

Неосцилляционные анализы в эксперименте NOvA

Андрей Шешуков
НЭОФЭЧ ЛЯП

Дубна

5 апреля 2017

Эксперимент NOvA

Цель: изучение нейтринных осцилляций в пучке мюонных нейтрино с энергией **2 ГэВ**

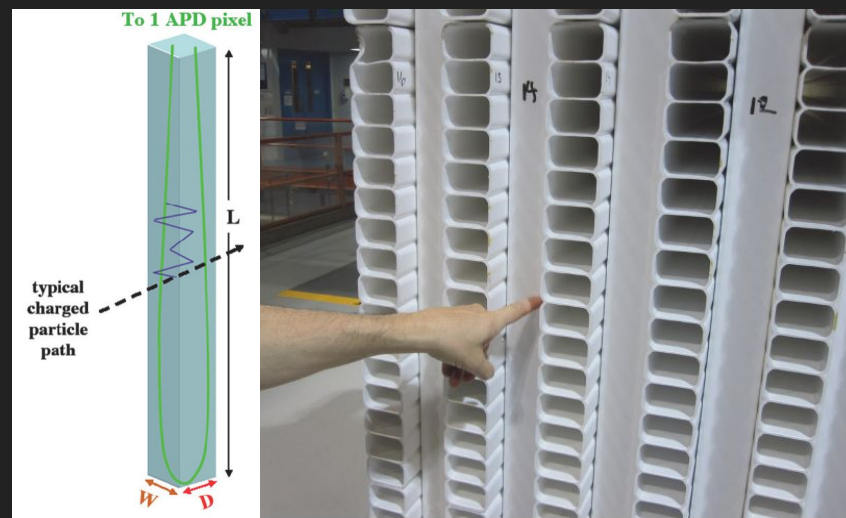


NOvA использует два детектора с одинаковой структурой:

- Пластиковые ячейки, наполненные жидким сцинтиллятором.

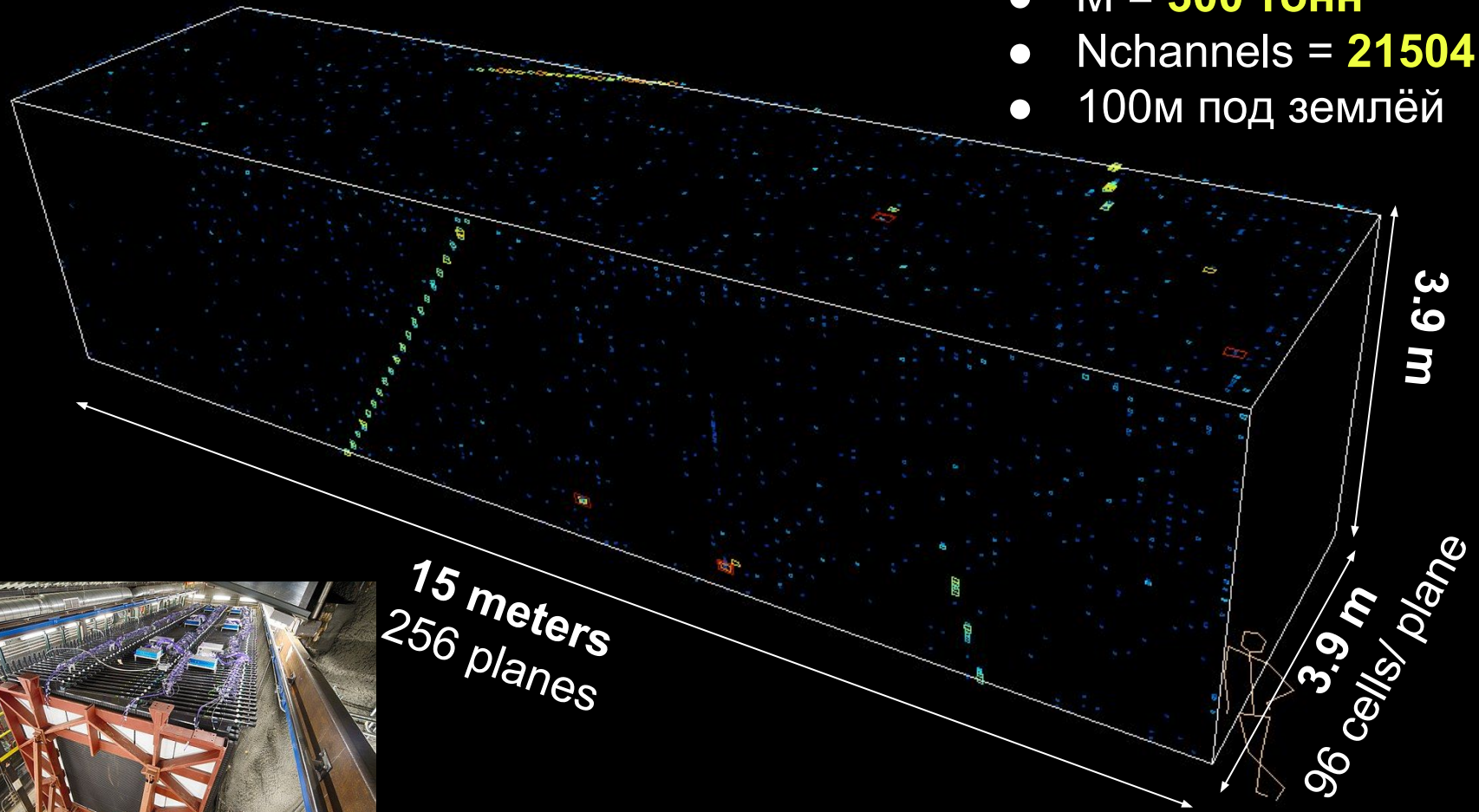
Ячейки расположены горизонтально и вертикально в чередующихся плоскостях, таким образом мы можем считывать данные в двух проекциях ZX и ZY

Поперечный размер ячейки **4x6 см**



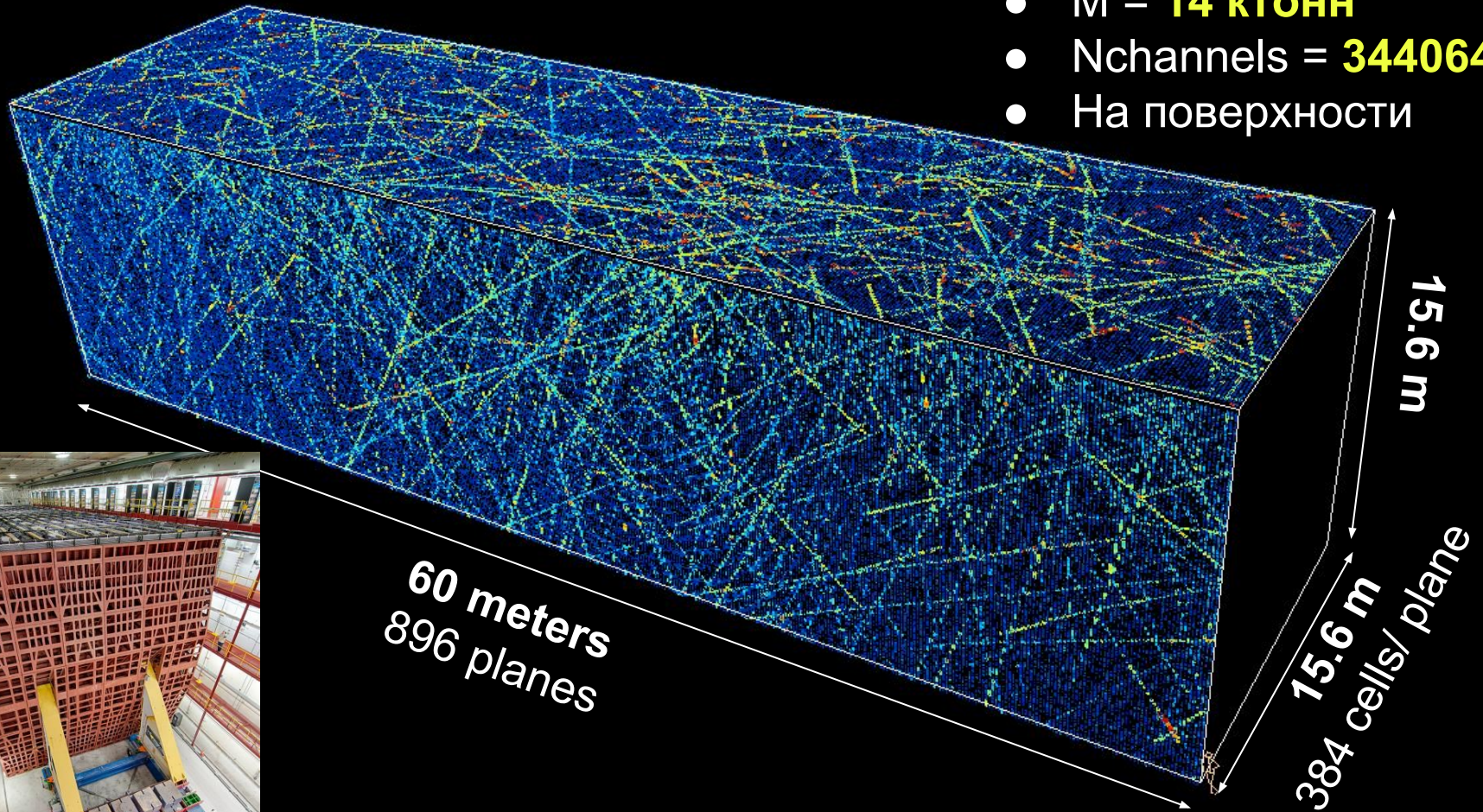
Ближний детектор NOvA: данные за 5мс

- M = **300 тонн**
- Nchannels = **21504**
- 100м под землёй



Дальний детектор NOvA: данные за 5мс

- М = **14 ктонн**
- Nchannels = **344064**
- На поверхности



Дальний детектор: реальный размер



Направления исследований в NOvA

- Осцилляционные анализы:
 - Исчезновение ν_{μ}
 - Появление ν_e
 - Измерение сечений взаимодействия нейтрино
- Поиск магнитных монополей
- Анализ электромагнитных ливней в ближнем детекторе
 - Поиск тёмной материи
 - Магнитный момент нейтрино
- Анализ атмосферных мюонов
 - Асимметрия углового распределения Восток-Запад
 - Мюоны высоких энергий
 - Группы параллельных мюонов
 - Сезонные вариации потока мюонов
- Детектирование нейтрино от сверхновых

NOvA Data Driven Triggers

Большинство дополнительных анализов требуют отбора специфических данных.

Принятие решения об отборе данных требуют базовой реконструкции и обработки данных в реальном времени.

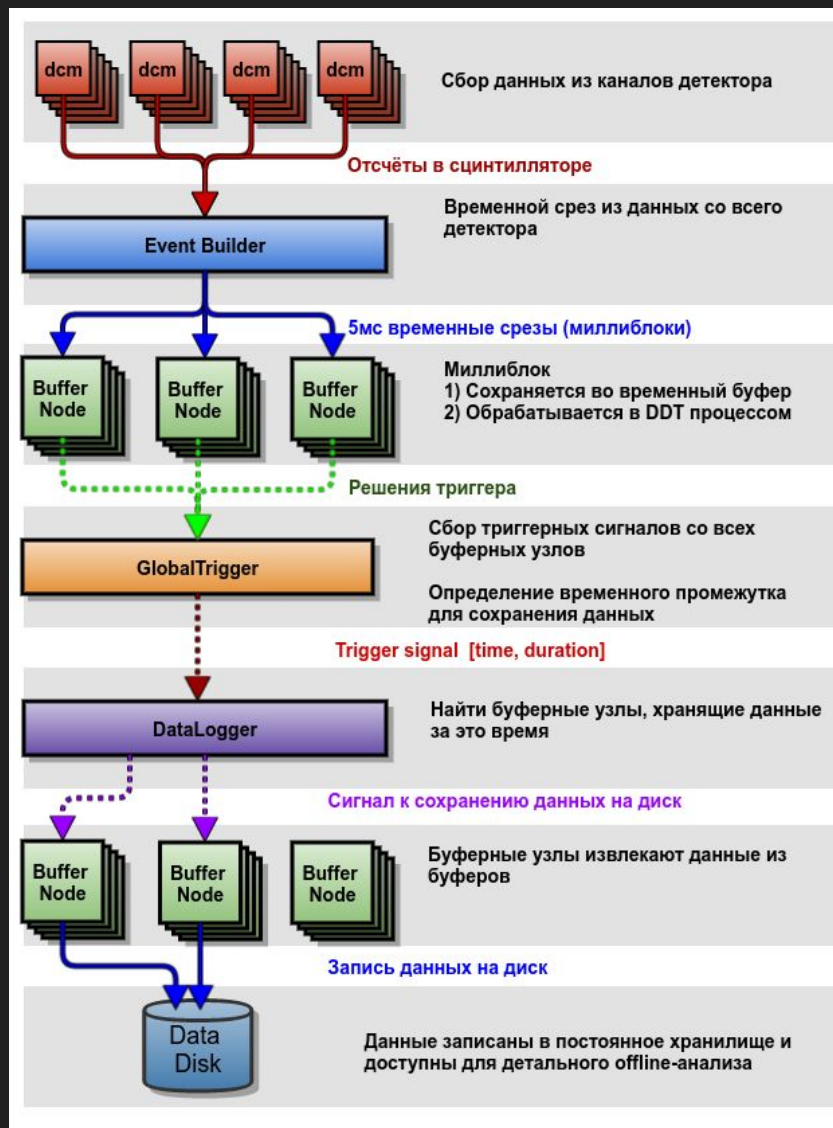
В NOvA данные с детектора формируются в **5мс срезы (миллиблоки)** и распределяются по 80 буферным узлам.

Данные сохраняются во временном буфере, глубина буфера ~ **10 минут**

Обработка миллиблоков происходит параллельно в более чем 1000 **DDT-процессах** на буферных узлах

DDT-процесс - конвейер, который реконструирует данные и ищет в них интересующие нас сигнатуры

DDT-процесс должен принять решение в 5мс временном отрезке данных

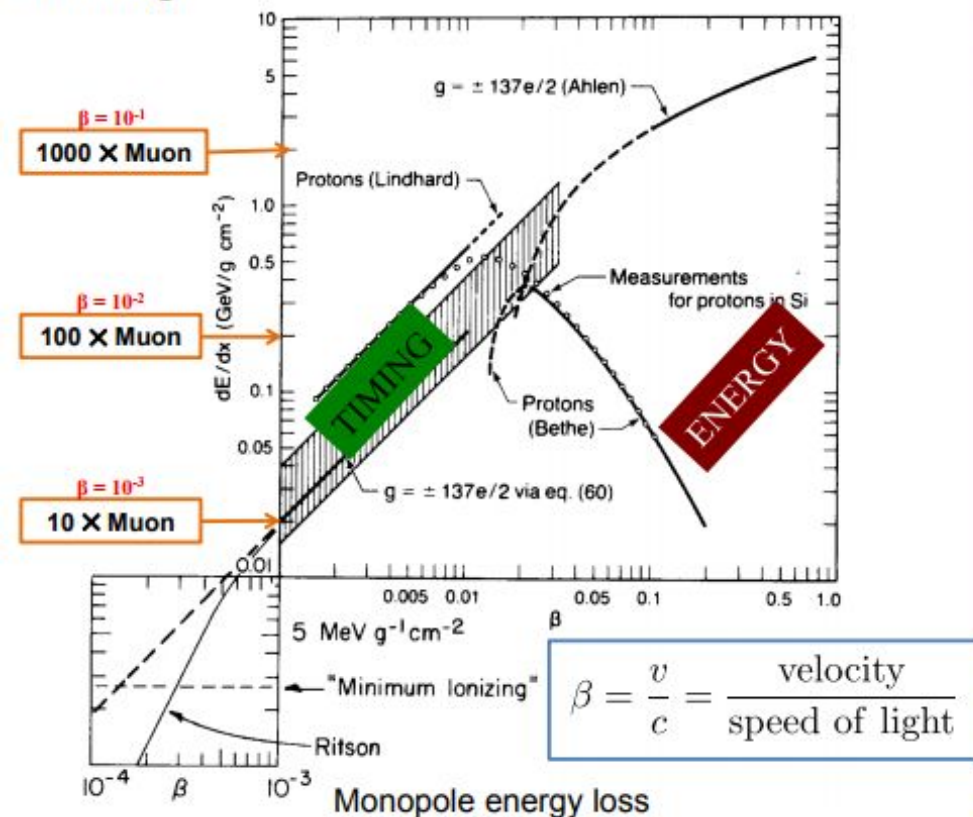




3. Signatures of Magnetic Monopoles and Search Strategies

From poster by Enhao Song

Magnetic monopoles should have a magnetic charge in multiples of g , which is 68.5 times the charge of the electron. Because of their large charge they are expected to be very highly ionizing.



We divide the magnetic monopole searches into two broad categories :

- ❖ Fast Monopoles ($\beta > 10^{-2}$): which are identified by their high energy deposition as they cross the detector. This leads to well defined linear tracks with extraordinarily high energy deposits in the cells of the detector.
- ❖ Slow Monopoles ($\beta < 10^{-2}$): which are identified by their well defined linear tracks with long transit times across the detector. A $\beta = 10^{-2}$ monopole takes 5 μ s to cross from the bottom to the top of the detector. A cosmic ray muon takes only 50 ns to cross the detector.

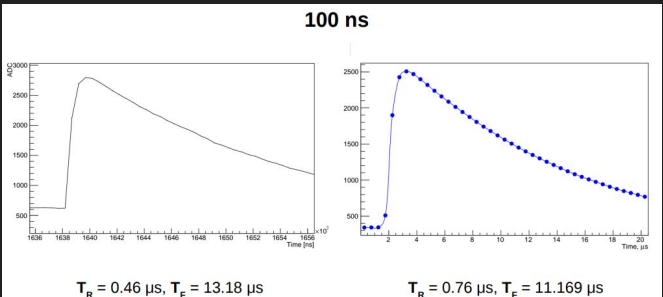
Поиск магнитных монополей

Александр Антошкин

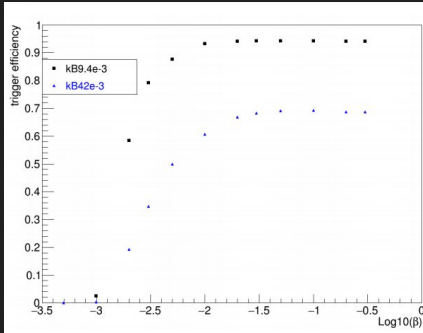


Сигнал от магнитного монополя - долгий и энергичный - нетипичен для NOvA.

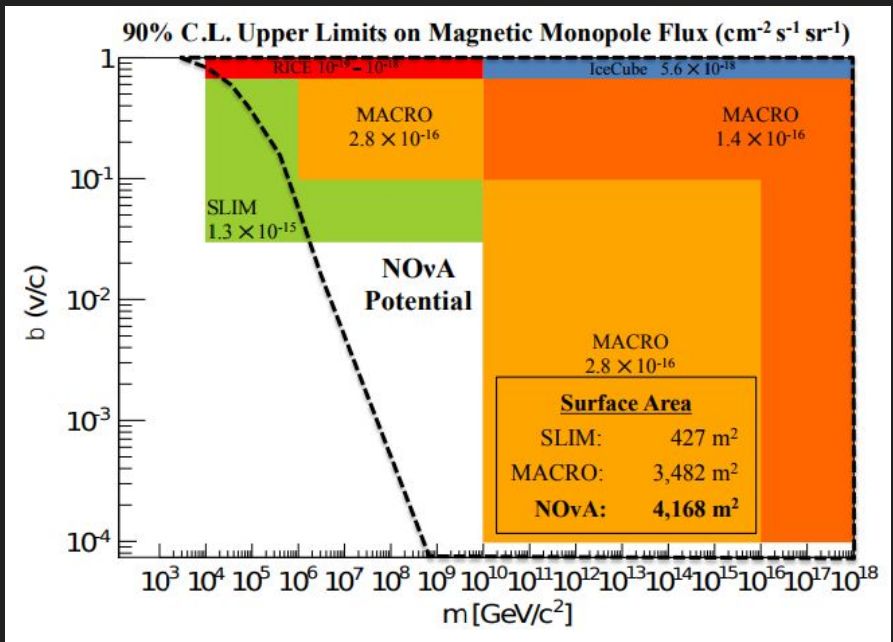
Было проведено отдельное измерение отклика электроники на такие сигналы для калибровки симуляции



Также сигнал чувствителен к свойствам сцинтиллятора:

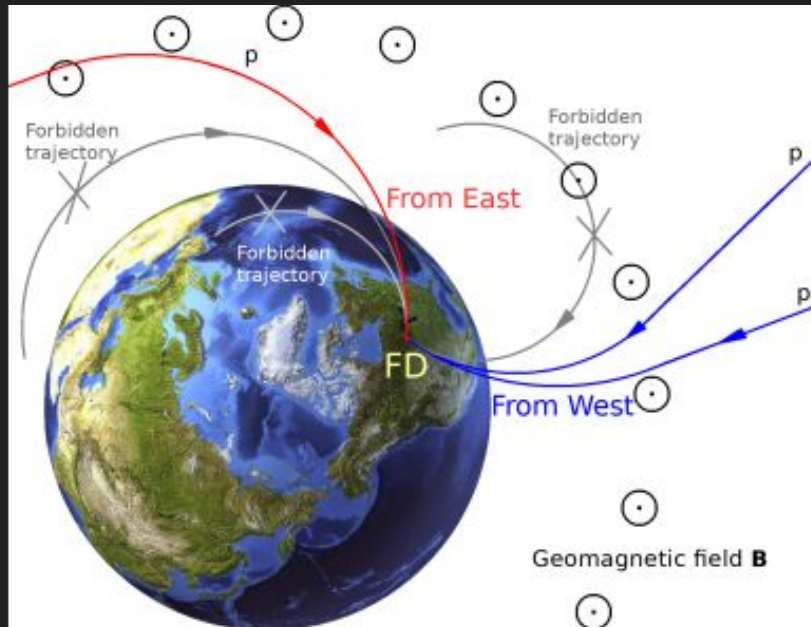


Birks' law: $\frac{dE_{vis}}{dx} = \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx} \rho}$
 Light is suppressed for heavily ionizing particles according to the Birks formula. For monopoles with very large dE/dx , the energy is capped by the Birks' suppression. We use Birks' constant from 9.4×10^{-3} to 42×10^{-3} . This covers all the experiment measurement results. A larger Birks' constant yields less energy and lower trigger efficiency. 9.4×10^{-3} is preferred by theorist.



Измерение восточно-западной асимметрии потока мюонов

Ольга Петрова



Сила Лоренца отклоняет заряженные частицы в геомагнитном поле

Северное полушарие:

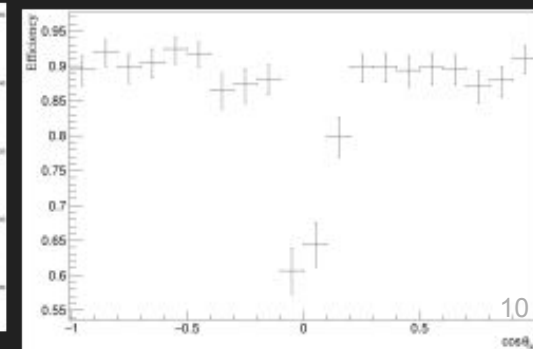
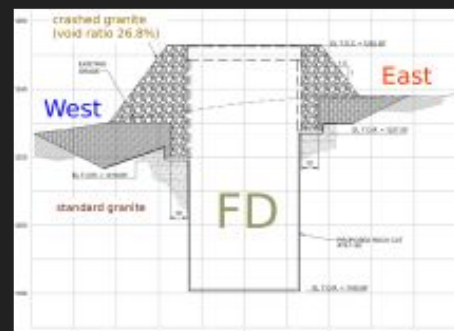
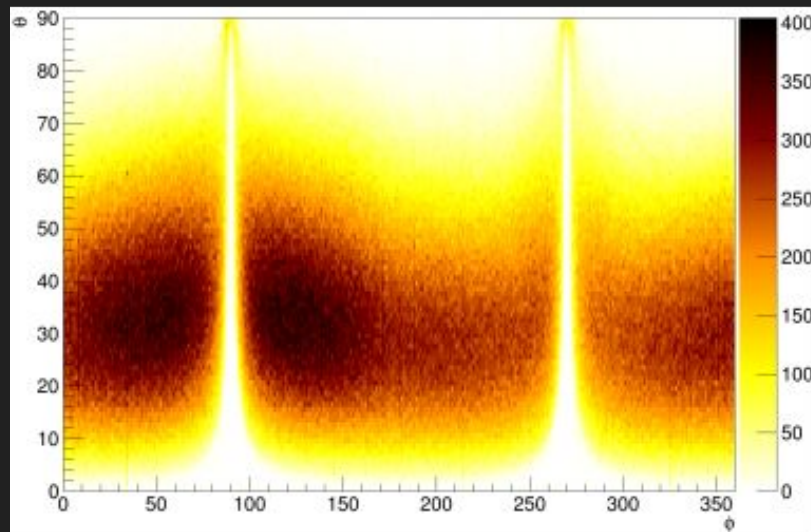
запрещённые траектории первичных p с Востока \Rightarrow поток с В < поток с З

Измерение асимметрии осложняется тем, что:

- Склон, где расположен детектор, тоже асимметричен.
- Эффективность реконструкции треков зависит от азимутального угла.
- Детектор не направлен точно на север.

\Rightarrow эффективность асимметрична относительно В-З

Работа в процессе



Цель: Измерение спектра мюонов высоких энергий (>1 TeV)

Мотивация: Спектр первичных космических лучей

Метод: параметр [ЭЧАЯ, 21, вып.3 (1990) 774-811.]

Потери энергии мюона в среде состоят из ионизационной и радиационной компонент:

$$dE/dx = a(E) + b(E) E$$

При энергиях мюона больше 1 ТэВ $a(E)$ и $b(E)$ не зависят от энергии.

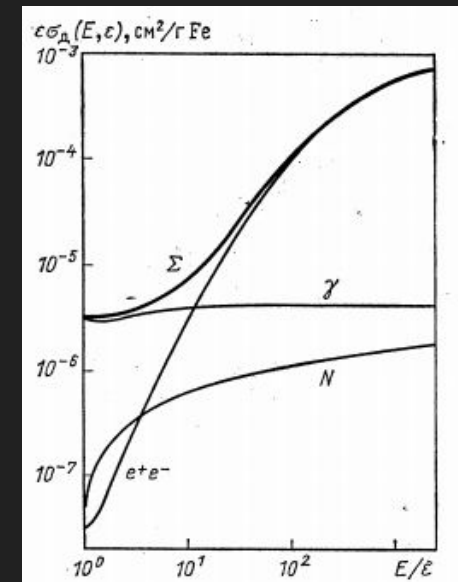
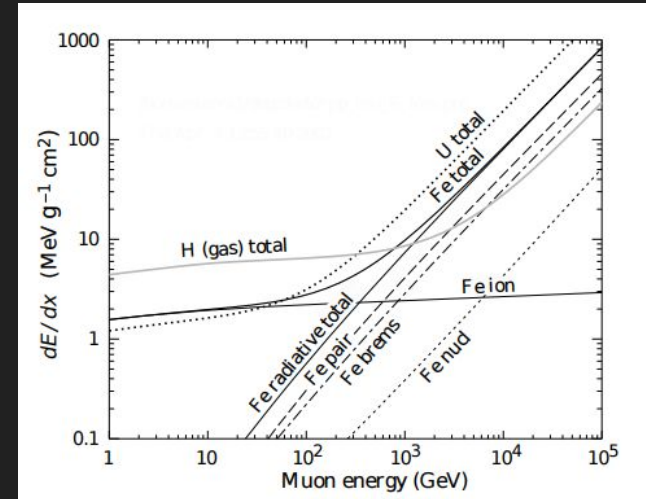
a - ионизационные потери

b - состоит из

- рассеяния на ядрах
- тормозного излучения
- образования e^+e^- пар

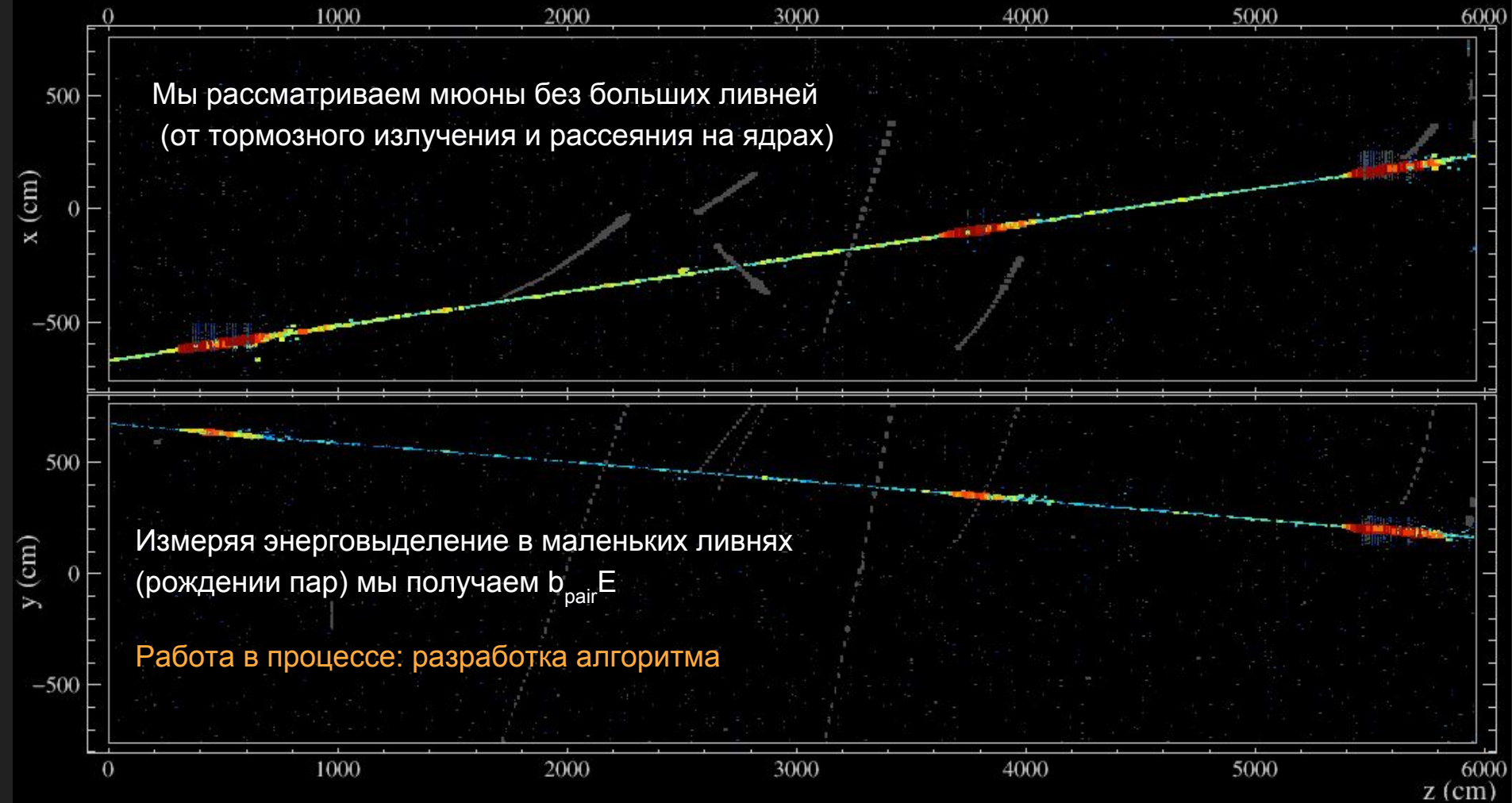
Образование пар - самый частый процесс, энерговыделение флуктуирует слабо.

Измеряя энерговыделение в данных, содержащих только события образования пар: $dE/dX = a + b_{\text{pair}} E$ можно получить энергию: $E = (dE/dX - a) / b_{\text{pair}}$



Спектроскопия мюонов высоких энергий

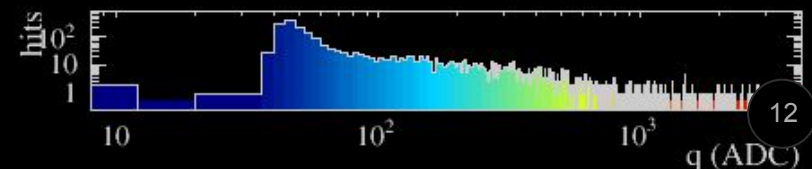
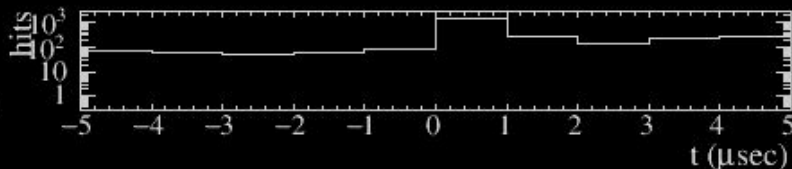
Анна
Морозова



NOvA - FNAL E929

Run: 24850 / 10
Event: 51 / DDenergy

UTC Thu Dec 22, 2016
05:51:41.801507648



Группы параллельных мюонов

Благодаря размеру дальнего детектора, можно детектировать ливни большой множественности.

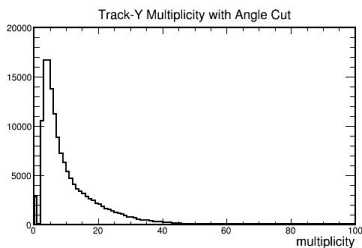
Множественность позволяет судить о составе первичных КЛ

• Направление ливня позволит указать на астрофизический источник.

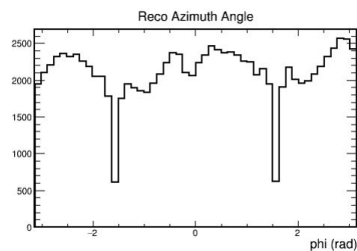
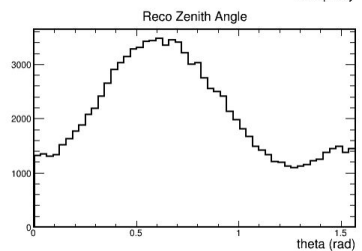
Работа в процессе

Slides by Micah Groh

Reconstructed Values

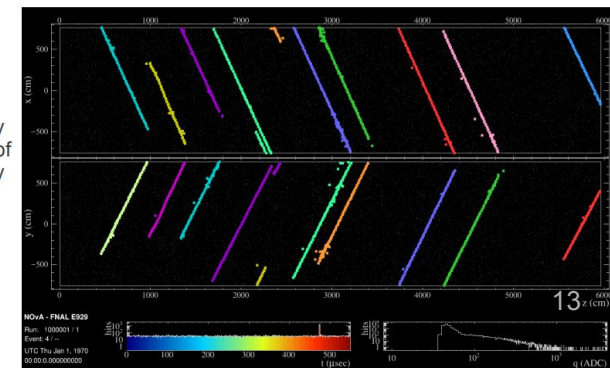


- Odd zenith angles at 0 and $\pi/2$
- Odd oscillations in phi



Track Multiplicity

- The reconstruction uses the maximum hough angle as a seed to find tracks.
- The track multiplicity counts the number of track slices made by the reconstruction.



Сезонные вариации потока мюонов

Цель: измерение параметров атмосферных ливней

Температура атмосферы определяет её толщину, что влияет на развитие атмосферного ливня.

Измеряя потоки мюонов в различное время года, можно исследовать эту температурную зависимость.

Результаты MINOS показывают, что потоки для одиночных мюонов и множественных мюонов находятся в противофазе друг к другу.

Stefano Tognini

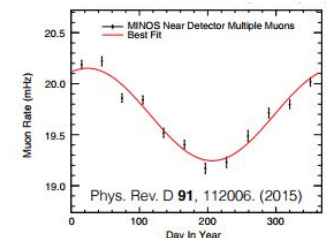
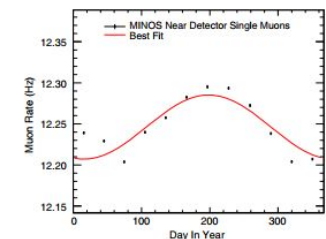
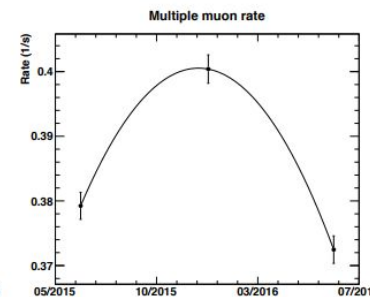
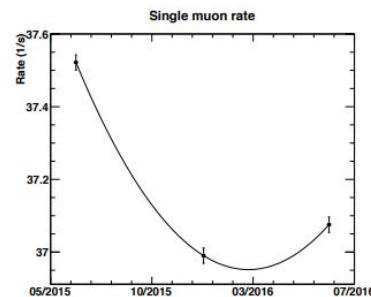
Federal University of Goias

Preliminary results



- The 3 processed days are the summer/winter solstices between June 2015 and June 2016

Run (Date)	Single muon (1/s)	Multiple muon (1/s)
11003 (2015-06-20/21)	$3.24770E6 / 86555 = 37.52 \pm 0.02$	$32825 / 86555 = 0.379 \pm 0.002$
11343 (2015-12-21/22)	$3.06448E6 / 82846 = 36.99 \pm 0.02$	$33171 / 82846 = 0.400 \pm 0.002$
11607 (2016-06-19/20)	$3.05579E6 / 82421 = 37.07 \pm 0.02$	$30699 / 82421 = 0.372 \pm 0.002$



- The effect seen by NOvA is in agreement with MINOS:



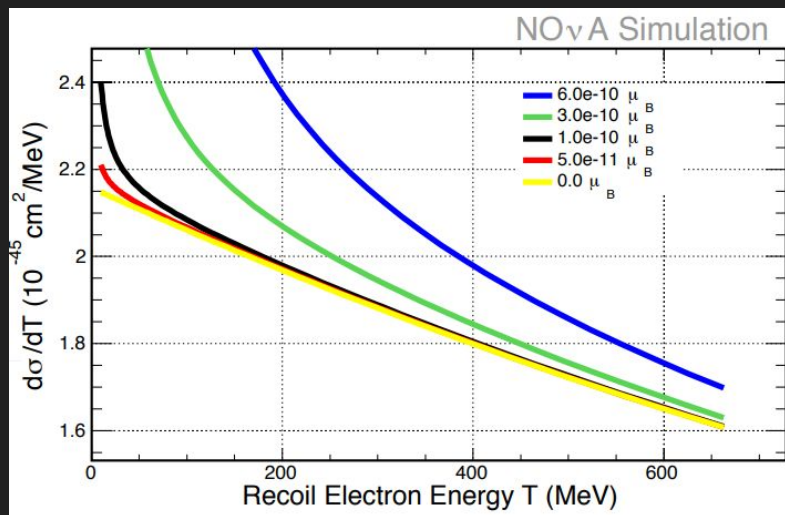
Collaboration Meeting

Feb. 11, 2017

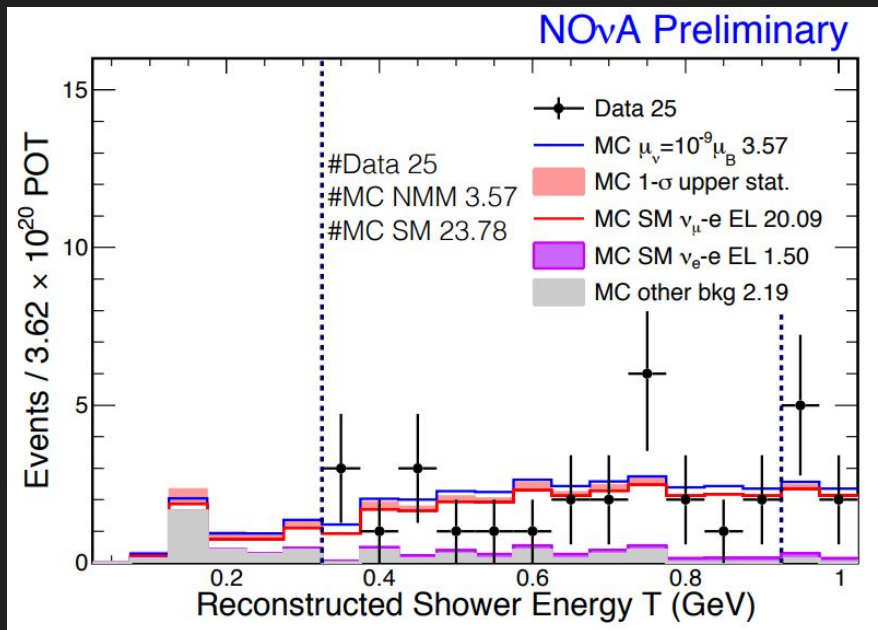
10

Магнитный момент нейтрино

Сечение упругого рассеяния нейтрино на электроне зависит от магнитного момента нейтрино.



Мы можем использовать нейтринный пучок для этих измерений.



Сигнал: Измеряя спектр электромагнитных ливней в ближнем детекторе, мы можем быть чувствительны к магнитному моменту нейтрино.

Работа в процессе

Поиск лёгкой тёмной материи в пучке нейтрино

Предполагается, что тёмная материя может рождаться при взаимодействии протонов с мишенью.

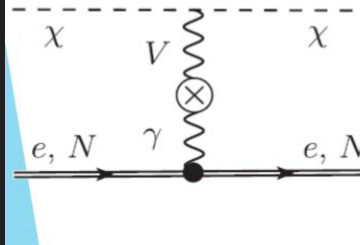
Метод: Поиск рассеяния частиц тёмной материи на электроны.

Сигнал: электромагнитный ливень высокой энергии (несколько ГэВ) в Ближнем Детекторе

LDM in NOvA ND

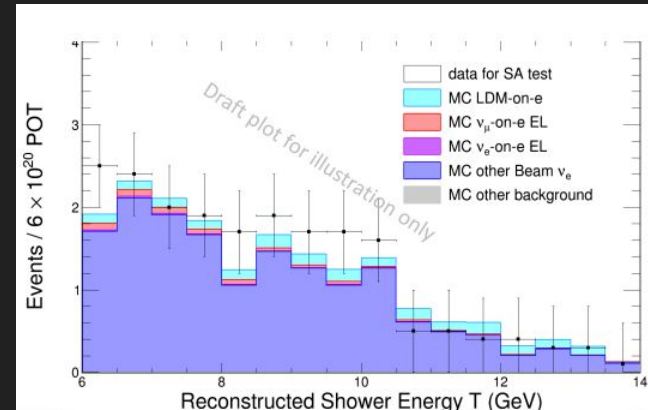
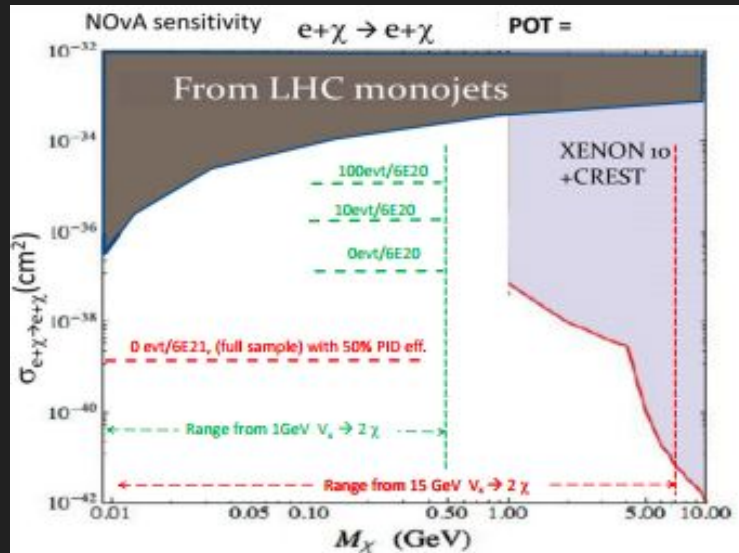
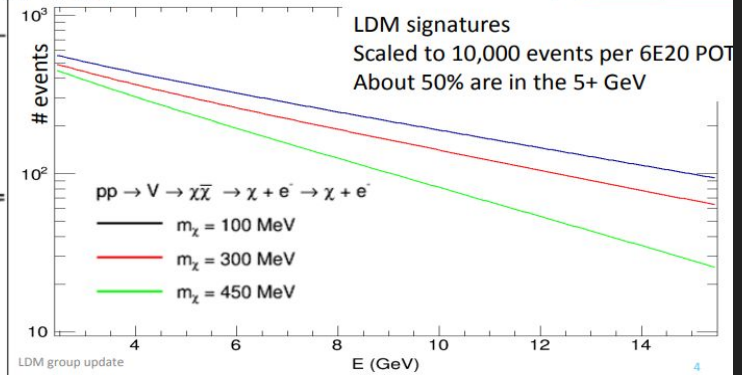
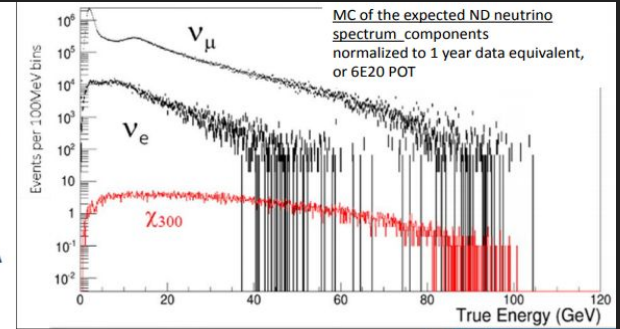
- Dark matter scalar scattering off of an atomic electron: $\sigma > 1000$ pico-barns
- Signal events input to NOvA analysis.

• PRD 84(075020)2011. Further references, preprints from FNAL: [FERMILAB-CONF-13-544-E](#), [FERMILAB-CONF-14-376-PPD](#), and [FERMILAB-CONF-15-371-ND](#), DESY-PROC-2015-02.



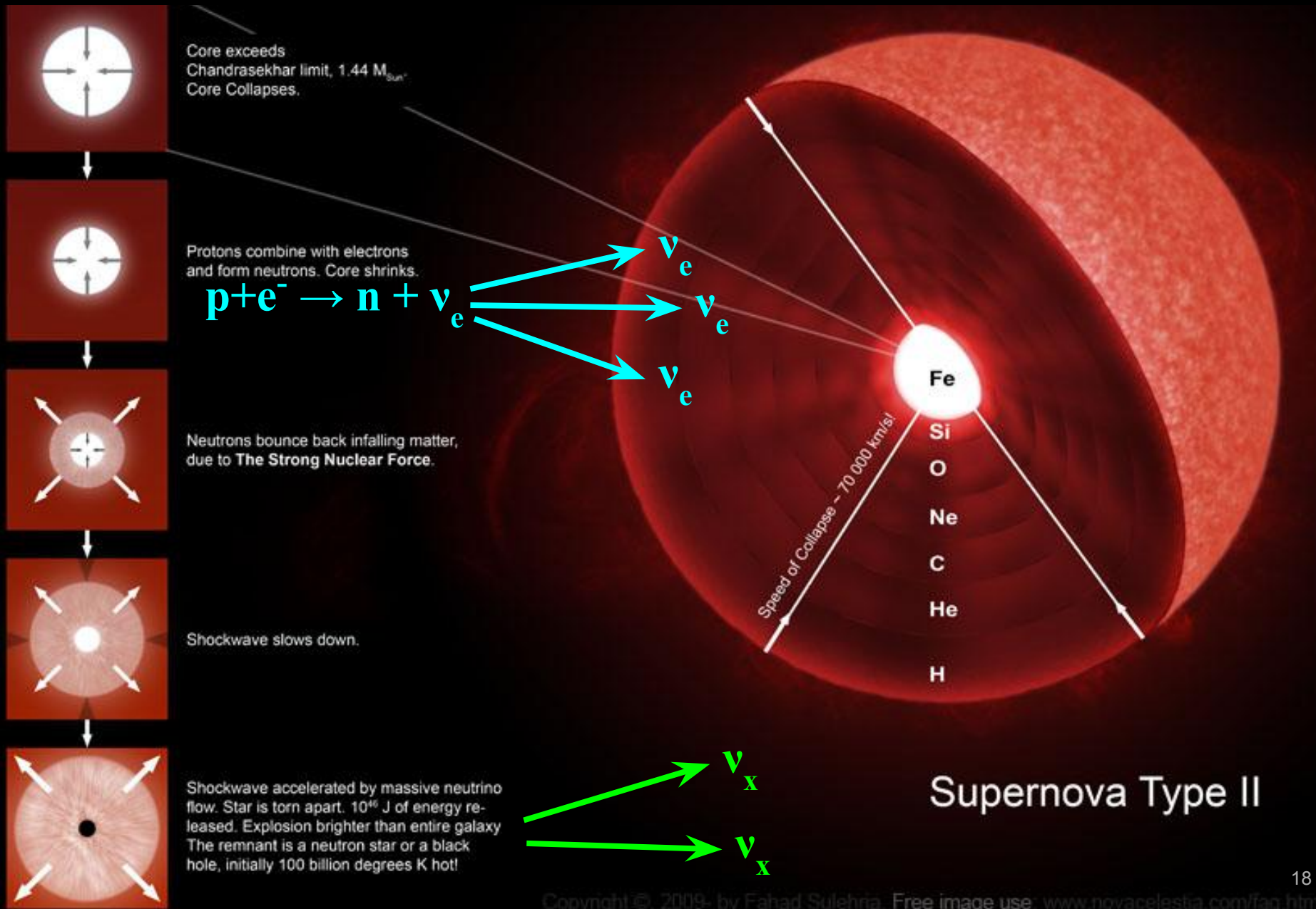
Slides by Athans Hatzikoutelis

2/11/2017

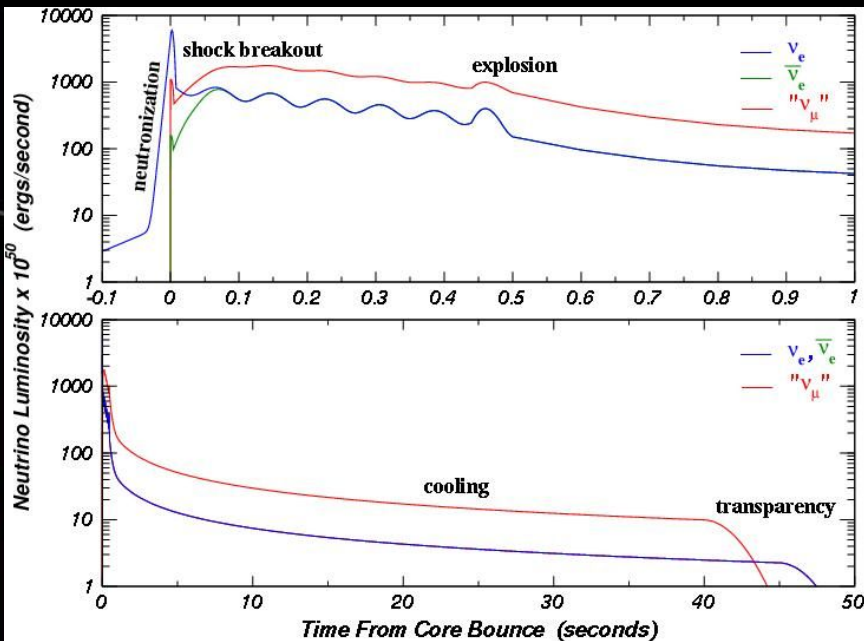


Детектирование нейтринного сигнала от сверхновой

Нейтринный сигнал от коллапсирующей сверхновой



Нейтринный сигнал от коллапсирующей сверхновой



Сверхновая II типа испускает $\sim 10^{58}$ нейтрино, $E_{\nu} \sim 10\text{-}60 \text{ MeV}$

Эти нейтрино уносят **99%** энергии гравитационного коллапса.

Галактические сверхновые редки: $\sim 1\text{-}3$ в столетие!

(и нейтринный сигнал никогда не наблюдался)

Нейтринный сигнал несет информацию о

- Физике сверхновой:
 - Масса и состав звезды
 - Уравнение состояния нейтронной звезды
 - Гидродинамические эффекты
 - Неизотропности, колебания
- Свойствах нейтрино:
 - Нейтринные осцилляции в плотной среде
 - Взаимодействие нейтрино с веществом
 - $\nu + (\text{anti})\nu$ взаимодействия: **dirac/majorana!**
 - Иерархия масс нейтрино

[arXiv:1508.00785 \[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/1508.00785)

SuperNova Early Warning System



snews.bnl.gov

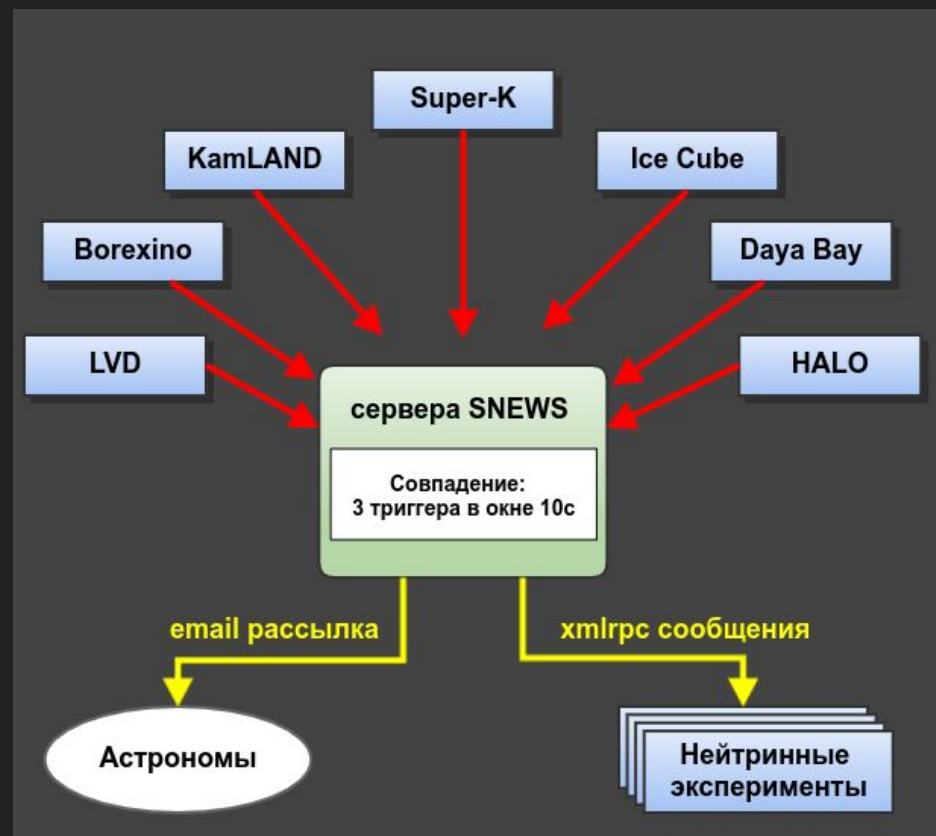
Взрыв сверхновой - глобальное событие.

Важно использовать все доступные нейтринные эксперименты.

- Глобальная сеть, объединяющая триггеры от нейтринных экспериментов.
- В настоящий момент 7 экспериментов отправляют информацию в SNEWS.
- Другие эксперименты могут получать сообщение о сверхновой.

Нейтринный сигнал приходит на несколько часов раньше, чем оптический:

- Можно использовать как раннее предупреждение для оптических наблюдений!



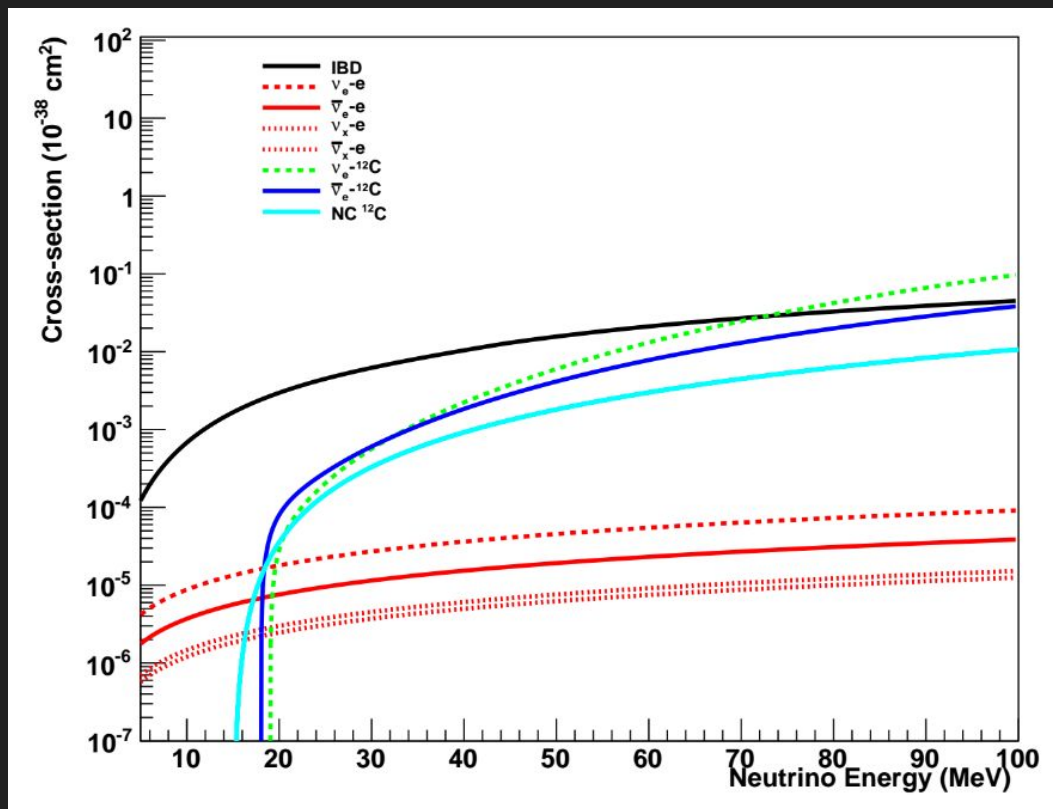
Сейчас: NOvA **получает** внешний триггерный сигнал от SNEWS.

В будущем: детектирование сверхновой на основе данных NOvA, **отправка** сигнала в SNEWS

Взаимодействия в сцинтилляционном детекторе

Наиболее значимые каналы:

1. Обратный бета-распад
Сигнал: позитрон (1-4 ячейки)
захват нейтрона на хлоре (8-
МэВный фотон)
2. Нейтральный ток на ^{12}C :
возникает возбуждённое
состояние $^{12}\text{C}^*$
Сигнал: 15-МэВный фотон от
деэкситации углерода
3. Упругое рассеяние на электроны
Сигнал: электрон



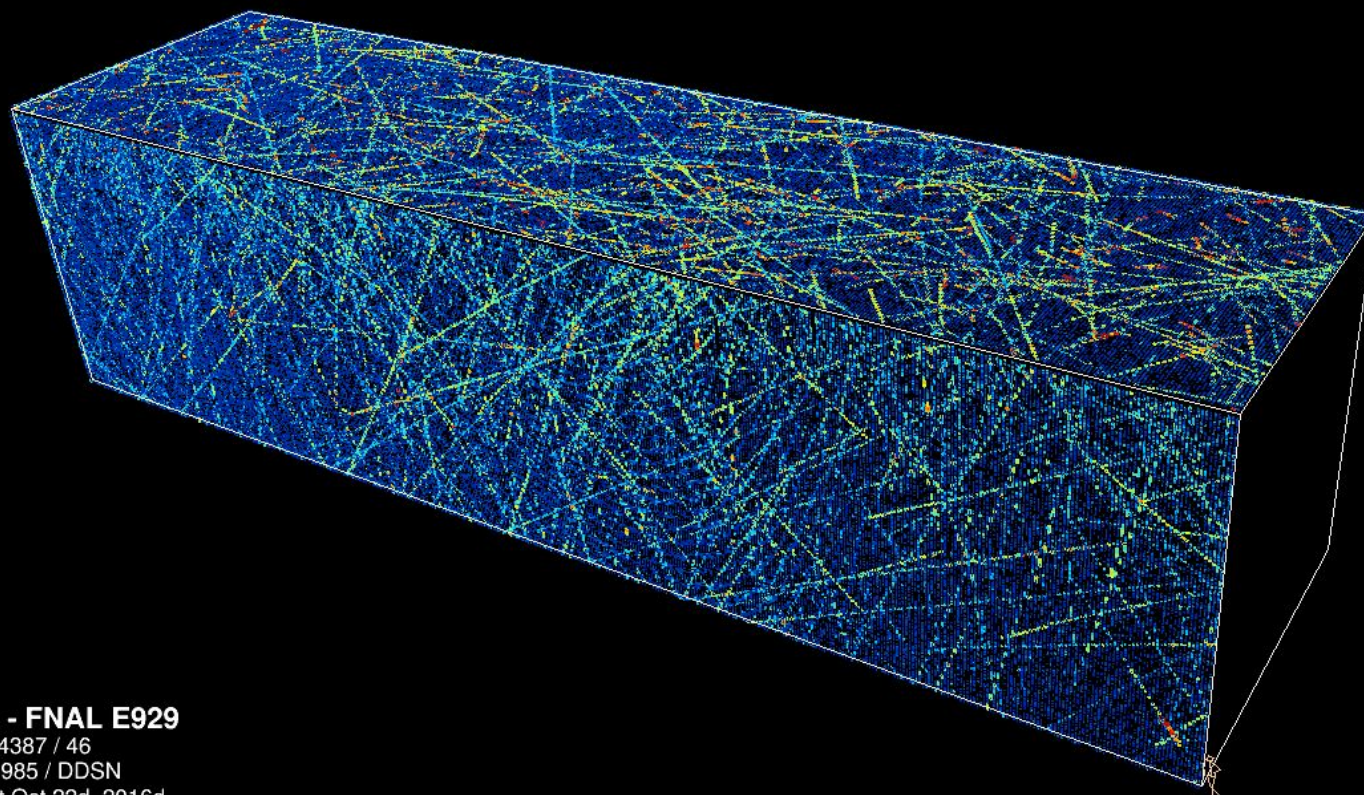
В текущем анализе мы рассматриваем только обратный бета-распад.

Источники фона

- Атмосферные мюоны
 - Мишелевские электроны
- Атмосферные ливни высоких энергий
- Шумы электроники

Сигнал: 1-4

сцинтилляционных ячейки



NOvA - FNAL E929

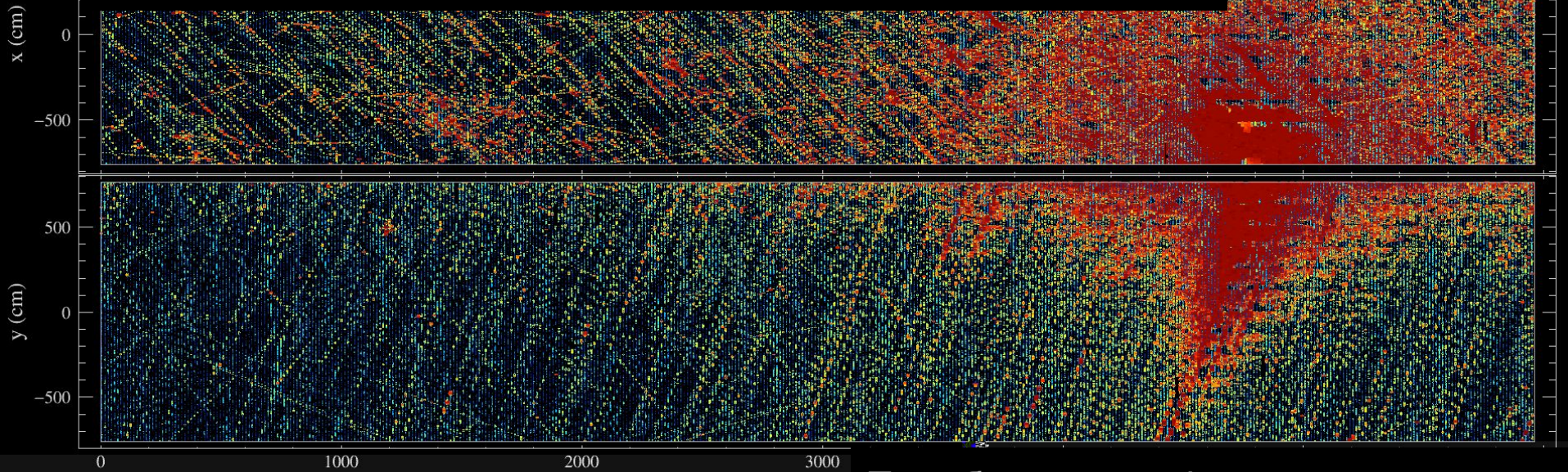
Run: 24387 / 46

Event: 1985 / DDSN

UTC Sat Oct 22d, 2016d

19d:32d:48.095000000

Атмосферные ливни высоких энергий



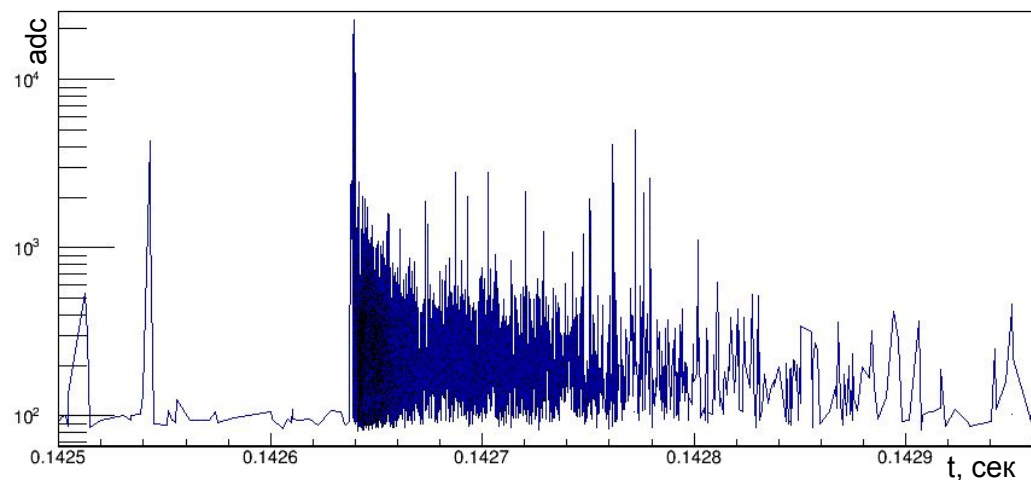
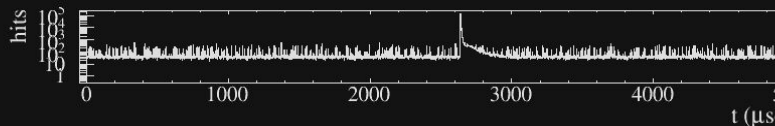
NOvA - FNAL E929

Run: 24387 / 46

Event: 2016 / DDSN

UTC Sat Oct 22, 2016

19:32:48.14000000



Подобные атмосферные ливни:

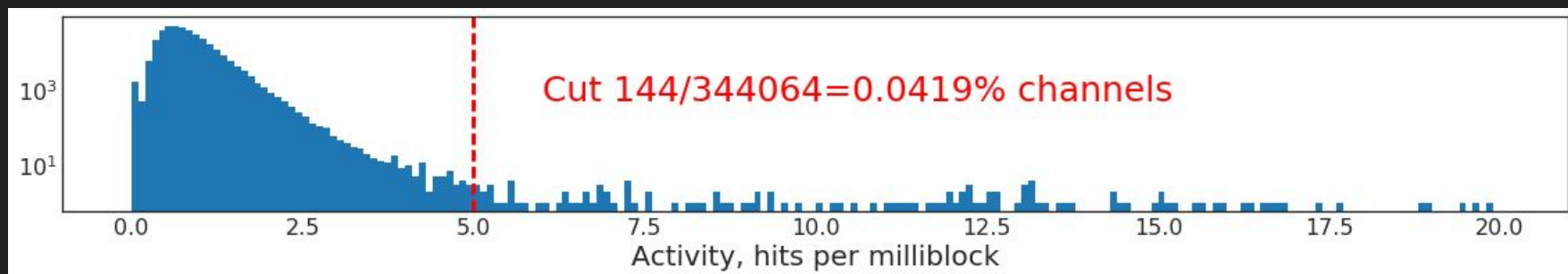
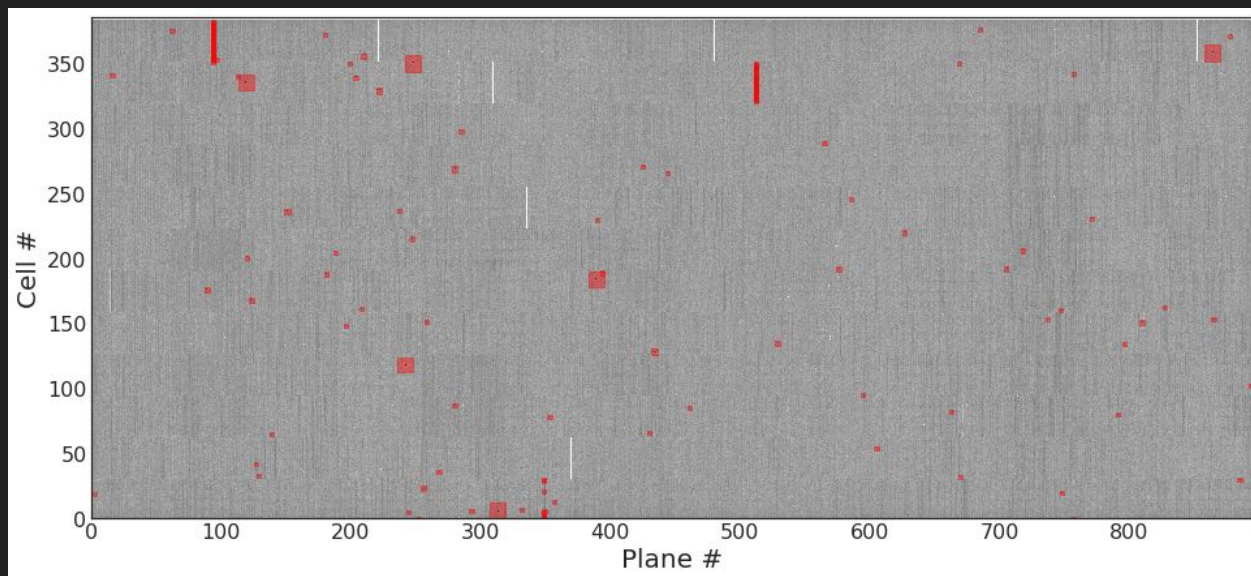
- Случаются довольно часто (1-2 раза в час)
- Огромное энерговыделение в течение короткого времени (~1 мкс)
- Скореллированная активность в течение ~350 мкс после ливня.
- Легко детектируются по первому всплеску энерговыделения, вырезаются по времени

Шумы каналов считывающей электроники

Каналы считывающей электроники имеют разный уровень шума.

Для того, чтобы отбросить шумящие каналы, мы оцениваем активность каждого канала в течение 50мс.

Каналы с активностью больше 5 отсчетов/5мс



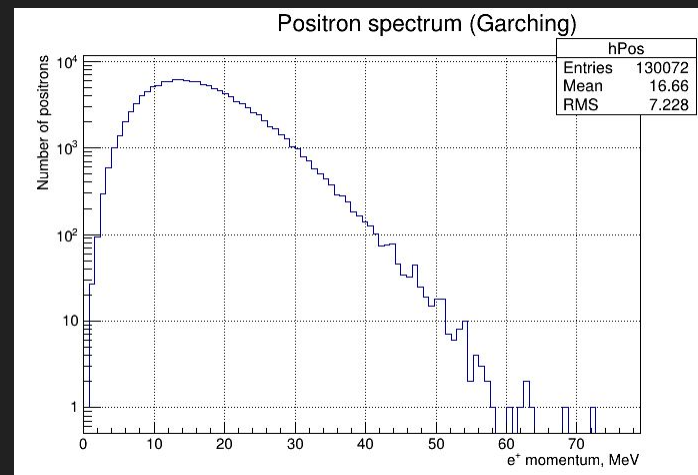
Симуляция сигнала: GenieSNova

Для симуляции взаимодействий нейтрино от сверхновых в детекторах NOvA был разработан программный пакет **GenieSNova** на основе генератора GENIE

- Интерфейс к нескольким моделям потока нейтрино от сверхновой
- Генерация нейтринных взаимодействий последовательно во времени
- Легкая интеграция в существующую цепочку симуляции в NOvA
- Универсальность: можно адаптировать для других экспериментов.

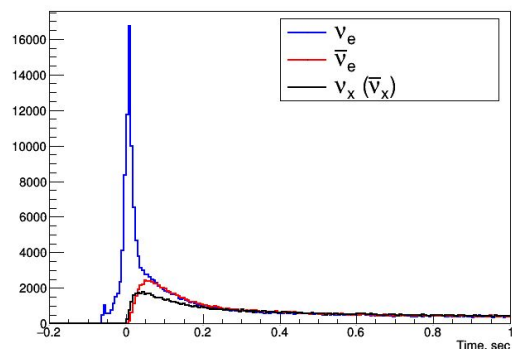
Сечения взаимодействий:

- Обратный бета распад: Strumia-Vissani
- Упругое рассеяние на электронах

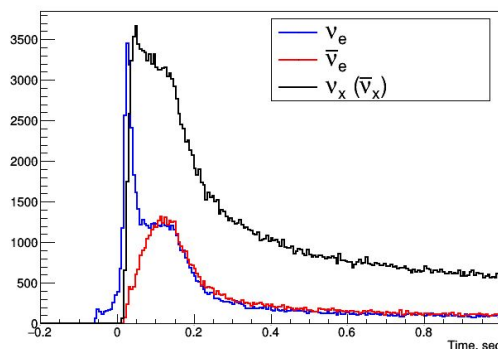


Дополнительные каналы будут добавлены позже

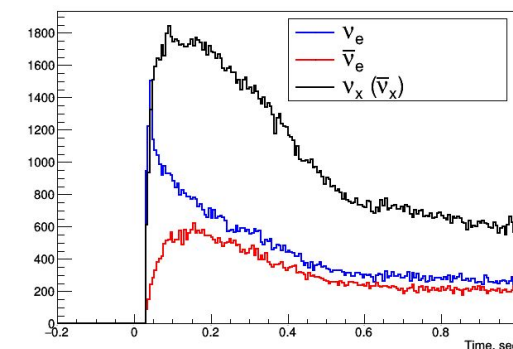
garching model



SND_5001 model



livermore model



Реконструкция кандидатов взаимодействий

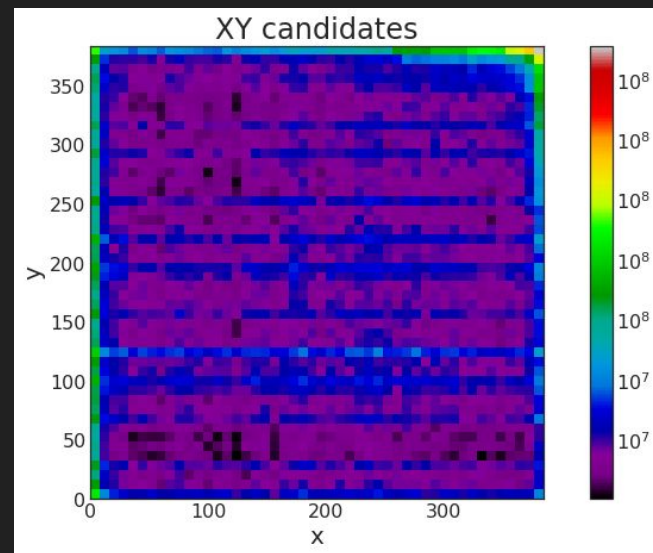
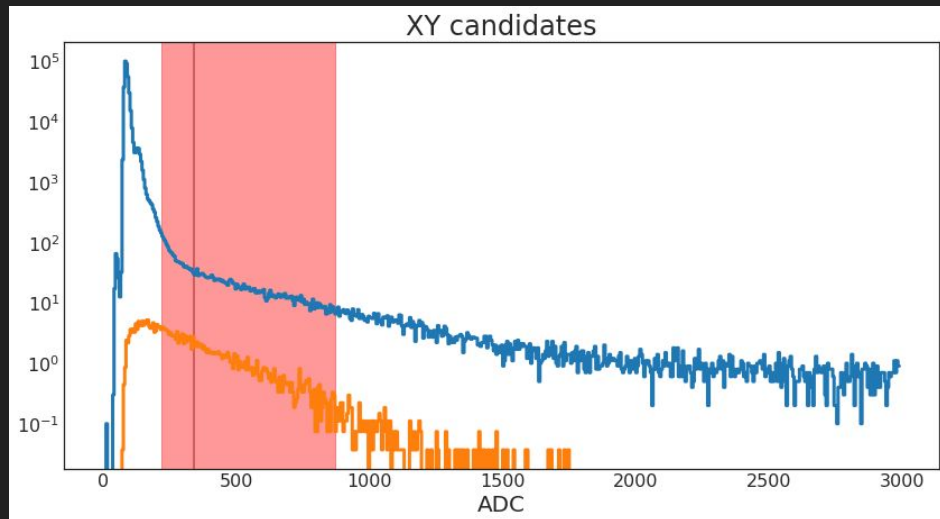
Сигнал: несколько отсчётов в сцинтилляционных ячейках, близких во времени и пространстве - кластер

Фон в соседних ячейках в одной плоскости Z может быть скоррелирован (шум электроники).

Поэтому мы рассматриваем только кластеры, имеющие отсчёты в обеих плоскостях: ZX и ZY.

Отбор сигнала в доверительном объёме позволяет уменьшить фон, идущий извне детектора.

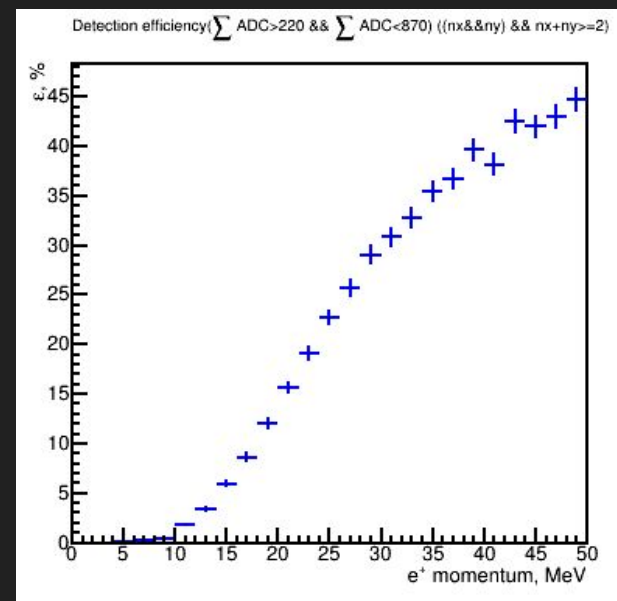
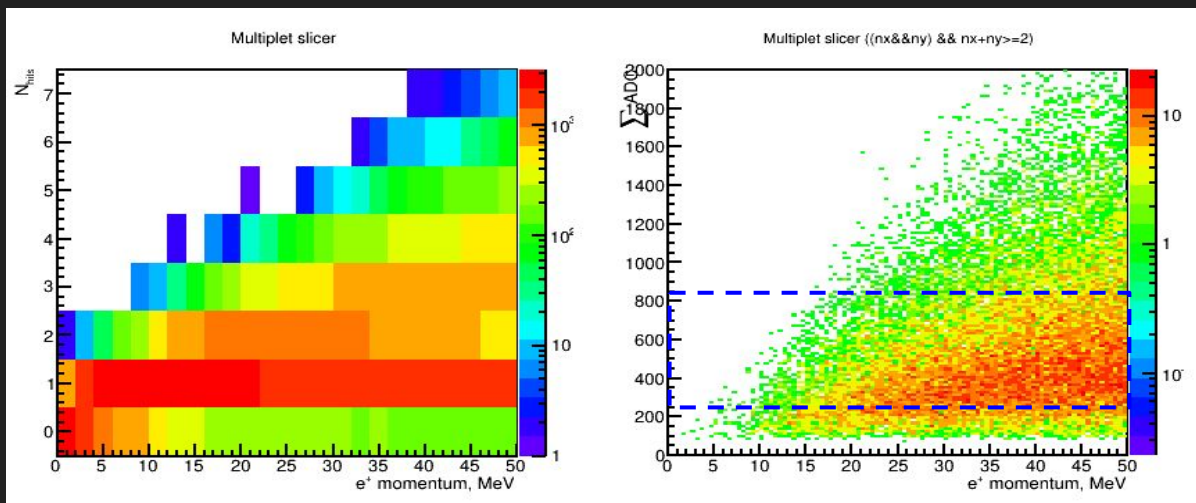
Кроме того, отбираем сигнал по суммарной амплитуде отсчётов.



Эффективность детектирования позитронов

С помощью симулированного набора позитронов с энергиями до 50 МэВ мы можем оценить эффективность нашего отбора кандидатов.

Позитроны распределены равномерно по объему детектора и изотропны.



Временной анализ

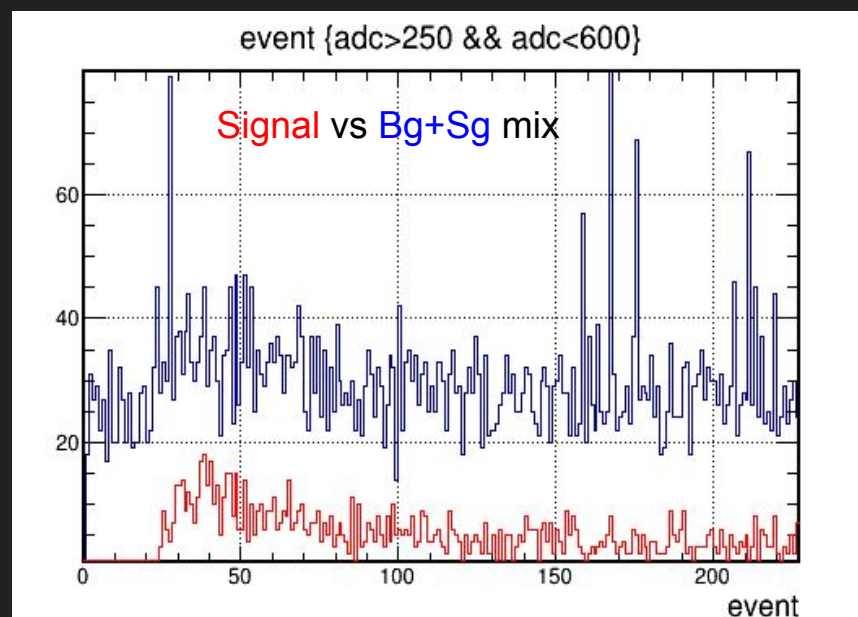
Мы рассмотрели процедуру отбора кандидатов в одном миллиблоке.

Однако в случае сверхновой, мы не можем принять решение на основе одного измерения!

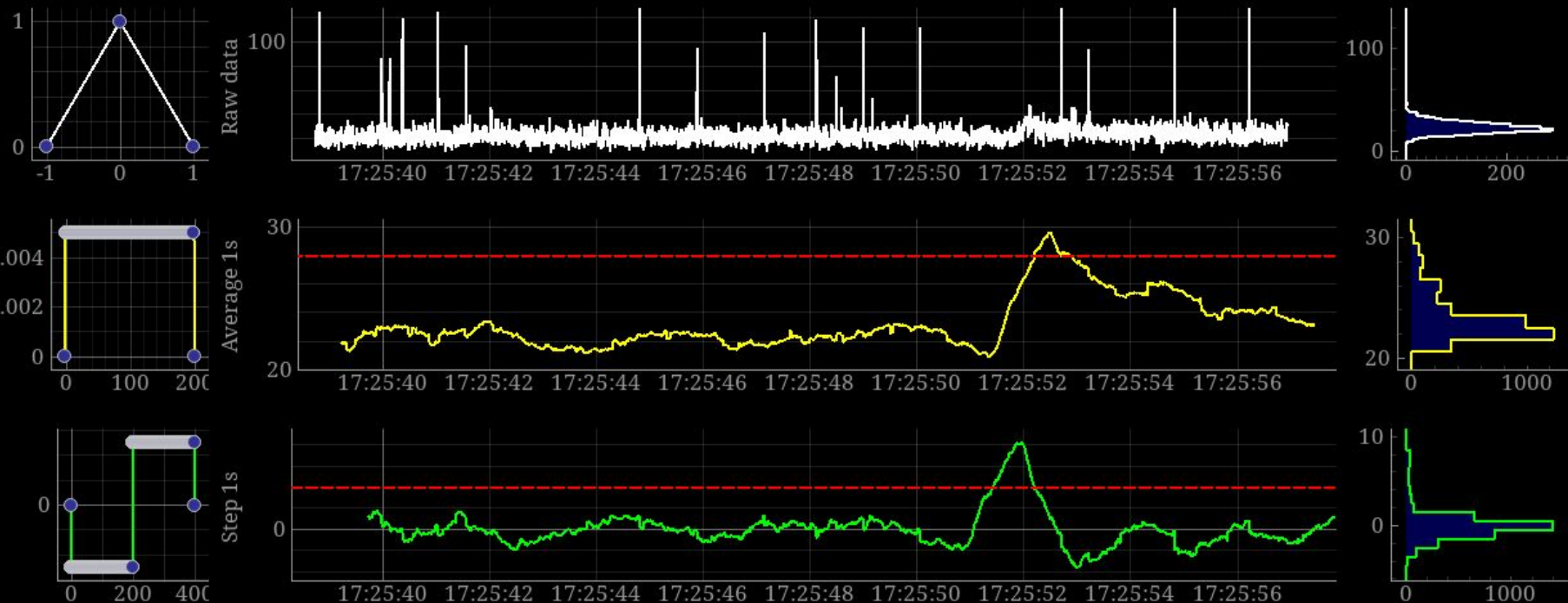
Система DDT в обычном виде не подходит:

- Каждый DDT процесс может анализировать только текущий миллиблок
- Данные обрабатываются параллельно в 1000 процессов - нет возможности временного анализа.

Решение: каждый DDT процесс отправляет данные на центральный узел, где уже производится временной анализ и принимается решение.

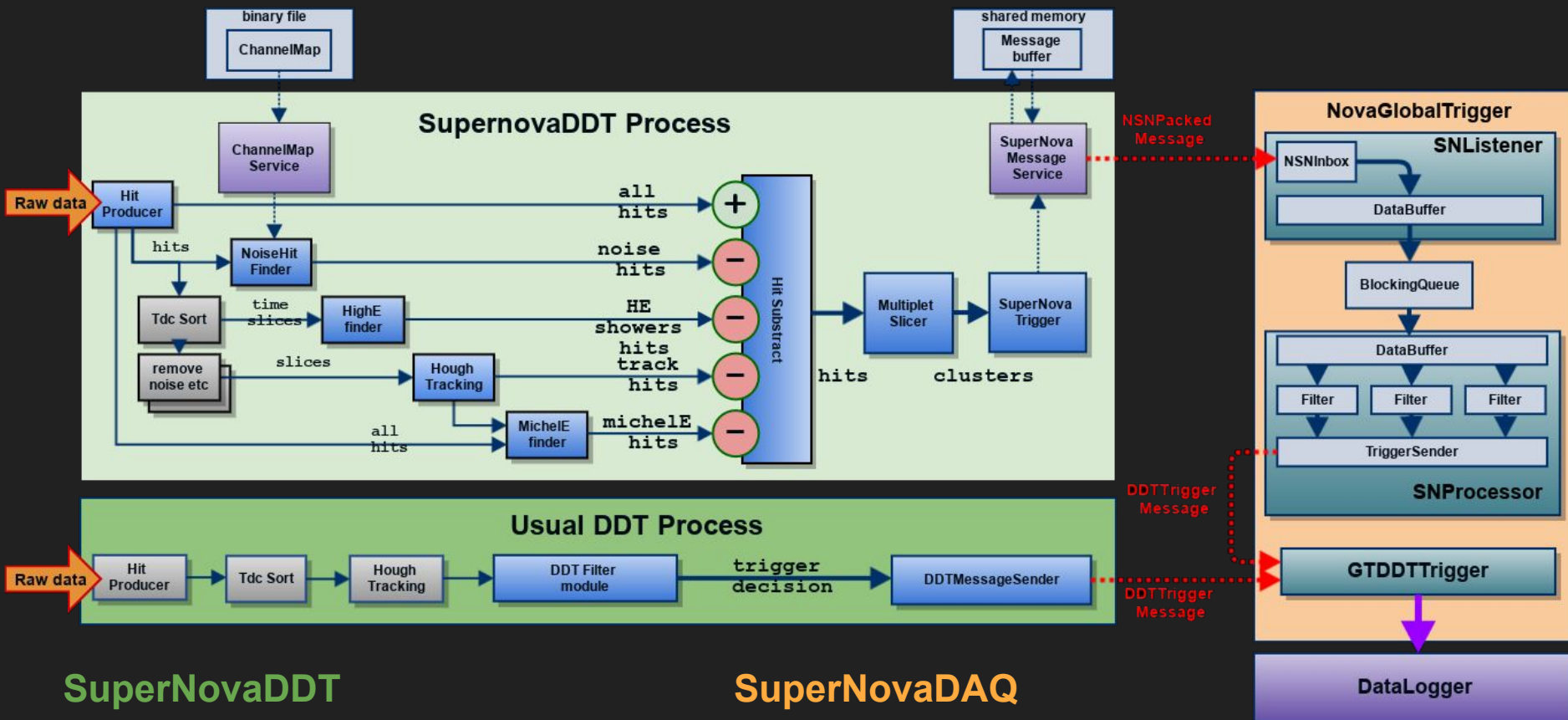


Обработка сигнала от сверхновой: фильтрация и триггер



- **Raw data** has a small bump above the noisy background, when SN starts.
- **Averaging** data with 1s window gives us a peak around the bump (signal maximum). It is non shift-invariant: when BG level changes we'll need to update the **threshold**
- **Variation** of 1s averages detects the **front** of the signal. It is shift-invariant.

Схема триггерной системы для сверхновой



SuperNovaDDT

- Из общего набора хитов мы вычитаем
 - мюонные треки, мишелевские электроны,
- Реконструкция кластеров
- Подсчёт количества кандидатов взаимодействий на миллиблок
- Отправка сообщения

SuperNovaDAQ

- Получение [#candidates; timestamp] ⇒ временной ряд
- Свертка с фильтрами. Если превышен порог:
 - Отправить триггерное сообщение
- При получении триггера:
 - Отправить команду на сохранение данных
 - Отправить триггерный сигнал в другой детектор

Порог триггера и эффективность детектирования

Триггер срабатывает, когда число кандидатов в 1с окне превысит установленный порог.

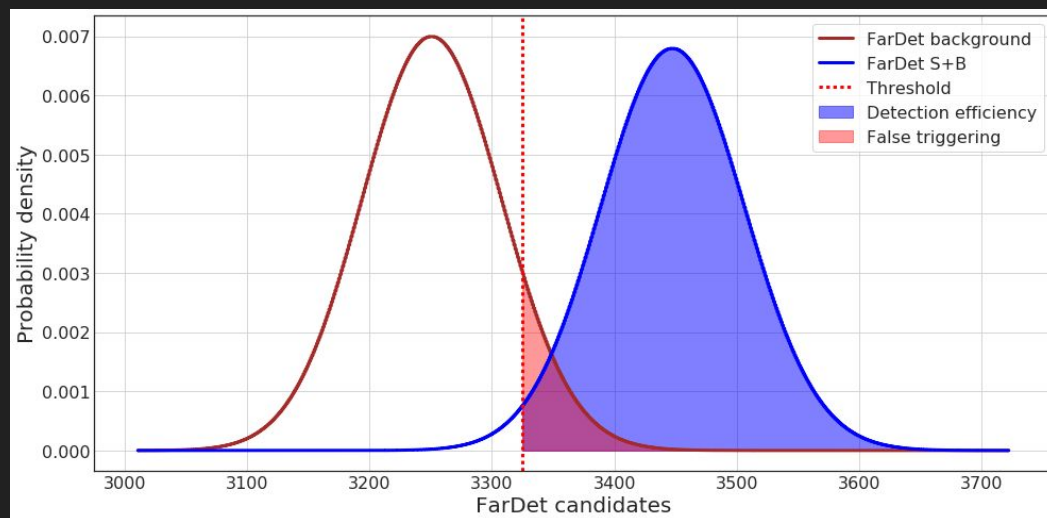
Поскольку число кандидатов (фона и сигнала) подчиняется распределению Пуассона, можно вычислить для заданного порога:

- вероятность ложного срабатывания
- вероятность детектирования сигнала (зная ожидаемое среднее значение)

Требование SNEWS: не более

1 ложного срабатывания в неделю

Это позволяет определить порог для детекторов.



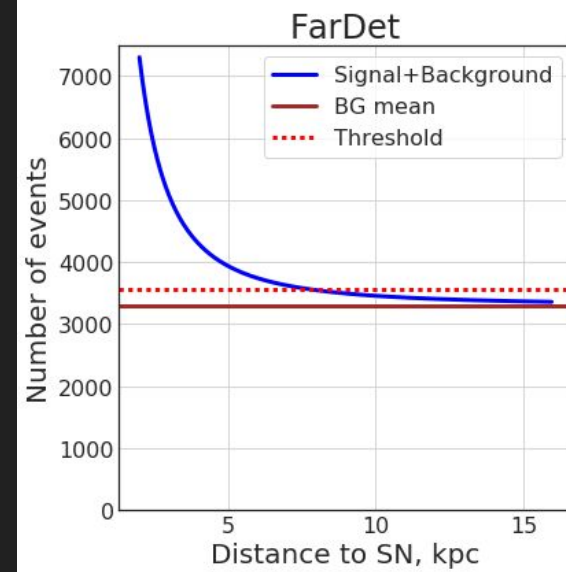
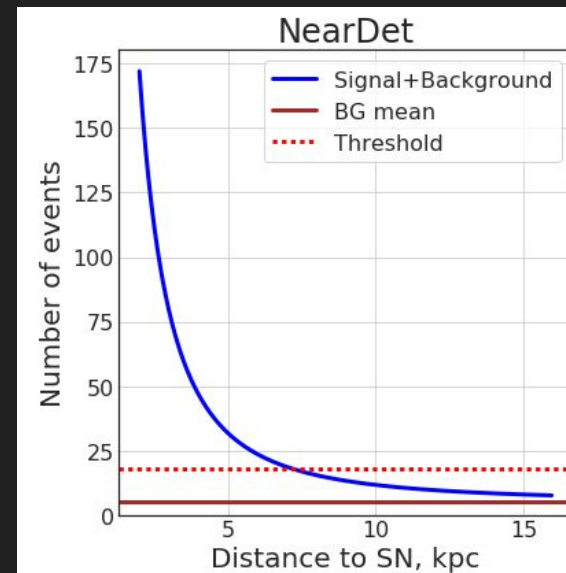
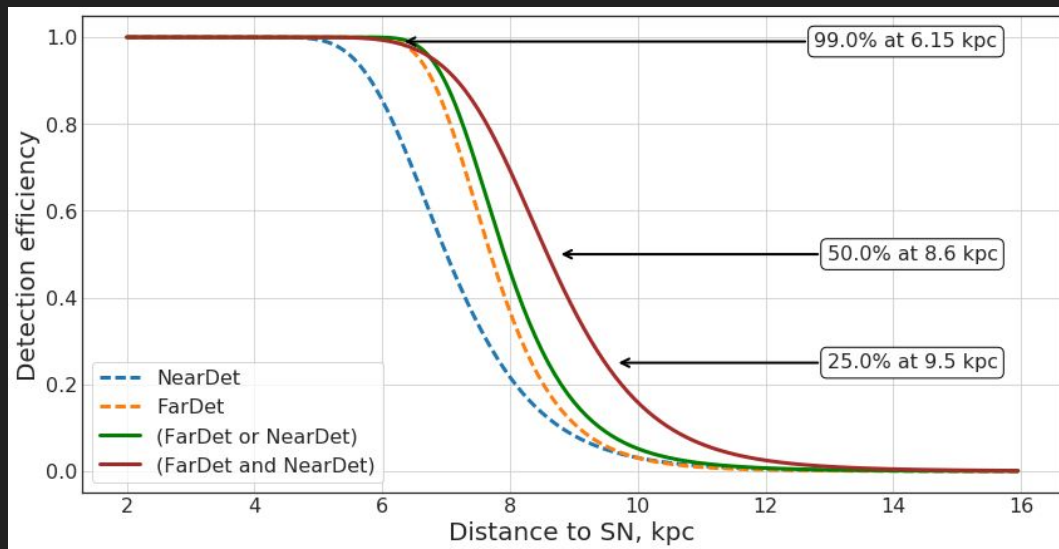
Комбинирование детекторов

Процедура отбора была также проведена для ближнего детектора.

Мы можем скомбинировать триггерные сигналы от **Дальнего** и **Ближнего** детекторов:

- оба детектора сработали вместе (**AND**):
 - Ложные срабатывания каждого детектора: раз в **13 минут**
- сработал один из детекторов (**OR**):
 - Ложные срабатывания каждого детектора: раз в **2 недели**

чтобы комбинированный триггер срабатывал раз в **1 неделю**



Заключение

- NOvA предоставляет широкие возможности для дополнительных анализов:
 - Ближний детектор - благодаря близости к нейтринному пучку
 - Дальний детектор - благодаря размерам и расположению на поверхности
- Ведутся работы в различных направлениях:
 - Поиск магнитных монополей, темной материи, анализ магнитного момента нейтрино
 - Исследования космических лучей
- Разработана система для детектирования сигнала от вспышки сверхновой
 - Есть возможности для улучшения:
 - Использование временной корреляция данных с БД и ДД
 - Включение новых классов сигнальных кандидатов (кластеры только в X и Y плоскостях)
 - Учёт дополнительных каналов взаимодействий
 - Система будет развёрнута на детекторе этим летом.

