

ISSN 0004-6299

Том 100, Номер 8

Август 2023



АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 100, номер 8, 2023

Проблемы происхождения Вселенной

И. Д. Новиков 649

Астрономические и космохимические аспекты проблемы происхождения жизни

М. Я. Маров 655

Новые формы материи во Вселенной

А. М. Черепашук 684

Тонкие и толстые диски вокруг черных дыр и кротовых нор

С. В. Чернов 693

Современные оценки массы Млечного пути

В. В. Бобылев, А. Т. Байкова 708

Нейтронные звезды в приближении однородного шара

Г. С. Бисноватый-Коган, Е. А. Патраман 721

ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

© 2023 г. И. Д. Новиков^{1,2,3,*}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

²Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark

³Федеральное государственное бюджетное учреждение

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: novikov@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В статье дается обзор основных положений космологии и ее современного состояния.

Ключевые слова: космология, инфляция

DOI: 10.31857/S000462992308008X, **EDN:** HMTZGS

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемой происхождения Вселенной занимается космология, которая за последние 30–40 лет претерпела колоссальную эволюцию. Еще в 1993 г. знаменитый английский физик С. Хокинг писал: “В последние 30 лет в статусе космологии произошли огромные изменения. Когда я в 1962 г. начинал мои исследования в Кембридже, космология мыслилась как псевдонаука, где самые дикие спекуляции никак не ограничивались любыми возможными наблюдениями”. Сейчас положение в корне изменилось. Проблема рождения Вселенной и другие космологические проблемы решаются на основе последних достижений физики и проверяются точнейшими астрономическими наблюдениями. Никакие измышления здесь в принципе невозможны.

2. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Сначала напомним несколько хорошо известных космологических фактов. Уже более 100 лет известно, что мы живем в расширяющейся Вселенной. Этот факт теоретически был предсказан российским ученым А. Фридманом [1] и подтвержден наблюдениями американского астрофизика Э. Хаббла [2]. Галактики удаляются друг от друга. Вся Вселенная расширяется.

Обычно, когда говорят о расширяющейся Вселенной, проводят такую аналогию. Представим себе, что галактики — это отдельные монетки на поверхности раздувающегося шарика: если этот шарик раздувается, то все расстояния между галактиками увеличиваются. (Большинство галактик входит в скопления и группы галактик, так

что лучше говорить об удалении скоплений галактик друг от друга). Такая двумерная аналогия — поверхность шарика — это раздувающаяся система координат Лагранжа, расширяющаяся вместе с расширением всего мира. И такая система часто очень удобна, особенно для компьютерных вычислений.

Скорость удаления галактик хорошо измерена. Измерены также и расстояния до галактик. Таким образом, мы можем сказать, что нами измерен темп расширения Вселенной. Если же известен темп расширения Вселенной, мы можем сказать, когда примерно оно началось. Оказалось, что это произошло примерно 13.5 млрд. лет тому назад. Материя в самом начале расширения была очень плотной, почти однородной, за исключением очень маленьких по амплитуде флуктуаций этого однородного распределения по пространству. Эти флуктуации возникли вместе с рождающейся Вселенной.

Кратко историю Вселенной можно обрисовать следующим образом. В самом начале вещество Вселенной было очень плотным, как уже было сказано, почти однородным и очень горячим. Поэтому нашу Вселенную мы называем “горячей”. Примерно 13.5 млрд. лет назад началось ее расширение. В процессе расширения Вселенной температура падала. После первых минут расширения Вселенной, когда температура упала примерно до миллиарда градусов, произошел синтез легких химических элементов. Тяжелые химические элементы во Вселенной возникли существенно позже, в ходе ее дальнейшей эволюции — в звездах, в эпоху, близкую к нам.

Примерно через 300 тыс. лет после начала расширения температура упала до 3–4 тысяч градусов. Произошла так называемая “рекомбинация” горячей плазмы, плазма превратилась в нейтральный газ. Никаких галактик, никаких звезд тогда, конечно, не было. В ходе последующей эволюции неоднородности нарастали из-за гравитационной неустойчивости. В конце концов из них возникли галактики, звезды, и мы переходим к эпохе, близкой к нам. Так, коротко говоря, развивалась Вселенная.

От той далекой эпохи, когда Вселенная была горячей, в наше время остались существенные следы. Самым существенным из этих следов является слабое электромагнитное излучение, называемое реликтовым. Оно заполняет всю видимую часть Вселенной. Сегодня его температура составляет всего 2.7 градуса абсолютной шкалы Кельвина. Но оно остыло лишь в ходе расширения Вселенной. Раньше оно было гораздо горячее и находилось в тепловом равновесии с горячей плазмой. Причиной существования реликтового излучения является огромная температура горячей плазмы в прошлом. Все сказанное надежно установлено и подтверждено наблюдениями.

Теперь мы подходим к трем важнейшим проблемам происхождения Вселенной.

1. Как родилась горячая Вселенная?
2. Что послужило причиной начала расширения?
3. Что было до рождения горячей Вселенной?

Все эти вопросы связаны между собой. Мы начнем со второго вопроса. Неправильно представлять, что причиной расширения стала высокая температура плазмы и, следовательно, высочайшее давление. Дело в том, что давление служит причиной возникновения гидродинамической силы, которая способна придать начальную скорость расширению материи, только если есть перепад давления. Так происходит, например, при взрыве бомбы в разреженной атмосфере. Чрезвычайно плотный горячий газ имеет очень большое давление, которое соседствует с практически ничтожным давлением в атмосфере. Значительный перепад давления и вызывает появление силы. В таком случае может возникнуть гидродинамическая причина для появления начальных скоростей и разлета.

Во Вселенной ничего подобного, конечно, не случилось. Никакого пространства вне Вселенной не было, никаких перепадов давления не было, материя была распределена практически однородно. Следовательно, большая температура не может быть причиной появления начальных скоростей разлета во Вселенной.

Но из-за чего же началось расширение Вселенной? Первые догадки о возможных причинах были высказаны в середине 1960-х гг. у нас в стра-

не Эрастом Глинером [3, 4]. Согласно предположению Э. Глинера в начале расширения материя находилась в так называемом вакуумном состоянии. Вакуумное состояние материи характеризуется тем, что материя в этом состоянии имеет огромное, но весьма своеобразное давление. По абсолютной величине оно равно плотности энергии (т.е. плотности материи, умноженной на квадрат скорости света), но со знаком минус. Иными словами, это огромное отрицательное давление. Но что такое отрицательное давление? Это просто натяжение; оно присутствует, например, в растянутой резине.

Это огромное отрицательное давление, конечно, тоже было распределено во Вселенной равномерно. Никакой гидродинамической силы это давление вызвать не могло, потому что оно везде было одинаково, так же, как и положительное давление горячего вещества, о котором я упоминал раньше и которое также не могло вызвать никакой гидродинамической силы.

Но такое вакуумное состояние материи порождает гравитационное отталкивание, подобно тому, как между одноименно заряженными электрическими зарядами создается электростатическое отталкивание. Гравитационное отталкивание возникает вместо гравитационного притяжения, которое существует в нормальных условиях.

По идее Э. Глинера, это гравитационное отталкивание и послужило причиной первотолчка, который привел к появлению гигантских начальных скоростей расширения материи. Тогда Глинеру никто не поверил, да его, по существу, и не поняли. Но впоследствии развитие представлений о том, что причиной чрезвычайного мощного первотолчка послужило гравитационное отталкивание, оказалось чрезвычайно плодотворным. Постепенно эти идеи начали развиваться и у нас в стране, и за рубежом.

После первотолчка Вселенная начала расширяться с постоянным ускорением, все быстрее и быстрее, так как эта сила продолжала действовать. Мы называем это чрезвычайно быстрое или, как еще говорят, экспоненциально быстрое расширение инфляцией. Именно инфляция и была до возникновения горячей Вселенной.

Кратко мы можем представить себе картину следующим образом. Сначала размер Вселенной, в которой мы живем, был ничтожно мал, всего 10^{-33} см, что на 20 порядков меньше размеров атомного ядра. Соответственно, плотность была гигантская — 10^{93} граммов на кубический сантиметр. Несмотря на такую гигантскую плотность из-за малости объема полная масса существовавшей тогда материи была всего 10^{-5} – 10^{-6} г. И эта Вселенная расширялась с огромной скоростью.

Расширение характеризуется так называемым “параметром Хаббла” H , который зависит от

плотности материи ρ как $H = \sqrt{G\rho}$ (G — это ньютоновская гравитационная постоянная). Тогда этот параметр был равен 10^{43} с^{-1} , т.е. расширение было чрезвычайно быстрым. Объем Вселенной становился все больше и больше, а плотность фактически не менялась, она падала чрезвычайно медленно. Из-за этого масса материи во Вселенной возрастала.

Как же быть в таком случае с законом сохранения массы-энергии? Дело в том, что с новой массой рождалось и новое тяготение этой массы, а энергия гравитации, энергия тяготения отрицательны. Поэтому положительная энергия материи компенсировалась рождающейся отрицательной энергией гравитации, и в сумме закон сохранения энергии соблюдался.

Вакуумная материя неустойчива. Инфлантон (как называют вакуумную материю) через ничтожное время (10^{-36} с) распался квантовым образом и превратился в горячую плазму — обычную материю. Это и был квантовый процесс рождения нашей Вселенной. За эти 10^{-36} сек , мгновение, которое мы не можем не только представить, но даже назвать правильно, Вселенная невероятно раздулась — в 10^{10} . Это единица с миллиардом нулей. И вся Вселенная стала гораздо больше, чем та ее часть, которую мы можем сейчас наблюдать и исследовать.

Таким образом, можно сказать, что мы знаем, что было перед началом горячей Вселенной: был процесс инфляции, который за ничтожный промежуток времени определил очень многое из того, что существует сегодня во Вселенной.

Эти выводы очень сложной современной физико-математической теории. Но, может быть, все это просто домыслы? Существуют ли какие-то проверки, подтверждения выводов этой теории? Да, существуют!

Во Вселенной имеются явные следы той очень ранней эпохи. Наиболее информативно слабое электромагнитное излучение, о котором мы уже говорили, — реликтовое излучение, или, как его часто называют в англоязычной литературе, космическое микроволновое фоновое излучение. Это излучение содержит сведения о первых моментах расширения Вселенной. И мы, расшифровывая эту информацию, можем проверить выводы теории, о которых я говорил. Дело в том, что это излучение приходит на Землю с разных сторон немножко с разной интенсивностью. Вариации интенсивности крайне малы — примерно одна стотысячная доля от среднего значения (2.7 К). Их крайне трудно уловить. Первые попытки измерения этих малых флуктуаций в зависимости от направлений на небе делались сразу после обнаружения самого реликтового излучения, кото-

рое было открыто в 1965 г. [5] (в 1978 г. за это открытие была присуждена Нобелевская премия).

Попытки обнаружения вариаций реликтового излучения предпринимались и у нас в стране: соответствующие измерения проводились со спутника “Реликт”. Но уверенно открытие этих флуктуаций было совершено при помощи американского спутника COBE, запущенного в 1989 г. Сообщение о результатах первых измерений было сделано в 1992 г. [6], и этот год считается датой обнаружения этих маленьких флуктуаций. Их открытие было чрезвычайно важным и также было удостоено Нобелевской премии. Но угловое разрешение первых наблюдений было очень плохим, всего около 7° . Поэтому информация, которую получали из этих наблюдений, была не слишком богатой.

В последующие годы неоднократно проводились другие наблюдения как с помощью радиотелескопов на поверхности Земли, так и с помощью радиотелескопов, которые поднимались на воздушных шарах в верхние слои земной атмосферы. В июне 2001 г. был запущен американский спутник WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), который существенно обогатил наши познания о слабых флуктуациях реликтового излучения. Угловое разрешение радиотелескопов WMAP составляло 0.2° . Чувствительность приборов была также значительно выше, чем в эксперименте COBE. Наконец, весной 2009 г. запущен европейский спутник “Planck” с радиотелескопом, имеющим еще лучшее угловое разрешение и лучшую чувствительность, чем спутник WMAP.

Теория предсказывает определенную зависимость между размерами более холодных и более горячих пятен на карте интенсивности излучения. Хотя вариации очень малы, они все-таки должны зависеть от размера этих пятен.

Как видно из рис. 2, зависимость очень своеобразна. Принципиальный механизм, приводящий к такой зависимости, был открыт российским физиком А.Д. Сахаровым, поэтому такую осциллирующую зависимость называют “Сахаровскими осцилляциями”. В положении максимумов и минимумов на этой кривой, в их ширине, форме и высоте как раз и заключена та информация, которую можно расшифровать и сделать выводы о процессе рождения Вселенной, о том, что происходило сразу после этого рождения, а также о параметрах сегодняшней Вселенной.

Наблюдая с помощью телескопов чуть более горячие и холодные пятна реликтового излучения, мы, по существу, видим небольшие неоднородности в распределении материи во Вселенной в далеком прошлом. Эти небольшие неоднородности возникли вследствие квантовых процессов при рождении Вселенной, а затем в ходе ее дальнейшей эволюции привели к возникнове-

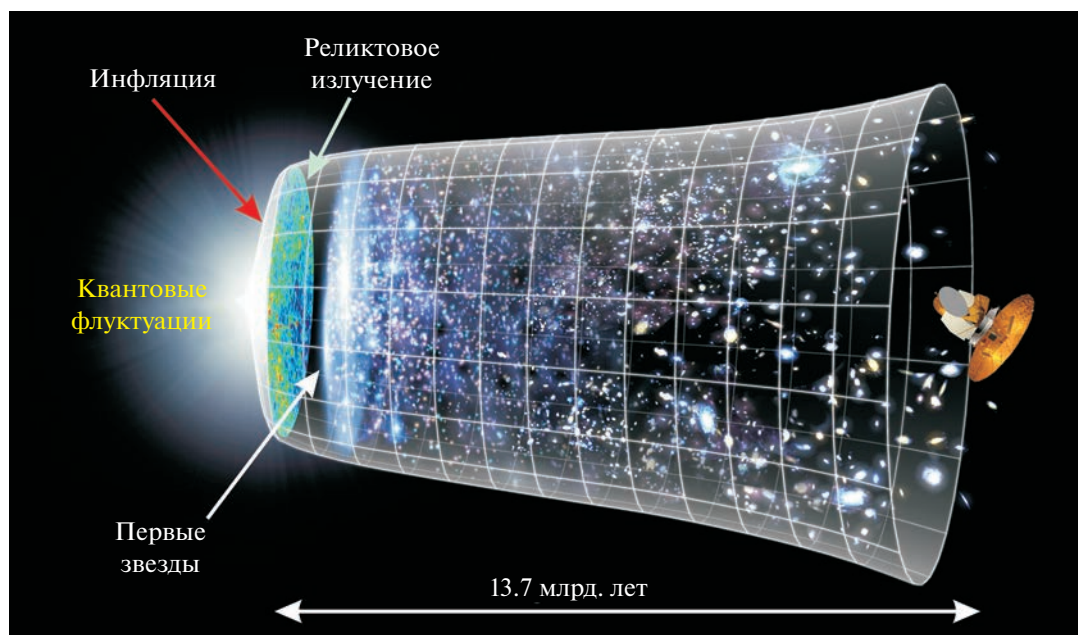


Рис. 1. Хронология развития Вселенной от Большого Взрыва до наших дней. © NASA / WMAP Science Team.

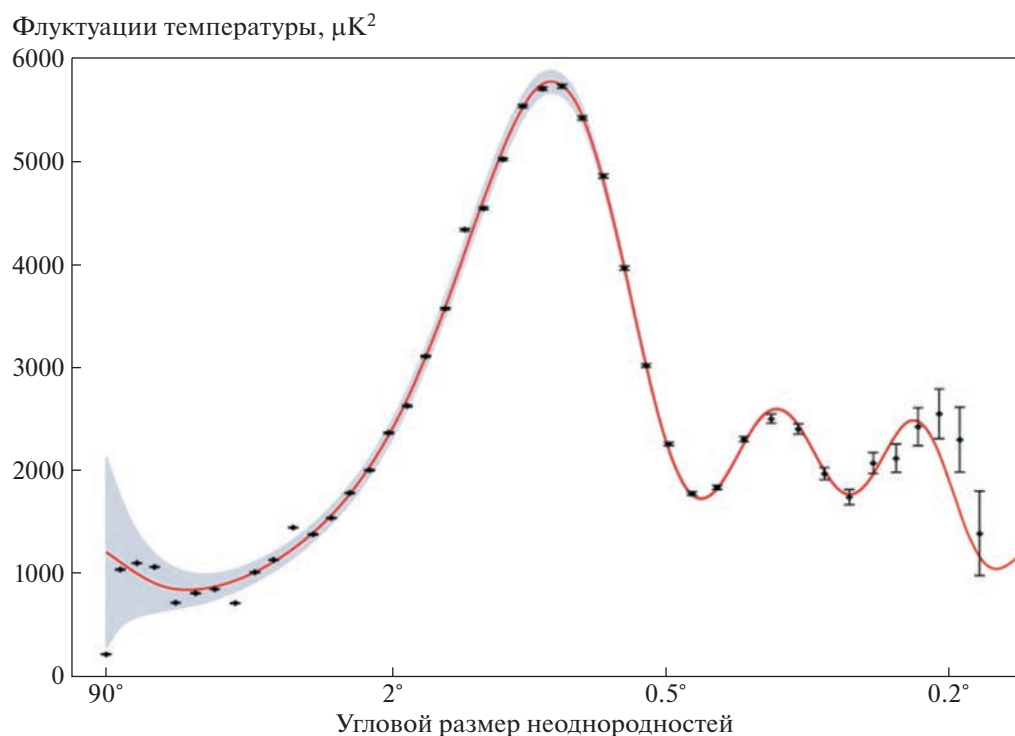


Рис. 2. Теоретическая зависимость амплитуды неоднородностей реликтового фона от их углового размера. По горизонтальной шкале отложен масштаб неоднородностей, по вертикальной — относительная интенсивность вариаций.

нию галактик и их скоплений. Поэтому наблюдения распределения галактик также дают информацию о первичных неоднородностях, а значит, и о процессах, происходивших при рождении Вселенной.

Итак, с одной стороны, у нас есть наблюдения, а с другой — теория, которая предсказывает значения для целого ряда физических параметров, которые можно измерить. Что же дало сопоставление информации, полученной из упомянутых

наблюдений, с предсказаниями теории, описывающей происхождение Вселенной? Подтверждаются или опровергаются наши представления? Конечно, в популярной статье невозможно углубиться в какие-то детали. Поэтому я упомяну о только двух таких параметрах.

