

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА КОРРЕЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ОТ ВСПЫШКИ СВЕРХНОВОЙ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И НЕЙТРИННЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

*М. Б. Громов**

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Предлагается методика, разработанная усилиями коллабораций LIGO, Virgo, Borexino, IceCube и LVD, которая базируется на совместном анализе данных нейтринных и гравитационно-волновых детекторов, регистрирующих соответствующие излучения, практически не искаженные межзвездной средой и распространяющиеся с почти одинаковой скоростью. Такой подход к проблеме позволяет повысить достоверность наблюдений, зарегистрировать Безмолвные сверхновые и исследовать свойства и механизмы генерации гравитационных волн.

The proposed methodology, developed by LIGO, Virgo, Borexino, LVD, and IceCube collaborations, is based on a joint analysis of data of neutrino and gravitational wave detectors, which detect the respective radiations that are practically undistorted by the interstellar medium and propagate with almost the same speed. This approach to the problem allows one to increase the reliability of the observations, detect the so-called “Silent” supernovae, and explore the properties and generation mechanisms of gravitational waves.

PACS: 97.60.Bw; 95.55.Vj; 95.55.Ym; 29.40.Mc; 04.80.Nn; 29.85.Fj

Для раннего оповещения научного сообщества о вспышке сверхновой детекторы нейтрино уже более 10 лет объединены в систему SNEWS [6, 7]. Дальнейшим развитием идеи мультиканальных наблюдений стал совместный анализ данных нейтринных и гравитационно-волновых обсерваторий, актуальность которого сильно выросла после первого прямого детектирования гравитационных волн установками LIGO [2].

*E-mail: gromov@physics.msu.ru

Совместный анализ имеет ряд преимуществ. Во-первых, оба типа излучения имеют сходные свойства: они пренебрежимо мало искажаются межзвездной средой и распространяются с практически одинаковой скоростью, равной скорости света. Таким образом, гравитационные волны и нейтрино в своих характеристиках несут фактически неизменную информацию о процессах, происходящих внутри массивных звезд на последних стадиях их эволюции. Одновременность же прихода сигналов обеспечивает четкую идентификацию типа астрофизического события, при этом нейтринное излучение выступает в качестве маркера. Во-вторых, регистрация гравитационных волн является принципиально новым методом изучения сверхновых. В-третьих, оба типа излучения возникают в ходе единой цепи взаимосвязанных физических процессов и, следовательно, полученные данные взаимодополняют друг друга. В-четвертых, совместный анализ позволяет уточнить свойства гравитационных волн и механизмы их генерации. В-пятых, тот же совместный анализ значительно расширяет область наблюдений и потенциально может позволить наблюдать вспышки сверхновых во всей Местной группе галактик.

В 2014 г. была организована межколлекторная рабочая группа GWNU по поиску корреляций в данных детекторов гравитационных волн и нейтрино в составе коллабораций: LIGO, Virgo, IceCube, Borexino, LVD. В апреле 2016 г. к этой группе присоединился KamLAND. Дальнейшее вовлечение других экспериментов крайне желательно, так как увеличивается шанс наблюдения сверхновой, при этом уменьшается вероятность одновременных случайных наложений сигналов, и появляется возможность смягчить критерии отбора событий с помощью увеличения чувствительности всей сети и расширения диапазона значений параметров поиска.

Для исследования сверхновых в галактике Млечный Путь используемые детекторы должны быть способны измерять гравитационные волны с амплитудой 10^{-21} – 10^{-20} Гц $^{-1/2}$ и иметь полосу регистрируемых частот от 10 до 10^3 Гц [1,5]. Предпочтительно иметь минимум два гравитационных детектора [2], работающих в режиме запаздывающих совпадений, что, в свою очередь, сильно понижает уровень фона. Все гравитационные детекторы должны быть разнесены на сотни или тысячи километров, чтобы уменьшить влияние локальных источников шумов. При трех и более одновременно работающих гравитационно-волновых установках становится возможным восстанавливать положение источника излучения на небе с помощью метода триангуляции [4]. Это важно для исследования Безмолвных сверхновых, так как они частично или полностью не наблюдаются с помощью телескопов, регистрирующих электромагнитное излучение, из-за того, что скрыты за ядром галактики или областями плотных пылевых облаков.

Для поиска корреляций выбирают одну из двух стратегий. Их блок-схемы представлены на рис. 1 и 2. Они строятся исходя из принципа максимальной модельной независимости. Каждая из стратегий есть консенсус между точ-

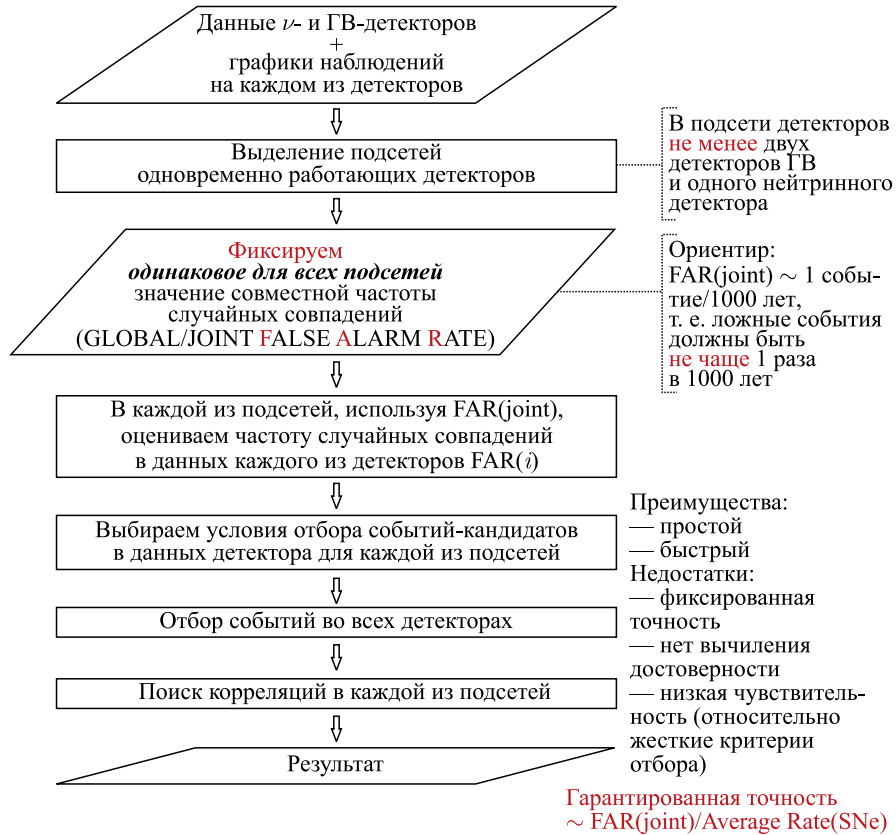


Рис. 1. Стратегия модельно-независимого поиска (вариант 1)

ностью получаемого результата и вычислительными затратами. Точность же определяется уровнем случайных совпадений, которые возникают как в каждом отдельном детекторе, так и между детекторами. Соответственно, вводят понятие частоты случайных совпадений или False Alarm Rate (FAR, R). При анализе данных конкретного детектора частота случайных совпадений есть количество случайных наложений фона выше порога регистрации полезного сигнала в заданном интервале времени. Для оценки стохастических корреляций фона между детекторами вычисляется совместная частота случайных совпадений $R_{\text{совм}}$, определяемая следующей формулой:

