Поиск нейтринного излучения от взрывов Сверхновых в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

В.Б. Петков

и коллаборация БПСТ

ИЯИ РАН, Баксанская нейтринная обсерватория

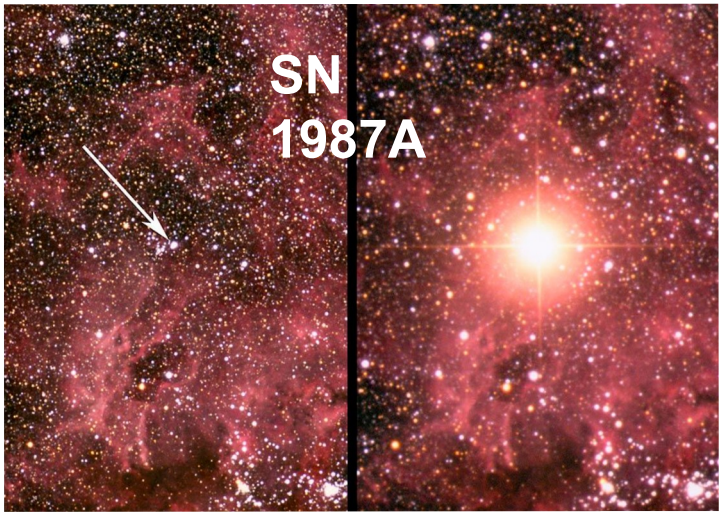
Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»
ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 10 – 13 марта 2026 года.

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.

Нейтрино уносят подавляющую часть энергии при взрыве сверхновой с коллапсом ядра

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

- → образование нейтронной звезды;
- изменение гравитационной энергии связи от начального состояния до конечного составляет: ~ $3 \cdot 10^{53}$ эрг.
- ~ 99% этой энергии переходит в нейтрино и антинейтрино всех сортов (делится примерно поровну между различными типами нейтрино).
- ~ 1% переходит в кинетическую энергию разлетающейся оболочки и световую вспышку.



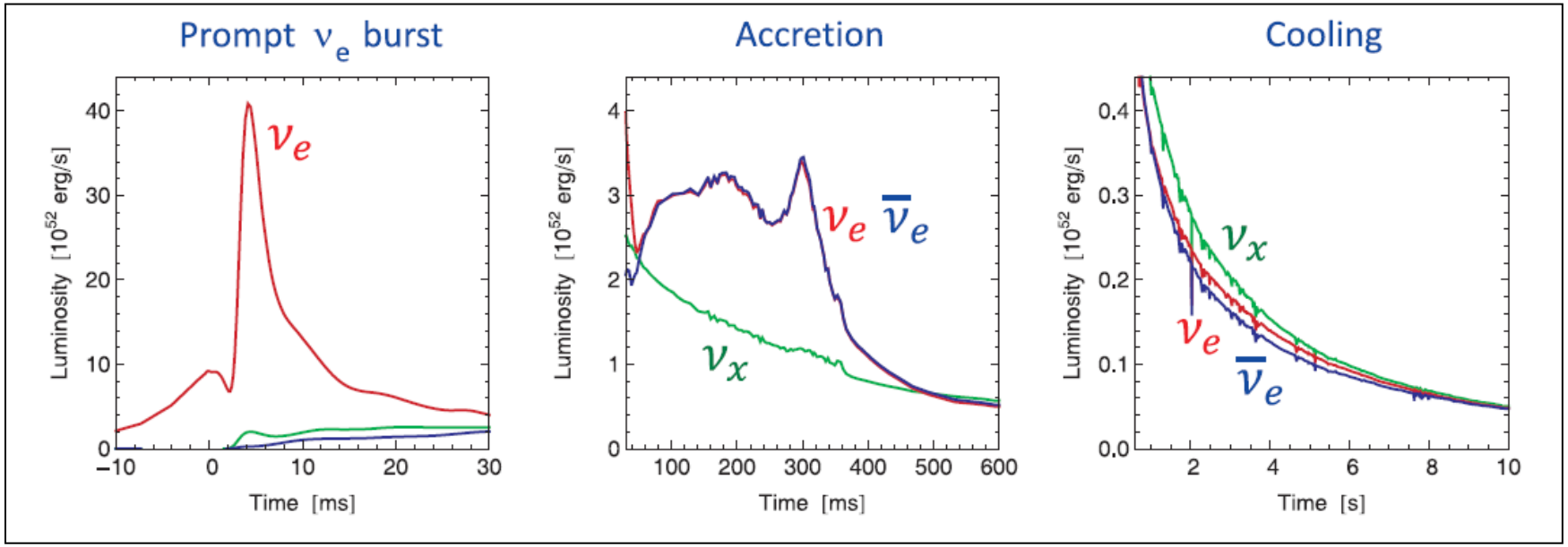
Первая и пока единственная сверхновая, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение.

- Нейтринная вспышка
- T_{burst} ~ 10 секунд, E_ν ~ 10 – 20 МэВ
- Временной профиль: зависит от модели

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

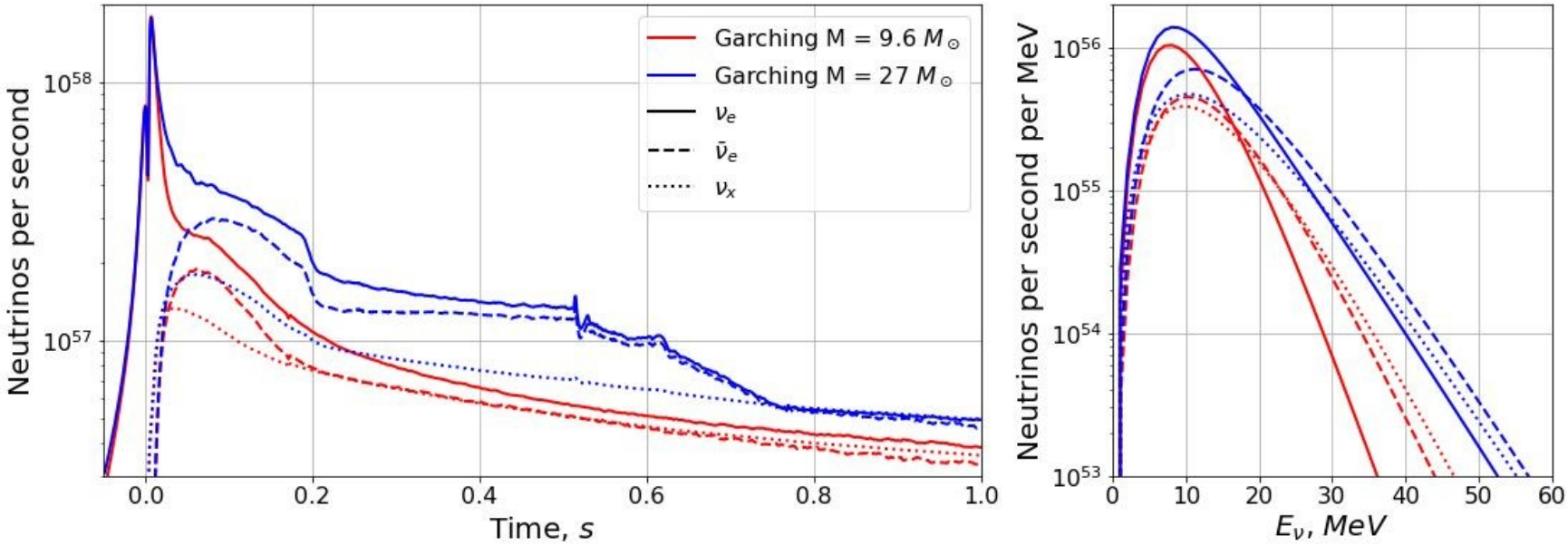
$p + e^- \rightarrow \nu_e + n$

S. Horiuchi, James P. Kneller, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 45, 043002 (2018)



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

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



The Garching Core-Collapse Supernova Research. https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/ccsnarchive/

…. различные современные коды не согласуются в своих предсказаниях взрывов сверхновых и их свойств, а также образования черных дыр у отдельных звезд-предшественников. Поэтому систематика взрывов массивных звезд в зависимости от их массы до сих пор остается предметом споров.

Long-Term Multidimensional Models of Core-Collapse Supernovae: Progress and Challenges. Hans-Thomas Janka. arXiv:2502.14836

Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН: подземные лаборатории.

Распределение интенсивности мюонов вдоль штольни

БПСТ — 850 м в.э.

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 гравитационая антенна

ГФ-1 — геофизическая лаборатория № 1

ГФ-2 — геофизическая лаборатория № 2

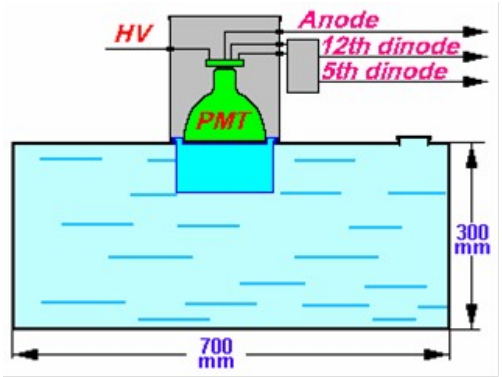
НКЛ — низкофоновая криогенная лаборатория (проект)

ББНТ — Баксанский большой нейтринный телескоп (проект)

BUST: 1977 - up to date

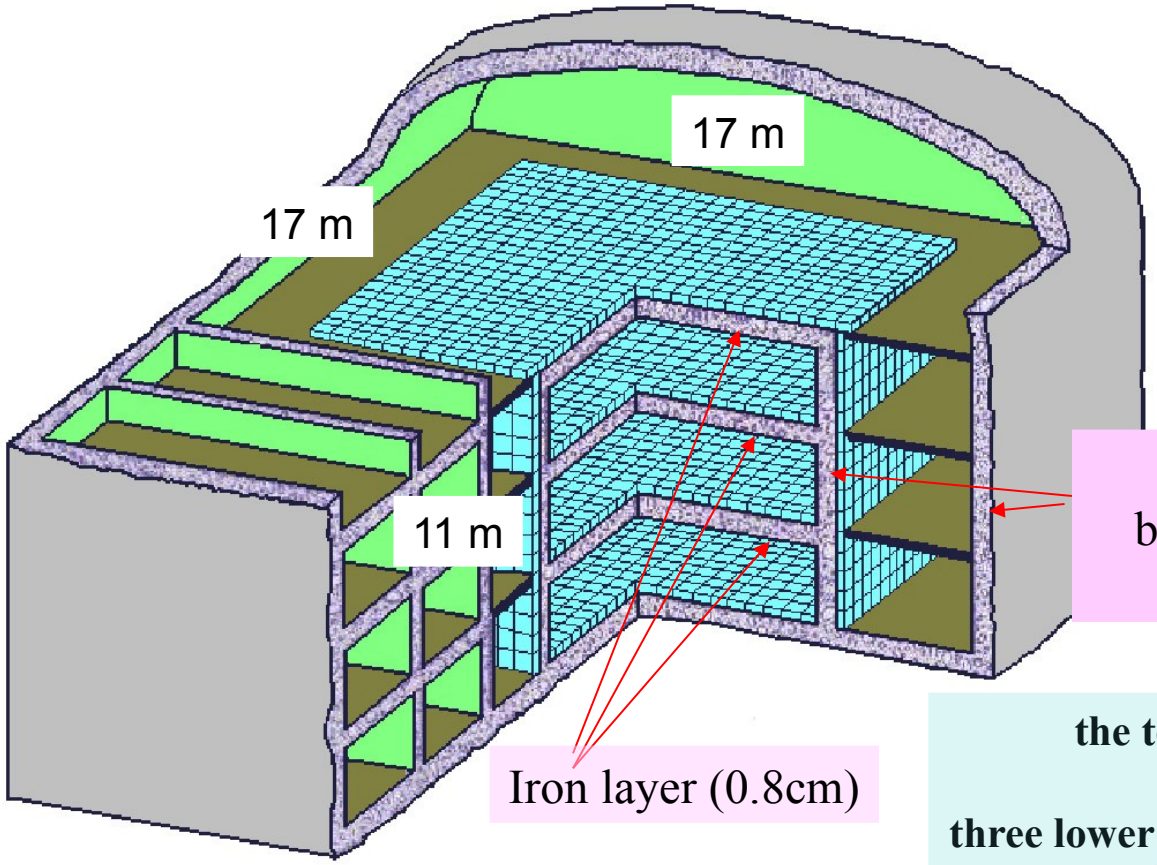
→ Stable operation of the telescope, stable scintillator

dimensions: 17 * 17 * 11 m^3
number of counters: 3180
tank size: 70 * 70 * 30 cm^3



the scintillator C_nH_{2n+2} (n ≈9)

1 р.ч. = 50 МэВ



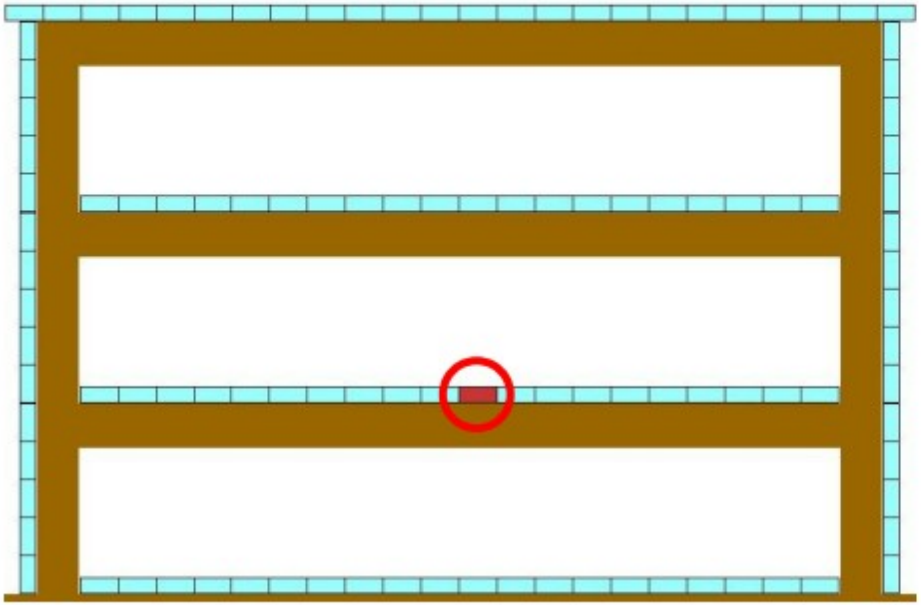
low-background concrete

Iron layer (0.8cm)

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



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$ **~ 88%**

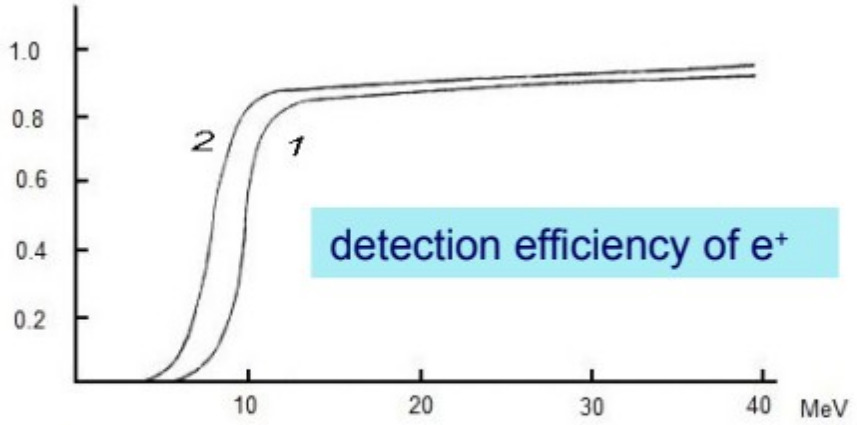
E_{th} =1.8 MeV

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

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

$<E_{\bar{\nu}_e}> = 12 - 15$ MeV

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

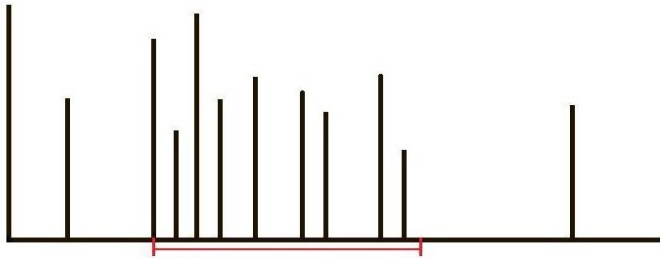


detection efficiency of e^+

→ 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)

The search for a neutrino burst at the BUST

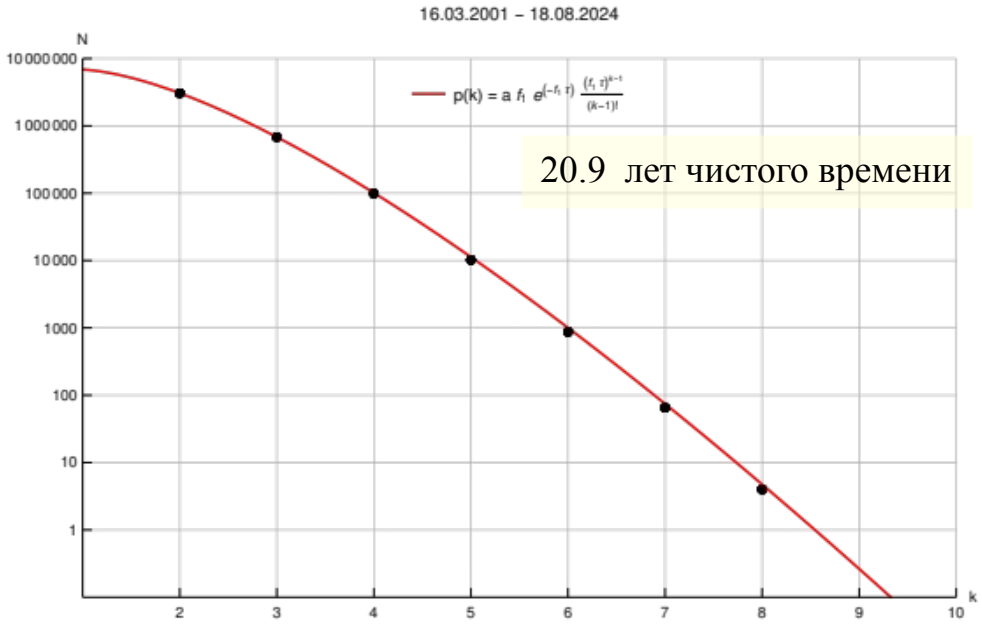


$\Delta t = 20$ s

Sliding interval, $\Delta t = 20$ s

Background events

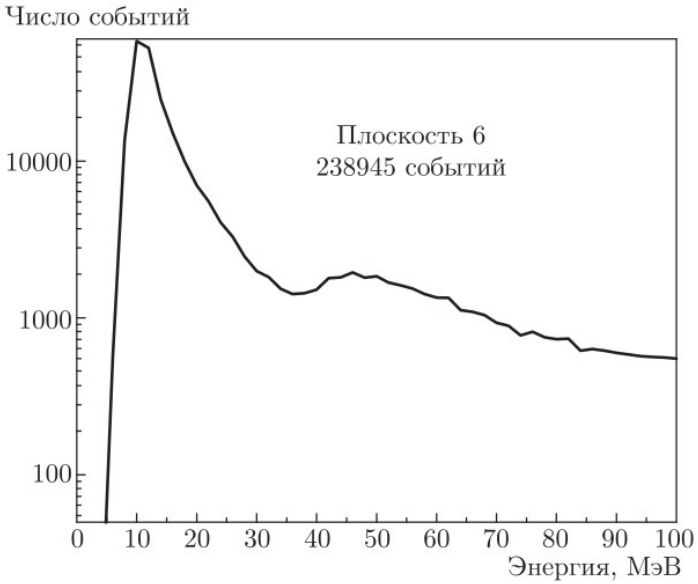
1) ghost signals from module (noises)
2) cosmic ray muons:
 - a single muon is registered by one counter due to spatial gaps between tanks of the telescope
 - a muon energy release < 8 MeV
3) radioactivity



20.9 лет чистого времени

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

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

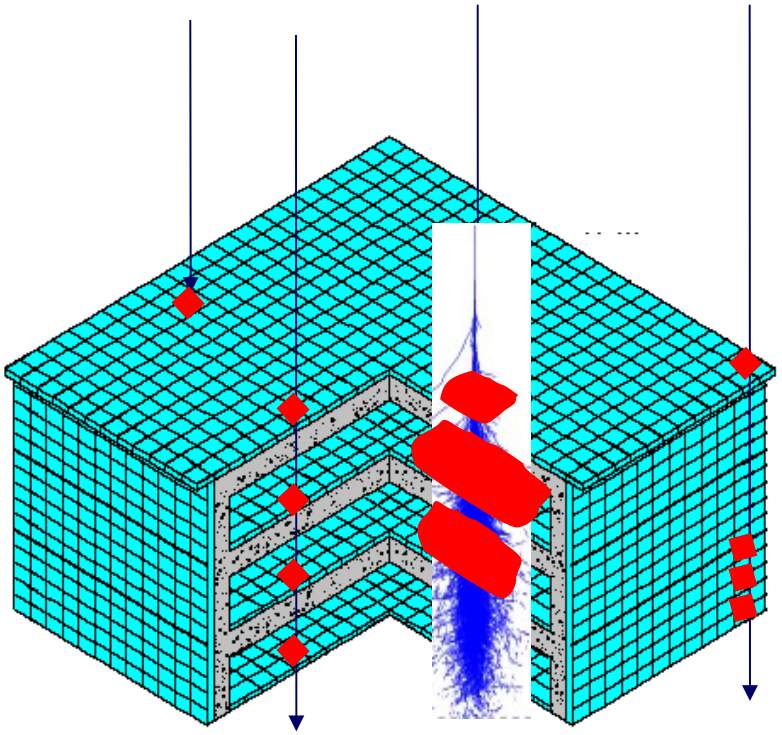


Спектр фоновых событий (2 МэВ/бин)
Время экспозиции: 331 сутки

Пик в области 10 – 15 МэВ связан с распадами космогенных изотопов

Рождение радиоактивных изотопов в сцинтилляторе от каскада в БПСТ

- 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



Группа мюонов + каскад

Рождение радиоактивных изотопов в сцинтилляторе от каскада в БПСТ

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

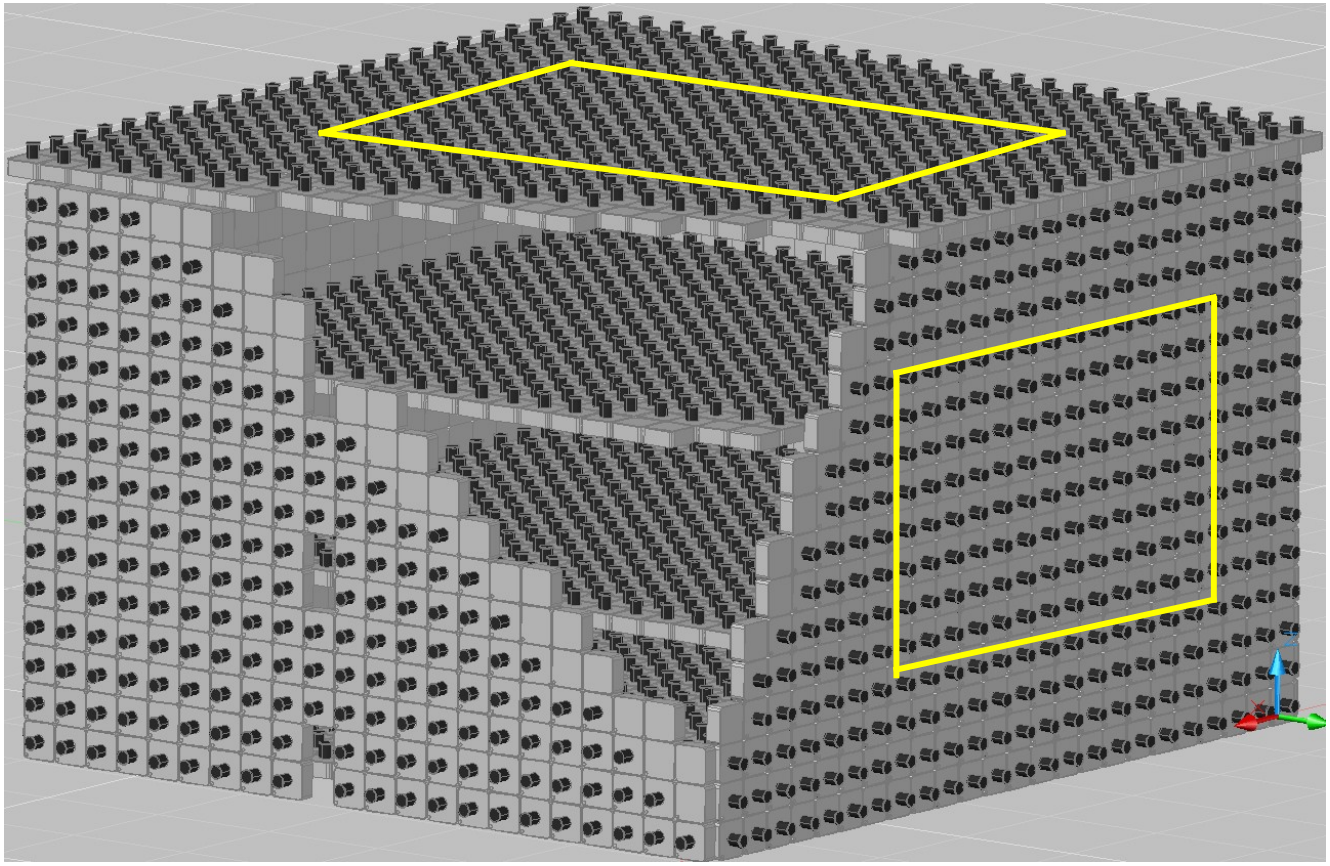
Изотоп	Время жизни, τ	Q, МэВ	Тип распада	Максимальное энерговыделение, с учётом аннигиляции позитрона	Основная реакция	Конечное состояние
^{12}N	15.9 ms	16.38	β+	17.38	^{12}C(p,n)	стаб. (^{12}C)
^{12}B	29.1 ms	13.4	β-	13.4	^{12}C(n,p)	стаб. (^{12}C)
^{8}He	171.7 ms	10.7	β-	10.7	^{12}C(π^-,n3p)	^{8}Li (84%), остальные – стаб.[2]
^{9}C	182.5 ms	16.5	β+	17.5	^{12}C(π^+,^{3}H)	стаб.[2]
^{9}Li	257.2 ms	13.6	β-	13.6	^{12}C(π^-,^{3}He)	стаб.[2]
^{8}B	1.11 s	18.0	β+	19.0	^{12}C(π^+,^{2}H^{2}H)	стаб.[2]
^{8}Li	1.21 s	16.0	β-	16.0	^{12}C(n,pα)	стаб.[2]
^{11}Be	19.9 s	11.5	β-	11.5	^{12}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 ГэВ, 265 ГэВ, 1090 ГэВ и 355 ГэВ

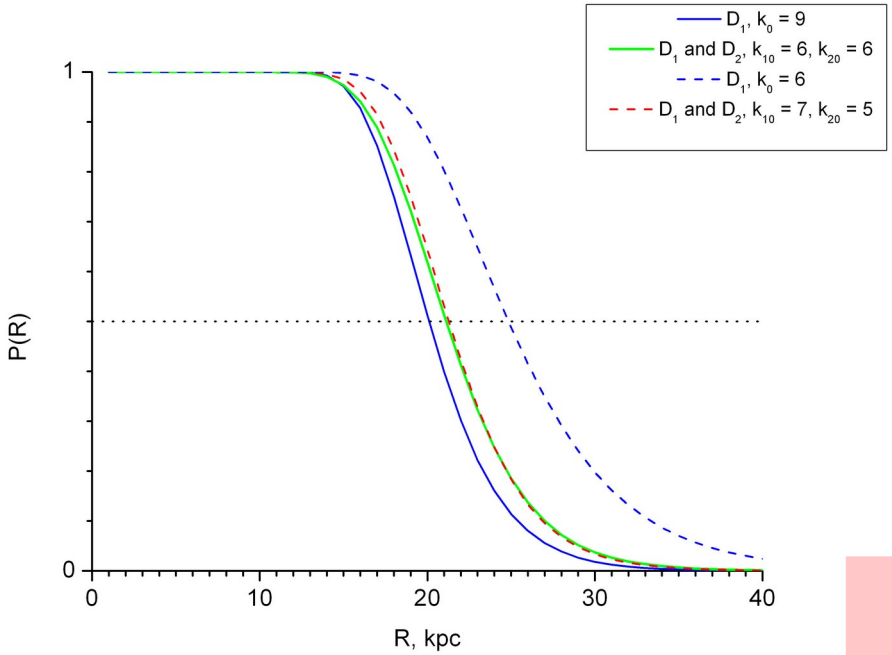
Two parts of the BUST – two independent detectors, ~ 240 tons



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

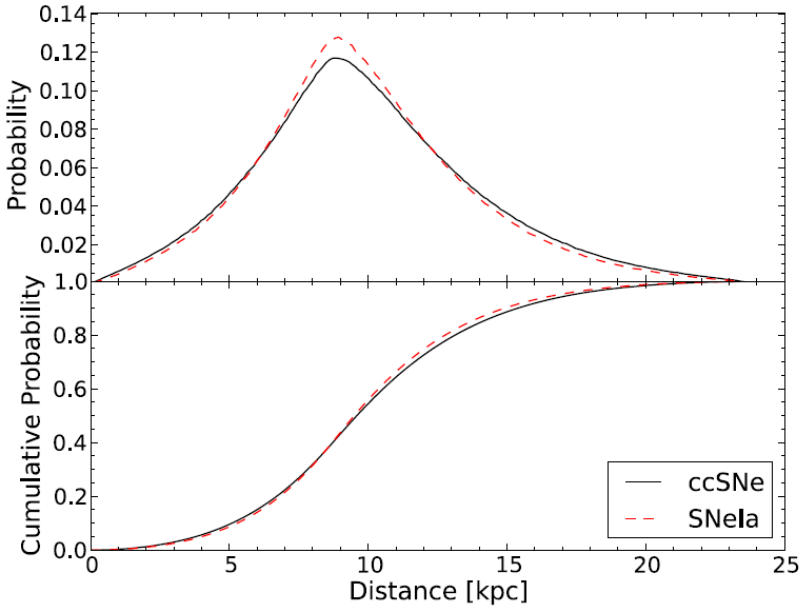
Internal planes, the D1: 1200 counters (130 tons), 0.02 sec^{-1}

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



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 с коллапсом ядра на БПСТ идет с 30.06.1980

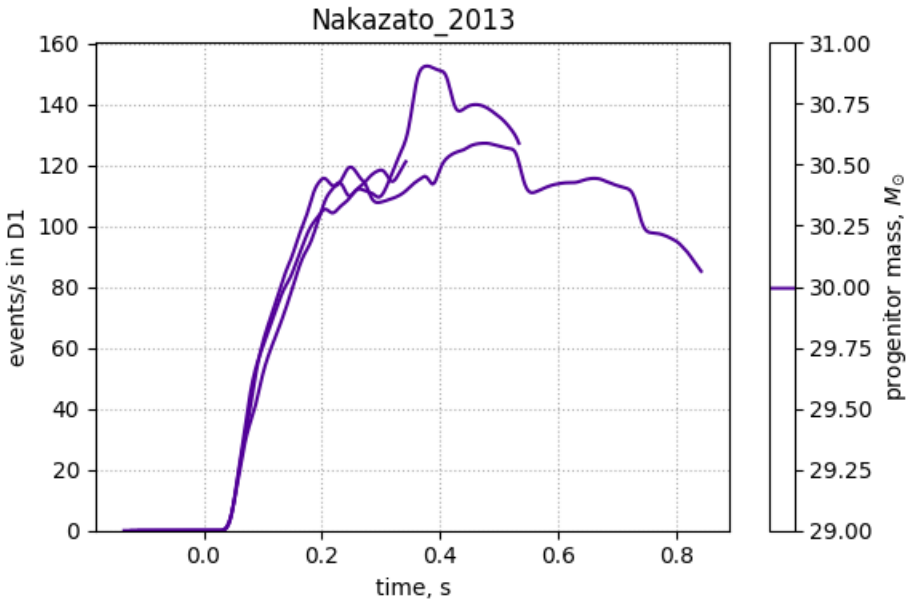
За период с 30.06.1980 по 18.11.2025 чистое время наблюдения: 39.47 года

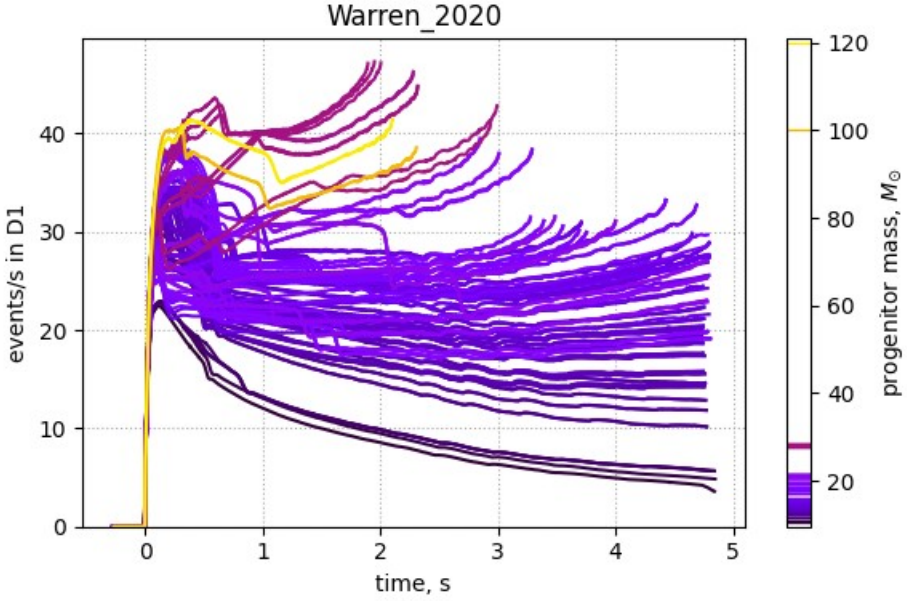
Ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике: 0.058 год$^{-1}$ (~5.8 в столетие) на 90% уровне достоверности ($T_{SN} \approx 17$ лет)

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

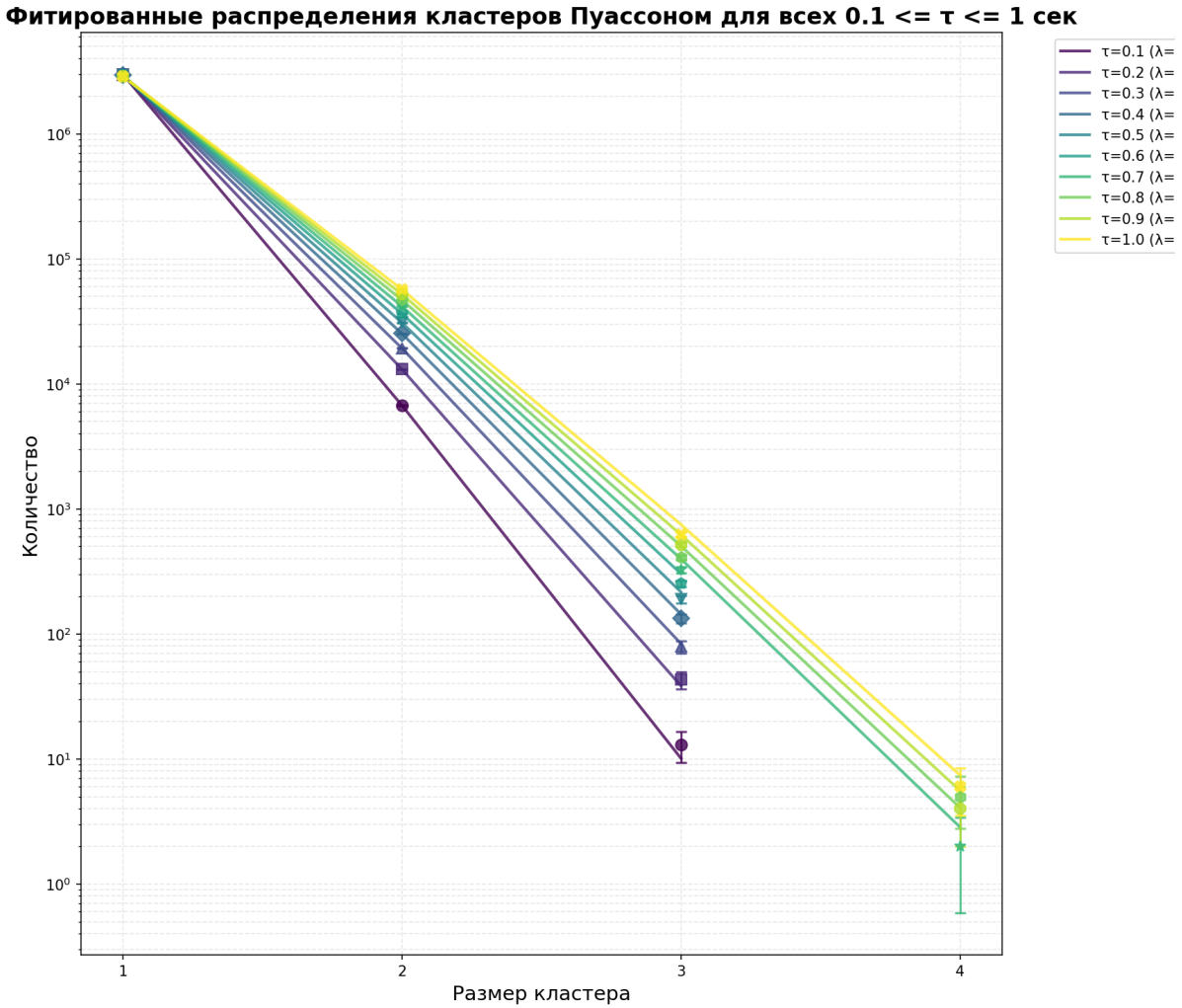
Короткие нейтринные вспышки от прерванного взрыва Сверхновой

Традиционное представление о возможности взрыва сверхновой заключалось в том, что менее массивные звёзды, с массой $M \leq 20\ M_{\odot}$, успешно взрываются, образуя нейтронные звёзды, а более массивные звёзды, с массой $M \geq 20\ M_{\odot}$, приводят к неудавшимся сверхновым и образованию чёрных дыр. Но современные трехмерные модели сверхновых показали, что возможность успешного взрыва сверхновой зависит от многих факторов, и что так называемые «острова взрываемости» существуют во всём диапазоне масс от 9 до 120 $M_{\odot}$, а их расположение является модельно зависимым.



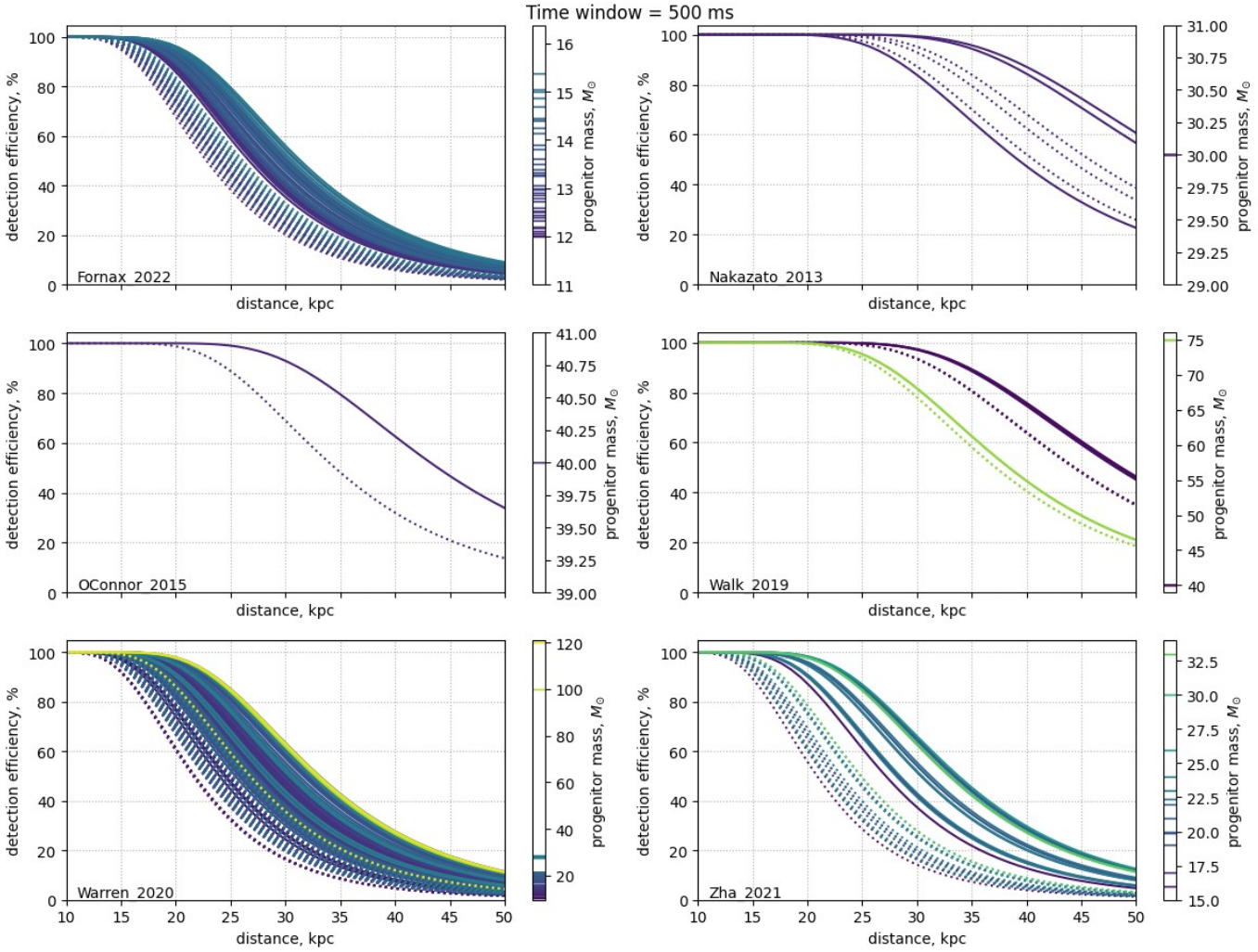


Поиск коротких нейтринных вспышек от прерванного взрыва Сверхновой

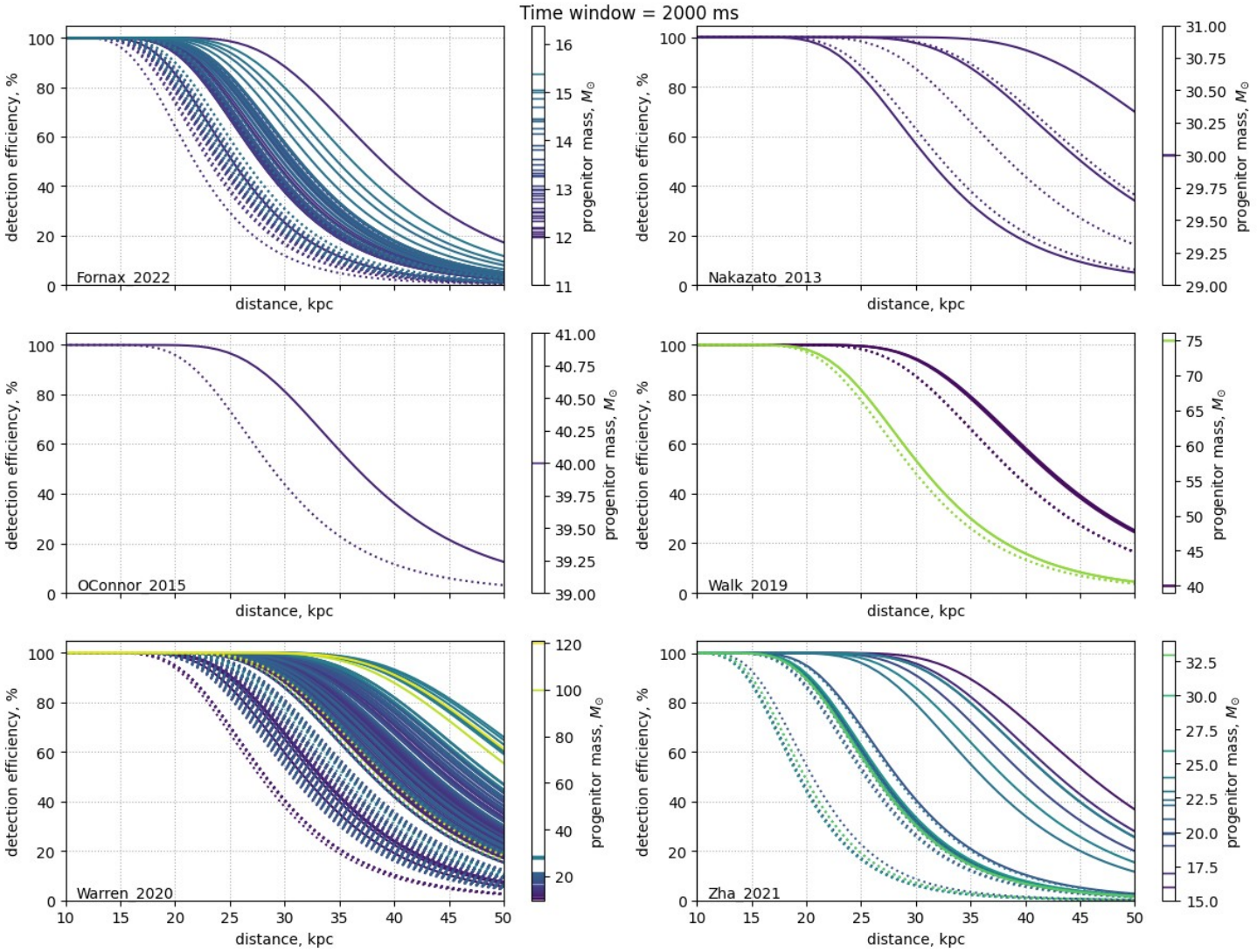


За чистое время набора информации 6.02 года не было обнаружено ни одного кандидата на короткую нейтринную вспышку от взрыва сверхновой с коллапсом ядра в черную дыру.

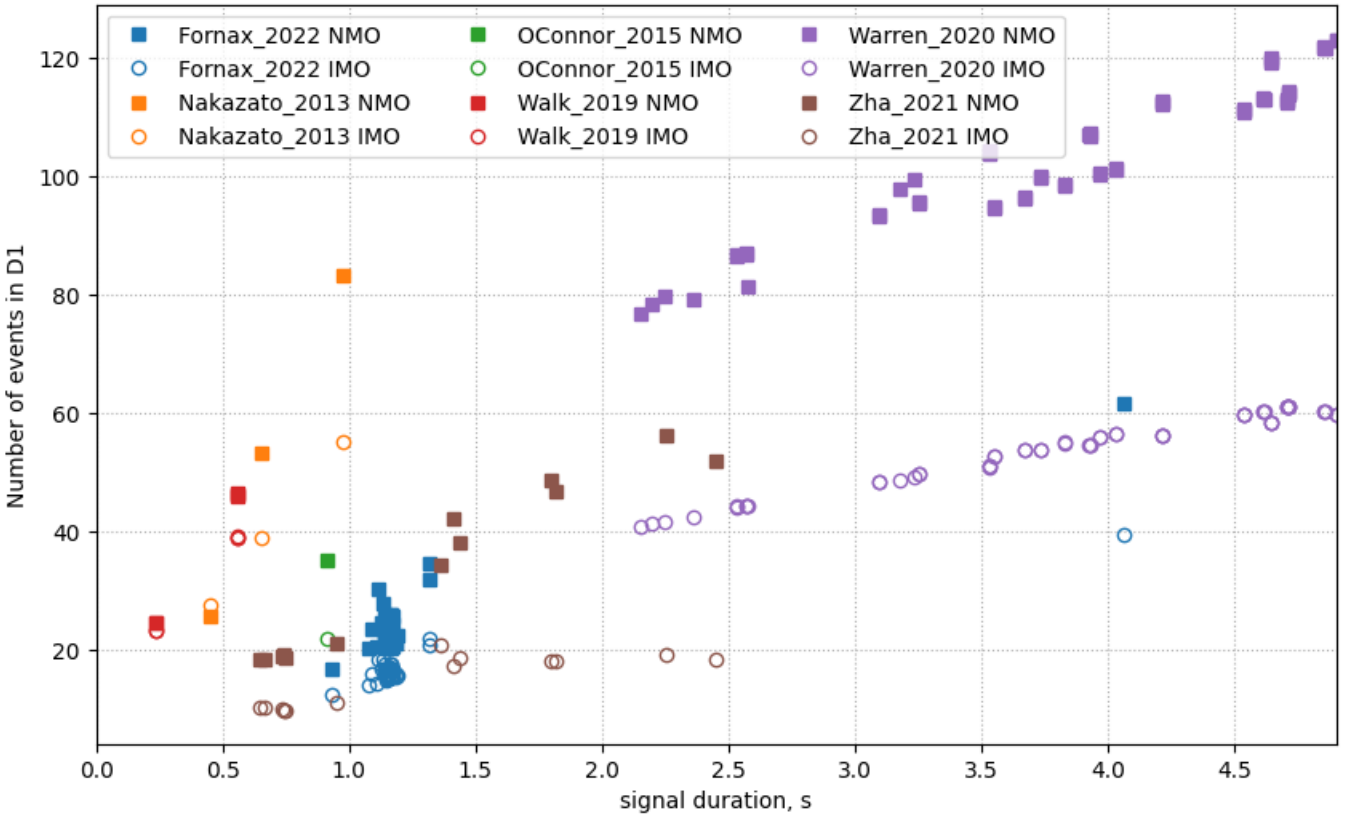
Поиск коротких нейтринных вспышек от прерванного взрыва Сверхновой



Поиск коротких нейтринных вспышек от прерванного взрыва Сверхновой



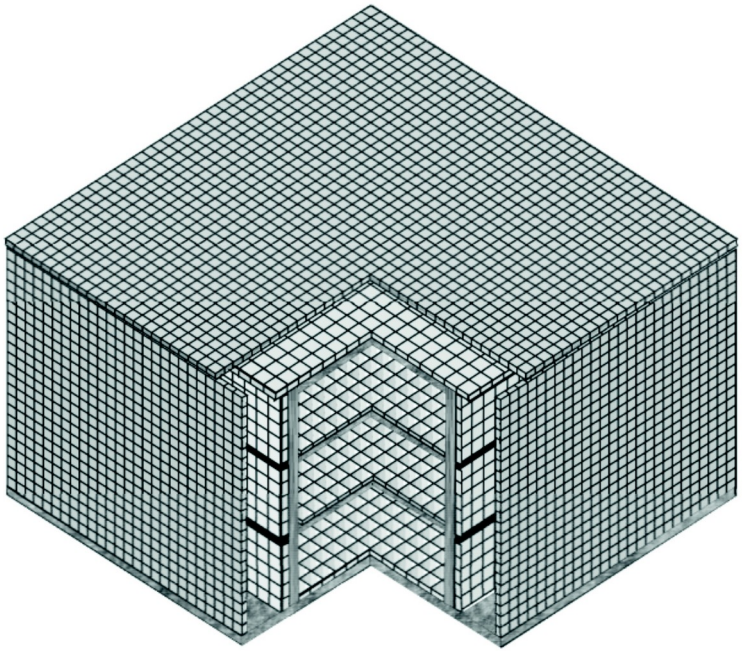
Поиск коротких нейтринных вспышек от прерванного взрыва Сверхновой



Ожидаемые числа событий (по вертикали) и длительность вспышки (по горизонтали) в детекторе D1 для рассматриваемых моделей на расстоянии 10 килопарсек.

Развитие комплекса установок БПСТ, Ковёр-3, Андырчи: ***модернизация БПСТ***.
Изучение мюонных групп большой кратности → спектр и состав ПКИ.

Поиск нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых: 330 т сцинтиллятора



Оценка числа зарегистрированных событий от взрыва сверхновой на 10 кпк

130 т сцинтиллятора

s11.2c, 11.2 $M_\odot$	— 24/24	NS
s27.0c, 27.0 $M_\odot$	— 47/46	NS
s40, 40.0 $M_\odot$	— 44/30	BH

240 т сцинтиллятора

s11.2c, 11.2 $M_\odot$	— 45/45	NS
s27.0c, 27.0 $M_\odot$	— 86/84	NS
s40, 40.0 $M_\odot$	— 82/56	BH

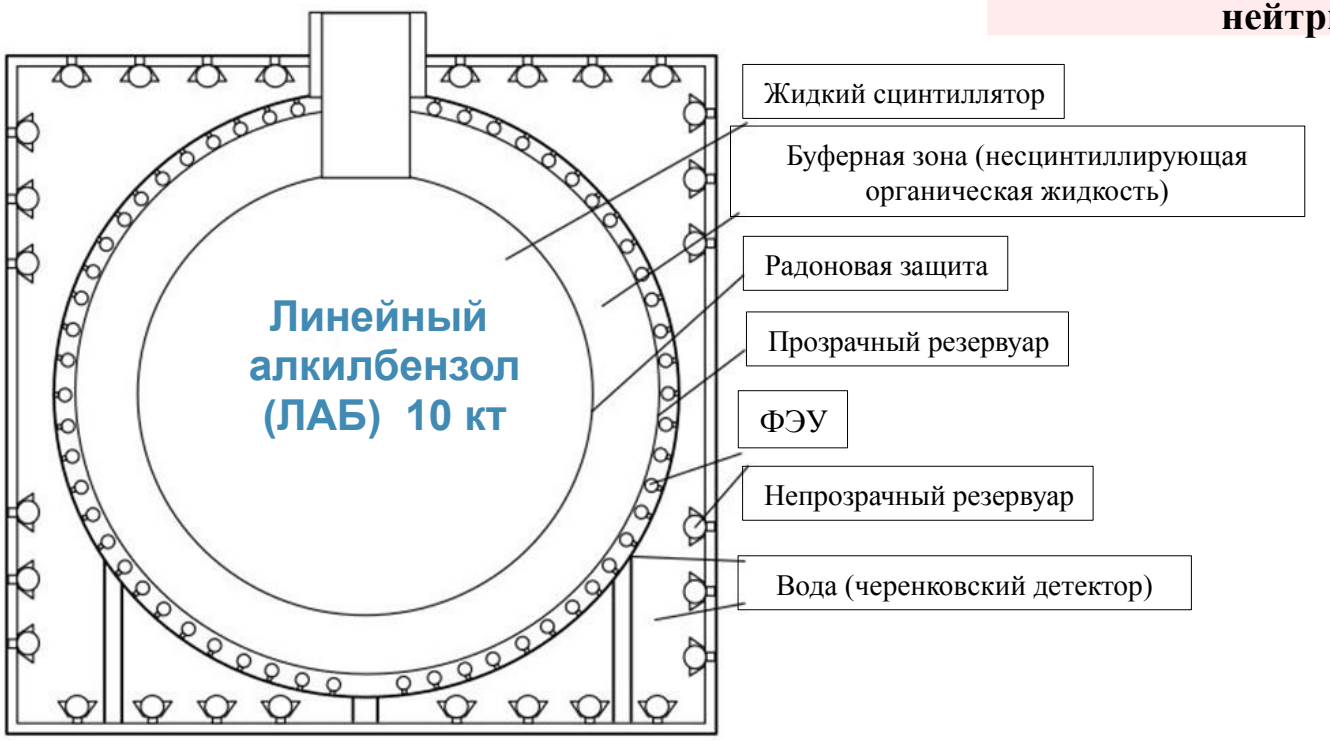
330 т сцинтиллятора

s11.2c, 11.2 $M_\odot$	— 62/62	NS
s27.0c, 27.0 $M_\odot$	— 118/116	NS
s40, 40.0 $M_\odot$	— 113/77	BH

Вход
Зал БПСТ
НФ лаб.2 +
Баксанский лазерный
интерферометр-деформограф
400 м
500 м
НФ
лаб.1
1320 м
1500 м
ГеоФиз
лаб.1
Зал ОГРАН
НФ
крио.
2620 m
~3000 m w.e.
НФ лаб.3
ГеоФиз
лаб.2
4000 m
3400м
Зал ГГНТ
3700 м
4300 м
ББНТ
Предполагаемое место для низкофоновой
криогенной лаборатории

Сцинтилляционный детектор большого объёма: предполагаемая конструкция

Изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки



Оценка числа зарегистрированных событий от взрыва сверхновой на 10 кпк

s11.2c, 11.2 $M_\odot$ — 1900/1900 NS

s27.0c, 27.0 $M_\odot$ — 3600/3500 NS

s40, 40.0 $M_\odot$ — 3400/2400 BH

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова и др. Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики. Ядерная физика, 2017, том 80, №3, с. 230

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 18.11.2025 не было зарегистрировано ни одного события - кандидата на нейтринную вспышку в Галактике. За этот период чистое время наблюдения составило T= 39.47 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 0.058 год$^{-1}$ (∼5.8 в столетие) на 90% уровне достоверности ($T_{SN} \approx 17$ лет).

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.
- Различные современные коды не согласуются в своих предсказаниях взрывов SN и свойств взрыва.
- 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.