Прежде всего, это так называемый параметр “Омега”. Он характеризует общую кривизну трехмерного пространства Вселенной и зависит от соотношения между плотностью материи и скоростью расширения Вселенной. Теория предсказывает, что по величине этот параметр должен равняться единице. Наблюдения показывают, что с точностью до ошибок измерений он действительно близок к единице, т.е. наблюдения подтверждают то, что предсказывает теория. Как сказано выше, это, главным образом, наблюдения анизотропии реликтового излучения, а также наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной.

Другой параметр n описывает зависимость между размерами небольших неоднородностей, существовавших во Вселенной сразу после ее рождения, и амплитудой этих неоднородностей. Теория предсказывает, что относительная амплитуда этих неоднородностей не должна зависеть от размеров, т.е. должна быть одна и та же на всех масштабах. Если это так, то параметр n также должен быть с точностью до ошибок измерений равен единице. И это на самом деле так.

Таким образом, я думаю, что мы можем сказать с достаточной уверенностью, что основные параметры теории действительно подтверждаются прямыми астрономическими наблюдениями и что инфляционный период в самом начале существования Вселенной действительно имел место. Начался он, по-видимому, через 10^{-43} с после рождения Вселенной.

Но тогда возникает еще один естественный вопрос: что было еще раньше, что было перед началом инфляции Вселенной? К сожалению, тут и теоретические, и тем более экспериментальные выводы гораздо более проблематичны. Мы далеко не все еще знаем. Но тем не менее, предварительные заключения здесь тоже возможны.

По современным представлениям, перед инфляционным периодом был так называемый период квантового существования, или квантовый период в эволюции Вселенной. Промежутки времени, более короткие, чем 10^{-43} с, и размеры Вселенной меньше 10^{-33} см нельзя рассматривать как непрерывное пространство и непрерывное время. Пространство и время в этот период распадались на отдельные кванты, и все это находилось в состоянии, образно говоря, “кипения вакуума”, с чрезвычайно большой плотностью вакуумоподобной материи, порядка 10^{93} граммов в кубическом сантиметре. В эту эпоху “самого начала”

пространство менялось причудливейшим, квантовым образом, менялись размерность пространства, его топология.

Процессы, которые при этом происходят, удается моделировать на компьютерах. И такое моделирование показало, что из-за квантовых флуктуаций в различные моменты времени случайным образом происходит превращение кипения вакуума в отдельные пузыри раздувающихся вселенных. Каждая из них подобна нашей Вселенной. Причем разные вселенные могут иметь разные физические свойства и развиваться по-разному. В одних вселенных будут происходить процессы, подобные процессам в нашей Вселенной. В других вселенных законы физики могут отличаться от законов нашей Вселенной, и потому процессы будут совсем иные. Потом может происходить коллапс отдельных пузырей, и они снова будут переходить в квантовое кипение.

В принципе, разные вселенные могут быть связаны топологическими туннелями, так называемыми “кратовыми норами”. Эти туннели представляют собою связи, оставшиеся после эпохи “кипения вакуума”. Сквозь такие туннели может протекать материя, а значит и проходить информация из других Вселенных. Если такое предположение верно, то очень важно попытаться найти в нашей Вселенной входы в такие кратовые норы. В современной наблюдательной космологии такие поисковые наблюдения планируются.

Итак, процесс бесконечного рождения разных вселенных не имеет ни границ, ни пределов. Это вечное кипение, вечное рождение новых вселенных и такое же вечное их умирание. Вот такая картина вырисовывается перед нами на основе последних достижений физики и астрофизики, достижений, касающихся процессов рождения Вселенной, и судьбы вообще всей, так сказать, Сверхвселенной.

В заключение хочу подчеркнуть следующее. В самом начале истории современной космологии, когда Эдвин Хаббл экспериментально обнаружил, что наша Вселенная расширяется, многие астрономы и физики встретили это открытие с сильным скептицизмом. Казалось, что оно неизбежно ведет к заключению о внезапном возникновении Вселенной из ничего. Такой вывод казался очень далеким от естественной науки. Знаменитый английский астроном того времени Артур Эддингтон писал: “Мне кажется, что наиболее удовлетворительной была бы теория, которая делает картину начала мира не столь неестественно оборванной”. Это было написано сразу после открытия Хаббла в самом конце 1920-х гг. прошлого столетия. Сегодня мы можем сказать, что пожелание Эддингтона в какой-то степени сбылось. Последующее развитие космологии по-

казало, что вся Вселенная вечна. Наша Вселенная рассматривается как один из пузырьков в этой целой Сверхвселенной.

Андрей Линде — один из создателей современной теории расширяющейся Вселенной, вечно рождающейся и умирающей, — написал так: “В этом сценарии Вселенная как целое бессмертна. Каждая отдельная часть Вселенной может отделиться от сингулярности (кипящего вакуума) когда-то в прошлом и закончиться в сингулярности когда-то в будущем. Однако конца эволюции всей Вселенной нет”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Friedmann*, Zeitschrift für Physik **10**, 377 (1922).
2. *E. Hubble, M. L. Humason*, Astrophys. J. **74**, 43 (1931).
3. *Э. Б. Глинер*, Доклады АН СССР **192**, 771 (1970).
4. *Э. Б. Глинер*, Успехи физических наук **172**, 221 (2002).
5. *A. A. Penzias, R. W. Wilson*, Astrophys. J. **142**, 419 (1965).
6. *G. F. Smoot, C. L. Bennett, A. Kogut, E. L. Wright et al.*, Astrophys. J. Lett. **396**, L1 (1992).

PROBLEMS OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE

I. D. Novikov^{a,b,c}

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark*

^c*National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

The paper presents an overview of the main foundations of cosmology and its current state.

Keywords: cosmology, inflation

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И КОСМОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ

© 2023 г. М. Я. Маров^{1,*}

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: marovmail@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Кратко рассмотрены фундаментальные свойства известной формы жизни, включая основополагающие представления о химической эволюции вещества и свойствах живой материи, основой которой служат биогеохимия и молекулярная биология. Обсуждаются концепции, лежащие в основе современного понимания происхождения жизни исходя из химической и биологической эволюции. Кратко затронуты основы астробиологии и интригующая проблема существования внеземного разума и поиска жизни во Вселенной.

Ключевые слова: астрономия, биогеохимия, молекулярная биология, абиогенез, панспермия, эволюция, астробиология, внеземной разум

DOI: 10.31857/S0004629923080078, EDN: HMMESR

1. ВВЕДЕНИЕ

Обсуждаемая тема чрезвычайно обширна и по своему содержанию является междисциплинарной. Она относится к самым фундаментальным направлениям современного естествознания и напрямую связана с астрономией и космохимией, поскольку мы изучаем не только ключевые проблемы происхождения жизни и ее физико-химические свойства, но и возможности ее зарождения в различных условиях космической природной среды и на разных объектах Вселенной. Это современное сравнительно молодое направление исследований, объединившее прежде всего астрономию и биологию, получило название “астробиология”.

Астробиология, которую вначале называли биоастрономией, изучает происхождение, распространение и эволюцию жизни на Земле, в Солнечной системе и во Вселенной, включая проблему существования внеземного разума. Стремительный прогресс биологии и астрофизики, в том числе открытие внесолнечных планетных систем, поставил этот раздел астрономических исследований на новую научную основу. Современные наземные и космические инструменты открыли уникальные возможности наблюдений структуры и свойств таких космических объектов, как молекулярные облака, околозвездные газопылевые протопланетные диски, которые следует считать колыбелями жизни и в кото-

рых протекают начальные космохимические процессы, ответственные за ее истоки.

Последующие процессы, приводящие к зарождению живой материи, исключительно сложны и многообразны. В соответствии с фундаментальными принципами термодинамики, в основе циклических процессов энерго- и массообмена на живой планете лежат биогеохимические функции, и они считаются ответственными за происхождение, поддержание и распространение жизни. Наличие жизни создает новую оболочку планеты — биосферу, пронизывающую, согласно В.И. Вернадскому, все остальные оболочки: верхнюю часть коры (литосферу), гидросферу и атмосферу. В свою очередь, основой биосферы служат биотические циклы, включающие в себя процессы биогеохимической эволюции и трансформации органического вещества.

Жизнь, по определению В.И. Вернадского, “это могучая геологическая сила нашей планеты, формирующая облик Земли и создающая ее в образе живой планеты” [1]. Вернадский полагал, что добиогенная стадия эволюции неживого (косного, по его определению) вещества на Земле произошла очень быстро и что уже в самую раннюю геологическую эпоху, в архее, могли появиться миллионы открытых систем на основе образования разнообразных макромолекул — предшественников высокомолекулярных протеинов и нуклеотидов. Эти системы, как правило, были способны оставаться в течение некоторого



Рис. 1. Схематическое изображение фундаментальных свойств жизни.

времени в состоянии динамического равновесия с окружающей их средой и не изменяться, как это следует из характера и парагенезиса минералов. Высокая степень внутренней организации некоторых из этих систем привела к появлению устойчивых метаболических процессов и примитивной репликации, которые послужили основой возникновения биосферы, охватывающей, как уже говорилось, все другие оболочки планеты.

К ключевым вопросам, лежащим в основе астрономических аспектов проблемы происхождения жизни, следует отнести следующие:

— Что такое жизнь, что предопределяет ее возникновение?

— Каковы необходимые природные условия на планете для предбиологической эволюции вещества, приводящей к зарождению жизни?

— На какой, помимо известной нам водно-углеродной основе, в принципе возможно зарождение и существование жизни?

— Что выделило Землю среди других планет Солнечной системы для возникновения жизни и развития интеллекта?

— Существует ли примитивная жизнь на Марсе, в подповерхностных океанах галилеевых спутников Юпитера (Европе, Ганимеде), спутнике Сатурна Энцеладе, и каковы были пути возникновения и эволюции первичной углеводородной среды на Титане?

— Какова вероятность локального (*in situ*) возникновения жизни на планете на основе биохимических процессов (абиогенеза) по сравнению с глобальным источником — приносом “семян жизни” извне (панспермия)?

— Каковы перспективы развития возникшей жизни до интеллектуального уровня и обнаружения внеземных цивилизаций (проблема SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence)?

Эти критерии являются основополагающими при рассмотрении вопросов зарождения и распространения (пролиферации) жизни и вероятности ее обнаружения за пределами собственной планеты. Попробуем обсудить эти актуальные вопросы с акцентом на ключевые астрономические и биохимические проблемы.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЖИЗНИ. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Для жизни необходимы жидкая вода, наличие биогенных элементов и доступные источники свободной энергии. К фундаментальным свойствам жизни относятся: потребление энергии и природных веществ, репликация (воспроизводство), выделение отходов, активный биоминеральный обмен и эволюция (рис. 1). Согласно Вернадскому, “Жизнь состоит в значительной мере в извлечении из окружающей среды определенных химических элементов, проведении их через соединения или жидкости организма и их выделении вновь в окружающую среду, нередко в виде новых соединений” [2].

Основной вопрос, который мы задаем, касаясь проблемы зарождения жизни: как начался процесс перехода от предбиотической химии к возникновению процессов метаболизма, репликации и передаче генетической информации, поскольку в современном понимании жизнь определяют как функциональную систему, спо-

собную перерабатывать и передавать информацию на молекулярном уровне. Одна из характерных основ жизни — функциональная упорядоченность (самоорганизация).

Возникновению жизни и формированию биосферы предшествует химическая эволюция вещества в космосе и на планете, имеющая важные следствия для последующих процессов биогеохимической и биологической природы, включая упорядочение и самоорганизацию. В межзвездной среде, особенно в областях гигантских межзвездных молекулярных облаков, обнаружено большое разнообразие органических соединений, многие из которых имеют довольно сложный химический состав (см. табл. 1 [3]). В них содержатся азот, кислород и биологически важный углерод. Особенно много (до 10%) его связано в полициклических ароматических углеводородах (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), сосредоточенных, преимущественно, в молекулярных облаках, где они образуют сложные углеродные цепи и решетки типа фуллеренов, а при низких температурах (~10 K) захватываются ледяными оболочками пылевых частиц облака. Ледяные мантии состоят из H_2O с примесью метанола (CH_3OH), CO_2 , CO^1 и NH_3 , а через процессы фотоллиза они функционально связаны с образованием кетонов, метила, алкоголя, карбоксильных групп и других сложных органических соединений. Измерения с высоким спектральным и пространственным разрешением сетью высокочувствительных наземных радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter Array [4]) выявили наличие многих сложных молекул, важных с точки зрения предбиогенной химии. Среди них молекулы формальдегида (H_2CO), этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), гликольальдегида (CH_2OHCHO), этиленгликоля ($((\text{CH}_2\text{OH})_2)$), метилформиата (метилового эфира муравьиной кислоты CH_3OCHO), диметилэфира (CH_3OCH_3), а также много других соединений, включая обогащенные дейтерием. Особый интерес вызывают молекулы, содержащие пептидные связи, и простые сахара, а также метиламин, являющийся предшественником простейшей аминокислоты — глицина. По оценкам, общее число органических молекул, содержащих до 40 атомов, достигает нескольких сотен. Все это указывает на чрезвычайно богатую предбиогенную химию межзвездной среды, особенно молекулярных облаков и окрестностей молодых звезд, что расширяет перспективы обнаружения в их планетных системах признаков жизни.

¹ Заметим, что CO считается наилучшим индикатором переноса массы вещества в протопланетном диске. В этом качестве этот компонент используется, в частности, в наблюдениях ALMA и служит для оценки массового содержания пыли и газа.

Наряду с органическим синтезом, возникновению жизни могут способствовать широкая космическая распространенность необходимых ингредиентов и тот факт, что метаболически (дыхание, питание) жизнь обладает большим разнообразием и приспособляемостью. Вместе с тем жизнь способна существовать лишь в ограниченном диапазоне условий природной среды, несмотря на высокую выживаемость микроорганизмов. Иными словами, сам космос налагает сильные ограничения на условия возникновения жизни, прежде всего на параметры небесного тела, на котором могла бы зародиться жизнь, что ограничивает вероятность ее обнаружения и признаков воздействия на природную среду.

3. ОСНОВЫ БИОГЕОХИМИИ

Согласно законам термодинамики, основой жизни служат *биогеохимическая энергия* живого вещества и стремление системы достичь минимума свободной энергии. Эти принципы заложены в исходных геохимических процессах на Земле и, вероятно, в обобщающих космохимических процессах на других телах во Вселенной. Вернадский допускал, что сам космос является источником жизни, возникшей вслед за образованием Вселенной. Он писал: "...Жизнь есть такая же вечная черта строения космоса, какой является атом и его совокупности" [1]. Оставляя в стороне это спорное утверждение, согласимся с другим его утверждением относительно взаимосвязи форм жизни, как целостного космопланетарного явления в масштабах биосферы. Эта взаимосвязь определяет химизм, миграцию и дифференциацию химических элементов и отдельных изотопов на основе особых разнородных биогеохимических функций и биогеохимических циклов — систем незамкнутых и необратимых круговоротов веществ в биосфере и других оболочках Земли. Непрерывно идущая биогенная миграция атомов в коровом слое Земли, вызываемая геохимической энергией живого вещества, приводит к изменению в них атомных и изотопных соотношений элементов. При этом неполная обратимость (незамкнутость) является одним из важнейших свойств биогеохимических циклов, имеющая планетарное значение. Эти циклы пронизывают все живое в биосфере как глобальной экосистеме, причем их важнейшим компонентом являются трофические связи (пищевые цепочки).

К биогеохимическим функциям (циклам), как к основе жизни, относятся:

- метаболизм и дыхание (все организмы);
- газообмен с участием $\text{N}_2\text{—O}_2\text{—CO}_2\text{—CH}_4\text{—H}_2\text{—NH}_3\text{—H}_2\text{S}$ (все организмы);
- кислородная функция (фотосинтез), присущая хлорофильным растениям;

Таблица 1. Некоторые молекулы, обнаруженные в межзвездной среде (числами полужирного начертания обозначено количество атомов в молекуле)

2	3	4	5	6	7	8	9
H ₂	H ₂ O	NH ₃	SiH ₄	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CHOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ OH
OH	H ₂ S	H ₃ O ⁺	CH ₄	NH ₂ CHO	CH ₃ NH ₂	CH ₃ CCCN	(CH ₃) ₂ O
SO	SO ₂	H ₂ CO	CHOOH	CH ₃ CN	CH ₃ CCH		CH ₃ CH ₂ CN
SO ⁺	N ₂ H ⁺	H ₂ CS	HC=CCN	CH ₃ NC	CH ₂ CHCN		H(C=C) ₃ CN
SiO	HNO	HNCO	CH ₂ NH	CH ₃ SH	H(C=C) ₂ CN		H(C=C) ₂ CH ₃
SiS?	SiH ₂	HNCS	NH ₂ CN	C ₅ H	C ₆ H		
NO	HCN	CCCN	H ₂ CCO	HC ₂ CHO			
NS	HNC	HCO ₂ ⁺	C ₄ H	CH ₂ =CH ₂			
HCl	HCO	CCCH	C ₃ H ₂	H ₂ CCCC			11
NaCl	HCO ⁺	C–CCCH	CH ₂ CN				H(C=C) ₄ CN
KCl	OCS	CCCO	C ₅				
AlCl	CCH	CCCS	SiC ₄				
AlF	HCS ⁺	HCCH	H ₂ CCC				
PN	SiCC	HCNH ⁺	HCCNC				13
SiN	CCO	HCCN	HNCCC				C ₆ H ₅ CN
NH	CCS						
CH	C ₃						
CH ⁺	MgNC						
CN	H ₃ ⁺						
CO							
CS							
C ₂							
SiC							

- окислительно-восстановительная функция (превращение веществ и энергии в процессе жизнедеятельности);

- бактерии, ответственные за оксигенизацию биосферы;

- автотрофная функция (хемосинтез);

- концентрационная функция (накопление определенных химических элементов в одно- и многоклеточных организмах);

- кальциевая функция (накопление солей Са бактериями, мхами, водорослями, морскими организмами);

- регуляционная функция (разрушение органических соединений бактериями и грибами).

Главную роль в этих процессах играют микроорганизмы как самая мощная биогенная планетарная геологическая сила, самое мощное проявление живого вещества [5].

