

Нейтринный детектор Borexino в эру многоканальной астрономии

М. Б. Громов^{1,2*} А. С. Чепурнов^{1†}

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцины
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

(Статья поступила 30.06.2019; Подписана в печать 08.08.2019)

Рассматриваются возможности использования нейтринного детектора Borexino для многоканальных астрономических наблюдений и астрофизических исследований. Описывается участие коллаборации Borexino в рамках совместного анализа данных нейтринных и гравитационно-волновых детекторов GWNU. Дается краткий обзор текущего применения и перспектива дальнейшего использования детектора в рамках системы раннего оповещения о вспышках сверхновых SNEWS. Обсуждаются общие проблемы и возможности объединения детекторов разных излучений в рамках единой сети наблюдения.

PACS: 97.60.Bw, 95.55.Vj, 95.55.Ym, 29.40.Mc, 04.80.Nn.

УДК: 539.123, 524.352.

Ключевые слова: нейтрино, Borexino, гравитационные волны, GWNU, SNEWS, многоканальная астрономия, сверхновые звезды

ВВЕДЕНИЕ

Borexino — это жидко-сцинтилляционный детектор нейтрино, работающий в режиме реального времени [1]. Он расположен под скальным массивом в Национальной лаборатории Гран-Сассо (сокр. LNGS) в Италии. Скалы обеспечивают экранировку от компонентов космических лучей, равную 3800 мвэ, а многослойная защита и материалы с рекордной радиохимической чистотой позволяют регистрировать нейтринные взаимодействия, характеризующиеся малыми сечениями $\sim 10^{-43}$ см². Детектирование нейтрино и антинейтрино возможно в широком энергетическом диапазоне с минимальной энергией 200 кэВ и максимальной ~ 50 МэВ. Основные реакции, используемые для регистрации нейтрино, — это упругое рассеяние нейтрино на электронах мишени и обратный β -распад (ОБР) [2]. Главная задача эксперимента Borexino — спектроскопия солнечных нейтрино. В этом направлении были достигнуты существенные результаты [3, 4]. Но на детекторе активно исследуются и другие редкие процессы [5–8], в том числе и гео-нейтринное излучение из недр Земли [9]. В случае вспышки сверхновой благодаря энергии нейтрино порядка нескольких десятков МэВ есть возможность регистрировать частицы по упругому рассеянию на протонах и через реакции на изотопах углерода [2]. По современным меркам мишень у детектора Borexino небольшая. Её масса равна 278 т. В такой мишени при вспышке сверхновой аналогичной SN1987A [10–14] на расстоянии 10 кпк будет

зарегистрировано около 50 антинейтрино через реакцию ОБР. Несмотря на малую массу мишени, детектор имеет крайне низкий уровень фона и великолепное соотношение сигнал/шум, которое в случае ОБР достигает 100 [9]. Учитывая, что эксперимент набирает данные уже 12 лет, и запланировано его функционирование минимум ещё на два года, перспективно использование детектора как для совместного анализа с другими установками как по уже набранному данным, так и для многоканальной астрономии в режиме реального времени.

1. BOREXINO — ЧЛЕН МЕЖКОЛЛАБОРАЦИОННОЙ ГРУППЫ SNEWS

Первой системой многоканальных наблюдений с помощью детекторов разных излучений стала система раннего оповещения о вспышках сверхновых SNEWS [15, 16], которая призвана по совместно регистрируемому нейтринному сигналу от сверхновых оповестить оптические и другие обсерватории, регистрирующие как электромагнитные волны, так и нейтрино, о начале этого редкого астрономического события. Организованная в 1998–1999 гг., SNEWS на 2019 г. включает 7 детекторов, а именно Super-Kamiokande, LVD, IceCube, KamLAND, Borexino, Daya Bay и HALO. В целом такая сеть детекторов позволяет выявлять сверхновые в пределах подгруппы Млечного Пути Местной группы галактик, т.е. не далее, чем в 200 кпк в лучшем случае.

Эксперимент Borexino участвует в SNEWS с 2009 г. [17]. В нём было реализовано два программных модуля для системы SNEWS: Echidna Online supernova monitor (bx_snews) и Princeton supernova monitor. Оба функционируют в режиме реального времени. Первый модуль имеет следующую логику работы. Ищутся последовательности единич-

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

†E-mail: aschepurnov@yandex.ru

ных событий с кратностью, т.е. в количестве, не меньше 15 в окне 30 с. События с энергией меньше 500 кэВ, мюоны и нейтроны отсеиваются. Если искомая последовательность найдена, то она записывается на диск и пересылается на сервер. У второго модуля логика работы иная. Ищутся последовательности взаимодействий в мишени через реакцию ОБР. Для этого отбираются события в энергетическом окне около 2.22 МэВ, которые потенциально соответствуют моноэнергетической γ -линии от захвата нейтрона на ядре водорода 1H. Временное окно отбора — 10 с. При этом кратность должна быть не меньше 6, а разница во времени между первым и последним событиями во всплеске больше 2 мс. Последнее условие обеспечивает исключение из рассмотрения космогенных нейтронов.

У текущих модулей SNEWS детектора Bogexino есть ряд недостатков. В первую очередь нет никакой информации о достоверности найденных событий. Фактически, на центральный сервер SNEWS посылается информация о том, что какой-то всплеск событий наблюдается в детекторе Bogexino в конкретный момент времени. Подобные сообщения от детекторов-участников позволяют на верхнем уровне SNEWS выполнять лишь простейшее комбинирование сигналов, состоящее в подсчёте количества сообщений от детекторов за определённый промежуток времени. С другой стороны, возникновение искоемых последовательностей событий в детекторе Bogexino само по себе является сильным указанием на наличие вспышки сверхновой, так как вероятность подобной последовательности из-за случайных наложений фонов близка к нулю. Этот факт является следствием жёстких критериев отбора, которые нацелены на минимизацию сомнений относительно полученного результата, т.е. на консервативность отбора. Оба суждения о недостатках не противоречат, а дополняют друг друга. Это легко объясняется текущей философией построения SNEWS. Не стоит задача найти абсолютно все вспышки сверхновых в Млечном Пути или его подгруппе галактик. Важно не пропустить начало явной вспышки, которую легко пронаблюдать с помощью других инструментов в разных диапазонах электромагнитных волн. Переход к более аккуратному поиску сверхновых как на уровне отдельных детекторов типа Bogexino, так и на уровне всей сети SNEWS — следующий шаг в развитии многоканальных наблюдений в данном подходе.

2. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НЕЙТРИННЫХ И ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ GWNУ

Открытие в 2015 г. гравитационных волн [18] — это открытие нового и принципиально отличающегося от электромагнитного и нейтринного излучения источника информации об астрофизических объектах и явлениях. Фактически, это начало новой эры в многоканальной астрономии. При этом можно не только на-

блюдать гравитационно-волновые сигналы от процессов, которые точно их создают, но искать гравитационные волны в ситуациях, когда, согласно современным теоретическим представлениям, они должны излучаться. Один из таких процессов — вспышка сверхновой [19]. Хотя ожидаемое гравитационное излучение должно породить слабый и практически неотличимый от шума сигнал в детекторах, имеющий к тому же неопределённые параметры, однако, использование информации с нейтринных обсерваторий для уменьшения уровня фона, потенциально может позволить зарегистрировать гравитационные волны от сверхновой. Исследования в данном направлении проводятся в рамках межколлекторной группы GWNУ [20, 21]. В неё входят 4 нейтринных эксперимента (LVD, IceCube, KamLAND, Bogexino) и две гравитационно-волновые обсерватории (LIGO and VIRGO). В процессе присоединения ещё два нейтринных эксперимента: NO ν A и JUNO.

Исследования делятся на несколько направлений. Это теоретическое обоснование и методологические разработки, моделирование для оценки чувствительности сети детекторов в разных конфигурациях, анализ уже набранных (архивных) данных и анализ в режиме реального времени. Особенностью анализа является поиск модельно-независимых сигналов от сверхновой с низким уровнем достоверности. Для иллюстрации данного утверждения и обоснования его перспективности необходимо формализовать само понятие достоверности. На текущий момент используется частота случайных совпадений R (от False Alarm Rate или Imitation Frequency) [21, 22]. 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 в сети наблюдения вычисляется совместная частота случайных совпадений $R_{\text{совм}}$, определяемая следующей формулой:

$$R_{\text{совм}} = \prod_{t=1}^N R_i \times (2t_{\text{совм}})^{N-1},$$

где R_i — частота случайных совпадений в i -ом детекторе, $t_{\text{совм}}$ — временной интервал, в котором происходит совпадение нейтринного и гравитационно-волнового сигналов. Множитель «2» перед $t_{\text{совм}}$ возникает, так как предварительно неизвестно, какое из двух излучений раньше достигло наблюдателя.

Частота случайных совпадений использовалась как критерий достоверности всплесков в статьях LVD о поиске сигналов от всплесков сверхновых [23, 24]. Пороговое значение было равно 1 всплеск в 100 лет [24]. Если рассмотреть сеть детекторов, состоящую из трех одинаковых нейтринных детекторов и одного гравитационно-волнового, и потребовать пороговый уровень $t_{\text{совм}}$ в 10 раз меньший, чем применялся в исследованиях LVD, т.е. 1 всплеск в 1000 лет, то такое

условие будет удовлетворено при пороговом значении частоты для гравитационно-волновой обсерватории 1 всплеск в месяц, и пороговом уровне для нейтринных детекторов 1 всплеск в 10 мин.

Используя результаты приведённого примера в случае *Bogexino*, для совместного анализа подойдут любые всплески во временных окнах порядка десятка секунд, состоящие из не шумовых и не космогенных событий и имеющие кратностью 2 и больше. Для отбора всплесков в данных детектора *Bogexino* в рамках совместного анализа применяется методика, разработанная в эксперименте *LVD* [23]. При этом события отбираются в 20 с временных окнах со сдвигом начала одного окна относительно начала другого в 10 с.

Каждый всплеск событий характеризуется рядом параметров: кратность, GPS время начала окна, частота случайных совпадений, фактическая длительность, измеренная как время между первым и последним событием, энергии отдельных событий, их относительные времена и т. д. Набор параметров может различаться для разных типов детекторов, но для установок одного класса, например, для *LVD*, *KamLAND* и *Bogexino*, список параметров единый. Со временем он постепенно расширяется в связи с развитием методологии анализа. В этой связи стоит отметить опубликованную статью *GWNU* группы в 2018 г. статью [25]. В ней предлагается дополнительный параметр для детекторов типа *Bogexino*, позволяющей с одной стороны в разы уменьшить вероятность нахождения ложного всплеска без снижения эффективности, а с другой стороны открывает путь к грубым оценкам расстояний до потенциальных источников нейтрино. Параметр ξ есть отношение кратности всплеска к его фактической длительности.

Измерения с применением сети детекторов имеют ещё одно преимущество перед измерениями на отдельных установках. Так как наблюдения проводятся в разных точках Земли, то между регистрируемыми всплесками в случае вспышки сверхновой должны быть временные задержки. По этим задержкам можно восстановить положение источника излучения на небе. При этом чем больше детекторов будет в сети, тем точнее будет восстановление координат. Подобная возможность рассмотрена в статьях [26, 27].

Таким образом, в результате совместного анализа данных нейтринных и гравитационно-волновых детекторов возможно не только зафиксировать сигнал от вспышки сверхновой, но и потенциально указать область пространства, в которой должно было произойти это явление. Последний факт важен для оперативного оповещения других обсерваторий с целью всеобъемлющего наблюдения и изучения феномена.

3. ДРУГИЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЯ И ОПОВЕЩЕНИЯ: AMON, PRE-SN, GCN, LIGO/VIRGO PUBLIC ALERTS

Многоканальные наблюдения организуются на базе разных сетей и систем оповещения. Ниже приводится краткое описание основных сетей, не упомянутых ранее.

AMON (*Astrophysical Multimessenger Observatory Network*) [28–30] — сеть наблюдения и оповещения, подобная в своём построении сети *GWNU*, но ориентированная на высокие энергии и более широкий спектр детектируемых излучений — γ -кванты, нейтрино, космические лучи, гравитационные волны. Эксперименты в сети *AMON* могут либо сами участвовать в поиске корреляций, либо принимать сообщения от *AMON* и проводить наблюдения/проверку данных, либо делать и первое, и второе.

Pre-SN [31] — специальная система сверххранного оповещения о возможной вспышке сверхновой, разработанная коллаборацией *KamLAND*. Идея, положенная в основу, состоит в наличие интенсивного нейтринного излучения на последних стадиях горения массивных звёзд ($M > 8M_{\text{солн}}$). Хотя нейтринная светимость таких звёзд на несколько порядков ниже, чем при вспышке сверхновой, но в нейтринных детекторах большого объёма от звёзд, удалённых не более чем на ~ 1 кпк, можно ожидать сигналы. В *KamLAND* для выработки сигнала оповещения осуществляется поиск превышения количества антинейтрино над фоном в 48-часовом окне в режиме реального времени. В качестве оценки фона берётся его среднее значение за последние три месяца. В связи с малой энергией излучаемых массивной звездой нейтрино (< 2 МэВ) только радиохимически сверхчистые сцинтилляционные детекторы, *KamLAND* и *Bogexino*, могут их зарегистрировать. Однако мишень *Bogexino* почти в 4 раза меньше по массе мишени *KamLAND*, поэтому количество наблюдаемых событий в *Bogexino* будет не более нескольких штук, и создание подобной системы оповещения не имеет смысла. Оповещение *Pre-SN* от детектора *KamLAND* доступно публично по подписке [32].

GCN [33] — изначально платформа для оповещения наземных детекторов электромагнитного излучения о наблюдаемых космическими гамма-телескопами астрономических явлениях, например, о гамма-всплесках. В настоящее время используется значительно шире, собирая и передавая сообщения о различных астрономических наблюдениях разными детекторами и обсерваториями. Платформа позволяет также анализировать присылаемые сообщения с целью поиска временных и пространственных совпадений. Но данный инструмент фактически применяется только для сети космических гамма-телескопов.

LIGO/Virgo Public Alerts [34] — публичная система оповещения о событиях, зарегистрированных сетью гравитационно-волновых детекторов *LIGO/Virgo*. Система работает в режиме с малой задержкой. Первич-

ное оповещение посылается через 1–10 мин после регистрации события-кандидата. Далее посылаются обновления после предварительного анализа в течение первых суток и после более аккуратного и детального анализа в течение недели. Рассылка идёт через сеть GCN, и оповещение включает лишь события-кандидаты с высокой значимостью. События с низкой значимостью могут рассылаться в режиме реального времени или с малой задержкой в рамках анализов, выполняемых группами GWNU и AMON.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. НА ПУТИ К SNEWS 2.0

Система SNEWS создавалась в конце 90-х годов XX века. Устроенная очень просто, она имела ряд недостатков, некоторые из которых были отмечены в этой статье. Начиная с 2009 г. возникло несколько межколлекторных групп, нацеленных на многоканальные измерения. Цели, задачи и применяемые методы некоторых таких групп, например, GWNU, очень близки к целям, задачам и методам SNEWS. Начи-

ная с 2017 г. внутри GWNU, SNEWS и, вероятно, других групп идёт обсуждение о возможности обновления системы SNEWS и слияния её с другими системами, в частности, с GWNU. С точки зрения детектора Borexino, было бы крайне желательным создание нового модуля SNEWS с использованием метода отбора всплесков, предложенного LVD и реализуемого для Borexino группой GWNU в совместном анализе архивных данных. Также важно вычислять для всплесков достоверность, а на уровне сети наблюдения и/или оповещения комбинировать сигналы с разных установок с учётом их достоверности. Стоит отметить, что комбинирование с использованием совместной частоты случайных совпадений не является оптимальным, и переход к другим методам может быть осуществлён в ближайшие годы.

В работе умышленно не затронут вопрос анализа данных в случае детектирования сверхновой. Эта тема достаточно широкая, местами плохо разработанная и требующая особого внимания. Она достойна отдельной статьи или даже монографии.

-
- [1] *Alimonti G. et al. (The Borexino collaboration)*. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso. NIMPA. 2009. **600**, N 3. P.568. (Preprint 0806.2400v1).
- [2] *Громов М.Б.* Регистрация нейтрино с энергиями от 1 до 50 МэВ с помощью детектора Borexino. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.16. М., 2017. 173 с.
- [3] *Bellini G. et al. (The Borexino collaboration)*. // Nature. 2018. **562** (7728). P. 505.
- [4] *Bellini G. et al. (The Borexino collaboration)*. // Nature. 2014. **512** (7515). P. 383.
- [5] *Bellini G. et al. (The Borexino collaboration)*. // Phys. Lett. B. 2011. **696**, N 3. P. 191. (Preprint 1010.0029v1).
- [6] *Agostini M. et al. (The Borexino collaboration)*. // Astropart. Phys. 2017. **86**. P. 11. (Preprint 1607.05649v2).
- [7] *Agostini M. et al. (The Borexino collaboration)*. // Phys. Rev. D. 2017. **96**, N 9. 091103(R), (Preprint 1707.09355v3).
- [8] *Agostini M. et al. (The Borexino collaboration)*. // Phys. Rev. Lett. 2015. **115**, N 23. 231802. (Preprint 1509.01223v2).
- [9] *Agostini M. et al. (The Borexino collaboration)*. // Phys. Rev. D. 2015. **92**, N 3. 031101(R). (Preprint 1506.04610v2).
- [10] *Hirata K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1987. **58**, N 14. P. 1490.
- [11] *Bionta R.M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1987. **58**, N 14. P. 1494.
- [12] *Alekseev E. N. et al.* // JETP Lett. 1987. **45**, N 10. P. 589.
- [13] *Aglietta M. et al.* // Europhys. Lett. 1987. **3**, N 12. P. 1315.
- [14] *Dadykin V.L.* // JETP Lett. 1987. **45**, N 10. P. 593.
- [15] *Antonioli P. et al.* // New J. Phys. 2004. **6**. P. 114. (Preprint astro-ph/0406214v2).
- [16] *Scholberg K.* // Astron. Nachr. 2008. **329**, N 3. P. 337. (Preprint 0803.0531v1).
- [17] Новости на сайте SNEWS: <https://snews.bnl.gov/news.html>. Внутренняя документация коллаборации Borexino.
- [18] *Abbott B.P. et al. (The LIGO and Virgo Collaborations)* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Phys. Rev. Lett. **116** N 6., 061102, 2016.
- [19] *Ott C.D.* // Class. Quant. Grav. 2009. **26**, N 6., 063001. (Preprint 0809.0695v2).
- [20] *Leonor I. et al.* // Class. Quant. Grav. 2010. **27**, N 8. 084019. (Preprint 1002.1511v1).
- [21] *Gromov M.B., Casentini C.* // Journal of Physics: Conference Series. 2017. **888**, N 1. 012099.
- [22] *Gromov M.B.* // Physics of Particles and Nuclei. 2017. **48**, N 6. P. 977.
- [23] *Agafonova N.Y. et al. (The LVD Collaboration)*. // Astropart. Phys. 2008. **28**, N 6. P. 516. (Preprint 0710.0259v1).
- [24] *Agafonova N.Y. et al. (The LVD Collaboration)*. // ApJ. 2015. **802**, N 1. P. 47. (Preprint 1411.1709v2).
- [25] *Casentini C. et al.* // JCAP. 2018. **2018**, N 8. P. 010.
- [26] *Pagliaroli G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. **103**, N 3. 031102. (Preprint 0903.1191v1).
- [27] *Abbott B.P. et al. (The LIGO and Virgo Collaborations)*. // Living Rev. Relativity. 2016. **19**, N 1. P. 1. (Preprint 1304.0670v6).
- [28] AMON website: <https://www.amon.psu.edu/>
- [29] *Smith M. W. E. et al.* // Astropart. Phys. 2013. **45**. P. 56. (Preprint 1211.5602v1).
- [30] *Solares H. A. A. et al.* The Astrophysical Multimessenger Observatory Network (AMON). 2019. (Preprint 1903.08714v1).
- [31] *Asakura K. et al. (The KamLAND Collaboration)*. // Astrophys. J. 2016. **818**, N 1. P. 91. (Preprint 1506.01175v4).

- [32] KamLAND SN monitor website: <https://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/SNmonitor/regist/index.html>
- [34] LIGO/Virgo Public Alerts website: <https://emfollow.docs.ligo.org/userguide/index.html>
- [33] GCN website: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/>

Borexino neutrino detector in the era of multi-messenger astronomy

M. B. Gromov^{1,2,a}, A. S. Chepurnov^{1,b}

¹*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Moscow 119991, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 141980, Russia
E-mail: ^agromov@physics.msu.ru, ^baschepurnov@yandex.ru*

The possibilities of using the Borexino neutrino detector for multi-messenger astronomical observations and astrophysical studies are considered. The participation of the Borexino collaboration in the joint data analysis of neutrino and gravitational wave detectors GWNU is described. A brief overview of the current application and the prospect of further use of the detector in the supernova early warning system SNEWS is given. The general problems and possibilities of combining detectors of various radiations within a single observation network are discussed.

PACS: 97.60.Bw, 95.55.Vj, 95.55.Ym, 29.40.Mc, 04.80.Nn.

Keywords: neutrino, Borexino, gravitational wave, GWNU, SNEWS, multi-messenger astronomy, supernovae.

Received 30 June 2019.

Сведения об авторах

1. Громов Максим Борисович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: e-mail: gromov@physics.msu.ru.
2. Чепурнов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-56-31, e-mail: aschepurnov@yandex.ru.