

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Внегалактическая астрономия

*Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 28 октября 2009 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004e.0415

28 октября 2009 г. в конференц-зале Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, "Внегалактическая астрономия".

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Варшалович Д.А., Иванчик А.В., Балашев С.А.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). *Первичный нуклеосинтез и HD/H₂ в молекулярных облаках, существовавших 12 млрд лет назад*.
2. **Аптекарь Р.Л., Голенецкий С.В., Мазец Е.П.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). *Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ КОНУС*.
3. **Бескин Г.М., Карпов С.В.** (Специальная астрофизическая обсерватория РАН), **Бондарь С.Ф.** (Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения). *Открытие быстрой оптической переменности гамма-всплесков GRB 080319B и перспективы астрономического мониторинга высокого временного разрешения*.
4. **Старобинский А.А.** (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН). *Экспериментальное и теоретическое исследование тёмной энергии во Вселенной*.
5. **Засов А.В., Сильченко О.К.** (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова). *Диски галактик и их эволюция*.
6. **Бурдюжа В.В.** (Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН). *Тёмные компоненты во Вселенной*.

Статьи, написанные на основе докладов 1–3, 5 и 6, публикуются ниже. Расширенное содержание доклада А.А. Старобинского будет представлено в виде обзора, который планируется опубликовать в одном из последующих выпусков УФН.

PACS numbers: **26.30.–k, 26.35. +c, 98.38.Dq**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004f.0415

**Первичный нуклеосинтездейтерия
и содержание молекул HD/H₂
в межзвёздных облаках,
существовавших 12 млрд лет назад**

Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик,
С.А. Балашев, П. Петижан

1. Первичный нуклеосинтез

В последние годы широко обсуждается вывод о том, что во Вселенной доминируют ранее неизвестные формы материи и энергии — холодная тёмная материя (CDM) и тёмная энергия (DE), а обычное вещество, состоящее из барионов (протонов и нейтронов), составляет лишь 4–5 % от полной плотности энергии. Последнее утверждение основывается на детальном количественном анализе первичного нуклеосинтеза и на тщательном измерении содержаниядейтерия в межзвёздном веществе наиболее далёких галактик и протогалактик [1, 2].

Как известно, на ранней стадии космологической эволюции наша Вселенная пережила краткую эпоху, когда температура понизилась настолько, что стали эффективными реакции синтеза атомных ядер из протонов и нейтронов. Вся Вселенная тогда представляла собой единый термоядерный реактор, заполненный почти однородной, полностью ионизованной плазмой с $T \sim 10^9 - 10^8$ К. Однако та эпоха была столь краткой, что успели образоваться (в заметных количествах) лишь наиболее лёгкие ядра: ${}^2\text{D}$, ${}^3\text{T}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$. Относительное содержание образовавшихся в процессе первичного нуклеосинтеза реликтовых ядер можно рассчитать, поскольку скорости всех соответствующих реакций хорошо известны. Единственным свободным параметром расчёта является относительная концентра-

Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ
E-mail: varsh@astro.ioffe.ru

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ

С.А. Балашев. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ

П. Петижан (P. Petitjean). Institut d'Astrophysique de Paris, France

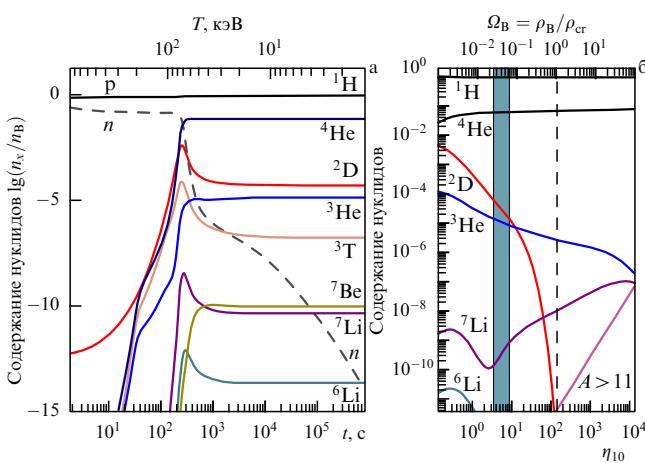


Рис. 1. Эпоха первичного нуклеосинтеза. (а) Изменение состава вещества со временем t и соответственно с изменением температуры T . (б) Относительное содержание образовавшихся в итоге реликтовых ядер как функция отношения концентрации барийонов к концентрации фотонов $\eta_{10} = 10^{10}(n_B/n_\gamma)$. Сплошные кривые — теоретические значения, затенённая вертикальная полоса — интервал значений η_{10} , допускаемых астрономическими наблюдениями содержания разных реликтовых ядер, штриховая прямая соответствует $\rho_B = \rho_{\text{cr}}$.

ция барийонов. И этот параметр можно определить путём сравнения результатов расчёта с данными астрономических наблюдений по содержанию реликтовых ядер.

На рисунке 1а показано, как менялся состав нуклидов с изменением времени t и температуры T , которые в эту эпоху были связаны соотношением $t = AT^{-2}$, где коэффициент A определяется эффективным числом степеней свободы ультратрелативистских частиц (фотонов, нейтрено и антинейтрено всех сортов).

На рисунке 1б представлены результаты расчёта конечного состава реликтовых ядер в зависимости от отношения концентраций барийонов и фотонов n_B/n_γ . Затенённой полосой на рисунке показан интервал значений n_B/n_γ , соответствующих данным астрономических наблюдений по относительному содержанию разных реликтовых ядер. Из рисунка видно, что наиболее чувствительным индикатором отношения концентраций барийонов и фотонов n_B/n_γ является относительное содержание первичного дейтерия $(\text{D}/\text{H})_p$. Так, например, если бы плотность барийонного вещества равнялась критической, $\rho_B = \rho_{\text{cr}}$, то мы вообще не видели бы дейтерия, так как его содержание было бы на восемь порядков меньше.

Отношение содержания изотопов (D/H) в ходе последующей эволюции могло только уменьшаться, так как при попадании межзвёздного вещества в недра звёзд дейтерий выгорает, превращаясь в гелий. Поэтому для определения $(\text{D}/\text{H})_p$ необходимы измерения изотопного состава межзвёздного вещества в наиболее ранние эпохи космологической эволюции. Для этой цели используют спектры поглощения квазаров с большими красными смещениями. Квазары являются наиболее мощными источниками излучения, поэтому они видны на расстояниях вплоть до 10–12 млрд световых лет. Другими словами, спектры квазаров, измеряемые сегодня, формировались 10–12 млрд лет назад. При этом излучение самих квазаров используется для просвечивания оказавшихся на луче зрения далёких облаков межзвёздного

и межгалактического газа, которые "впечатывают" в спектр квазара свои линии поглощения. Можно сказать, что квазары служат "рентгеновским аппаратом" для просвечивания Вселенной.

До последнего времени относительное содержание (D/H) определяли только по атомным линиям $\text{H}\,\text{I}$ и $\text{D}\,\text{I}$ в спектрах поглощения квазаров. Однако такие измерения наталкиваются на ряд трудностей. Оптические спектры $\text{D}\,\text{I}$ и $\text{H}\,\text{I}$ практически одинаковы, лишь длины волн их линий сдвинуты на 0,027 %. При этом концентрации этих атомов различаются на 4–5 порядков. Поэтому если лучевая концентрация $\text{H}\,\text{I}$ мала, то линии $\text{D}\,\text{I}$ вообще не видны. Если же лучевая концентрация водорода слишком велика, то линии $\text{H}\,\text{I}$ насыщены, уширены и наплываю на линии $\text{D}\,\text{I}$ (блэндируют их). Более того, линии, идентифицированные как линии $\text{D}\,\text{I}$, в принципе могут быть порождены небольшим облаком $\text{H}\,\text{I}$, движущимся относительно исследуемого облака со скоростью $\sim 80 \text{ km s}^{-1}$, тем более, что на луче зрения действительно находится большое количество таких облаков, движущихся с разными скоростями (так называемый лайман-альфа-лес). Возможно, этими причинами объясняется существенный разброс полученных таким методом значений (D/H) (см. раздел 3, рис. 5).

Трудностей с идентификацией линий не возникает, если измерять относительное содержание не атомов $\text{D}\,\text{I}$ и $\text{H}\,\text{I}$, а молекул HD и H_2 , поскольку их спектры существенно различаются, а большинство узких абсорбционных линий не перекрываются. Этот метод до последнего времени не использовался потому, что молекулы HD не удавалось обнаружить при больших красных смещениях.

2. Облако HD/H_2 с красным смещением $z = 2,33771$

Нам первыми удалось обнаружить дейтерированый молекулярный водород на больших красных смещениях, идентифицировав линии молекул HD в спектре поглощения квазара Q 1232+082, сдвинутые вследствие красного смещения так, что $\lambda_{\text{набл}}/\lambda_{\text{лаб}} = 1 + z = 3,337714(3)$ [3]. Фактически впервые на большом космологическом расстоянии было обнаружено облако, содержащее наряду с молекулами H_2 молекулы HD . Это облако существовало около 12 млрд лет назад, когда ещё не было Солнечной системы, да и наша Галактика ещё не сформировалась.

На рисунках 2 и 3 представлены схемы уровней и переходов лаймановской серии $L\nu'' = 0$ молекул H_2 и HD и участки спектра квазара с линиями, соответствующими этим переходам. В случае HD видны линии R_0 , соответствующие переходам из основного состояния $J = 0$, а в случае H_2 видны линии, соответствующие не только переходам из основных состояний пара- H_2 ($J = 0$) и орто- H_2 ($J = 1$), но и из возбуждённых вращательных состояний R_J и P_J с $J = 2, 3, 4, 5$, поскольку времена жизни молекул H_2 в этих состояниях τ_J на порядки больше аналогичных времён для HD .

После дополнительных тщательных измерений спектра этого квазара, выполненных французскими коллегами на 8,2-метровом телескопе VLT (Very Large Telescope) Европейской южной обсерватории (ESO) (Чили), мы определили лучевые концентрации молекул HD и H_2 в этом облаке: $N(\text{HD}) = (3,4^{+1,6}_{-0,8}) \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $N(\text{H}_2) = (4,8 \pm 1,0) \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ [4]. Отношение лучевых концентраций (HD/H_2) оказалось равным $(7,1^{+3,7}_{-2,2}) \times 10^{-5}$.

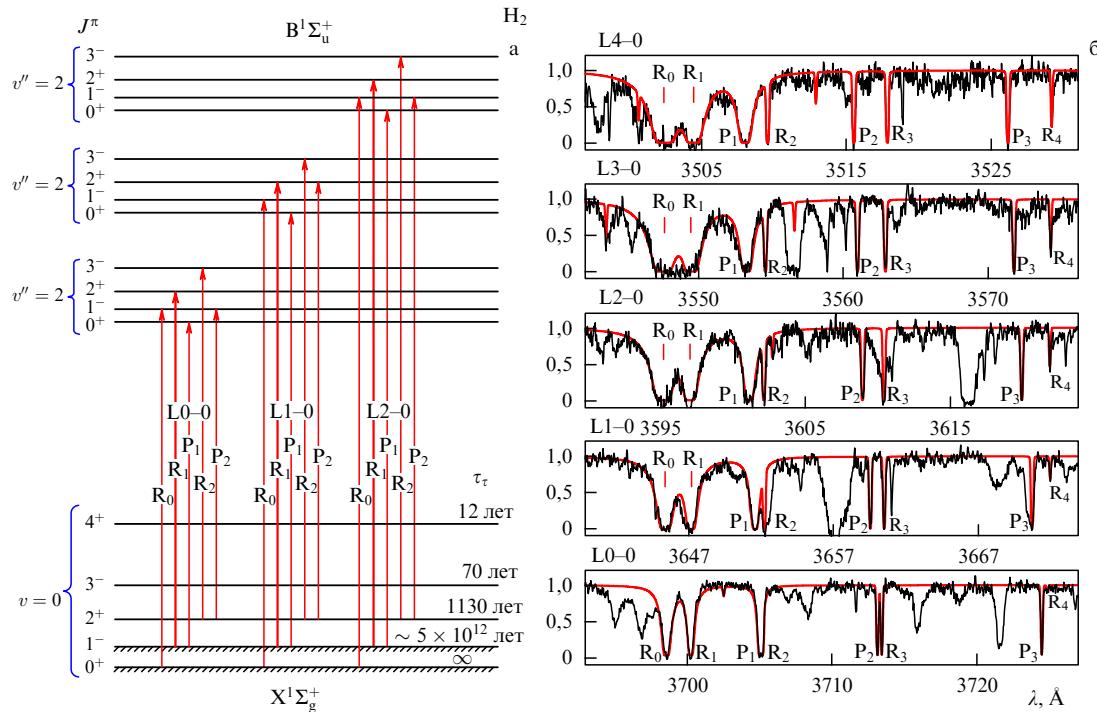


Рис. 2. (а) Схема уровней и переходов лаймановской серии $Lv'' - v$ молекулы H_2 . (б) Участки спектра квазара Q 1232+082, на которых видны соответствующие линии поглощения H_2 , длины волн которых сдвинуты из-за космологического красного смещения $\lambda_{\text{набл}} / \lambda_{\text{лаб}} = 3,33771$.

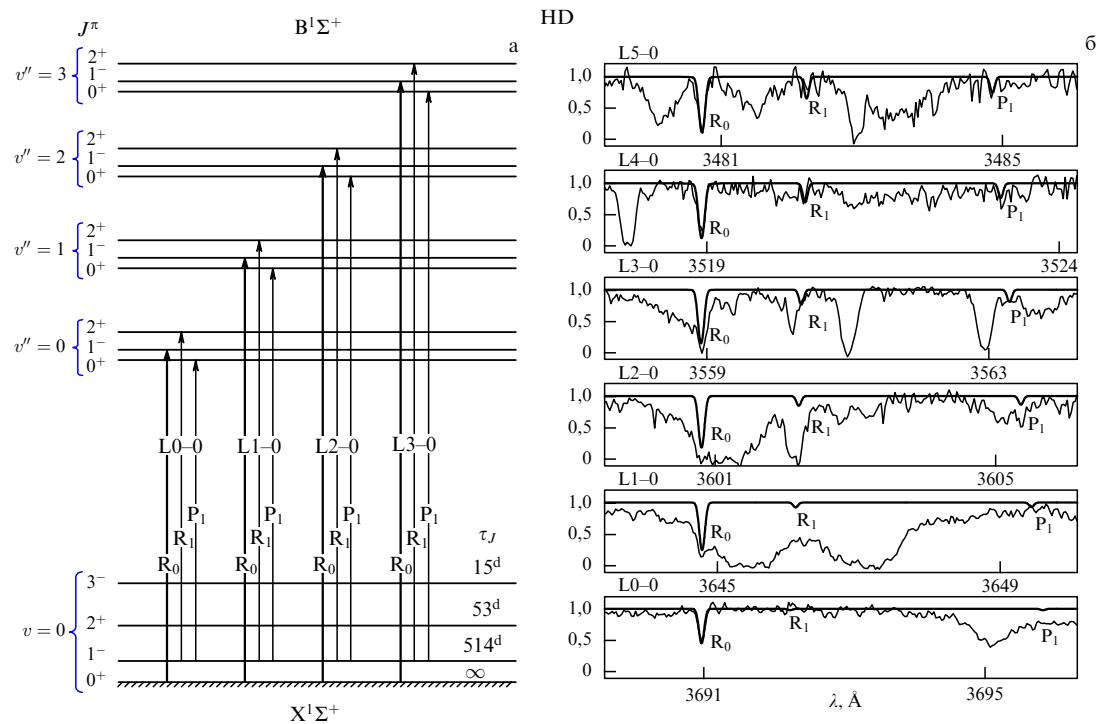


Рис. 3. (а) Схема уровней и переходов молекулы HD. (б) Участки спектра, на которых видны линии HD, с $\lambda_{\text{набл}} / \lambda_{\text{лаб}} = 3,33771$.

Это значение существенно превосходит аналогичные значения в межзвёздных молекулярных облаках нашей Галактики, $(0,4-4,0) \times 10^{-6}$ [5]. На рисунке 4 представлен полученный спектр квазара Q 1232+082 [4] в сравнении с абсорбционным спектром ζ Oph [6], характеризующим межзвёздное молекулярное облако Галактики. Оба фрагмента спектра отвечают одному и тому же интервалу длин волн в сопутствующей системе, но для

астронома-наблюдателя шкалы длин волн сдвинуты из-за красного смещения в 3,33771 раза. Из сравнения спектров видно, что относительное содержание молекул (HD/ H_2) в облаке, существовавшем 12 млрд лет назад, было значительно больше, чем в нашу эпоху. Количественная оценка показывает, что это отношение различается почти в 200 раз.

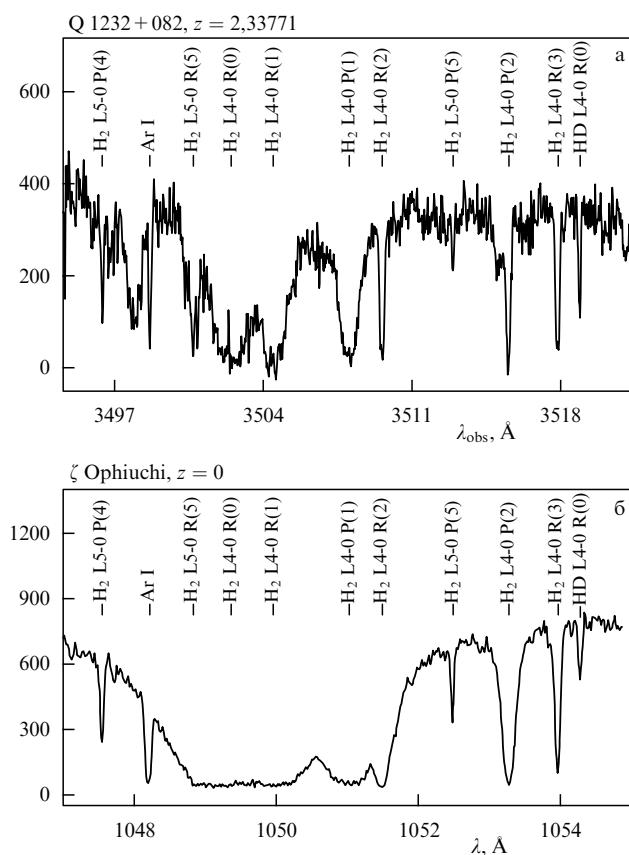


Рис. 4. Представлен спектр квазара Q 1232+082 [4] в сравнении с абсорбционным спектром ζ Oph [6], характеризующим межзвёздное молекулярное облако нашей Галактики. Оба фрагмента спектра отвечают одному и тому же интервалу длин волн в сопутствующей системе, но для астронома-наблюдателя шкалы длин волн свинуты из-за красного смещения в 3,33771 раза. Из сравнения спектров видно, что относительное содержание молекул (HD/H_2) в облаке, существовавшем 12 млрд лет назад, было значительно больше, чем в нашу эпоху.

Анализ полученного спектра показал, что исследуемое облако всё же содержит небольшое количество вещества, переработанного звёздами, т.е. обеднённого дейтерием. Об этом свидетельствует наличие в спектре линий некоторых атомов и ионов, в частности, линия Ar I, указанная на рис. 4. В результате количественного анализа [7] удалось показать, что содержание в газе таких элементов как Si, P, S, Ar, Ti в 30–40 раз меньше солнечного. Например, содержание Ar в облаке составляло $(2.4^{+1.9}_{-1.0})\%$ от солнечного содержания. В протосолнечной системе отношение (D/H) составляло 1.94×10^{-5} [8], т.е. отличалось от первичного на 30–50 %, поэтому есть основания полагать, что (D/H) в этом облаке отличается от первичного $(\text{D}/\text{H})_p$ лишь на 1–2 %.

Итак, исследуемая абсорбционная система представляет собой холодное разрежённое облако межзвёздного газа, входящее в удалённую галактику или протогалактику. Кинетическая температура газа, определённая по относительному содержанию орто- и пара- H_2 , составляет $T = 67 \pm 11$ К. Средняя концентрация газа, определённая из относительной заселённости уровней тонкой структуры основного состояния атомов CI, составляет (71 ± 28) см $^{-3}$. Размер облака порядка 1 пк. Анализ спектра показал, что атомы O I, N I, Ar I с потенциалами ионизации более 13,6 эВ присутствуют в облаке лишь в

нейтральном состоянии, тогда как C, Mg, Al, Si, P, S, Ti, Mn, Fe с потенциалами ионизации менее 13,6 эВ представлены в виде как однозарядных ионов (преимущественно), так и нейтральных атомов. Это обстоятельство позволяет оценить поток ионизирующего ультрафиолетового (УФ) излучения в исследуемом облаке. Перенос излучения в линиях H_2 для этого облака детально рассмотрен в работе [9].

Таким образом, детальный анализ полученного спектра позволил выявить эволюционные изменения химического и изотопного состава вещества, произошедшие за 12 млрд лет, и определить физические условия, существовавшие в облаке в ту эпоху.

3. Относительное содержание изотопов (D/H) и содержание барионов

Для того чтобы определить отношение содержания изотопов (D/H) по относительному содержанию молекул (HD/H_2), в общем случае необходимо учитывать все каналы рождения и гибели этих молекул. Доминирующий канал разрушения молекул H_2 и HD — это диссоциация ультрафиолетовым излучением в резонансных линиях. Под действием УФ-излучения молекулы возбуждаются и переходят из основного состояния $\text{X}^1\Sigma_g^+$ в верхние электронные состояния $\text{B}^1\Sigma_u^+$ и $\text{C}^1\Pi_u$, т.е. возбуждение происходит в линиях лаймановской и вернеровской полос в диапазоне 1120–912 Å (именно эти линии и наблюдаются в спектрах квазаров). Около 87 % молекул, возбуждённых УФ-излучением, возвращаются в основное электронное состояние (на разные колебательно-вращательные уровни), а около 13 % молекул диссоциируют. Однако при проникновении в облако излучение в линиях лаймановской и вернеровской полос поглощается, линии насыщаются, так что молекулы H_2 и HD внутри облака оказываются экранированными от разрушающего их УФ-излучения. Самоэкранирование облака начинается тогда, когда оптическая толщина в резонансных линиях достигает единицы, что соответствует лучевой концентрации молекул $\sim 4 \times 10^{14}$ см $^{-2}$. В нашем случае измеренные лучевые концентрации молекул H_2 и HD существенно превосходят это критическое значение. При таких условиях согласно результатам расчётов в модели межзвёздных молекулярных облаков [10–12] практически весь газ внутри облака должен быть молекуляризован, т.е. весь D должен находиться в форме HD, а H — в форме H_2 . В этом случае устанавливается универсальное соотношение: $(\text{HD}/\text{H}_2) = 2(\text{D}/\text{H})$. Это обстоятельство позволило нам определить отношение изотопов в исследуемом облаке: $(\text{D}/\text{H}) = (3.6^{+1.9}_{-1.1}) \times 10^{-5}$ [4].

Полученное значение (D/H) сопоставляется с результатами других работ на рис. 5, где показано содержание дейтерия и других реликтовых ядер в зависимости от относительной концентрации барионов n_B/n_γ . Представлены (рис. 5а) результаты измерений (D/H) в спектрах квазаров по абсорбционным линиям атомов DI/H I и по молекулярным линиям HD/ H_2 (данные и ссылки по этим работам приведены в [4]). На рисунке 5б результаты измерений относительной распространённости реликтовых ядер ^2D , ^3He , ^4He , ^7Li сопоставляются с расчётными кривыми и со значением n_B/n_γ , полученным из анализа спектра угловых флуктуаций температуры реликтового излучения [13].

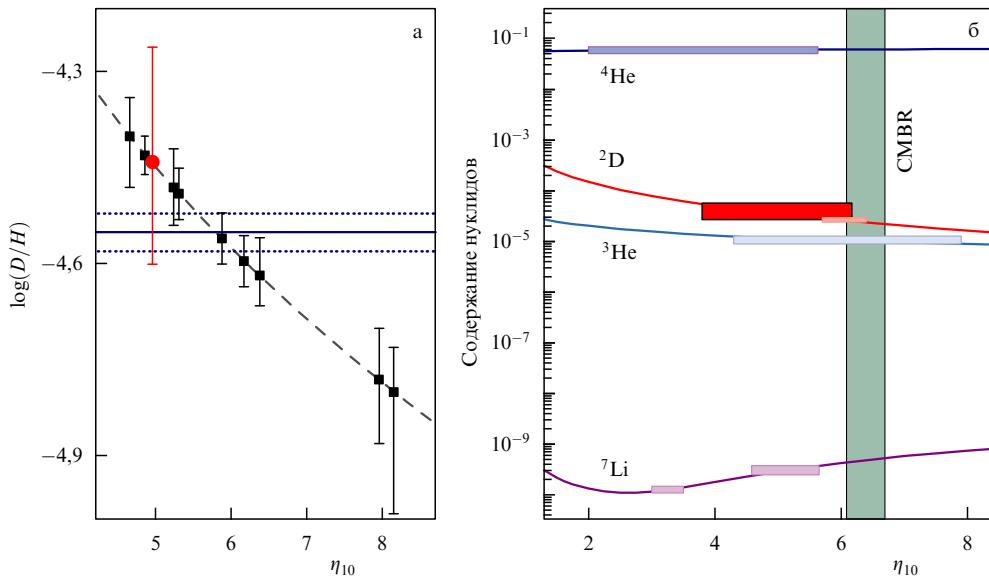


Рис. 5. Относительное содержаниедейтерия и другихреликтовыхядеркакфункцияотносительнойконцентрации барионов $\eta_{10} = 10^{10}(n_B/n_\gamma)$. (а) Результаты измерений (D/H) в спектрах квазаров по абсорбционным линиям атомов $D/H/I$ (квадраты) и по молекулярным линиям HD/H_2 (кружок) [4]. (б) Результаты измерений относительной распространённости реликтовых ядер сопоставляются с расчётыми кривыми и со значением n_B/n_γ , полученным из анализа анизотропии реликтового излучения (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) [13].

На основе теории первичного нуклеосинтеза было определено с использованием полученного значения (D/H) отношение концентраций барионов и фотонов реликтового излучения: $n_B/n_\gamma = (5 \pm 1) \times 10^{-10}$ [4]. При этом для расчёта кинетики первичного нуклеосинтеза мы использовали модифицированный пакет программ [14, 15]. Согласно стандартной космологической модели, отношение концентраций n_B/n_γ должно сохраняться со временем первичного нуклеосинтеза до наших дней, т.е. считается, что в процессе эволюции барионы не распадались и частицы холодной тёмной материи (CDM) не превращались в барионы. В нашу эпоху концентрация реликтовых фотонов, соответствующая температуре $T_0 = 2,726$ К, составляет $n_\gamma = 411 \text{ см}^{-3}$. Поэтому средняя концентрация барионов $n_B(0) = (2,1 \pm 0,4) \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$. Однако, в отличие от распределения вещества в эпоху первичного нуклеосинтеза, когда среда была почти однородной, современное распределение вещества крайне неоднородно, поэтому $n_B(0)$ представляет собой среднее значение по большой области пространства, порядка 100 Мпк. Полученное значение $n_B(0)$ соответствует $(3,7 \pm 0,8)\%$ от критической плотности (при постоянной Хаббла $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$). Это согласуется в пределах ошибок измерений со значением, полученным из анализа флуктуаций температуры реликтового излучения [13].

4. Заключение

Впервые на больших космологических расстояниях обнаружено облако холодного разрежённого газа, содержащее молекулы HD и H_2 . Изучен состав вещества и физические условия, существовавшие в этом облаке ~ 12 млрд лет назад. Показано, что отношение лучевых концентраций (HD/H_2) было существенно выше, чем в современную эпоху в межзвёздных облаках нашей Галактики [4].

Определено относительное содержание изотопов (D/H) в этом облаке новым (независимым) методом из

отношения лучевых концентраций HD/H_2 в рамках моделей молекулярных облаков [10–12]. Полученное значение $(D/H) = (3,6^{+1,9}_{-1,1}) \times 10^{-5}$ позволило на основе стандартной космологической модели первичного нуклеосинтеза определить среднюю плотность барионов во Вселенной в нашу эпоху: $\Omega_B \equiv \rho_B/\rho_{\text{кр}} = (3,7 \pm 0,8)\%$ [4].

Работа была поддержана программой Президиума РАН "Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной", Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 08-02-01246а и грантом НШ-3769.2010.2.

Список литературы

- Steigman G *Annu. Rev. Nucl. Part. Syst.* **57** 463 (2007)
- Pettini M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **391** 1499 (2008)
- Варшалович Д А и др. *Письма в Астрон. журн.* **27** 803 (2001) [Varshalovich D A et al. *Astron. Lett.* **27** 683 (2001)]
- Ivanchik A V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2010) (принято к печати), doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16383.x; arXiv:1002.2107
- Lacour S et al. *Astron. Astrophys.* **430** 967 (2005)
- Spitzer L (Jr.), Jenkins E B *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **13** 133 (1975)
- Балашев С А и др., подготовлена к печати
- Lodders K, Palme H, Gail H-P, in *Landolt-Börnstein, New Series. Astronomy and Astrophysics* (Berlin: Springer-Verlag) (в печати); arXiv:0901.1149
- Балашев С А, Варшалович Д А, Иванчик А В *Письма в Астрон. журн.* **35** 171 (2009) [Balashev S A, Varshalovich D A, Ivanchik A V *Astron. Lett.* **35** 150 (2009)]
- Abgrall H et al. *Astron. Astrophys.* **253** 525 (1992)
- Le Bourlot J *Astron. Astrophys.* **360** 656 (2000)
- Le Petit F, Roueff E, Le Bourlot J *Astron. Astrophys.* **390** 369 (2002)
- Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 330 (2009); arXiv:0803.0547
- Орлов А В, Варшалович Д А "Кинетика первичного нуклеосинтеза: новый пакет программ", Препринт № 1719 (СПб: ФТИ РАН, 1999)
- Иванчик А В, Орлов А В, Варшалович Д А *Письма в Астрон. журн.* **27** 723 (2001) [Ivanchik A V, Orlov A V, Varshalovich D A *Astron. Lett.* **27** 615 (2001)]

PACS numbers: 95.55.Ka, 95.85.Pw, 98.70.Rz
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004g.0420

Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ КОНУС

Р.Л. Аптечарь, С.В. Голенецкий,
Е.П. Мазец, В.Д. Пальшин, Д.Д. Фредерикс

В докладе представлены результаты многолетних исследований космических гамма-всплесков, выполненных Физико-техническим институтом (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе РАН на межпланетных космических станциях и искусственных спутниках Земли. На автоматических межпланетных станциях (АМС) "Венера-11, -12, -13, -14" впервые были определены основные характеристики временных профилей и энергетических спектров гамма-всплесков и распределения их источников на небесной сфере. В результате наблюдений гигантской вспышки 5 марта 1979 г. и последующих коротких гамма-всплесков из её источника был открыт новый редкий класс астрофизических объектов, получивших позднее название мягкие гамма-репитеры (Soft Gamma Repeaters, SGR). В последующих экспериментах КОНУС и ГЕЛИКОН исследование космических гамма-всплесков и гамма-репитеров были продолжены, были открыты новые источники, зарегистрированы и детально исследованы гигантские вспышки от других гамма-репитеров в нашей Галактике и впервые из источников в близких галактиках M81 и M31. В современную эпоху всеволновых исследований космических гамма-всплесков продолжающийся уже более 15 лет российско-американский эксперимент КОНУС–ВИНД предоставляет важные, часто уникальные данные о временных и энергетических свойствах их излучения в области 10 кэВ – 10 МэВ.

Проблема природы космических гамма-всплесков как источников экстремального взрывного выделения электромагнитной энергии находится в центре внимания астрофизиков с момента их открытия в 1967–1973 гг. на американских спутниках "Вела" [1]. Одно из первых независимых подтверждений открытия нового явления было дано в наблюдениях ФТИ на спутнике "Космос-461" [2]. Первый важнейший прорыв в исследованиях гамма-всплесков был осуществлён в длительных экспериментах КОНУС, проведённых ФТИ на межпланетных станциях "Венера 11"– "Венера 14" в 1978–1983 гг. В них впервые были определены основные наблюдательные свойства гамма-всплесков, которые позднее получили подтверждение в других экспериментах и которые до сих пор составляют основу современных представлений о гамма-всплесках. Было изучено многообразие временных структур гамма-всплесков и показано существование отдельного класса коротких всплесков (так называемого "бимодального распределения" всплесков по длительности), а использование массивов детекторов с анизотропной угловой чувствительностью и триангуля-

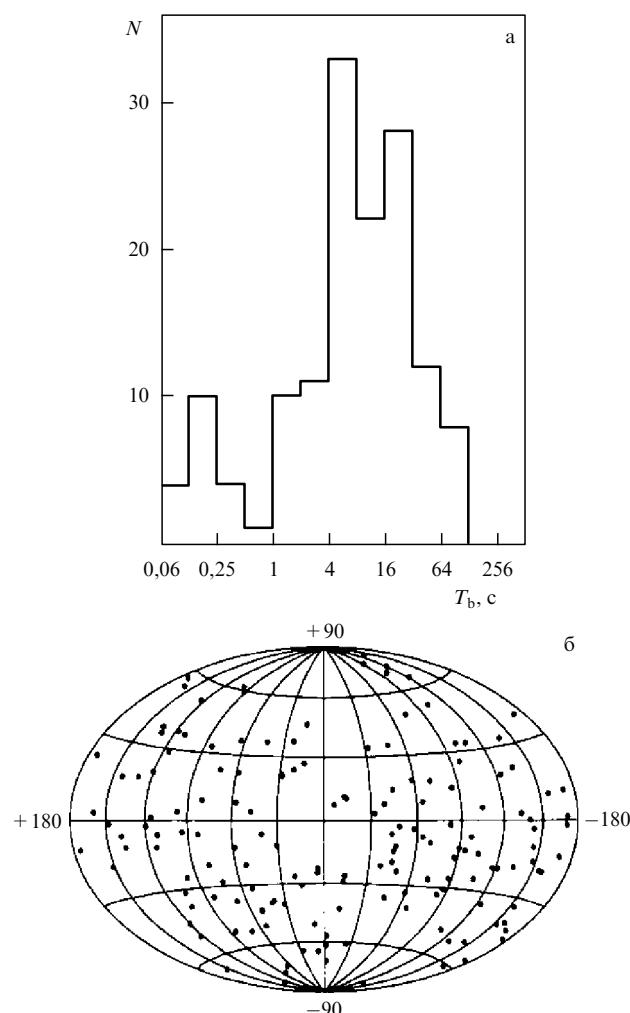


Рис. 1. Распределение гамма-всплесков по длительности (а) и распределение источников гамма-всплесков по небесной сфере (б) по наблюдениям в экспериментах КОНУС на АМС "Венера" (1978–1983 гг.). T_b — длительность всплеска, N — число событий.

ционного метода локализации источников всплесков позволило впервые установить, что их распределение по небесной сфере носит случайный характер (рис. 1) [3, 4]. Позднее эти результаты были подтверждены на большей статистике событий в известном американском эксперименте BATSE (Burst And Transient Source Experiment) на орбитальной обсерватории "Комптон" [5].

Интереснейшим и полностью неожиданным результатом стало открытие в экспериментах КОНУС на станциях "Венера" нового, очень редкого класса галактических источников повторяющихся, мягких по спектру всплесков — мягких гамма-репитеров (SGR). Гамма-репитеры проявляют два вида активности. Первый — испускание мягких повторных всплесков с длительностью $\sim 0,1$ с и изотропным энерговыделением $\sim 10^{39}–10^{41}$ эрг. Периоды вспышечной активности репитеров крайне неравномерны во времени, преимущественно источники находятся в стадии молчания, которая может длиться годами, прерываясь периодами интенсивной реактивации. Вторым, несравненно более впечатляющим, видом активности репитеров являются гигантские вспышки — крайне редкие события, по пикующей мощности энерговыделения ($10^{45}–10^{47}$ эрг с^{-1}), сопо-

Р.Л. Аптечарь, С.В. Голенецкий, Е.П. Мазец, В.Д. Пальшин,
Д.Д. Фредерикс. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, РФ. E-mail: aptekar@mail.ioffe.ru

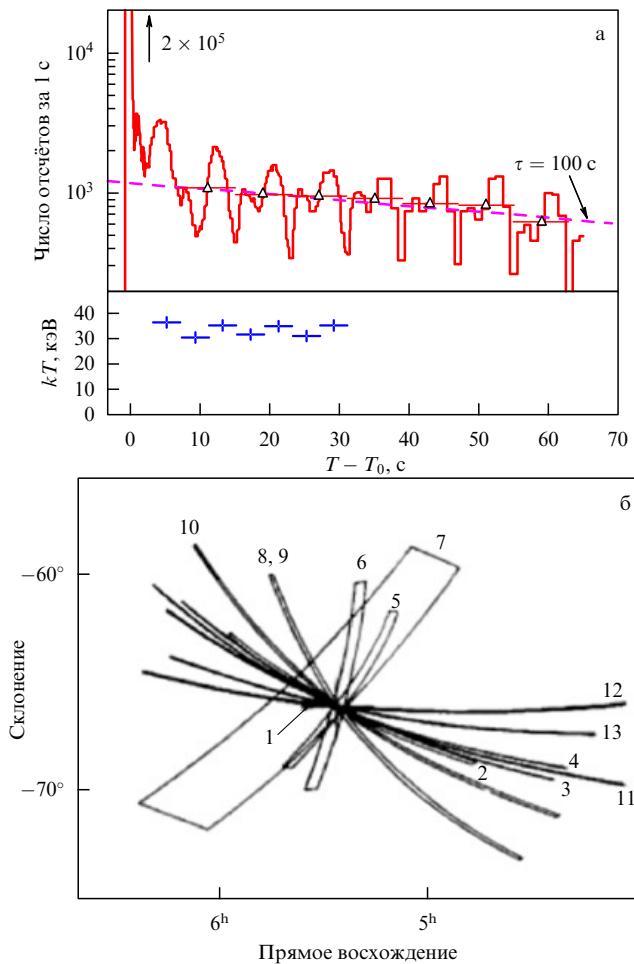


Рис. 2. Гигантский всплеск 5 марта 1979 г. (а) и повторные всплески (б) в SGR 0526-66 по данным аппаратуры КОНУС на АМС "Венера-11, -12". На рисунке а τ — постоянная времени затухания. На рисунке б числа 1, 2, ... обозначают порядковые номера повторных всплесков.

ставимой со светимостью квазаров. Открытие гамма-репитеров началось с регистрации 5 марта 1979 г. гигантской вспышки жёсткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения от первого репитера, SGR 0526-66, расположенного в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии 55 кпк (рис. 2а [6, 7]). Вспышка представляла собой узкий, чрезвычайно интенсивный начальный пик излучения с жёстким энергетическим спектром, сопровождавшийся сравнительно более слабым и мягким по спектру "хвостом", который, пульсируя с периодом 8 с, затухал в течение нескольких минут. Уже на следующий день была зарегистрирована первая повторная вспышка от этого источника. На протяжении нескольких лет было зарегистрировано 17 таких повторных всплесков от SGR 0526-66 (рис. 2б [8]). Почти в течение 20 лет гигантская вспышка 5 марта 1979 г. оставалась уникальным событием. Только 27 августа 1998 г. в эксперименте КОНУС-ВИНД была зарегистрирована гигантская вспышка от SGR 1900+14, в которой проявились все основные особенности первой вспышки. Третья подобная, но ещё более интенсивная вспышка наблюдалась 27 декабря 2004 г. от SGR 1806-20. По общепринятым представлениям мягкие гамма-репитеры представляют собой молодые (возраст $\sim 10^3$ – 10^4 лет), быстро замед-

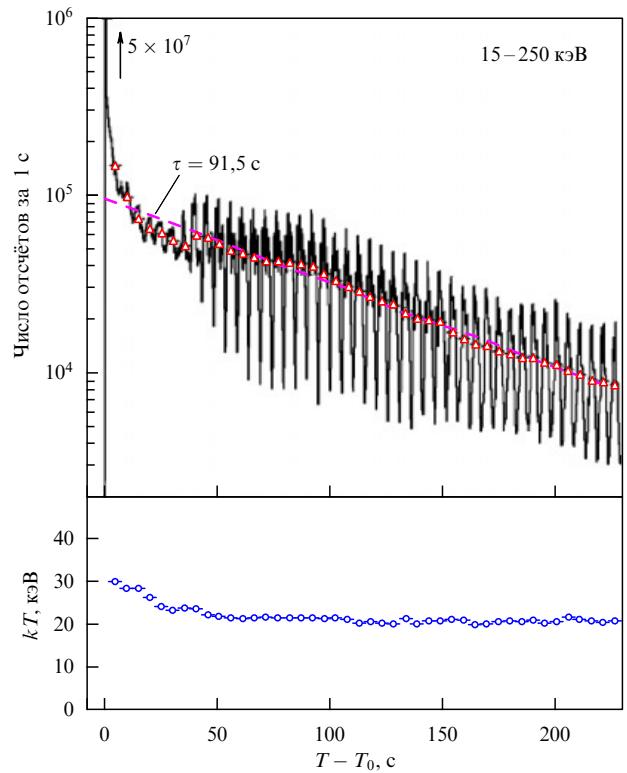


Рис. 3. Гигантский всплеск в SGR 1900+14 27 августа 1998 г. по данным аппаратуры КОНУС – ВИНД.

ляющие свое вращение нейтронные звёзды со сверхсильным ($\sim 10^{15}$ Гс) магнитным полем.

Новый важный этап проводимых ФТИ исследований космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров связан с проведением на американском космическом аппарате "Wind" совместного российско-американского эксперимента с помощью российской научной аппаратуры КОНУС. Сильно вытянутая и удалённая от Земли орбита КА "Wind" с апогеем 0,5–1,5 млн км обеспечивает обзор всей небесной сферы без существенных потерь экспозиции, что исключительно благоприятно для исследования непредсказуемых и транзитных источников. Два высокочувствительных детектора аппаратуры КОНУС – ВИНД постоянно наблюдают всю небесную сферу, и ни одно из важных для физики гамма-всплесков и гамма-репитеров событий не было пропущено за все годы наблюдений, которые успешно продолжаются уже более 15 лет.

Преимущество эксперимента КОНУС – ВИНД проявилось, в первую очередь, в наблюдениях таких редких событий, как всплески гамма-репитеров. В 1998 г. было зарегистрировано два гигантских всплеска. Первым 18 июня наблюдался исключительно мощный, но без пульсирующего хвоста всплеск от источника SGR 1627-41 [9]. Затем наблюдалась гигантская вспышка 27 августа от SGR 1900+14 (рис. 3 [10]), в которой видны все типичные признаки этого явления: короткий, исключительно большой по интенсивности начальный импульс гамма-излучения, сменяющийся более слабым, затухающим за ≈ 500 с "хвостом", пульсирующим с периодом вращения нейтронной звезды.

Поток гамма-квантов в начальных импульсах гигантских вспышек от SGR настолько велик, что чувстви-

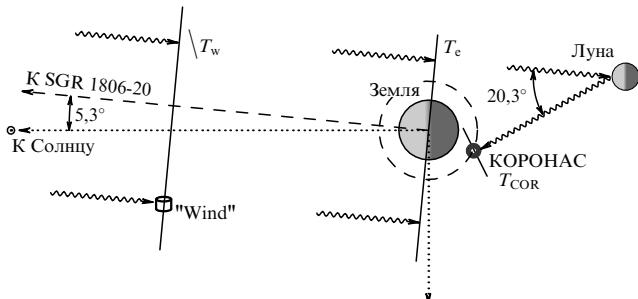


Рис. 4. Отражение начального импульса гигантской вспышки SGR 1806-20 от Луны и его детектирование аппаратурой ГЕЛИКОН на КА КОРОНАС-Ф.

тельные детекторы аппаратуры перегружаются, "зашкаливают" и точное измерение временных и энергетических характеристик начального импульса становится практически неразрешимой задачей, так как возможны только грубые оценки снизу. Для самой мощной из зарегистрированных вспышек, пришедшей от источника SGR 1806-20 27 декабря 2004 г., насыщение детектора КОНУС-ВИНД продолжалось более полутора секунд. Но для наблюдений этого события ситуация оказалась исключительно благоприятной, в это же время синхронные измерения проводились в другом эксперименте ФТИ, с использованием идентичного аппарата КОНУС-ВИНД спектрометра ГЕЛИКОН на солнечной космической обсерватории КОРОНАС-Ф (аббр. от Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца). Схема расположения космических аппаратов в момент регистрации этого всплеска показана на рис. 4 [11]. Детекторы аппаратуры ГЕЛИКОН оказались экранированы Землёй от прямого облучения начальным импульсом гигантского всплеска, но четко зарегистрировали его отражение от поверхности Луны. Это позволило впервые надёжно восстановить временной профиль начального импульса гигантского всплеска гамма-репитера (рис. 5 [11]) и определить его энергетические характеристики: полное изотропное энерговыделение ($2,3 \times 10^{46}$ эрг) и пиковую светимость ($3,5 \times 10^{47}$ эрг с^{-1}). Таким образом, вспышка 27 декабря стала первым в истории внеатмосферной астрономии примером естественной локации Луны рентгеновским и гамма-излучением.

Наблюдения гигантских вспышек от SGR 1900+14 и SGR 1806-20 возродили на новом уровне интерес к выдвинутому Е.П. Мазеем и С.В. Голенецким в 1981–1982 гг. [3] предположению о том, что некоторые короткие жёсткие гамма-всплески могут представлять собой начальные импульсы гигантских вспышек от значительно более далёких гамма-репитеров. Определение энергетических характеристик начального импульса гигантской вспышки в SGR 1806-20 позволило оценить предельную дальность, на которой подобные вспышки могут быть зарегистрированы, для современных широконаправленных детекторов она составляет 30–50 Мпк. Имеющиеся данные о гигантских вспышках известных гамма-репитеров позволяют определить ожидаемые временные и спектральные характеристики коротких гамма-всплесков, которые могли бы свидетельствовать о приходе вспышки из другой галактики. Такой всплеск должен иметь вид одиночного импульса с крутым

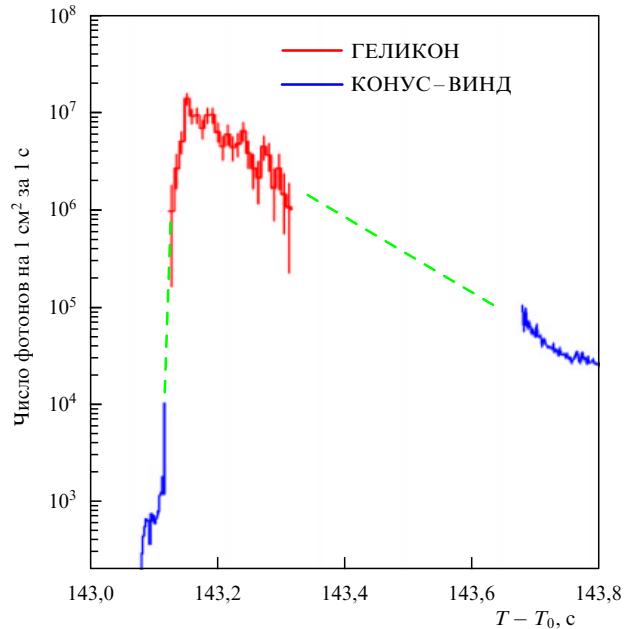


Рис. 5. Восстановленный временной профиль начального импульса гигантской вспышки SGR 1806-20, по данным КОНУС-ВИНД и ГЕЛИКОН.

передним фронтом длительностью $\approx 5-15$ мс и с экспоненциальным спадом с постоянной $\approx 50-70$ мс при общей длительности импульса около 200–300 мс. Энергетический спектр излучения должен быть весьма жёстким в начальной части, и по ходу всплеска он должен быстро эволюционировать, заметно смягчаясь к концу импульса. Анализ характеристик коротких всплесков по данным эксперимента КОНУС-ВИНД показал, что доля событий с указанными характеристиками в общем числе коротких всплесков не превышает нескольких процентов.

3 ноября 2005 г. КОНУС-ВИНД зарегистрировал интенсивный короткий и жёсткий гамма-всплеск GRB 051103 [12]. Локализация всплеска межпланетной сетью IPN (Interplanetary Network), в которую входит большинство работающих на орбите экспериментов по наблюдению гамма-всплесков, показала, что его источник располагается близко к группе галактик M81, находящейся от нас на расстоянии $\approx 3,6$ Мпк. Кривая блеска события, зарегистрированная с временным разрешением 2 мс, представляла собой одиночный импульс с крутым передним фронтом (≤ 6 мс) и экспоненциальным спадом ≈ 55 мс. Полная длительность всплеска составила 170 мс. Изменения жёсткости во времени указывали на явное смягчение спектра излучения. Из трёх детальных энергетических спектров, снятых со временем накопления 64 мс, только первый спектр содержал интенсивную жёсткую компоненту с энергией до 10 МэВ. Сравнение результатов исследования распределения вещества в группе галактик M81, полученных методами оптической, рентгеновской и радиоастрономии, с данными локализации источника гамма-всплеска свидетельствовало в пользу его ассоциации с гигантской вспышкой от расположенного в ней гамма-репитера. Энергия вспышки в этом случае составила бы $\sim 7 \times 10^{46}$ эрг. Эта величина сравнима с энергией гигантской вспышки в SGR 1806-20 [11].

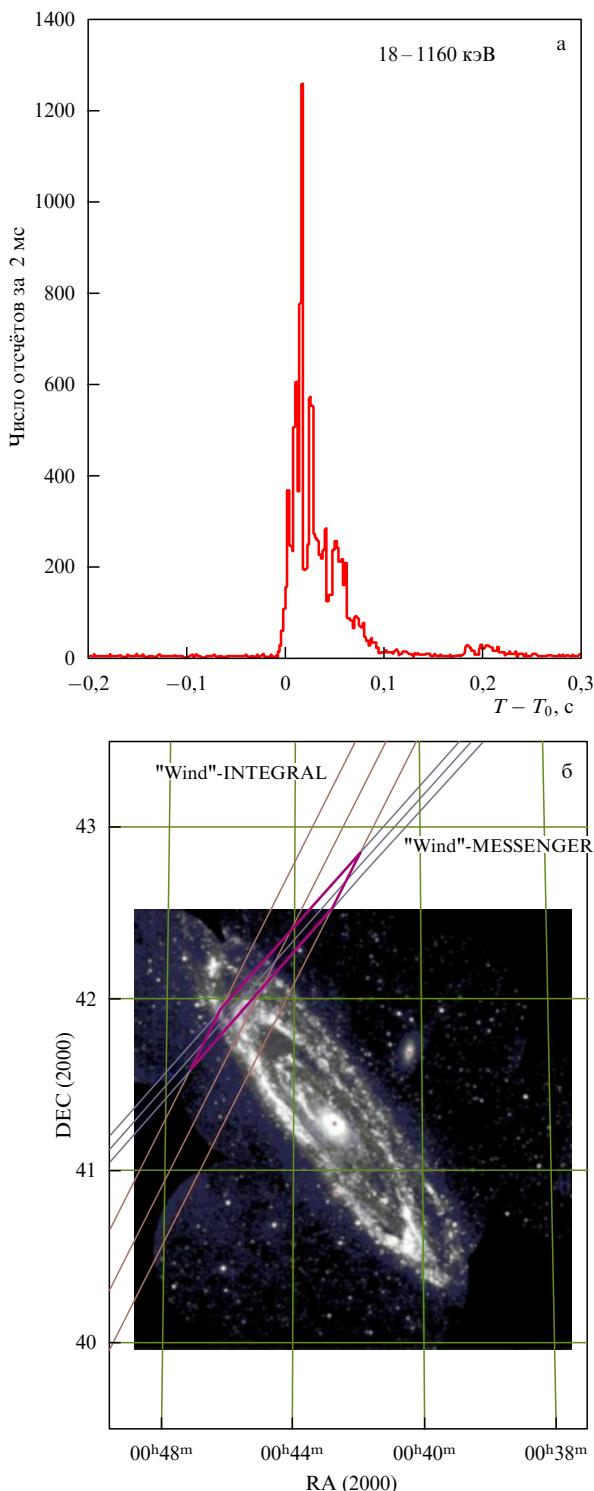


Рис. 6. GRB 070101 — гигантская вспышка от гамма-репитера SGR 0044+42 в туманности Андромеды: кривая блеска по данным КОНУС–ВИНД и локализация источника в сети IPN.

Ещё один короткий гамма-всплеск с жёстким спектром был зарегистрирован в эксперименте КОНУС–ВИНД 1 февраля 2007 г. (рис. 6а [13]). Он имел самую высокую интенсивность излучения за всю историю наблюдений. Временной профиль события представляет собой узкий импульс с передним фронтом ≈ 20 мс и более пологим спадом при общей длительности около 180 мс. Для всплеска характерна сильная спектральная

эволюция, показывающая, что жёсткая компонента излучения наблюдается в пределах первых 80 мс. Всплеск был также локализован сетью IPN. Область локализации, показанная на рис. 6б, совпадает с внешними рукавами галактики Андромеды (M31), расположенной на расстоянии ≈ 780 кпк. Детальное рассмотрение результатов наблюдений галактики Андромеды космическими инфракрасным, ультрафиолетовым и рентгеновским телескопами и сравнение характеристик всплеска GRB 070201 с характеристиками ранее наблюдавшихся гигантских вспышек от гамма-репитеров дали убедительные свидетельства тому, что это событие является гигантской вспышкой от гамма-репитера в галактике Андромеды. Источники всплесков 3 ноября 2005 г. и 1 февраля 2007 г., первые внегалактические мягкие гамма-репитеры, получили обозначения SGR 0952+69 (M81) и SGR 0044+42 (M31) [13].

В эксперименте КОНУС–ВИНД получены новые данные о сильной спектральной переменности нового источника мягких повторных всплесков SGR 0501+4516, открытого в августе 2008 г. телескопом BAT (Burst Alert Telescope) с борта космического аппарата "Swift". Пять всплесков от нового гамма-репитера были зарегистрированы и детально изучены с помощью гамма-спектрометра КОНУС–ВИНД [14]. Важной особенностью нового репитера явилась сильная спектральная переменность излучения повторных всплесков. Подобная корреляция жёсткости излучения повторных всплесков и их интенсивности ранее наблюдалась только для гамма-репитера SGR 1627-41 [9]. Из последних результатов, полученных в экспериментах КОНУС, следует отметить открытие 5 июня 2009 г. нового источника мягких повторных гамма-всплесков — гамма-репитера SGR 0418+5729 [15]. Эта работа была осуществлена в совместных наблюдениях детекторов GBM обсерватории Ферми, спектрометра КОНУС-РФ обсерватории КОРОНАС–ФОТОН и телескопа BAT обсерватории "Swift".

Эксперимент КОНУС–ВИНД, благодаря высокой чувствительности, исключительно благоприятному месту наблюдений в межпланетном пространстве и оптимальной программе наблюдений, является уникальным источником информации о временных и спектральных характеристиках гамма-всплесков в интервале энергий от 10 кэВ до 10 МэВ. Эти данные, составляющие неотъемлемую часть современных всеволновых исследований источников гамма-всплесков на космических аппаратах и сети наземных оптических и радиотелескопов, широко востребованы. Благодаря высокоточной и оперативной локализации источников гамма-всплесков телескопом BAT/"Swift" исследования на сети наземных телескопов начинаются, буквально, спустя единицы и десятки секунд после начала события. На рисунке 7 показана кривая блеска в гамма-лучах (эксперимент КОНУС–ВИНД) и в видимой области спектра (телескопы TORTORA (CAO РАН) и "Pi of the Sky") для знаменитого всплеска GRB 080319B, яркость которого в диапазоне оптического излучения достигала 5,5 звёздной величины. Всеэволовные исследования показывают, что оптическое излучение и гамма-излучение этого всплеска начинаются в одно и то же время. Это даёт веское свидетельство их происхождения из одной и той же физической области [16].

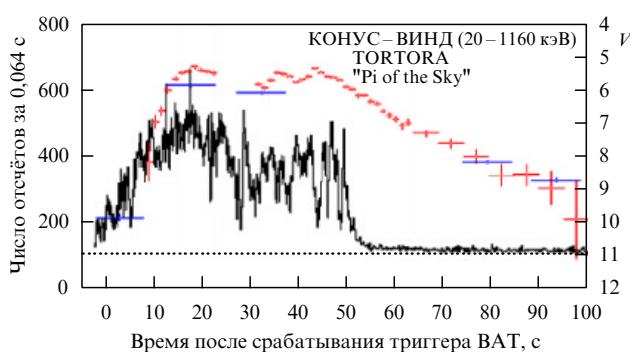


Рис. 7. Оптическое и гамма-излучение события GRB 080319B, по данным КОНУС – ВИНД, TORTORA и "Pi of the Sky" [16]. *V* — характеристика оптической яркости всплеска.

В заключение следует подчеркнуть, что в ФТИ создана надёжная и адекватная задаче исследования космических гамма-всплесков аппаратура КОНУС. Российско-американский эксперимент КОНУС – ВИНД по важности, качеству и полноте получаемой информации выдвинулся на передовые позиции в исследованиях экстремальных взрывных явлений во Вселенной. В ходе 15-летнего непрерывного эксперимента обнаружено и изучено более 3500 космических гамма-всплесков, исследована всплесковая активность всех известных гамма-репитеров. Сводка данных о наблюдениях гамма-репитеров в экспериментах КОНУС содержится в "Konus catalog of SGR activity: 1978 to 2000" [17]. Подготовлены печатная и электронная версии второго каталога данных наблюдений гамма-репитеров в экспериментах КОНУС – ВИНД, КОНУС, ГЕЛИКОН и КОНУС-РФ. Этот каталог охватывает период наблюдений с 1994 г. по 2009 г. и содержит данные о всех известных источниках мягких повторных всплесков и гигантских вспышек от них, полученные с помощью идентичных приборов. Сводка данных о наблюдениях коротких гамма-всплесков за период 1994–2002 г. содержится в электронном каталоге [/www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog/](http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog/). Готовится печатная и электронная версии каталога коротких всплесков, охватывающие период 1994–2009 гг.

Список литературы

1. Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A *Astrophys. J. Lett.* **182** L85 (1973)
2. Мазец Е П, Голенецкий С В, Ильинский В Н *Письма в ЖЭТФ* **19** 126 (1973) [Mazets E P, Golenetskii S V, Il'inskii V N *JETP Lett.* **19** 77 (1973)]
3. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Под ред. Р А Сюняева) (М.: Физматлит, 1982) с. 216 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 1 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1981) p. 205]
4. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия, Вып. 32, Под ред. Р А Сюняева) (М.: ВИНИТИ, 1987) с. 16 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 6 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1988) Pt. 3, p. 283]
5. Paciesas W S et al. *Astrophys. J. Suppl.* **122** 465 (1999)
6. Мазец Е П и др. *Письма в Астрон. журн.* **5** 307 (1979) [Mazets E P et al. *Astron. Lett.* **5** 163 (1979)]
7. Mazets E P et al. *Nature* **282** 587 (1979)
8. Golenetskii S V, Ilyinskii V N, Mazets E P *Nature* **307** 41 (1984)
9. Mazets E P et al. *Astrophys. J. Lett.* **519** L151 (1999)
10. Hurley K et al. *Nature* **397** 41 (1999)
11. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 3 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 1 (2007)]
12. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 22 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 19 (2007)]
13. Mazets E P et al. *Astrophys. J.* **680** 545 (2008)
14. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Lett.* **698** L82 (2009)
15. Van der Horst A J et al. *Astrophys. J. Lett.* **711** L1 (2010)
16. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
17. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Suppl.* **137** 227 (2001)

PACS numbers: 95.55.Ka, 95.85.Pw, 98.70.Rz
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004h.0424

Открытие быстрой оптической переменности гамма-всплеска GRB 080319B и перспективы широкоугольного оптического мониторинга высокого временного разрешения

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, С.Ф. Бондарь, В.Л. Плохотниченко, А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони

1. Введение

Систематическое изучение переменности ночного неба на субсекундной временной шкале является важной, но по сей день практически нерешённой задачей. Необходимость такого рода наблюдений для поиска и изучения нестационарных объектов с неизвестной заранее локализацией отмечалась ещё Бонди [1]. Исследования в этой области проводились и ранее [2, 3], но из-за технических сложностей в них либо достигалось высокое временное разрешение на уровне нескольких десятков микросекунд при мониторинге малых, размером 5'–10', полей, либо использовалось временное разрешение 5–10 с при широких (20°–30°) полях. Функционирующие в настоящее время широкопольные мониторинговые системы, такие как WIDGET [4], RAPTOR [5], BOOTES [6] и "Pi of the Sky" [7], имеют большие поля зрения при достаточно хорошем пределе обнаружения, но низкое временное разрешение, что затрудняет их использование для регистрации быстрых транзитов.

Приведём несколько примеров таких: вспышки звёзд типа UV Cet, передние фронты которых могут длиться 0,2–0,5 с [8], 30 % гамма-всплесков, продолжающихся менее 2 с, тогда как отдельные детали их кривых блеска делятся вплоть до 1 мс [9]. Представляют также значительный интерес очень быстрые метеоры, возможно, рождающиеся за пределами Солнечной системы [10].

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Карачаево-Черкесия, РФ. E-mail: beskin@sao.ru

С.Ф. Бондарь. Научно-исследовательский институт прецизионного

приборостроения, Москва, РФ

А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони

(A. Guarneri, C. Bartolini, G. Greco, A. Piccioni).

Astronomy Department, Bologna University, Bologna, Italy

Ещё одной задачей, требующей проведения регулярных широкопольных наблюдений с высоким временным разрешением является мониторинг околоземного пространства. Траектории большого числа спутников, а также огромного массива малых частиц космического мусора достаточно быстро меняются, причём скорости этих объектов весьма велики, потому наблюдение их обычными методами представляет собой весьма сложную задачу.

Начиная с конца 1990-х годов мы разрабатываем стратегию оптического мониторинга с высоким временным разрешением областей небесной сферы, сравнимых по размеру с полем зрения космических гамма-телескопов. Изначально предлагалось использовать инструменты с большими зеркалами относительно низкого качества [11, 12], например черенковские телескопы и солнечные концентраторы, с массивами фотоумножителей при временному разрешении вплоть до нескольких микросекунд. Затем, однако, мы остановились на проекте широкопольной камеры с объективом, имеющим относительно малый диаметр, оснащённой электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) для эффективного сокращения фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей (ПЗС — прибор с зарядовой связью). Прототип такой системы, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), который был введён в строй в 2003 г., расположен вблизи 6-метрового телескопа БТА (Большой телескоп азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории РАН [13, 14]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RApidi) [15], установленная в 2006 г. на монтировке роботического телескопа REM (Rapid Eye Mount) [16] в обсерватории Ла Силла (Чили) (ESO — European Southern Observatory), составляет вместе с ним двухтелескопный комплекс TORTOREM [17]. Именно эта камера обнаружила и позволила детально исследовать оптическое излучение самого яркого на данный момент гамма-всплеска GRB 080319B [18–20].

В данном докладе описывается схема и особенности реализации камеры TORTORA, приводятся некоторые результаты её работы, включая всесторонний анализ данных по всплеску GRB 080319B, а также обсуждается проект широкопольной мониторинговой системы следующего поколения, способной не только обнаруживать гораздо более слабые транзиенты, но и проводить их многоцветную фотометрию и поляриметрию.

2. Описание широкопольных камер FAVOR и TORTORA

Параметры камер FAVOR и TORTORA в сравнении с параметрами других существующих на данный момент широкопольных мониторинговых систем приведены в табл. 1. Видно, что лишь камеры FAVOR и TORTORA

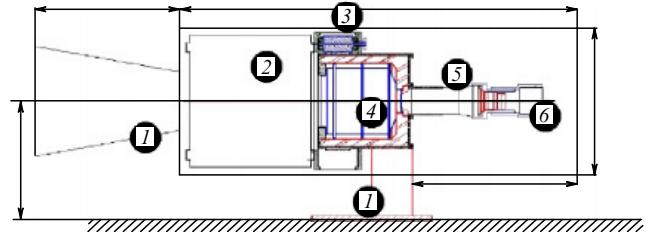


Рис. 1. Схема камеры TORTORA: 1 — защитная бленда, 2 — главный объектив, 3 — узел фокусирования главного объектива, 4 — электронно-оптический преобразователь, 5 — оптика переброса и узел фокусирования ПЗС-матрицы, 6 — быстрая ПЗС-матрица.

Таблица 1. Основные работающие на данный момент оптические широкопольные мониторинговые системы

Название	Поле зрения, град	Разрешение, с	Проницание
WIDGET	62 × 62	5	10 ^m
RAPTOR A/B	40 × 40	60	12 ^m
RAPTOR Q	180 × 180	10	10 ^m
BOOTES	16 × 11	30	12 ^m
BOOTES-AllSky	180 × 180	30	10 ^m
"Pi of the Sky"	33 × 33	10	11,5 ^m
AROMA-W	25 × 35	5–100	10,5 ^m –13 ^m
MASTER-VWF	20 × 21	5	11,5 ^m
MASTER-Net	30 × 30	1	9 ^m
FAVOR*	16 × 24	0,13	10 ^m –11,5 ^m
TORTORA*	24 × 32	0,13	9 ^m –10,5 ^m

* Для камер FAVOR и TORTORA предельное проницание соответствует обнаружению транзиента на уровне 3σ на отдельном кадре и может отличаться от реального предела обнаружения в используемом разностном методе.

обладают как высоким временным разрешением, так и относительно большим размером поля зрения.

Схема камеры TORTORA приведена на рис. 1, её параметры даны в табл. 2, а изображение представлено на рис. 2. Прибор состоит из главного объектива 2, узла его фокусирования 3, электронно-оптического преобразователя 4, используемого для масштабирования и усиления изображения, оптики переброса 5 и быстрой малошумящей ПЗС-матрицы 6. Камера смонтирована на роботическом телескопе REM, имеющем альт-азимутальную монтировку.

Быстрая ПЗС-матрица регистрирует 7,5 кадров в секунду при времени экспозиции 0,128 с, интервалы между отдельными экспозициями при этом пренебрежимо малы. Информация с матрицы распространяется по локальной гигабитной сети и сохраняется в дисковом RAID-массиве объёмом 1 терабайт. Поток данных при этом составляет около 20 Мб s^{-1} , поэтому информация, полученная за ночь наблюдений, может быть сохранена лишь в течение одного дня.

Таблица 2. Технические параметры камеры TORTORA

Главный объектив	ЭОП	ПЗС-матрица			
Диаметр	120 мм	Фотокатод	S20	Модель	VS-CTT285-2001
Фокус	150 мм	Диаметр	90 мм	Размеры	1388 × 1036 пикселей
D/F	1/1,2	Усиление	150	Масштаб	81"/пиксель
Поле зрения	24 × 32 град	Масштабирование	7,7	Экспозиция	0,13–10 с
		Квантовый выход	10 %	Размер пикселя	6,45 мкм



Рис. 2. Изображение камеры TORTORA, смонтированной на роботическом телескопе REM в обсерватории Ла Силла (ESO, Чили).

Помимо этого данные передаются на выделенный компьютер для обработки в реальном времени с помощью специализированного программного обеспечения, работающего под управлением операционной системы Linux. При этом выделяются и классифицируются транзиентные объекты различных типов и отсеиваются уже известные объекты путём сравнения информации о них с данными из каталогов спутников и звёзд.

3. Методика обнаружения транзиентов

Широкопольные мониторинговые камеры высокого временного разрешения могут применяться для обнаружения и исследования различных классов транзиентных событий — переменных звёзд, сверхновых, активных галактических ядер, событий микролинзирования, покрытых звёзд планетами — с постоянными, хотя и неизвестными заранее координатами. С другой стороны, камеры типа FAVOR и TORTORA могут также отслеживать и движущиеся объекты: искусственные спутники, элементы космического мусора, кометы, астероиды и метеоры. Для решения этих задач были разработаны специализированные алгоритмы обработки данных.

В связи с высокой интенсивностью потока наблюдательной информации практически невозможно использовать для её анализа в реальном времени стандартные фотометрические пакеты, и поэтому мы разработали специальный быстрый метод выделения транзиентов, основанный на изучении статистического поведения интенсивности излучения I в каждом пикселе изображения с течением времени. Текущее значение I сравнивается с бегущим средним

$$\langle I \rangle = \sum \frac{I}{N}, \quad (1)$$

оцениваемым по некоторому числу (скажем, $N = 100$, что соответствует временному окну в 13 с) предшествующих кадров, и выборочной дисперсией

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum I^2 - (\sum I)^2 / N}{N - 1}} \quad (2)$$

и определяется значимость его отклонения от среднего

$$A = \frac{I - \langle I \rangle}{\sigma_I}. \quad (3)$$

Затем все пиксели, имеющие высокую значимость, группируются в пространственно-связные кластеры — наблюдаемые объекты. Некоторые из них, например однопиксельные события, отсеиваются как шумовые.

После выделения всех объектов на данном кадре проводится сравнение их положений с траекториями транзиентов, выделенных ранее (все объекты предполагаются движущимися, неподвижные при этом считаются движущимися с нулевой скоростью). Обнаружение объекта на трёх последовательных кадрах (на временной шкале 0,4 с) достаточно для вынесения суждения о его принадлежности к одному из трёх возможных классов — "шумовых" событий, если объект исчезает после одного кадра, движущихся объектов, если он показывает статистически значимое изменение положения, либо неподвижных транзиентов. Случай вспышек медленно движущихся высокоорбитальных искусственных спутников выделяются путём сравнения положения транзиентов с данными из регулярно обновляемых каталогов орбитальных элементов спутников [21].

Выделение метеоров, однако, требует несколько иного подхода, поскольку, как правило, они видны лишь на одном-двух кадрах. Более того, скорости их движения существенно выше, чем у искусственных спутников. Подобные события выделяются по высокой яркости и протяжённости.

Астрометрическая и фотометрическая привязки выполняются регулярно (для камеры TORTORA один раз в минуту, так как альт-азимутальная монтировка приводит к систематическому вращению поля зрения) посредством отдельной процедуры фотометрирования всех звёзд на кадре с помощью программы SExtractor [22] и отождествления их в астрометрическом каталоге Tycho-2 [23].

Таким образом, система анализа данных в реальном времени позволяет выделять и классифицировать любые достаточно яркие оптические транзиенты за 0,4 с после их появления и до момента падения их блеска ниже уровня обнаружения разностным методом. Пример такой достаточно короткой вспышки показан на рис. 3. После обнаружения и классификации информация о событии может передаваться в сеть для проведения его детального исследования. Кроме того, все полученные в реальном времени данные о транзиенте, включая его кривую блеска, траекторию, а также изображения его окрестностей, могут сохраняться для дальнейшего изучения.

4. Результаты, полученные камерой TORTORA

Широкопольная мониторинговая камера TORTORA, которая эксплуатируется с июня 2006 г., примерно половину всего доступного наблюдательного времени (когда телескоп REM не выполняет плановых наблюдений) проводит мониторинг областей небесной сферы, наблюдаемых в данный момент космическим аппаратом "Swift", в соответствии с телеметрической информацией, распространяемой в реальном времени по сети GCN (Gamma-ray Burst Coordination Network) [24].

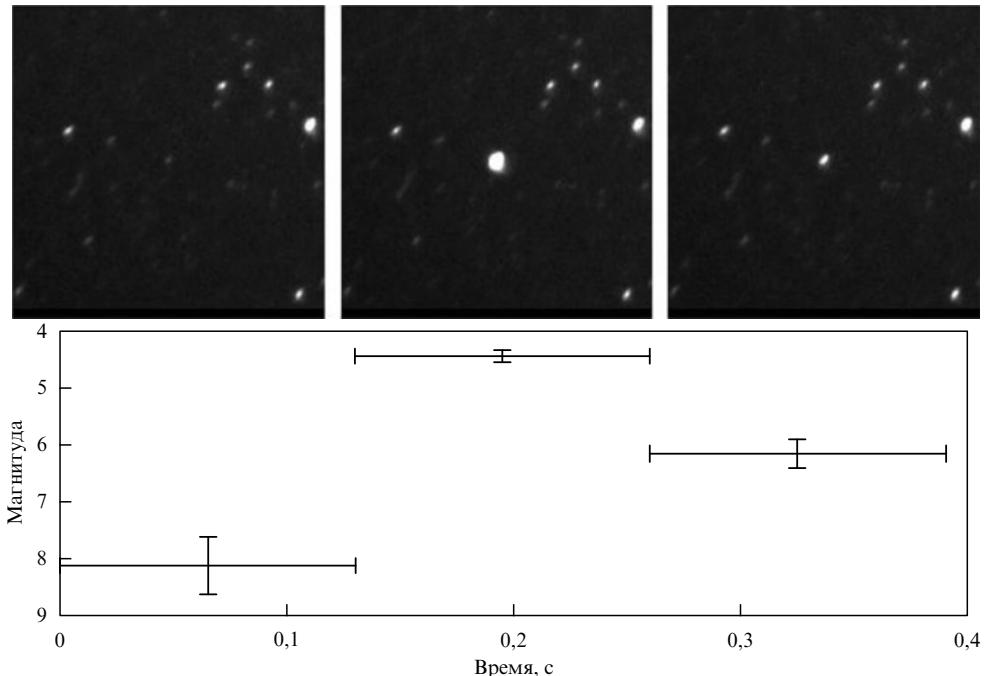


Рис. 3. Пример короткой вспышки (результат вращения высокогорббитального спутника), зафиксированной мониторинговой камерой. Полная длительность события 0,4 с, оно обнаруживается на трёх последовательных кадрах.

Таблица 3. Верхние пределы постоянной составляющей оптического потока, а также синусоидальной переменной компоненты блеска возможных оптических транзиентов

Всплеск	Начало наблюдений, с	Предел за 13 с (100 кадров)	Диапазон частот, Гц	Верхний предел
GRB 060719	59	12,4	0,01–3,5	15,3 ^m
GRB 061202	92	11,3	0,1–3,5	14,0 ^m
GRB 060719	118	11,3	0,01–3,5	16,4 ^m

Каждую наблюдательную ночь камера фиксирует примерно 300 метеоров и 150 пролётов спутников различной яркости.

4.1. Наблюдения гамма-всплесков в реагирующем режиме

Благодаря автоматической реакции телескопа REM на сообщения об обнаружении гамма-всплесков космическими аппаратами, камера TORTORA смогла пронаблюдать области локализации трёх гамма-всплесков вскоре после их начала [25–27].

Сводка полученных в этих наблюдениях верхних пределов для блеска соответствующих оптических транзиентов приведена в табл. 3. Пределы постоянной составляющей потока были получены по суммам 100 последовательных кадров, что соответствует эффективному временному разрешению 12,8 с.

4.2. Наблюдения гамма-всплеска GRB 080319B

19 и 20 марта 2008 г. оказались наиболее плодотворными для широкопольных мониторинговых систем по всему миру. Тогда в течение 24 часов были зарегистрированы пять гамма-всплесков, один из которых, GRB 080319B [28], оказался самым ярким из наблюдавшихся как в гамма-диапазоне, так и в оптическом диапазоне и первым, который был независимо обнаружен наземными мониторинговыми системами. Область его локализации

на небесной сфере наблюдалась до, во время и после гамма-события камерами "Pi of the Sky" [29], RAPTOR Q [30] и TORTORA [18].

Наша камера TORTORA проводила мониторинг области всплеска GRB 080319B [18, 19] начиная с 05:46:22 UT, примерно за полчаса до его начала (момент обнаружения его в гамма-диапазоне — 06:12:49 UT), в течение периода существования всплеска, а также на протяжении нескольких десятков минут после его окончания. В промежутке между 06:13:13 и 06:13:20 UT роботический телескоп REM произвёл автоматическое перенаведение по координатам, полученным со спутника "Swift" [28], что переместило область события с края поля зрения камеры в его центр. Примеры изображений области события на разных его стадиях приведены на рис. 4.

Полученные камерой изображения были обработаны с помощью стандартной процедуры редукции, состоящей из вычитания шумов ПЗС-матрицы и деления на плоское поле. Измерение потоков было проведено с использованием специализированной версии метода апертурной фотометрии и кода DAOPHOT пакета IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) для всего набора данных, за исключением промежутка перенаведения. В этой фазе изображения как объекта, так и соседних звёзд были деформированы вследствие их существенного смещения за время экспозиции, что значительно понизило отношение сигнала к шуму. В результате на отдельных кадрах поток нельзя было уверенно измерить. Мы произвели сложение неперекрывающихся последовательностей из 10 кадров с соответствующим сдвигом, компенсирующим движение звёзд. Для полученных изображений треков отношение сигнала к шуму примерно соответствует таковому на остальных участках кривой блеска (рис. 5б). Затем мы измерили потоки от объекта и соседних звёзд на суммарных кадрах как посредством апертурной фотометрии с эллиптическими

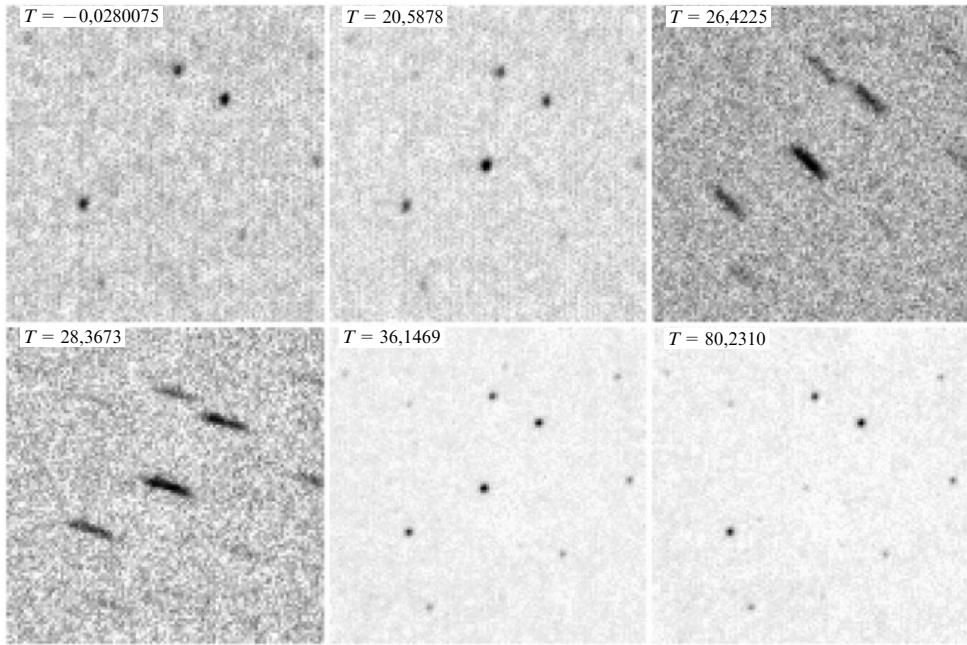


Рис. 4. Изображение оптического транзинта, связанного с гамма-всплеском GRB 080319B, на разных стадиях его развития по результатам наблюдений камеры TORTORA. Приведены суммы 10 последовательных кадров с эффективным временным разрешением 1,3 с для момента начала гамма-события ($T \approx 0$), времени максимального блеска первого пика ($T \approx 20,6$ с), двух моментов в его середине ($T \approx 26,4$ с и $T \approx 28,4$ с), во время последнего пика ($T \approx 36$ с) и на стадии раннего послесвечения ($T \approx 80$ с). Размер поля составляет $2,5 \times 2,5$ градусов. Звёздные профили на третьем и четвёртом кадрах деформированы в процессе перенаведения (с $T \approx 24$ с по $T \approx 31$ с) роботического телескопа REM, на котором установлена камера, по координатам всплеска, полученным с космического телескопа "Swift". Исходное положение всплеска находилось на краю поля зрения камеры, в результате перенаведения оно сместилось к центру поля зрения, что привело к некоторому улучшению качества изображений.

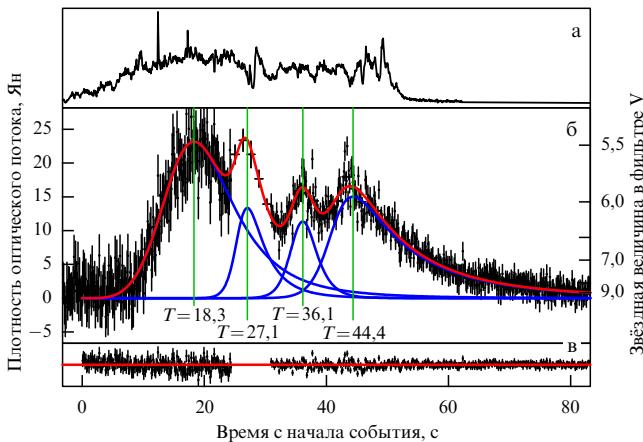


Рис. 5. Кривая блеска оптического компаньона гамма-всплеска GRB 080319B по данным широкопольной камеры TORTORA. (а) Гамма-излучение, начинающееся в момент $T \approx -4$ с и затухающее при $T \approx 55$ с. (б) Данные высокого временного разрешения (экспозиция 0,13 с, выделены серым цветом) доступны для всего периода гамма-активности за исключением интервала перенаведения телескопа REM ($24,5 < T < 31$ с), тогда как данные низкого разрешения, полученные по суммам каждого 10 последовательных кадров с эффективным временем экспозиции 1,3 с, доступны для всей длительности события. (в) Невязки аппроксимации кривой блеска четырьмя практически равнотстоящими друг от друга пиками с параметрами, приведёнными в табл. 4.

апертурами, так и методом аппроксимации функции рассеяния точки. Оба метода дали согласующиеся между собой результаты. Мы отдельно проверили поведение потоков от звёзд сравнения и не нашли в них никаких особенностей, которые поставили бы под сомнение точность фотометрии и переменность блеска объекта

на данном интервале. Эффективное временнóе разрешение для него составило 1,3 с; для всех других фаз всплеска фотометрия проводилась как с высоким (0,13 с, отдельные кадры), так и с низким (1,3 с, суммы 10 последовательных изображений) временным разрешением. Полученные инструментальные звёздные величины затем были приведены к V-полосе джонсоновской фотометрической системы путём нормировки на расположенные поблизости звёзды каталога Tycho-2 [23]. Сравнение полученной таким образом кривой блеска, приведённой на рис. 5, с данными других, наблюдавших это событие мониторинговых камер, таких как "Pi of the Sky" [29] и RAPTOR (RAPid Telescope for Optical Response) [30], показало хорошее совпадение результатов.

Оптическое излучение транзинта по данным камеры TORTORA уверенно обнаруживается примерно с десятой секунды после начала гамма-события. Его интенсивность возрастает как $\sim t^4$, достигает звёздной величины $V \approx 5,5^m$, затем изменяется в полтора-два раза на временнóй шкале в несколько секунд и, наконец, убывает как $\sim t^{-4,6}$ вплоть до выхода за предел чувствительности камеры спустя примерно 100 с. Гамма-излучение при этом заканчивается на 57-й секунде с начала события.

На кривой блеска транзинта выделяются четыре пика с близкими амплитудами, длительностями и формами. Мы аппроксимировали их суммой четырёх кривых, каждая из которых гладко соединяет два степенных выражения, описывающих передний и задний фронты соответственно [31],

$$F = F_0 \left(\frac{t}{T_0} \right)^r \left(\frac{d}{d+r} + \frac{r}{d+r} \left(\frac{t}{T_0} \right)^{r+1} \right)^{-(r+d)/(r+1)}. \quad (4)$$

Таблица 4. Параметры оптимальной аппроксимации для разложения кривой блеска транзиента на четыре пика, описываемых выражением (4) и показанных на рис. 5

T_0 , с	F_0 , Ян	r	d	ΔT , с
$18,3 \pm 0,3$	$23,2 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,4$	$-5,4 \pm 4,1$	$8,7 \pm 0,4$
$27,0 \pm 0,3$	$13,4 \pm 3,4$	$24,8 \pm 8,3$	$-9,7 \pm 4,9$	$9,1 \pm 0,4$
$36,1 \pm 0,2$	$11,4 \pm 1,7$	$25,9 \pm 7,6$	$-22,0 \pm 17$	$8,3 \pm 0,5$
$44,4 \pm 0,5$	$15,1 \pm 1,8$	$21,9 \pm 3,3$	$-5,1 \pm 0,2$	

Примечание. ΔT — расстояние между данным и предыдущим пиками. Вероятность случайного выпадения таких расстояний между пиками, которая оценивалась путём вычисления статистики $\Delta T_{1,2}\Delta T_{2,3}\Delta T_{3,4}/\Delta T_{1,4}^3$ по 10^5 реализациям четырёх пуассоновских пиков, составила 10^{-3} .

Здесь T_0 и F_0 соответствуют положению пика и его интегральному потоку, r и d — показатели степени для переднего и заднего фронтов соответственно. Параметры этих кривых приведены в табл. 4. Интервалы между максимумами пиков оказываются практически одинаковыми — около 8,5 с, что соответствует 4,4 с при красном смещении GRB 190308B $z = 0,937$ [19]. Вероятность случайной комбинации таких интервалов между четырьмя пиками составляет 10^{-3} (см. табл. 4). В спектре мощности центральной части кривой блеска также при-

существует выброс на частоте, соответствующей интервалу между пиками, при уровне значимости 10^{-15} (рис. 6б). Таким образом, можно утверждать, что нами обнаружена периодичность вариаций оптического излучения транзиента на временной шкале в несколько секунд.

Спектр мощности гамма-излучения, найденный по данным детектора BAT космического телескопа "Swift", изображённый на рис. 6а, не показывает явно выделенных деталей на данной частоте. Это может объясняться существенным вкладом стохастической переменности, имеющей вид дробового шума, в частотном интервале от нескольких десятков секунд до нескольких долей секунды [32], что может скрывать периодическую структуру с не очень большой амплитудой в случае мультиплекционного шума.

Для анализа переменности кривой блеска на малых временах мы вычли из неё гладкую кривую с четырьмя пиками, согласно проведённой ранее аппроксимации, и исследовали эту разность, представленную на рис. 5в. Фурье-анализ различных её интервалов выявил признаки периодических вариаций интенсивности во время последнего пика, в интервале от $T = 40$ с до $T = 50$ с (см. рис. 6). В остальных фазах кривой блеска нет признаков сущест-

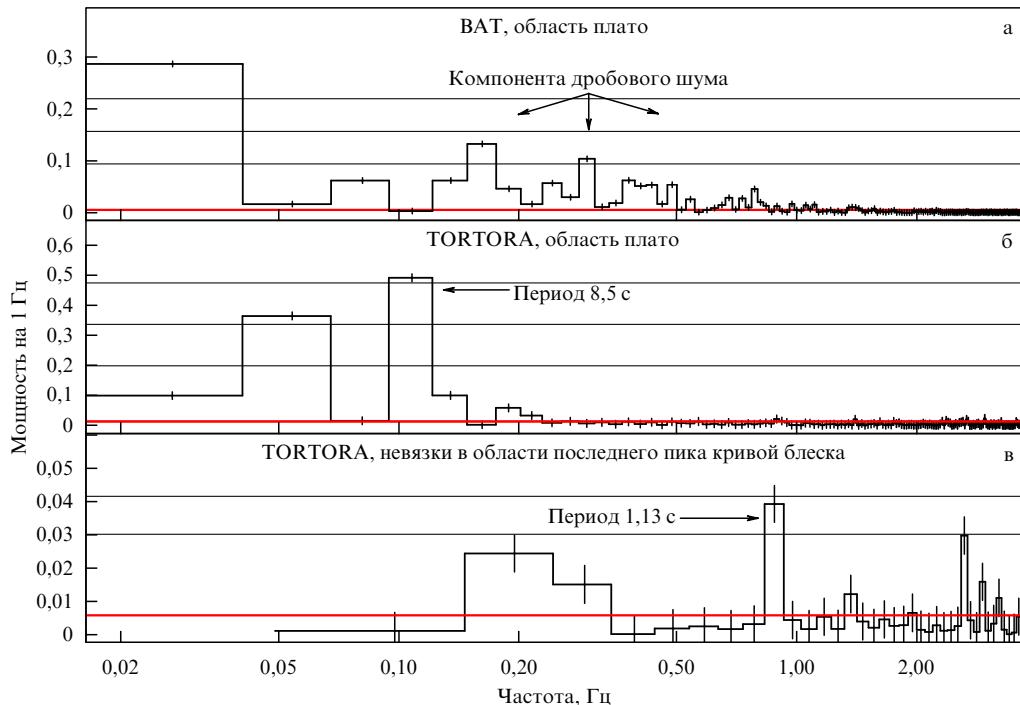


Рис. 6. Спектры мощности центральной части (от $T = 13$ с до $T = 50$ с) всплеска по данным гамма-телескопа BAT (Burst Alert Telescope) космического аппарата "Swift" (сумма всех спектральных каналов) (а) и оптической камеры TORTORA (б), а также спектр мощности разностей оптической кривой блеска после вычитания гладкой аппроксимирующей функции, изображённой на рис. 5, для интервала последнего пика (от $T = 40$ с до $T = 50$ с) (в). Линейный тренд был вычен из всех кривых. Отсутствующая часть оптической кривой (интервал от $T = 24,5$ с до $T = 31$ с) высокого временного разрешения была заполнена гауссовым белым шумом с дисперсией, соответствующей таковой в остальной части данных, и средними значениями, лежащими на гладкой аппроксимирующей кривой. Ошибки и уровни значимости спектров оценивались бутстреп-методом — посредством генерации большого числа синтетических кривых блеска при случайному перемешивании величин интенсивности в исходной кривой, что полностью уничтожает её временнную структуру, сохраняя, тем не менее, распределение этих величин. Уровни значимости при этом соответствуют вероятности случайного появления значения, превышающего заданное, в любом из частотных бинов для спектра мощности полностью случайного процесса с выборочным распределением, совпадающим с наблюдаемым. Особенность в области 9 с, которая ясно видна в спектре мощности средней части кривой блеска при уровне значимости около 10^{-15} , соответствует четырём, отделённым друг от друга практически равными интервалами, пикам на кривой блеска. Низкочастотные компоненты как в оптическом спектре, так и в гамма-спектре соответствуют двум различным уровням интенсивности в кривых блеска. Особенность в спектре мощности разностной кривой с уровнем значимости $\sim 0,01$ может соответствовать периодической компоненте с амплитудой 10 % и периодом $\approx 1,13$ с, обнаруживающейся в течение последнего пика. Остальные интервалы разностной кривой блеска не показывают подобных особенностей.

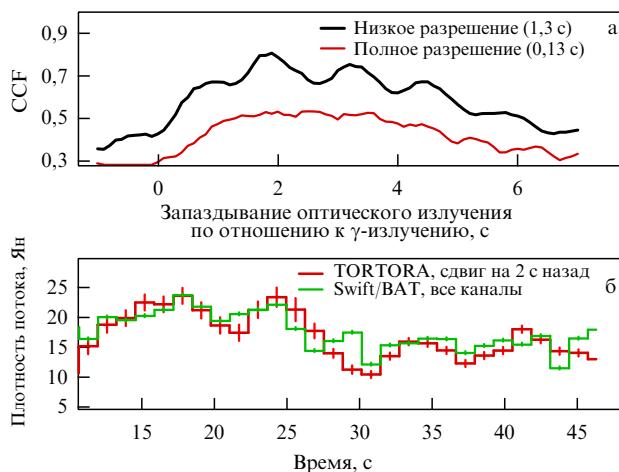


Рис. 7. (а) Кросскорреляция (CCF) гамма-кривой блеска по данным "Swift"/BAT (сумма всех спектральных каналов) и оптической кривой блеска по данным камеры TORTORA как с полным (0,13 с), так и с низким (1,3 с) временным разрешением. Для анализа использовалась лишь центральная часть всплеска за исключением фаз нарастания и спада излучения. Коэффициент корреляции вычислялся для каждого значения сдвига путём переразбиения соответствующим образом сдвинутой гамма-кривой блеска к бинам оптической. Пиковая корреляция для данных высокого временного разрешения (0,13 с) существенно меньше, чем для низкого (1,3 с), вследствие их более высокой зашумлённости. Квазипериодические вариации величины корреляции связаны с переходом острого пика кривой блеска в гамма-диапазоне на $T+30$ с через границы отдельных бинов. (б) Оптическая кривая блеска с низким разрешением, сдвинутая на 2 с назад, а также соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне. Коэффициент корреляции r при этом близок к 0,82 при уровне значимости 5×10^{-7} .

венной переменности на частотах 0,1–3,5 Гц (0,3–10 с) с мощностью, превышающей 15 % до перенаведения и 10 % после него. Для того чтобы исключить аппаратную природу обнаруженных периодических вариаций, мы провели аналогичный анализ для звёзд сравнения и уровня фона, который не показал наличия подобных особенностей.

Уровень значимости этого пика на спектре мощности равен примерно 1 %. Период и амплитуда соответствующей синусоидальной компоненты, полученные аппроксимацией методом нелинейного метода наименьших квадратов (МНК), составляют 1,13 с (0,6 с в системе отсчёта всплеска) и 9 % соответственно.

Для сравнения временной структуры кривых блеска в оптическом и гамма-диапазонах мы провели кросскорреляционный анализ средней части всплеска, исключая очевидным образом скоррелированные участки нарастания и спада интенсивности [33] (рис. 7). Корреляция между данными высокого временного разрешения не превышает 0,5 за счёт существенного вклада в диапазоне 0,1–1 с шумовой компоненты как в оптической кривой блеска (ошибки измерения), так и в гамма-кривой блеска (физическая высокочастотная переменность типа дробового шума [32]). Для данных низкого разрешения с шагом 0,13 с коэффициент корреляции, напротив, достигает 0,82 при сдвиге оптической кривой на 2 с назад по отношению к гамма-кривой (см. рис. 7). Соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне показывает те же четыре разделённых практически равными временными интервалами пика, что и оптическая.

Запаздывание $\Delta t \approx 2$ оптического излучения по отношению к гамма-излучению с неизбежностью свидетельствует о том, что они генерируются в различных частях выброса, при этом оптические кванты выходят с расстояния от центра большего на $\Delta R \approx 2c\Gamma^2\Delta t(1+z)^{-1} = 1,5 \times 10^{16}\Gamma_{500}^2$ см, где Γ_{500} — лоренц-фактор выброшенного вещества в единицах 500 [34, 35].

Особенности, обнаруженные нами в излучении этого всплеска, явно противоречат моделям генерации излучения, основанным на различных видах взаимодействия внутри одного ансамбля электронов и излучаемых ими фотонов (синхротронные и обратные комптоновские механизмы) [19, 36, 37], модели с двумя внутренними ударными волнами — прямой и обратной [38], а также модели с релятивистской турбулентностью в выбросе [39]. С другой стороны, крутизна передних фронтов и практически одинаковая длительность всех четырёх оптических вспышек противоречат модели внешней ударной волны, как прямой, так и обратной, в качестве источника оптического излучения [40].

На настоящий момент предложены две модели, основанные на внутренних ударных волнах, в которых оптическое и гамма-излучение генерируются синхротронным механизмом в различных частях выброса: чем больше энергия кванта, тем ближе к центральному источнику он испускается. Это модели "остаточных столкновений" [35] и значительной нейтронной компоненты в выбросе [41]. В этих сценариях гамма-кванты испускаются на расстоянии 10^{14} – 10^{15} см от центра вследствие нагрева электронов на фронтах ударных волн, порождаемых при столкновении протонных оболочек, выброшенных из центрального источника. В рамках первой модели оптические кванты образуются в оптически тонкой плазме при столкновении "остаточных" оболочек — результатов слияний отдельных групп исходных — на значительно больших, $\gtrsim 10^{16}$ см, расстояниях [35]. Во второй модели, с существенной нейтронной компонентой, оптическое излучение генерируется электронами, испущенными при β -распаде нейтронов, которые достигают расстояний $R \sim 10^{16}$ см, не взаимодействуя с другими компонентами выброса. Продукты такого распада, протоны и электроны, сталкиваются с позднее выброшенными из центрального источника быстрыми протонными оболочками, что приводит к формированию вторичных ударных волн, нагревающих электроны, которые генерируют синхротронное излучение. Обе модели объясняют наблюдаемое двухсекундное запаздывание периодических пиков в оптической кривой блеска по отношению к таковым в гамма-диапазоне, а также её существенно большую сложность на временной шкале 0,1–1 с по сравнению с сильноизменным на этих временах гамма-излучением [32]. С другой стороны, огромное различие оптического и гамма-потоков ($F_o/F_\gamma \sim 10^3$) [19] легче интерпретировать в модели с нейтронной компонентой [41]. Более того, существенная доля нейтронов в выбросе практически неизбежна в случае ярких гамма-всплесков типа GRB 080319B [42, 43]. Таким образом, эта модель является предпочтительной, и наши результаты могут служить сильным свидетельством в пользу существования значительной нейтронной компоненты в выбросе.

Следует отметить, что вывод о генерации оптического и гамма-излучения на разных расстояниях от центрального источника является прямым следствием

обнаруженного нами сходства структур оптической кривой блеска и гамма-кривой блеска. Этот вывод не зависит ни от конкретных механизмов преобразования кинетической энергии выброса во внутреннюю энергию частиц, ни от механизмов излучения последних. Такой эффект не может быть следствием вариаций плотности или скорости вещества внутри выброса, таких как наблюдавшиеся на временах в несколько десятков минут в послесвечениях некоторых других всплесков [44, 45]. Практически невозможно представить такое поведение, в особенности периодическое, совпадающее в различных частях релятивистского выброса, разнесённых на расстояние около 10^{16} см. Таким образом, неизбежно следует заключение о том, что наблюдаемые нами вариации имеют общее происхождение, а именно обусловлены периодической активностью центрального источника (каждый оптический пик при этом соответствует одному эпизоду активности).

Обнаруженная переменность потока излучения выброшенного вещества может быть проявлением нестационарной акреции, обусловленной периодически развивающейся гравитационной неустойчивостью [46] горячих внутренних частей массивного (около одной массы Солнца) акреционного диска, врачающегося вокруг чёрной дыры с массой в три солнечных, образовавшейся в результате коллапса ядра массивной звезды [47, 48]. Такой диск должен содержать существенную долю нейтронов [43]. Четыре видимых в оптической кривой блеска пика отражают четыре эпизода акреционной активности, приводящей к струйному выбросу вещества. Газ из внутренних частей диска, фрагментированный вследствие различных неустойчивостей, образует отдельные оболочки внутри выброса, столкновения которых порождают внутренние ударные волны. Более того, полусекундные вариации интенсивности, видимые на последних стадиях всплеска, могут быть следствием прецессии Лензе–Тирринга внутренних частей акреционного диска.

5. Широкопольная мониторинговая система следующего поколения

Очевидна важность дальнейшего развития методологии широкопольного поиска быстрых оптических транзиентах в двух направлениях. Во-первых, необходимо улучшать проницание системы как минимум на 2–3 звёздных величины, сохраняя или даже расширяя при этом размер её поля зрения. Этого можно достичь использованием многообъективных (или многотелескопных) конфигураций посредством уменьшения поля зрения отдельного инструмента и, таким образом, увеличения его углового разрешения [49]. Для преодоления существенного вклада шумов считывания ПЗС-матриц необходимо либо увеличивать их квантовый выход и коэффициент усиления электронно-оптического преобразователя, либо использовать малошумящие ПЗС-матрицы с внутренним усилением. Вторым важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзиентов.

Одна из возможных схем многообъективной мониторинговой системы на основе ПЗС-матриц с внутренним усилением, способной приносить многоцветную и поляриметрическую информацию о транзиенте, приводится ниже.

5.1. Базовый 3×3 -блок

Предлагаемый проект имеет модульную структуру и состоит из отдельных, содержащих по 9 объективов, базовых блоков, установленных на отдельных экваториальных монтировках (рис. 8). Каждый из объективов помещён в карданный подвес, управляемый двумя приводами, и может переориентироваться независимо от остальных. Кроме того, каждый объектив снабжён набором цветовых и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, в которых все объективы направлены на одну область, например, содержащую только что обнаруженный транзиент, и регистрируют её во всех возможных комбинациях цветовых и поляризационных фильтров (рис. 9). Одновременное наблюдение транзиента всеми объективами в одном фильтре также возможно для повышения точности фотометрии за счёт суммирования их данных.

Каждый объектив снабжён быстрой ПЗС-матрицей с внутренним усилением, имеющей пренебрежимо малые шумы считывания даже на большой кадровой частоте.

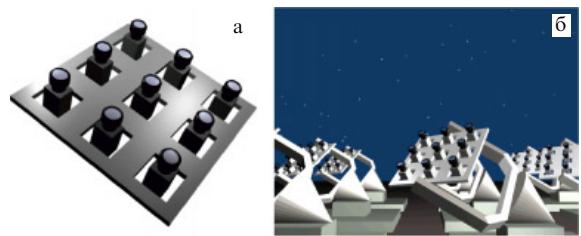


Рис. 8. (а) Базовый 3×3 блок. Каждый объектив оснащён набором смесных цветовых и поляризационных фильтров, которые могут быть оперативно введены в световой пучок, и может перенаводиться независимо от остальных: B, V, R — фотометрические (для полос B, V, R) фильтры, P₁, P₂ и P₃ — поляризационные фильтры для трёх различных ориентаций поляризации. (б) Примерный вид полной мониторинговой системы, состоящей из множества базовых блоков, размещенных на отдельных экваториальных монтировках.

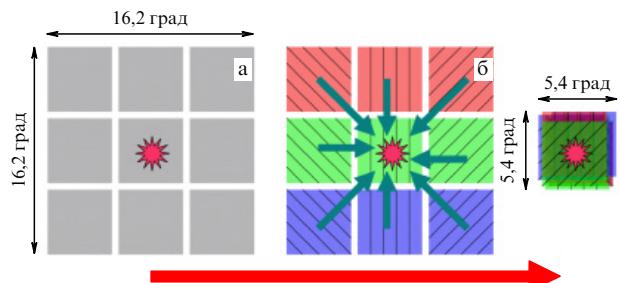


Рис. 9. Различные режимы функционирования базового блока. (а) Режим широкопольного мониторинга в белом цвете либо в одном из цветовых фильтров. (б) Введение в световой пучок цветовых и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. (в) Перенаведение всех объективов на поле, содержащее транзиент, для получения информации о нём в трёх различных фотометрических полосах при трёх ориентациях плоскости поляризации (показанных различными направлениями штриховки) одновременно. Точное время, необходимое для перехода из одного режима в другой, зависит от аппаратной конфигурации, но ожидается, что оно не будет превосходить 0,3 с.

Таблица 5. Проницание в звёздных величинах для базового блока в узкопольном режиме при различных комбинациях фотометрических и поляризационных фильтров при использовании объективов "Marshall Electronics". Для случая объективов "Canon" все пределы оказываются примерно на $1,5^m$ ниже

Экспозиция, с	Без фильтра/B	B + 3 поляризации	BVR	BVR + 3 поляризации
0,1	15,7	13,0	15,0	12,5
10	18,2	15,2	17,5	15,0
1000	20,7	17,9	20,0	17,5

Возможные варианты массово производимых ПЗС-матриц и объективов приведены на рис. 10.

Поток данных с каждого канала такой системы, составляющий около 20 мегабайт в секунду, собирается выделенным компьютером, сохраняющим его на жёстком диске, а также производящим его анализ в реальном времени методом, аналогичным описанному для камер FAVOR и TORTORA. Работа системы в целом координируется выделенным компьютером, получающим информацию об обнаруженных транзентах от отдельных каналов и контролирующим смену наблюдательных режимов.

Каждый базовый блок в широкопольном мониторинговом режиме имеет поле зрения около 260 квадратных градусов (720 при использовании объективов "Canon") и проницание в B-полосе $\sim 14,5^m$ за 0,1 с (13^m для "Canon"). Сложение последовательных кадров позволяет достичь проницания вплоть до 17^m для экспозиции 10 с и вплоть до $19,5^m$ для 1000 с ($15,5^m$ и 18^m при использовании объективов "Canon" соответственно). В режиме узкого поля, при наблюдениях отдельных объектов, размер поля зрения уменьшается до 30 квадратных градусов (80 для "Canon"), а проницание зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров, варианты которых приведены в табл. 5. Кроме того, для ярких событий возможна реализация режима высокого временного разрешения в случае, если ПЗС-матрица поддерживает считывание в узком окне на повышенной кадровой частоте (например, для матрицы "Andor iXon^{EM}+888" возможна кадровая частота вплоть до 65 Гц в поле 128×128 без биннинга либо вплоть до 310 Гц с биннингом 8×8).

5.2. Система в целом

Полная система состоит из набора базовых блоков, установленных на отдельных экваториальных монтировках и работающих совместно. Их количество может быть

произвольным — чем больше, тем полнее покрытие небесной сферы и лучше проницание в узкопольном режиме.

Например, конфигурация из восьми базовых блоков покрывает 2100 квадратных градусов (5700 градусов при использовании объективов "Canon") на небе одновременно в широкопольном мониторинговом режиме, что позволяет проводить обзор всей доступной полусфера дважды за ночь, оставаясь на каждой площадке по полчаса. В узкопольном режиме при совмещении информации от всех 72 каналов проницание достигает от $17,2^m$ до $19,7^m$ для эффективных экспозиций от 0,1 с до 10 с (пределы при использовании объективов "Canon" равны $15,5^m$ и $18,2^m$ соответственно). Объём данных, получаемых за ночь такой системой, составляет около 40 терабайт, которые обрабатываются в реальном времени по мере поступления. Эффективность системы при наблюдениях объектов различного типа иллюстрирует рис. 11, на котором показаны возможности некоторых существующих и проектируемых широкопольных мониторинговых систем.

При стоимости объектива 2 тыс. евро, ПЗС-матрицы 45 тыс., одного компьютера 1 тыс. евро и монтажа 26 тыс. евро, стоимость базового блока составляет около 500 тыс. евро, тогда как конфигурации из восьми блоков — около 5 млн евро.

5.3. Прототип системы

В качестве прототипа многообъективной мониторинговой системы нами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований разрабатывается комплекс, состоящий из девяти объективов "Canon" с относительным отверстием 1/1,2 и фокусным расстоянием 85 мм, снабжённых набором спектральных и поляризационных фильтров, а также оснащённых электронно-оптическими преобразователями с арсенид-галлиевыми фотокатодами, имеющими квантовый выход около 30 % на длине волны 4500 Å. Электронно-оптические преобразователи эффективно укорачивают фокусное расстояние системы в два раза, а также позволяют подавить шумы считывания быстрых ПЗС-матриц "Sony" ICX285AL. В результате этого поле зрения отдельного канала оказывается около 100 квадратных градусов (900 градусов для всей системы) при проницании $B \approx 12,5^m$ за 0,1 с (пределная величина увеличивается вплоть до $B \approx 15^m$ при сложении 100 последовательных кадров, что соответствует эффективному временному разрешению 10 с). Сведение всех

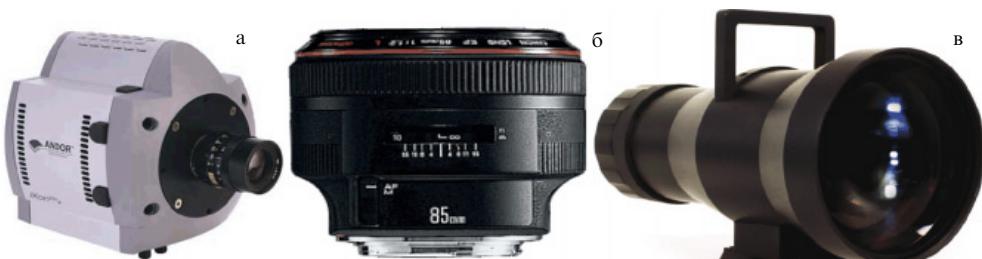


Рис. 10. Возможные массово производимые комплектующие для проектируемой системы: (а) ПЗС-матрица с внутренним усилением "Andor iXon^{EM}+888" с форматом 1024×1024 пикселя размером 13 мкм каждый; (б) объектив "Canon" EF 85 f/1,2 L USM II, способный проецировать поле размером 9 × 9 градусов при масштабе 31"/пиксель на эту матрицу; (в) объектив "Marshall Electronics" 140 мм f/1,0, который даёт поле $5,4 \times 5,4$ градусов при масштабе 19"/пиксель.

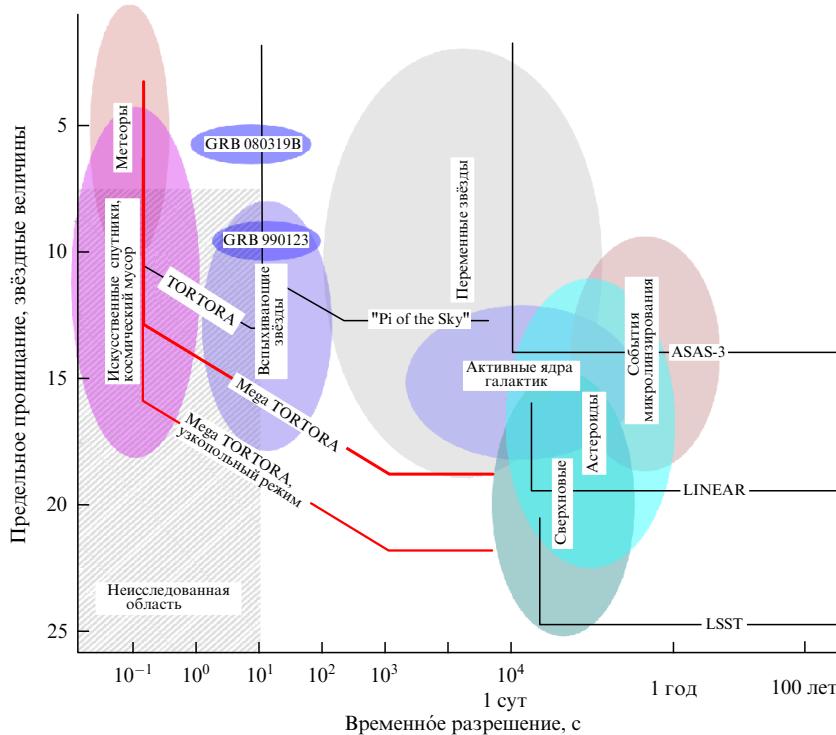


Рис. 11. Эффективность предлагаемой мониторинговой системы для наблюдений различных классов объектов в сравнении с таковой для других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3 (All Sky Automated Survey), LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), "Pi of the Sky", FAVOR/TORTORA), так и планирующихся на будущее (Большой обзорный телескоп — LSST (Large Synoptic Survey Telescope)).

каналов в одно поле позволяет получить предел $B \approx 13,5^m$ за 0,1 с и $B \approx 16^m$ за 10 с.

Система-прототип будет завершена и введена в строй в течение 2010–2011 гг.

6. Заключение

Обнаружение и детальное исследование оптического компаньона самого яркого на данный момент гамма-всплеска GRB 080319B камерой TORTORA подчёркивает особую важность как проведения постоянного мониторинга больших областей небесной сферы, так и использования приёмников и методов высокого временного разрешения при поиске коротких оптических транзисторов неизвестной заранее локализации. Созданные нами в рамках общей стратегии подобных наблюдений камеры FAVOR и TORTORA продемонстрировали успешность этой стратегии, что позволяет и далее развивать такие исследования: следующим шагом может явиться предложенный проект широкопольной мониторинговой системы нового поколения.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 04-02-17555, 06-02-08313 и 09-02-12053), INTAS (04-78-7366), CRDF (No. RP1-2394-MO-02), грантом Progetti Pluriennali 2003 Болонского университета, а также программой Президиума РАН и грантом Президента РФ для поддержки молодых российских учёных.

Список литературы

1. Bondi H *J. R. Astron. Soc.* **11** 443 (1970)
2. Schaefer B E et al. *Astron. J.* **90** 1363 (1985)
3. Schaefer B E et al. *Astron. Astrophys.* **174** 338 (1987)
4. Tamagawa T et al. *Nuovo Cimento C* **28** 771 (2005)
5. Borozdin K N et al. *Proc. SPIE* **4847** 344 (2002)
6. Castro-Tirado A J et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **138** 583 (1999)
7. Burd A et al. *New Astron.* **10** 409 (2005)
8. Шварцман В Ф и др. *Письма в Астрон. журн.* **14** 233 (1988) [Shvartsman V F et al. *Sov. Astron. Lett.* **14** 97 (1988)]
9. McBreen S et al. *Astron. Astrophys.* **380** L31 (2001)
10. Афанасьев В Л, Калениченко В В, Карапенцев И Д *Астрофиз. бюлл.* **62** 319 (2007) [Afanasiev V L, Kalenichenko V V, Karachenets I D *Astrophys. Bull.* **62** 301 (2007)]
11. Beskin G M et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **138** 589 (1999)
12. Eichler D, Beskin G *Astrobiology* **1** 489 (2001)
13. Zolotukhin I et al. *Astron. Nachrichten* **325** 675 (2004)
14. Karpov S et al. *Nuovo Cimento C* **28** 747 (2005)
15. Molinari E et al. *Nuovo Cimento B* **121** 1525 (2006)
16. Zerbi F M et al., in *Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era* (ESO Astrophys. Symp., Eds E Costa, F Frontera, J Hjorth) (Berlin: Springer-Verlag, 2001) p. 434
17. Beskin G et al. *Nuovo Cimento C* **28** 751 (2005)
18. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7452) 1 (2008)
19. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
20. Beskin G et al., arXiv:0905.4431
21. American department of defense satellite ephemerides database, <http://www.spacetrack.org/>
22. Bertin E, Arnouts S *Astron. Astrophys. Suppl.* **117** 393 (1996)
23. Høg E et al. *Astron. Astrophys.* **355** L27 (2000)
24. Barthelmy S D *AIP Conf. Proc.* **428** 129 (1998)
25. Guarnieri A et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5372) 1 (2006)
26. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5897) 1 (2006)
27. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5941) 1 (2006)
28. Racusin J L et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7427) 1 (2008)
29. Cwiok M et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7439) 1 (2008)
30. Wozniak P et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7464) 1 (2008)
31. Kocevski D, Ryde F, Liang E *Astrophys. J.* **596** 389 (2003)
32. Margutti R et al. *AIP Conf. Proc.* **1065** 259 (2008)
33. Beskin G et al. *AIP Conf. Proc.* **1065** 251 (2008)
34. Piran T *Rev. Mod. Phys.* **76** 1143 (2005)
35. Li Z, Waxman E *Astrophys. J.* **674** L65 (2008)
36. Kumar P, Panaitescu A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **391** L19 (2008)
37. Fan Y-Z, Piran T *Frontiers Phys. China* **3** 306 (2008)

38. Yu Y W, Wang X Y, Dai Z G *Astrophys. J.* **692** 1662 (2009)
39. Narayan R, Kumar P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **394** L117 (2009)
40. Zou Y-C, Piran T, Sari R *Astrophys. J. Lett.* **692** L92 (2009)
41. Fan Y-Z, Zhang B, Wei D-M *Phys. Rev. D* **79** 021301(R) (2009)
42. Derishev E V, Kocharovskiy V V, Kocharovskiy V I V *Astrophys. J.* **521** 640 (1999)
43. Pruet J, Woosley S E, Hoffman R D *Astrophys. J.* **586** 1254 (2003)
44. Jakobsson P et al. *New Astron.* **9** 435 (2004)
45. Bersier D et al. *Astrophys. J. Lett.* **584** L43 (2003)
46. Masada Y et al. *Astrophys. J.* **663** 437 (2007)
47. Woosley S E *Astrophys. J.* **405** 273 (1993)
48. Zhang W, Woosley S E, Heger A *Astrophys. J.* **608** 365 (2004)
49. Beskin G et al. *Bull. Special Astrophys. Observatory* **60–61** 217 (2007)

PACS numbers: **95.35.+d**, **98.62.Hr**, **98.65.-r**
 DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004i.0434

Диски галактик и их эволюция

А.В. Засов, О.К. Сильченко

Рассматриваются ключевые проблемы, связанные с измерением масс звёздных дисков и тёмных гало в галактиках, а также с объяснением наблюдаемых свойств дисков, сформировавшихся в массивных тёмных гало.

Вращающиеся звёздно-газовые диски — это основные структурные элементы большинства наблюдаемых галактик. В них сосредоточено основное количество барионного вещества: звёзд и разрежённой межзвёздной среды (в последней преобладает холодный газ). Диски обладают большим моментом импульса и вращаются так, что локальное значение угловой скорости уменьшается вдоль радиуса. При этом максимальная скорость вращения диска зависит от общей массы (светимости) галактики и обычно составляет $100\text{--}300 \text{ km s}^{-1}$, что соответствует периоду обращения в $200\text{--}300 \text{ млн лет}$.

Диски галактик — неоднородные образования. Они содержат звёзды с различной массой и возрастом, причём самые молодые звёзды сосредоточены вблизи экваториальной плоскости диска: там, на дне потенциальной ямы, образуемой его гравитационным полем, скапливается межзвёздный газ. Но диски в целом — это старые образования, спектр их излучения указывает на доминирование звёзд с очень большим возрастом, превышающим 8 млрд лет. При этом наиболее старые звёзды образуют так называемый толстый диск, который в два-три раза толще основного, тонкого, звёздного диска, но масса толстого диска относительно невелика. Фактически формирование дисков в большинстве галактик ещё не завершено, поскольку в них (преимущественно в спиральных ветвях) и в настоящее время происходит образование звёзд из газа, но наблюдаемые темпы роста массы звёздного населения, за редкими исключениями, являются очень низкими, составляя 1–5 масс Солнца в год на всю галактику типа нашей.

Происхождение галактик и механизм формирования дисков до сих пор остаются не очень понятными и активно обсуждаются в литературе. Сама форма дисков

однозначно указывает на то, что они образовались в результате эволюции диссипативной среды (газа), которая теряла энергию на излучение при сохранении момента импульса, а возраст дисков говорит о том, что они существовали уже в эпоху ранней молодости современных галактик и были охвачены в то далёкое время интенсивным процессом формирования звёздного населения. Дисковые галактики, часто содержащие обширные области звездообразования, издалека похожие на совокупность отдельных ярких пятен, действительно присутствуют в большом количестве среди галактик с красным смещением $z > 1$ — мы наблюдаем их в эпоху молодости.

В современных теориях образования галактик важную роль играет то обстоятельство, что формирование их звёзд происходило в гравитационном поле тёмной материи, или так называемой скрытой массы, которая в настоящее время должна образовывать массивное тёмное гало галактик, простирающееся далеко за пределы их видимой части. Как показали численные эксперименты, роль тёмного гало является определяющей не только в формировании диска из первоначально разрежённого газа, но и в его последующей эволюции. Однако разделить массу наблюдаемой галактики на составляющие, принадлежащие газу, звёздам и тёмной материи, оказалось непростой задачей. Решить её для конкретных галактик удаётся благодаря совершенствованию методов измерения кинематических характеристик диска, с одной стороны, и моделей эволюции спектров излучения звёздных систем, с другой.

Научный бум, породивший целую лавину работ по скрытой массе внутри галактик, начался с появлением наблюдательных данных о скоростях вращения V галактических дисков на достаточно большом расстоянии R от центра, т.е. с получением достаточно длинных кривых вращения $V(R)$. В оптическом диапазоне для этого обычно используются либо классические дифракционные спектрографы с длинной щелью, либо сканирующие интерферометры Фабри–Перо в высоких порядках интерференции. Последние не имеют щели, и с их помощью можно оценивать доплеровский сдвиг спектральных линий сразу во многих тысячах точек по диску галактики, восстанавливая посредством довольно сложной математической обработки данных двумерное поле лучевых скоростей и получая из него кривую вращения. В России такие наблюдения проводятся на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН. Радионаблюдения в эмиссионных линиях атомарного водорода или молекул уступают оптическим по угловому разрешению, в то время как оптические наблюдения могут давать оценки скоростей как газа, так и звёзд, причём с высоким разрешением. Тем не менее в галактиках, богатых газом, радиокривые вращения прослеживаются значительно дальше оптических, иногда далеко за пределами видимых границ галактики, поскольку газовые диски часто бывают больше звёздных. Оказалось, что скорости вращения на больших расстояниях от центра галактики, как правило, не убывают, а выходят на почти плоский участок — плато — или даже возрастают с увеличением R .

Часто считают, что выход кривой вращения на плато является если не доказательством, то, по крайней мере, решающим аргументом в пользу существования в галактиках тёмного гало с массой, сопоставимой с массой видимого вещества или превосходящей её. На самом деле, это не совсем так, поскольку форма кривой

А.В. Засов, О.К. Сильченко. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
 E-mail: zasov@sai.msu.ru

вращения, какая бы она ни была, сама по себе ещё не говорит о наличии скрытой массы. Кривая вращения с любой формой — возрастающая или убывающая — может быть объяснена наличием только одного диска, и она может отражать лишь особенность распределения массы в нём. Проиллюстрируем это на простых примерах.

Если бы плотность диска вдоль радиуса сохранялась постоянной или уменьшалась очень медленно, то скорость вращения диска должна была бы безудержно возрастать с увеличением R , даже при отсутствии гало. Конечно, в дисках реальных галактик постоянство поверхностной плотности заведомо не выполняется, их поверхностная плотность довольно быстро убывает с удалением от центра. Но и это не создаёт особой проблемы с объяснением плато на кривой вращения. Классический пример — так называемый диск Местеля. Это тонкий осесимметричный диск, поверхностная плотность $\Sigma(R)$ которого уменьшается от центра к периферии как $1/R$. Теоретически можно показать, что круговая скорость, которая в общем случае определяется радиальным градиентом гравитационного потенциала,

$$V^2(R) = R \frac{\partial \Phi(R)}{\partial R},$$

в случае диска Местеля не меняется с изменением R и кривая вращения галактики представляет собой горизонтальную прямую — от нуля до бесконечности — без привлечения к рассмотрению какого-либо тёмного гало! Масса такого диска в пределах любого заданного радиуса R будет определяться выражением $M(R) = -V^2 R/G$, т.е. так же, как и в случае сферически симметричного распределения плотности. Иными словами, по кривой вращения диск Местеля нельзя отличить от сферически симметричной галактики.

Что в таком случае действительно можно рассматривать как прямое указание на наличие невидимой массы в дисковых галактиках, и в частности массивного тёмного гало? В первую очередь, это расхождение между измеренной кривой вращения галактического диска (имеются в виду как форма, так и абсолютные значения скоростей) и ожидаемой кривой, полученной в предположении, что галактика состоит только из "светлого" вещества, т.е. из непосредственно наблюдаемых компонентов. Поскольку основная масса диска заключена в звёздах, распределение яркости звёздного диска отражает распределение в нём массы, особенно если яркость измеряется в ближней инфракрасной области спектра, где преобладает излучение старых звёзд.

Яркость, а следовательно и поверхностная плотность, в широком интервале расстояний от центра убывает с увеличением R по экспоненциальному закону $I(R) \sim \exp(-R/R_0)$ (R_0 — радиальная шкала яркости), т.е. быстрее, чем $1/R$. Этому закону соответствует кривая вращения, проходящая через максимум при $R \approx 2R_0$ и затем медленно спадающая. Однако на кривых вращения галактик ожидаемый максимум практически никогда не наблюдается. Если подходить более строго и принять определённое отношение массы к светимости M/L для звёздного населения диска (это отношение можно оценить по наблюдаемым показателям цвета, используя модель звёздного населения), то легко перейти от распределения яркости к количественному распределению плотности диска (не обязательно имеющему экспоненциальный вид) и рассчитать ожидаемую скорость вращения галактики, обусловленную её

барионными составляющими. При этом, как правило, оказывается, что расчётная кривая проходит ниже наблюдаемой (по крайней мере, во внешних областях диска). Отсюда делается вывод о большом вкладе тёмной массы в общую массу галактики. Этот вклад наиболее существен в галактиках с низкой поверхностной яркостью диска: в пределах наблюдаемых границ тёмная масса у них может в несколько раз превосходить массу барионного вещества.

Есть несколько других аргументов, подтверждающих вывод о большой массе тёмного гало галактик. Два самых главных из них вытекают из наблюдений, хотя и имеют статистический характер.

Первый аргумент заключается в том, что интегральные массы галактик, измеренные другим способом — по относительным скоростям движения спутников, а также массы систем галактик оказываются значительно больше, чем масса их видимого вещества. Так, по данным Карапенцева и Макарова [1, 2], среднее отношение суммарной массы галактик, образующих пару, к их суммарной светимости в инфракрасном К-диапазоне (2,2 мкм), определённое более чем по 500 парам, оказывается очень высоким: около 11 солнечных единиц, а для групп — более чем вдвое выше. Для сравнения, модели чисто звёздного населения дают значения M/L_K , не превышающие 1,5 [3]. Учёт массы газа и внутреннего поглощения лишь ненамного увеличивает это отношение. Следовательно, в области, превосходящей галактику по размерам и охватывающей целиком пару или группу галактик, масса тёмного вещества многократно превышает суммарную массу непосредственно наблюдаемой материи.

Второй аргумент связан с требованием устойчивости диска к гравитационным возмущениям. Диск обычно описывается как массивная сильно сплюснутая бесстолкновительная звёздная система, в которой могут распространяться колебания и развиваться неустойчивости на различных масштабах. Последние неизбежно приводят к динамическому разогреву диска до такого состояния, при котором он выходит на пороговый (маргинальный) уровень устойчивости к малым возмущениям. Диск тем устойчивее, чем больше радиальная дисперсия скоростей звёзд, составляющих его основную массу, а также чем быстрее он вращается и чем меньше его поверхностная плотность. Критическое (максимальное) значение поверхностной плотности, при котором сохраняется устойчивость, определяется как аналитически (при целом ряде упрощений), так и с помощью численных моделей. В первом приближении критическое значение поверхностной плотности пропорционально произведению радиальной дисперсии скоростей звёзд на угловую скорость диска на заданном радиусе. Поэтому, получив из наблюдений кривую вращения галактики и значения дисперсии скоростей старых звёзд диска, можно оценить максимально допустимую поверхностную плотность диска и соответствующее ему отношение M/L , а тогда исходя из полной светимости диска легко найти верхний предел его массы.

Для отдельно взятой галактики точность оценки невелика — обычно в пределах коэффициента 2, но по совокупности данных для различных галактик можно сделать некоторые обобщающие выводы. А именно подтверждено, что в пределах оптических границ галактики на долю гало приходится масса, как правило, сопоставимая с массой диска, а часто и превышающая её [4], что хорошо согласуется с результатами, основан-

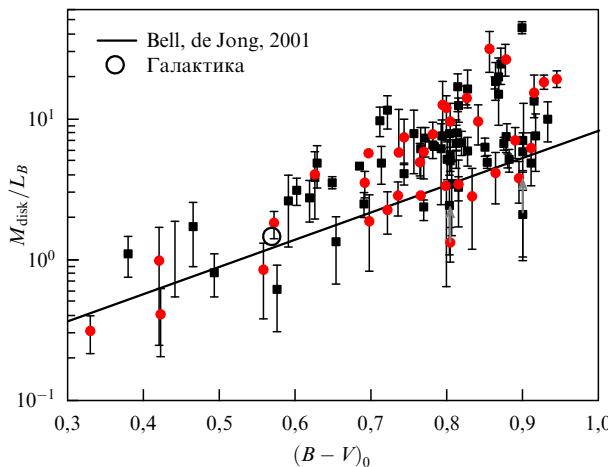


Рис. 1. Верхний предел отношения массы к светимости в голубой области спектра M/L_B (в солнечных единицах) для дисков галактик с различным показателем цвета, определённый в предположении маргинальной устойчивости диска (Засов, Хоперсков, Сабурова [7]). Кружки — галактики в двойных системах, квадраты — одиночные галактики или члены групп, полый кружок относится к нашей Галактике. Значения M/L_B для галактик с активным звездообразованием ($(B - V)_0 < 0.7$) близки к ожидаемым из фотометрической модели эволюции звёздных систем (прямая линия согласно [3]), что говорит об отсутствии сильного динамического нагрева их дисков.

ными на анализе кривых вращения. К тому же выводу приводят и фотометрические оценки толщины звёздных дисков, наблюдаемых "с ребра" [5, 6]. Удивительно другое: поскольку диски галактик подвержены гравитационным воздействиям — как со стороны соседних галактик, так и со стороны массивных элементов тёмного гало (о них немного ниже), то, казалось бы, гравитационные возмущения должны динамически нагреть диск выше предела, который устанавливается требованием устойчивости. Тогда отношения M/L , вычисленные в предположении маргинально устойчивых дисков (рис. 1), окажутся завышенными и превзойдут значения, найденные по показателю цвета из фотометрических моделей эволюции звёздных дисков галактик (прямая на рис. 1). Оказалось, что такие перегретые системы действительно существуют, но к ним относится только часть галактик, преимущественно с высоким показателем цвета (исправленным за наклон диска к лучу зрения): $(B - V)_0 > 0.7$. Такой показатель цвета соответствует проэволюционировавшим дискам, в которых основной вклад в светимость даёт старое звёздное население. В указанных галактиках звездообразование является очень слабым или вообще отсутствует; многие из них относятся к типу линзовидных систем, почти не содержащих холодного межзвёздного газа. Часто значительная "перегретость" диска наблюдается в галактиках, входящих в состав пар (кружки на рис. 1), очевидно, по той причине, что они с большей вероятностью испытывают сильное гравитационное воздействие со стороны своего компаньона. Но среди галактик с "перегретыми" дисками есть и такие, которые не имеют близких компаньонов, — возрастание дисперсии скоростей звёзд в этом случае может быть связано с полным поглощением спутников, сейчас уже не наблюдаемых как отдельные галактики. Но самым важным является то, что многие линзовидные и большинство спиральных галактик не испытали значительной динамической эволюции за несколько миллиардов лет своего существования и их

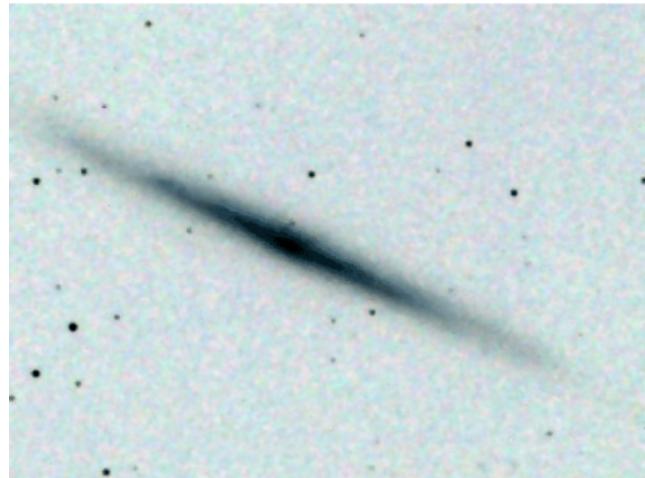


Рис. 2. NGC 5907 — пример галактики с тонким диском, наблюдаемым "с ребра" (2MASS (Two Micron All-Sky Survey) — обзор всего неба на длине волн 2 мкм, ближняя инфракрасная область).

диски сохраняются динамически слабо "нагретыми" — в состоянии, близком к маргинально устойчивому. О том же говорит и существование галактик с удивительно тонкими звёздными дисками, которые, следовательно, обладают низкой вертикальной дисперсией скоростей звёзд по отношению к скорости их вращения и которые нередко встречаются среди галактик, наблюдаемых нами "с ребра" (рис. 2).

Ещё один аргумент в пользу существования тёмных гало и вообще тёмной материи во Вселенной имеет, скорее, теоретический характер: в рамках существующей теории расширяющейся Вселенной невозможно рассчитать физическую картину формирования галактик, если не предположить, что основная масса вещества в природе — это тёмная небарионная масса. Собственная гравитация барионного вещества, на долю которого приходится около четырёх процентов критической плотности Вселенной, оказывается явно недостаточной для того, чтобы объяснить, как за короткое время ничтожно малые первоначальные флуктуации плотности в расширяющемся веществе успели вырасти и сформировать наблюдаемые ныне галактики и их системы.

В рамках так называемой стандартной космологической модели галактики возникают в результате иерархического скучивания многочисленных единиц тёмной материи (субгало), в гравитационном поле которых концентрируется первичный газ, из которого после его охлаждения формируется звёздная галактика. Далее начинается длинный эволюционный путь галактики: за несколько миллиардов лет может существенно измениться структура галактики, содержание и химический состав газа и звёзд, темп звездообразования. С теоретической точки зрения здесь остаётся очень много неясного: до сих пор не совсем понятно, какую роль в этих изменениях играют такие процессы, как взаимодействие галактик между собой и с межгалактической средой, слияние сталкивающихся галактик, активность галактических ядер, выброс газа из галактик и аккреция газа на галактические диски, способная долгое время поддерживать текущий уровень звездообразования. Во всех перечисленных случаях относительная масса тёмного вещества в галактиках имеет либо заметное, либо действительно ключевое значение.

Численное моделирование процессов формирования галактик из тёмного и барионного вещества позволило, по крайней мере на качественном уровне, найти объяснение наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной и распределения галактик по массам. Значительно хуже объясняется зависимость масса – размер галактик [8] или концентрация массы в центральном килопарсеке, которая значительно ниже предсказываемой на основе численных моделей (так называемая проблема центрального каспа). Но одной из самых актуальных и сегодня проблем иерархической концепции построения галактик является наличие в ближней Вселенной большого количества *чисто дисковых галактик* (см., например, статистику обзора APM (Automated Plate Measuring), нацеленного на морфологическую классификацию галактик по их изображениям [9]), т.е. галактик без значительного звёздного сфероида в центре, с крупномасштабными тонкими звёздными дисками. У многих спиральных галактик, в том числе у нашей Галактики, эти тонкие звёздные диски являются ещё и *старыми*: возраст самых старых рассеянных скоплений нашего тонкого диска приближается к 8–9 млрд лет [10], а это означает, что начиная с момента, в который красное смещение составило $z = 1$, нашу Галактику никто всерьёз не "потревожил".

Об отсутствии сильной динамической нагретости дисков многих галактик говорит и упомянутая выше близость дисперсии скоростей звёзд дисков многих галактик к минимальному значению, требующемуся для гравитационной устойчивости, а также малая дисперсия скоростей звёзд диска нашей Галактики (см., например, [11]). Это прямо противоречит предсказаниям иерархической концепции о процессе непрерывных слияний галактик в ходе эволюции Вселенной. Дело в том, что когда в результате слияния мелких гало возникает гало с массой в 10^{12} масс Солнца (как у нашей Галактики), слившиеся фрагменты ещё долго сохраняют свою идентичность внутри большого гало. Например, недавние расчёты в рамках проекта GHALO (Galactic Halo) [12] — численное моделирование небольшого объёма, размером примерно 400 кпк, с высоким пространственным разрешением — показали, что внутри нашего тёмного гало можно выделить до ста тысяч "субгало" с непрерывным спектром масс. Сгустки тёмной материи движутся внутри большого гало по вытянутым траекториям, неизбежно проходя через барионный диск Галактики. Эта "бомбардировка" нагревает звёздный диск, и он постепенно утолщается из-за увеличения вертикальной дисперсии скоростей звёзд. Более того, сгустки тёмной материи, внутри которых возникли звёзды (карликовые спутники нашей Галактики), при столкновениях и вследствие динамического трения теряют энергию и в конце концов падают на диск, сливаясь с ним. Согласно результатам недавних расчётов [13], за последние 8 млрд лет (с момента, при котором $z = 1$) типичная модельная галактика, похожая на нашу, должна испытать около шести "малых" слияний, одно из которых — со спутником массой, составляющей 10 % от массы Галактики, в результате чего толщина её диска увеличилась бы в несколько раз. Иными словами, тонкие звёздные диски не выживают на временных масштабах в несколько миллиардов лет, если они погружены в такие гало тёмной материи, которые предсказывает теория, — тем не менее большинство галактик в ближней Вселенной имеет именно тонкие диски. Это противоречие между теорией и наблюдениями пока не разрешено.

Ключевой особенностью эволюции дисков галактик является постоянная аккреция газа извне — "подпитка" топливом для звездообразования. Необходимость аккреции газа извне, причём с темпом, примерно соответствующим темпу звездообразования, следует из многих наблюдательных фактов. В частности, сценарий химической эволюции диска нашей Галактики невозможно построить без рассмотрения значительной аккреции газа извне (см., например, [14]). Звездообразование в диске Галактики в последние 9–10 млрд лет идёт примерно с постоянной (если осреднить на масштабах в 1–2 млрд лет) скоростью, что косвенным образом указывает на непрерывную аккрецию газа. Поскольку звёзды в процессе своей эволюции синтезируют тяжёлые элементы (все элементы тяжелее бериллия), звёзды последних поколений должны быть намного богаче металлами, чем звёзды возрастом 8–10 млрд лет. Однако значимой антикорреляции металличности с возрастом у звёзд диска нашей Галактики не наблюдается [15]. Более того, существует так называемая проблема G-карликов: звёзды спектрального класса G, с массой равной одной солнечной или немного меньшей, среди которых имеются звёзды всех возрастов, в диске нашей Галактики обладают практически одной и той же, в пределах ошибок измерений, металличностью [16]. Создаётся впечатление, что химическая эволюция в диске нашей Галактики последние 8–10 млрд лет "не шла", хотя ядерные реакции в звёздах, несомненно, происходили. Эта проблема решается введением аккреции извне, т.е. предположением о падении на диск газа с минимальным (а лучше нулевым) содержанием тяжёлых элементов: такой низкометаллический газ "разбавляет" газ, обогащённый синтезированными тяжёлыми элементами, и поддерживает среднюю металличность межзвёздной среды примерно на постоянном уровне.

В дисках спиральных галактик, включая нашу собственную, существует заметный "градиент металличности" — среднее обилие тяжёлых элементов как в звёздах, так и в газе, выше в центре диска и ниже на периферии. На качественном уровне это понятно: в центральной части галактик звездообразование уже привело к почти полному исчерпанию газа, т.е. было очень эффективным, а на периферии ещё остаётся довольно много неизрасходованного газа, т.е. звездообразование шло еле-еле. Однако, чтобы получить в моделях градиент металличности наблюдаемого наклона, нужно не просто "доставлять" на диск газ извне, но и "ронять" его быстрее в центре диска и медленнее на периферии. Естественно, тогда и звездообразование будет происходить эффективнее в центре диска и вяло на периферии. Киапини с соавторами [17] построили модель химической эволюции диска нашей Галактики с переменной по радиусу аккрецией газа и получили, что характерное время аккреции, за которое существенно (в ϵ раз) увеличится локальная плотность диска, линейно возрастает вдоль радиуса: в центре оно меньше 2 млрд лет, вблизи Солнца составляет 8 млрд лет, а на далёкой периферии значительно превышает хаббловское время, т.е. там диск ещё только начинает формироваться. Соответственным образом изменяются и характерные времена крупномасштабного звездообразования. Такая концепция получила название "inside-out", т.е. построение (диска) галактики "изнутри-наружу". С момента своей формулировки эта концепция неоднократно подтверждалась новыми наблюдательными фактами.

Одно из самых наглядных подтверждений было получено с помощью космического ультрафиолетового телескопа GALEX (Galaxy Evolution Explorer), который с хорошей чувствительностью и приличным пространственным разрешением закартографировал большую выборку близких галактик в далёком ($\lambda_{\text{eff}} = 1516 \text{ \AA}$) и близком ($\lambda_{\text{eff}} = 2267 \text{ \AA}$) ультрафиолетовых диапазонах спектра [18]. И оказалось, что многие дисковые галактики в ультрафиолетовых лучах имеют гораздо большие размеры, чем в видимом диапазоне спектра [19]. Что это означает? Главные "поставщики ультрафиолета" в галактиках — это молодые массивные звёзды: они имеют высокие температуры, существенно превышающие 10000 К, так что основное энерговыделение приходится на ультрафиолетовый диапазон. После завершения обзора галактик, проведённого телескопом GALEX, оказалось, что во внешних областях дисков галактик, там, где практически нет старого звёздного населения и ничего не видно в оптическом диапазоне спектра, идёт звездообразование. То есть, действительно, диски строятся, точнее надстраиваются, во внешних частях у нас на глазах.

Недавно была сделана интересная работа с целью проверки этого сценария [20]. Эволюция ультрафиолетовых (т.е. звездообразующих) дисков наблюдалась непосредственным сравнением размеров галактик на различных красных смещениях. Как это делается? Вследствие конечности скорости света, чем более далёкую галактику мы наблюдаем, тем к более ранней её эпохе относятся эти наблюдения. Если мы наблюдаем галактику на красном смещении $z = 0,5$, мы видим её 5 млрд лет назад, а для галактики при $z = 1$ время запаздывания света составляет уже 8 млрд лет. Это означает, что с современными средствами наблюдений на крупных телескопах мы непосредственно просматриваем две трети времени жизни Вселенной и можем видеть эволюцию галактик в течение большей части их жизни. При этом вследствие красного смещения собственное ультрафиолетовое излучение далёкой галактики может оказаться в оптическом диапазоне спектра. Авторы [20] проследили изменение характерной формы профиля распределения поверхностной яркости дисков с z , подстраивая длину волн наблюдений к красному смещению так, чтобы в системе покоя галактики каждый раз измерения относились к одной и той же (ультрафиолетовой) области спектра. Точкой отсчёта эволюции были данные обзора галактик, проведённого телескопом GALEX на $z \approx 0$. Оказалось, что, действительно, эволюция наблюдается: на больших красных смещениях ультрафиолетовые диски были более компактными. Раньше звездообразование шло в центрах дисков, а сейчас сместилось на периферию? Ведь именно такую эволюцию предсказывает сценарий построения дисков "inside-out".

Однако оказалось, что не всё так просто: когда сравнили не только масштабы, но и абсолютный уровень ультрафиолетовой поверхностной яркости, выяснилось, что периферия дисков выглядит практически одинаково на $z = 1$ и $z = 0$. Профили на $z = 1$ более компактны или иными словами, имеют более крутой наклон из-за того, что звездообразование в центральных областях на $z = 1$ происходило более интенсивно, чем на $z = 0$, в то время как эволюции темпов звездообразования на периферии дисков не наблюдается. То есть диски не "росли" в течение последних 8 млрд лет — они просто завершали звездообразование в центре и продолжали его на периферии. Сценарий "inside-out" явно нуждается в корректировке.

Проблемой теории формирования дисков галактик является также то, что хотя в существовании акреции газа на галактические диски трудно сомневаться, до сих пор не удается обнаружить в наблюдениях реальные резервуары газа для этой акреции. Кроме того, важно, чтобы внешний газ имел ещё и низкое содержание тяжёлых элементов. Одно время считали, что при коллапсе тёмного гало первичный газ, связанный гравитационно с этой тёмной материей, нагревается в ходе виреализации и в виде горячего рентгеновского гало долгое время сохраняется вокруг дисковой галактики. Постепенно остывая, горячее рентгеновское гало могло бы обеспечить долгую стационарную акрецию первичного газа по всему протяжению галактического диска. Такие горячие газовые гало наблюдаются у скоплений галактик, но до сих пор не обнаружены ни у одной близкой спиральной галактики (за возможным исключением областей массивных балджей галактик раннего типа). Более того, детальные газодинамические модели показали, что даже если такие гало и существуют, действия известных механизмов тепловой неустойчивости горячего виреализованного, т.е. пришедшего в равновесное состояние, газа недостаточно для того, чтобы обеспечить должное количество холодных газовых облаков вблизи дисков и стационарную эффективную акрецию в течение миллиардов лет — то, что необходимо для построения крупномасштабного звёздного диска [21].

Долгое время на роль источников внешнего газа "назначали" высокоскоростные облака нейтрального водорода, которые действительно наблюдаются вне диска нашей Галактики. Однако, во-первых, их мало для обеспечения акреции в нужных масштабах (в лучшем случае они дают 0,1–0,2 массы Солнца в год, т.е. на порядок меньше, чем требуется для поддержания современного звездообразования), а во-вторых, когда "на просвет" оценили содержание в них тяжёлых элементов по абсорбционным линиям источников дальнего фона, на которые случайно проектируются облака, оказалось, что химический состав газа высокоскоростных облаков близок к солнечному — это не первичный газ. Сейчас считается, что высокоскоростные облака нейтрального водорода большей частью представляют собой газ, выброшенный из диска Галактики так называемыми галактическими фонтанами — истечением газа из областей активного звездообразования, в которых его нагревают как звёздный ветер массивных звёзд, так и вспышки сверхновых. Впоследствии этот газ остывает и образует облака. Однако, во-первых, это не "добавка" к диску, это собственно изначально часть диска, а во-вторых, химический состав не первичный, а напротив, обогащённый продуктами нуклеосинтеза.

Важные изменения происходят в последние годы в теории формирования галактик. Сейчас горячие виреализованные газовые гало молодых галактик как источники вещества для формирования звёздных дисков уже становятся "немодными": теоретики сомневаются, что виреализация газа происходит в большей части коллапсирующих гало. Формирование дисков и балджей галактик совсем не обязательно должно происходить только посредством слияния более мелких подсистем. Всё более важную роль в формировании галактик отводят холодным филаментарным газовым потокам, направленным на внутреннюю область гало [22]. Это тоже акреция, но акреция "потоковая", через газовые струи, которая не может захватить весь диск, а, скорее, будет подпитывать

его периферию. Эти струи проходят, не останавливаясь, сквозь горячее газовое гало и падают на диск. Согласно современным моделям [23], холодные потоки должны доминировать в маломассивных (относительно тёмной массы скоплений и групп галактик) гало на всех красных смещениях, начиная с $z = 5 - 6$. Это означает, что эффективной акреции газа извне непосредственно на центр диска не было ни на каком этапе эволюции галактики. Таким образом, сценарий построения галактических дисков "inside-out" в его классической формулировке конфликтует сейчас не только с наблюдениями, но и с космологической теорией. Явно наступает время для его кардинального пересмотра.

Наши исследования дисков галактик частично поддержаны грантами РФФИ 07-02-00792 и 07-02-00229.

Список литературы

1. Makarov D, Karachentsev I *Proc. Int. Astron. Union* **3** 370 (2008); arXiv:0801.0043
2. Каракентьев И Д, Макаров Д И *Астрофиз. бюлл.* **63** 320 (2008) [Karachentsev I D, Makarov D I *Astrophys. Bull.* **63** 299 (2008)]; arXiv:0812.0689
3. Bell E F, de Jong R S *Astrophys. J.* **550** 212 (2001)
4. Засов А В, Хоперсков А В, Тюрина Н В *Письма в Астрон. журн.* **30** 653 (2004) [Zasov A V, Khoperskov A V, Tyurina N V *Astron. Lett.* **30** 593 (2004)]
5. Засов А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **28** 599 (2002) [Zasov A V et al. *Astron. Lett.* **28** 527 (2002)]
6. Bizyaev D, Mitronova S *Astrophys. J.* **702** 1567 (2009)
7. Засов А В, Хоперсков А В, Сабурова А С, готовится к печати
8. Dutton A A et al. *Astrophys. J.* **654** 27 (2007)
9. Naim A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **274** 1107 (1995)
10. Paunzen E, Netopil M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371** 1641 (2006)
11. Wyse R F G *Proc. Int. Astron. Union* **4** 179 (2009); arXiv:0809.4516
12. Zemp M *Mod. Phys. Lett. A* **24** 2291 (2009)
13. Kazantzidis S et al. *Astrophys. J.* **700** 1896 (2009)
14. Tosi M, astro-ph/0308463
15. Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R *Astron. Astrophys.* **377** 911 (2001)
16. Jørgensen B R *Astron. Astrophys.* **363** 947 (2000)
17. Chiappini C, Matteucci F, Gratton R *Astrophys. J.* **477** 765 (1997)
18. Gil de Paz A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 185 (2007)
19. Thilker D A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 538 (2007)
20. Azzollini R, Beckman J E, Trujillo I *Astron. Astrophys.* **501** 119 (2009)
21. Binney J, Nipoti C, Fraternali F *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397** 1804 (2009)
22. Dekel A, Birnboim Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **368** 2 (2006)
23. Dekel A et al. *Nature* **457** 451 (2009)

PACS numbers: 95.35.+d, 95.36.+x, 98.80.Cq
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004j.0439

Тёмные компоненты Вселенной

В.В. Бурдюжа

1. Тёмная энергия

Новой космологической парадигмой является мультиверс — вечно растущий фрактал, состоящий из большого числа частей (вселенных) с различными константами связи, массами частиц и другими константами природы. Наша Вселенная, возраст которой около

В.В. Бурдюжа. Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ
E-mail: burdyuzh@asc.rssi.ru

14 млрд лет, — одна из них. За этот период Вселенная прошла тернистый путь: инфляция, разогрев (reheating), эра излучения, эра вещества и вот теперь вакуум — доминированная эра. Вселенная расширяется с ускорением начиная с момента, когда красное смещение достигло значения $z \sim 0,7$ (при больших z расширение происходило с замедлением)¹. Не менее любопытен состав нашей Вселенной: барионный компонент составляет всего 4 % от полной плотности Ω_{tot} , тёмная материя (Ω_{DM}) — 23 % полной плотности, тёмная энергия (Ω_{DE}) — около 73 % полной плотности:

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_b + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\text{DE}} = 0,04 + 0,23 + 0,73,$$

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{cr}}} , \quad \rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N} ,$$

где H_0 — постоянная Хаббла, G_N — гравитационная постоянная.

К сожалению, мы до сих пор точно не знаем физической природы этих компонент, и поэтому они для нас — тёмные, хотя существует более десяти моделей для каждой из них. С очень большой вероятностью можно предполагать, что тёмная энергия — это вакуум. В этом случае космологическая константа, Λ -член, вакуумная энергия и тёмная энергия — понятия эквивалентные. Но в любом случае лучше обратиться к истокам, т.е. к уравнениям Эйнштейна

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G_N T_{\mu\nu} , \quad G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} . \quad (1)$$

Эйнштейн ввёл Λ -член как свойство пространства. Если поставить Λ -член в правую часть уравнений, то он уже будет представлять собой вид энергии, который и был назван тёмной энергией:

$$G_{\mu\nu} = -8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} . \quad (2)$$

Современное значение плотности тёмной энергии (DE)

$$\rho_{\text{DE}} = \rho_\Lambda \sim 10^{-47} \text{ ГэВ}^4 \approx 0,7 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3} ,$$

если $H_0 = 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

В планковскую эпоху плотность этого вида энергии имела значение

$$\rho_\Lambda \sim 2 \times 10^{76} \text{ ГэВ}^4 (\approx 0,5 \times 10^{94} \text{ г см}^{-3})$$

при $M_{\text{Pl}} = 1,2 \times 10^{19} \text{ ГэВ}$,

которое на 123 порядка превышает плотность наблюдаемой тёмной энергии. Эта необъяснимая разница в 123 порядка породила кризис физики, хотя, конечно, было сделано много предложений по его преодолению (см. обзоры [1–5])².

Здесь уместно напомнить определение вакуума и его свойства. В классической физике вакуум — мир без частиц и этот мир — плоский, в квантовой физике — это вакуумные конденсаты, возникающие в процессе релятивистских фазовых переходов, в геометрической физике вакуум — это состояние, в котором геометрия простран-

¹ Сейчас красное смещение $z = 0$, в момент рождения Вселенной $z = \infty$.

² Свежий взгляд на проблему космологической константы дан в недавнем обзоре [5].

ства-времени не деформирована. В более общем виде определение вакуума следующее: вакуум — это стабильное состояние квантовых полей без возбуждения волновых мод (неволновые моды представляют собой конденсаты). Уравнение состояния вакуума $p = -\rho$. Отсюда, обозначая $w \equiv p/\rho$, имеем:

- если $w = -1$, то это собственно вакуум;
- если $w > -1$, то это квинтэссенция (скалярное поле);
- если $w < -1$, то это фантомная энергия.

Последние наблюдения космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [6] дают оценку $-0,14 < 1 + w < 0,12$ на уровне достоверности (CL) 95 %. В этой же работе на основе измерений авторов получено новое (более точное) значение постоянной Хаббла: $H_0 \sim 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Вакуум во Вселенной (как следует из его определения) представляет собой комбинацию большого числа взаимно связанных вакуумных подсистем: гравитационный конденсат, хиггсовский конденсат, кварк-глюонный конденсат. Другие конденсаты с энергиями в области $265 \text{ ГэВ} < E < 10^{19} \text{ ГэВ}$, к сожалению, не изучены. Вопрос состоит в том, как они скординированы и с каким весом входят в полную энергию вакуума, которую можно определить как

$$\Lambda = \Lambda_{\text{QF}} + \Lambda_{\text{GVC}}, \quad (5)$$

где Λ_{QF} — конденсаты квантовых полей, Λ_{GVC} — гравитационный вакуумный конденсат — новая вакуумная структура [7], включающая в себя топологические дефекты с различной размерностью: кротовые норы (трёхмерные дефекты), микромембранны (двумерные дефекты), микроструны (одномерные дефекты) и точечные дефекты-монополи. Конечно, микродефекты с более высокой размерностью также присутствуют в этом конденсате. Трёхмерные микродефекты (кротовые норы) дают явный вклад в полную плотность энергии вакуума, т.е. ренормируют Λ -член:

$$\Lambda = \Lambda_0 - \frac{\kappa \hbar^2 c_3^2}{768\pi^2}, \quad (6)$$

здесь κ — гравитационная константа в единицах, в которых $c = 1$, $\hbar = 1$; c_3 — коэффициент параметризационной функции $\mu(a)$ (подробности можно найти в работе [7]). Формула (6) даёт первое указание на наличие компенсационного механизма в вакууме нашей Вселенной, так как трёхмерные топологические дефекты уменьшают Λ -член. Конденсаты других квантовых полей при понижении температуры также вносили отрицательные вклады в положительную плотность энергии вакуума (Вселенная теряла симметрию при понижении температуры, образуя конденсаты). Компенсационная гипотеза впервые, по-видимому, была высказана А. Долговым.

Следует отметить глубокий смысл наблюдаемой "малости" космологической константы. Вселенная с большим отрицательным Λ никогда не станет макроскопической (для того чтобы придать физический смысл этим утверждениям можно привлечь к рассмотрению Λ -антагравитацию). Во вселенной с большим положительным Λ будут отсутствовать сложные ядерные, химические и биологические структуры (поскольку мало времени для их образования).

Но продолжим обсуждение компенсационной гипотезы и следов релятивистских фазовых переходов,

вероятная цепочка которых могла быть следующей:

$$\begin{aligned} P &\xrightarrow[10^{19} \text{ ГэВ}]{} D_4 \times [\text{SU}(5)]_{\text{SUSY}} \xrightarrow[10^{16} \text{ ГэВ}]{} \\ &\xrightarrow[10^{16} \text{ ГэВ}]{} D_4 \times [\text{U}(1) \times \text{SU}(2) \times \text{SU}(3)]_{\text{SUSY}} \xrightarrow[\sim(10^5-10^{10}) \text{ ГэВ}]{} \\ &\xrightarrow[\sim(10^5-10^{10}) \text{ ГэВ}]{} D_4 \times \text{U}(1) \times \text{SU}(2) \times \text{SU}(3) \xrightarrow[100 \text{ ГэВ}]{} \\ &\xrightarrow[100 \text{ ГэВ}]{} D_4 \times \text{U}(1) \times \text{SU}(3) \xrightarrow[0,15 \text{ ГэВ}]{} D_4 \times \text{U}(1), \end{aligned} \quad (7)$$

где только два последних фазовых перехода могут быть конкретизированы, так как они хорошо исследованы (это ускорительные энергии):

$$\Lambda_{\text{QF}} = \Lambda_{\text{EW}} + \Lambda_{\text{QCD}}; \quad \rho_{\text{QF}} = -\rho_{\text{EW}} - \rho_{\text{QCD}}. \quad (8)$$

Электрослабый (EW) фазовый переход происходил при температуре около 100 ГэВ и сопровождался появлением хиггсовского конденсата, который также внёс свой вклад в уменьшение энергии вакуума:

$$\rho_{\text{EW}} = -\frac{m_H^2 m_W^2}{2g^2} - \frac{1}{128\pi^2} (m_H^4 + 3m_Z^4 + 6m_W^4 - 12m_t^4). \quad (9)$$

Первый член в правой части (9) — плотность энергии квазиклассического хиггсовского конденсата, второй — поляризация вакуума квантовыми полями, m_H , m_Z , m_W и m_t — соответственно массы бозона Хиггса, Z- и W-бозонов и t-кварка, g — константа связи. Бозонный вклад в формуле (9) отрицательный, а фермионный (t-кварк) — положительный. Так как значения всех констант (за исключением массы бозона Хиггса) известны, то можно вывести условие вакуумной стабильности: в Стандартной модели (СМ) взаимная компенсация положительных и отрицательных вкладов в плотность вакуумной энергии запрещена условием стабильности! Таким образом, утверждение об уменьшении вакуумной энергии при понижении симметрии в ходе эволюции Вселенной вследствие релятивистских фазовых переходов связано с условием стабильности вакуума и, вероятно, носит абсолютный характер. Если принять массу бозона Хиггса $m_H \sim 2m_W \sim 160 \text{ ГэВ}$, то тогда

$$\rho_{\text{EW}} \sim -(120 \text{ ГэВ})^4 \quad (10)$$

и остается мало сомнений в том, что хиггсовский бозон будет обнаружен на Большом адронном коллайдере.

Непертурбативный кварк-глюонный конденсат как элемент теории включён в СМ. Исследование уравнений квантовой хромодинамики (КХД) показало, что феномен конфайнмента имеет место, если квантовые корреляторы кварк-глюонных полей не являются нулевыми. Кварк-глюонный конденсат — система взаимно коррелированных непертурбативных флуктуаций, возникающих в результате квантово-топологических туннельных переходов между вырожденными состояниями глюонного вакуума [8]. Плотность энергии этого конденсата

$$\rho_{\text{QCD}} = -\frac{b}{32} \left\langle 0 \left| \frac{\alpha_s}{\pi} G_{ik}^a G_a^{ik} \right| 0 \right\rangle, \quad (11)$$

где $b = 9 + 8T_g(m_u + m_d + 0,8m_s) \approx 9,6$, $T_g = (1,5 \text{ ГэВ})^{-1}$ — характеристический пространственно-временной масштаб флуктуаций; m_u , m_d , m_s — массы u-, d- и s-кварков. Главный энергетический параметр кварк-

глоонного конденсата

$$u^4 = \left\langle 0 \left| \frac{\alpha_s}{\pi} G_{ik}^a G_a^{ik} \right| 0 \right\rangle \approx (360 \text{ МэВ})^4.$$

Согласно современной парадигме кварк-глоонный конденсат имеет несколько фазовых состояний, в каждом из которых флуктуации обладают собственной специфической микроструктурой. В результате имеем

$$\rho_{\text{QCD}} = -\frac{b}{32} u^4 \approx -(265 \text{ МэВ})^4. \quad (12)$$

Только кварк-адронный фазовый переход гасит более 10 порядков ($120^4 / 0,265^4 \sim 4 \times 10^{10}$) от величины полного гашения вакуумной энергии (более 78 порядков) вакуумными конденсатами:

$$\left(\frac{M_{\text{Pl}}}{M_{\text{QCD}}} \right)^4 = \left(\frac{1,2 \times 10^{19}}{0,265} \right)^4 \approx 4,5 \times 10^{78}. \quad (13)$$

Таким образом, вполне вероятно, что Вселенная потеряла более 78 порядков за первые 10^{-5} с своей эволюции. КХД-фазовый переход был последним в череде фазовых переходов и явился в некотором роде реперной точкой, и дело здесь вот в чём. Киральная симметрия $SU(3)_L \times SU(3)_R$ не была точной, а псевдоголдстоуновские бозоны представляют собой физическую реализацию нарушения этой симметрии³ при $E \sim 265$ МэВ. Д.А. Кирнциц много лет назад обратил моё внимание на тот факт, что π -мезоны — это псевдоголдстоуновские бозоны. Тогда π -мезоны как легчайшие частицы октета псевдоголдстоуновских состояний характеризуют основное состояние. В данном случае вакуум — основное состояние. Я.Б. Зельдович более 40 лет назад [9] из соображений размерности выписал формулу для подсчёта Λ -члена (слегка модифицированную Н.С. Кардашёвым), согласно которой космологическая постоянная представляет собой энергию нулевых колебаний квантовых полей, т.е. энергию вакуума:

$$\Lambda = 8\pi G_N^2 m_\pi^6 h^{-4} [\text{см}^{-2}], \quad \rho_\Lambda = G_N m_\pi^6 c^2 h^{-4} [\text{г см}^{-3}], \quad (14)$$

и тогда вакуумный конденсат последнего фазового перехода можно вычислить:

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{\text{cr}}} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}, \quad \rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N}. \quad (15)$$

При средней массе π -мезонов $m_\pi = 138$ МэВ и $H_0 = 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ имеем $\Omega_\Lambda \approx 0,73$. Последнее значение практически совпадает со значением наблюдаемой безразмерной плотности энергии вакуума $\Omega_\Lambda \approx \approx 0,726 \pm 0,015$, которое получено коллаборацией WMAP [6]. То есть можно сказать, что вакуумная энергия в то мгновение (10^{-5} с) "закалилась" после резкой компенсации конденсатами квантовых полей. Но осталось ещё "погасить" (в течение около 14 млрд лет) почти 44 порядка, для того чтобы достичь сегодняшнего значения плотности вакуумной (тёмной энергии)

$$\rho_{\text{DE}} \sim (1,8 \times 10^{-12} \text{ ГэВ})^4 \left(\left(\frac{0,15}{1,8} \times 10^{-12} \right)^4 \sim 5 \times 10^{43} \right). \quad (16)$$

³ Начало КХД-фазового перехода происходило при $E \sim 265$ МэВ, а окончание — при $E \sim 150$ МэВ.

Вакуумная энергия за этот огромный период времени должна была изменяться, так как Вселенная расширяясь, генерировала новые квантовые состояния, т.е. тратила энергию. Но в этот период скорость изменения вакуумной энергии была в 10^{57} раз меньше, чем скорость её изменения в квантовый период эволюции. Для того чтобы понять "последние" изменения вакуумной энергии от 0,15 ГэВ до $1,8 \times 10^{-12}$ ГэВ обратимся к введённому 'т Хофтом [10] голографическому принципу⁴, согласно которому "физика" трёхмерной системы может быть описана теорией, действующей на её двумерной границе. Используя анти-де-ситтеровское пространство-время, Х. Малдасена и Э. Виттен показали, что описание Вселенной теорией суперструн соответствует её описанию квантовой теорией поля, действующей на её границе. Однако этот пример неубедителен, так как наше пространство-время — де-ситтеровское. Но исследуем этот вопрос глубже, так как существует голографический предел числа степеней свободы, которые могут существовать внутри ограниченной поверхности. Дж. Бекенштейн [11] показал, что энтропия чёрных дыр пропорциональна $1/4$ площади горизонта событий, выраженной в планковских единицах. И если нашу Вселенную ограничить и измерить это "ограничение", как предлагают в работе [12], также в планковских единицах, то тогда в голографическом пределе плотность вакуумной энергии во Вселенной будет выражаться простой формулой:

$$\rho_{\text{DE}} = \frac{3M_{\text{Pl}}^4}{8S}, \quad (17)$$

где $S \leq \pi R^2 M_{\text{Pl}}^2$ — энтропия Вселенной. Если $R = 10^{28}$ см, то тогда $\rho_{\text{DE}} \sim 10^{-57}$. В этой формуле энтропия пропорциональна $1/4$ площади "поверхности" Вселенной. Вообще-то это определение — всего лишь предположение Фишлера–Сасскинда (Fischler–Susskind), называемое голографическим [12]. Важно также обсудить границы применимости голографического подхода и показать, как "гасятся" оставшиеся 44 порядка. Как отметил 'т Хофт [10], энтропийное ограничение даёт верхний предел средней плотности энергии Вселенной. Физика здесь следующая: новые квантовые степени свободы рождаются с увеличением площади хаббловского горизонта и их непрерывное пополнение требует некой энергии (подробности голографического подхода для космологии даны в работе [12], в которой отмечается, что общая теория относительности (ОТО) — яркий пример голографической теории). Однако голографический подход является правомерным до тех пор, пока применима ОТО. Квантовая теория в её настоящем виде — не голографическая теория. Используя эти "аргументы", проведём численную оценку. Вероятно, голографический подход можно применить после серии релятивистских фазовых переходов, с момента "закалки" вакуумной энергии при $E \sim 150$ МэВ, $t \sim 10^{-5}$ с, $R \sim 3 \times 10^5$ см (где R — причинный горизонт в то мгновение). Сейчас размер Вселенной составляет $R \sim 10^{28}$ см, и вакуумная энергия вследствие возникновения новых квантовых состояний потеряла около 45 порядков,

$$\left(\frac{10^{28}}{3 \times 10^5} \right)^2 \approx 10^{45}, \quad (18)$$

⁴ Все прежние физические принципы: Паули, эквивалентности, относительности, неопределённости Гейзенберга и др. приводили к явному прогрессу физики.

или даже больше, если причинный горизонт был менее 10^5 см в момент "закалки".

Суммируя вышесказанное, отметим, что в период ранней эволюции Вселенной при уменьшении энергии от 10^{19} ГэВ до 150 МэВ конденсаты квантовых полей компенсировали 78 порядков плотности вакуумной энергии всего за 10^{-5} с. Затем за 14 млрд лет ($\approx 4 \times 10^{17}$ с) вакуумная компонента за счёт рождения новых квантовых состояний при расширении Вселенной потеряла ещё 45 порядков. То есть 123 порядка вакуумной энергии теряются в обычных физических процессах.

Но обсудим некоторые соображения, связанные с "крамольными" утверждениями о том, что термодинамика чёрных дыр является следствием тепловой природы вакуума Минковского и что уравнение Эйнштейна имеет термодинамическое происхождение [13], т.е. это уравнение состояния Вселенной. Связь, которую установил Дж. Бекенштейн между гравитацией и термодинамикой крайне интересна, так как эйнштейновское уравнение — это гиперболическое дифференциальное уравнение второго порядка для метрики пространства-времени и термодинамика здесь, казалось бы, ни причём. Но дело в том, что Вселенная расширяется (при этом с ускорением) и постепенно охлаждается, поэтому физическая ситуация здесь другая, так как налицо неравновесная термодинамика и имеет место связь Клаузиуса: $dS = \delta Q/T$, при которой энтропия dS равна $1/4$ площади горизонта, δQ — поток энергии через горизонт, T — температура Унру (Unruh), видимая ускоряющимся наблюдателем внутри горизонта [13]. Идейной основой этих рассуждений является утверждение о том, что гравитация на макроскопической шкале — это проявление термодинамики вакуума. В конце концов, новые квантовые состояния Вселенной образуются за счёт энергии вакуума и уравнение (17) является фридмановским уравнением.

Резюмируя эту часть доклада, можно утверждать, что удовлетворительная численная разница между плотностями вакуумной энергии в планковский момент времени и в настоящий момент времени реализуется, если к вакууму применить компенсационную гипотезу и голографическое приближение и тем самым "погасить" 123 кризисных порядка за счёт наличия фазовых переходов и образования новых квантовых состояний.

Кроме того, стоит также отметить, что тёмная энергия всё более и более "уступает место" вакуумной энергии, как показали последние экспериментальные данные коллаборации WMAP [6], упомянутые выше.

2. Тёмная материя

Не менее интригующая ситуация сложилась с другим компонентом нашей Вселенной — тёмной материи (DM), плотность которой $\Omega_{\text{DM}} \sim 0,23$. Ещё в 1933 г. швейцарский астрофизик Фриц Цвики (Fritz Zwicky), работая в США на большом телескопе, понял, что скопление галактик Волосы Вероники (Coma) не может быть связано гравитационно без присутствия дополнительной массы, которую потом называли скрытой массой. В течение последних десятилетий стало ясно, что тёмная материя распространена во Вселенной намного обильнее, чем видимая материя ($\Omega_{\text{stars}} \sim 0,005$) и барионная материя ($\Omega_b \sim 0,04$). Появилось даже новое направление — DM-космология, задача которой заключается в том, чтобы выяснить, из каких частиц состоит тёмная материя. Формально этот компонент Вселенной может иметь даже барионную природу. В качестве примера

можно привести несформировавшиеся звёзды—"юпитеры", малый разогрев которых при сжатии не позволил зажечься в них ядерным реакциям, или другие явные барионные структуры: чёрные дыры, коричневые и белые карлики. В частности, в обзоре "Мелкомасштабная структура тёмной материи и микролинзирование" [14] подчёркивается, что более половины тёмного вещества может иметь барионную природу. Кроме того, во Вселенной могут существовать неизлучающие остатки чёрных дыр планковских масс (10^{-5} г) и, вероятно, преонные звёзды с $M \sim 10^2 M_\oplus$ (масса Земли $M_\oplus \sim 6 \times 10^{27}$ г) [15]. Эксперимент EROS-2 (EROS от франц. — Experience de Recherche d'Objets Sombres) [16] по микролинзированию 25 млн звёзд в Магеллановых Области дал следующие результаты относительно масс массивных компактных объектов гало (Massive Astrophysical Compact Halo Objects, MACHO): $M_{\text{MACHO}} \sim (10^{-2} - 10^{-6}) M_\odot$ (масса Солнца $M_\odot \approx 2 \times 10^{33}$ г). Не вдаваясь в подробности, следует отметить, что в тёмной материи барионная компонента присутствует обязательно, так как $\Omega_b \sim 0,04$, а $\Omega_{\text{stars}} \sim 0,005$. Заметим, что было высказано "сумасшедшее" предположение [17] о том, что Стандартная модель может иметь большое число своих копий, и тогда наличием барионов в скрытых копиях можно естественным образом объяснить тёмную материю. В этой модели гравитация будет сильной уже при энергии в 1 ТэВ и число копий тёмных барионов N может быть огромным:

$$10^{11} \leq N \leq 10^{32}. \quad (19)$$

Такое число копий становится "возможным" благодаря новой перестановочной симметрии (permutation symmetry), введённой в [17]. Здесь есть и другой интересный момент: инфляция осуществляется через инфлатон, относящийся к нашей копии Стандартной модели, в то время как возмущение и разогрев после инфляции (reheating) обеспечиваются модуляторным полем общим для всех копий. Небарионный компонент тёмной материи должен состоять из стабильных частиц, или эти частицы должны иметь время жизни большее, чем возраст Вселенной. К таким частицам относятся, в первую очередь, нейтрино, нейтралино и аксион. Конечно, существуют и другие предположения по составу тёмной материи, вплоть до предположения о тёмной материи Калуцы — Клейна. Такая тёмная материя аннигилирует в заряженные лептоны, которые способны образовать наблюдаемый спектр космических лучей из электронов и позитронов в соответствии с измеренным в экспериментах PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) и ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter) [18]. Небарионные частицы тёмной материи могут быть как холодными (CDM), так и горячими (HDM) [19]:

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 0,223 \pm 0,016, \quad \Omega_{\text{HDM}} \sim 0,0152. \quad (20)$$

Напомним, что если эти частицы в момент образования (закалки) имели релятивистские скорости, то тогда они являются HDM-частицами, а если нерелятивистские, то тогда они представляют собой CDM-частицы. Примером HDM-частицы является лёгкое нейтрино⁵. Открытие нейтринных осцилляций, вероятно, явилось поворот-

⁵ Нейтрино с массой 1 ГэВ и более уже является CDM-частицей.

ной точкой нашего понимания природы нейтрино. Это открытие поставило нейтринную физику в центр внимания физического сообщества, поскольку стало ясно, что нейтрино имеет массу (возникла даже индустрия нейтринных осцилляций (см. <http://neutrinooscillation.org>)). Наличие малых масс нейтрино подтвердило теоретические ожидания начала 1980-х годов, в которых так называемый see-saw-механизм индуцирует как лёгкие, так и сверхтяжёлые нейтрино, но некоторые "нейтринные вызовы" на будущее остались. Среди них — величина СР-нарушения в нейтринных осцилляциях, существование безнейтринного двойного β -распада (тогда нейтрино является частицей Майорана) и абсолютная шкала нейтринных масс. В работе Мальтони и др. [20] суммируются данные по нейтринным осцилляциям на уровне 3σ :

$$\begin{aligned}\Delta m_{2,3}^2 &= (1,4 - 3,3) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{1,2}^2 &= (7,2 - 9,1) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2.\end{aligned}\quad (21)$$

Следует упомянуть также о новых осцилляционных экспериментах с длинной базой, таких как MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search), CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signal), OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), в которых будут "охотиться" за $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ -осцилляциями [21].

Ограничения, следующие из космологии, чувствительны ко всем трём массовым состояниям нейтрино:

$$\sum_i m_i \leq 0,2 - 1,7 \text{ эВ (95 \% CL)}, \quad (22)$$

но космология не даёт значений углов смешивания или возможных СР-нарушений. Космологические ограничения следуют из обработки данных с космического аппарата WMAP (эксперимент СМВ — Cosmic Microwave Background), из распределения галактик из Слоановского цифрового обзора неба (Sloan Digital Sky Survey — SDSS), данных телескопа Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) и данных по сверхновым 1-го типа (SN1) [22]. Более определённое космологическое ограничение на массу нейтрино получено в недавней работе [23]: $m_\nu < 1,05$ эВ. В. Лобашёв [24] по β -распаду трития в эксперименте в Троицке даёт следующее ограничение на массу электронного антинейтрино:

$$m_\nu < 2,05 \text{ эВ}. \quad (23)$$

Коллaborация KATRIN (KArlsruhe Tritium Neutrino) обещает достичь в определении масс нейтрино чувствительности порядка 0,2 эВ [25]. Интересные перспективы и в безнейтринном β -распаде ($\beta\beta_{0\nu}$), в котором эффективная майорановская масса нейтрино

$$m_M^{\text{eff}} \leq 0,3 - 1 \text{ эВ}. \quad (24)$$

Отметим, что безнейтринный двойной β -распад должен происходить с несохранением лептонного числа и если он будет доказан, то это будет явным указанием на существование суперсимметрии, поскольку несохранение лептонного числа (как и барионного) является одним из ярких предсказаний суперсимметричных (SUSY) теорий.

Все нейтринные группы — это огромные коллаборации различных специалистов. Потоки нейтрино наблюдаются и измеряются разными методами в глубоких

шахтах (SNO (Sudbury Neutrino Observatory) в Канаде, Баксанская нейтринная обсерватория в России, лаборатория в шахте Болби (Boulby) в Англии, Национальная лаборатория Гран Сассо (Gran Sasso) в Италии, Kamioka в Японии), в реакторных экспериментах, в каскадах вторичных космических лучей от Солнца и даже от сверхновых. Общий вывод: основной компонент HDM-составляющей⁶ тёмной материи — нейтрино — вносит определённый и неисчезающий вклад в плотность тёмной материи ($n_\nu \sim 112 \text{ см}^{-3}$ для каждого сорта нейтрино).

Но перейдём к основным CDM-компонентам тёмной материи, представителями которой являются нейтралино и аксион (эти частицы появляются из расширения Стандартной модели). Это более экзотические частицы, чем нейтрино, но такой их статус не должен продержаться долго.

Нейтралино χ — слабовзаимодействующая массивная частица (Weakly Interacting Massive Particle, WIMP) — могла возникнуть в ранней Вселенной, если суперсимметрия имела место. Суперсимметрия может естественным образом решить проблему тёмной материи, поскольку в большинстве минимальных SUSY-моделей легчайший суперпартнёр является абсолютно стабильным, что связано с сохранением мультиплексивного квантового числа (R-чётности). Вероятно, на ранних стадиях эволюции Вселенной суперчастицы, рождаясь парами, быстро распадались, образуя наряду с обычными частицами легчайшие суперсимметричные частицы. Последние должны быть незаряженными и не обладать сильным взаимодействием, чтобы не нарушать нуклеосинтез (Big Bang Nucleosynthesis, BBN). Этим требованиям удовлетворяет нейтралино, описываемое майорановским спинором. Волновая функция нейтралино состоит из суперпозиции волновых функций четырёх суперсимметричных частиц: двух гейджино и двух хиггсино. Если нейтралино составляют гало нашей Галактики, то тогда их плотность [26]

$$n_\chi \sim \frac{0,3}{m_\chi \text{ ГэВ}} [\text{см}^{-3}]. \quad (25)$$

Как отмечено в работе [14], нейтралино в гало нашей Галактики (и, естественно, в гало других галактик) могли образовать объекты мелкомасштабной ($R \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}$) иерархической структуры и даже нейтралиновые звёзды. Нейтралино предполагается наблюдать по продуктам распада при их аннигиляции. На поиски продуктов аннигиляции направлены усилия семи (!) подземных лабораторий. Сигнал от аннигиляции нейтралино принадлежит области 100–200 ГэВ (энергии Большого адронного коллайдера), и их вклад в полную плотность Вселенной лежит в пределах

$$0,1 < \Omega_\chi < 0,3, \text{ если } 5 \times 10^{-8} < \sigma_\chi < 5 \times 10^{-10} \text{ пб} \quad (26)$$

(1 пб $\equiv 10^{-36} \text{ см}^2$). На поиски нейтралино направлены эксперименты таких нейтринных групп, как SuperKamio-kande, "Байкал", "Ananda", "Баксан", а также эксперимент ANTARES (Astronomy with Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), который будет проведён в Средиземном море.

⁶ Стерильные нейтрино, как и гравитино, — это тёплая тёмная материя.

Аксион был постулирован более трёх десятилетий назад для объяснения сохранения в сильном взаимодействии Р- и СР-симметрии, несмотря на то, что в Стандартной модели (в электролабом секторе) эти симметрии нарушаются. Печеи и Куин [27] предложили решить сильную СР-проблему путём введения новой глобальной симметрии U_{PQ} . Тогда аксионы как бозоны Намбу–Годстоуна ассоциируются со спонтанным нарушением этой симметрии. Аксион имеет нулевой спин, нулевой электрический заряд и отрицательную внутреннюю чётность. Масса аксиона

$$m_a \sim 6 \times 10^{-6} \frac{10^{12}}{f_a} [\text{эВ}], \quad (27)$$

и если свободная константа связи $f_a < 10^{12}$ ГэВ, то плотность аксионов не будет превышать критическую плотность Вселенной. В этой ситуации $m_a \sim 10^{-5}$ эВ. Эта частица могла бы быть образована в КХД-фазовом переходе в очень ранний период эволюции Вселенной. Аксионы могут быть обнаружены в лаборатории посредством стимуляции сильным магнитным полем их конверсии в два микроволновых фотона [28]. Эксперимент ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) направлен на регистрацию реликтовых аксионов. В пилотном поиске аксионов коллаборацией ADMX в области масс 1,98–2,17 мкэВ аксионов не обнаружено [29].

Отметим ещё один важный факт, который непосредственно не связан с темой доклада, однако связан с аксионами, точнее с фамилионами [30]. Если следующий фундаментальный уровень материи (проеоны) будет обнаружен, то тогда роль поколений частиц проясняется. Первое поколение частиц даёт наблюдаемый нами барионный мир. Учёт симметрии между поколениями (как следствие их наличия) даёт всю тёмную материю. Таким образом, структурирование тёмной материи, а вслед за ней и барионного компонента могут дать частицы (фамилионы), возникающие только при рассмотрении симметрий между поколениями.

В среде из фамилионов мог иметь место фазовый переход, который "закалил" фрактальность (фрактальность — прерогатива только фазовых переходов), и барионы повторили бы распределение тёмной материи. В этом случае фрактальность барионной крупномасштабной структуры находит естественное объяснение. Следует хотя бы упомянуть работы по взаимодействию тёмной энергии и тёмной материи (см. [31] и приведённые там ссылки), а также работы по $f(R)$ гравитации (см. [32] и приведённые там ссылки), которые непосредственно связаны с тёмной материей.

Другие варианты для частиц тёмной материи, которые мы здесь подробно не обсуждали, включают в себя стерильное (суперсимметричное) нейтрино, гравитино, аксино, лёгкие скалярные частицы, лёгкие хиггсы, тёмную материю Калуцы–Клейна, сверхтяжёлую тёмную материю (simpzillas), нетопологические солитоны (Q-balls), заряженные массивные частицы (CHAMPS), слабовзаимодействующую тёмную материю (SWIMPS), тёмную материю мембранного мира, тяжёлое нейтрино четвёртого поколения, зеркальные частицы и др. Список экзотических кандидатов был представлен в докладе J. Collar на симпозиуме памяти Д. Шрамма в декабре 2005 г.

В заключение заметим, что наш главный результат — объяснение происхождения огромной разницы (123 порядка) между значениями плотности вакуумной энергии в момент рождения Вселенной и в настоящий момент, которая вызвала многолетний кризис физики. В нашей работе [33] плотность вакуума была вычислена при значениях красного смещения от $z = 0$ до $z = 10^{11}$ с использованием "космологического калькулятора" [34]. Кроме того, пришло понимание, зачем нужно три поколения частиц в нашей Вселенной. Но для такого "понимания" необходим следующий фундаментальный уровень материи (проеоны). Тогда первое поколение частиц образует наблюдаемый нами барионный мир, а учёт симметрии между поколениями даёт всю тёмную материю.

Список литературы

1. Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
2. Peebles P, Ratra B *Rev. Mod. Phys.* **75** 559 (2003)
3. Bousso R *Gen. Rel. Grav.* **40** 607 (2008); arXiv: 0708.4231
4. Frieman J A, Turner M S, Huterer D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46** 385 (2008); arXiv: 0803.0982
5. Бурдюжа В В *Астрон. журн.* **86** 419 (2009) [Burdyuzha V V *Astron.* **53** 381 (2009)]
6. Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 330 (2009); arXiv: 0803.0547
7. Burdyuzha V, Vereshkov G *Astrophys. Space Sci.* **305** 235 (2006)
8. Marochnik L, Usikov D, Vereshkov G, arXiv: 0811.4484
9. Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **6** 883 (1967) [Zel'dovich Ya B *JETP Lett.* **6** 316 (1967)]
10. Stephens C R, 't Hooft G, Whiting B F *Class. Quant. Grav.* **11** 621 (1994); gr-qc/9310006
11. Bekenstein J D *Phys. Rev. D* **7** 2333 (1973)
12. Balazs C, Szapudi I, hep-th/0603133
13. Eling Ch, Guedens R, Jacobson T *Phys. Rev. Lett.* **96** 121301 (2006); gr-qc/0602001
14. Гуревич А В, Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **167** 913 (1997) [Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **40** 869 (1997)]
15. Hansson J, Sandin F *Phys. Lett. B* **616** 1 (2005); astro-ph/0410417
16. Renault C et al. *Astron. Astrophys.* **324** L69 (1997)
17. Dvali G, Sawicki I, Vicman A *JCAP* (08) 009 (2009); arXiv: 0903.0660
18. Hooper D, Zurek K M *Phys. Rev. D* **79** 103529 (2009); arXiv: 0902.0593
19. Frampton P H, astro-ph/0506676
20. Maltoni M et al. *New J. Phys.* **6** 122 (2004)
21. Balantekin A B *Phys. Lett. B* **613** 61 (2005); hep-ph/0405019
22. Dolgov A D *Phys. Rep.* **370** 333 (2002)
23. Малиновский А М и др. *Письма в Астрон. журн.* **34** 490 (2008) [Malinovsky A M et al. *Astron. Lett.* **34** 445 (2008)]
24. Lobashev V M *Nucl. Phys. A* **719** C153 (2003)
25. Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment. KATRIN, <http://www-ik.fzk.de/~katrin>
26. Majorana Collab., nucl-ex/0311013; SuperNEMO, <http://nemo.in2p3.fr/supernemo>
27. Peccci R D, Quinn H R *Phys. Rev. Lett.* **38** 1440 (1977)
28. Sikivie P *Phys. Rev. Lett.* **48** 1156 (1982)
29. Duffy L D et al. *Phys. Rev. D* **74** 012006 (2006)
30. Burdyuzha V et al. *Astron. Astrophys. Trans.* **23** 453 (2004)
31. Micheletti S, Abdalla E, Wang B *Phys. Rev. D* **79** 123506 (2009)
32. Motohashi H, Starobinsky A A, Yokoyama J *Int. J. Mod. Phys. D* **18** 1731 (2009)
33. Burdyuzha V, arXiv:1003.1025; *Phys. Rev. B* (2010), submitted
34. Wright E R *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118** 1711 (2006)