Происхождение жизни обусловлено ключевыми процессами биохимической эволюции – появлением молекулярных механизмов организа-

ции биосистем, образованием цепочек нуклеотидов и аминокислот. Они служат, соответственно, информационной (ДНК и РНК) и функциональной (протеины) основами жизни. Условия появления жизни тесно связаны с геологией и геохимией. «Геология позволяет сейчас научно ставить вопрос о начале биосферы, геохимия научно точно определяет условия, каким должна удовлетворять жизнь для того, чтобы могла создаться биосфера, а биогеохимия определяет геохимические процессы в биосфере, протекающие при участии живых организмов. “Живое вещество, так же, как и биосфера, обладает своей особой организованностью и может быть рассматриваемо как закономерно выраженная *функция биосферы*”» [6, 7].

Возникшие первичные примитивные организмы могли потреблять основные органические вещества в виде мономеров из небιологических источников, как это происходит сейчас в глубинной биосфере Земли. Сценарий начальных этапов возникновения биосферы с участием и последо-

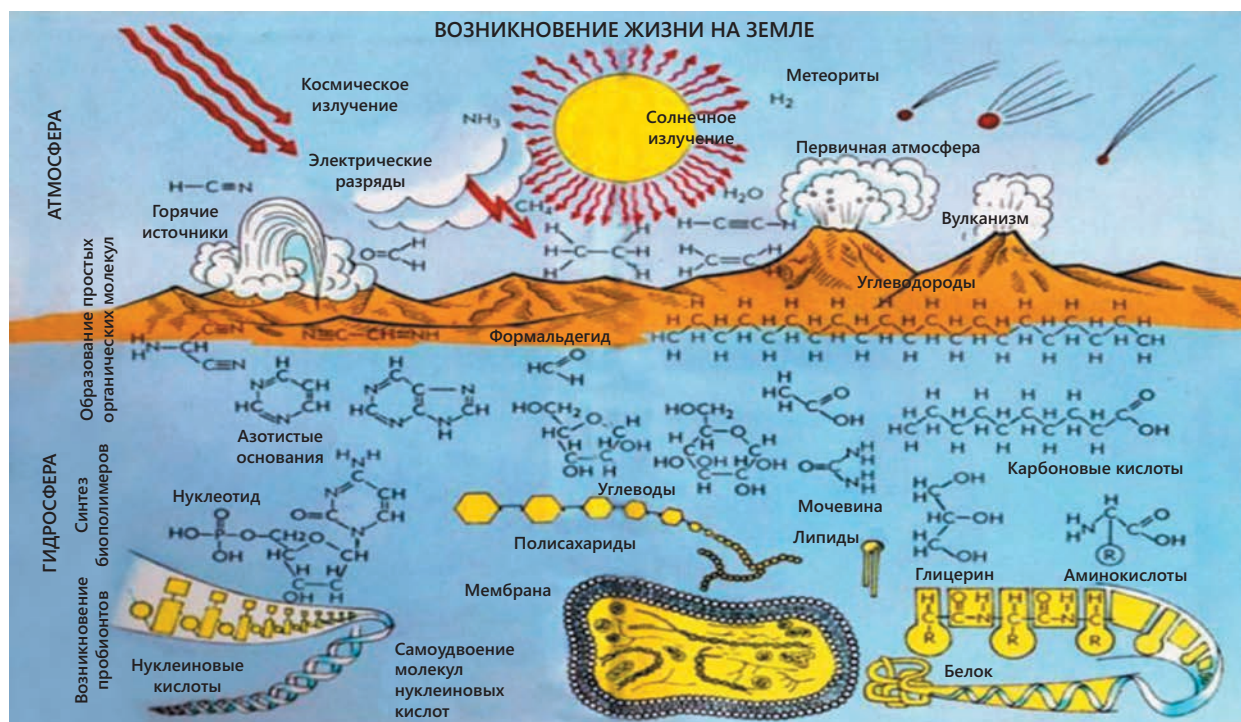


Рис. 2. Предбиологическая эволюция органических соединений на Земле в раннем архее, предшествующая образованию биосферы. © Википедия

вательным усложнением простейших органических соединений показан на рис. 2.

Основной вопрос зарождения жизни — переход от абиогенной химии к процессам метаболизма, репликации и передачи генетической информации. В качестве вероятных механизмов такого перехода рассматривают абиогенез и панспермию. Под абиогенезом понимают возникновение жизни из неорганического вещества, в противоположность биогенезу: все живое от живого (*omne vivum ex vivo*). Согласно принципу итальянского натуралиста XVII столетия Франческо Реди, абиогенез предполагает возникновение особой формы материи из косного вещества в ранние геологические эпохи. Вернадский считал вполне закономерным абиогенное появление многообразных живых форм “в процессе геологического круговорота веществ” из неорганических веществ, приводящего к совокупности многих видов, морфологически принадлежащих к разным классам организмов и раннему появлению биоценозов” [6, 7], хотя последующий эволюционный процесс был длительным. В качестве вероятных источников предбиотических соединений последователи этой идеи называют опаринский “первичный бульон”, дарвиновские теплые пруды, лагуны, приведшие к возникновению биоты, и глубоководные вулканические жерла — подводные горячие источники (vents), в ко-

торых могли появиться самые ранние формы жизни — гипертермофильные микробы.

Занос жизни на Землю извне путем панспермии — переносом “семян жизни” из межзвездной (межпланетной) среды — представляется нам, наряду с абиогенезом, вполне возможным. Этот механизм, предложенный шведским физхимиком С. Аррениусом в самом конце XIX в., предполагает, что блуждавшие в течение миллионов лет в космосе и занесенные на Землю организмы нашли на ее поверхности условия, благоприятные для развития жизни или, по крайней мере, стимулирования абиогенеза. Возникшие на начальной стадии первичные примитивные организмы могли потреблять основные органические вещества в виде мономеров из небиологических источников, как это происходит сейчас в глубинной биосфере Земли путем хемосинтеза. Идею о возможности сочетания абиогенеза и панспермии в процессах возникновения жизни разделял Вернадский. Синергизм этих двух подходов показан на рис. 3.

К сожалению, мы пока далеки от понимания основ зарождения и устойчивого функционирования живой системы. Очевидно, эти процессы происходили на молекулярном уровне в общей эволюционной “стреле времени” (по Пригожину). При этом новые изомерные формы образовывались из достаточно крупных структурированных молекулярных комплексов, генерация



Рис. 3. Синергизм локального (абиогенез) и глобального (панспермия) источников происхождения жизни. © Википедия

которых вероятно имела в своей основе детерминированный характер [8]. Одновременно происходила генерация отрицательной энтропии при выполнении в целом для всей системы второго начала термодинамики.

Есть вполне определенное понимание того, что природа наделила основные классы углеродсодержащих органических соединений стремлением к функциональному упорядочению через селективный катализ и самовоспроизведению, и в этом состоит основная парадигма жизни. Первичное упорядочение в состоянии динамического равновесия (гомеостаза) создают цепочки нуклеотидов и цепочки аминокислот — пептидов, соединенных амидными связями, образующими белки. При этом цепочки нуклеотидов обеспечивают самовоспроизведение (репликацию) и передачу наследственной информации, как основное свойство живой материи, а цепочки аминокислот формируют биологические структуры — универсально построенные организмы, способные к бесконечному разнообразию (биоразнообразию).

Как видим, уникальными свойствами органических соединений, необходимых для возникновения и эволюции жизни, является их способность к функциональному упорядочению. В мире органических соединений такое упорядочение обусловлено уникальными свойствами соединений углерода. Только на основе углерода могут образовываться сложные биополимерные структуры, создаваться упорядочение через селективный (ферментативный) катализ и функция репликации. Это утверждение следует считать основной парадигмой происхождения жизни. Поэтому встречающиеся иногда рассуждения о возможности существования жизни на основе, например, кремния вряд ли следует считать обос-

нованными. По нашему мнению, если существует жизнь во Вселенной, то молекулярно она, вероятно, построена примерно аналогичным образом, как на Земле, — на основе углерода, его соединений и воды и на принципах, обеспечивающих белково-нуклеотидную форму функционирования. К этому добавим, что существование живых систем обеспечивается наличием флуктуаций отрицательной энтропии в отсутствие химического равновесия системы, несовместимого с понятием жизни. Еще одним фундаментальным свойством жизни является наличие диссимметрии — однонаправленной ориентировки биологических молекул-изомеров молекул (L-аминокислот и D-сахаров), известная как хиральность. Причина ее возникновения остается до конца непонятой.

4. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ

При изучении проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения во Вселенной важно понимать, как она построена у нас на Земле. Основой такого понимания служат молекулярная биология и биогеохимия, важнейших положений которых мы здесь очень кратко коснемся [9].

Основа живых организмов — биополимеры: нуклеиновые кислоты (ДНК и РНК) и протеины (белки). Биополимеры представляют собой длинные цепочки, состоящие из различных мономерных звеньев (мономеров).

Нуклеиновые кислоты образованы четырьмя видами мономеров (нуклеотидов), а белки — двадцатью видами мономеров (аминокислот). Нуклеотиды отличаются входящими в их состав, вме-

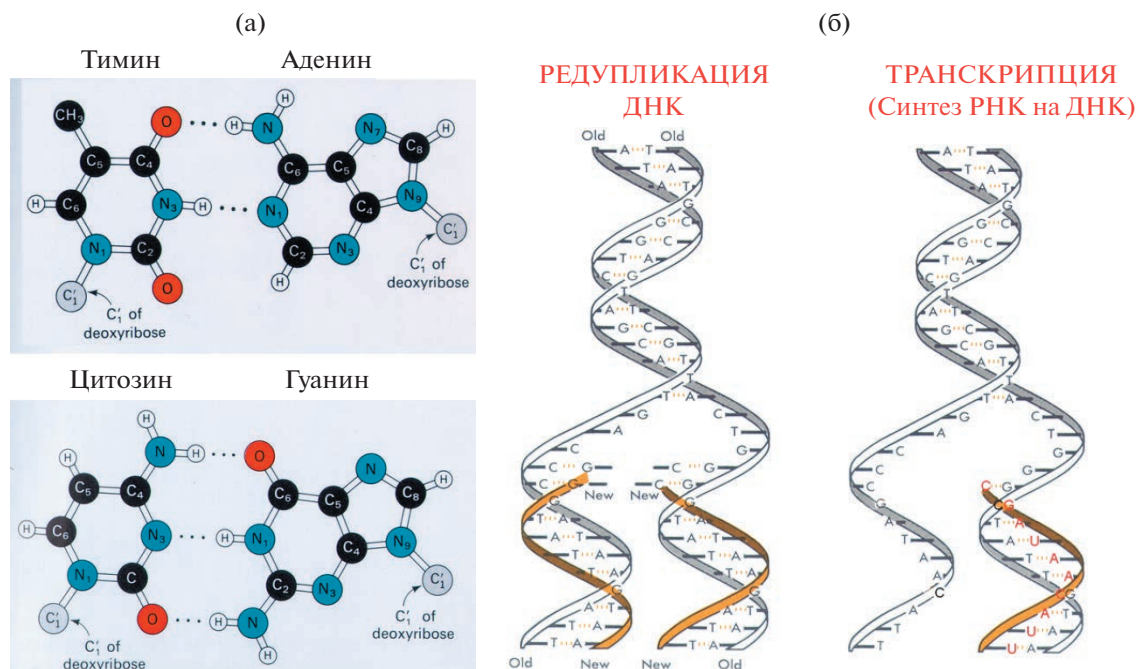


Рис. 4. а) Нуклеотиды, образующие комплиментарные пары на основе водородных связей. б) Полинуклеотидные цепи со свойствами редупликации (воспроизводства) и транскрипции (синтеза РНК на основе ДНК).

сте с молекулами сахара и фосфатной группы, азотистыми основаниями. Это аденин (А), гуанин (G), цитозин (C) и тимин (Т) в ДНК или урацил (U) в РНК. Цепочки нуклеотидов и аминокислот образуют, соответственно, длинные полинуклеотидные цепи и пептиды, участвующие в биосинтезе белков. Азотистые основания нуклеотидов аденин, гуанин, цитозин и тимин (урацил) образуют комплиментарные пары на основе водородных связей (Т–А, С–G и т.д.). Такие структуры, показанные на рис. 4, обладающие чрезвычайно плотной трехмерной упаковкой, обеспечивают получение точных копий (*реplik*) нуклеотидной цепи, необходимых для синтеза белков и служат информационной основой жизни на молекулярном уровне.

Белки (протеины) — это функциональная основа жизни: они обеспечивают построение клеток и протекание биохимических реакций, а ДНК и РНК — ее информационная основа: они управляют параметрами белков. ДНК и РНК обладают замечательными свойствами, в том числе редупликации (воспроизводства) и транскрипции (синтеза РНК на основе ДНК) (рис. 4).

Свойства белка определяются нуклеотидной последовательностью кодирующего его гена в соответствии с выработанными природой правилами — генетическим кодом, имеющим детерминированную природу. Каждая аминокислота имеет нуклеотидный символ, которым служит нуклеотидный триплет (кодон). Каждый смысловой ко-

дон придает определенное свойство одной аминокислоте, обеспечивая тем самым программирование синтеза белков. Всего существует $4^3 = 64$ различных кодонов (61 — смысловых и 3 — стоп). Таким образом, биологическое разнообразие может в принципе характеризоваться невообразимо громадным числом 20^{61} .

Каталогом генетического (наследственного) материала в живой системе на клеточном уровне служит геном, который для большинства организмов состоит из молекул ДНК, а сами размеры геномов в зависимости от сложности организмов отличаются на несколько порядков. Но геном некоторых вирусов состоит из РНК, как, например, геном вируса HIV1, вызывающего СПИД. Соматические клетки высших млекопитающих и человека содержат 23 пары хромосом — 22 пары телных хромосом (аутосом) и одну пару половых хромосом X и Y (гаметов), находящихся в клеточном ядре, — причем каждая клетка обладает множеством содержащихся в митохондриях (органеллах эукариотических клеток) копий митохондриальной ДНК (мДНК). Эти молекулы преобразуют химическую энергию пищи в доступную для потребляемой клетками форму, такую, например, как аденозинтрифосфат (АТФ), к которой мы еще вернемся при обсуждении путей зарождения жизни. Двадцать две аутосомы, половые хромосомы, митохондриальная ДНК человека содержат в совокупности примерно 3.1 млрд. пар оснований.

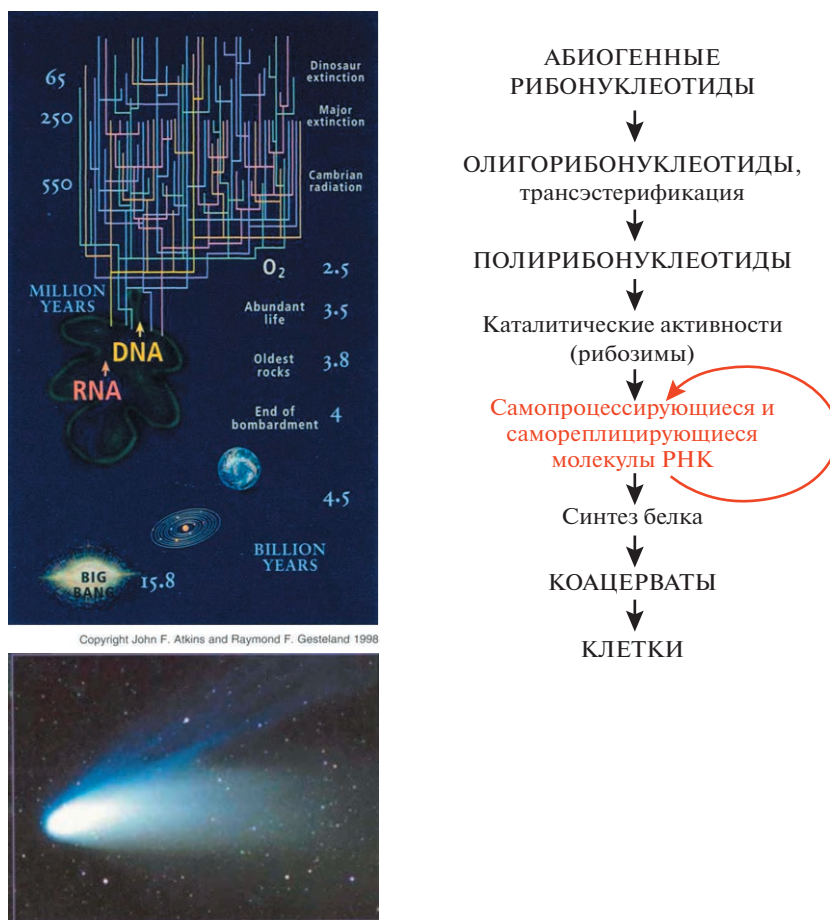


Рис. 5. Концепции древнего мира РНК как одна из гипотез происхождения жизни. © А.С. Спирин. Слева внизу — комета, ядро которой может служить хранилищем РНК.

5. СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ

Среди разнообразных концептуальных подходов к проблеме происхождения жизни мы выделим две основные гипотезы, наиболее обоснованные и заслуживающие, на наш взгляд, наибольшего внимания. Абстрагируясь от теологических воззрений, это *древний мир РНК* и *последовательное упорядочение*. Автор склоняется к концепции упорядочения, которая в наибольшей степени отвечает его мировоззрению.

Представление о том, что прообразом жизни был древний мир РНК [10], как основа эволюции первичной биосферы, разделяется многими известными исследователями, среди которых К.Р. Вуз, Л. Оргел, В. Гилберт, А.С. Спирин. Аргументами в пользу данной концепции служат уникальные свойства этой молекулы (трехмерно-го гетерополимера), определяемые последовательностью оснований РНК вдоль нити и характером скручивания (рис. 5). Действительно, ансамбли молекул РНК выполняют функции ассимиляции, метаболизма, репликации. Важно

подчеркнуть, что РНК могут содержать также генетическую информацию или служить временной копией генетической информации. Для этого используется короткоживущая промежуточная молекула (m-РНК), несущая первичную информацию о производстве специфического белка и обеспечивающая копирование клеточного генома ДНК.

Вообще РНК способны выполнять многие базовые функции ДНК, участвуя в процессе синтеза белка (*рибосомы*). К ним относятся: кодирование — программирование синтеза биополимеров линейной последовательностью полинуклеотидов; репликация — строгое копирование генетического материала; свертывание линейных полинуклеотидов в уникальные компактные конфигурации (3D структуры); распознавание — специфическое взаимодействие с другими макромолекулами; каталитические функции. К этому перечню следует добавить, что молекула РНК обладает транспортными свойствами (t-РНК), т.е. обеспечивает перенос других молекул, необходимых для протекания ря-

да биологических реакций и синтеза белков. Каждая из 20 существующих молекул t-РНК способна присоединяться лишь к одной из 20 аминокислот, которую она приносит к определенной рибосоме и вместе с нею встраивается в цепочку синтезируемого белка, в соответствии со спецификацией, содержащейся в промежуточной молекуле m-РНК.

В свою очередь, каталитические РНК (*рибозимы*) участвуют, наряду со стандартными белковыми катализаторами (*энзимами*), в синтезе белка, что обеспечивает выбор определенных межмолекулярных реакций и уменьшает энергии, необходимые для их протекания. Помимо этого, рибозимы обеспечивают правильную расстановку связей между нуклеотидами в цепочке в процессе сращивания молекул m-РНК. Только после этого они будут аккуратно считаны рибосомой в процессе синтеза белка. Таким образом, рибосомные молекулы РНК (r-РНК) играют важнейшую роль в синтезе белка, поскольку они образуют структурное ядро рибосомы, состоящее более чем из 50 различных белков и нескольких r-РНК. Рибосома как бы “полагается” на каталитические функции r-РНК при синтезе белков. Считывая информацию, закодированную в m-РНК, она “узнает”, какой белок нужно создать. Тем не менее до сих пор до конца непонятно, как работает чрезвычайно сложный механизм декодирования генетической информации нуклеиновых кислот в структурные параметры белков и как он сформировался в процессе эволюции.

Из всего сказанного следует, что РНК, будучи рабочим инструментом клеточного производства, могли быть прототипами живых систем (рис. 5). Однако, как показали оценки потребных времен на шкале преобразования органического вещества, возникновение мира РНК и его эволюция до первых высокоорганизованных организмов — бактерий примерно в первые полмиллиарда лет истории Земли крайне маловероятно, что признают сами сторонники данной концепции. Снять это противоречие позволяет гипотеза о зарождении и начальной эволюции ансамблей молекул РНК в космической среде, в первую очередь в ядрах комет. Попадая на Землю в ходе широко распространенных процессов миграции и соударений, эти молекулы обретают среду, стимулирующую их дальнейшую эволюцию. Иными словами, с древним миром РНК напрямую связана концепция панспермии — внеземного происхождения жизни. Эту гипотезу мы рассмотрим подробнее в разделе, посвященном связи биологической эволюции с астрономическими факторами.

Альтернативой концепции древнего мира РНК служит концепция последовательного упорядочения в процессах возникновения и следую-

щей вслед за хаотическим состоянием стадии эволюции живой материи — стадии молекулярного мира [8]. В своей первоначальной форме она предложена Э.М. Галимовым [11, 12], рассмотревшим упорядочение (или стремление к упорядочению) как химическую основу жизни. В рамках этой концепции, в которой молекулы РНК с их основными функциями также играют важную роль, зарождение жизни представляется как непрерывный процесс упорядочения в открытой стационарной системе, которая в отличие от консервативной (гамильтоновой) системы, сохраняющей внутреннюю энергию, является диссипативно-информационной системой, обмениваясь с окружающей средой энергией и информацией. Такая система состоит из предбиотических органических соединений, возникших в процессе химической эволюции и, возможно, имевших, как отмечалось выше, космическое происхождение. В ней идут сопряженные химические реакции и производится, наряду с положительной, отрицательная энтропия (неэнтропия), что является непременным условием возникновения структурной организации (упорядочения) в хаотической среде. В такой системе поддерживается энергия выше некоторого минимального уровня, при непременном выполнении пригожинского условия минимума производства энтропии [13].

Химическое упорядочение (ограничение числа партнеров в реакции, числа механизмов и путей взаимодействия) эффективно осуществляется путем селективного катализа с участием биохимических катализаторов — ферментов, представляющих собою пептидные цепочки, свернутые в плотные трехмерные структуры и обладающие чрезвычайно высокой активностью. Согласно Галимову, “в природе нет органических соединений, более эффективно осуществляющих упорядочение посредством селективного катализа, чем пептиды” [11]. Исходя из данной концепции, ключевую роль играет упомянутая в контексте клеточного преобразования энергии молекула аденозинтрифосфата (АТФ), состоящая из аденина, рибозы и фосфатной группы (рис. 6). Она поглощает солнечную энергию и передает ее в сопряженную химическую систему, а универсальным посредником, обеспечивающим сопряжение, является вода (реакция гидролиза). Привлекательным обстоятельством является то, что АТФ синтезируется на основе простых молекул — цианистого водорода HCN и формальдегида H₂CO, широко распространенных в космосе.

Возникновение порядка из хаоса (самоорганизация) — удивительное свойство неживой материи, широко распространенное в природе. Оно наблюдается на больших и малых масштабах в структуре галактик, в фракталах и структуре кристаллов, в турбулентных течениях и др. Способность к упорядочению через селективный катализ

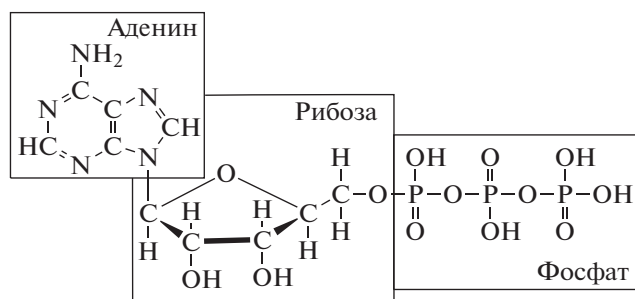


Рис. 6. Молекула аденозинтрифосфата (АТФ).

и способность к самовоспроизведению — два важнейших свойства биоорганических соединений, необходимые для возникновения и эволюции жизни. Первичное упорядочение создают цепочки нуклеотидов и аминокислот. Как мы видели, на цепочках аминокислот формируются универсально построенные биологические структуры, способные к бесконечному разнообразию, а цепочки нуклеотидов обеспечивают самовоспроизведение (репликацию) как основное свойство живой материи. Другими словами, природа разделила стремление к упорядочению через селективный катализ и способность к самовоспроизведению между двумя классами органических соединений. Вновь подчеркнем, что в мире органических соединений упорядочение обусловлено уникальными свойствами соединений углерода, на основе которых могут создаваться сложные биополимерные структуры².

Рассмотренная концепция возникновения и структурной организации живой материи через последовательное упорядочение (усложнение) представляется нам на сегодня наиболее обоснованной. Накопление изменений происходит в сильно нелинейной системе, что приводит к развитию неустойчивостей, возникновению бифуркаций и переходам системы в качественно новое состояние. На математическом языке такому процессу отвечает ветвление (качественное изменение) решений при определенных критических значениях параметров. Каждому новому состоянию (самоорганизации) системы отвечают иная совокупность и взаимодействие молекулярных комплексов. Другими словами, нарастающая упорядоченность исходной хаотической системы состоит в последовательности бифуркаций от появления примитивных полимерных структур и развития универсальной каталитической функции пептидов до возникновения нуклеотидных последовательностей, участвующих в синтезе белка, и генетического кода.

² Все живые организмы Земли содержат суммарно 550 миллиардов тонн углерода из примерно 3.6 триллионов тонн биомассы.

С позиций стохастической динамики такие события есть не что иное, как порождение и следствие локальной неустойчивости в нелинейной хаотической диссипативной системе с большим числом степеней свободы, а последовательность изменения состояний (эволюция) системы приводит к возникновению самоорганизации. В других терминах, следуя подходу А.Г. Башкирова [14], можно говорить о “фазовом переходе упорядочения”, отвечающем переходу от обычной термостатистики Гиббса к термостатистике Реньи, в рамках которой энтропию следует рассматривать в качестве потенциала, движущего систему в состояние наибольшей упорядоченности [15]. В этом случае, в отличие от классической статистической термодинамики Больцмана–Гиббса, обеспечивается принцип максимума энтропии для информационной энтропии Реньи, которой соответствует степенное (фрактальное) распределение. При этом устраняется противоречие между вторым началом термодинамики и стремлением системы к самоорганизации, что мы и связываем с возникновением и ранней эволюцией жизни.

Подчеркнем, что реализация модели последовательного упорядочения (и возникновения “островков упорядоченности из первичного хаоса” [16]) для перехода к новому уровню самоорганизации требует наличия обратной связи, которая является ее важным свойством. Наличие отрицательной обратной связи необходимо для существования биосферы. Требуется также восстановительная среда в условиях раздельного существования атмосферы и гидросферы для обеспечения доступности и подвижности фосфатов, что в целом не противоречит существующим представлениям о природных условиях на Земле в период, с которым связывают возникновение первых примитивных форм жизни.

6. ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Как уже говорилось, Вернадский полагал, что первичные очаги жизни и биосфера Земли возникли в самую раннюю геологическую эпоху (хадейское событие). Предбиологическая эволюция происходила очень быстро, и “поле жизни” оставалось со времени архейской эры в целом неизменным, на что указывают характер и парагенезис минералов (биоминералов) в биосфере. В детритных цирконах с возрастом 4.1 млрд. лет был найден легкий изотоп углерода, что связывают с биологическим фракционированием.

Исходя из рассмотренных выше основополагающих биогеохимических процессов, предполагают, что уже в раннем археозое на основе первичных высокомолекулярных белковых и нуклеотидных соединений могли возникнуть

миллионы открытых диссипативных систем с высокой степенью внутренней организации (минимума свободной энергии) и в состоянии динамического равновесия. Как мы видели, к периоду становления биосферы относится начало матричного синтеза биологически значимых биополимеров, способных к катализу, и липидных пленок.

Рост структурно-функционального упорядочения обеспечил появление абиогенных рибонуклеотидов, безъядерных предшественников клеток — коацерватов — и биосинтез белков из аминокислот (“биологической машины” — рибосомы). Ключевую роль в функционировании этой машины играли процессы трансляции — синтез полипептидов на матричной (м-РНК) с участием транспортной РНК (т-РНК), а также процессы клеточного метаболизма, репликации и начало формирования генетического кода. За абиогенным синтезом органических соединений и матричным синтезом органических макромолекул последовало формирование аппарата метаболизма и репликации, предшествовавшего появлению и развитию прокариотов и эукариотов и их экологической экспансии.

Вслед за Вернадским современные исследователи считают, что простейшие организмы — эобионты (эобактерии) появились на Земле 4.25 млрд. лет тому назад, а возникновение механизма фотосинтеза у прокариотных протобионтов относят к периоду 4—3.5 млрд. лет назад. При этом огромный вклад в биогеохимические процессы в биосфере внесли цианобактерии: они первыми в мире прокариотов освоили кислородный фотосинтез и обеспечили кислородную функцию (оксигенизацию) биосферы. На протяжении последующих миллиардов лет биологической эволюции происходили процессы формирования лика Земли, в которых ключевая роль принадлежала биогенной миграции атомов в биосфере и одновременно происходило изменение организмов во времени, в котором основную роль стал играть естественный отбор — дарвинизм.

Мы видели, что начало процессу создания “морфологически различных наследственных рядов”, развитию молекулярных механизмов самоорганизации биологических систем и появлению сложных организмов из простых предков было положено на этапе предбиологической эволюции. Этап предбиологической эволюции завершается с возникновением генетического кода, после чего начинается биологическая эволюция (эволюция жизни). Первичные живые организмы — бактерии (прокариоты, эукариоты) обладали сложным молекулярным аппаратом белкового синтеза, наследственности, энергообеспечения и обмена веществ. Возникновение этих первых жи-

вых систем сопровождалось эволюцией на уровне клеток, организмов, экосистем и формированием биосферы.

В основе ее функционирования лежат процессы фотосинтеза двух типов (анаэробный и аэробный), обеспечивающие питание биологических организмов путем преобразования энергии солнечного света. Другим механизмом служат процессы автотрофного питания — хемосинтез — на основе реакций окисления неорганических соединений. Последний составляет основу глубинной биосферы Земли — подземной высокотемпературной экосистемы, функционирующей на основе активных микробиологических процессов. Населяющие ее многоклеточные эукариоты приспособились к экстремальным условиям на глубине до нескольких километров — анаэробной среде, высоким температурам (~100°C) и давлениям (сотни атм). Бактериальная жизнь в этих условиях неожиданно оказалась весьма богатой и разнообразной: ее составляют гетеротрофные и автотрофные бактерии, в основном, метаногены, археи и зубактерии. В отличие от основополагающего процесса, фотосинтеза, контролирующего жизнь на поверхности, эти бактерии (хемолитоавтотрофы) получают энергию за счет окисления неорганических веществ. Общая биомасса глубинных бактерий сопоставима с поверхностной биомассой Земли. Вероятно, эти микробные сообщества образовались из поверхностных одноклеточных микроорганизмов в результате медленной эволюции, и их геном может быть сопоставим с геномом гидротермальных микробов (см., напр., [17]).

Биологическая эволюция понимается как кумулятивные изменения во времени. По современным представлениям непрерывно нарастающее упорядочение (включая предшественников РНК) привело к тому, что на Земле примерно 3.8 млрд. лет назад появились первые живые организмы — бактерии — со сложными молекулярными аппаратами наследственности, белкового синтеза, энергообеспечения и обмена веществ. Возникновение первичных живых систем (прокариотов, эукариотов) сопровождалось эволюцией на уровне клеток, организмов, экосистем и формированием биосферы. При этом процессы упорядочения неизбежно сопровождалось процессами разупорядочения и хаотизации. В конкурентных процессах упорядочения-разупорядочения (деградации) решающую роль играл дарвиновский естественный отбор. Таким образом, следует подчеркнуть важнейшую роль дарвинизма в биологической эволюции, но не на ранних этапах становления жизни и развития молекулярных механизмов самоорганизации биологических систем. С этих позиций молекулярная биология, биохимическая генетика и дарвинизм не противоречивым, а взаимодопол-

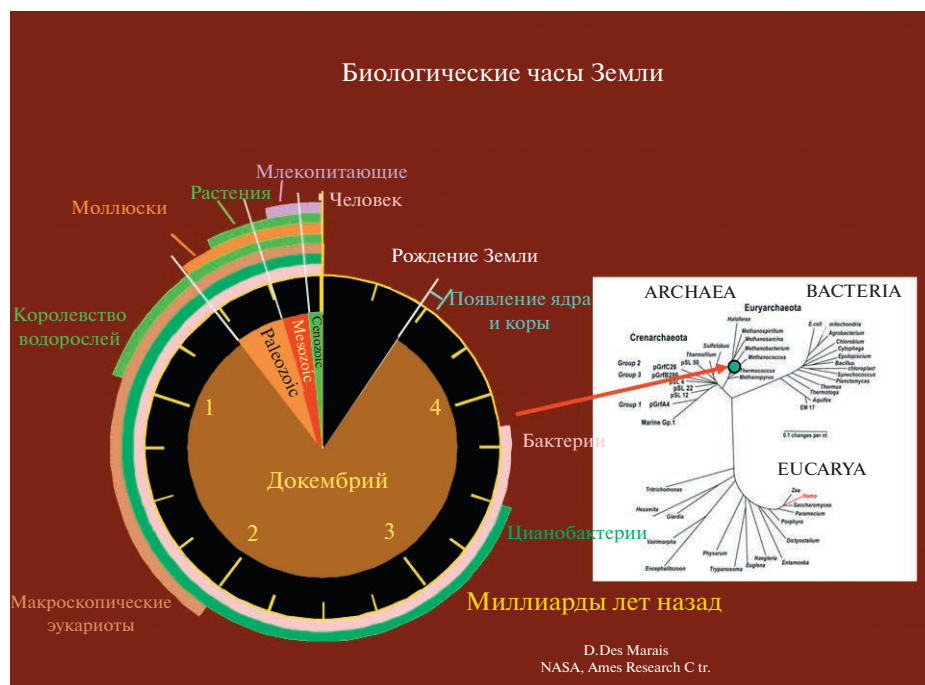


Рис. 7. Эволюция жизни на Земле (“Биологические часы Земли”). Справа — эволюция микробных сообществ от примитивных прокариотов до обладающих ядром эукариотов, входящих в клетки более сложных организмов.

няющим образом лежат в основе современной теории эволюции.

Развитием дарвинизма может служить концепция “конвариантной редупликации”, предложенная Н.В. Тимофеевым-Ресовским [18], в основе которой лежит идея о матричном воспроизведении и тиражировании разных вариантов наследственных текстов, в том числе подверженных мутации, и эти варианты “предлагаются” природе на выбор. Соответственно, матричный механизм изменчивости и наследственности связывается с естественным отбором и теорией эволюции.

С дарвиновским естественным отбором связана эволюция жизни на Земле, схематично показанная на рис. 7 и известная в литературе как биологические часы Земли. Как видим, в течение первых трех миллиардов лет существовал только постепенно усложнявшийся мир бактерий. Первые водоросли и моллюски появились около 1–0.5 млрд. лет тому назад, а млекопитающие — лишь в последние ~100 млн. лет. Появление разумных существ, возникновение и упадок человеческих цивилизаций — лишь миг в истории Земли.

7. СВЯЗЬ С АСТРОНОМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Зарождение и существование жизни на Земле, как и на любой другой планете, пригодной для обитания, нельзя рассматривать в отрыве от ее

космического окружения. Это касается, в первую очередь, положения звездной системы в галактике и нахождения планеты в окрестности родительской звезды. Не менее важным является наличие в межзвездной среде, особенно в гигантских молекулярных облаках, большого числа сложных органических соединений, о чем говорилось в разделе, посвященном химической эволюции (см. табл. 1). Они могли войти в состав протопланетных дисков и послужить основой последующих процессов, связанных с формированием биотической среды на планете.

В окраинных областях Галактики металличность звезд низка, и это препятствует образованию каменных планет земного типа. С другой стороны, ближе к центру Галактики, где процесс звездообразования интенсивен, металличность высока, но высока и частота взрывов сверхновых; и это приводит к невозможности устойчивого развития сложных форм жизни на планетах. Согласно модельным расчетам галактической эволюции [19], галактическая зона обитаемости, где возможно существование жизни земного типа, ограничена кольцом радиальной протяженности от 7 до 9 кпк от центра Галактики; в котором находятся звезды, сформировавшиеся 8–4 млрд лет назад (рис. 8). В этой кольцеобразной области сосредоточено большинство (75%) звезд, у которых могут существовать планеты, на которых возможна жизнь, и эти звезды старше Солнца в среднем

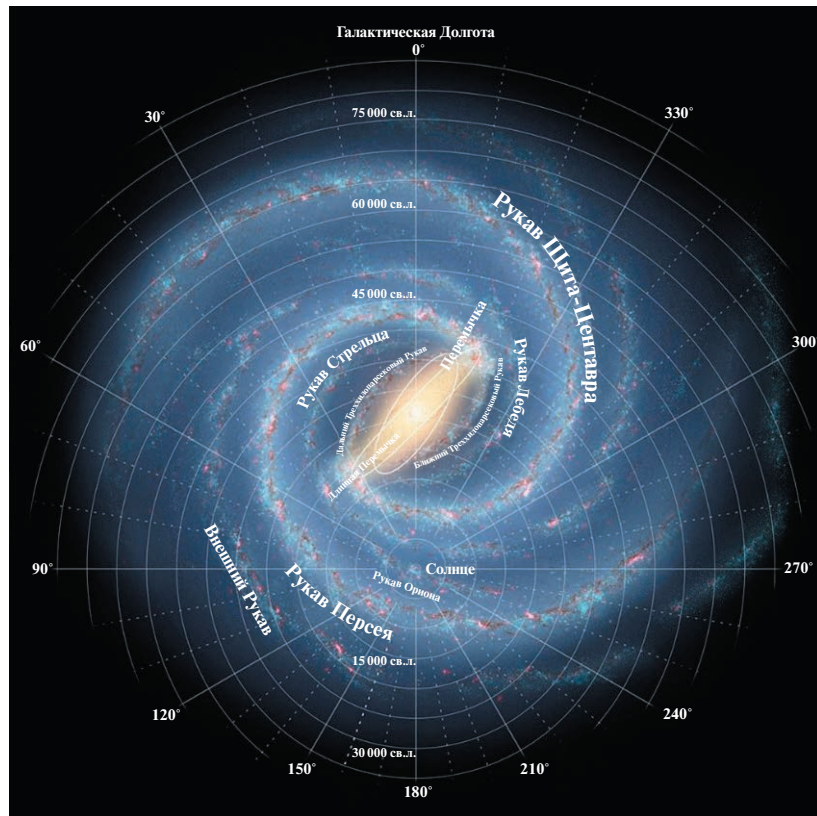


Рис. 8. Положение Солнечной системы в Галактике.

на ≈ 1 млрд лет. Отсюда следует, что пик возникновения жизни в Галактике пройден [19, 20].

Планета, пригодная для обитания, должна отвечать вполне определенным критериям, среди которых, в первую очередь, выделим следующие (рис. 9):

- принадлежность к звезде высокой металличности, находящейся в благоприятной галактической зоне на достаточном удалении от галактического центра с умеренным числом взрывов сверхновых, чтобы избежать воздействия жесткой радиации, но вместе с тем способствовать фрагментации молекулярных облаков;
- оптимальные размер и масса, поскольку большая планета активно аккрецирует окружающее вещество, превращаясь в газовый гигант, а малая планета теряет свою газовую оболочку — атмосферу;
- ограниченная зона расположения относительно родительской звезды, так как близкая планета захватывается в приливный резонанс, препятствующий возникновению жизни;
- радиальное расстояние от родительской звезды, в пределах которого возможны благоприятные климатические условия, т.е. температура и давление, обеспечивающие наличие жидкой во-

ды, которая отсутствует на очень холодной или очень горячей планете;

- благоприятный химический состав атмосферы, исключающий наличие агрессивных примесей.

Совокупности перечисленных критериев удивительным образом отвечает Земля, находящаяся в наиболее пригодной для обитаемости зоне в окрестности Солнца (рис. 10), а само Солнце расположено в рукаве Ориона на расстоянии ~ 8 кпк от центра Млечного пути. Очевидно, подобные области существуют и для экзопланет, а зоны их расположения зависят от спектрального класса звезды. Зона обитаемости — благоприятного климата — довольно узкая. В пределах Солнечной системы она находится в окрестности орбиты Земли, далеко не доходя до орбиты Венеры и лишь приближаясь к орбите Марса (рис. 10). Ограничением для Венеры служит необратимый парниковый эффект, развивающийся с приближением планеты к Солнцу и повышающий температуру у ее поверхности до 475°C , а давление углекислой атмосферы до 90 атм. Иная ситуация на Марсе, на котором, судя по остаточным геологическим формам рельефа, ранее существовали благоприятные климатические условия с обилием воды на поверхности, которые катастрофически измени-

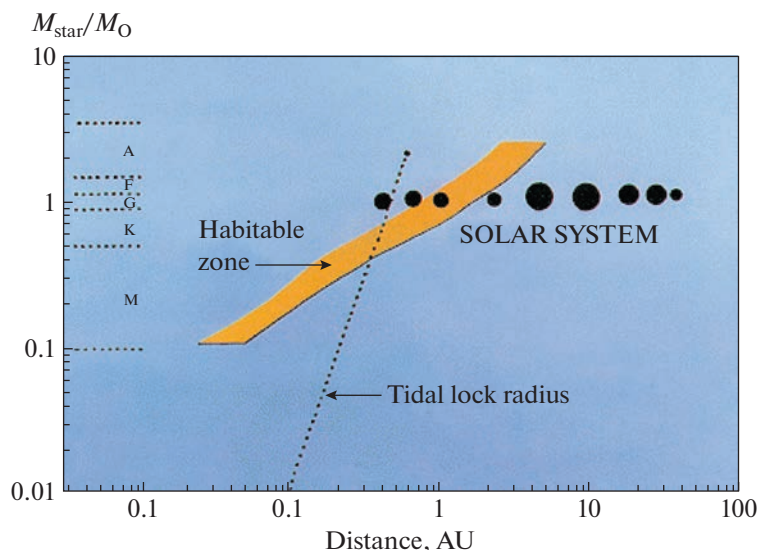


Рис. 9. Планеты, пригодные для жизни, в окрестности родительской звезды. По вертикальной оси — спектральный класс и масса звезды в массах Солнца, по горизонтальной оси — расстояние от планеты до звезды в а.е. Штриховые кривые — предельные ограничения для планет в зависимости от класса звезды и радиального расстояния, пунктирная линия — зона захвата в приливной резонанс. Желтая полоса — область, пригодная для существования жизни. В Солнечной системе в нее попадают Земля и частично Марс. © ISU



Рис. 10. Зона обитаемости в окрестности Солнца.

лись примерно 3.8–3.6 млрд. лет тому назад, оставив безводную пустынную поверхность и разреженную атмосферу. Но, так или иначе, свидетельства в пользу существования на Марсе благоприятного палеоклимата подкрепляют представления о зоне обитаемости в Солнечной системе, простирающейся вплоть до марсианской орбиты.

В Солнечной системе (и, вероятно, в других планетных системах) важная роль принадлежит миграционным процессам транспорта вещества астероидов углисто-хондритового состава и комет из внешних областей в зону внутренних планет. Такой транспорт и ударная бомбардировка рассматриваются в качестве вероятного переносчика предбиотического и/или биотического ве-

щества из транснептуновых областей, включая пояс Койпера, на ранней стадии эволюции Солнечной системы, и лежит в основе гипотезы панспермии. В метеоритах Мерчисон и Мюррей, содержащих около 2% (по весу) органического углерода, было найдено свыше 75 аминокислот, что свидетельствует в пользу предположения о внеземном происхождении предшественников биомолекул. Действительно, как показал анализ вещества метеоритов, в них содержатся соединения, которые ранее были обнаружены в космических породах, включая гуанин, аденин и урацил.

В согласии с миграционным механизмом находится рассмотренная выше концепция древнего мира РНК, связывающая появление жизни с

периодом интенсивной бомбардировки Земли (Large Heavy Bombardment, LHB) астероидами и кометами около 4 млрд. лет назад. Действительно, в ядрах комет и углистых хондритах содержатся большие объемы водяного льда и органические вещества, а их пористая структура удобна для роста и развития колоний РНК и микроорганизмов. Схематически процесс возникновения жизни, порожденный внешним источником РНК, и ее эволюция от абиогенных рибонуклеотидов до ко-ацерватов и клеток показаны на рис. 5.

Как видим, углистые хондриты дают ключ к отысканию источников внеземного органического вещества: в них содержится химически связанная вода (в среднем до 10–15%), и вероятно, что их родительские тела (гидросиликаты) образовывались в водной среде. Соотношение углерода в кометах и углистых хондритах 10:1 (углистые хондриты вероятно недополучили углерод), но летучая органика метеоритов могла быть потеряна на более поздних стадиях при взаимных соударениях астероидов.

Ключевая роль в зарождении жизни принадлежит воде: без нее не могли образоваться РНК и ее структуры, без нее невозможно создать никакие молекулы нуклеиновых кислот. Как показали наши модельные расчеты (см., напр., [21, 22]), миграция малых тел в Солнечной системе и кометно-астероидная бомбардировка могли обеспечить значительный приток летучих (воды, азота, углерода), предбиотической органики и, возможно, даже РНК на Землю и другие планеты земной группы. В частности, Земля за счет экзогенного источника могла получить количество воды, сопоставимое с современным объемом земных океанов (около 2×10^{24} г) и этот же источник мог обеспечить образование предполагаемых древних океанов на Венере и Марсе [23].

Говоря о связи биологических процессов с экзогенными источниками, надо иметь в виду, что соударения астероидов и комет с планетами, наряду с позитивным фактором приноса вещества из межпланетной или даже межзвездной среды, расширяющим перспективы зарождения жизни, могли иметь для жизни и катастрофические последствия. В истории Земли выпадения крупных (километровых и более) тел периодически приводили к громадным биосферным изменениям, подобным космическому событию Чиксулуб – падению астероида размером примерно 10 км на полуострове Юкатан в Мексике, произошедшему около 66 млн. лет тому назад (на рубеже мела и кайнозоя) и оставившего кратер диаметром около 180 км и первоначальной глубиной около 20 км. Энерговыделение составило громадную величину – не менее 100 тератонн в тротиловом эквиваленте.

Кратер, с которым связана крупная гравитационная аномалия, обогащен иридием, что характерно для пород внеземного происхождения (и, вероятно, других металлов платиновой группы, связанных с железом во внутренних оболочках Земли вследствие процессов дифференциации недр). К этому же времени относят исчезновение на Земле древних рептилий, в частности, динозавров. Интересно, что рептилии возможно имели шанс стать в процессе эволюции более высокоорганизованными существами, что могло воспрепятствовать появлению человека.

Выдвинуто предположение, что выявленные долгопериодические вариации в массовом исчезновении морских организмов были вызваны забросом внутрь Солнечной системы многочисленных комет из облака Оорта вследствие периодических возмущений, связанных с движением Солнечной системы в Галактике (рис. 11). Между этими событиями обнаруживается вполне определенная корреляция. На инжекцию комет внутрь Солнечной системы влияют также галактические приливы и возмущения в движении ближайших звезд. При этом наибольшие возмущения возникают при пересечении Солнцем галактической плоскости с полупериодом около 30 млн. лет.

Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу препятствовали высокая устойчивость и приспособляемость жизни. На рис. 12 показаны примеры такой приспособляемости к экстремальным и даже агрессивным условиям окружающей среды на Земле. На левой панели рис. 10 показаны “живые” антарктические породы с колониями микроорганизмов, развивающихся при крайне низких температурах, а в правом нижнем углу показано озеро с очень высокой соленостью воды (рН порядка 1–2), в котором тем не менее существуют микроорганизмы. На правой панели рис. 12 показан гидротермальный источник на дне Красного моря, в котором обнаружены микроорганизмы, существующие при температуре около 120°C.

8. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЖИЗНИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

К традиционно задаваемому вопросу “Есть ли жизнь на Марсе?” сравнительно недавно добавился еще один вопрос: есть ли жизнь на спутниках Юпитера и Сатурна, что связано с особенностями их внутреннего строения – вероятным существованием подповерхностных глубинных океанов.

Среди планет земной группы Венера находится далеко за пределами зоны обитаемости. Марс продолжает волновать воображение возможно-

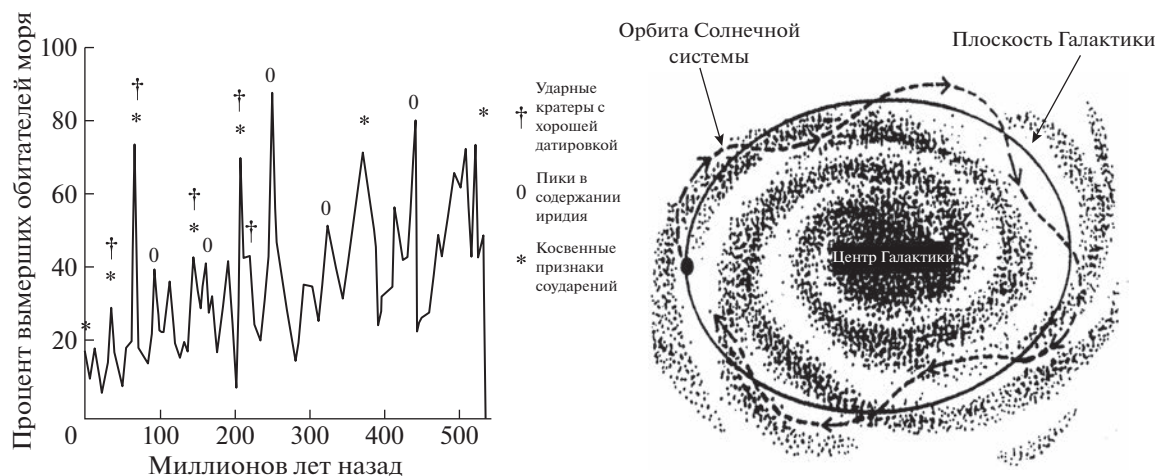


Рис. 11. Слева — массовое исчезновение морских организмов на Земле за последние 540 млн. лет. Эти события коррелируют с ударными кратерами, вещество которых обогащено иридием, что свидетельствует о выпадении космического тела. Справа — схема движения Солнечной системы в Галактике с периодическим пересечением галактической плоскости. © Википедия

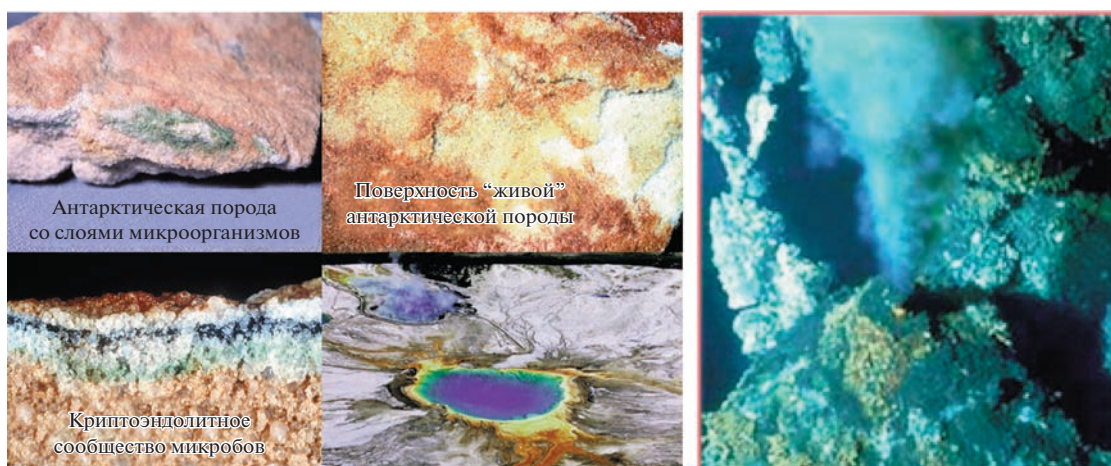


Рис. 12. Приспособляемость земной жизни к экстремальным условиям природной среды. Слева и в центре сверху — колонии микроорганизмов в антарктических породах. В центре внизу — озеро в Канаде с высокой кислотностью (pH 1), в котором существуют микроорганизмы. Справа — гидротермальный источник на дне Красного моря с температурой $\sim 120^\circ\text{C}$, в котором обнаружены гипертермофильные микроорганизмы. © NOAA

стью обнаружить следы жизни или палеожизни — ископаемые остатки микроорганизмов (фосси́лы). Как уже говорилось, Венера находится далеко за пределами зоны обитаемости, что обусловило ее своеобразный климат. Температура и давление на поверхности составляют 475°C и 92 атм, атмосфера на 97% состоит из CO_2 , вода практически отсутствует. В атмосфере происходят процессы круговорота серосодержащих и других соединений, обусловленные литосферно-атмосферным взаимодействием и вероятно сохранившемся вулканизмом (рис. 13). С циклами серосодержащих связано образование экзотических сернокислотных облаков Венеры [24]. Сооб-

щалось об обнаружении в них фосфина (фосфористого водорода) в пределах десяти ppb, который может иметь биологическое происхождение [25]. Это привело к предположению о жизни в венерианских облаках. Однако фосфин может иметь и небиологическую (вулканическую) природу, к тому же этот результат не подтвердился последующими измерениями.

С противоположной стороны на краю зоны обитаемости находится Марс. Такое расположение благоприятствует возникновению на нем жизни практически одновременно или даже раньше земной, и нельзя исключить, что она могла сохраниться в приповерхностных слоях после

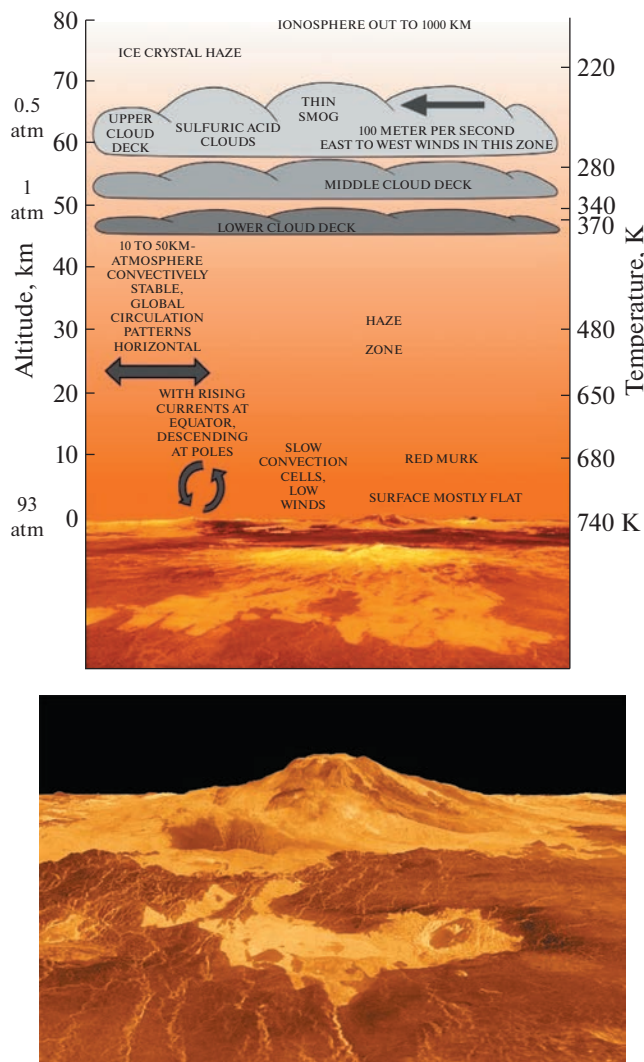


Рис. 13. Вверху — строение атмосферы Венеры и циклы серосодержащих, с которыми связано образование сернокислотных облаков Венеры. Внизу — гора Маат вулканического происхождения, свидетельство активной вулканической активности на Венере.

катастрофического изменения климата на рубеже ~3.7 млрд. лет назад или в глубинной биосфере. О благоприятном климате, существовавшем до этого периода, свидетельствуют геологические формы рельефа, сохранившие следы водных потоков и водно-гляциологической эрозии [24]. Примеры характерных геологических структур, образованных при участии воды, а также русла высохших рек и ледяное озеро на дне кратера поперечником в несколько десятков километров показаны на рис. 14. Там же показаны результаты измерений тепловых нейтронов по данным дистанционных измерений со спутника “Mars Odyssey” и марсохода “Curiosity”, дающие содержание воды в подповерхностном слое [26—

29], а также спектр гематита, содержащегося в марсианской породе, — окисла железа Fe_2O_3 , образующегося в присутствии воды. Наконец, показаны изображения слоистых пород с высокой концентрацией сульфатов, солей хлора и брома, напоминающих осадочные породы на океаническом ложе Земли и свидетельствующие о существовании на Марсе древних водных бассейнов. Все эти детали встречаются в различных областях на пустынных областях марсианских равнин (рис. 14).

Сенсацией стало сообщение группы американских исследователей в конце 1990-х гг. о найденных следах палеожизни в антарктических метеоритах, выброшенных с Марса и занесенных на Землю [30]. В одном из таких метеоритов, ALH 84001, были обнаружены идентичность морфологической структуры окаменелым ископаемым бактериям и наличие магнетитов в карбонатах, образование которых связывалось с бактериями и рассматривалось в качестве биомаркеров (рис. 15). Однако более полный анализ привел к выводу, что подобные образования, как и их земные аналоги, допускают небиологическую интерпретацию, и поэтому вывод об обнаружении марсианской палеожизни вероятнее всего является ошибочным.

Потенциальные глубинные океаны на спутниках Юпитера и Сатурна представляют особый интерес для астробиологии. В системе Юпитера их образование, как и вулканизм на Ио, обусловлены наличием орбитального резонанса Лапласа в системе трех галилеевых спутников. Океаны глубиной до 100 км, подверженные приливному разогреву, предполагаются на Европе и Ганиমেде [24]. Особенно большой интерес вызывает Европа (рис. 16), о водном океане которой глубиной 50—100 км под ледяным панцирем толщиной 10—15 км свидетельствует анализ особенностей морфологии удивительно сглаженной поверхности, а также выбивающиеся сквозь трещины водяные гейзеры. Из-за диссипации приливной энергии океан может быть теплым, а обнаружение у Европы заметного магнитного поля указывает на то, что он еще и соленый. В такой вполне благоприятной среде могла зародиться жизнь, обнаружение которой становится одной из наиболее актуальных задач будущих космических миссий.

С приливными эффектами связана высокая активность совсем небольшого (~500 км) спутника Сатурна Энцелада, на котором обнаружены извергающиеся с поверхности в вакуум водяные гейзеры — плюмы, — что вероятно так же обусловлено обширными внутренними резервуарами воды (рис. 16). С точки зрения химической эволюции вещества в Солнечной системе и возможности подробного изучения состояния и свойств предбиотической органики огромное внимание

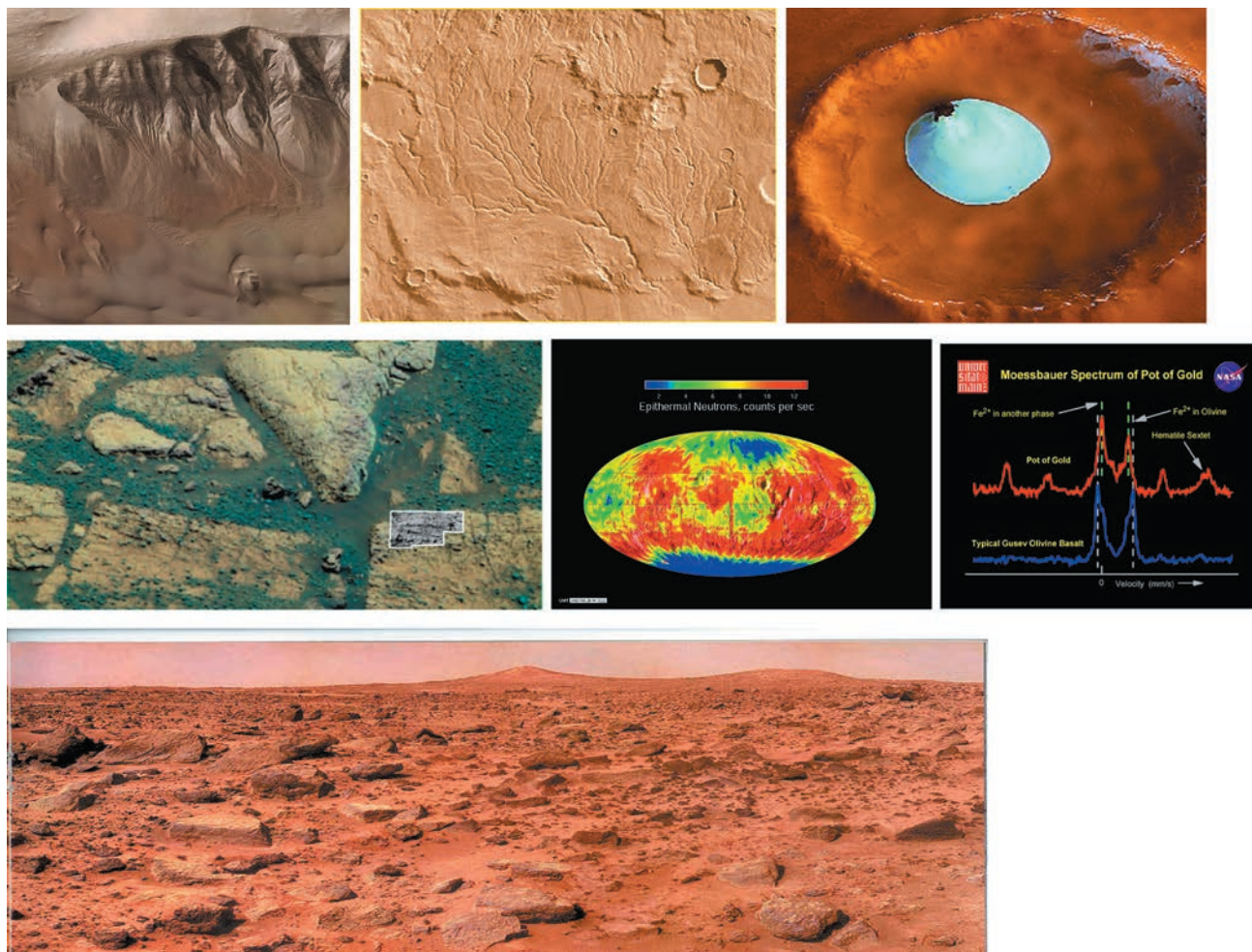


Рис. 14. Свидетельства наличия воды и древнего океана на Марсе. Верхний ряд: склон каньона, образованный с участием потоков воды; русла высохших рек; ледяное озеро на дне марсианского кратера. Средний ряд: слоистые породы, содержащие соли галогенов — вероятных следов древних океанов; распределение воды в поверхностном (~1 м) слое по данным нейтронного мониторинга от фиолетового (максимум) до оранжевого (минимум), и спектр гематита в марсианской породе; нижний ряд — поверхность Марса в современную эпоху. © NASA, ESA, DLR, FU Berlin.

привлекает второй по размеру (после Ганимеда) спутник Сатурна Титан [24]. На его поверхности обнаружены озера метана, этана и других непредельных углеводородов, которые могли послужить основой более сложных органических соединений. Круговорот метана с испарением в атмосферу и последующим обратным выпадением на поверхность практически аналогичен круговороту воды на Земле, с которым непосредственно связано происхождение биосферы (рис. 16).

По-видимому, перечисленные объекты — единственные, в Солнечной системе, на которых могла возникнуть примитивная жизнь, возможно, сохранившаяся до нашего времени. К сожалению, результаты космических исследований пока оказались отрицательными, но их нельзя считать однозначными из-за ограничений использовавшихся экспериментальных методов.

9. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЭКЗОПЛАНЕТАХ

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы, ограниченные Землей и Солнечной системой. Именно поэтому мы говорим о симбиозе биологии и астрономии. Открытие экзопланет на рубеже прошлого и нынешнего столетий стало одним из крупнейших событий в астрономии и открыло новые перспективы в астробиологии. Всего за четверть века было открыто около 5000 экзопланет самого различного типа, примерно две трети которых принадлежат планетным системам, и этот процесс стремительно нарастает. Это позволяет изучать пути эволюции планетных систем по аналогии с эволюцией звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Одновременно повышаются шансы обнаружения призна-

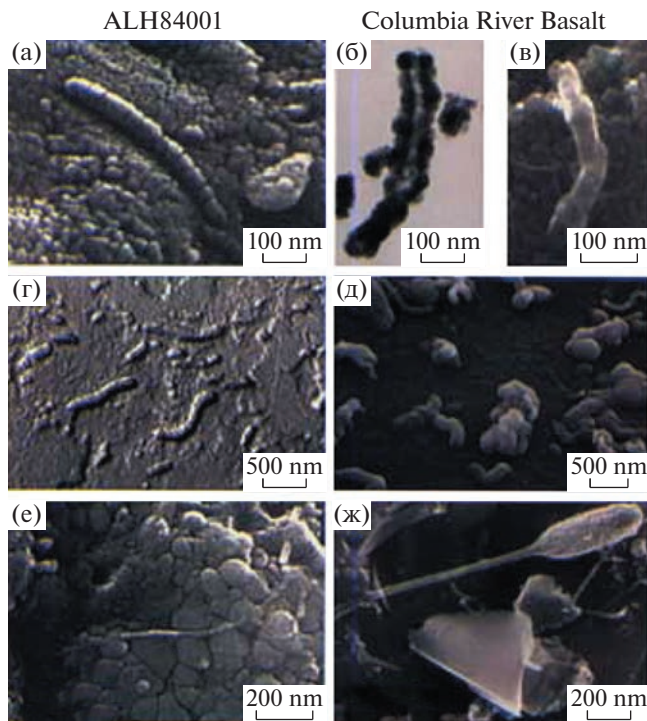


Рис. 15. Структуры микроокрашенностей в метеорите ALH 8004, первоначально ошибочно отождествленные с микробными фоссилами. © McKay

ков внеземной жизни с учетом обсуждавшихся выше критериев пригодности планеты для обитаемости.

Первые внесолнечные планеты были обнаружены с использованием метода доплеровской спектроскопии (радиальных скоростей), т.е. измерений смещения линий в спектре звезды из-за периодического смещения барицентра системы при наличии планеты. К сожалению, достигнутая предельная точность метода (около 2 м/с) не позволяет обнаруживать планеты земного типа. Для сравнения, скорость смещения барицентра системы “Солнце-планета” под действием притяжения Юпитера, Сатурна и Земли составляет, соответственно, 13, 2.8 и 0.09 м/с. Более эффективным оказался фотометрический (“затменный”) метод, в основе которого лежит регистрация ослабления света родительской звезды при прохождении планеты по ее диску. Прямая регистрация излучаемого планетой света проблематична: планета земного типа в пределах 1 а.е. излучает в ИК диапазоне в $\sim 10^6$ раз слабее родительской звезды. К тому же пылевой фон может быть в несколько сотен раз ярче самой планеты. Использование “затменного” метода стало возможным благодаря созданию высокочувствительных детекторов на базе самых передовых технологий. Достигнутая точность фотометрии составляет

$\sim 10^{-5}$, что открывает возможность регистрации вариаций яркости звезды на уровне десятков-сотен фотонов. Примерно такой точностью обладал запущенный весной 2009 г. космический аппарат “Кеплер” (NASA) с телескопом диаметром 90 см, с задачей обнаружения в выбранном участке небесной сферы в созвездии Лебедя ($10^\circ \times 10^\circ$) внесолнечных планет, в первую очередь, планет земного типа в зоне обитаемости, и изучения распределения планетных масс и общей архитектуры планетных систем. На очереди использование еще более эффективного для поиска небольших планет астрометрического метода и космических телескопов-интерферометров. Это позволит достигнуть точности порядка одной микросекунды дуги (для сравнения Земля на расстоянии 10 пк создает амплитуду 0.3 микросекунды дуги).

Примеры экзопланет, открытых КА “Кеплер”, показаны на рис. 17. Свойства наиболее характерных тел со ссылками на первоисточники результатов наблюдений подробно обсуждаются в монографии М.Я. Марова и И.И. Шевченко [31], в которой приведены ссылки на первоисточники — основы обсуждаемых в этом разделе результатов. Большинство открытых к настоящему времени экзопланет — планеты, получившие названия сверхземли и мининептуны, с радиусами в 3–4 раза больше земного, что, вероятно, отражает реально существующее в Галактике распределение планет по размерам (рис. 18). Среди них значительную долю составляют массивные суперюпитеры, некоторые из которых находятся на орбитах, очень близких к родительской звезде, поэтому температуры их газовых оболочек, вероятно, с примесью паров тугоплавких элементов (силикатов, металлов) достигают 1500–2000 К. Их называют “горячие юпитеры” (hot Jupiters). Конечно, говорить о возможности существования на них жизни не приходится, как, впрочем, существуют серьезные ограничения для ее возникновения на мининептунах и сверхземлях. Статистика открытых экзопланет приведена на рис. 18.

Пока из-за инструментальных ограничений обнаружено немного планет, близких по своим размерам к Земле. К сожалению, среди открытых землеподобных планет большая часть находится в “горячей” зоне, близкой к родительской звезде. Так, например, планета Kepler-78b, которая превышает Землю по размеру только на 80%, обращается вокруг подобной Солнцу звезды на расстоянии всего двух ее радиусов. Заметим, кстати, что такое расположение маломассивного тела предоставляет уникальную возможность одновременно использовать методы транзита и лучевых скоростей и тем самым определить среднюю плотность планеты. Оказалось, что плотность Kepler-78b составляет ~ 5.5 г/см³, что идентично

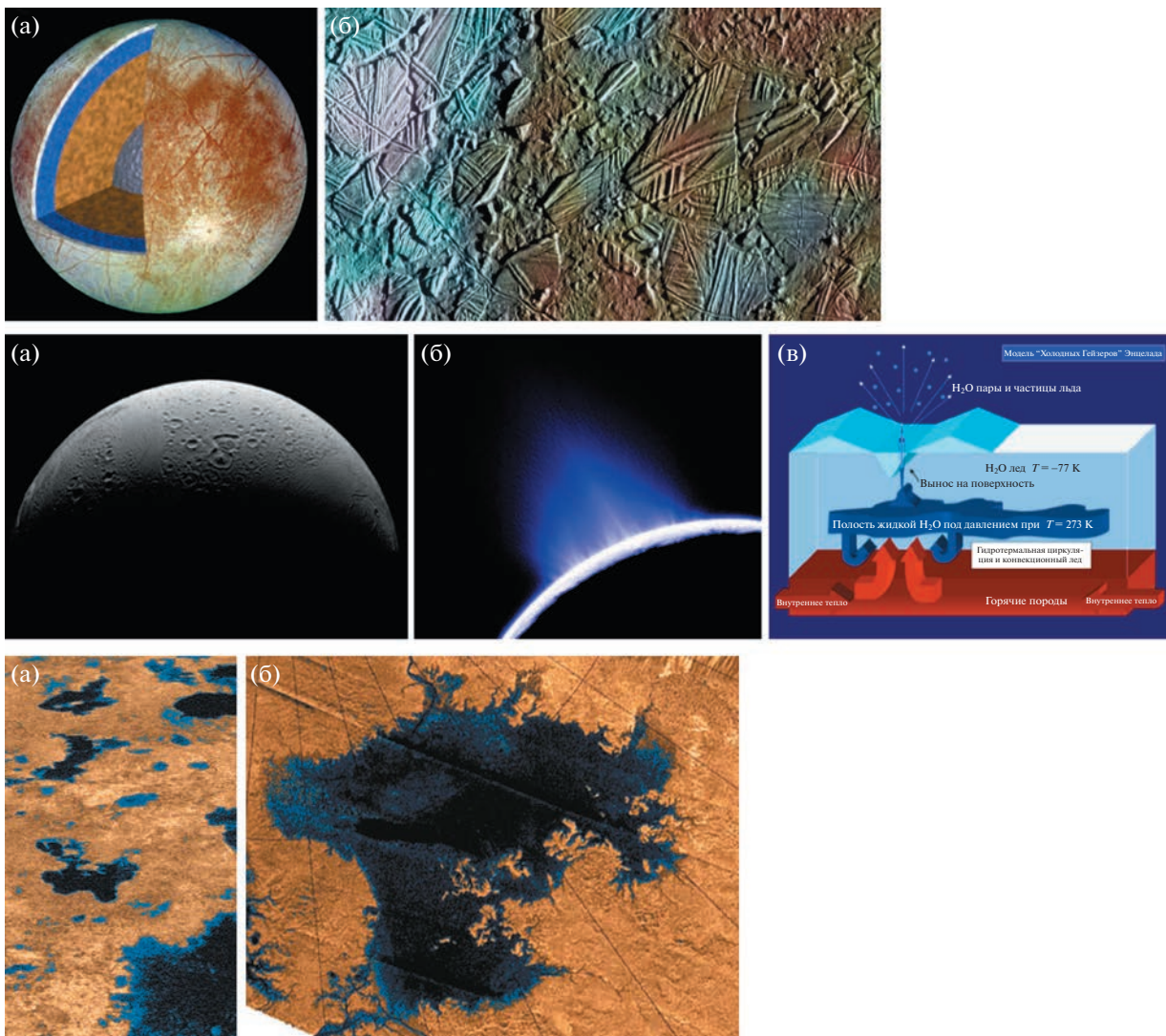


Рис. 16. Модели водных резервуаров и органики на спутниках Юпитера и Сатурна. Верхний ряд: галилеев спутник Юпитера Европа, модель внутреннего строения с глубинным океаном (а) и сглаженная ледяная поверхность спутника (б). Средний ряд: спутник Сатурна Энцелад (а), водяные гейзеры — плюмы с поверхности Энцелада (б); модель его внутреннего строения (в). Нижний ряд: метановые озера на поверхности Титана (а), море Лигеи (б). © NASA

плотности Земли. Таким образом, эта планета, состоящая из горных пород, по своим природным свойствам прямая противоположность Земле, и ее ландшафт может выглядеть так, как показано в изображении художника на рис. 19.

То же самое можно сказать о пяти планетах вокруг солнцеподобной звезды Kepler-444, удаленной от нас на 117 св. лет. Эти скальные горячие планеты, одна из которых похожа по размерам на Меркурий, другая на Венеру, а остальные три на Марс, обращаются вокруг своей звезды с периодами в пределах 10 земных суток. Они, однако, привлекают к себе особое внимание. Дело в том, что по вариациям блеска звезды удалось определить скорость акустических волн в ее недрах и тем самым оценить соотношение водорода и гелия —

ключевого параметра при суждении о продолжительности звездной эволюции. На основании этих оценок был сделан вывод, что возраст Kepler-444, а значит, и ее планетной системы, составляет 11.2 млрд. лет, т.е. они образовались вскоре после рождения Вселенной, возраст которой составляет 13.7 млрд. лет. Если допустить, что на других подобных планетах, но с более благоприятными климатическими условиями, могла возникнуть жизнь и ничто не помешало ее эволюции, трудно даже вообразить, как далеко вперед от Земли такая жизнь ушла бы в своем развитии.

Из открытых землеподобных планет, находящиеся в зонах обитаемости, большой интерес представляют близкие по размерам Венере и Земле планеты Kepler 20e ($R = 0.87R_E$) и Kepler 20f

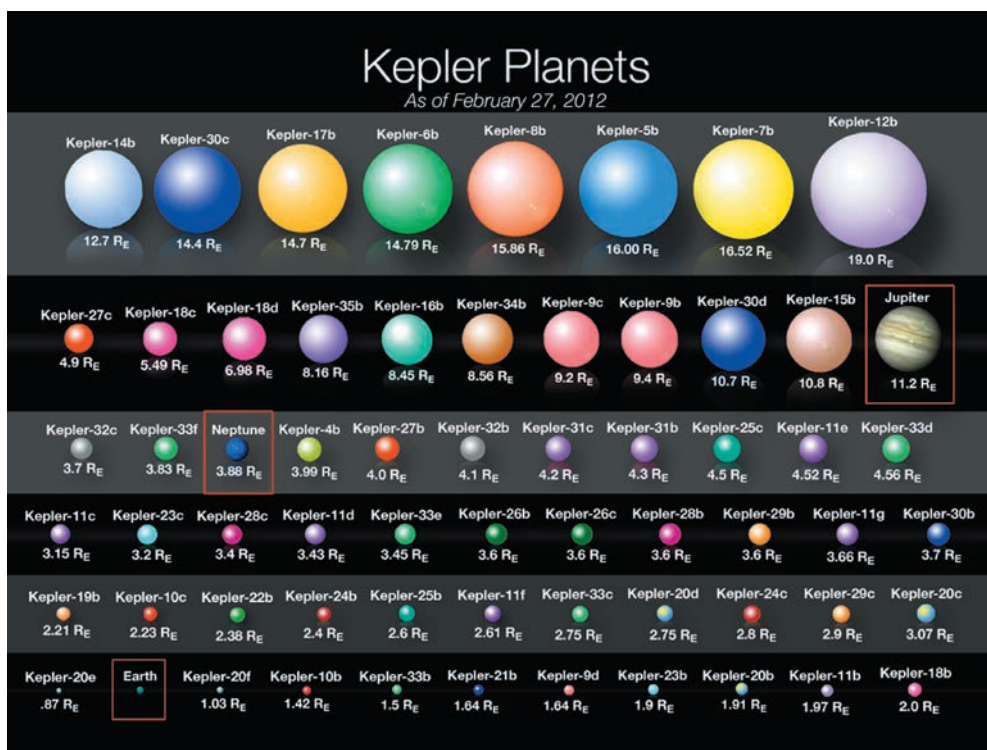


Рис. 17. Примеры типов экзопланет, открытых космическим аппаратом “Kepler”. © Ames Research Center, NASA

($R = 1.03R_E$). Другой самой близкой к Земле по климатическим условиям оказалась планета Kepler 22b ($R = 2.38 \pm 0.13R_E$) с равновесной температурой 262 К и периодом обращения 289.86 дней. Ее размер более чем вдвое превышает земной. Привлекает к себе внимание экзопланета Kepler-452b, находящаяся на расстоянии от Земли 1400 св. лет и обращающаяся вокруг солнцеподобной звезды на расстоянии лишь на 5% дальше, чем Земля, с периодом 385 дней.

Особый интерес вызывают планеты у красных карликов М-класса, примером которых служит обнаруженная на расстоянии 42 св. лет от Солнца планета с периодом обращения ~200 земных суток у красного карлика HD 40307. К этому типу относятся также две из пяти планет в созвездии Лебедя на расстоянии около 500 св. лет от Солнца — Kepler-186f и Kepler-438b, — которые лишь на ~10% больше Земли. При светимости звезды в 25 раз меньше солнечной эти планеты, находящиеся в пределах 0.4 а.е. от звезды, оказываются в зоне обитаемости и могут содержать воду. Вода и метан обнаружены в атмосфере планеты у звезды HD 189733, что может создавать сильный парниковый эффект. Такие планеты могут быть окутаны плотными облаками из водяных капель и/или кристаллов, а некоторые даже состоять наполовину из воды или иметь сплошной океан на поверхности. Планеты Kepler 20e и Kepler 20f

были названы кузинами Земли, имеющими максимальный на сегодняшний день так называемый индекс подобия Земле (Earth Similarity Index, ESI).

Следует, однако, учитывать наблюдаемую чрезвычайно высокую активность звезд этого класса, с часто повторяющимися вспышками и выбросами плазмы типа корональных выбросов массы, по мощности на порядок превосходящими солнечные. Они способны срывать атмосферу планеты, даже обладающую сильным магнитным полем, не говоря уже о катастрофическом воздействии звездной радиации. Неблагоприятными для жизни могут быть сильнее ветра в атмосфере, подобные обнаруженным на экзопланете HD 189733b при помощи спектрографа HARPS на обсерватории Ла-Силла в Чили. Их скорость достигает нескольких километров в секунду, что в десятки раз сильнее земных ураганов. Вряд ли в таких условиях на планете, даже очень похожей на Землю, возможна жизнь.

Крупным событием стало обнаружение системы из семи планет Trappist-1 у красного карлика спектрального класса M8 V с поверхностной температурой ~4000 К и светимостью почти в 2000 раз меньше светимости Солнца (рис. 20). Все эти планеты близки по размерам к Земле (~0.7 R_E) и находятся на соседних орбитах с периодами обращения от единиц до ~20 сут в близкой окрест-

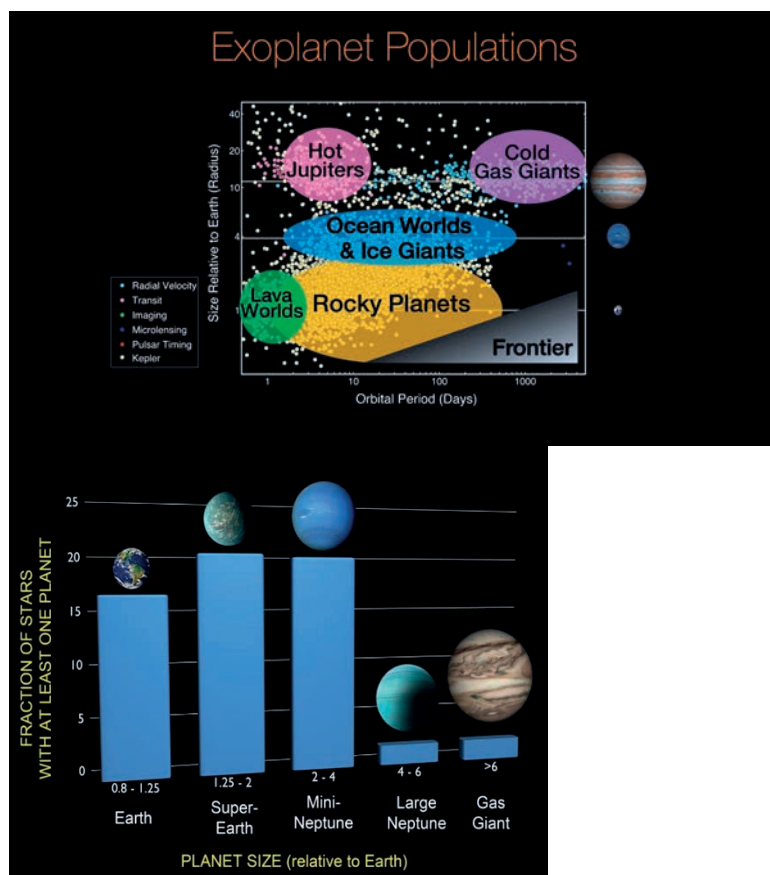


Рис. 18. Вверху — популяции открытых экзопланет, включающие планеты, состоящие из скальных (горных) пород и холодные газовые, водные, ледяные гиганты и горячие юпитеры. Внизу — статистика экзопланет, согласно которой преобладают мининептуны и суперземли. © NASA



Рис. 19. Гипотетический вид поверхности землеподобной планеты в близкой окрестности родительской звезды в изображении художника.

ности звезды. Их периоды кратны друг другу и находятся в резонансе. Три планеты расположены в зоне обитаемости с равновесной температурой ~ 300 К и у них могут быть вода на поверхности и атмосфера, возможность удержания которой ставится, однако, под сомнение с учетом упомянутой высокой активности родительской звезды. Тем не менее, по крайней мере, на какой-либо из этих планет не исключается наличие жизни, и система Trappist-1 рассматривается как перспективная для ее обнаружения.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что наибольшим числом экзопланетных систем обладают маломассивные звезды позднего спектрального класса. Является ли с этой точки зрения Земля, находящаяся в планетной системе у звезды G-класса, исключением? Ответ на этот вопрос следует, очевидно, искать в решении общих эволюционных проблем звездно-планетной космогонии, включая различие между крупной внесолнечной планетой (газовым сверхгигантом) и коричневым карликом на пороге массы, отвечающим термоядерной дейтериевой реакции (0.013).

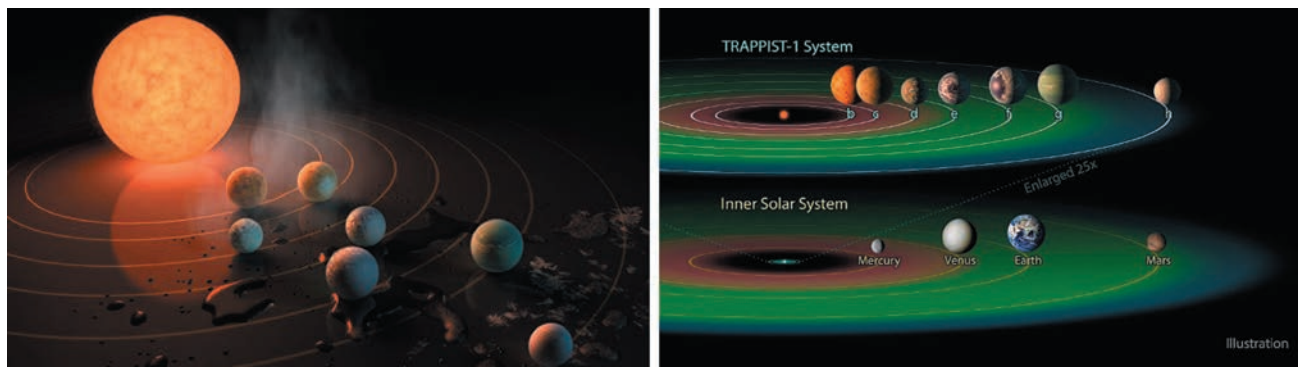


Рис. 20. Система из семи планет у красного карлика Trappist -1 (а) и ее сопоставление с расположением и размерами планет земной группы в Солнечной системе (б). © NASA

Примером может служить недавнее открытие двух землеподобных планет в зоне обитаемости у звезды Тигардена. Однако эту звезду, находящуюся в 4 пк от Солнца, с массой около ~ 0.08 солнечной, скорее следует классифицировать, как объект, промежуточный между звездой и коричневым карликом.

Помимо самих планет, заслуживает внимания потенциальная обитаемость их спутников лунных размеров — экзолун. Возможность их образования в протопланетных дисках показана в серии массовых численных экспериментов с учетом статистики ударных взаимодействий и фрагментации на поздних этапах формирования землеподобных планет у звезд солнечного типа. При этом вероятность образования экзолун выше у двойных, чем у одиночных звезд: планеты в системах как Р-типа, так и S-типа, могут обладать спутниками внутри своих сфер Хилла. Вместе с тем следует подчеркнуть, что планеты с компонентами сравнимых масс (как в случае системы Земля—Луна) — довольно редкий феномен и с космогонической точки зрения маловероятен, хотя сами спутники могут быть больше Луны. Данные численного моделирования свидетельствуют, например, о том, что у суперюпитеров могут формироваться спутники размером с Землю. Поскольку все известные циркумбинарные планеты являются гигантами, размеры их экзолун могут быть также велики. Условия потенциальной обитаемости экзолун определяются орбитальной устойчивостью, параметрами инсоляции и приливного нагрева, а магнитное экранирование может быть обеспечено протяженной магнитосферой самой планеты. Предельными случаями считается обращение спутника либо на удаленной орбите, отвечающей границе устойчивости (на пределе сферы Хилла), либо, наоборот, на орбите, близкой к планете, вблизи порога приливной синхронизации. Ограничения на возможную обитаемость планет и их спутников в двойных системах нала-

гают и ряд других обстоятельств. Так, например, у находящейся в зоне обитаемости планеты-гиганта Kepler-47c может быть потенциально обитаемый спутник земного типа; однако, в условиях циркумбинарной системы его климат подвержен сильным колебаниям, так что условия обитаемости экзолун в двойных системах должны быть сильно модифицированы.

Подводя итоги обсуждения актуальной проблемы обнаружения признаков жизни на экзопланетах (экзолунах), следует говорить о совокупности астрономических и космохимических факторов, обеспечивающих подходящие условия (неуязвимость) планеты в данной области космического пространства и одновременно формирующих благоприятную для жизни природную среду. Земля служит примером их идеального сочетания. Можно было бы думать, что с учетом громадного числа и огромного разнообразия планетных систем и наличия землеподобных планет, наша планета не является уникальным космическим оазисом. На самом деле ситуация гораздо сложнее, и формальный статистический подход, позволяющий считать Землю “типичной” обитаемой планетой, совершенно не оправдан. Но есть и ряд отличных от Земли и благоприятных для возникновения жизни астрономических факторов. Помимо расширения зоны обитаемости и “долговечности” планеты у красных карликов, сюда можно отнести, например, большую площадь поверхности у сверхземель. Важную роль может играть кратность родительской звезды: как показал совместный анализ условий обитаемости экзопланетных систем одиночных и кратных звезд, ряд условий может удовлетворяться на циркумбинарных планетах у двойных звезд главной последовательности с большей вероятностью, чем на Земле, где эти условия возможно возникли достаточно случайно.

Вполне вероятно, что возникновению жизни на Земле способствовала сама архитектура Сол-



Рис. 21. Сопоставление Солнечной системы с гипотетической планетной системой у звезды HD 189733 (рисунок художника).

нечной системы, на которую не похожи конфигурации ни одной из экзопланетных систем. В их формировании важная роль принадлежит процессам гравитационную неустойчивости, приливной и столкновительной эволюции в протопланетном диске, что подтверждают результаты компьютерного моделирования с использованием методов стохастической динамики. Они свидетельствуют о крайней чувствительности конфигурации планетной системы к начальным условиям, определяемым параметрами диска. В рамках такого подхода ставится под сомнение предположение о частом рождении устойчивых планетных конфигураций типа Солнечной системы, что делает ее уникальной. На рис. 21 показана гипотетическая планетная система у звезды HD 189733 в сравнении с Солнечной системой. В показанной конфигурации, при наличии планеты-гиганта типа Сатурна вблизи звезды, система оказывается неустойчивой, по крайней мере, на временном интервале, необходимом для зарождения жизни на одной из землеподобных (или близких к ним) планет.

Как видим, многие обстоятельства, к сожалению, препятствуют оптимистическим ожиданиям обнаружить жизнь, в своей основе похожую на земную. Ключевым остается вопрос о том, существуют ли на экзопланетах формы жизни на другой химической основе и/или других принципах, с высокой приспособляемостью и устойчивостью к экстремальным природным условиям. Выполняются ли рассмотренные выше принципы формирования молекулярного мира [8]? Хотя ответа на этот вопрос пока нет, можно, тем не менее, еще раз повторить высказанное утверждение о

том, что углерод, составляющий основу органических соединений и способный образовывать разветвленные полимерные цепи, и вода являются самой подходящей комбинацией для процессов, биосинтеза и основой биоразнообразия. К этому добавим, что образование сложных органических соединений в космосе и на планетах с учетом механизмов миграции и транспорта вещества является универсальным и его, вероятно, следует рассматривать, как некую парадигму в представлениях о жизни во Вселенной.

10. ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ (SETI). СВЯЗЬ С НООСФЕРОЙ

Развитие жизни от примитивного состояния до рождения интеллекта, как высшей формы эволюции материи — чрезвычайно сложный и во многом уязвимый процесс. Вполне обоснованно можно предположить, что усложнение и рост степени организации жизни происходят далеко не на всех планетах, на которых возникла жизнь. На Земле такой переход произошел в процессе биологической эволюции и в условиях, способствовавших дарвиновскому естественному отбору, но сами эти процессы вряд ли можно считать универсальными.

Вернадский рассматривал появление человеческого разума как вполне естественный путь эволюции. Он писал: “Человек и человечество в биосфере — это закономерная часть ее живого вещества и ее организованности”. Научная мысль и быт человечества — проявление этого процесса. “Научная мысль социального человечества — это новая геологическая сила в биосфере и одно из

повторяющихся в истории планеты геохимических проявлений, выходящих своей причиной за пределы земной коры”. И далее: “Под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние — в ноосферу” [1, 32]. Под ноосферой он понимал новую фазу эволюции биосферы и новый геологический фактор, небывалый по мощности и общности. И это было в середине прошлого столетия. Современные технологии обеспечили начало атомной и космической эры, овладение новыми источниками энергии, расшифровку генома, широкое внедрение информационных технологий и небывалый рост коммуникаций, “опутав” мир паутиной Интернета. Создана мощная техносфера, порожденная человеческой мыслью — ноосферой.

Вернадский отводил огромную роль “движению научной мысли ... и его значению в геологической истории биосферы”. Он отмечал, что особый смысл приобрел взрыв научного творчества в XX столетии, что означает одновременно изменение понимания основ реальности, “вселенскость и действенное, социальное понимание науки”, определяющей само существование цивилизации. Следуя своим гуманистическим воззрениям, он говорил об “ответственности каждого отдельного человека и одновременно объединении усилий всех людей в решении глобальных проблем”. “Человек, — писал он, — впервые реально понял, что он житель планеты и может — должен — мыслить и действовать в новом аспекте, не только в аспекте отдельной личности, семьи или рода, государств или их союзов, но в планетарном аспекте” [32]. Он призывал к тому, чтобы эти изменения сознательно направлялись человеческой мыслью, и только тогда биосфера превратится в *необходимую для процветания человека ноосферу*. К сожалению, на современном историческом этапе, с учетом обострения сырьевых, экологических и — главное — политических и социально-экономических проблем эти мысли не открывают перед человечеством новые перспективы, а скорее приобретают утопический характер. Вместе с утратой гармонии человека с природой растет опасность самоуничтожения.

В современных условиях само понятие ноосферы обретает новый смысл и естественным образом расширяется на одну из ключевых проблем астрономии и астробиологии — поиск внеземных цивилизаций (Search for ExtraTerrestrial Intelligence, SETI) [33].

Проблема возможности существования неземного разума волновала человечество с незапамятных времен. Представитель знаменитой афинской философской школы Эпикур еще в 300 г. до н. э. писал: “Существует бесконечное число миров, похожих и не похожих на наш мир... Мы должны верить, что во всех этих мирах есть живые

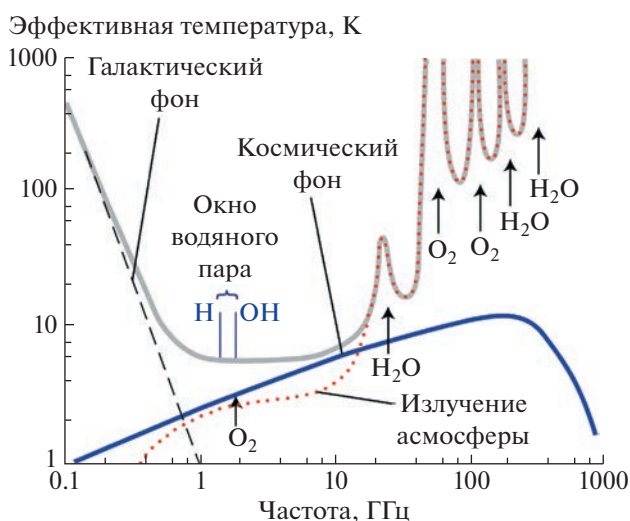


Рис. 22. Оптимальное окно частот для межзвездной связи для наземных радиотелескопов — приблизительно от 1 до 10 ГГц. На частотах ниже 1 ГГц высок тепловой фон газа в Галактике, на частотах выше 10 ГГц — тепловое излучение молекул газа в атмосфере Земли. В качестве универсальной физической величины выделено окно прозрачности водяного пара на частоте около 1420 МГц (длина волны 21.1 см), соответствующей метастабильному переходу между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода. Позднее, после обнаружения космического источника мазерного радиоизлучения в линии гидроксила OH ($\lambda = 18$ см), эту частоту также отнесли к окну прозрачности H₂O. © Cocconi & Morrison, 1959

существа, планеты и все то, что мы видим в нашем мире”. Китайский философ Тенг Му на рубеже предыдущих тысячелетий утверждал: “Земля и небо велики, но во всем космосе они не более, чем зернышко риса... Весь космос можно сравнить с деревом, а землю и небо с одним из его фруктов. Космос — это королевство, а земля и небо — один из его жителей. На дереве много фруктов, а в королевстве много жителей. Неразумно предполагать, что кроме земли и неба, которые мы видим, нет других небес и других земель!”. Эти убеждения развивались в эпоху Возрождения и сохранились до наших дней (цит. по [1]).

К сожалению, это чисто умозрительные суждения, не подкрепленные никакими реальными фактами. Современная наука пока не в состоянии ответить даже на вопрос о том, существуют ли примитивная жизнь в Солнечной системе и тем более в других звездных системах, не говоря уже о разумной жизни. Астрономы приложили немало усилий, чтобы добиться успеха в этом актуальном разделе фундаментальной науки, чтобы вместо преобладающих интуитивного и/или эмоционального подходов поставить изучаемую проблему на строго научную основу. Начиная с пионерской работы Ж. Коккони и Ф. Моррисона [34],

в которой в качестве наиболее подходящего диапазона для межзвездных коммуникаций обособилось использование длины волны линии нейтрального водорода (21 см, 1420 МГц), было предложено много оригинальных проектов и проведено множество наблюдений с использованием все более мощных радиотелескопов и анализаторов сигналов. К сожалению, положительных результатов выполненных работ, обзор которых не входит в нашу задачу, получено не было. Отметим лишь, что в развитие этого направления исследований большой вклад внесли отечественные астрономы В.С. Троицкий, И.С. Шкловский, Н.С. Кардашев [35, 36].

Продолжение усилий стимулируется осознанием того факта, что общее число звезд во Вселенной достигает 10^{22} и по оценкам примерно треть из них обладает планетными системами. Это означает что число планет сопоставимо с числом звезд. Как показано в предыдущих разделах, среди них есть землеподобные планеты с подходящими для жизни природными условиями, и даже при относительно небольшой фракции их абсолютное число должно быть огромным, а значит, и ожидаемое число цивилизаций, обладающих ноосферой и способных установить контакт с другими цивилизациями.

Между тем более детальный анализ делает ситуацию менее оптимистичной. Для оценки числа технологически развитых цивилизаций в Галактике можно использовать известную формулу Дрейка в виде мультипликативного соотношения вероятностных критериев:

$$N = n f_p f_c f_i f_e L / T,$$

где n — общее число звезд в Галактике (иногда за n принимают скорость звездообразования); f_p — доля звезд, обладающих планетными системами; f_c — доля планет в планетной системе, пригодных для жизни; f_i — доля планет, на которых возникла жизнь; f_e — доля планет, на которых развилась разумная жизнь; L — средняя продолжительность жизни цивилизационноосферы; T — возраст Галактики (~ 10 млрд. лет).

Принимая достаточно произвольно, но, по нашему мнению, вполне рационально, вероятностные значения этих сомножителей, получаем квазиреальную оценку числа N :

$$N \sim 10^{11} \times 0.3 \times 0.1 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \times 10^{-1} \times 10^3 / 10^{11} \approx 1.$$

Это означает, что единственная цивилизация, существующая в нашей Галактике, — земная [37]. Однако вероятности, определяющие этот результат (за исключением f_p и f_e), допускают большие отклонения от принятых значений. Большую не-

определенность в эту оценку вносит, в частности, продолжительность существования цивилизации. Принятая величина $L \sim 10^3$ лет представляется весьма оптимистичной, если принять во внимание упомянутые проблемы, с которыми уже столкнулось человечество на Земле.

При том же значении $L \sim 10^3$ лет и с учетом размеров Галактики (100 000 св. лет) времени для установления контактов недостаточно. Диспропорцией между необходимым временем передачи-приема сигнала и временем существования цивилизации можно объяснить отсутствие контактов. Аналогией служат появление и схлопывание пузырей на поверхности лужи во время дождя, если учесть, что расстояние между “пузырями” достигает сотен и тысяч световых лет и посланный сигнал не успевает достичь адресата, не говоря уже об установлении двусторонней связи. При этом мы оставляем в стороне философский вопрос о желании продвинутой цивилизации в силу эгоцентризма установить контакт с себе подобной или отставшей в развитии, скажем, на тысячи лет. Эти вопросы, так же, как и понятие разума, сходства и различия социальных сообществ, подробно обсуждаются в работах [38–40].

Как видим, на пути решения интригующей проблемы обнаружения внеземного разума и установления связи с другими потенциально существующими мирами сохраняются большие неопределенности. От астрономов потребуются еще много усилий, чтобы добиться здесь реального прогресса, используя самые передовые технологии. Сегодня трудно строить прогнозы. Вспомним, однако, что всего лишь несколько десятилетий назад не было крупных оптических и радиоинтерферометров и космических телескопов; не было грандиозного прогресса в познании Вселенной; не были обнаружены внесолнечные планеты; не было ошеломляющих успехов в развитии информационных технологий, биотехнологий, молекулярной биологии и биохимии; и много другого.

Что принесут нам следующие 20, 50, 100 лет? И какое влияние они окажут на перспективу установления межзвездных контактов?

В завершение напомним высказывание известного писателя-фантаста Артура Кларка (цит. по [41]): “...Самая любопытная отрасль науки — исследование космоса... Чем лучше мы будем узнавать Вселенную, тем больше сюрпризов получим от нее. Взять хотя бы вопрос о существовании разумных существ. Не думаю, чтобы эти существа были подобны человеку. Может быть, у них три руки или три глаза — не знаю, на этот вопрос ответит будущее, но то, что они есть в других мирах, несомненно”.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жизнь представляет собой исключительно сложный феномен, поэтому изучение проблемы ее происхождения и эволюции требует междисциплинарного подхода и привлечения самых передовых современных методов исследований. За последние десятилетия в этом направлении достигнут значительный прогресс, получены впечатляющие результаты, прежде всего, в таких областях биологической науки, как молекулярная биология, генетика и биохимия. Одновременно с этим пришло осознание того, что саму проблему происхождения жизни нельзя рассматривать изолированно, вне связи с многочисленными факторами, существующими в космосе. Так родилась новая научная дисциплина — астробиология, объединившая астрономию и биологию, в рамках которой предпринимаются попытки обнаружить жизнь за пределами Земли.

Мы попытались подойти к этой проблеме, уделяя основное внимание астрономическим и космохимическим аспектам происхождения жизни и формированию биосферы. Этим процессам предшествует химическая эволюция вещества в космосе и на планете, имеющая важные следствия для последующих процессов биогеохимической и биологической природы, включая упорядочение и самоорганизацию. Эти принципы заложены в исходных геохимических и космохимических процессах на Земле и других планетах. Показано, что взаимосвязь форм жизни, как целостного космопланетарного явления в масштабах биосферы определяет химизм, миграцию и дифференциацию химических элементов и отдельных изотопов на основе особых разнородных биогеохимических функций и биогеохимических циклов — систем незамкнутых и необратимых круговоротов веществ в биосфере и других оболочках Земли. При этом неполная обратимость (незамкнутость) является одним из важнейших свойств биогеохимических циклов, имеющая планетарное значение.

Мы опираемся на единственно известный нам биологический механизм земной жизни. Поэтому приведены краткие сведения из молекулярной биологии, включающие информационную и функциональную основы жизни. Обсуждаются современные концепции происхождения жизни, среди которых выделены две основные гипотезы: древний мир РНК и последовательное упорядочение. На основе этих подходов рассмотрены проблемы предбиологической и биологической эволюции, начиная от возникновения первичных бактерий — прокариотов, эукариотов — до млекопитающих и человека на геохронологической шкале, составляющей “биологические часы Земли”. При этом подчеркивается важная роль дарвинизма на этапах биологической эволюции, но

не на ранних этапах становления жизни, развития молекулярных механизмов самоорганизации и формирования биологических систем. С этих позиций молекулярная генетика, биохимия и дарвинизм являются взаимодополняющими компонентами, лежащими в основе современной теории эволюции.

Среди астрономических аспектов происхождения жизни основное внимание уделено связи происхождения жизни и биологической эволюции с космическими факторами. Среди них первостепенный интерес представляет синергизм абиогенеза и панспермии. Роль внешнего источника в переносе предбиотического или даже биотического вещества обусловлена наличием миграционно-столкновительных процессов в Солнечной системе и за ее пределами, основную роль в которых играют кометы и астероиды углистохондритового состава из транснептунового пояса на ранних этапах формирования планет. В согласии с этим механизмом находится концепция древнего мира РНК, связывающего появление жизни с периодом интенсивной бомбардировки Земли планетезималями (LHB) около 4 млрд. лет назад. При этом ключевая роль в зарождении жизни принадлежит воде и, как показывают результаты численного моделирования, за счет экзогенного источника Земля могла получить объемы воды и летучих, сопоставимые с земными океанами.

С другой стороны, бомбардировка Земли и планет астероидами и кометами могла иметь катастрофические последствия для зарождения и существования жизни, приводя к громадным биосферным изменениям. Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу препятствовал факт ее высокой устойчивости и приспособляемости к экстремальным природным условиям.

Сохраняются надежды обнаружить жизнь в Солнечной системе. Среди наиболее перспективных объектов называют Марс, включая возможное наличие у него глубинной биосферы, галилеевы спутники Юпитера Европу и Ганимед и спутник Сатурна Энцелад, в недрах которых с высокой вероятностью существуют глубинные теплые водные океаны. С точки зрения предбиологической эволюции огромный интерес представляет Титан.

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы Солнечной системы. Поэтому первостепенный интерес представляет возможность обнаружения жизни в окрестности других звезд — на экзопланетах. Большое число (~5000) и разнообразие открытых экзопланет, среди которых найдены землеподобные планеты, находя-

щиеся в благоприятных климатических зонах обитаемости, дают основания для оптимизма. Вместе с тем конфигурации экзопланетных систем у одиночных и двойных звезд сильно отличаются от архитектуры Солнечной системы, что связано с возможными неустойчивостями, а высокая активность родительских звезд может оказаться критической для жизни.

Еще более сложный и уязвимый путь эволюции жизни — рождение интеллекта и возникновение цивилизаций. Поиск внеземных цивилизаций (SETI) — один из наиболее актуальных разделов астрономии, представляющий собой комплексную проблему, решение которой связано с разработкой многоплановой стратегии и использованием самых передовых технологий. Оценки путем многофакторного вероятностного анализа числа технологически развитых цивилизаций, обладающих ноосферой и способных к установлению контактов, не внушают большого оптимизма. Как показывает земной опыт, наиболее критичными для цивилизации могут оказаться социально-экономические и политические проблемы. Поэтому сегодня трудно строить прогнозы, ожидает ли человечество успех в этом чрезвычайно актуальном разделе астрономии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Вернадский, *Философские мысли натуралиста* (Наука, М., 1988).
2. В. И. Вернадский, Проблемы биогеохимии, вып. 1. Значение биогеохимии для изучения биосферы. М.—Л., 1935.
3. В. А. McGuire, *Astrophys. J. Supp.* **259**, id. 30 (2022).
4. J. T. R. Bae, R. Teague, S. M. Andrews, M. Benisty, et al., *Astrophys. J. Lett.* **934**, L20 (2022).
5. Г. А. Заварзин, *Вестник РАН*, **71**, 988 (2001).
6. В. И. Вернадский, *Биосфера. Избранные сочинения. т. 5* (М., 1960).
7. В. И. Вернадский, *Химическое строение биосферы Земли и ее окружения* (М., 1965).
8. Л. А. Грибов, В. И. Баранов, *От молекул к жизни* (URSS, М., 2012).
9. Дж. Хаггис, Д. Мухи, А. Мюир, К. Робертс, П. Уокер, *Введение в молекулярную биологию* (М.: Мир, 1967).
10. А. С. Спирин, *Вестник РАН* **71**, 320 (2001).
11. Э. М. Галимов, *Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции* (М.: Едиториал УРСС, 2001).
12. Э. М. Галимов (ред.) *Проблемы зарождения и эволюции биосферы* (М.: URSS, 2008).
13. И. Пригожин *Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы* (R&C Dynamics, Москва-Ижевск, 2001).
14. А. Г. Башкиров, *Теоретическая и математическая физика* **149**, 299 (2006).
15. А. В. Колесниченко, М. Я. Маров, *Астрономический вестник* **53**, 436 (2019).
16. Д. Рюэль *Случайность и хаос* (R&C Dynamics, Москва-Ижевск, 2001).
17. Р. А. Лутц, М. Дж. Кенниш, *Обзоры геофизики* **31**, 211 (1993).
18. Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. Н. Воронцов, А. В. Яблоков, *Краткий очерк теории эволюции. 2-е изд.* (М.: Наука, 1978).
19. C. H. Lineweaver, Y. Fenner, and B. K. Gibson, *The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way* // *Science* **303**, 5962 (2004).
20. C. Bounama, W. Von Bloh, S. Franck, *How rare is complex life in the Milky Way?* // *Astrobiology*, **7**, 745756 (2007).
21. М. Я. Маров, *Успехи физ. наук* **175**, 668 (2005).
22. М. Ya. Marov and S. I. Ipatov, *Astrophysics and Space Science Library* **261**, 223 (2001).
23. M. Ya. Marov and D. H. Grinspoon. *The Planet Venus* (Yale University Press, New Haven and London, 1998).
24. М. Я. Маров, *Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. Изд. 3-е* (Физматлит, М., 2021).
25. J. S. Greaves, A. M. S. Richards, W. Bains, P. B. Rimmer, et al., *Nature Astronomy* **5**, 655 (2021).
26. D. Anfinov, A. Kozyrev, M. Litvak, A. Sanin, et al., *Science* **297**, 78 (2002).
27. I. G. Mitrofanov, M. T. