

Мониторинг нейтринных вспышек в Галактике



Ю.Ф. Новосельцев
коллорабация БПСТ



План

- 1) Детекторы, способные регистрировать нейтринную вспышку от СН
- 2) Статус эксперимента БПСТ ИЯИ РАН
- 3) Нейтрино от СН и легкая темная материя [$m \sim (\text{МэВ})$]



Нейтринные детекторы

Detector	Mass (kt)	Type
Super-K	32	$H_2O/\bar{\nu}_e$
IceCube	2500*	<i>String</i> / $\bar{\nu}_e$
KM3NeT	150*	<i>String</i> / $\bar{\nu}_e$
NovA	14	$C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$
KamLAND	1	$C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$
LVD	1	$C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$
SNO+	0.78	$C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$
Baksan	0.24	$C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$

JUNO (20, $C_nH_{2n}/\bar{\nu}_e$), DUNE (40, Ar/ν_e)



Более десятка детекторов готовы измерять характеристики нейтринного потока от СН

Недавним дополнением к набору потенциальных детекторов следующей СН стали большие детекторы темной материи.

- а) когерентное усиление нейтрино-ядерного сечения рассеяния (CEvNS) (Акимов и др., 2017)
- б) низкий (<кэВ) энергетический порог

DarkSide-50 (50 кг LAr) (Agnes et al 2018)

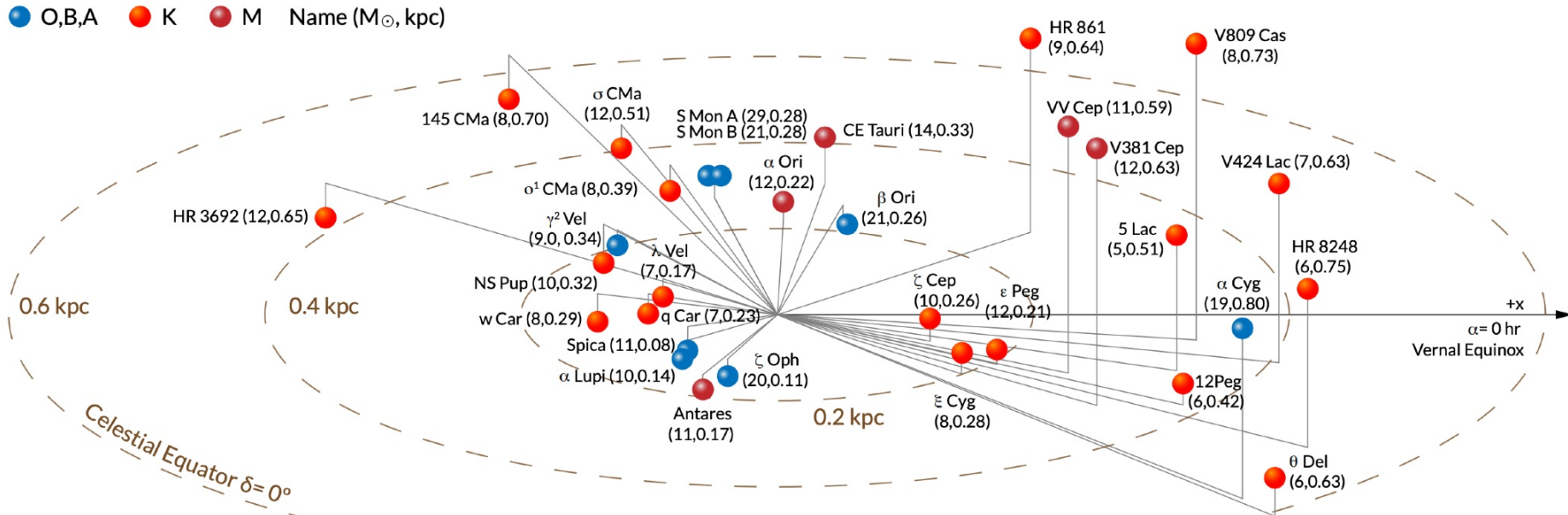
DEAP-3600 (3279 кг LAr) (Ajaj et al 2019)

DarkSide-20k (DS-20k) (47 т LAr)

Argo (300 т LAr)



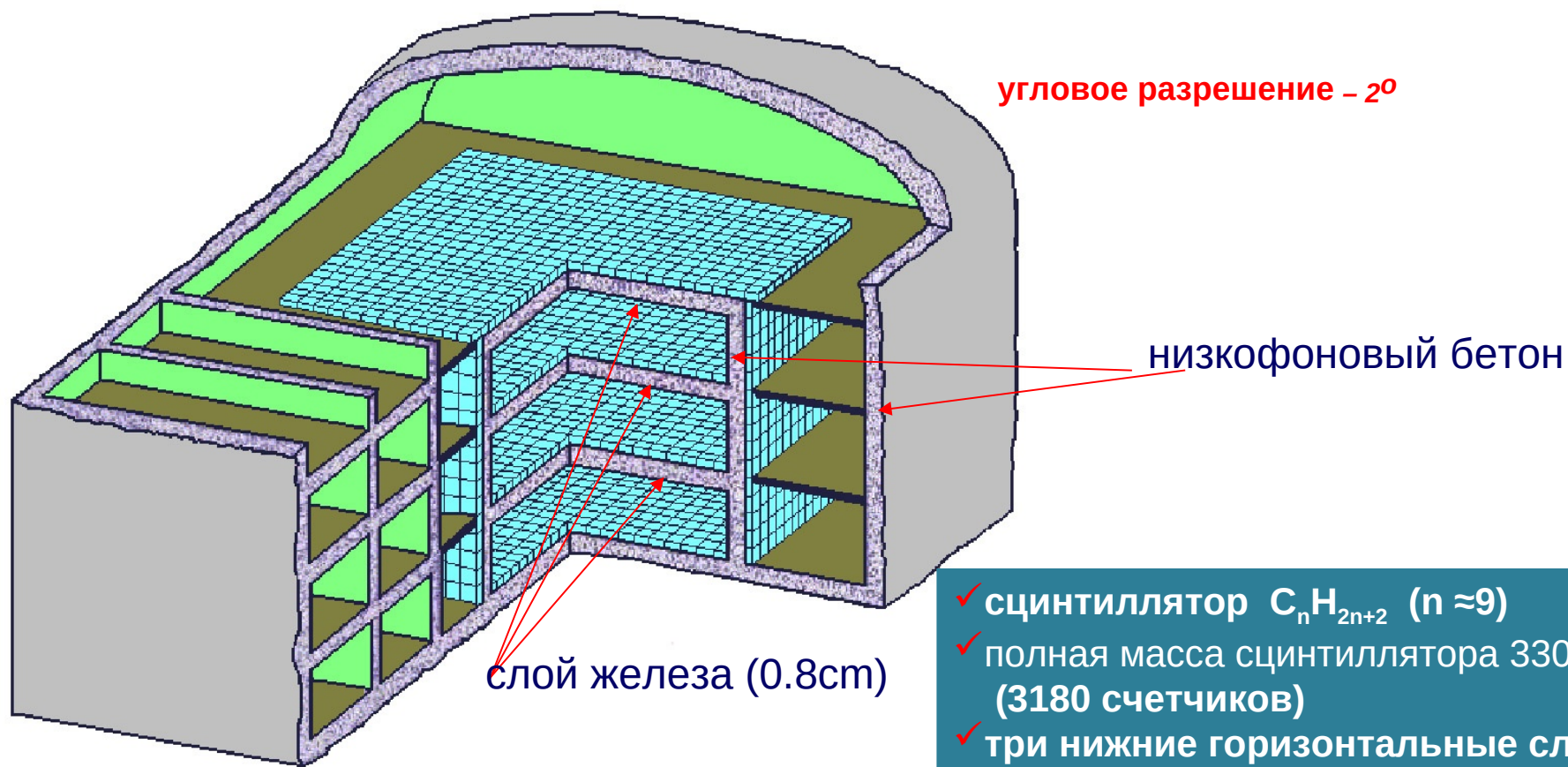
Ближайшие кандидаты в СН (BenZvi -- ICNEP 2020)



БПСТ – общий вид

(эффективная глубина – 850 в.э.)

- ✓ размеры 17•17•11 м³
- ✓ число счетчиков 3180
- ✓ размер счетчика - 70•70•30 см³



- ✓ сцинтиллятор $C_n H_{2n+2}$ ($n \approx 9$)
- ✓ полная масса сцинтиллятора 330 т (3180 счетчиков)
- ✓ три нижние горизонтальные слоя – 130 т, 1200 счетчиков

Стандартная модель коллапса

ε , erg	$\bar{E}_{\bar{\nu}_e}$, MeV	\bar{E}_{ν_e} , MeV	$\bar{E}_{\nu_{\mu,\tau}}$, MeV	τ , s
$(2-4) \cdot 10^{53}$	12-14	11	18-20	5-20

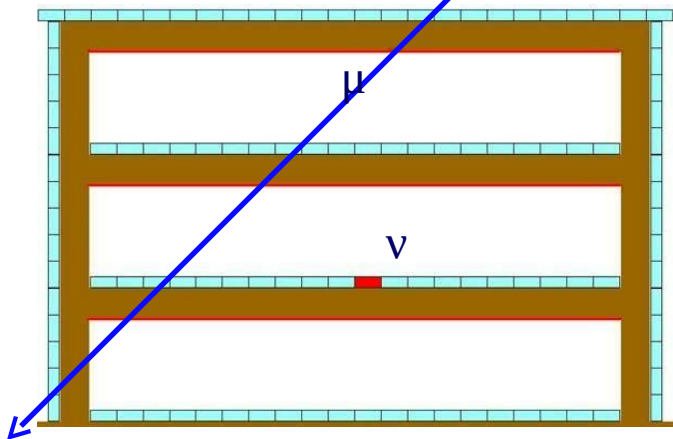
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+; \quad E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1,3 \text{ MeV}, \quad E_{e^+} \geq 8 \text{ MeV}$$

Поиск нейтринной вспышки на БПСТ

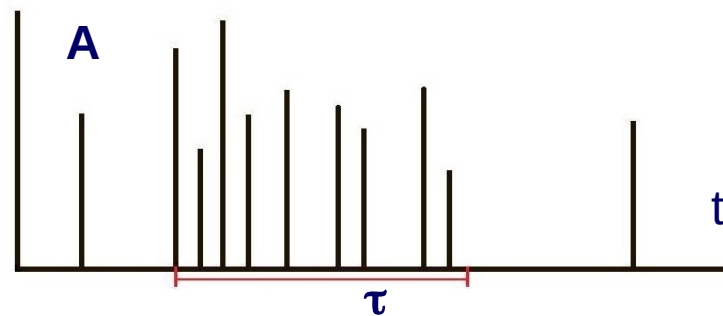
Радиационная длина для сцинтиллятора - 47 г/см²

если средняя энергия антинейтрино $\bar{E}_{\bar{\nu}_e} = 12-14 \text{ MeV}$ пробег e^+ будет заключен, как правило, в объеме одного счетчика.

нейтринное событие → срабатывание только одного счетчика
= “одиночное событие”



нейтринная вспышка – регистрация кластера одиночных событий во временном интервале τ .





Фоновые события (1)

- i) космогенные изотопы (^{12}B , ^{12}N , 8B , 8Li и т.п.)
- ii) мюоны КЛ, если сработал только один счетчик из 3180

Суммарная скорость счета фоновых событий

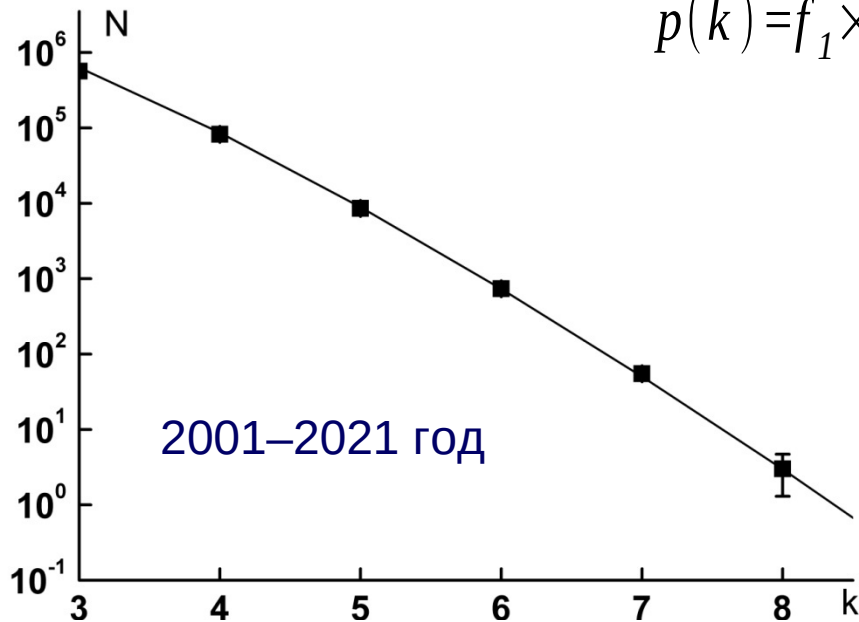
$f_1 = 0.02 \text{ с}^{-1}$ для 3-х нижних горизонтальных плоскостей
и $\approx 1.5 \text{ с}^{-1}$ для внешних плоскостей

В качестве мишени используются три нижние горизонтальные плоскости,
130 тонн сцинтиллятора (1200 счетчиков) – детектор D1

Фоновые события (2)

Фоновые события могут имитировать ожидаемый сигнал (k одиночных событий в интервале τ) со скоростью

$$p(k) = f_1 \times \exp(-f_1 \tau) \frac{(f_1 \tau)^{k-1}}{(k-1)!} \quad (1)$$



число событий	частота кластеров
$k = 6$	$\approx 1/10$ дней
$k = 7$	$\approx 1/152$ дней
$k = 8$	$\approx 1/7.27$ лет
$k = 9$	$\approx 1/145$ лет

Число кластеров с k одиночными событиями в D1 в интервале $\tau = 20$ с.
Кривая – ожидаемое распределение согласно (1)



Два независимых детектора

Чтобы увеличить число детектируемых нейтринных событий и надежность детектирования нейтринной вспышки мы используем те части внешних плоскостей, которые имеют относительно низкий темп счета фоновых событий (D2).

детектор D1 – 1200 счетчиков (130 тонн), 0.02 с^{-1} (8 МэВ)

детектор D2 – 1030 счетчиков (110 тонн), 0.12 с^{-1} (10 МэВ)

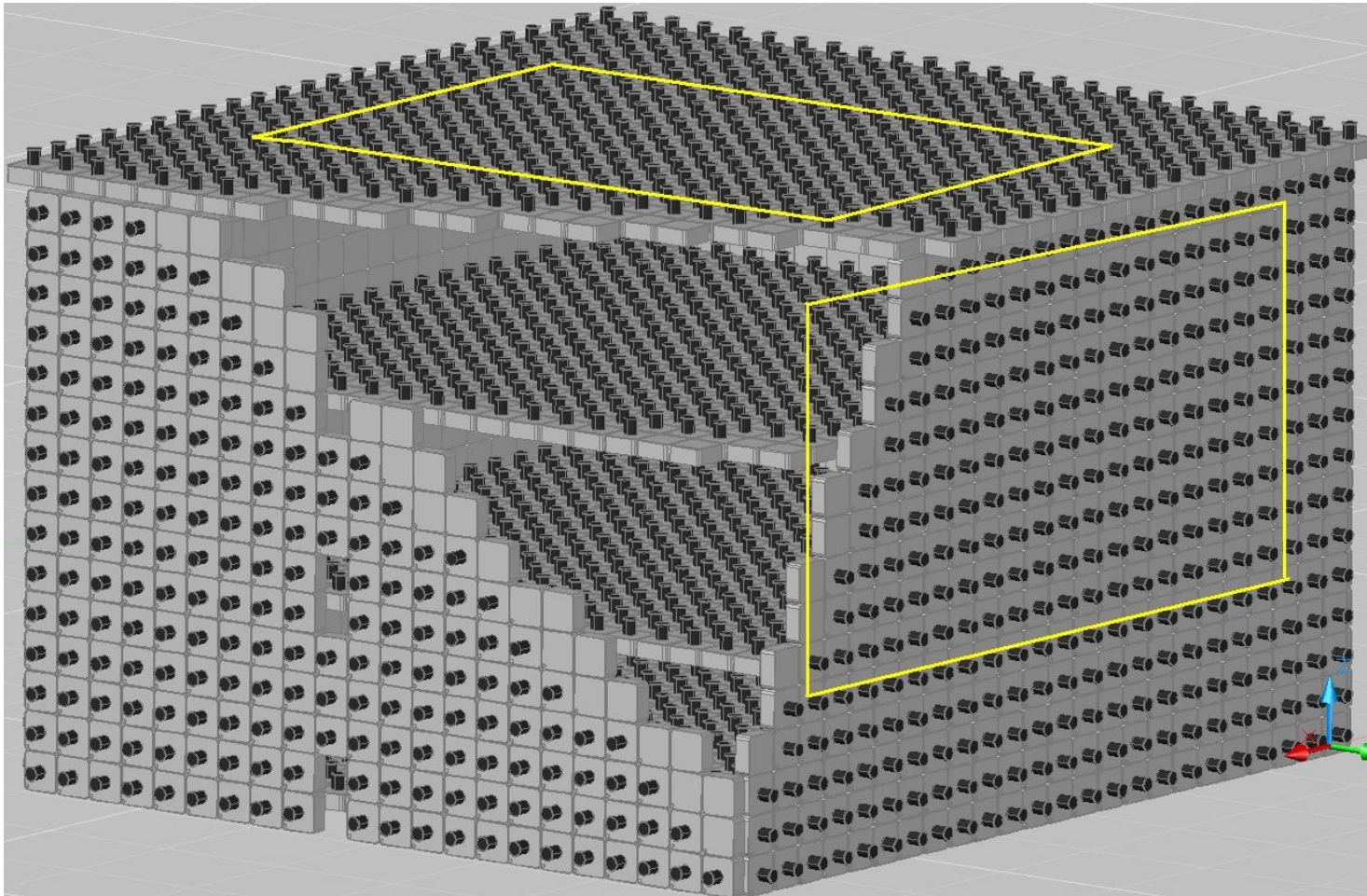
В случае регистрации кластера с $k_1 \geq 6$ в D1, проверяется число одиночных событий, k_2 , в 10-сек окне в D2.

$$P(k_1, k_2) = P_1(k_1) \times P_2(k_2)$$

$$F(6,5) = 0.23 \text{ год}^{-1}$$

$$F(6,6) = 0.045 \text{ год}^{-1}$$

Два независимых детектора



1,2,3,4,5 плоскости – 1980 счетчиков, 1.5 с^{-1}
D2 – 1030 счетчиков (110 тонн), 0.12 с^{-1}
6,7,8 плоскости, D1 – 1200 счетчиков (130 тонн), 0.02 с^{-1}



если расстояние до СН 10 кпс и

энергия, излученная в нейтрино, $E_{tot} = 3 \cdot 10^{53} \text{ erg}$ ($E_{\bar{\nu}_e} = (1/6) \cdot E_{tot}$)

$$(T_{\bar{\nu}_e} = 4.5 \text{ MeV})$$

$$N_{ev} = N_{ev}(D1) + N_{ev}(D2) \simeq 63$$

нет осцилляций

МСВ эффект, ($T_{\nu_x} = 6 \text{ МэВ}$)

$$N_{ev}(NH) \simeq 71$$

нормальная иерархия

$$N_{ev}(IH) \simeq 88$$

обратная иерархия



В случае очень близкой СН, например, на расстоянии 0.2 кпк, полное число событий от реакций ОБР будет $\approx 250\,000$.

В первые секунды (после отскока ядра), следует ожидать $\approx (20 - 30) \times 10^3$ событий в секунду.

В течение этого времени все события, регистрируемые БПСТ, (3180 счетчиков, масса мишени 330 тонн) будут нейтринными.

Время обработки события ≈ 1 мс, $\implies \approx 1000$ событий/сек

В случае очень близкой СН важную роль могут выполнить детекторы с малой массой

MicroBooNE (Ar/ν_e , 0.09), SBND (Ar/ν_e , 0.112)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В качестве мишени мы используем два массива счетчиков БПСТ (детекторы D1 и D2) с общей массой 240 тонн.
- Мы ожидаем ≈ 10 нейтринных событий от наиболее удаленных СН (≈ 25 кпк) в нашей Галактике.

За период с 30.06.1980. по 31.12.2022. время наблюдения составило 36.7 лет. За это время не было зарегистрировано ни одного события - кандидата на нейтринную вспышку.

Это приводит к значению верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов звезд в Галактике 0.063 год^{-1} на 90% уровне достоверности.



Kouvaris and Pradler (2017)

Pospelov et al. (2018)

Предложено использовать неизбежное существование высокоэнергетического компонента ТМ, генерируемого в результате столкновений с космическими лучами.

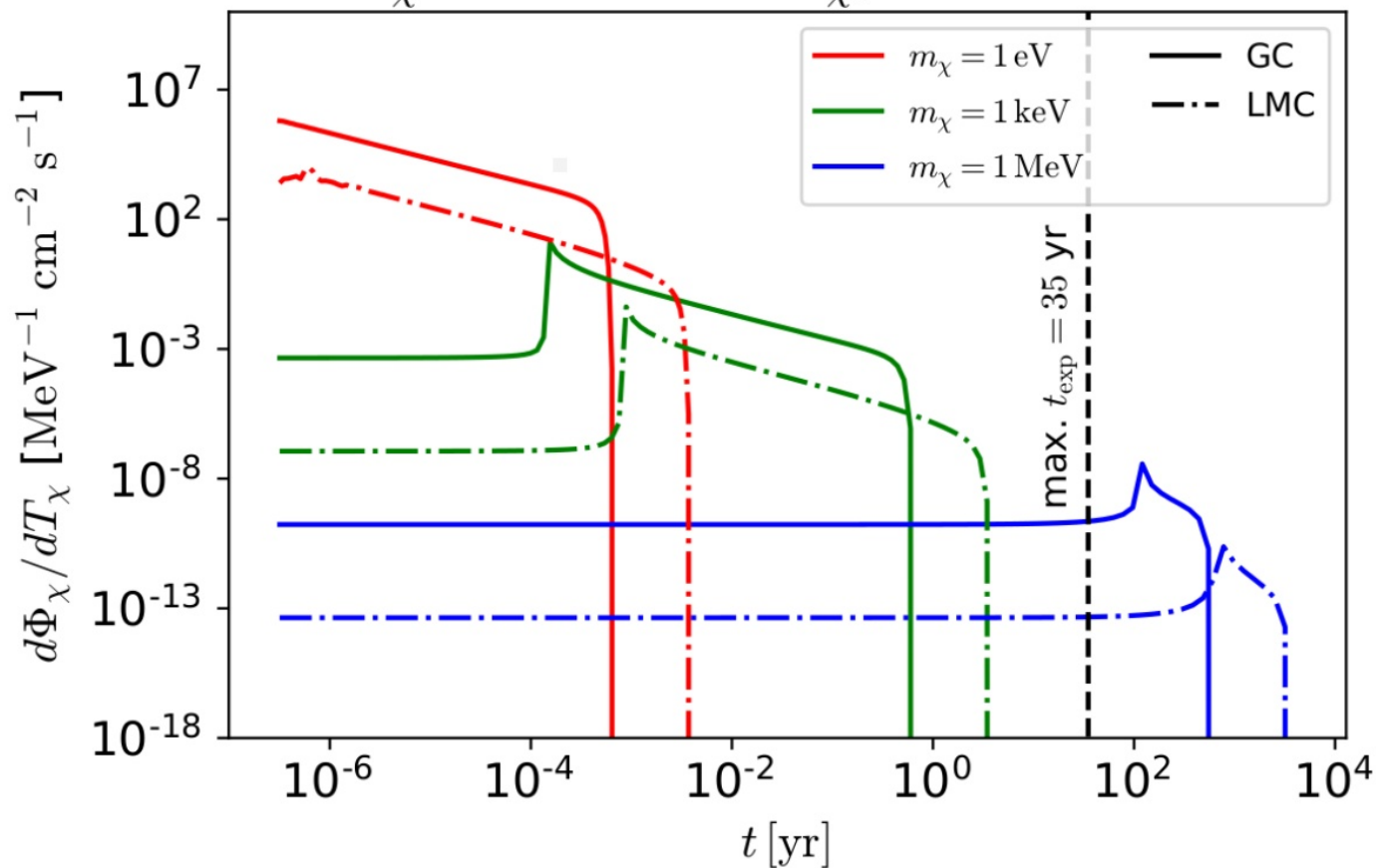
Yen-Hsun Lin et al. arXiv:2206.06864 [hep-ph]

Когда в галактике происходит взрыв сверхновой, частицы ТМ с массой 0 (МэВ) в гало могут быть разогнаны нейтрино до релятивистской скорости. Большинство ускоренных частиц ТМ прибывает на Землю с задержкой во времени, определяемой исключительно m_χ

$$\Delta t = 10 \text{ days} \times [R/(8 \text{ kpc})] \times [m_\chi / (10 \text{ keV})]^2 \times [T_\chi / (10 \text{ MeV})]^{-2}$$



$$T_\chi = 10 \text{ MeV and } \sigma_{\chi\nu} = 10^{-35} \text{ cm}^{-2}$$



Потоки ускоренной ТМ на Земле в зависимости от t и массы m_χ от СН в центре Галактики (GC) и SN1987 (LMC)

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**