

V МАРКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

10 – 11 мая 2007 года, Москва

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ НЕЙТРИННАЯ АСТРОНОМИЯ

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп:

**путь от идеи создания до
регистрации нейтринного сигнала от
SN 1987A LMC**

Е. Н. Алексеев

Институт ядерных исследований РАН

**М.А.Марков «НЕЙТРИНО»,
издательство «Наука», Москва, 1964 год**

Стр.136:

«...в будущем соответствующие лаборатории, детектируя возникновение такого нейтринного излучения, могли бы предсказывать появление сверхновых звезд, так как бурное развитие высоких температур внутри таких звезд ведет к возникновению проникающего нейтринного излучения ранее того момента, когда поверхность звезды испускает вспыхнувшее мощное световое излучение.

Так зарождаются идеи нейтринной астрономии.»



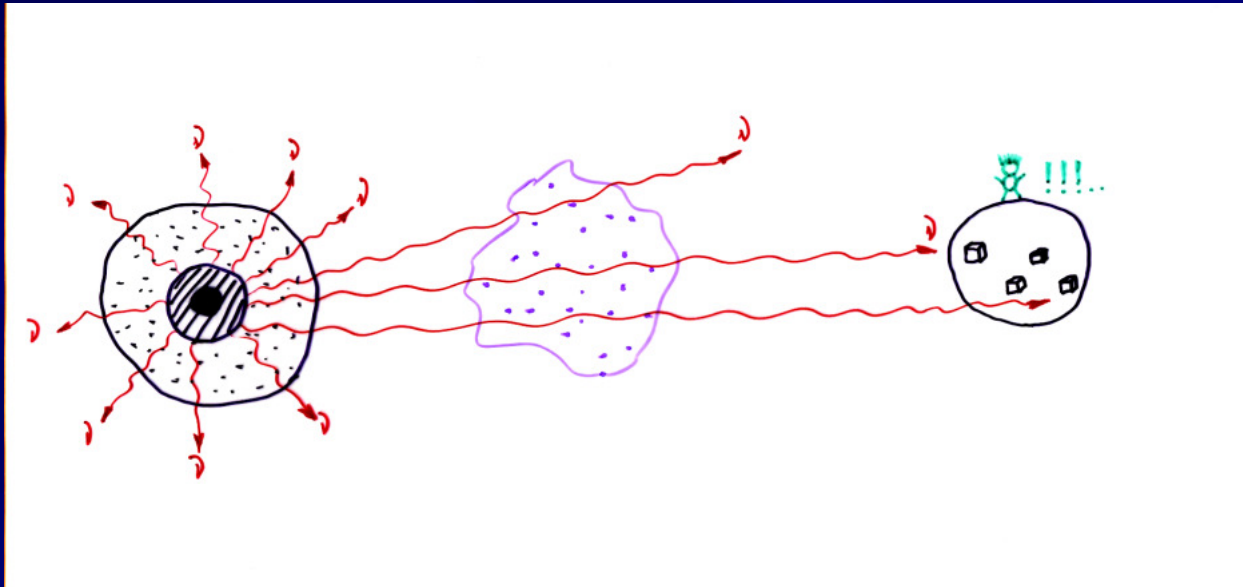
Идея эксперимента:

G.V. Domogatsky, G.T. Zatsepin.

“On the experimental possibilities of the observation of neutrinos from collapsing stars”, Proc.9th ICRC, London, England, 1965, v.2, p.1030 – 1032.

M.A. Markov, V.A. Kuzmin, G.T. Zatsepin, I.M.Zheleznykh

“ On high-energy neutrino physics in cosmic rays “
J. Phys. Soc. Jap. 1962, v. 17,
suppl. A – III, p. 353 – 356 .



В случае же, если структура нуклона проявляется при взаимодействии с нейтрино уже на расстояниях порядка 10^{-14} см, энергетический спектр мюонов, порожденных потоком нейтрино, будет мягким, подавляющая их часть пройдет только через тонкие фильтры, а угловое распределение окажется

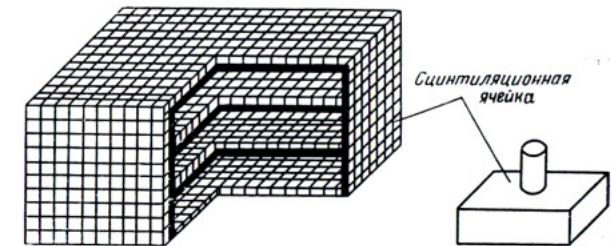
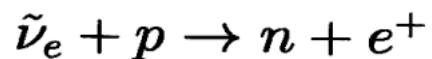


Схема установки для изучения взаимодействий нейтрино космических лучей



число зарегистрированных событий

$$\sim \text{const} \cdot M_{\text{det}} / R^2$$

$$L_{\text{набл}} \sim (2 - 5) \cdot 10^{53} \text{ эрг}$$

$$\langle E \rangle \sim (8 - 14) \text{ МэВ}, t_0 \sim (1 - 20) \text{ сек}$$

Г.Т.Зацепин, В.А. Кузьмин

«Солнечные нейтрино, нейтрино от коллапсирующих звезд и внегалактические нейтрино высоких энергий»,

Вестник АН СССР, № 2 (1964).

Этапы большого пути

- *** **1961-1962** - По инициативе М.А.Маркова начались поиски подземных выработок, пригодных для размещения подземного сцинтилляционного телескопа.
- *** **1964** - Утверждение Президентом АН СССР М.В.Келдышем задания на проектирование нейтринной станции ФИАН.
- *** Руководство по созданию телескопа поручено **А.Е. ЧУДАКОВУ**.
Основные задачи телескопа : изучение нейтрино высоких энергий и взаимодействий мюонов космических лучей.
- *** **1977** - Завершение работ по строительству телескопа. Создание исследовательских физических программ, включая «Коллапс».
- *** **1979** - Отработка методов отбора событий и обработки информации, регистрируемой в программе «Коллапс».
- *** **1980** - Начало непрерывного слежения за Галактикой в поиске нейтринного сигнала от гравитационного коллапса ядра массивной звезды.
- *** **1980** - ... - Поиск нейтрино от мощных солнечных вспышек, поиск низкоэнергичного нейтринного сопровождения гамма-всплесков, анализ редких сигналов на телескопе...
- *** **1987** - Регистрация нейтринного сигнала от SN 1987A LMC.

Основатели Баксанской нейтринной обсерватории



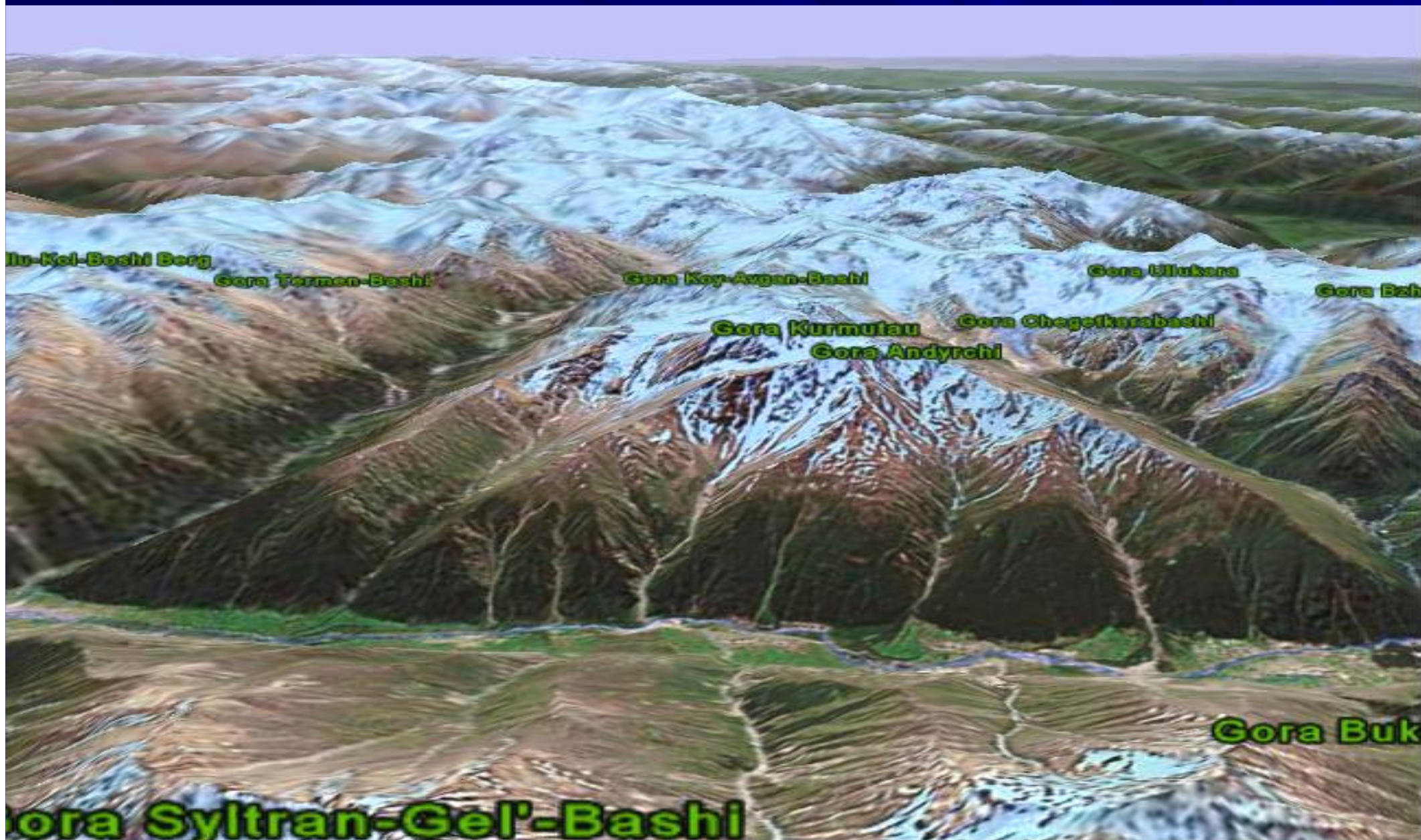
1973 – 1986 годы

Год начала наблюдений	Глубина (м.в.э.)	Масса мишени	$E_{\text{пор}}$ (МэВ)	Страна
1973	4400	15 т H_2O	20	Хоумстейк, США
1973	1800	22 т H_2O	20	Барбетон, США
1973	4270	20 т H_2O	20	Монблан, Италия
1978 – 1981	4200	150 т H_2O	10 – 15	Хоумстейк, США
1978	550	100 т сц - р	7	Артемовск, СССР
1979	850	330 т сц - р	12.5 → 10	Баксан, СССР
1984	5200	90 т сц - р	5 – 7	Монблан, СССР – Италия
1986	2400	2140 т H_2O	8	Камиока, Япония
1986	1570	6800 т H_2O	20	Ohio, США