$$R_{\text{совм}} = \prod_{i=1}^N R_i (2t_{\text{совп}})^{N-1}, \quad (1)$$

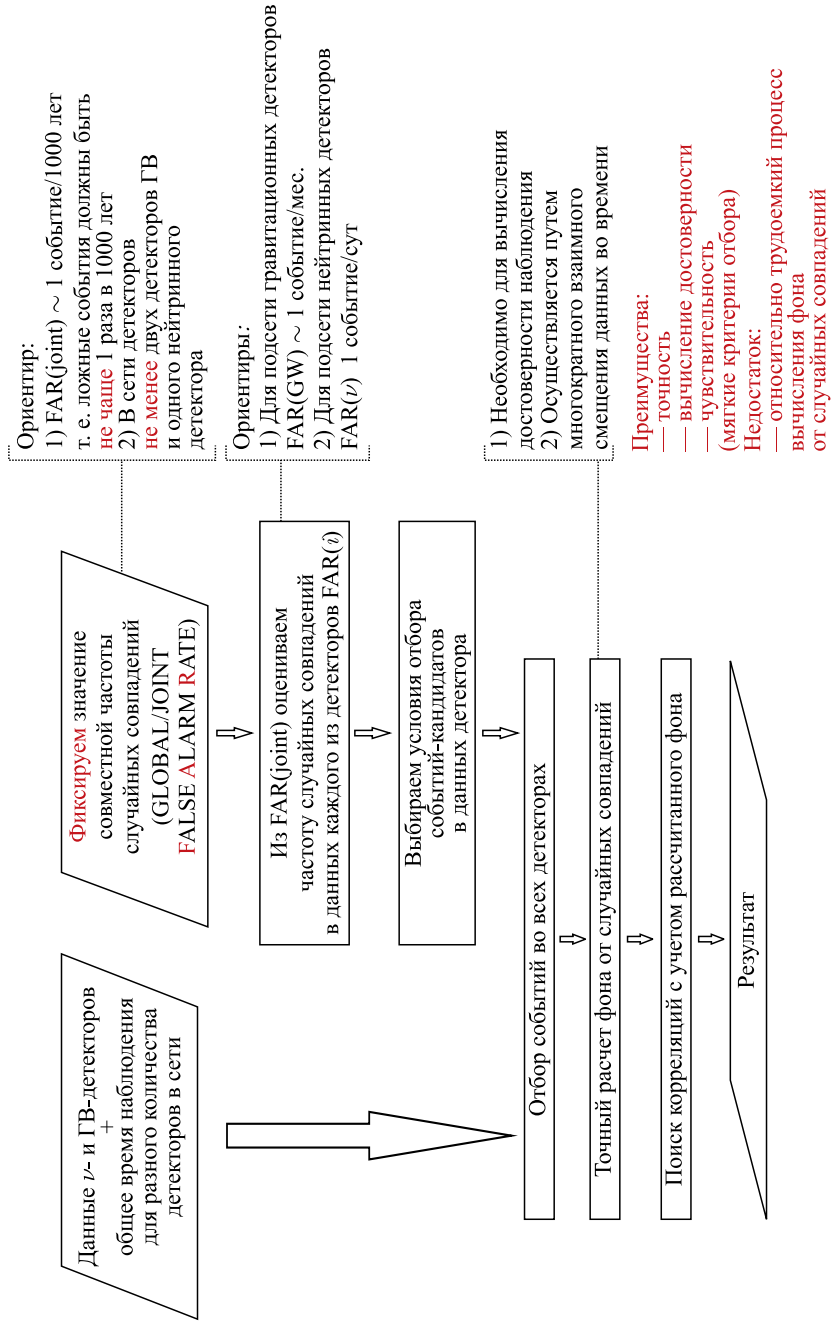


Рис. 2. Стратегия модельно-независимого поиска (вариант 2)

где R_i — частота случайных совпадений в i -м детекторе; $t_{\text{совп}}$ — временной интервал, в котором происходят совпадения нейтринного и гравитационно-волнового сигналов. Множитель 2 перед $t_{\text{совп}}$ возникает, так как предварительно неизвестно, какое из двух излучений раньше достигло наблюдателя.

На рис. 1 дана очень простая методика поиска корреляций. Для любого набора детекторов, называемого подсетью, совместная частота случайных совпадений фиксируется один раз и больше не меняется в ходе анализа. Таким образом, уровень точности задан *a priori* из тех или иных общих соображений. Недостатками методики являются получение результата с явно завышенной погрешностью и искусственное понижение чувствительности сети. Зато данная стратегия требует малых вычислительных ресурсов, она быстрая и допускает улучшение результатов путем варьирования фиксированной точности и повторного анализа.

На рис. 2 представлена усложненная по сравнению с первой методика, в рамках которой совместная частота случайных совпадений фиксируется также один раз, но сразу для всей рассматриваемой сети, и служит лишь как ориентир при выборе критериев отбора событий. Далее аккуратно рассчитывается фон.

Выбор условий отбора происходит итерационно. На первом шаге из совместной частоты случайных совпадений на основе формулы (1) и количества нейтринных и гравитационно-волновых детекторов в сети оценивается для каждой из установок ориентировочная частота случайных совпадений R_i . Затем выбираются и применяются первичные критерии отбора. После полученный набор событий сортируется, причем выделяются всевозможные события или группы (кластеры) событий и вычисляется для них по определенной процедуре частота случайных совпадений R_{ji}^k , где j — номер события или кластера, i — номер детектора, а k — шаг итерационного процесса. Сравнивая R_i и R_{ji}^k , можно сделать выводы о дальнейшей подстройке критериев отбора. Подробные описания стандартных процедур отбора событий и вычисления R_{ji}^k для гравитационно-волновых детекторов можно найти в [4, 8, 9], а для нейтринных детекторов — в [3] и [10].

Как только набор критериев отбора фиксируется, уровень фона оценивается путем многократного ($\sim 10\,000$ раз) поиска корреляций в данных, которые каждый раз смещаются во времени друг относительно друга, причем величина этого временного сдвига минимум на порядок должна быть больше заданного интервала совпадений $t_{\text{совп}}$ нейтринного и гравитационно-волнового сигналов.

Вся методика поиска корреляций проверяется на архивных данных, собранных в период с 2005 по 2014 г. Также для проверки методики и оценки эффективности поиска выполняется моделирование сигналов в детекторах от вспышек сверхновых. Результаты моделирования вставляются в реальные данные, а затем осуществляется анализ. Для лучшего понимания возможно-

стей новой методики поиска и наблюдения всплеск сверхновых планируется получить графики зависимости эффективности от расстояния до сверхновой и от количества установок в сети наблюдения. Однако эффективность модельно-зависима, так что ее можно рассматривать лишь как оценку или ориентир, но не как строгий результат.

Моделирование требует выбора каких-либо опорных теорий. Для описания нейтринного излучения решено было использовать следующие идеи и модели. Во-первых, воспроизвести всплеску сверхновой SN1987A, взяв основные параметры и процедуру вычисления потока нейтрино из анализа [11]. Во-вторых, рассмотреть Lawrence Livermore модель [12] с параметрами, близкими к характеристикам SN1987A. Это устоявшаяся опорная модель, хотя и явно устаревшая. В-третьих, получить результаты для консервативной (пессимистической) модели [13], которая предсказывает минимальный нейтринный поток. И, в-четвертых, использовать оптимистическую модель [14], дающую значительный нейтринный поток и возрастающую со временем энергию. Для описания возникновения гравитационных волн будет выбрано несколько моделей, указанных в [1].

В заключение стоит отметить, что выдвинутая методология поиска и исследования всплеск сверхновых достаточно проста, но качество результатов сильно зависит от количества детекторов, участвующих в совместном анализе, и продолжительности их одновременной работы. Поэтому расширение сети детекторов есть ключ к успеху в изучении сверхновых и гравитационных волн.

Благодарности. Автор выражает благодарность организаторам конференции за интересное и хорошо организованное мероприятие и возможность выступить на нем. Он также признателен своему научному руководителю Александру Сергеевичу Чепурнову (НИИЯФ МГУ) и коллегам по межколлекторной рабочей группе GWNУ, а именно: Lutz Koeperke (Майнцский университет), Erik Katsavounidis (MIT), Giulia Pagliaroli (INFN LNGS), Viviana Fafone (Università di Roma Tor Vergata и INFN), Virginia Re (Università di Roma Tor Vergata и INFN), Christian Ott (Caltech), Gemma Testera (INFN, Генуя), Carlo Vigorito (INFN, Турин), Walter Fulgione (INFN, Турин), Kate Scholberg (Университет Дьюка) и в особенности Claudio Casentini (Università di Roma Tor Vergata и INFN).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ott C. D.* The Gravitational Wave Signature of Core-Collapse Supernovae // *Class. Quant. Grav.* 2009. V. 62.
2. *Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.).* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116, No. 6. P. 061102.

3. *Agafonova N. Y. et al. (LVD Collab.)*. Implication for the Core-Collapse Supernova Rate from 21 Years of Data of the Large Volume Detector // *Astrophys. J.* 2015. V. 802, No. 1. P. 47; arXiv:1411.1709v2.
4. *Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.)*. Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo // *Living Rev. Relativ.* 2016. V. 19. P. 1; arXiv:1304.0670v3.
5. *Aasi J. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.)*. Methods and Results of a Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Using the GEO600, LIGO, and Virgo Detectors // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 122004; arXiv:1405.1053v2.
6. *Antonoli P. et al.* SNEWS: The SuperNova Early Warning System // *New J. Phys.* 2004. V. 6. P. 114; arXiv:astro-ph/0406214v2.
7. *Scholberg K.* The SuperNova Early Warning System // *Astron. Nachr.* 2008. V. 329, No. 3. P. 337–339; arXiv:0803.0531v1.
8. *Sutton P. J.* Upper Limits from Counting Experiments with Multiple Pipelines // *Class. Quant. Grav.* 2009. V. 26, No. 24. P. 245007; arXiv:0905.4089v2.
9. *Klimenko S. et al.* A Coherent Method for Detection of Gravitational Wave Bursts // *Class. Quant. Grav.* 2008. V. 25, No. 11. P. 114029; arXiv:0802.3232v2.
10. *Fulgione W., Mengotti-Silva N., Panaro L.* Neutrino Burst Identification in Underground Detectors // *Nucl. Instr. Meth.* 1996. V. 368, No. 2. P. 512–516.
11. *Pagliaroli G. et al.* Improved Analysis of SN1987A Antineutrino Events // *Astropart. Phys.* 2009. V. 31, No. 3. P. 163–176; arXiv:0810.0466v1.
12. *Totani T. et al.* Future Detection of Supernova Neutrino Burst and Explosion Mechanism // *Astrophys. J.* 1998. V. 496, No. 1. P. 216–225; arXiv:astro-ph/9710203v1.
13. *Hüdepohl L. et al.* Neutrino Signal of Electron-Capture Supernovae from Core Collapse to Cooling // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104, No. 25. P. 251101; Erratum // *Ibid.* V. 105, No. 24. P. 249901; arXiv:0912.0260v3.
14. *Sumiyoshi K., Yamada S., Suzuki H.* Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Non-Rotating Failed Supernovae. I. EOS Dependence // *Astrophys. J.* 2007. V. 667, No. 1. P. 382–394; arXiv:0706.3762v1.