

Методология поиска коррелированного сигнала от вспышки сверхновой по данным детекторов гравитационных волн и нейтринных обсерваторий

Громов М.Б.^{1,2}

от имени коллабораций
Borexino, LVD, IceCube, LIGO, VIRGO

¹НИИЯФ МГУ

²Физический факультет МГУ

ICSSNP'16
Дубна, ОИЯИ
15.04.2016

Мотивация

- 0) Открытие гравитационных волн (ГВ) в эксперименте LIGO
- 1) Регистрация ГВ - новый метод для изучения астрофизических объектов/явлений
- 2) Наблюдение за процессами путём регистрации разных типов излучений
 - Взаимодополняемость при исследовании конкретного объекта/явления
 - Уточнение свойств гравитационных волн и механизмов их генерации
 - Увеличение достоверности наблюдений и надёжности данных
 - Использование какого-либо излучения в качестве маркера, указывающего на конкретное астрофизическое явление
- 3) Сходные особые свойства нейтринного и гравитационно-волнового излучений
 - Пренебрежимо мало искажаются межзвёздной средой
 - Распространяются с практически одинаковой скоростью ($v = c$)

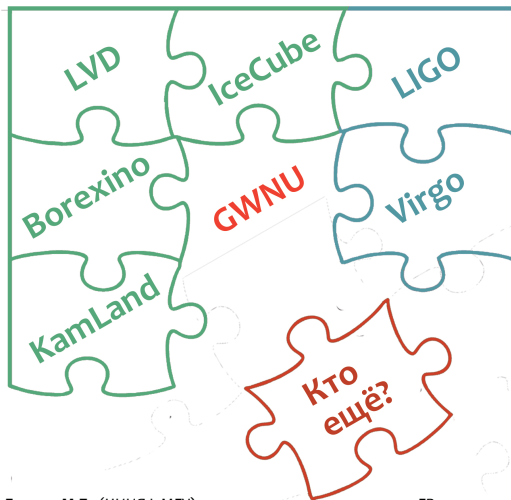
Возможность изучать процессы внутри плотных объектов

Основная цель:

**Поиск и исследование вспышек сверхновых
в Местной группе галактик**

Участники

GWNU - межколлорационная рабочая группа
по поиску корреляций в данных ГВ и ν экспериментов



Конец 2014

начало обмена данными,
разработки методологии
и анализа

Март - апрель 2016

KamLAND должен
присоединится к анализу
после одобрения MoU на
коллорационном
совещании

А кто ещё нужен? И зачем?

Очевидно, что чем больше детекторов, тем результаты надёжнее, и выше шанс зарегистрировать сверхновую. Однако есть некоторые требования:

1) Нужны **одновременно работающие и ν , и ГВ детекторы**

В минимальном приближении хватит одного нейтринного и двух гравитационно-волновых (для ГВ предпочтителен метод запаздывающих совпадений). Но отличный от 100% рабочий цикл детекторов и необходимость низкого уровня случайных совпадений требует дополнительных установок.

2) Больше детекторов - мягче критерии, больше информации

3) Потенциальное наличие **Безмолвных сверхновых**,

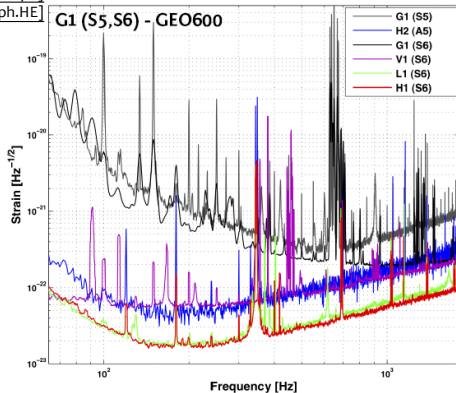
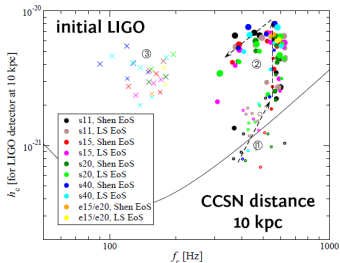
т.е. сверхновые не наблюдаемые в ряде диапазонов частот электромагнитных волн. В этой ситуации положение сверхновой на небе может быть долго неизвестно. Вопрос закрывается наличием 3 - 4 одновременно работающих ГВ детекторов (на основе метода триангуляции, по мотивам статьи [1]).

[1] Living Rev. Relativity 19 (2016), 1; arXiv:1304.0670v3 [gr-qc]

А кто ещё нужен? И зачем?

Слева: Class.Quant.Grav.26:063001,2009; arXiv:0809.0695v2 [astro-ph]

Справа: Phys. Rev. D 89, 122004 (2014); arXiv:1405.1053v2 [astro-ph.HE]

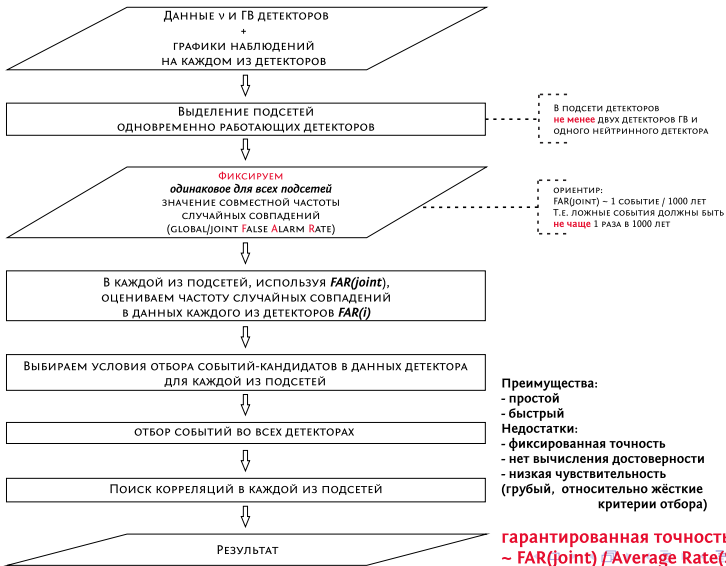


4) Широкополостные гравитационно-волновые телескопы

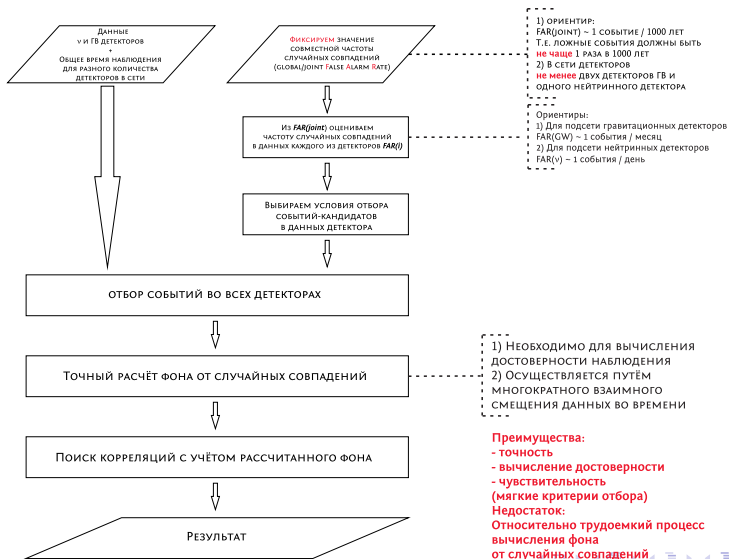
Кандидаты:

- **GEO600** Чувствительности должно хватить для наблюдения ГВ от сверхновых
- **KAGRA** Начнёт работать с 2018 года
- **aLIGO-H2 (LIGO-India)** Начнёт работать с 2022 года в лучшем случае

Стратегия модельно-независимого поиска. Вариант 1



Стратегия модельно-независимого поиска. Вариант 2



Совместная частота случайных совпадений

Частота случайных совпадений (False Alarm Rate, FAR) - это количество случайных флуктуаций фона выше порога детектирования сигнала от сверхновой в год.

Оценка FAR_{joint} - частоты случайных совпадений для сети детекторов:

$$FAR_{joint} = \prod_{i=1}^N FAR_i \times (2t_{coin})^{N-1} \quad (1)$$

Пример вычисления FAR_i (детектор Borexino)

- **Отбираем события** в заданном скользящем окне ($\Delta t \sim 2 - 10$ с), имеющие энергию выше заданной (4 – 10 МэВ). Требуем, чтобы событие не было ни мюоном, ни шумом. Сохраняем полное число разных событий и число событий в каждом динамическом окне.
- **Вычисляем средний уровень фона $\bar{B}$** , т.е. среднее количество отобранных событий в рассматриваемом окне. Для этого делим полное количество выбранных событий на рабочее время детектора.
- **Выбираем порог**
В общем случае в качестве порога thr выступает произведение желаемого отношения сигнал/шум на средний уровень фона. Результат округляется вверх и есть ничто иное как некоторое количество событий в заданном окне.

$$thr = \lceil \text{SNR} \times \bar{B} \rceil \quad (2)$$

Так как $\bar{B} \ll 1$, минимальный порог - одно событие в указанном интервале времени.

- **Вычисляем вероятность $\rho(thr)$** зарегистрировать в выбранном временном интервале количество случайных событий не меньше порога thr в год. Учитывая, что мы ищем наложение независимых случайных фоновых событий, среднее количество которых задаётся величиной $\bar{B} \ll 1$, считаем правомочным использовать распределение Пуассона $P(k)$.

Пример вычисления FAR_i (детектор Borexino)

$$\text{ПУАССОН: } P(k) = \frac{\bar{B}^k}{k!} e^{-\bar{B}}; \quad (3)$$

$$P(k \geq thr) = 1 - P(k < thr) = 1 - e^{-\bar{B}} \sum_{k=0}^{thr-1} \frac{\bar{B}^k}{k!}; \quad (4)$$

$$\rho(thr) = P(k \geq t) \times T; \quad (5)$$

$$T \equiv \frac{1 \text{ год}}{\Delta t}, \quad (6)$$

где 1 год = 365.25636 дней (земной сидерический год).

Вычисленное значение плотности вероятности $\rho(thr)$ и есть искомое значение частоты случайных совпадений FAR_i для детектора Borexino.

Что ещё нужно сделать?

Проверить методику на архивных данных - в процессе

Используются данные 2005-2014 годов

Моделирование. Зачем?

- Проверка методики и инструментов
- Функция эффективности поиска корреляций в зависимости от расстояния до сверхновой и количества детекторов в сети

Как?

Вставляем сгенерированные сигналы в реальные данные

Штраф: эффективность модельно-зависима

Трудности и ограничения

Трудности:

- Методики измерений на разных нейтринных детекторах различаются. В результате частота случайных совпадений вычисляется по разному, и зависит от разных физических величин
- Не все инструменты готовы для анализа (фильтры, МС генераторы/эмуляторы электроники)
- Какие модели можно считать опорными?

Физическое ограничение:

- **Коллапс должен быть асимметричным**

Какие модели можно считать опорными?

Нейтринное излучение

Идея для первого приближения:

воспроизведём SN1987A, взяв, например, основные параметры из анализа

G. Pagliaroli, F. Vissani, M.L. Costantini, A. Ianni

"Improved analysis of SN1987A antineutrino events", 2009 [2]

Другие предложения по опорным моделям:

1) Lawrence Livermore модель с параметрами близкими к характеристикам SN1987A.
Устоявшаяся опорная модель. Явно устарела

T. Totani, K. Sato, H.E. Dalhed, J.R. Wilson "Future Detection of Supernova Neutrino Burst and Explosion Mechanism", 1998 [3]

2) Консервативная (пессимистическая) оценка - минимальный нейтринный поток

L. Huedepohl, B. Mueller, H.-Th. Janka, A. Marek, G.G Raffelt "Neutrino Signal of Electron-Capture Supernovae from Core Collapse to Cooling", 2010 [4]

3) Оптимистическая оценка - значительный нейтринный поток + возрастающая энергия

K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki "Dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating failed supernovae. I. EOS dependence", 2007 [5]

[2] Astroparticle Physics 31 (2009) 163–176; arXiv:0810.0466v1 [astro-ph]

[3] Astrophys.J. 496 (1998) 216-225; arXiv:astro-ph/9710203v1

[4] Phys.Rev.Lett.104:251101,2010; Erratum-ibid.105:249901,2010; arXiv:0912.0260v3 [astro-ph.SR]

[5] Astrophys.J.667:382-394,2007; arXiv:0706.3762v1 [astro-ph]

Какие модели можно считать опорными?

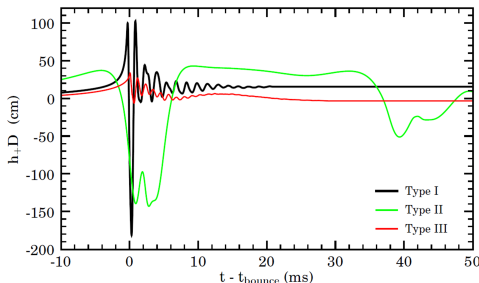
ГВ излучение

[6] Class.Quant.Grav.26:063001,2009; arXiv:0809.0695v2 [astro-ph]

[7] Astron.Astrophys. 388 (2002) 917-935; arXiv:astro-ph/0204288v1

Одна из наиболее развитых моделей генерации ГВ при вспышке сверхновой основывается на механизме коллапса вращающегося ядра (the rotating core collapse and core bounce mechanism). При коллапсе происходят быстрые изменяющиеся во времени квадрупольные деформации ядра звезды-прародителя, разделение его на сжимающееся внутреннее ядро и падающее внешнее. Масса внутреннего ядра в момент отскока определяет характеристики ГВ всплеска и начальный размер протонейтронной звезды.

"Последние" моделирования указывают, что скорее всего у ГВ сигнала форма первого типа. Подробности в [6,7]



$$\Delta E_{GW} = 10^{-10} - 10^{-4} M_{\odot}; \quad (7)$$

$$h_c \sim 2.7 \times 10^{-20} \left(\frac{\Delta E_{GW}}{M_{\odot} c^2} \right)^{1/2} \left(\frac{1 \text{ kHz}}{f_c} \right)^{1/2} \left(\frac{10 \text{ Mpc}}{r_0} \right). \quad (8)$$

В качестве заключения

Концентрация производства научных исследований
в очередной раз даёт нам возможность заглянуть
в глубины мироздания и попытаться их понять.
Давайте же не будем упускать эту возможность.

Присоединяйтесь к GWNУ сообществу!