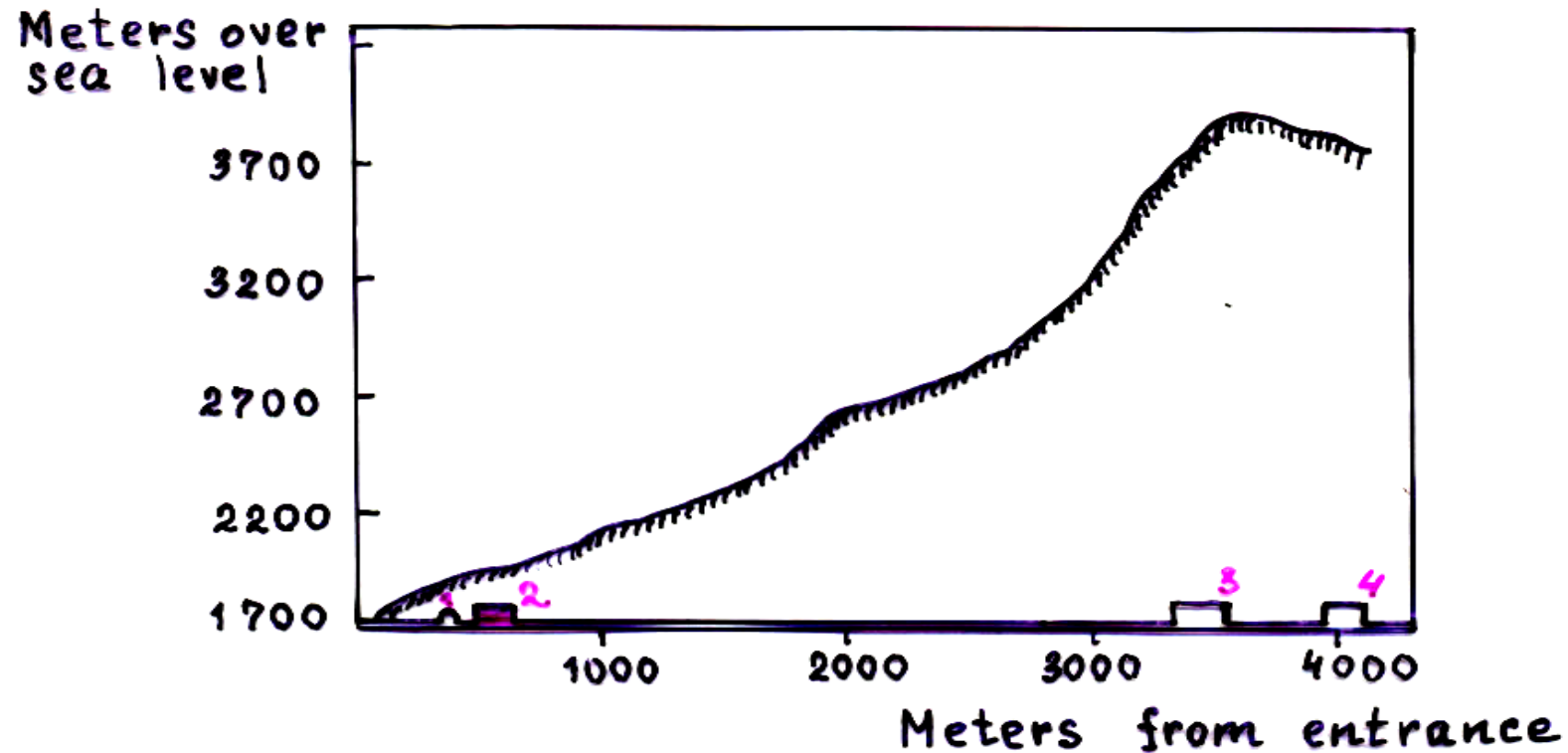
Баксанское ущелье



Баксанское ущелье и Кавказский хребет



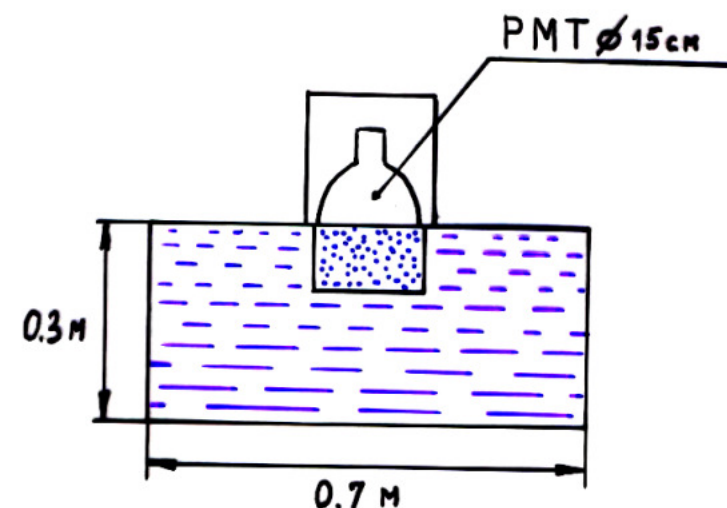
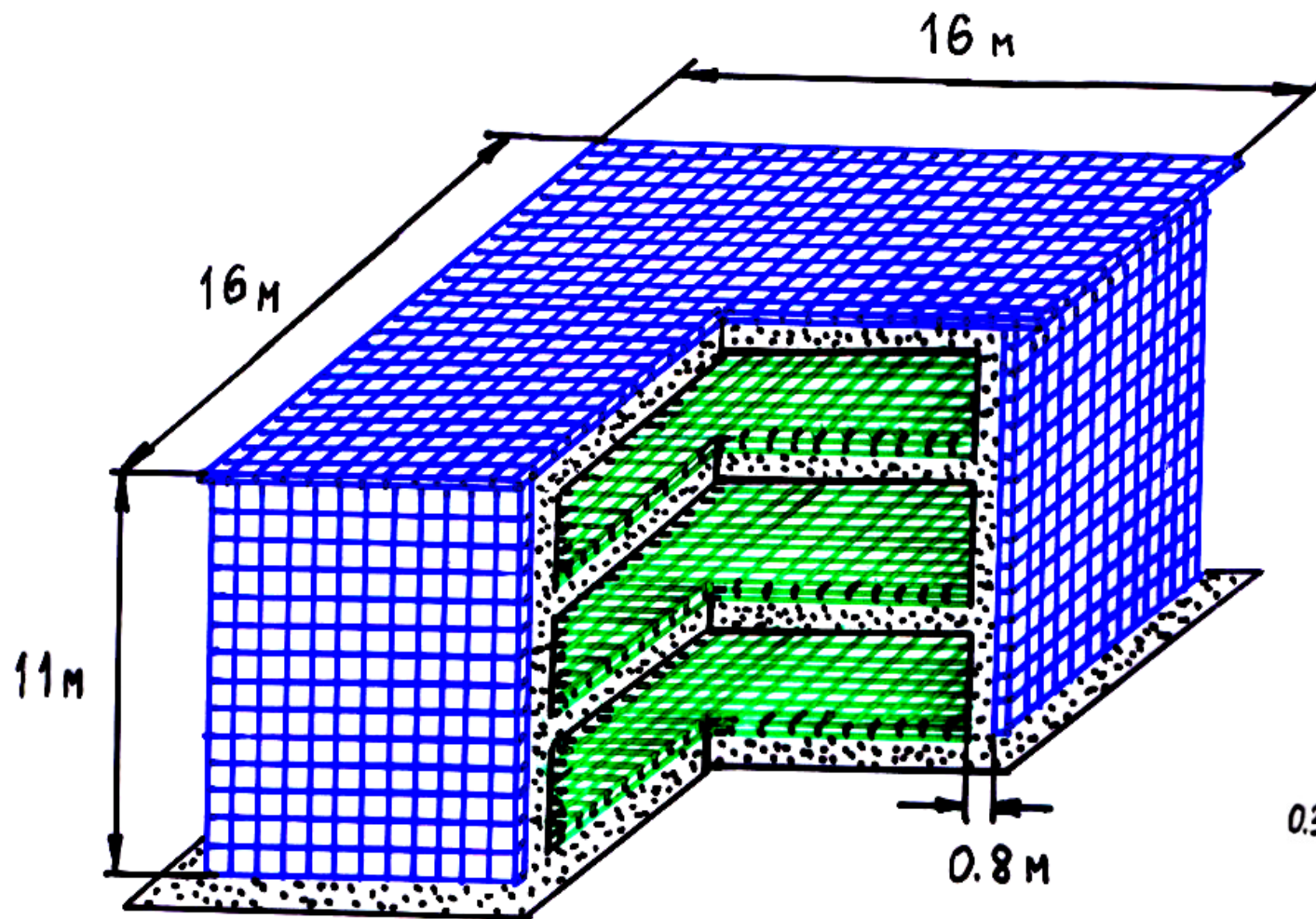
Схематическое изображение сечения г. Андырчи с помещениями для установок



1. Низкофоновая камера
2. Сцинтилляционный телескоп
3. Ga – Ge детектор
4. Будущие эксперименты

Телескоп расположен на расстоянии 550 м от входа в тоннель
на глубине 850 м.в.э..

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп



Стены, пол камеры и несущие конструкции телескопа выполнены из низкорadioактивного бетона.

Полное количество стандартных детекторов телескопа 3150

Полная масса мишени 330 т жидкого органического сцинтиллятора

Общий вид верхней плоскости телескопа, состоящей из 576 стандартных детекторов.

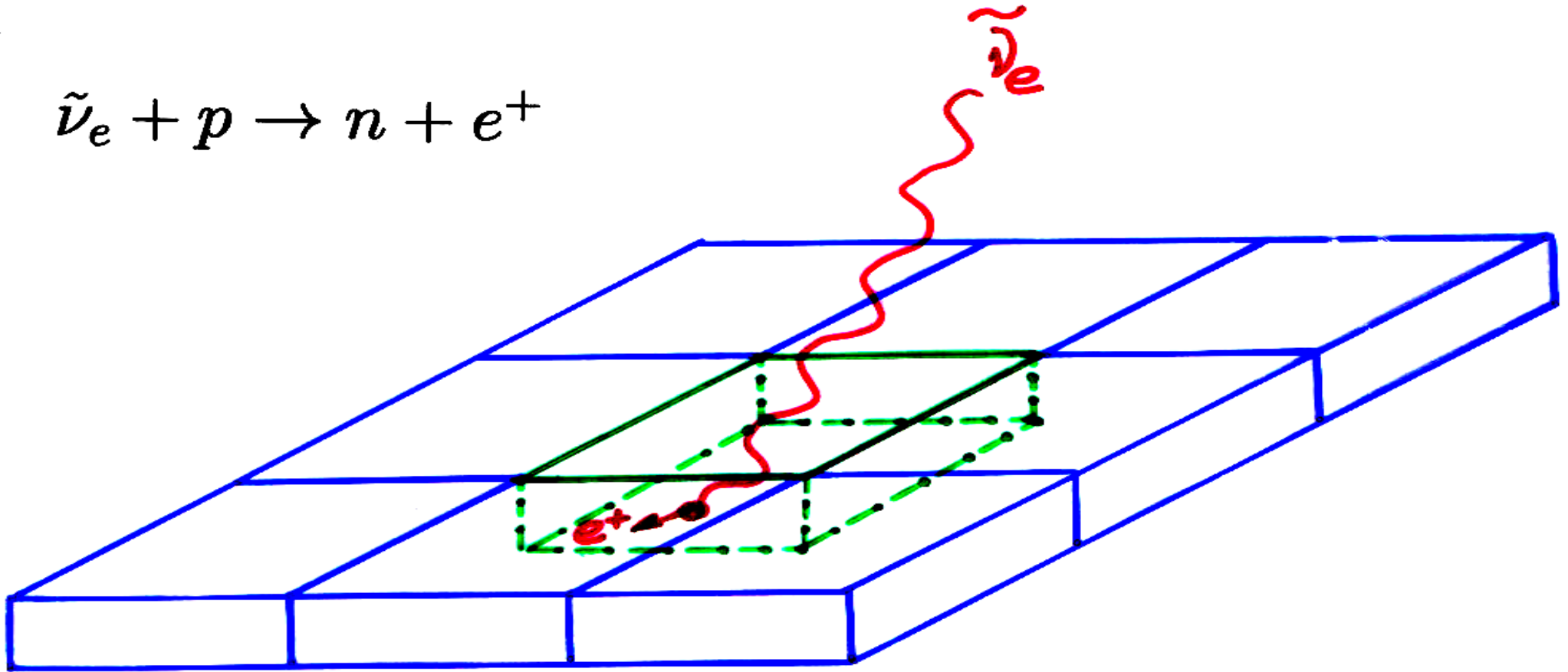
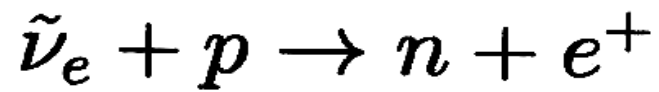


Физик - экспериментатор выполняет во время ремонтного дня работы, необходимые для поддержания стабильности физических характеристик телескопа.

Общий вид вертикальной плоскости телескопа.



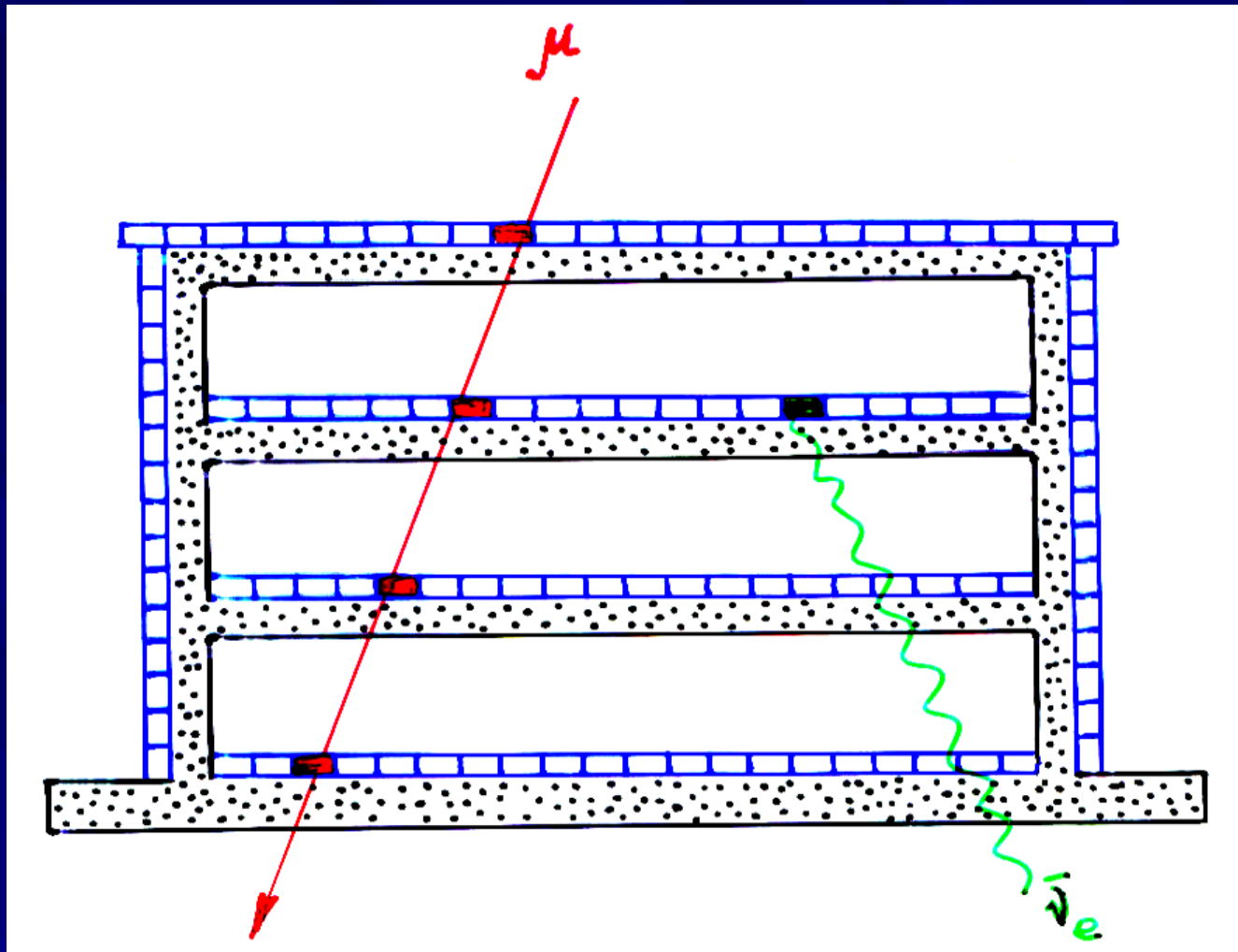
Стандартный детектор телескопа с позитроном от взаимодействия электронного антинейтрино



Пробеги позитронов, в основном, укладываются в объеме стандартного детектора.

Главное условие отбора : один и только один детектор из 3150

Картинка результата взаимодействия электронного антинейтрино на телескопе



Линия иллюстрирует путь мюона, пересекающего телескоп. Остается группа сработавших детекторов. Результатом взаимодействия электронного антинейтрино является срабатывание на телескопе **единичного детектора**. Сигнал от коллапсных нейтрино будет выглядеть как серия одиночно сработавших детекторов внутри Δt .

Фон от мюонов космических лучей, в основном, подавлен условием главного триггера установки в эксперименте «Коллапс».

Фоновые условия эксперимента

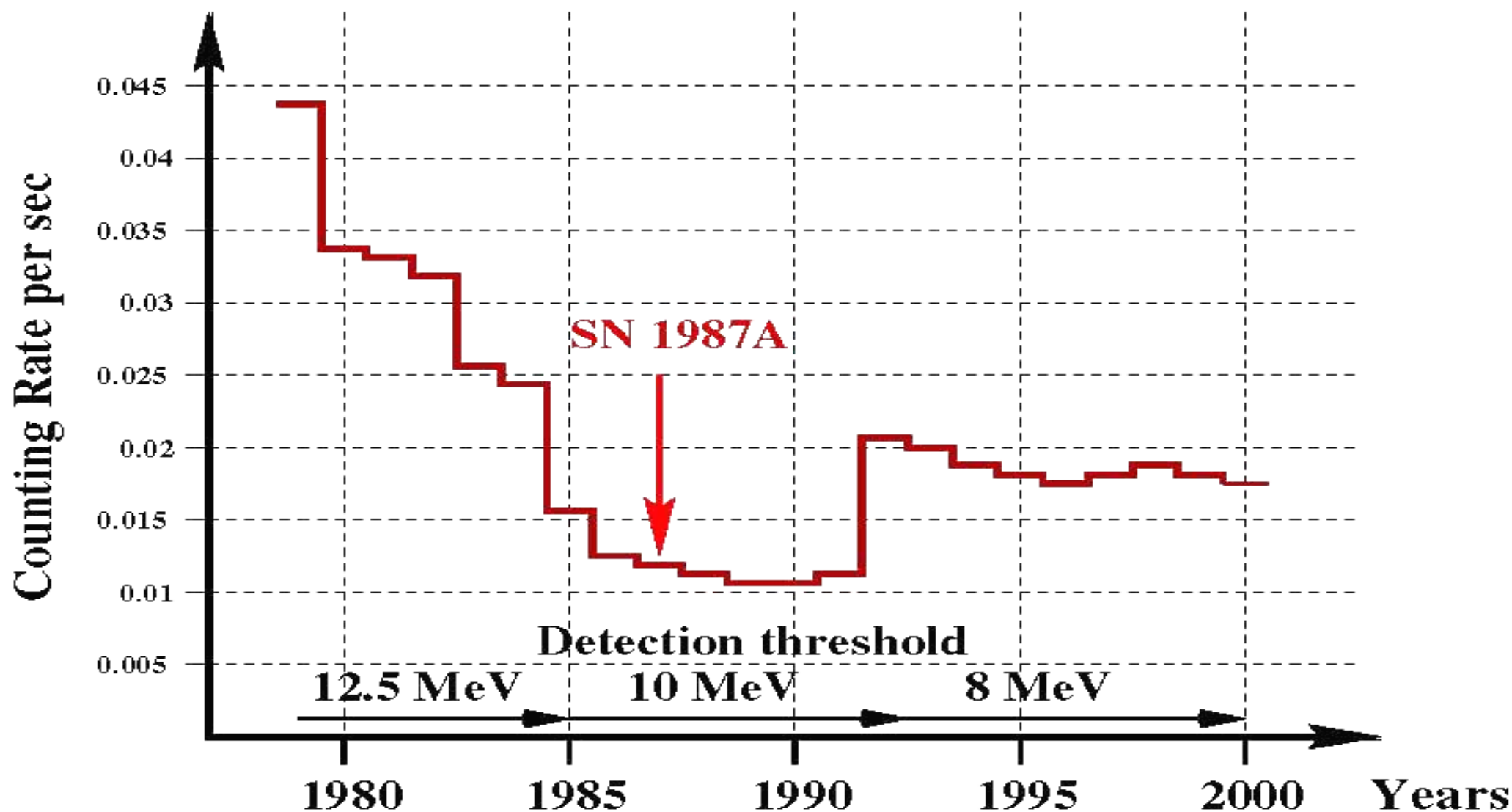
В эксперименте «Коллапс» основной работой является понижение фона для надежного выделения ожидаемого нейтринного сигнала.

Основные источники фона на Баксанском телескопе :

- **МЮОНЫ.** Проникающие мюоны; мюоны, прошедшие через «щели» плоскостей (допороговая потеря энергии); остановки мюонов в перекрытиях; нейтроны от мюонных взаимодействий в грунте вне установки.
Специальный отбор событий «один и только один детектор из 3150». Выполнена электронная защита с эффективным порогом 5 МэВ.
- **ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ.** Вклад незначителен благодаря использованию специального низкорadioактивного бетона и величине порогового энергосвечения в детекторах.
- **ШУМЫ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ.** Трудно устранимый и трудоемкий источник. Подбор низко шумящих фотоумножителей с низким энергетическим эквивалентом; отбор сигналов по форме импульса; постоянное ежедневное мониторингирование состояния всех фотоумножителей и электронных систем для своевременного удаления неисправностей.

Суммарный фон должен быть низким и описываться распределением Пуассона.

Темп счета фоновых событий как функция времени для внутренней части телескопа

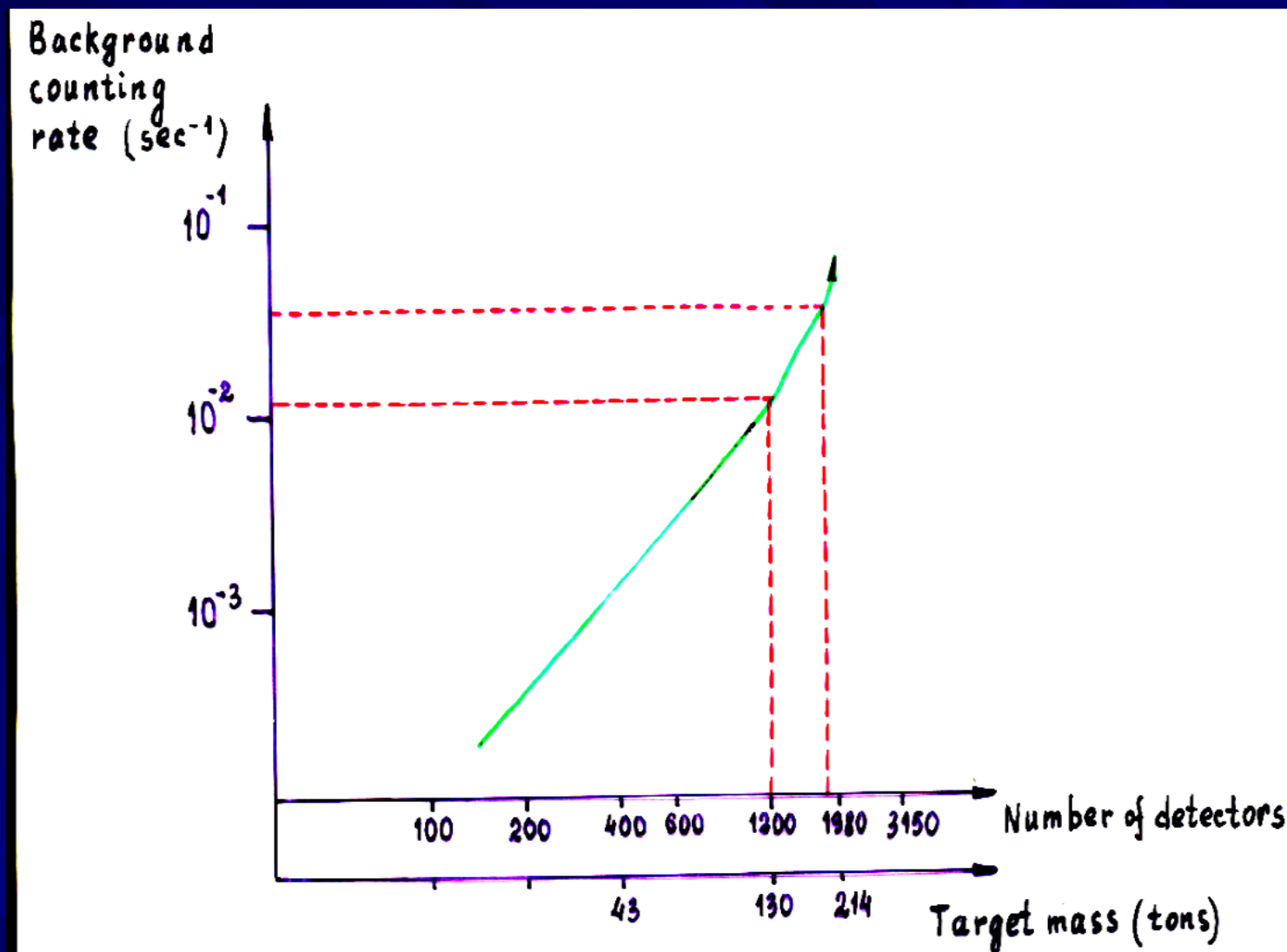


1978 начало работ на телескопе по программе «Коллапс».

1985 понижение порога регистрации 12.5 МэВ → 10 МэВ.

1992 понижение порога регистрации 10 МэВ → 8 МэВ.

Темп счета фоновых событий как функция массы, включенной в наблюдение



Триггер : условие «единичного» детектора. Энерговывделение в событиях : $< 50 \text{ МэВ}$.

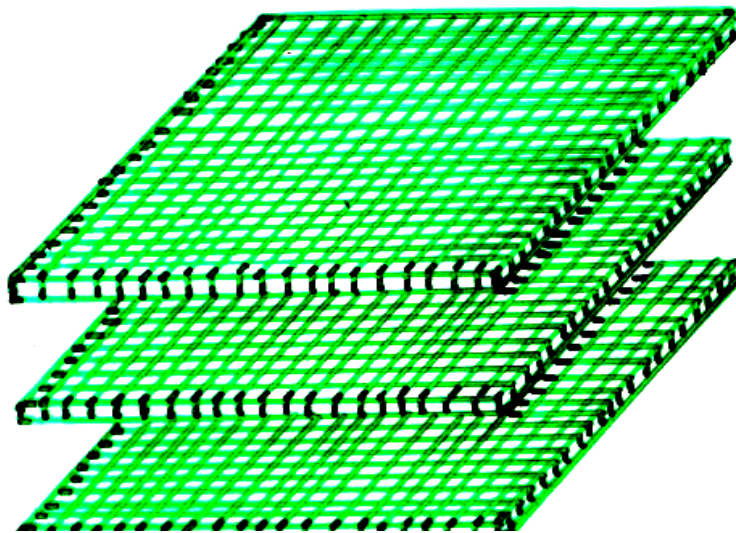
«Триггерная» масса 130 т

фон 0.012 сек^{-1}

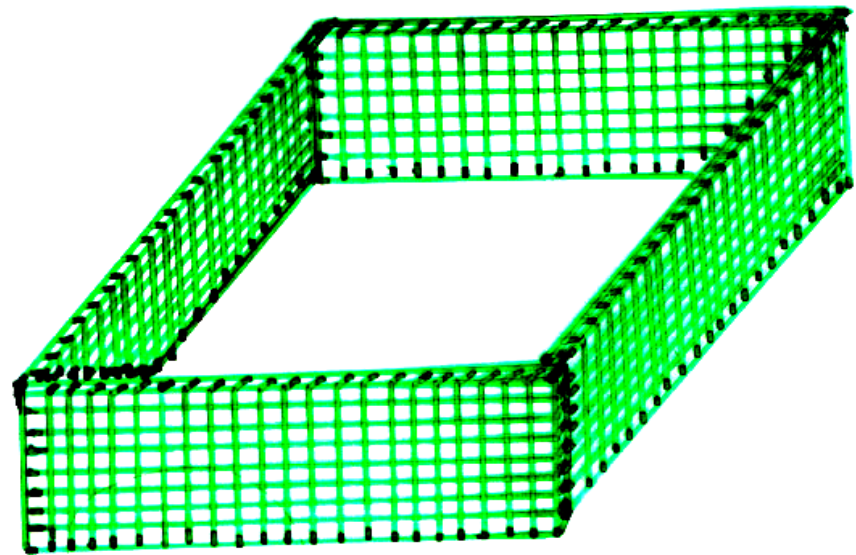
«Fiducial» масса 200 т

фон 0.034 сек^{-1}

«Fiducial» масса телескопа



Internal detectors



External detectors

Информация, регистрируемая о каждом событии всего телескопа :

энерговыделение, время, координаты

Методы выделения ожидаемого сигнала из фона

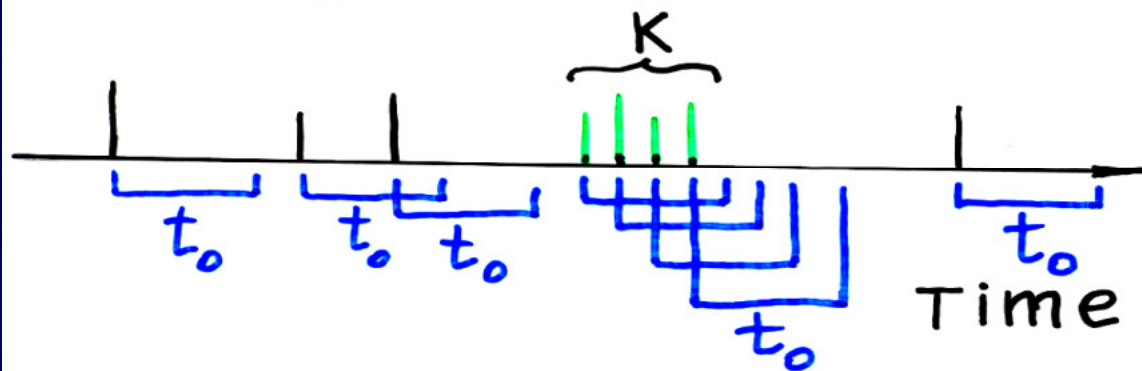
Non-overlapping time windows



Classical Poisson:

$$P(\text{classic}) = \frac{(mt_0)^K}{K!} e^{-mt_0}$$

Sliding time windows



Modified Poisson:

$$P(\text{modified}) = \frac{(mt_0)^{K-1}}{(K-1)!} e^{-mt_0}$$

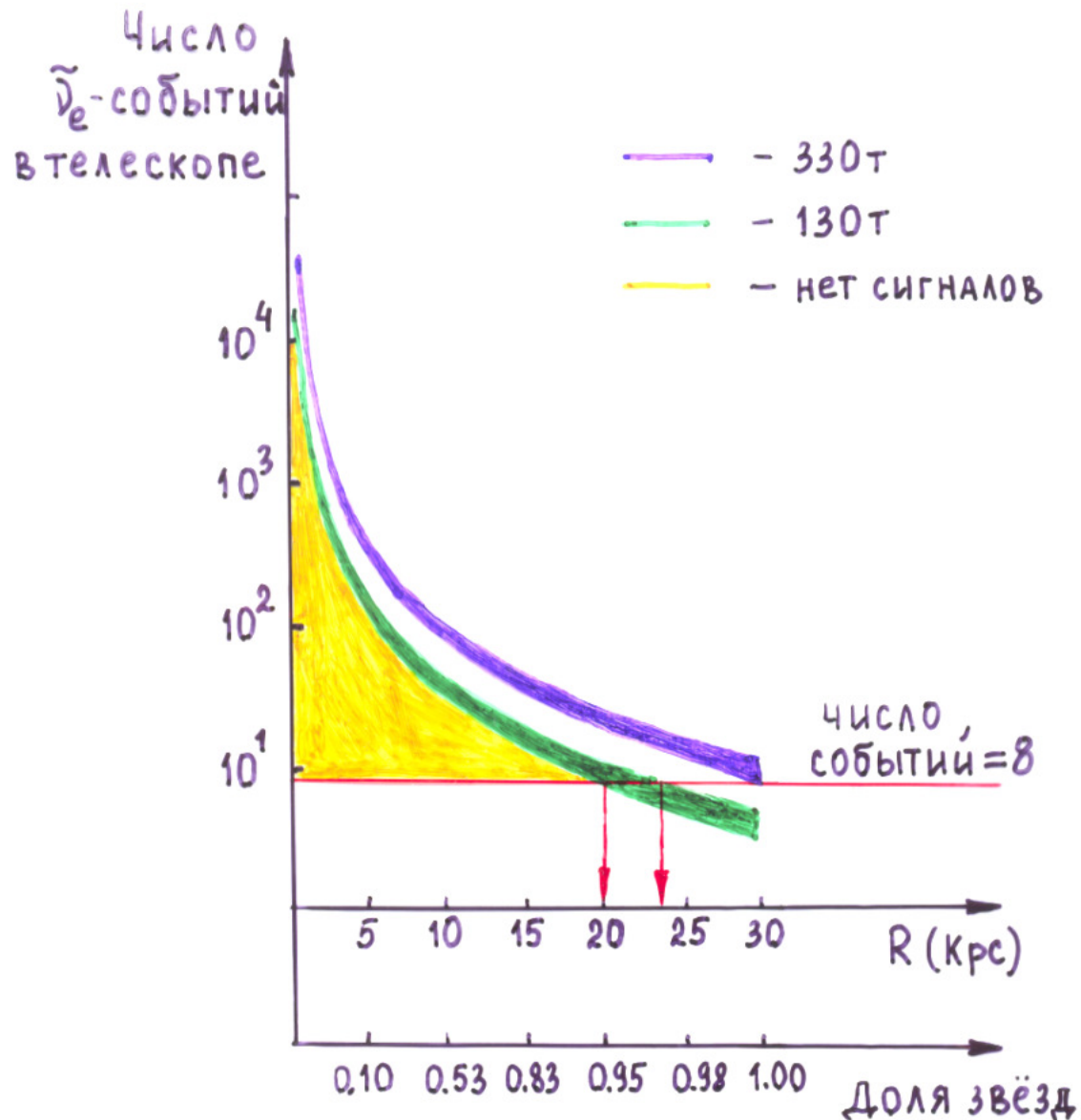
Background rate

$$N(\text{classic}) = \frac{T}{t_0} \cdot \frac{(mt_0)^K}{K!} e^{-mt_0}$$

$$N(\text{modified}) = m \cdot T \cdot \frac{(mt_0)^{K-1}}{(K-1)!} e^{-mt_0}$$

"m" is background counting rate per sec,
T is observation time.

Чувствительность телескопа к ожидаемой вспышке электронных антинейтрино от коллапсирующих звезд Галактики



↙

$$\begin{cases} E_{\text{tot}} = 3 \cdot 10^{53} \text{ эрг} \\ E(\bar{\nu}_e) = (5 \pm 1)^{-1} \cdot E_{\text{tot}} \\ k_B T_{\bar{\nu}_e} = 3.5 \text{ МэВ} \end{cases}$$

Радиус «чувствительности»
Баксанского телескопа
составляет ~ **20 Кpc**, или
более 95 % звезд нашей Галактики.

- Баксанский телескоп начал непрерывное слежение за Галактикой в поисках нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд 30 июня 1980 года.
- Ожидаемое число нейтринных событий от коллапса звезды в центре Галактики :
~ 50 событий в 130 т или ~ 70 событий в 200 т мишени.
- До 1987 года не было зарегистрировано ни одного сигнала, который достоверно можно было бы интерпретировать как вспышку нейтрино от гравитационного коллапса ядра массивной звезды.

23 февраля 1987 года

2 : 52 UT



LSD

7 : 35 UT



Kamiokande II, IMB, Баксан

В Kamiokande II нашли сигнал из 11 событий в 7 : 35 : 35 UT с неточностью ± 1 мин.

Позвонили на установку IMB.

На установке IMB посмотрели данные в течение 6.4 часа вокруг 7 : 35 UT, начиная с 5 : 00 : 00 UT.

Сигнал из 8 событий был найден.

Было объявлено о регистрации нейтринного сигнала от SN 1987A.

R.M. Bionta, G.Blewitt, C.B.Bratton et al.,

Phys. Rev. Lett. 58, 1494 – 1496 (1987)

ПЕРВЫЕ ДОКЛАДЫ О НЕЙТРИННЫХ СИГНАЛАХ

*** В марте на конференции в Морионе (Франция) представители установок Kamiokande II (Япония) и IMB (США) объявили о возможной регистрации нейтринного сигнала в 7 : 35 UT 23 февраля 1987 от SN 1987A LMC.

*** Участник конференции Поманский А.А. в тот же день дозвонился и сообщил об этих докладах.

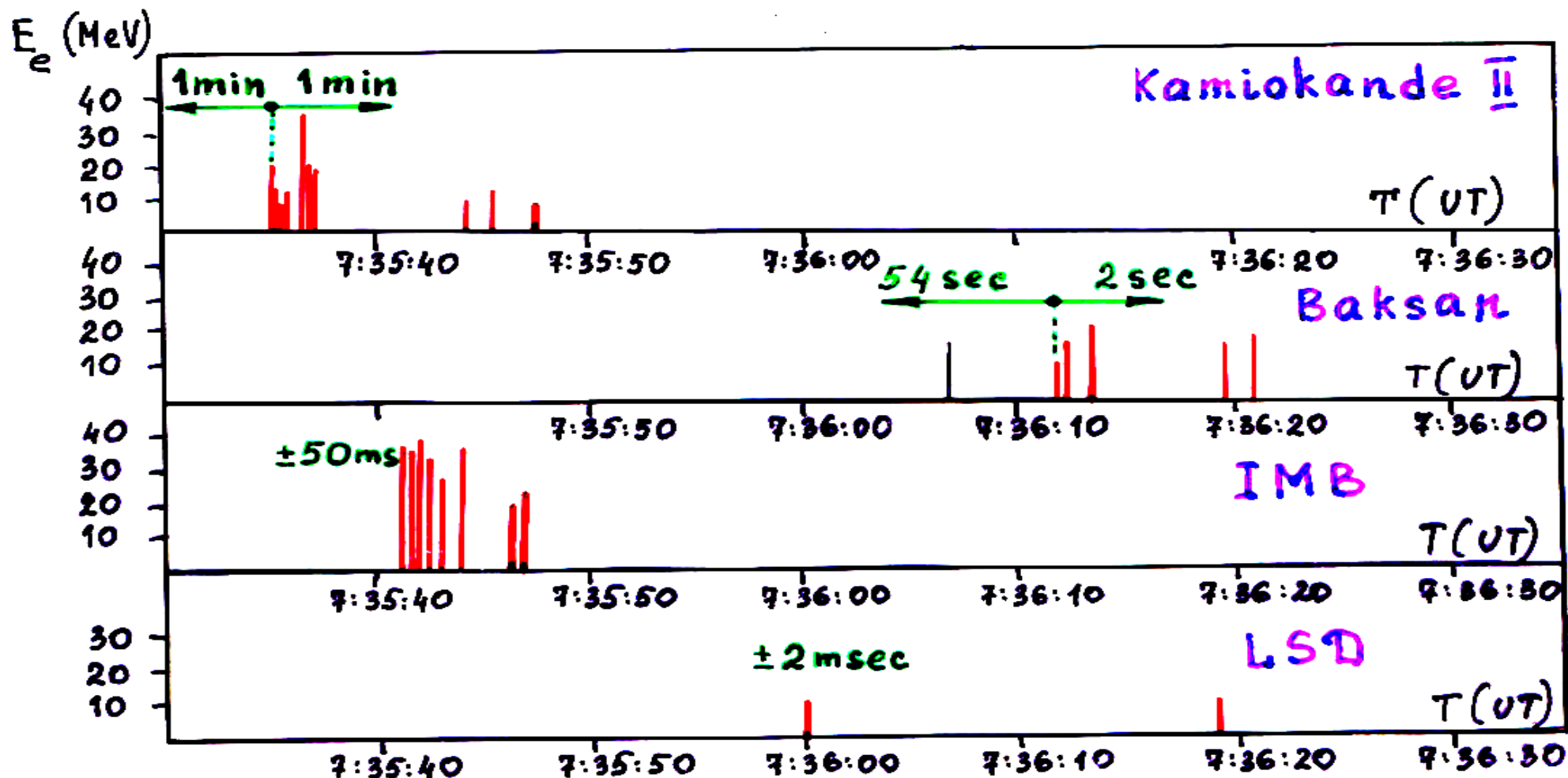
*** Информация телескопа была вновь проанализирована и сигнал был найден. Он оказался довольно слабым, 5 событий, (пришел из соседней галактики) и поэтому не был сразу обнаружен критериями обычной обработки, рассчитанной на сигнал от звезды нашей Галактики.

*** Предварительные данные были переданы Поманскому А.А. по телефону и он успел их доложить на Морионской конференции.

*** Далее последовали различные проверки, калибровки и анализ полученной информации.

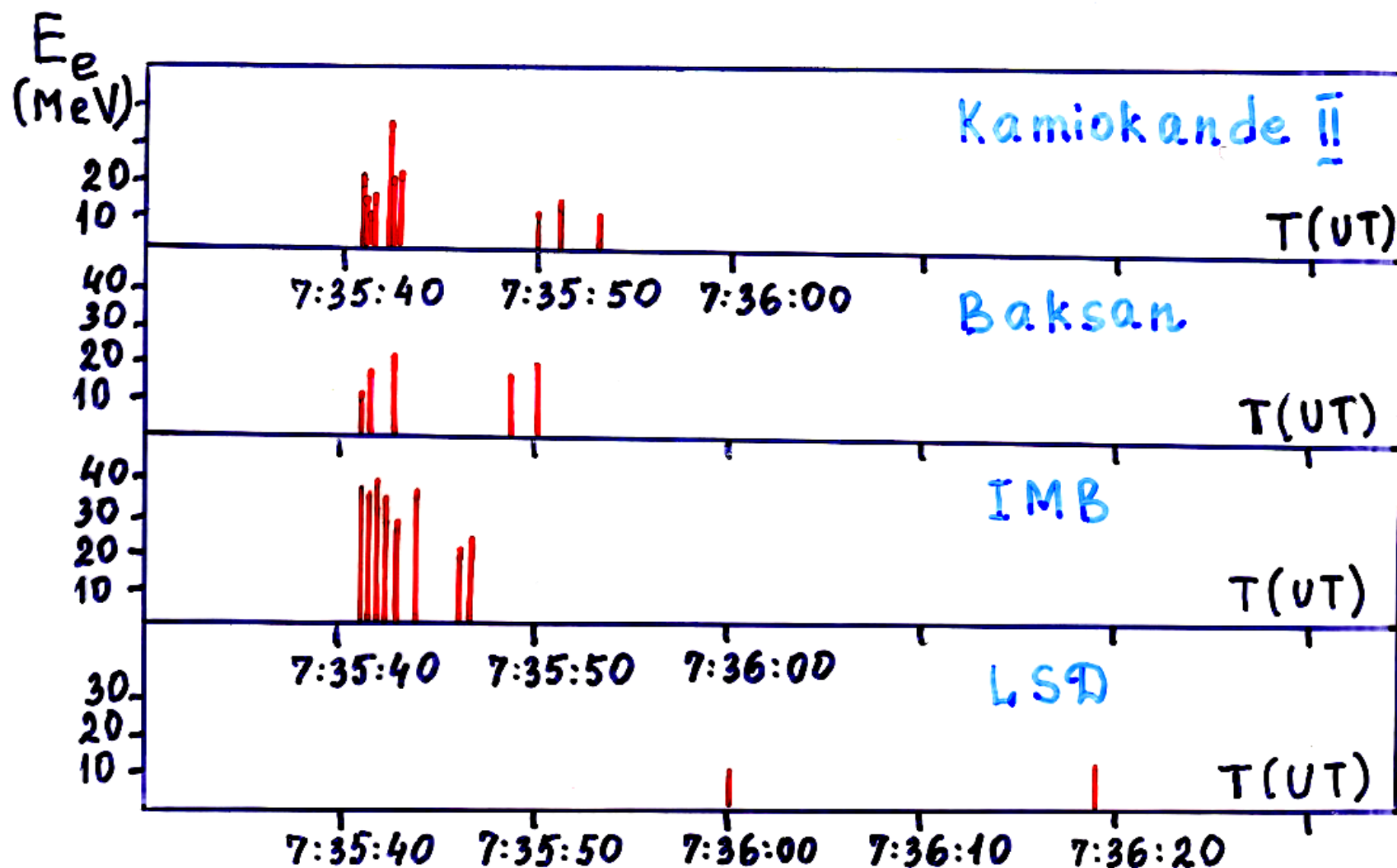


Временная последовательность событий, зарегистрированных установками Kamiokande II, IMB, LSD и Баксанским телескопом в 7 : 35 UT 23 февраля 1987 года



Баксанский телескоп : 5 событий в интервале 9.1 сек.

Вероятность фоновой имитации..... $1.7 \cdot 10^{-5}$



В пределах точности определения абсолютного времени на установках Kamiokande II и Баксанский телескоп, сигналы Kamiokande II, Баксанский и IMB можно считать пришедшими одновременно во время, определенное IMB.

Неудачи преследовали экспериментаторов

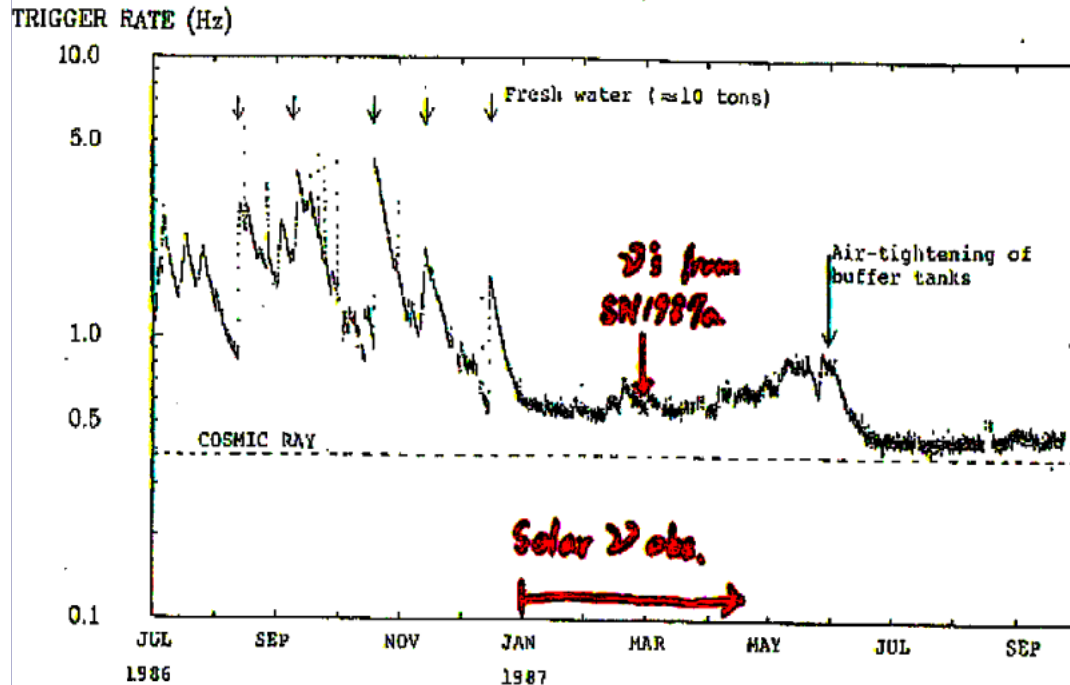


Fig. 3.20. The early performance of the KAM-II detector.

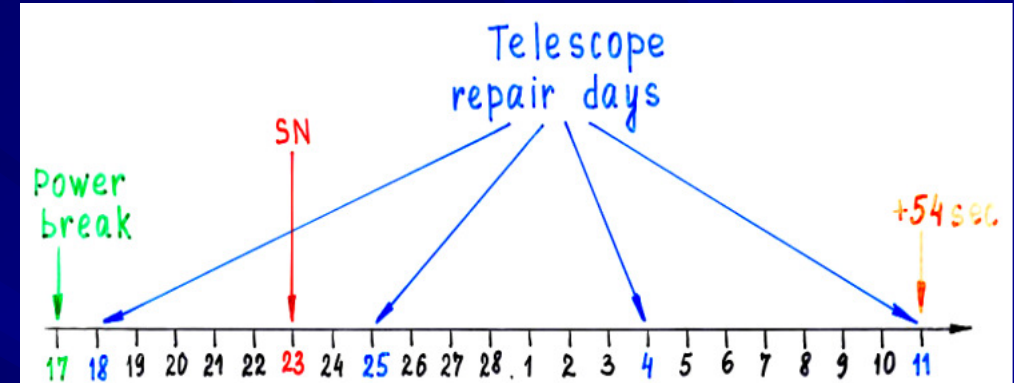
Kamiokande II

Проблемы:

Кам II часы и фон (± 1 мин)

Баксан Часы (-54с, +2с)

IMB отказы ФЭУ



UT 05:00:00.001

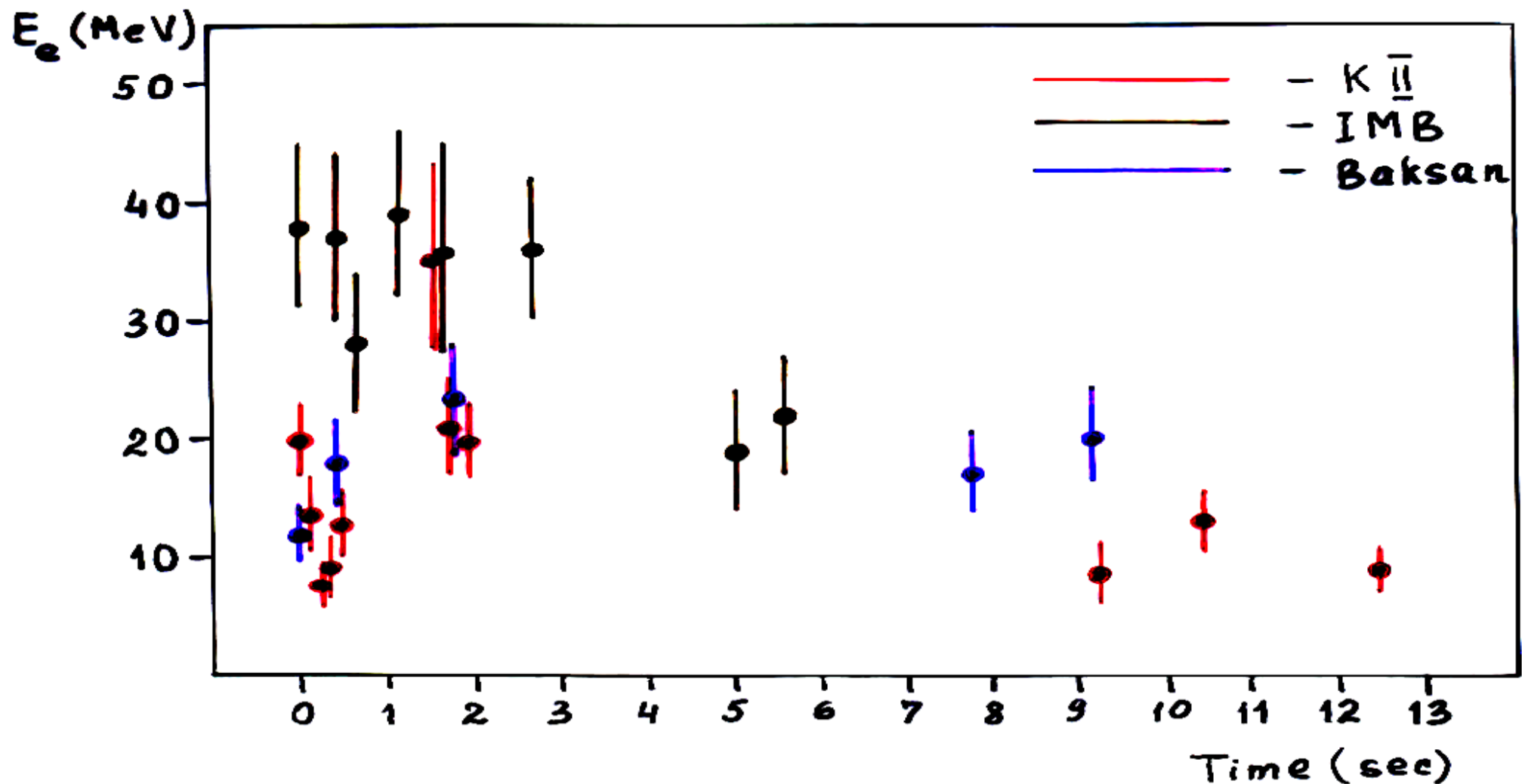
One of four HV power supplies
shuts down at IMB.

On-line data analysis system shuts down.

Detector limps ahead with $\frac{3}{4}$ tubes
and raw data tapes only

Two hours later.....

Энергии всех событий, зарегистрированных в 7 : 35 UT 23 февраля 1987 года как функция времени внутри сигнала



Вопрос: Сколько фоновых событий в сигналах?

Ответ: Никто не знает. Известно только среднее число фоновых импульсов в

каждом сигнале: $N_{\text{фон}} = m_{\text{фон}} (\text{сек}^{-1}) \cdot t_0 (\text{сек})$. Для всех сигналов $N_{\text{фон}} < 1$.

Лучшим методом анализа малых сигналов внутри малого, но ненулевого фона, является приближение Байеса.

Преимуществом Байесовского приближения является следующее:

1. Байесовского приближение определяет вероятность того, что источники различных потоков могут образовать наблюдаемые темпы счета.
2. Ненулевые фоны естественным образом входят в Байесовское определение доверительных интервалов.

R. P. Kraft, D. N. Burrows and J. A. Nousek
The Ap. J., 374, 344-355, 1991

Величины нижнего и верхнего пределов для числа зарегистрированных событий в Kamiokande II, Баксанском телескопе, IMB и LSD, используя Байесовские доверительные интервалы (95%).

Детектор	Число фон. событий внутри длительности зарегистрир. сигнала	Число зарегистрированных событий	Нижнее значение доверительного интервала	Верхнее значение доверительного интервала
Kamiokande II	0.272	11	5.38	18.43
Баксан	0.314	5	1.42	10.53
IMB	0.43	8	3.2	14.55
LSD	0.12	0	0.0	3.0

Оценка полной энергии унесенной из звезды электронными антинейтрино

$$L_{\tilde{\nu}_e} = \frac{4\pi R^2}{6.24 \cdot 10^5} \frac{K \langle E_{\tilde{\nu}_e} \rangle}{N_p \langle \sigma(E_{\tilde{\nu}_e}) \eta(E_{\tilde{\nu}_e}) \rangle},$$

where:

$$\langle E_{\tilde{\nu}_e} \rangle = \frac{\int_0^\infty F(E_{\tilde{\nu}_e}) \cdot E_{\tilde{\nu}_e} \cdot dE_{\tilde{\nu}_e}}{\int_0^\infty F(E_{\tilde{\nu}_e}) \cdot dE_{\tilde{\nu}_e}},$$

$$F(E_{\tilde{\nu}_e}, \alpha) = \frac{E_{\tilde{\nu}_e}^2 \exp[-\alpha(E_{\tilde{\nu}_e}/kT)^2]}{1 + \exp(E_{\tilde{\nu}_e}/kT)},$$

$$\alpha = 0.0$$

R is the distance to the LMC, $R = 50$ Kpc,

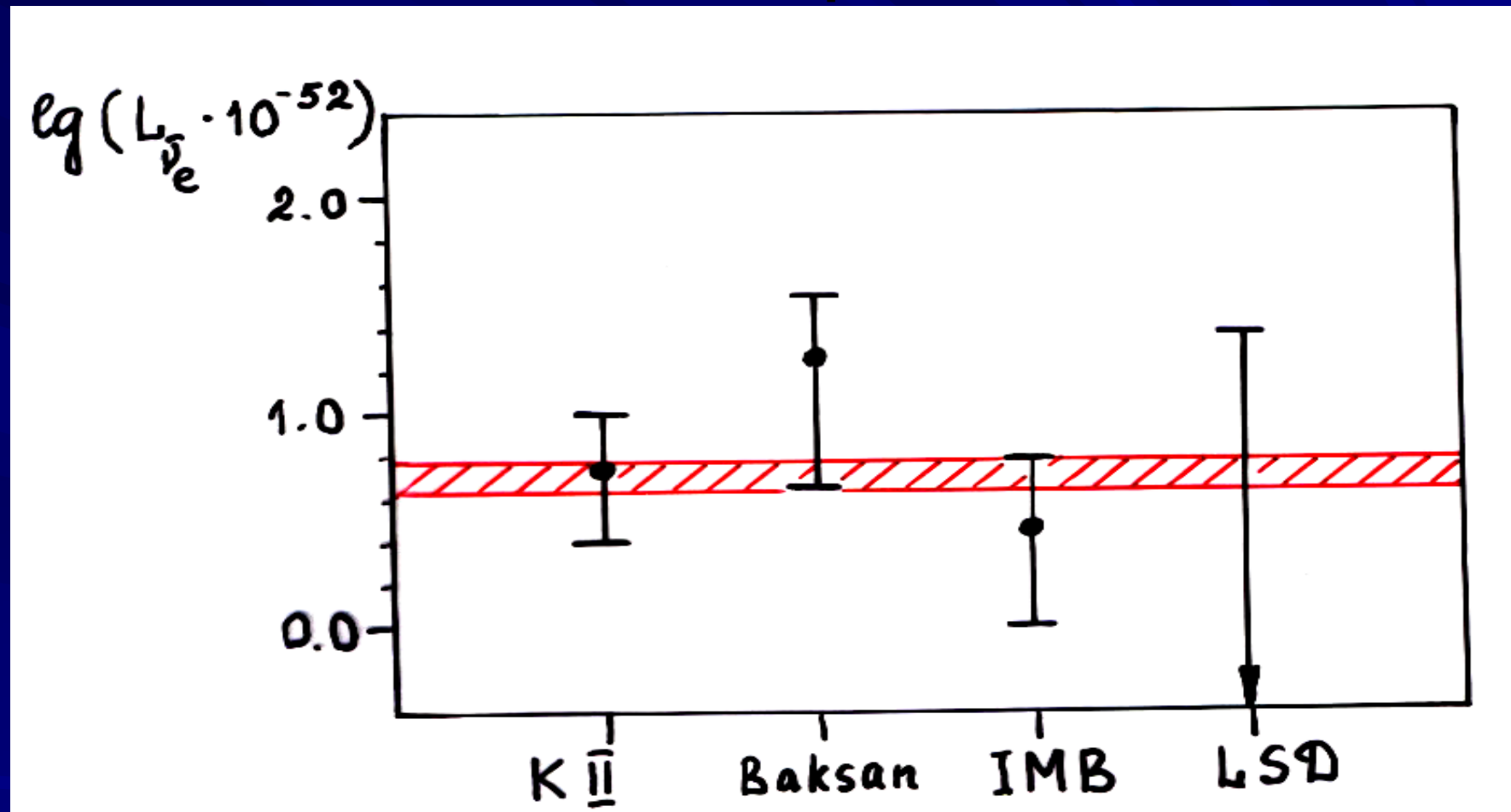
N is the number of free protons in the target,

$\sigma(E)$ is the cross-section of antineutrino-proton interaction,

$\eta(E)$ is a detection efficiency,

K is the number of detected events.

Доверительные интервалы (Байесовский подход) полной энергии электронных антинейтрино для сигналов всех детекторов



Заштрихованная область показывает полную энергию $\bar{\nu}_e$, описывающую набор всех экспериментальных данных.

$$L_{\text{набл}} = (4.6 - 6.1) \cdot 10^{52} \text{ эрг}$$

Необходимо учесть :
--- другие спектры нейтрино
--- нейтринные осцилляции

Галактика Млечный путь : Когда ожидать вспышку сверхновой ?



Возможно, завтра... или через год.....или через (10 – 100) лет..... ??

Частота вспышек сверхновых в нашей Галактике

- Последняя вспышка сверхновой была наблюдаена 402 года назад.
- Из статистики исторических сверх-вых : (5.7 ± 1.7) за 100 лет (1994).
- Из схожести параметров нашей Галактики с галактикой М 31 (туманность Андромеды) : $\approx 111 \pm 74$ лет (1977).
- Из анализа сверхновых в других галактиках : $\approx 70 \pm 50$ лет (1981)
- Из анализа остатков сверхновых нашей Галактики : $\sim (15 - 47)$ лет (1979 – 1980).
- Из анализа интенсивности термолюминесценции различных слоев донных отложений Тирренского моря : ~ 30 лет (1983).
- Из статистики пульсаров : ~ 6 лет (1977 год) ; ~ 30 лет (1982) ; 60 – 330 лет (1998 - 1999).
- Из звездной статистики : 9_{-3}^{+2} (1983) ; 10 – 50 лет (1991) ; 30 – 100 лет со средним значением 47 ± 12 лет (1994).

■ Прямые наблюдения :

По данным Баксанского телескопа : 23 года «живого» времени наблюдения $\longrightarrow > 10$ лет (90 % ур. д.) (2007) .

Что мы ждем от регистрации нейтринного сигнала в нашей Галактике?

- Впервые нейтринный сигнал от сверхновой SN 1987A LMC был зарегистрирован. 5 событий в LSD (2:52 UT) и 24 события в трех установках - Kamiokande II, IMB и Баксанский телескоп (7:35 UT).
- Усредненные характеристики событий (температура, полная энергия, длительность вспышки) подтверждают общую теоретическую картину взрывов массивных звезд.
- Некоторые индивидуальные черты наблюдаемых сигналов (временная форма, разница модельных оценок температур событий и полных энергий, особенности угловых распределений событий) указывают, вероятно, на более сложную картину явления, которая пока остается неясной из-за малой статистической обеспеченности сигналов.
- Нейтринные сигналы от сверхновой в нашей Галактике будут иметь число событий от нескольких десятков до нескольких тысяч в зависимости от массы и вещества мишени.
- Статистически значимые результаты позволят разобраться в энергетической, временной и составной структурах нейтринного сигнала, и построить цельную картину явления сверхновой.

ВЫВОДЫ

- Создан эксперимент по поиску вспышек нейтрино от гравитационного коллапса ядер массивных звезд на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе.
- Благодаря большому труду, вложенному группой сотрудников в улучшение физических характеристик телескопа как прибора для поиска нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд Галактики, впервые, совместно с детекторами Kamiokande II (Япония), IMB (США) [7:35 UT] и LSD (Россия - Италия) [2:52 UT] 23.02.1987 был зарегистрирован нейтринный сигнал от сверхновой 1987А, взорвавшейся в соседней галактике Большое Магелланово Облако.
- Непрерывное наблюдение за звездами нашей Галактики в поиске нейтринных вспышек от сверхновых, начавшееся 30 июня 1980 года, продолжается, давая лучшее в мире ограничение на частоту сверхновых, полученное прямым методом регистрации нейтрино на Баксанском телескопе.

Нам повезло : 10 лет упорного труда над характеристиками Баксанского телескопа привели нас к желаемой цели – регистрации нейтринного сигнала от сверхновой, правда, из соседней галактики.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить сотрудников группы «Коллапс» и других групп, и работающих и покинувших лабораторию по разным причинам, за плодотворную совместную работу в данном эксперименте.

Благодарим всех, спроектировавших и построивших Баксанскую Нейтринную Обсерваторию и подземный сцинтилляционный телескоп, а также весь коллектив сотрудников, без труда которых жизнь на Обсерватории была бы невозможна.

***СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ !***