

Нейтрино от взрывов Сверхновых: Сверхновая 1987А, современное состояние и перспективы экспериментального поиска

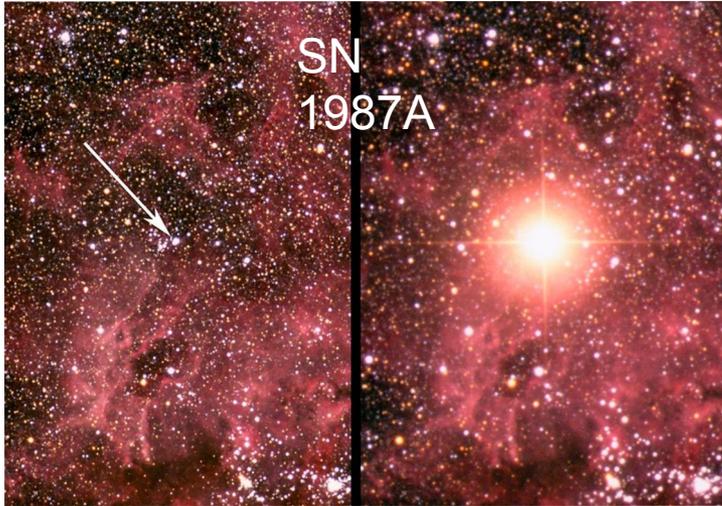
В.Б. Петков

ИЯИ РАН

Баксанская нейтринная обсерватория

Сессия-конференция “Физика фундаментальных взаимодействий”, посвященная 70-летию В.А. Рубакова
Москва, 17 - 21 февраля 2025

Звезда резко увеличивает свою светимость на 4—8 порядков (10—20 звёздных величин), с последующим сравнительно медленным затуханием вспышки.



1. Происхождение химических элементов
(взрывной нуклеосинтез)

2. Происхождение космических лучей

3. Взрыв сверхновой с коллапсом ядра –
нейтрино уносят подавляющую часть энергии

Количественная оценка частоты появления сверхновых является величиной, имеющей ключевое значение для нейтринных телескопов нынешнего и следующего поколения, а также актуальна для многоволновой галактической астрономии, физики космических лучей и астрофизики в целом.

Ускорение галактических космических лучей в остатках сверхновых (ускорение КЛ ударными волнами)

Сверхновые – наиболее вероятные источники космических лучей?
(В.Л. Гинзбург и С.И. Сыроватский, Происхождение космических лучей, М., Изд-во АН СССР, 1963)

- Плотность энергии космических лучей: $\sim 1 \text{ эВ/см}^3$ ($10^{-12} \text{ эрг/см}^3$)
- Мощность, необходимая для поддержания наблюдаемой плотности энергии космических лучей источников КЛ в Галактике: $\sim 10^{41} \text{ эрг/сек}$ ($T_{\text{КЛ}} \sim 10^{16} \text{ сек} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ лет}$)
- В результате взрыва сверхновой высвобождается $E \sim 10^{51} \text{ эрг}$ в виде кинетической и электромагнитной энергии.
- Выделяемая при этом средняя мощность: $E/T_{\text{SN}} \sim 10^{42} \text{ эрг/сек}$ при $T_{\text{SN}} \sim 30 \text{ лет}$
- Мощность источников КЛ: 10 % мощности взрыва сверхновых

Частота взрывов сверхновых в Галактике?

Вспышки сверхновых в нашей галактике – редкие события:
по современным представлениям, они происходят 1 – 3 раза в столетие.

The expected rate of stellar deaths in the Galaxy (~ 0.1 per year) is computed using a detailed model of the distribution of stars in the disk and standard values for Population I stellar evolutionary lifetimes.

(John .N. Bahcall and Tsvi Piran, *Stellar collapses in the Galaxy. AJ*, 267, L77, 1983)

- Expected rate of the ccSN in the Galaxy: $3.2^{+7.3}_{-2.6}$ per century.

(S.M. Adams et al., *Observing the next Galactic supernova. AJ*, 778,164, 2013)

$$R = 1.63 \pm 0.46 \text{ ccSN per century}$$

The rate based on the combination of:

- 1) counts of massive stars,
- 2) census of supernova explosions in the cosmos,
- 3) counts of neutron stars and
- 4) measurement of the galactic chemical enrichment of 26 Al.

(K. Rozwadowska et al. *On the rate of core collapse supernovae in the Milky Way. New Astronomy*, V. 83, 2021, 101498; *arXiv:2009.03438*)

$$T_{\text{SN}} = (10 \text{ — } 170) \text{ лет}$$

- 1) Наиболее достоверные исторические галактические сверхновые: 5, с 1006 года.
- 2) Последняя сверхновая (Кассиопея-А) вспыхнула в 1630? (1680?) году.
- 3) За прошедшие ~340 лет мы должны были бы наблюдать ~ (6 – 10) вспышек сверхновых, но не наблюдали ни одной.

Невооруженным глазом видны только примерно 13 % галактических сверхновых с коллапсом ядра и около 33 % термоядерных сверхновых (тип Ia).

C.T. Murphey et al. Witnessing history: sky distribution, detectability, and rates of naked-eye Milky Way supernovae. MNRAS 507, 927–943 (2021)

Остатки сверхновых в Галактике

294 Galactic SNRs. *D.A. Green. A revised catalogue of 294 Galactic supernova remnants. J Astrophys Astron 40, 36 (2019). arXiv:1907.02638*

303 Galactic SNRs. *D.A. Green. A Catalogue of Galactic Supernova Remnants (2022 December version). <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>*

390 Galactic radio SNRs. *S. Ranasinghe and D. Leahy. A Statistical Analysis of Galactic Radio Supernova Remnants. ApJS, 265, 53, 2023.*

G1.9+0.3 – наиболее молодой известный остаток сверхновой (Ia) в нашей Галактике: ~100 лет. → Последняя для земных наблюдателей вспышка сверхновой в Галактике, которую не видели из-за газопылевых облаков (вблизи центра Галактики). Современные наблюдения: радио, рентген.

Stephen P. Reynolds et al., The youngest Galactic supernova remnant: G1.9+0.3. ApJ, 680, L41, 2008.

S Chakraborti et al. Young remnants of type Ia supernovae and their progenitors: a study of SNR G1.9+0.3. ApJ, 819, 37 2016.

Нейтринное излучение играет важную роль в эволюции звезд, особенно в финальной части эволюции массивных звезд. Эволюция звезд с массой, превышающих 8 масс Солнца, заканчивается гравитационным коллапсом ядра (+ возможная Сверхновая) и сопровождается нейтринной вспышкой. → Наиболее подходящим инструментом для обнаружения сверхновых с коллапсом ядра являются большие нейтринные детекторы.

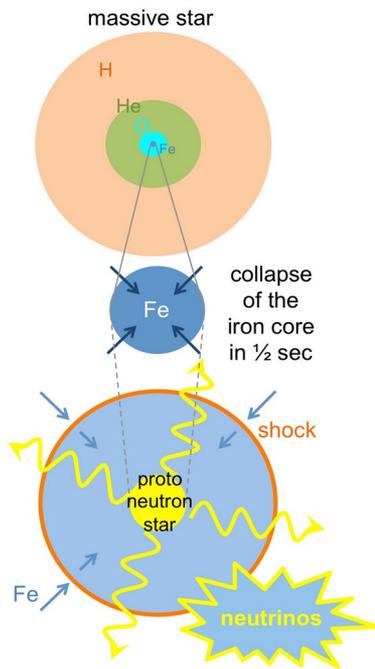
Нейтринные телескопы: поиск нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра.

- 1) Артемовский сцинтилляционный детектор (АСД): ноябрь 1977 – 2017(?)
- 2) Баксанский Подземный Сцинтилляционный Телескоп (БПСТ): поиск нейтринных вспышек идет с 30.06.1980 →
- 3) Kamiokande-II: 1985 – 1990. Kamiokande-III: 1990 – 1995.
- 4) Super-Kamiokande: 1996 →
- 5) Irvine–Michigan–Brookhaven (IMB) detector: May 1986 – 1991
- 6) Liquid Scintillation Detector (LSD): октябрь 1984 – 2002
- 7) Large Volume Detector (LVD): 1992(1 tower), 1998 (3 towers) →

Мы считаем, что в Галактике не было взрывов Сверхновых с коллапсом ядра с ноября 1977 года.

Нейтринные вспышки от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра.

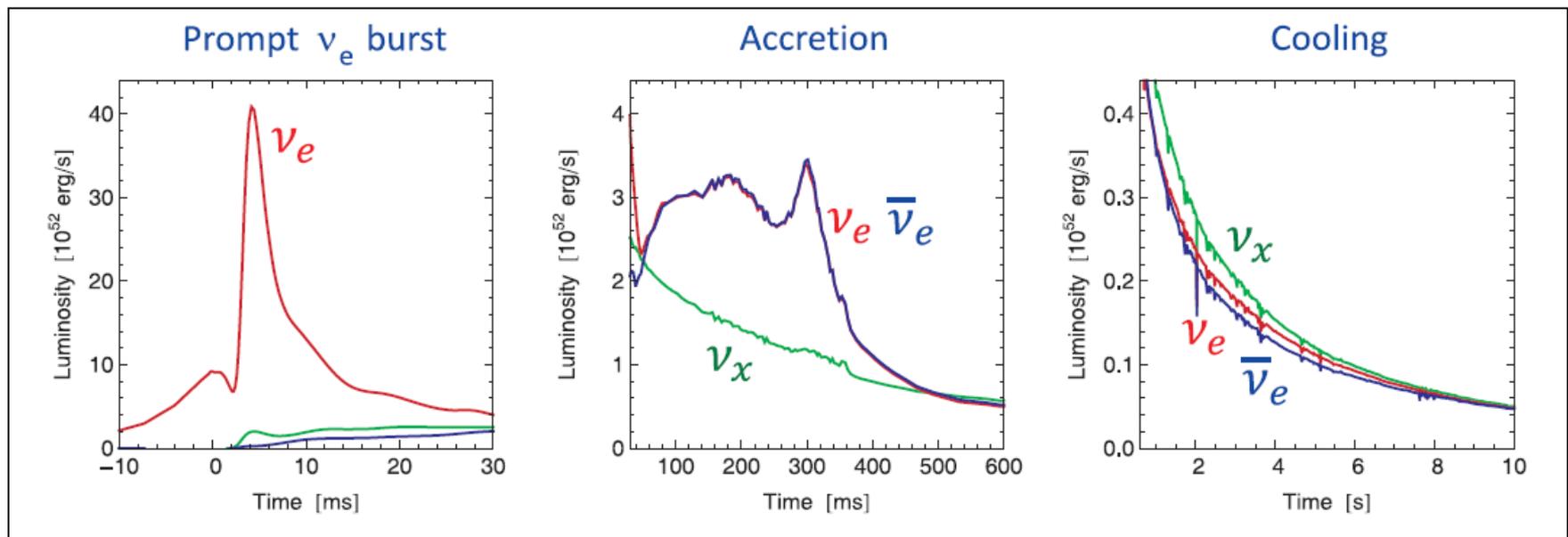
Реакции термоядерного синтеза: вначале дейтерий и гелий, затем более тяжелые элементы вплоть до железа, для которого энергия связи нуклонов в ядре максимальна, и дальнейшие реакции синтеза становятся невозможны. Звезда теряет устойчивость, происходит катастрофическое сжатие вещества, образуется смесь нейтронов, протонов и электронов с плотностью $\sim 10^{14}$ г/см³. Электроны вдавливаются в протоны, создавая нейтроны \rightarrow происходит нейтронизация звезды и возникает короткий мощный всплеск нейтринного излучения.



- ♦ \rightarrow образование нейтронной звезды;
- ♦ изменение гравитационной энергии связи от начального состояния до конечного составляет: $\sim 3 \cdot 10^{53}$ эрг.
- ♦ $\sim 99\%$ этой энергии переходит в нейтрино и антинейтрино всех сортов (делится примерно поровну между различными типами нейтрино).
- ♦ $T_{\text{burst}} \sim 10$ секунд, $E_{\nu} \sim 10 - 20$ МэВ
- ♦ $\sim 1\%$ переходит в кинетическую энергию разлетающейся оболочки и световую вспышку.

Epoch	Duration		Dominant neutrino
Presupernova	\sim days		ν_e and $\bar{\nu}_e$
Collapse	\lesssim 50 ms	$p + e^- \rightarrow \nu_e + n$	initially mostly ν_e , later all flavors
Accretion	\sim 100 ms for ONeMg core		$\nu_x < \bar{\nu}_e < \nu_e$
	\sim 200 – 700 ms for Iron core		$\nu_x < \bar{\nu}_e < \nu_e$
Cooling	\sim 10 s		$\nu_x \sim \bar{\nu}_e \sim \nu_e$

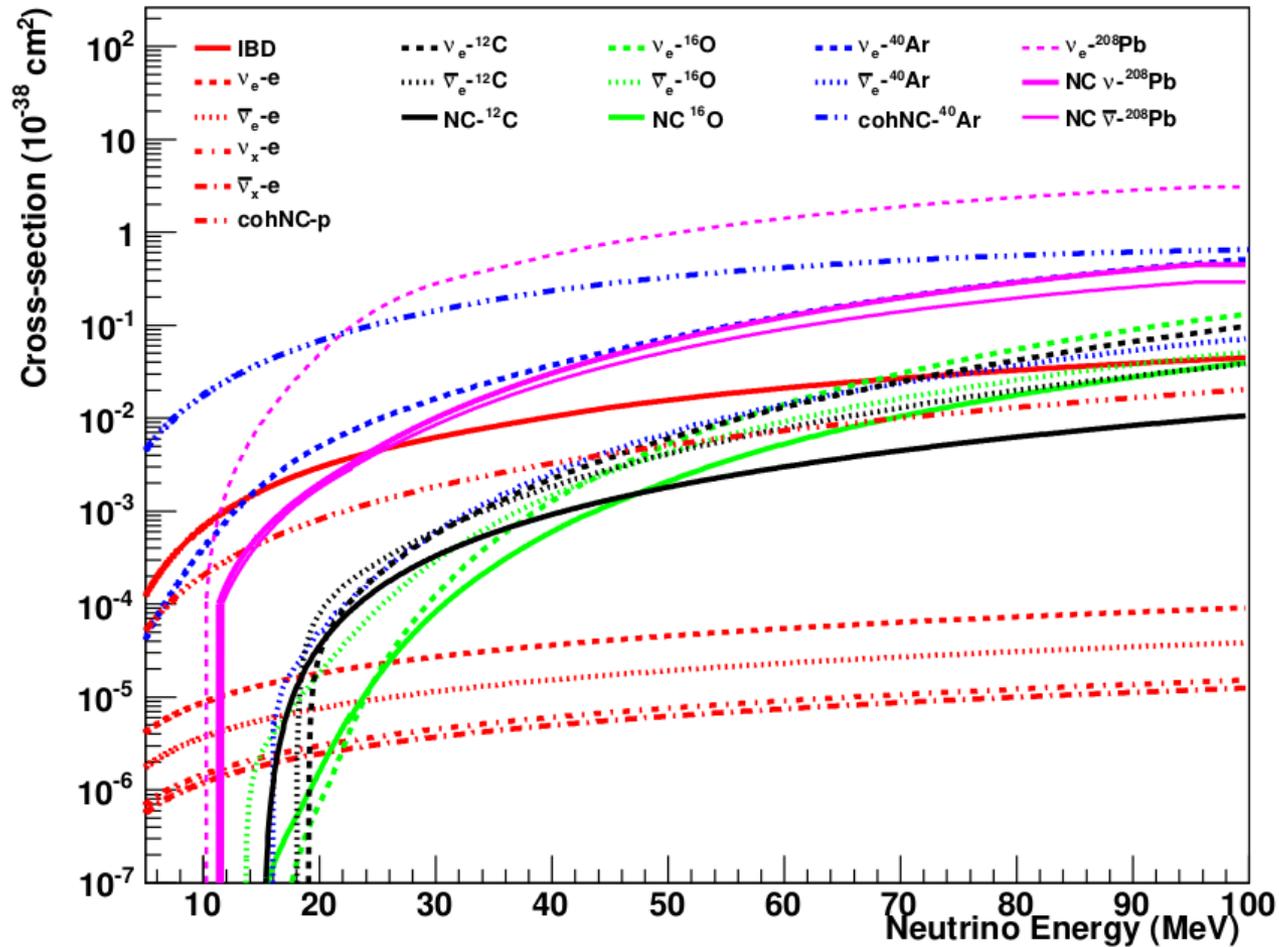
S. Horiuchi, James P. Kneller, arXiv:1709.01515



Neutrino signal using data from a spherically symmetric $10.8 M_{\text{Sun}}$ simulation

T. Fischer et al, Astron. Astrophys. 517 (2010) A80

Детектирование нейтрино от взрывов Сверхновых



Cross sections per target for relevant interactions

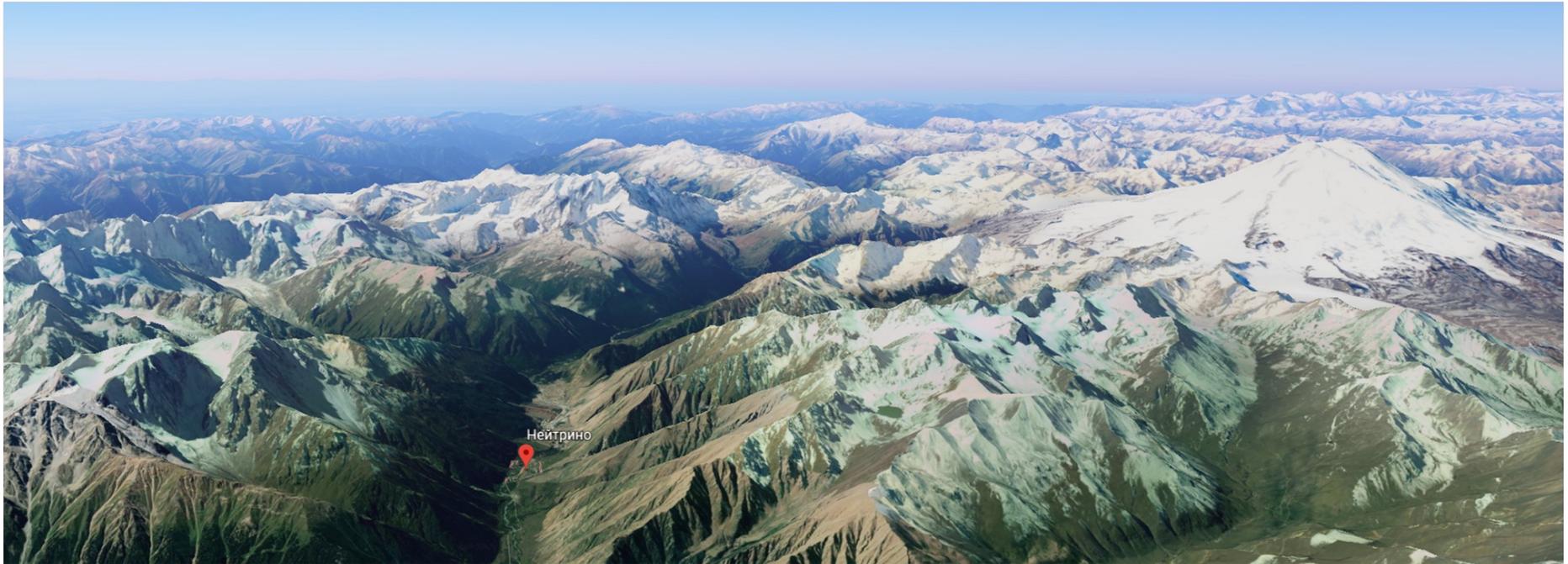
Детектирование нейтрино от взрывов Сверхновых

Channel	Observable(s)	Interactions
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	C	17/10
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	C, N, A	278/165
$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$	C	682/351
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}^{(*)}$	C, N, G	3/9
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{12}\text{B}^{(*)}$	C, N, G, A	6/8
$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + {}^{12}\text{C}^*$	G	68/25
$\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}^{(*)}$	C, N, G	1/4
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + {}^{16}\text{N}^{(*)}$	C, N, G	7/5
$\nu_x + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_x + {}^{16}\text{O}^*$	G	50/12
$\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$	C, G	67/83
$\bar{\nu}_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^+ + {}^{40}\text{Cl}^*$	C, A, G	5/4
$\nu_e + {}^{208}\text{Pb} \rightarrow e^- + {}^{208}\text{Bi}^*$	N	144/228
$\nu_x + {}^{208}\text{Pb} \rightarrow \nu_x + {}^{208}\text{Pb}^*$	N	150/55
$\nu_x + A \rightarrow \nu_x + A$	C	9,408/4,974

Estimations of the number of interactions per 1 kt at 10 kpc for two different neutrino flux models,
 $E_\nu \geq 5 \text{ MeV}$.

Abbreviations: C, energy loss of a charged particle; N, produced neutrons; G, deexcitation γ s; A, positron annihilation γ s.

Поиск нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых с
коллапсом ядра в Галактике на Баксанском подземном
сцинтилляционном телескопе (БПСТ)

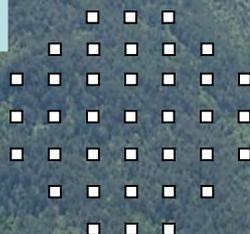


Расположение БНО:
Баксанское ущелье, недалеко (~ 20 км) от горы Эльбрус

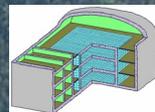
Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН:

уникальный комплекс наземных и подземных установок, созданных для решения фундаментальных задач в различных областях науки: от нейтринной астрофизики до геофизики.

“Андырчи”



БПСТ

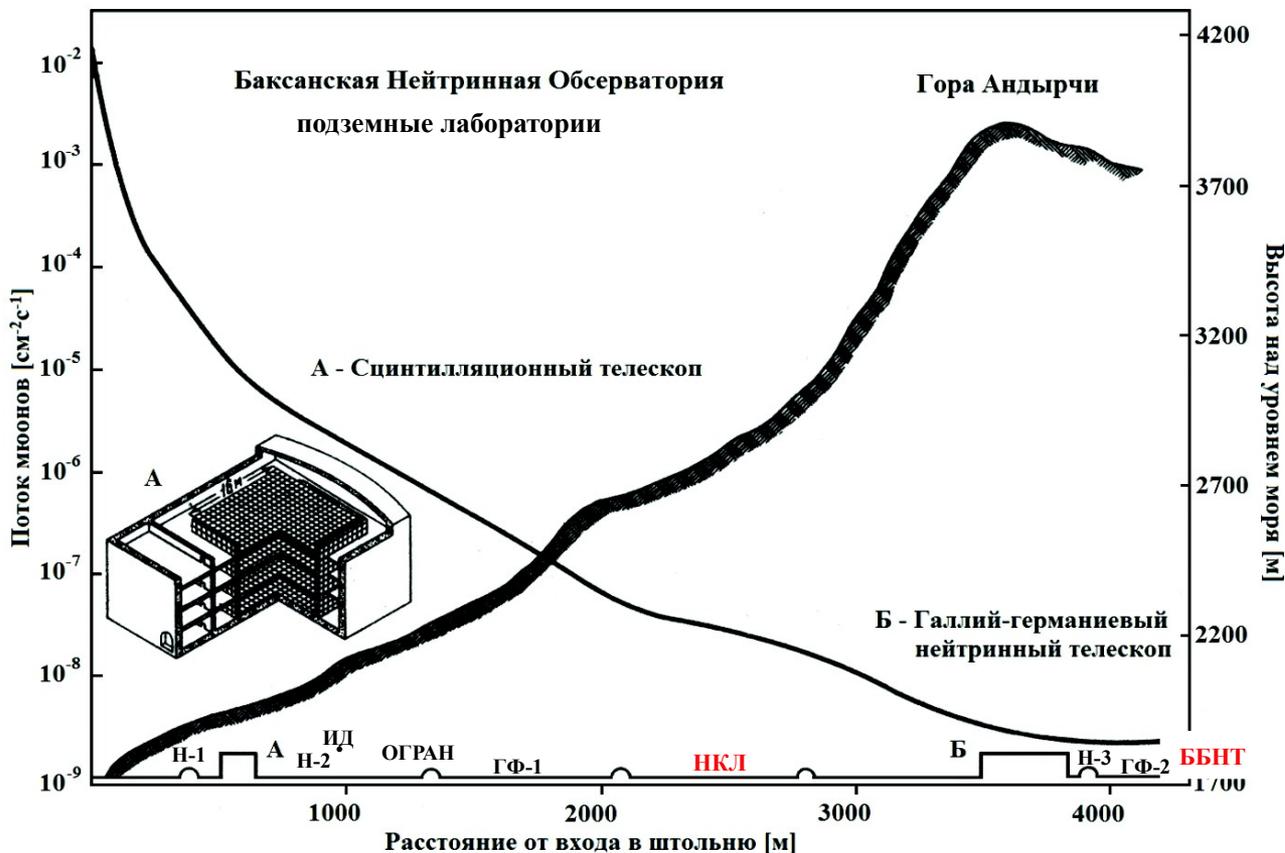


“Ковёр-3”

Вход в тоннель



Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН: подземные лаборатории.



А — Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

Б — Галлий-германиевый нейтринный телескоп

Н-1 — низкофоновая лаборатория № 1

Н-2 — низкофоновая лаборатория № 2

Н-3 — низкофоновая лаборатория № 3

ИД — Баксанский лазерный интерферометр-деформограф

ОГРАН — опто-акустическая гравитационная антенна

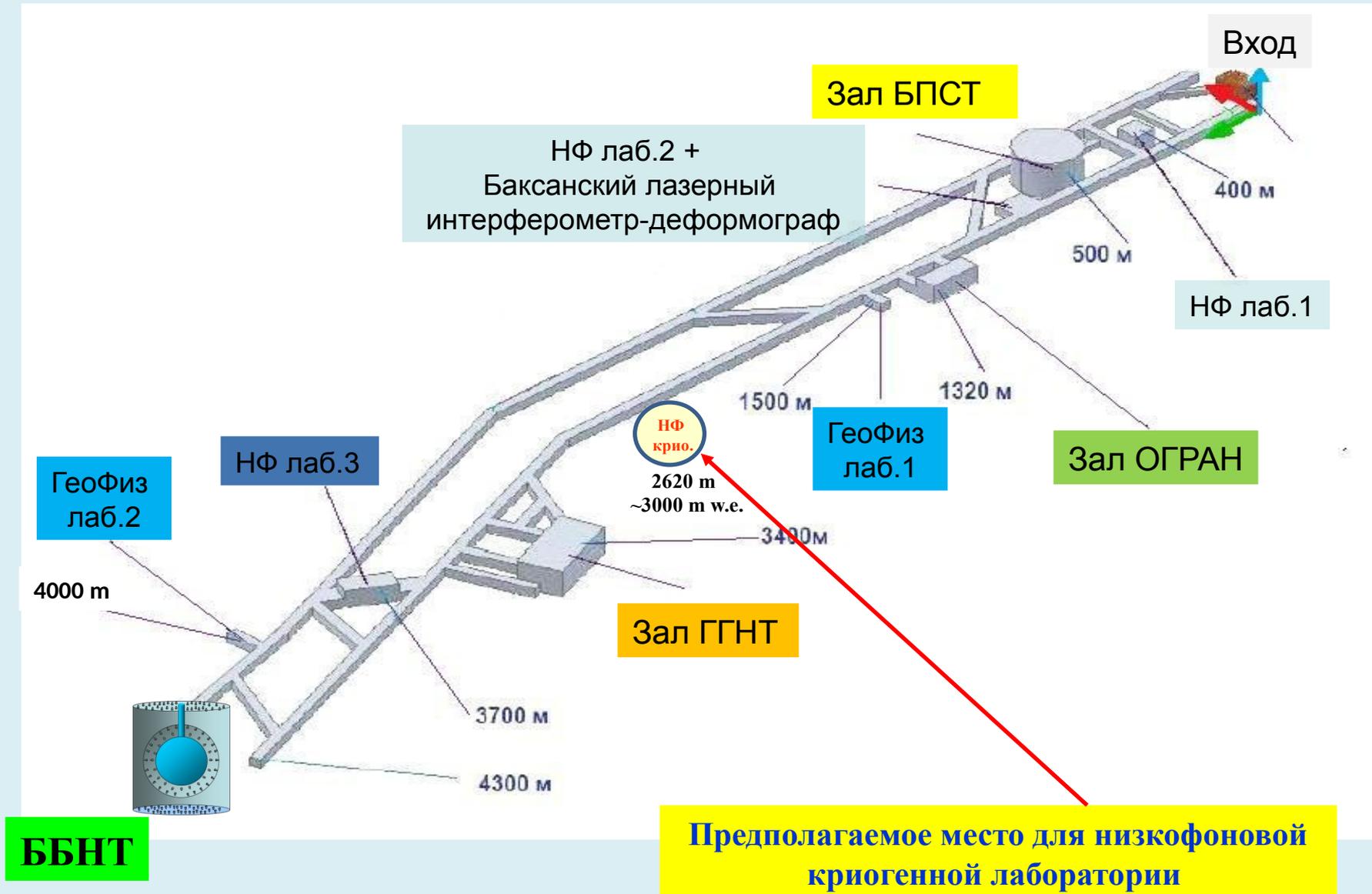
ГФ-1 — геофизическая лаборатория № 1

ГФ-2 — геофизическая лаборатория № 2

НКЛ — низкофоновая криогенная лаборатория (проект)

ББНТ — Баксанский большой нейтринный телескоп (проект)

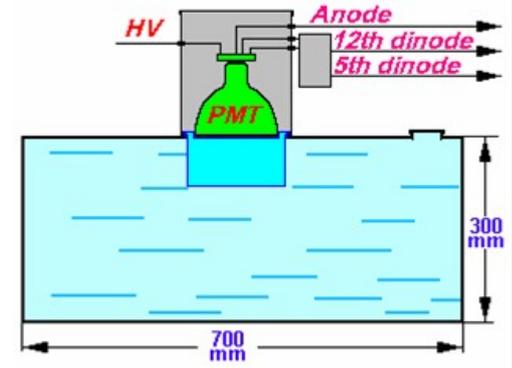
Распределение интенсивности мюонов вдоль штольни



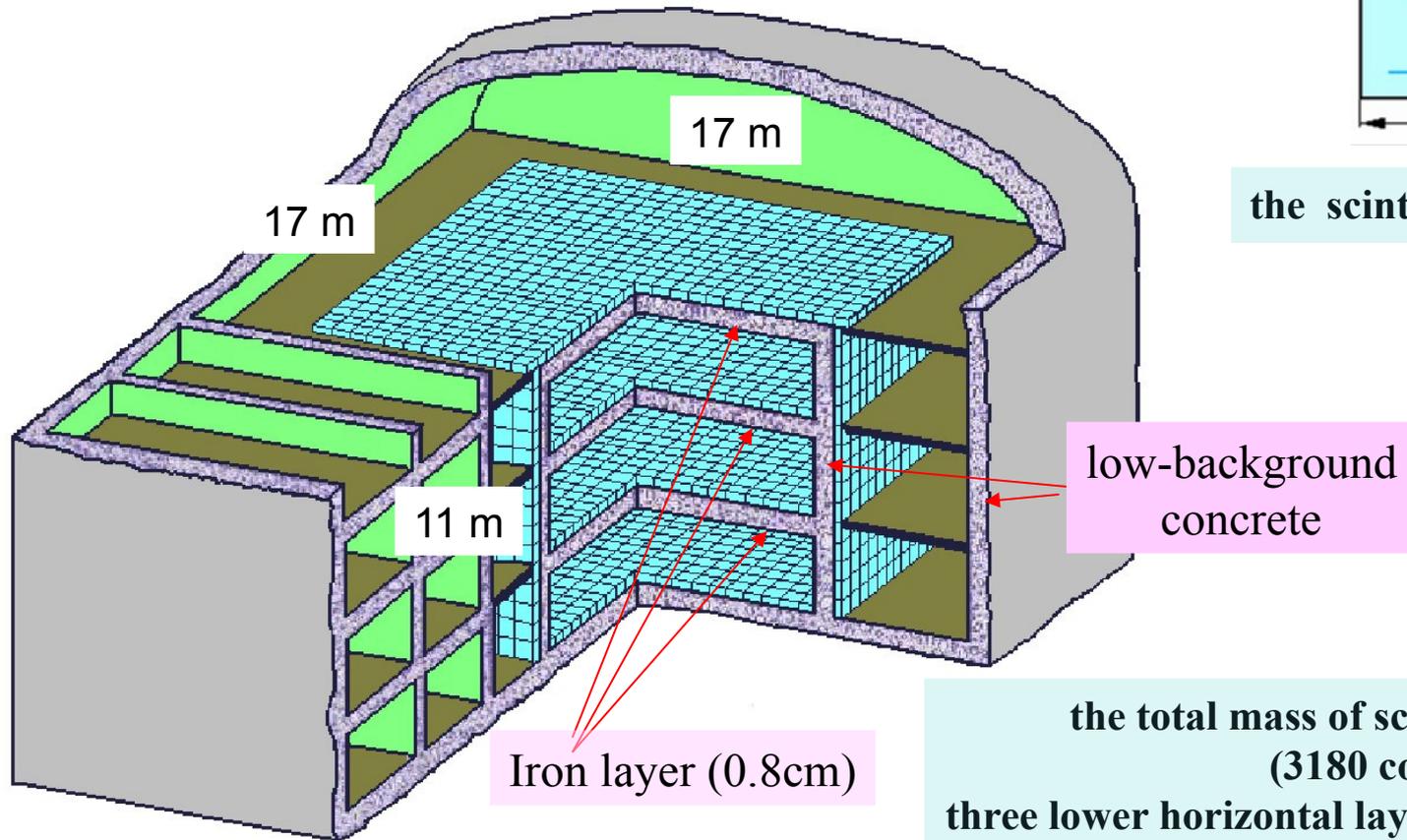
BUST: 1977 - up to date

→ Stable operation of the telescope, stable scintillator

dimensions: $17 * 17 * 11 \text{ m}^3$
number of counters: 3180
tank size: $70 * 70 * 30 \text{ cm}^3$



the scintillator $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ($n \approx 9$)



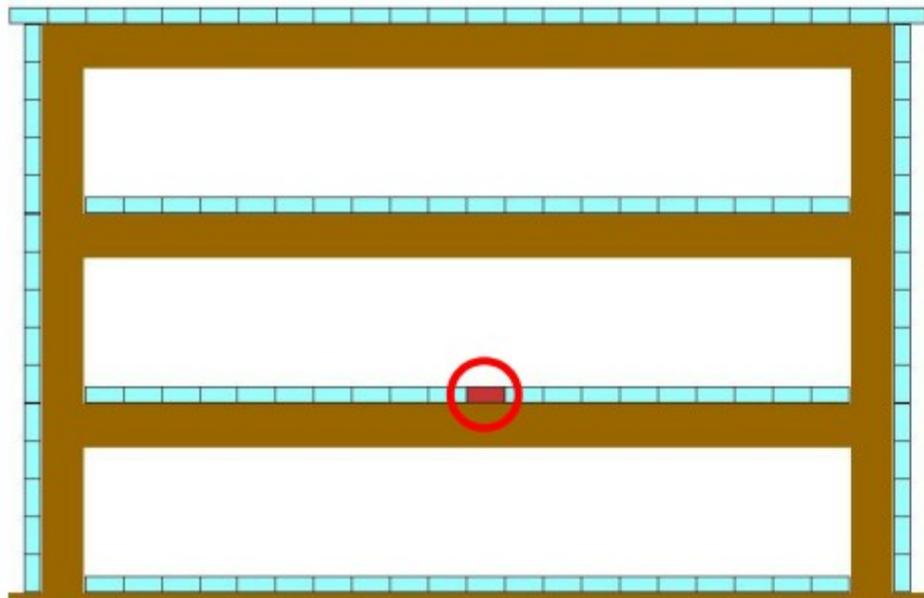
the total mass of scintillator is 330 t
(3180 counters)

three lower horizontal layers (the interior): 130 t
(1200 counters)

Верхняя (наружная) плоскость



Эксперимент по поиску нейтринных всплесков на БПСТ



~ 88%

$$E_{th} = 1.8 \text{ MeV}$$

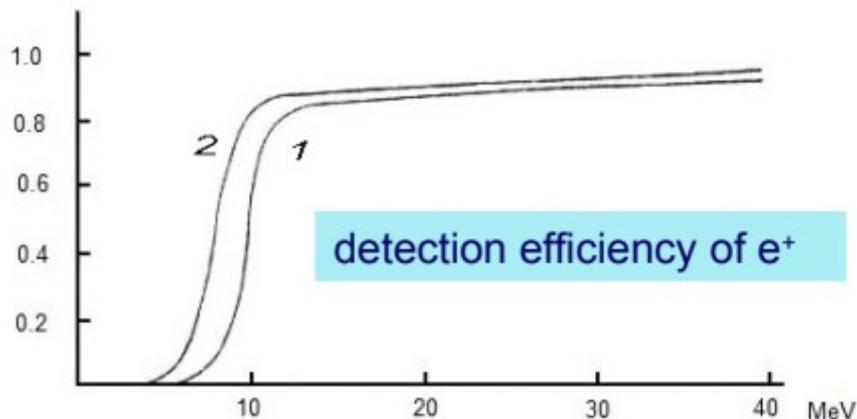
$$E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.3 \text{ MeV}$$

$$E_{e^+} \geq 8 \text{ MeV}$$

$$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 12-15 \text{ MeV}$$

→ ranges of e^+ of path lengths basically is within individual scintillation counter

→ neutrino signal from SN is series of single events during the burst



1 – energy threshold 10 MeV (1989 -1991 yr)

2 – energy threshold 8 MeV (since 1992 yr)

Среднее число событий в течение времени Δt от начала коллапса ядра

$$N_p \int_0^{\Delta t} dt \int_0^{\infty} dE \cdot F(E, t) \cdot \sigma(E) \cdot \eta(E)$$

N_p — число свободных протонов в мишени, $F(E, t)$ — поток электронных антинейтрино, $\sigma(E)$ — сечение реакции IBD, $\eta(E)$ — эффективность детектирования

Число событий в трех внутренних плоскостях (130 т), $E = 3 \cdot 10^{53}$ erg, $R = 10$ кpc

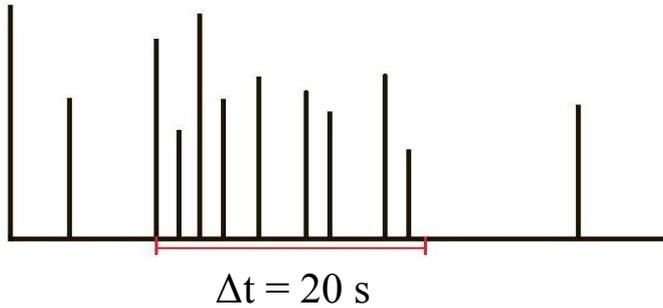
без осцилляций: $N_{ev} = 35$
(температура антинейтрино $T = 4.5$ MeV)

Осцилляции, только МСВ-эффект
(температура неэлектронных нейтрино $T_x = 6$ МэВ)

нормальная массовая иерархия: $N_{ev} = 39$

обратная массовая иерархия: $N_{ev} = 48$

The search for a neutrino burst at the BUST



Sliding interval, $\Delta t = 20 \text{ s}$

Background events

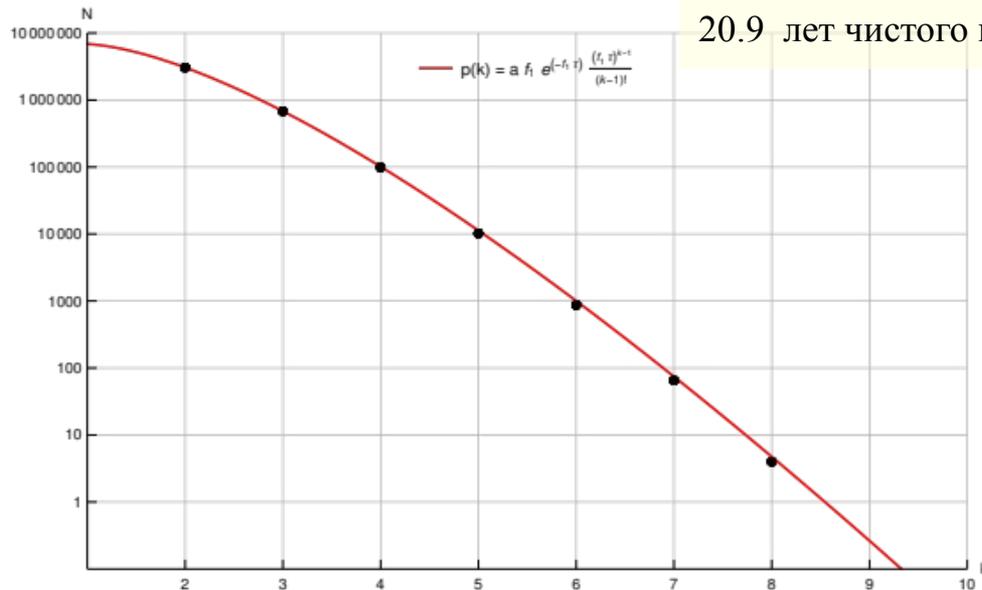
- 1) ghost signals from module (noises)
- 2) cosmic ray muons:
 - a single muon is registered by one counter due to spatial gaps between tanks of the telescope
 - a muon energy release $< 8 \text{ MeV}$
- 3) radioactivity

- Some part of the background events can be connected with inelastic muon interactions which can produce unstable nuclei whose disintegration brings into operation the only counter

16.03.2001 - 18.08.2024

20.9 лет чистого времени

$$p(k) = a f_1 \frac{e^{-(f_1 \tau)^k}}{(k-1)!}$$



$$p(k) = f \times \exp(-f\tau) \frac{(f\tau)^{k-1}}{(k-1)!}$$

$k=9$: $6.9 \cdot 10^{-3}$ per year
1/145 years

Рождение радиоактивных изотопов в сцинтилляторе от каскада в БПСТ

Изотоп	Время жизни, τ	Q, МэВ	Тип распада	Максимальное энерговыделение, с учётом аннигиляции позитрона	Основная реакция	Конечное состояние
^{12}N	15.9 ms	16.38	β^+	17.38	$^{12}\text{C}(p,n)$	стаб. (^{12}C)
^{12}B	29.1 ms	13.4	β^-	13.4	$^{12}\text{C}(n,p)$	стаб. (^{12}C)
^8He	171.7 ms	10.7	β^-	10.7	$^{12}\text{C}(\pi, n3p)$	^8Li (84%), остальные – стаб. ²
^9C	182.5 ms	16.5	β^+	17.5	$^{12}\text{C}(\pi^+, ^3\text{H})$	стаб. ²
^9Li	257.2 ms	13.6	β^-	13.6	$^{12}\text{C}(\pi, ^3\text{He})$	стаб. ²
^8B	1.11 s	18.0	β^+	19.0	$^{12}\text{C}(\pi^+, ^2\text{H}^2\text{H})$	стаб. ²
^8Li	1.21 s	16.0	β^-	16.0	$^{12}\text{C}(n,p\alpha)$	стаб. ²
^{11}Be	19.9 s	11.5	β^-	11.5	$^{12}\text{C}(n,2p)$	стаб. ²

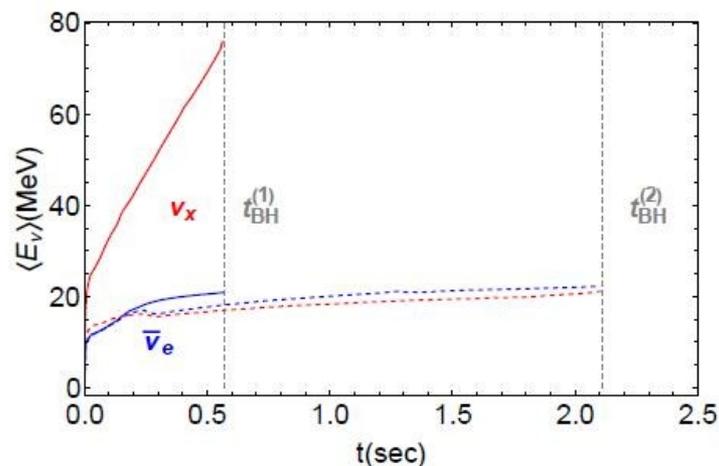
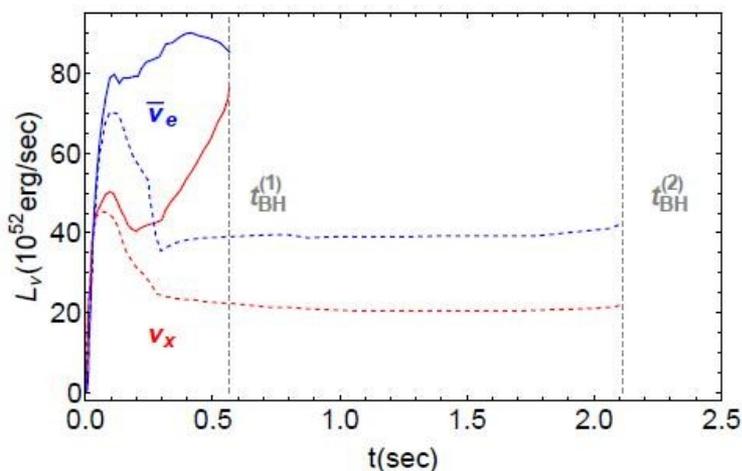
n_{ev}	Δt , с	counter	ε , МэВ
1	0.007	7:9-14	12.1
2	0.015	6:15-16	11.7
3	0.023	6:17-16	12.1
4	0.080	6:15-12	9.8
5	0.101	6:18-14	13.4
6	0.131	6:20-13	10.7
7	0.775	7:13-16	12.0
8	1.341	7:12-16	9.0
9	19.529	6:8-13	38.7

Параметры кластера с $k = 9$,
 Δt – время задержки события относительно каскада

Энергия каскада: 12.3 ТэВ,
 энерговыделение в горизонтальных слоях (сверху вниз):
 1.2 ТэВ, 265 ТэВ, 1090 ТэВ и 355 ТэВ

Поиск коротких нейтринных вспышек от прерванного взрыва сверхновой

Сценарий прерванного взрыва Сверхновой возможен для звезд с массами $> \sim 20M_{\odot}$, если аккреция вещества на центральную протонейтронную звезду сформирует черную дыру очень скоро после отскока ядра. В данном сценарии выбросы излучения и гравитационных волн одновременно резко прекращаются. В этом случае исчезающая звезда-прародительница испустит только очень слабый электромагнитный сигнал, так что наблюдение нейтрино и гравитационных волн может быть единственным способом поиска таких событий. Полная длительность нейтринной вспышки в случае прерванного взрыва Сверхновой гораздо короче, чем для обычного взрыва, и в зависимости от модели ожидается в пределах $\sim 0.5 - 2$ секунды.

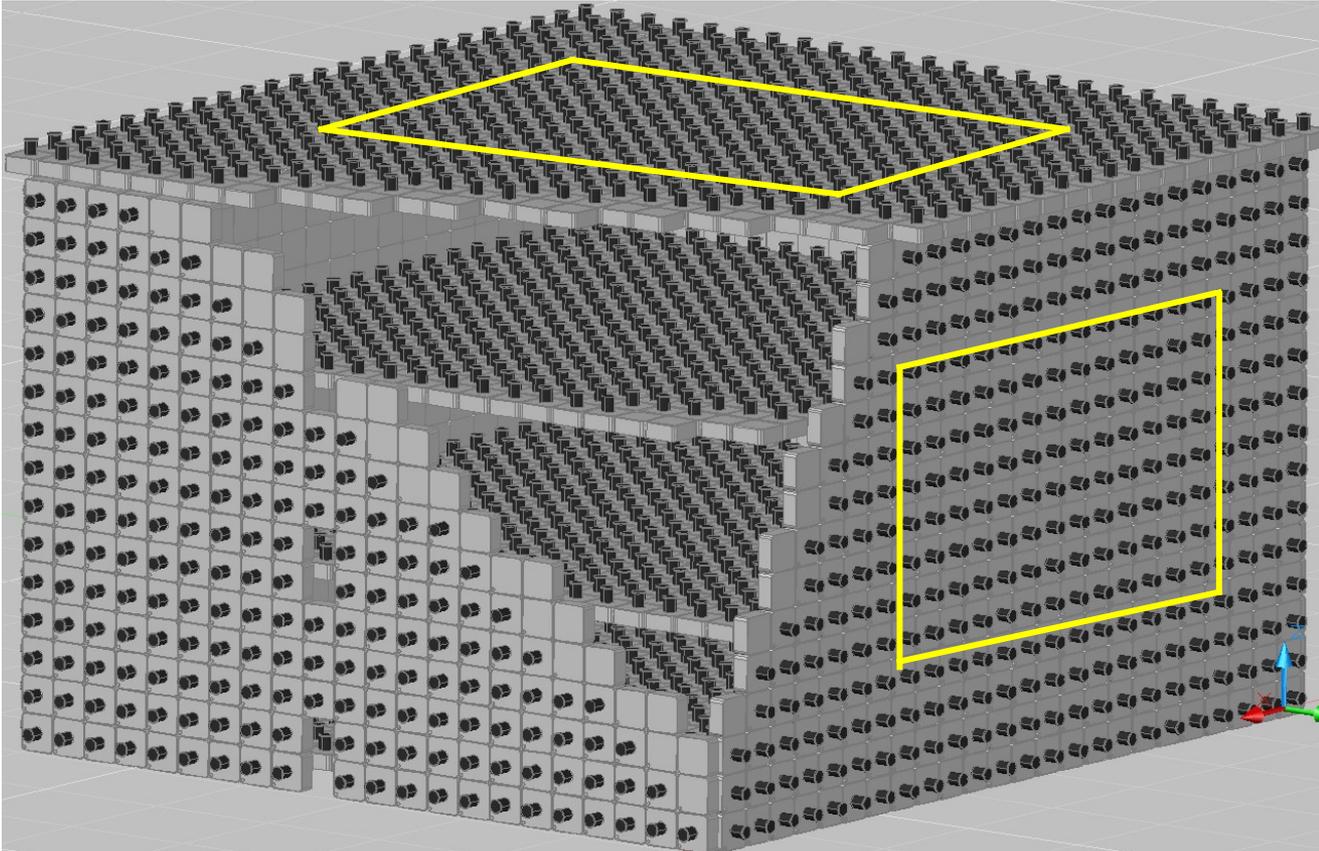


In Model 1, the BH formation occurs $t_{\text{BH}} = 0.568$ s after the bounce, whereas for Model 2 the gravitational instability occurs at a later time of $t_{\text{BH}} = 2.113$ s after the bounce thanks to a lower mass accretion rate of the collapsing stellar core.

1) S. E. Woosley and T. A. Weaver, *The Evolution and explosion of massive stars. 2. Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis*, *Astrophys. J. Suppl.* 101, 181 (1995).

2) S. E. Woosley, A. Heger, and T. A. Weaver, *The evolution and explosion of massive stars*, *Rev. Mod. Phys.* 74, 1015 (2002).

Two parts of the BUST – two independent detectors, ~ 240 tons

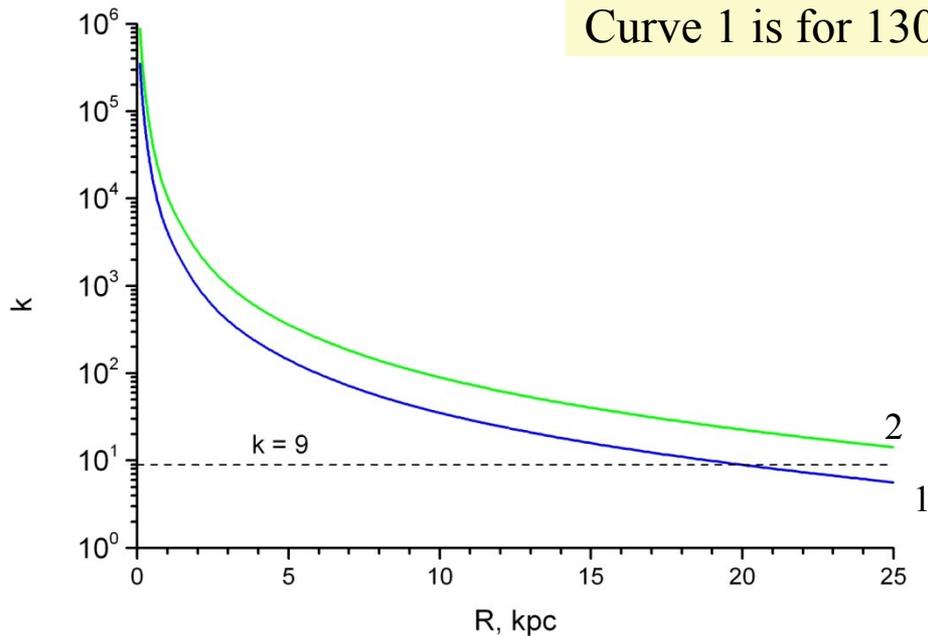


External planes: 1980 counters, 1.4 sec^{-1}

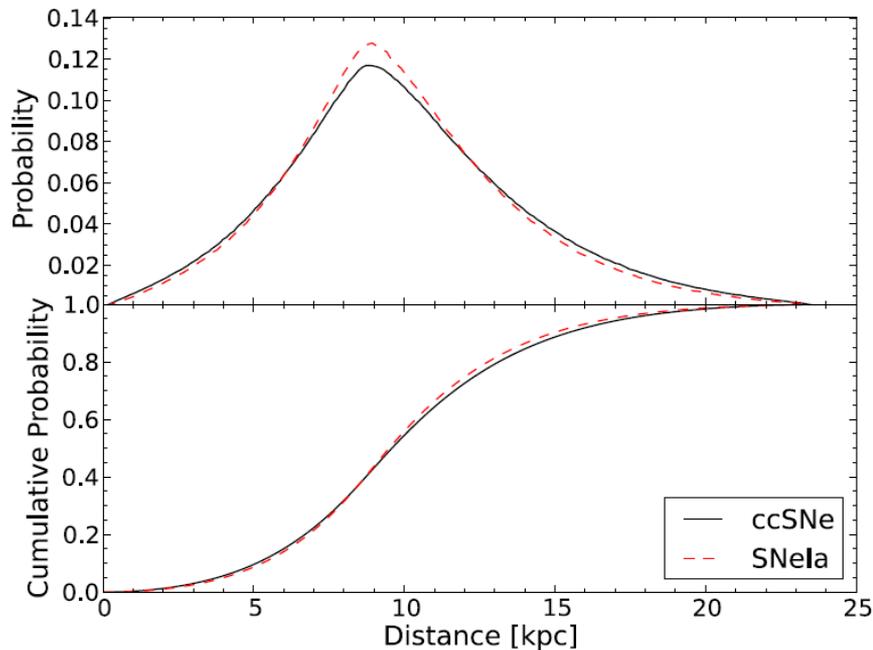
Internal planes, the D1: 1200 counters (130 tons), 0.02 sec^{-1}

the D2 - 1030 counters (112 tons), 0.12 sec^{-1}

Curve 1 is for 130 tons, curve 2 is for 330 tons of scintillator.



The joint use of D1 and D2 detectors allows us to increase the sensitivity radius of the BUST.



R = 10 кпк:
35 событий (130 т)
65 событий (240 т)

Поиск нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых на БПСТ

- Долговременная стабильность работы БПСТ по поиску нейтринных всплесков.
- Использование всего набора данных BUST позволяет нам узнать предысторию событий очень подробно и → исключать большую часть фоновых событий.
- Два независимых детектора D1 (внутренний, 130 т) и D2 (внешний, 112 т) повышают надежность регистрации нейтринного сигнала и радиус чувствительности БПСТ. Регистрация ложных всплесков нейтрино от СН практически исключена.
- От самых удаленных СН в Галактике (~ 25 кпк) ожидается ~ 10 событий.
- В случае очень близкой СН (например, Бетельгейзе, ~ 0.2 кпк) некоторая часть событий, зависящая от расстояния до СН, будет потеряна.
- За весь период наблюдения с 30.06.1980 по 02.12.2024 не было зарегистрировано ни одного события - кандидата на нейтринную вспышку в Галактике. За этот период чистое время наблюдения составило $T = 38.77$ года – самое продолжительное время наблюдения за нейтринными вспышками в нашей Галактике на одной установке.
- Это приводит к значению верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов звезд в Галактике 0.059 год^{-1} (5.9 в столетие) на 90% уровне достоверности ($T_{\text{SN}} = 17$ лет).

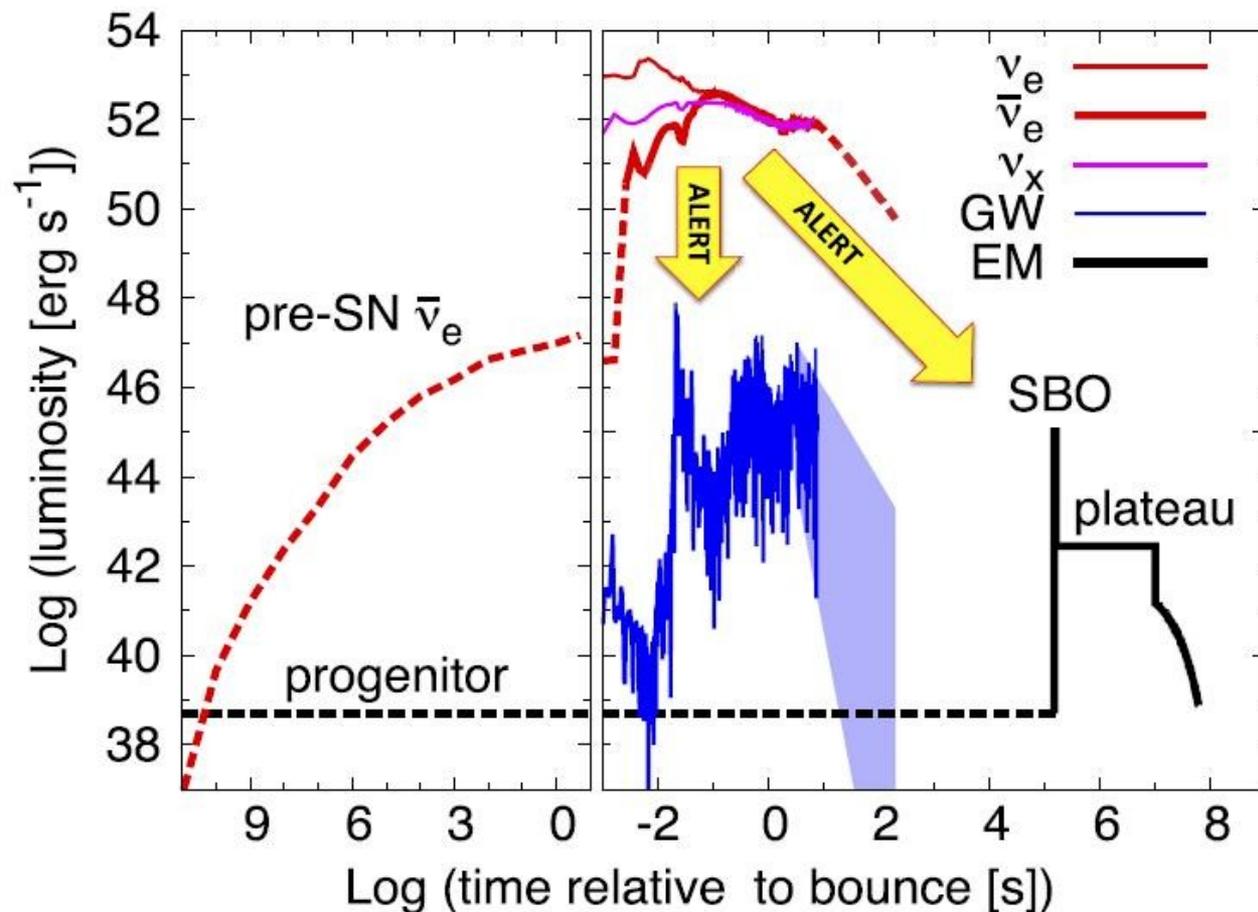
Современное состояние: следующий взрыв сверхновой в Галактике не будет пропущен

Experiment	Type	Mass (kt)	Location	11.2 M _⊙	27.0 M _⊙	40.0 M _⊙
Super-K	H ₂ O/ $\bar{\nu}_e$	32	Japan	4000/4100	7800/7600	7600/4900
Hyper-K	H ₂ O/ $\bar{\nu}_e$	220	Japan	28K/28K	53K/52K	52K/34K
IceCube	String/ $\bar{\nu}_e$	2500*	South Pole	320K/330K	660K/660K	820K/630K
KM3NeT	String/ $\bar{\nu}_e$	150*	Italy/France	17K/18K	37K/38K	47K/38K
LVD	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	1	Italy	190/190	360/350	340/240
KamLAND	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	1	Japan	190/190	360/350	340/240
Borexino	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	0.278	Italy	52/52	100/97	96/65
JUNO	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	20	China	3800/3800	7200/7000	6900/4700
SNO+	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	0.78	Canada	150/150	280/270	270/180
NOνA	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	14	USA	1900/2000	3700/3600	3600/2500
Baksan	C _n H _{2n} / $\bar{\nu}_e$	0.24	Russia	45/45	86/84	82/56
HALO	Lead/ ν_e	0.079	Canada	4/3	9/8	9/9
HALO-1kT	Lead/ ν_e	1	Italy	53/47	120/100	120/120
DUNE	Ar/ ν_e	40	USA	2700/2500	5500/5200	5800/6000
MicroBooNe	Ar/ ν_e	0.09	USA	6/5	12/11	13/13
SBND	Ar/ ν_e	0.12	USA	8/7	16/15	17/18
DarkSide-20k	Ar/any ν	0.0386	Italy	—	250	—
XENONnT	Xe/any ν	0.006	Italy	56	106	—
LZ	Xe/any ν	0.007	USA	65	123	—
PandaX-4T	Xe/any ν	0.004	China	37	70	—

Оценка числа зарегистрированных событий в нейтринных детекторах от взрыва
сверхновой на 10 кпк для трех моделей

SuperNova Early Warning System: SNEWS 2.0

Нейтронная вспышка как алерт для последующих наблюдений



Звезда-прародительница: невращающаяся, $17 M_{\odot}$

the total energy emitted after the bounce in the form of $\bar{\nu}_e$, photons, and gravitational waves are
 $\sim 6 \times 10^{52}$ erg, $\sim 4 \times 10^{49}$ erg, and $\sim 7 \times 10^{46}$ erg

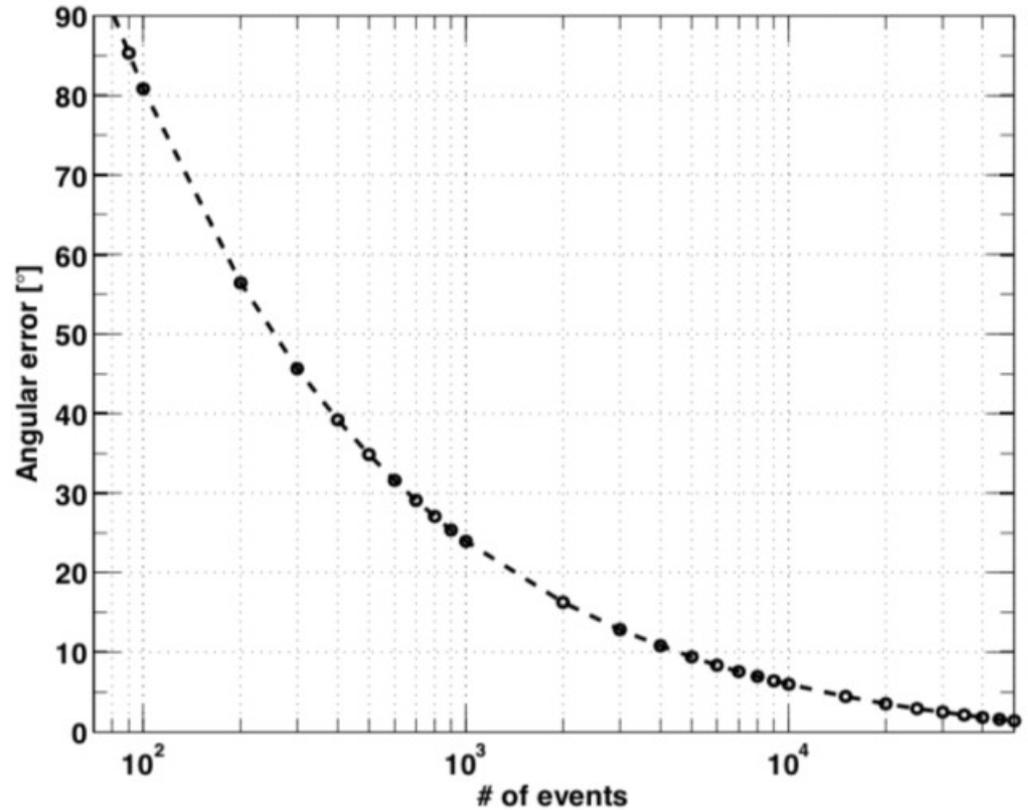
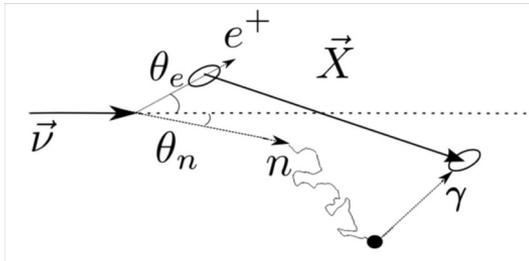
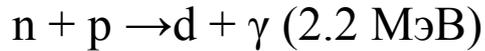
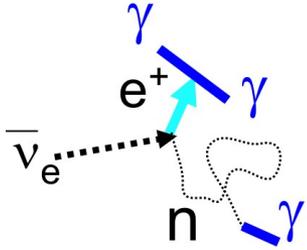
Нейтринная вспышка как алерт для последующих наблюдений
→ определение направления на сверхновую.

Методы определения направления

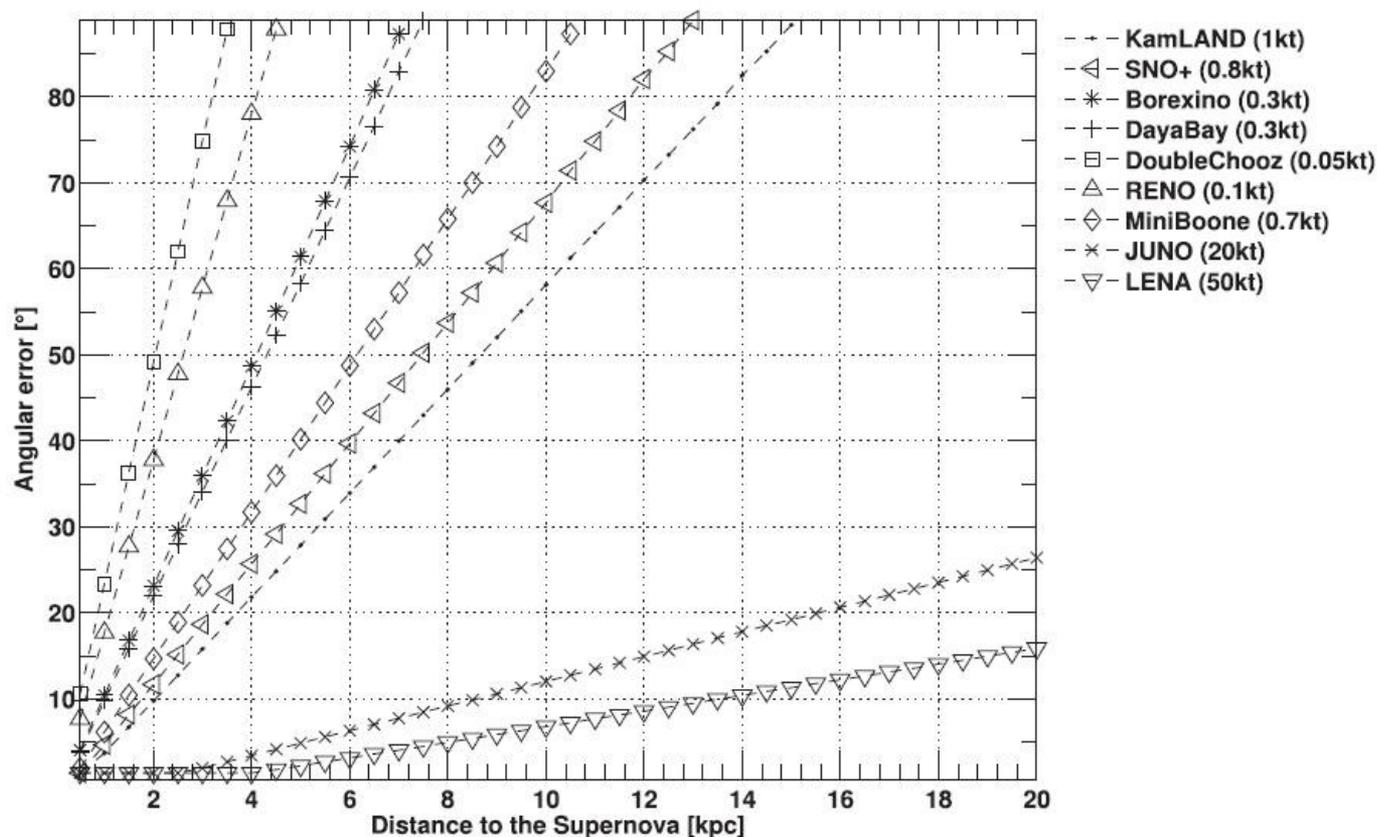
- Анизотропные взаимодействия нейтрино: восстановление направления прихода нейтрино по направлению вторичных частиц
- Триангуляция: по времени между регистрацией вспышки на различных детекторах

Сцинтилляционные детекторы: реакция обратного бета-распада

Захват нейтрона: ≈ 170 — 200 мкс



Сцинтилляционные детекторы: реакция обратного бета-распада

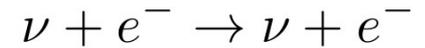


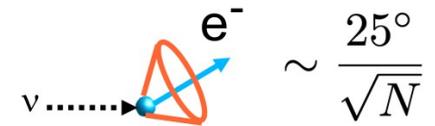
V. Fischer et al. Prompt directional detection of galactic supernova by combining large liquid scintillator neutrino detectors. J. Cosmol. Astropart. Phys. JCAP 08(2015)032.

Тематическая секция: Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы
Бежевый зал, Feb 21, 2025, 5:15 PM

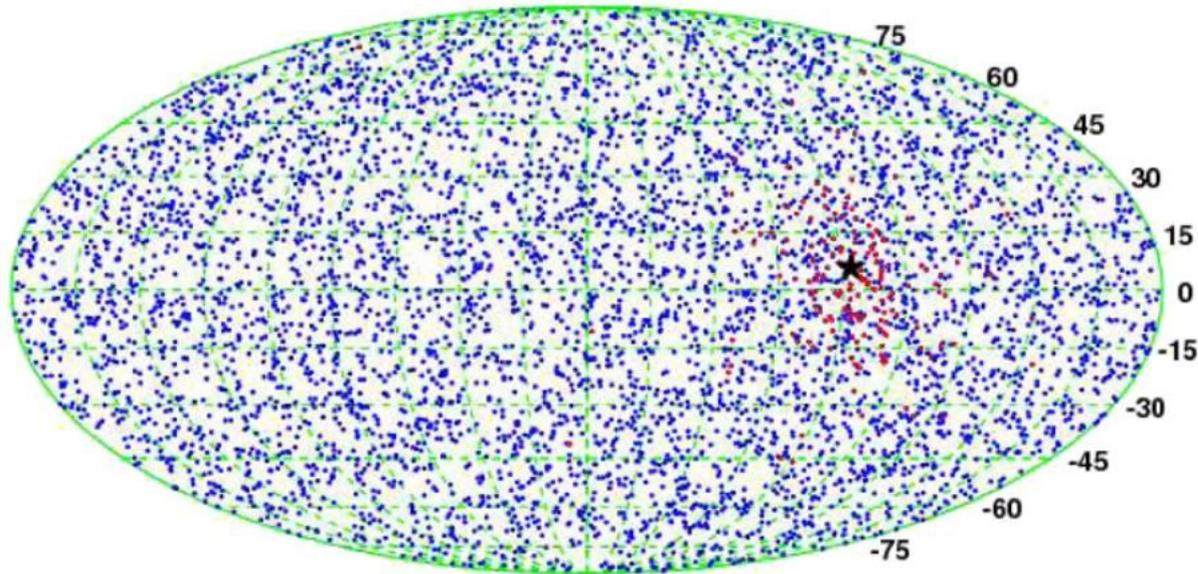
Жидкосцинтилляционный детектор большого объема с фотоприемниками на основе матриц из кремниевых фотоумножителей для низкофоновых экспериментов.

Водные черенковские детекторы:
упругое рассеяние + реакция обратного бета-распада




$$\sim \frac{25^\circ}{\sqrt{N}}$$

Declination (deg.)

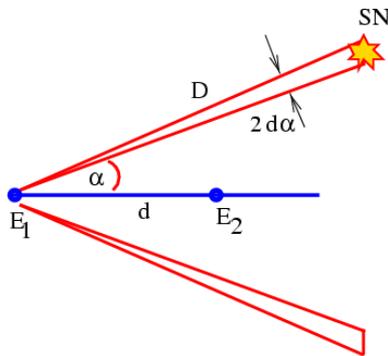
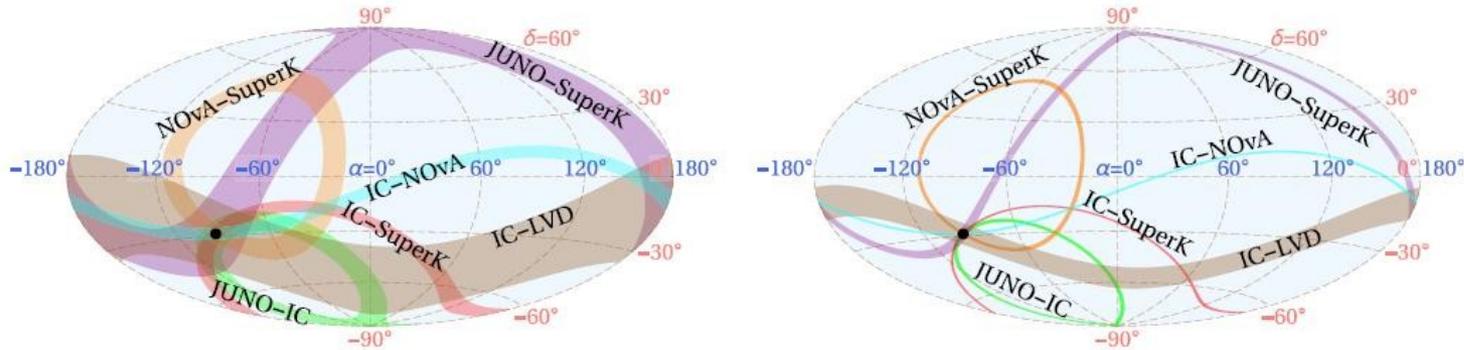


Right ascension (deg.)

Super-Kamiokande: 7 MeV total energy threshold.

The pointing accuracy for a supernova at 10 kpc is estimated using a modern supernova model to be $4.3^\circ - 5.9^\circ$ (68.2% C.L.) covering all combinations of neutrino oscillations and mass orderings.

Метод триангуляции



$$\cos(\alpha) = c \cdot \Delta t / d$$

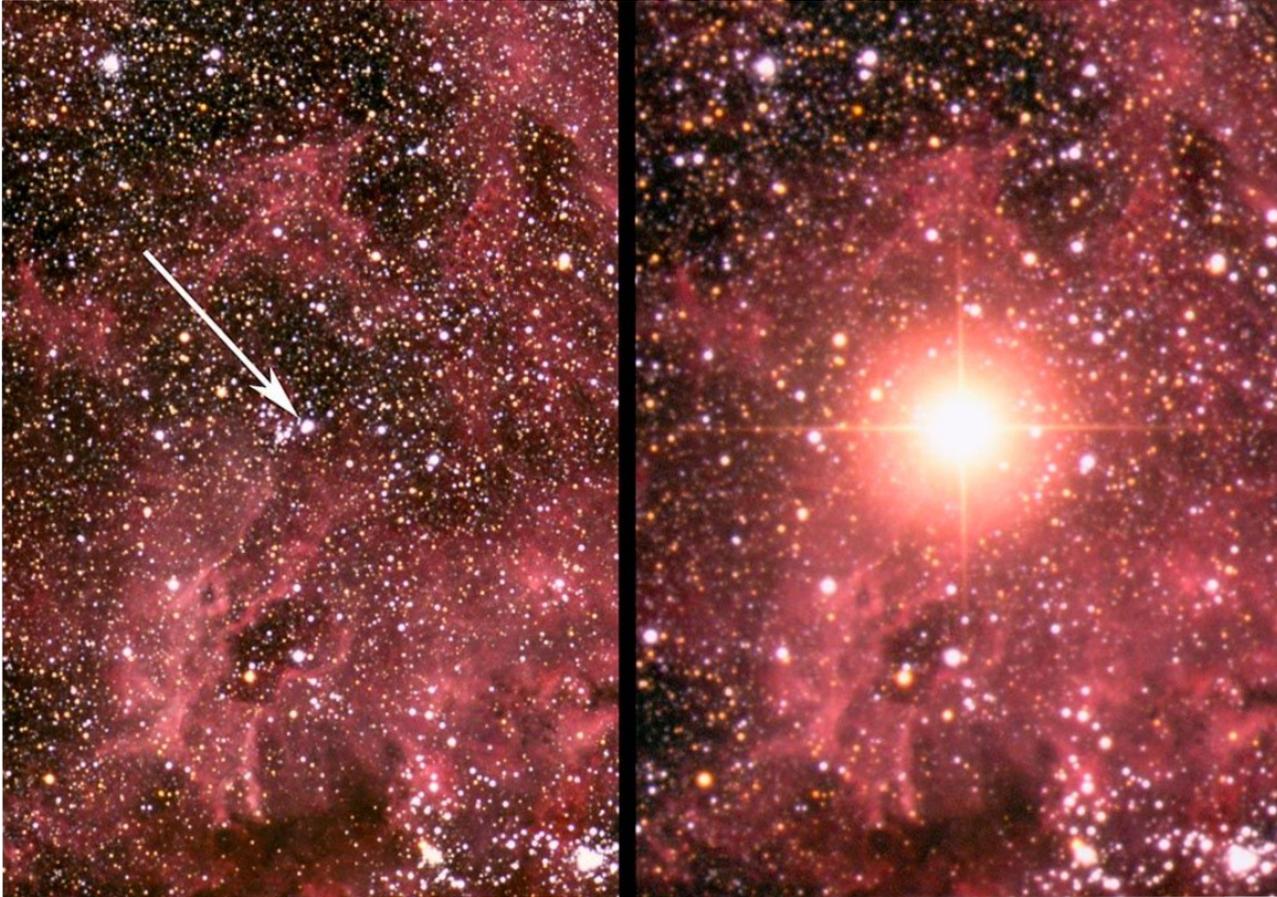
$$\delta(\cos(\alpha)) = c \cdot \delta(\Delta t) / d$$

Experiments	Major process	Target	δt (ms)	δt (BH)
Super-K	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	32 kt H ₂ O	0.9	0.14 ms
JUNO	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	20 kt C _n H _m	1.2	0.19 ms
DUNE	$\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$	40 kt LAr	1.5	0.18 ms
NOvA	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	14 kt C _n H _m	1.4	0.24 ms
CJPL	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	3 kt H ₂ O	3.8	0.97 ms
IceCube	Noise excess	H ₂ O	1	0.16 ms
ANTARES	Noise excess	H ₂ O	100	32 ms
Borexino	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	0.3 kt C _n H _m	16	5.5 ms
LVD	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	1 kt C _n H _m	7.5	2.4 ms
XENON1T	Coherent scattering	2 t Xe	27	10 ms
DARWIN	Coherent scattering	40 t Xe	1.3	0.7 ms

For the core collapsing into a neutron star the width of the 1σ region is 3° and 7° degrees in δ and α , respectively.
 For the core collapsing into a black hole precision of 1.5° in declination and 3.5° in right ascension is obtained.

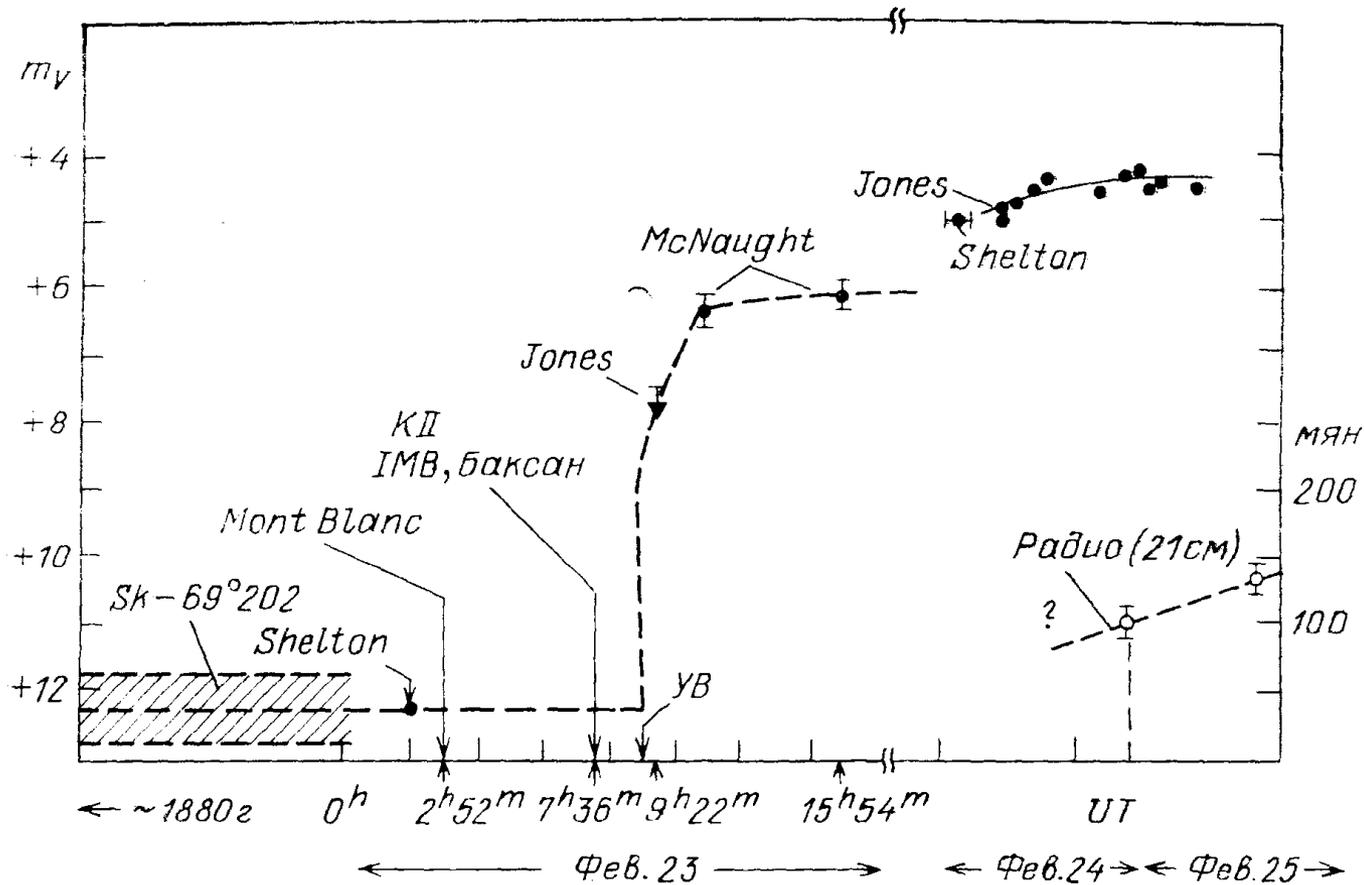
SN 1987A:

Первая и пока единственная сверхновая, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение.



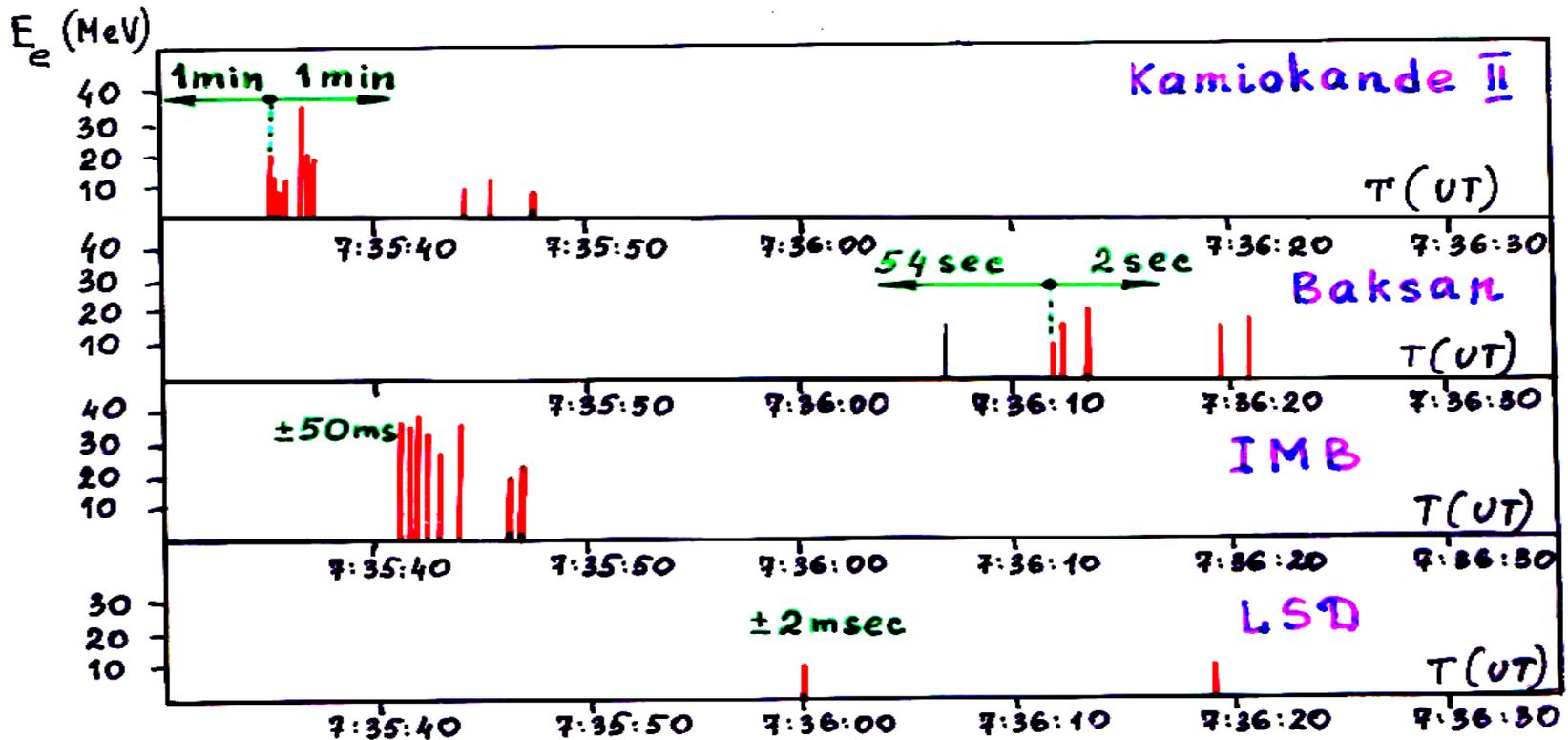
The progenitor of supernova 1987A was catalogued by in 1969 as an OB star of 12th magnitude and given the designation **Sanduleak-69 202**.

SN 1987A: history of observations



Observations of SN 1987A before and during the first days after its discovery.
 Blue supergiant supernova progenitor Sanduleak - 69 202.
 YB \equiv SW (shock wave, models)

The time sequence of events detected by the Kamiokande II, the Baksan telescope, IMB and LSD at 7:35 UT

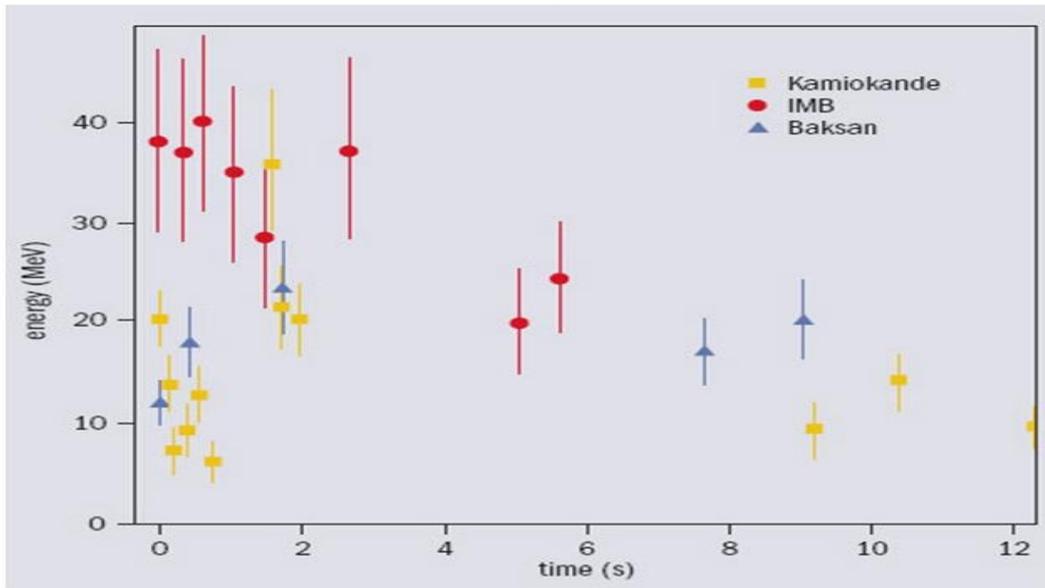


БПСТ: 5 событий за 9.1 с, фон – 0.7 событий в сутки.

Вероятность случайного совпадения БПСТ и Kamiokande II в интервале времени ~ 1 мин: $\sim 5 \cdot 10^{-4}$

Е.Н. Алексеев и др. Письма в ЖЭТФ, т.45, в. 10, с.461 – 464, 1987.

Scatter Plot of Energy and Time at 7:35



$t=0.0$ - время первого события для всех установок

Re-examination of the Time Structure of the SN1987A Neutrino Burst Data in Kamiokande-II.

Yuichi Oyama. ApJ, 922, 223, 2021.

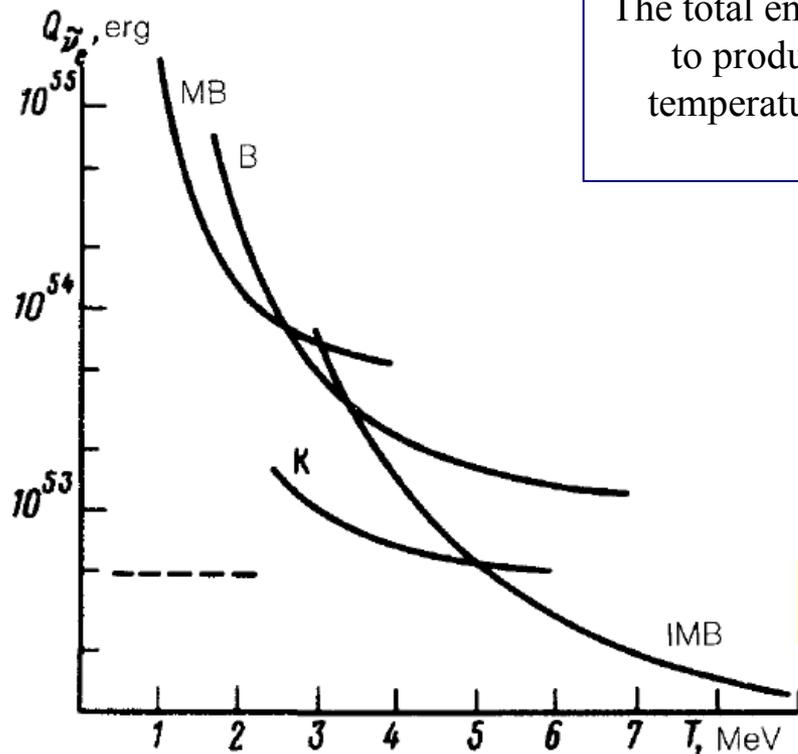
- « the probability of the Kamiokande-II experiment detecting no SN1987A neutrino, no cosmic ray muon, and no low-energy background for 7.304 s is less than 0.112%.»
- «it was reported that the ν_e^- output of SN1987A is estimated to be 8×10^{52} ergs. If the seven seconds' gap is dead time and it is assumed that a similar number of neutrino events is expected during this dead time, the ν_e^- output of SN1987A should be larger by a factor ~ 2 .

Supernova simulations confront SN 1987A neutrinos.

D.F.G. Fiorillo et al. Phys.Rev. D,108, 083040, 2023

«However, according to a private communication by M. Nakahata, this explanation is not viable because the event numbers were continuous across the gap.»

Анализ нейтринного излучения от SN 1987A



The total energy release in electron antineutrinos which would be required to produce the signals observed by various detectors, as function of temperature. The horizontal dashed line is the energy release would be expected in standard theory.

$$F(E_{\nu}, T) = C \frac{\varepsilon^2}{1 + e^{\varepsilon}} \exp(-\alpha \varepsilon^2)$$

$$\varepsilon = E_{\nu}/T$$

T (МэВ) – эффективная температура нейтриносферы

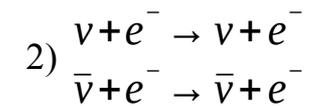
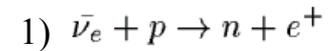
The reability of detection of neutrino burst from the gravitational collaps of star is not a simple and unambiguous matter which requires a futher and more detailed study: both an examination of other theoretical possibilities and reexamination of the experimental data.

→ E(K II): +20% and E(IMB): -20%

Анализ нейтринного излучения от SN 1987A

Effects near 7: 36 UT, each separately, do not contradict registration of neutrino radiation pulse for none of the three detectors BUST, KII, and IMB, but do not agree well with each other

Детектор	k_i ожидаемое		k_i (эксперимент)
	Реакция (1)	Реакция (2)	
LSD	1,5	0,04	0÷1
БПСТ	2	0,05	6
КII	17	0,5	12
IMB	6	0,4	8



V.L. Dadykin, G.T. Zatsepin, O.G. Ryazhskaya. Events detected by underground detectors on February 23, 1987. Soviet Physics Uspekhi(1989),32(5):459

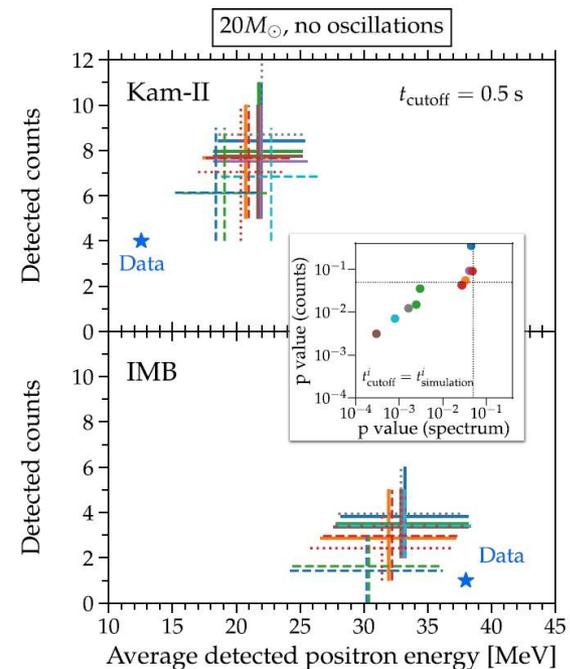
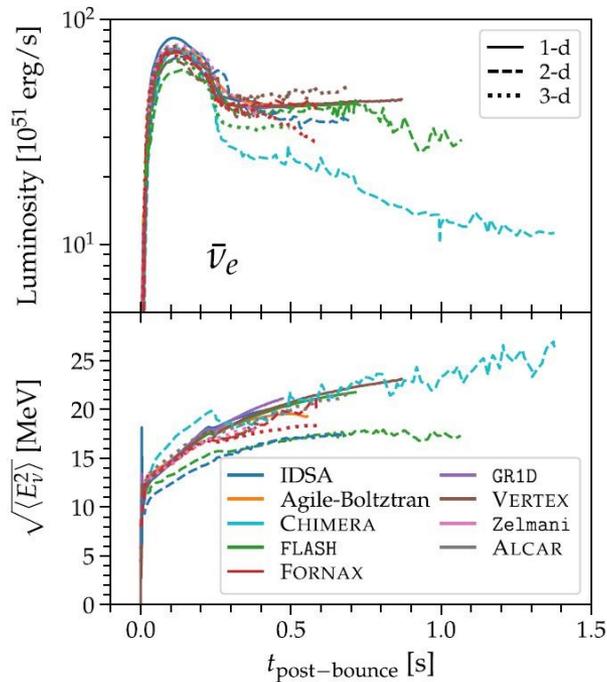
Анализ нейтринного излучения от SN 1987A

Old Data, New Forensics: The First Second of SN 1987A Neutrino Emission.

Shirley Weishi Li et al. Phys.Rev. D,109, 083025, 2023

Данные о нейтрино и электромагнитных свойствах SN 1987A, которые разумно согласуются с моделями сверхновых того времени, имеют решающее значение для нашего понимания сверхновых с коллапсом ядра. Обычно предполагается, что современные модели сверхновых — с 36 годами усовершенствований — также соответствуют этим данным. Мы пересматриваем это предположение.

Предсказания нейтрино современных моделей (1-, 2- и 3-D) в течение первой ≈ 1 с целом согласуются друг с другом. Однако, даже принимая во внимание малое количество нейтрино, модели в целом не согласуются с данными Kamiokande-II и IMB.

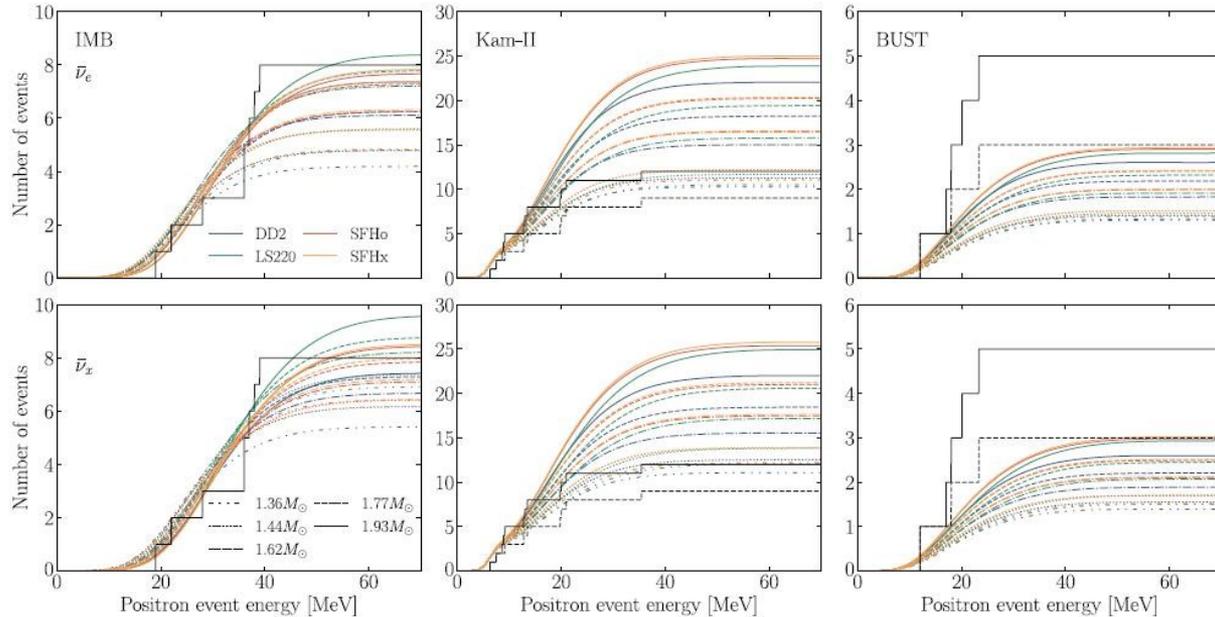
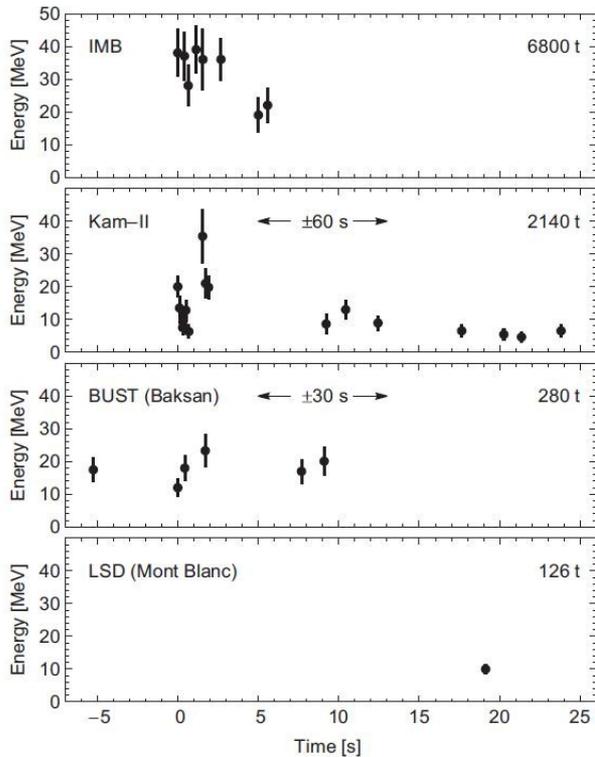


Анализ нейтринного излучения от SN 1987A

Supernova simulations confront SN 1987A neutrinos.

D.F.G. Fiorillo et al. Phys.Rev. D,108, 083040, 2023

While our models show compatibility with the events detected during the first seconds, PNS convection and nucleon correlations in the neutrino opacities lead to short PNS cooling times of 5–9 s, in conflict with the late-event bunches in Kam-II and BUST after 8–9 s, which are also difficult to explain by background.



Cumulative energy distributions in IMB, Kam-II, and BUST together with the expectations from our models for no-flavor swap (top row) and full-flavor swap (bottom row). The black dashed lines for Kam-II and BUST leave out the late events.

Liquid Scintillator Detector (LSD)

# of event	Time, UT±2ms	Energy, MeV
1	2:52:36,79	6,2 – 7
2	40,65	5,8 – 8
3	41,01	7,8 – 11
4	42,70	7,0 – 7
5	43,80	6,8 – 9
1	7:36:00,54	8
2	7:36:18,88	9

- LSD detected on real time a burst of 5 signals (time interval - 7 s) at 2:52:36, before optical observation.
- LSD detected two pulses at the IMB – Kamiokande time

The results are not explained in the frame of the standard collapse model, but can be naturally explained by rotating collapsar model which predicts two-stage collapse. LSD detected **neutrino** from the stage of neutronization of the star due to the presence of the **iron** in LSD. The first stage was ~ 5 hours early then second one.

V. Imshennik, O. Ryazhskaya, Astron. Lett. 30, 14, 2004.

Заключение.

- Первой и пока единственной сверхновой, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение, была SN 1987A.
- Детектирование нейтрино от сверхновой SN1987A явилось экспериментальным подтверждением крайне важной роли нейтрино в процессе взрыва массивных звезд.
- Современные модели сверхновых в целом не согласуются с данными по нейтринному излучению от SN 1987A.
- В настоящее время постоянно работает несколько нейтринных детекторов и если в Галактике в ближайшее время произойдет взрыв Сверхновой с коллапсом ядра, то нейтринная вспышка будет зарегистрирована.
- Современные нейтринные детекторы объединены в сеть SuperNova Early Warning System.
- SNEWS 2.0 будет вырабатывать алерты и давать целеуказание для последующих наблюдений.
-