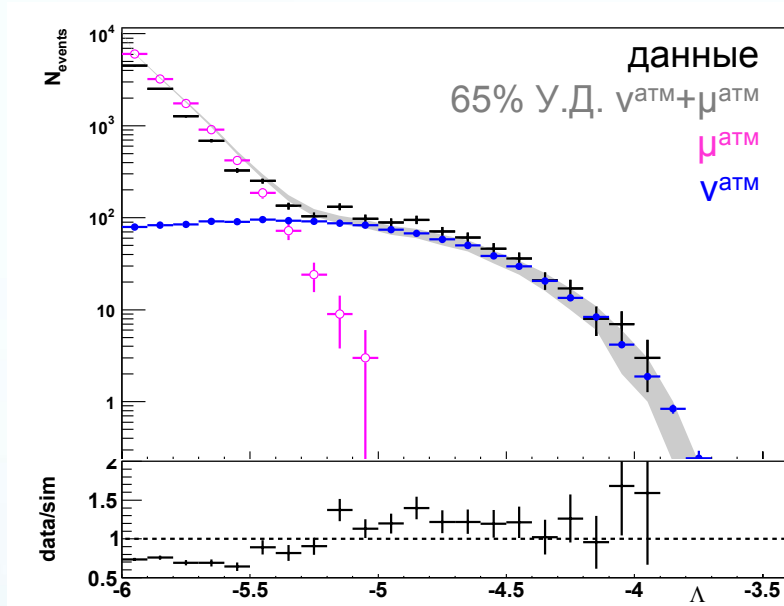
$$\Phi_{\nu_{\mu}} = 0.211 \square \Phi_{\gamma} \quad \Phi_{\bar{\nu}_{\mu}} = 0.195 \square \Phi_{\gamma}$$

- Экспоненциальное обрезание ожидается на 50 ТэВ– 500 ТэВ (обрезание спектра космич. лучей /20).

$$E^2 d\Phi_{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}} / dE = \boxed{1.2 - 2.4} \times 10^{-7} e^{-E/E_{\nu}^{\text{cutoff}}} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$



Сравнение с данными (для офф-зон)

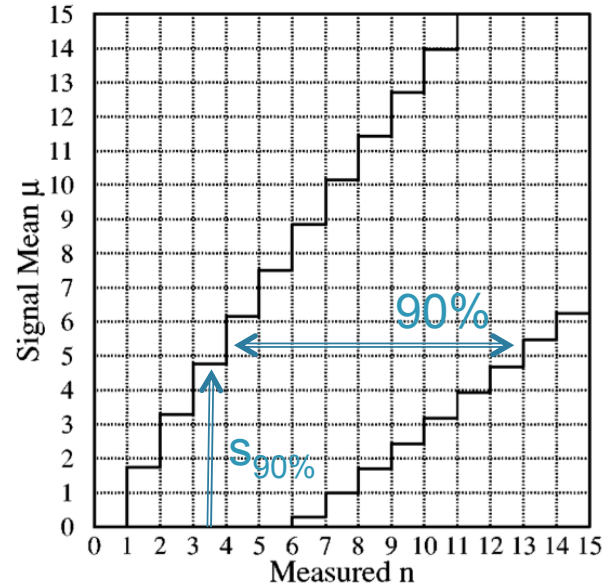


- 23% нехватки смоделированных атмосферных нейтрино, перенормировано.
- Восстановленная энергия в моделировании подправлена $\lg E_{\text{Rec}} = \lg E_{\text{Rec}}^{\text{org}} + 0.1$
(сравнимо с изменением длины поглощения света в воде в пределах погрешности измерения).



Оптимизация выборки событий

- Частотный метод Feldman & Cousins – нахождение верхних (нижних) пределов для измерения с пуассоновским фоном с известным средним значением.
- Метод оптимизации среднего верхнего предела в случае отсутствия сигнала Hill & Rawlins - среднее по всем возможным выходам эксперимента без сигнала.



$$\bar{s}_{90\%} = \sum_{n_{\text{obs}}=0}^{\infty} = s_{90\%}(n_{\text{obs}}, b) * \text{Poisson}(n_{\text{obs}}, b)$$

$$\bar{\Phi}_{90\%} = \Phi_{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}} \frac{\bar{s}_{90\%}(b)}{s} \rightarrow \bar{A}_{90\%} = A_{\text{theory}} \frac{\bar{s}_{90\%}(b)}{s}$$

Оптимизация выборки событий

- Ожидаемый поток для сравнения:

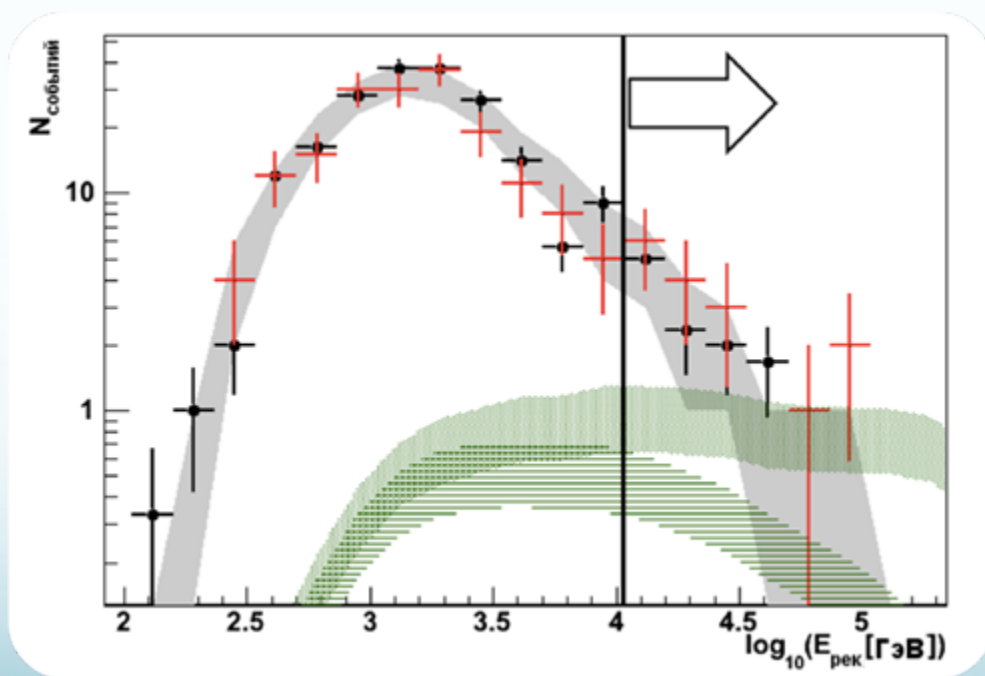
$$E^2 d\Phi_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} / dE = \boxed{1.2 - 2.4} \times 10^{-7} e^{-E/E_\nu^{\text{cutoff}}} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

E_ν^{cutoff} (TeV)	∞	500	100	50
Λ^{cut}	-5.16	-5.14	-5.14	-5.14
$\log_{10}(E_{\text{Rec}}^{\text{cut}} [\text{GeV}])$	4.57	4.27	4.03	3.87
$\bar{A}_{90\%}$ (flux units)	2.67	4.47	8.44	12.43
$\bar{A}_{90\%}^{100}$ (flux units)	3.07	4.68		12.75



Увиденные события

$$n_{\text{он}} = 16,$$
$$\langle n_{\text{офф}} \rangle = 11 \text{ (9+12+12 в офф-зонах).}$$



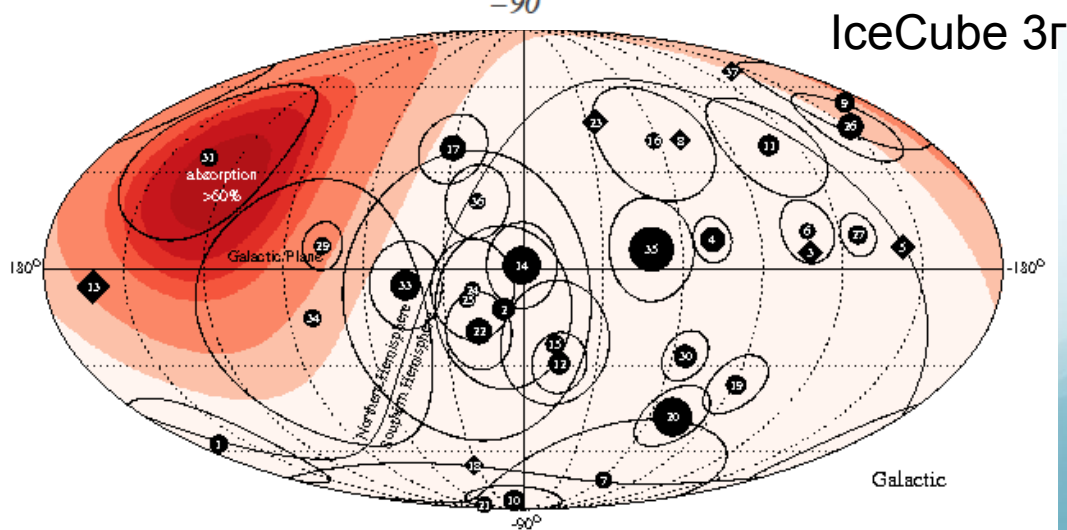
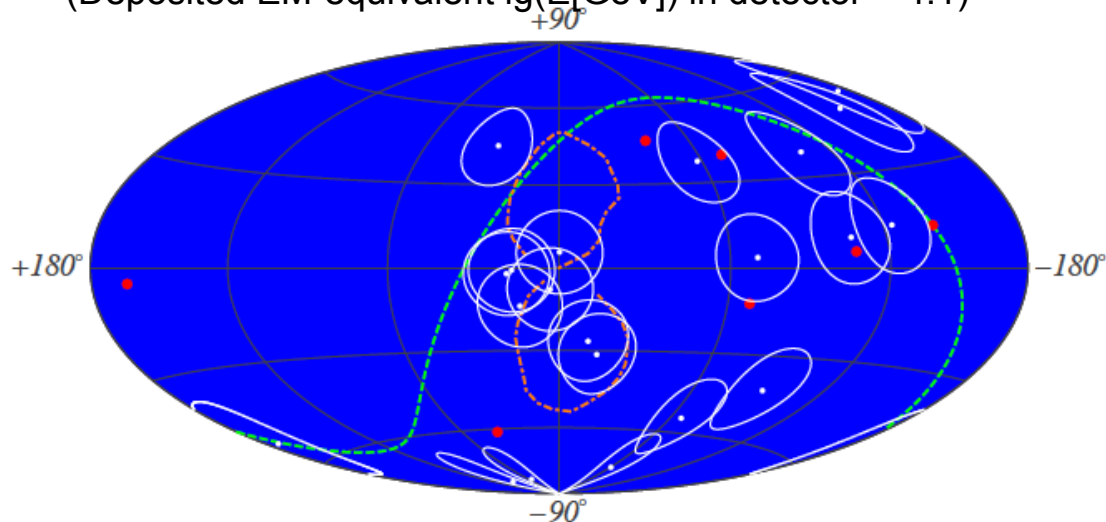
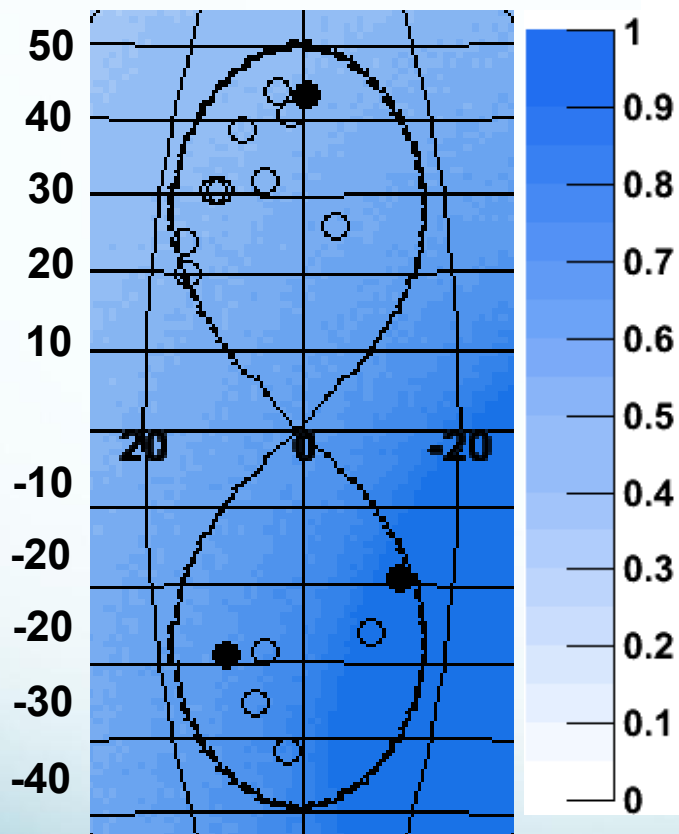
данные он-зона
данные <офф-зона>
64% У.Д. мод. Фона
ожидаемый сигнал
• без обрезания
• обрезание 50 ТэВ



События на небесной карте

IceCube's 28 events

(Deposited EM-equivalent $\lg(E[\text{GeV}])$ in detector > 4.1)



Значимость (1)

- Значимостью увиденного сигнала называется оценка несовместимости наблюдения с нулевой гипотезой (отсутствие сигнала, только фон).
- «Классическое» измерение с нормальным распределением фона:

$$S = (n_{\text{набл.}} - b) / \sigma$$

- Функция правдоподобия для данного измерения:

$$\mathcal{L}(n_{\text{он}}, n_{\text{офф}} \mid s, b; \tau) = \text{Poisson}(n_{\text{он}} \mid b + s) \text{Poisson}(n_{\text{офф}} \mid \tau b)$$

$$\lambda = \frac{\mathcal{L}(n_{\text{он}}, n_{\text{офф}} \mid s = 0, \hat{b})}{\mathcal{L}(n_{\text{он}}, n_{\text{офф}} \mid \hat{s}, \hat{b})} \quad -2 \ln \lambda \propto \chi^2$$

- Поэтому $\sqrt{-2 \ln \lambda}$ должно соответствовать нормальному распределению со средним 0 и сигма 1, т.е. данный критерий подходит для оценки значимости.



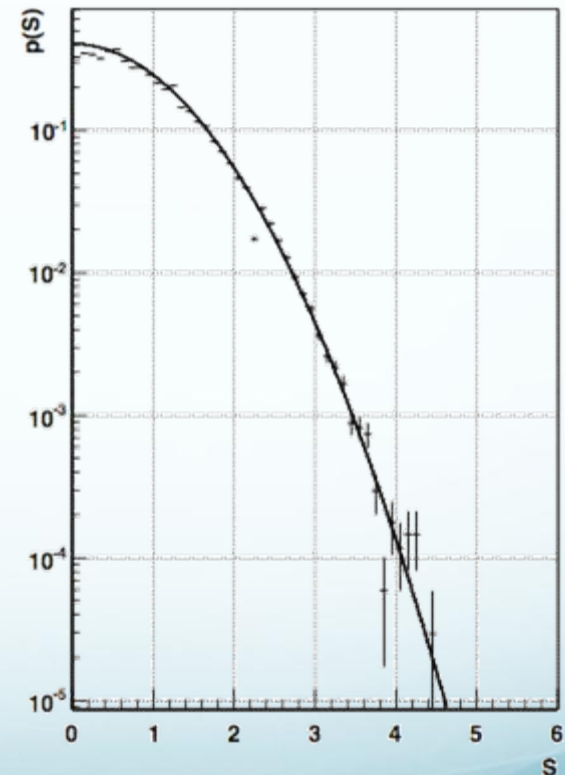
Значимость (2)

$$S = \sqrt{2} \left\{ n_{\text{он}} \ln \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \left(\frac{n_{\text{он}}}{n_{\text{он}} + n_{\text{офф}}} \right) \right] + n_{\text{офф}} \ln \left[(1 + \alpha) \left(\frac{n_{\text{офф}}}{n_{\text{он}} + n_{\text{офф}}} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$$\alpha = 1/\tau \quad (\text{Li \& Ma, 1983})$$

- Распределение S для $b = 11$ и $\tau=3$ и его сравнение с $\text{Gauss}(0,1)$.

Полученная значимость
сигнала 1.2σ



Значимость (3)

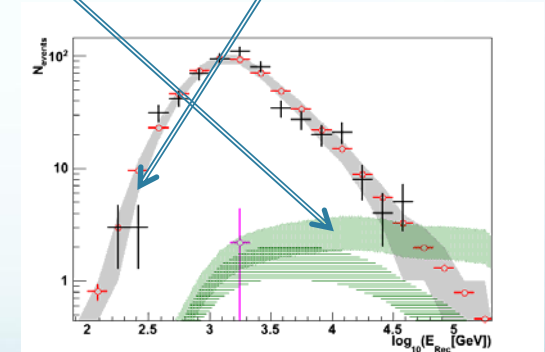
- Функция правдоподобия может быть расширена для использования информации о распределении энергии событий:

$$\mathcal{L}(n_{\text{он}}, n_{\text{офф}} \mid s, b; \tau) = \text{Poisson}(n_{\text{он}} \mid b + s) \text{Poisson}(n_{\text{офф}} \mid \tau b) \prod_{i=1}^{n_{\text{он}}} p(E_i \mid s, b)$$

$$p(E \mid s, b) = \frac{h(E \mid s, b)}{\int_0^\infty h(E \mid s, b) dE}$$

$$h(E \mid s, b) = s \frac{h_s(E)}{\int_{E_{\text{выборка}}}^\infty h_s(E) dE} + b \frac{h_b(E)}{\int_{E_{\text{выборка}}}^\infty h_b(E) dE}$$

- Для оценки значимости были проведены простые моделирования и посчитана р-величина.
- Полученная р-величина 0.86 соответствует **1.3 σ**



Пределы (поток нейтрино)

- Байесовский вывод

- Теорема Байеса:

$$P(s \mid X) = \frac{P(X \mid s)P(s)}{P(X)}$$

- $P(s) \rightarrow P_{\text{prior}}(s)$
- Процесс обучения: после измерения знание о сигнале s меняется от priorной вероятности к апостериорной
- Различные priorные вероятности $\rightarrow$ различные апостериорные? Если измерение приносит больше информации, чем содержится в priorной вероятности, апостериорная вероятность устойчива к priorной.



Пределы (поток нейтрино)

- Функция правдоподобия введена для этой проблемы:
 - 2 распределения Пуассона для событий в он-зоне и офф-зонах
 - Распределение Гаусса для числа смоделированных событий сигнала – неопределённости длины поглощения света в воде (10%), эффективности оптических модулей (10%)
 - Моделирование предоставляет конвертацию потока нейтрино в число сигнальных событий:

$$\frac{s}{f} = \frac{s_{\text{мод.}}}{f_{\text{мод.}}}$$
 - число сигнальных событий, которое имеет систематическую погрешность

$$\mathcal{L}(n_{\text{он}}, n_{\text{офф}}, s_{\text{мод.}} \mid f, b, \theta_{\text{мод.}}) = \text{Poisson}(n_{\text{он}} \mid b + f \frac{s'_{\text{мод.}}}{f_{\text{мод.}}}) \times \\ \times \text{Poisson}(n_{\text{офф}} \mid \tau b) \times \text{Gaussian}(s_{\text{мод.}} \mid \theta_{\text{мод.}}, \sigma_{\text{сист.}})$$



Пределы (поток нейтрино)

- Несколько независимых параметров:

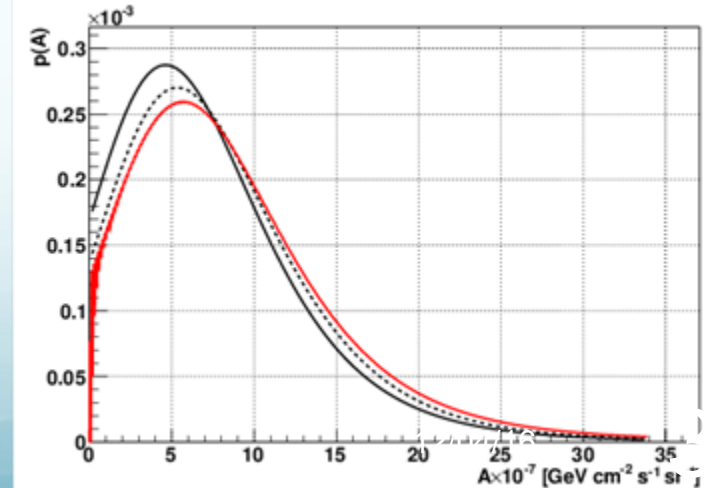
$$P(s, b | X) = \frac{P(X | s, b)P(s, b)}{P(X)} = \frac{P(X | s, b)P(s)P(b)}{P(X)}$$

- Исключение ненужных параметров:

- Маргинализация: $P(s | X) = \int_{-\infty}^{\infty} P(s, b | X) db$
- Профильная ф-я правдоподобия:

$$\hat{P}(f | n_{\text{он}}, n_{\text{офф}}, s_{\text{мод.}}) \propto \max_{b, \theta_{\text{мод.}}} P(f, b, \theta_{\text{мод.}} | n_{\text{он}}, n_{\text{офф}}, s_{\text{мод.}})$$

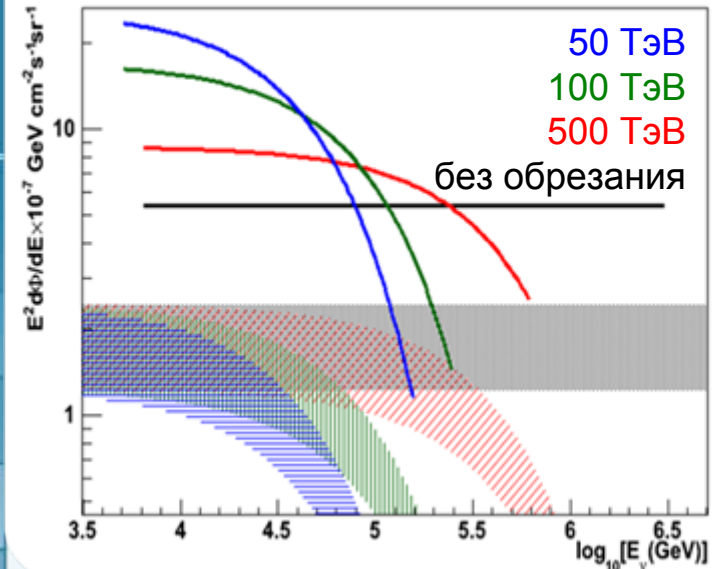
- Приорные ф-ии Джеффри, $1/\lambda$ (сплошная)
- Однородные приорные ф-ии (штрих)
- Профильная ф-я правд. (красный)



Пределы (поток нейтрино)

- Сравнение с известными частотными подходами [Conrad, 2003] (измерение с фоном, средняя величина которого имеет гауссово распределения).

Обрезание (ТэВ)	$S_{\text{мод}}$	сист, %	Поток ($\text{А } 10^{-7} \text{ ГэВ ср}^{-1} \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$)		
			теория	измер. предел	Conrad
∞	2.9	14	1.2– 2.4	5.4	5.9
500	1.9	19		8.7	9.1
100	1.1	24		17.0	16.7
50	0.7	27		25.9	26.4

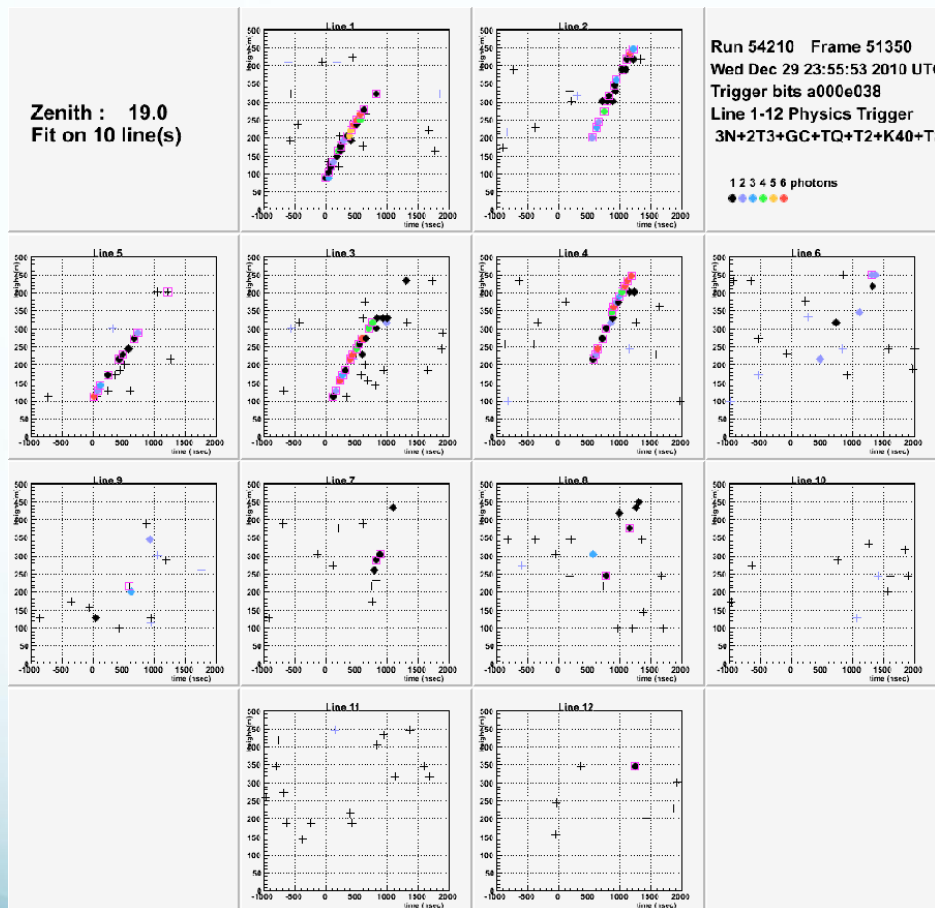


Заключение

- Проанализированы данные 2008–2011 года
- Увидена значимость сигнала 1.2σ
- Установленные верхние пределы выше ожидаемых в теории
- Ожидается увеличение чувствительности на 65% при добавлении данных 2012-2016 года.
- KM3NeT предоставит улучшение чувствительно на более чем один порядок
- Этот анализ был одобрен коллаборацией ANTAPEC, работа и результаты были подготовлены и опубликованы автором в Eur. Phys. J. C (2014) 74:2701 и были признаны референтом как наилучшее измерение потока нейтрино в данном регионе. Кандидатская работа с большими подробностями доступна для прочтения.



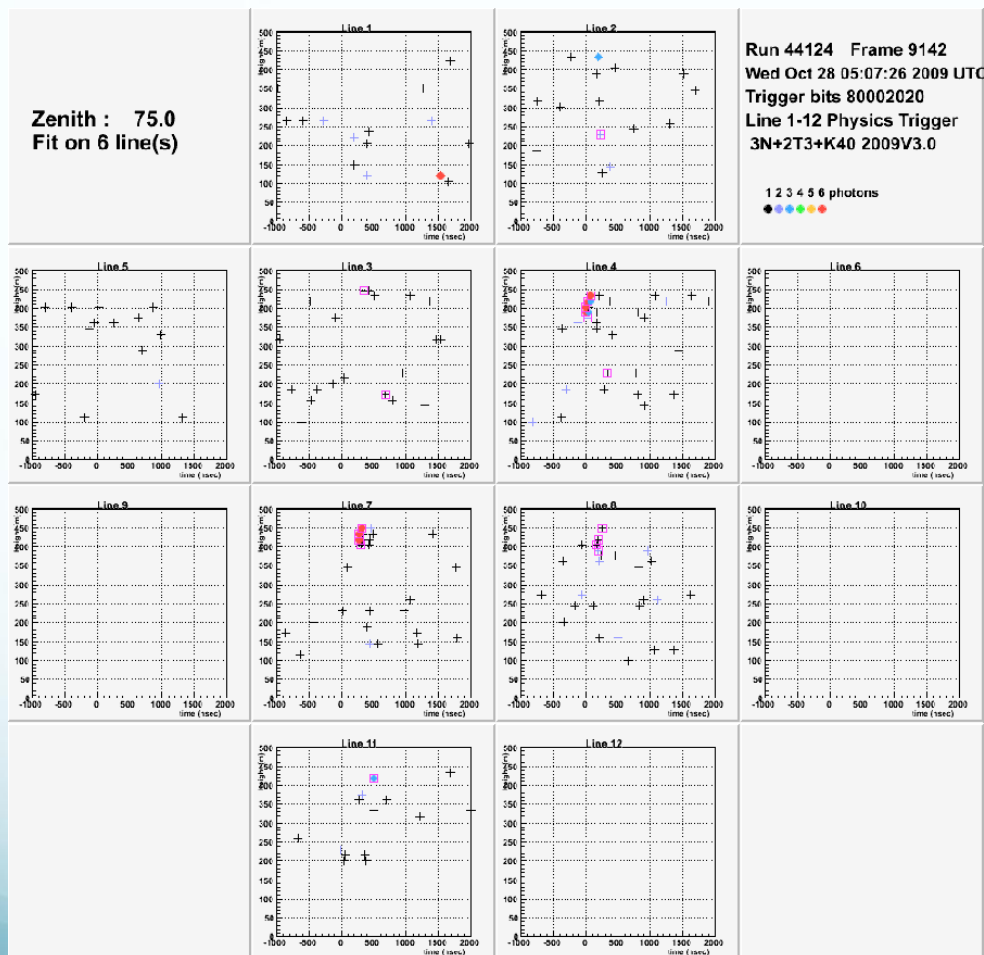
Событие #1



- зенит = 7.5°
- $\lg(E[\Gamma\text{эВ}])=5.0$
- долгота = -12.8°
- широта = -18.9°



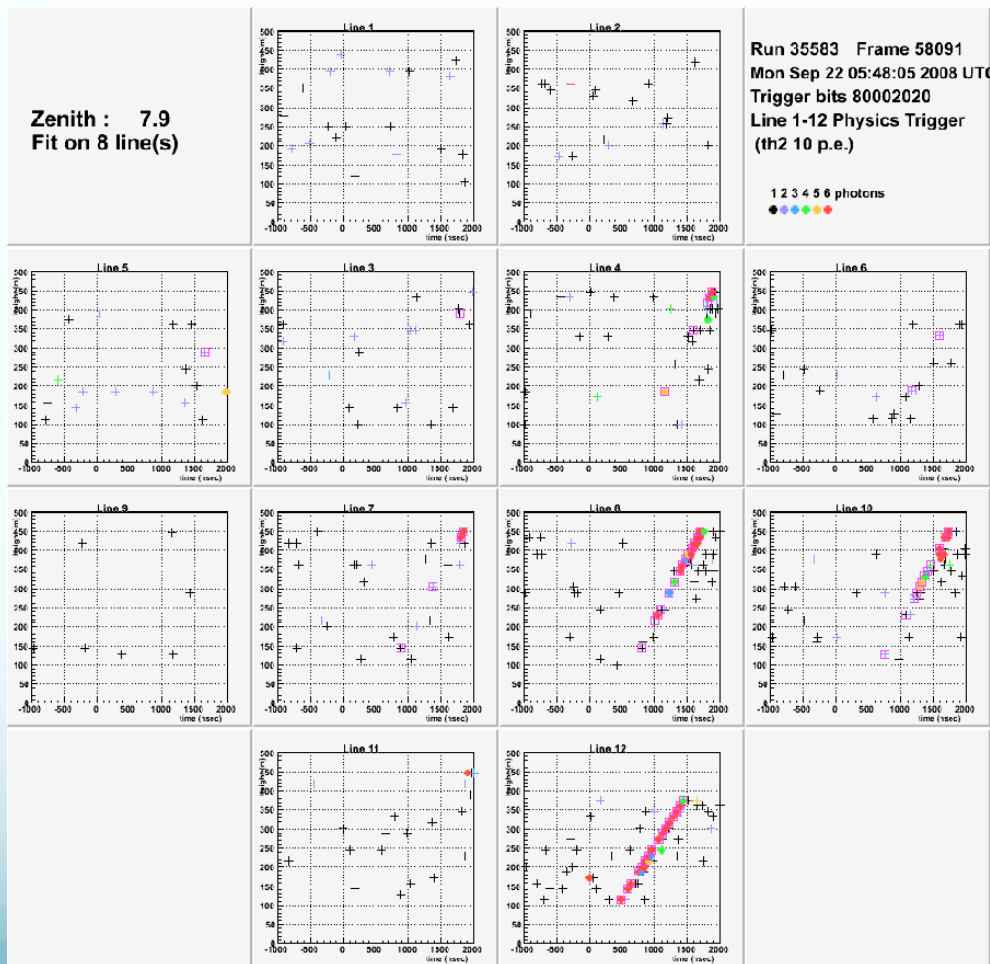
Событие #2



- зенит= 73.3°
- $\lg(E[\text{ГэВ}]) = 4.9$
- долгота = -0.8°
- широта = 43.5°



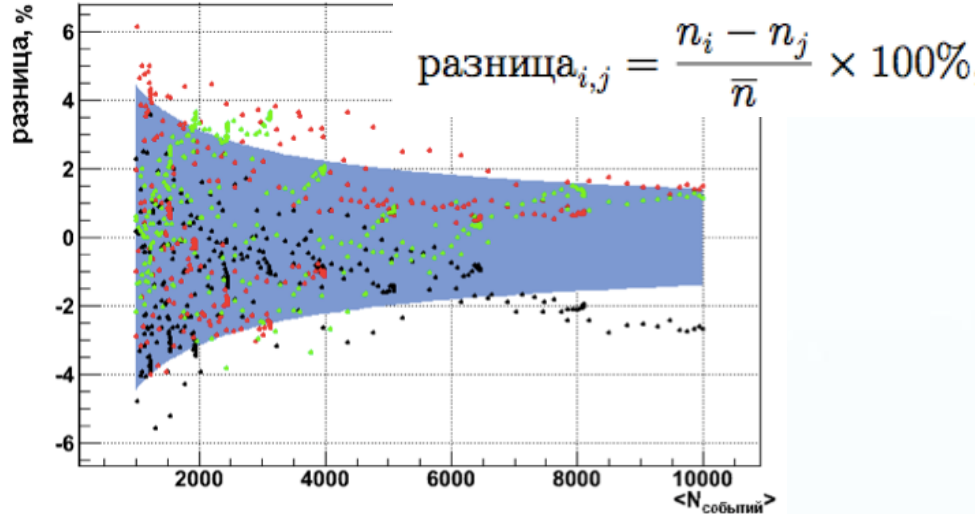
Событие #3



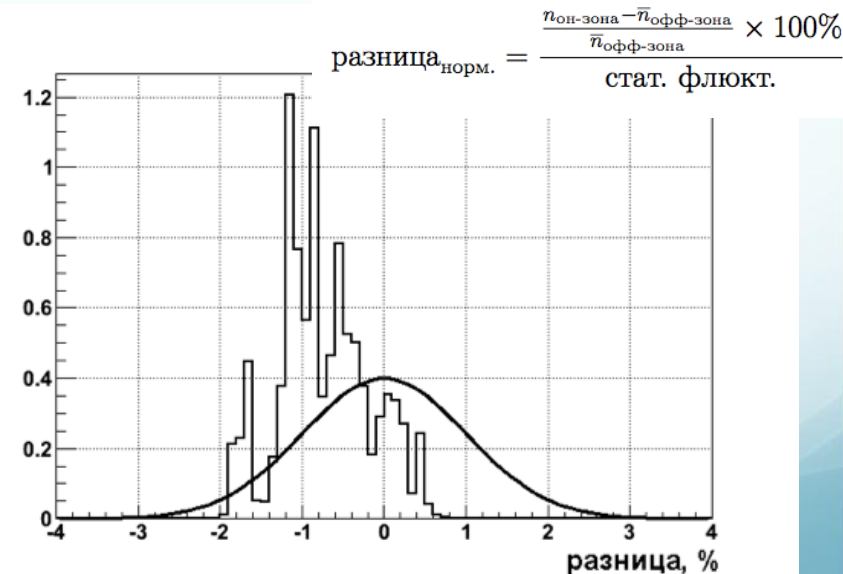
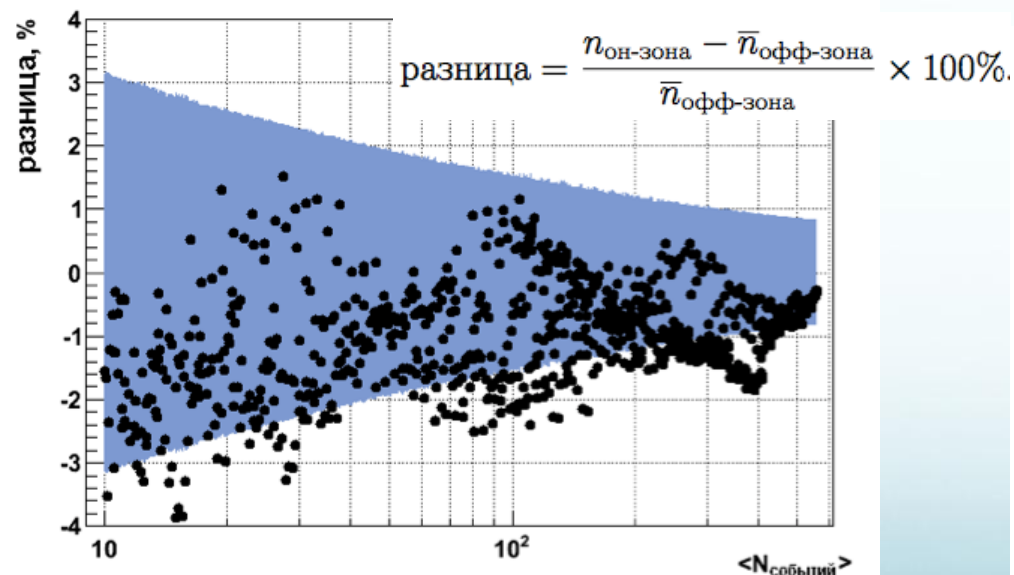
- зенит = 18.9°
- $\lg(E[\text{ГэВ}])=4.7$
- долгота = 10.5°
- широта = -29.1°



Применимость офф-зон



- Сканирование по всем возможным выборкам (Е, Л)
- Он-зона проверялась только в моделировании.
- Не независимые измерения – могут быть систематические искажения.



Выбор данных

- Эффективность детектора не постоянна во времени (основная причина – изменяющаяся биOLUMиНесценция).
- Моделирование ран-за-раном учитывает состояние детектора в каждом ране.
- Есть падающая эффективность детектора, которая не воспроизводится в моделировании.

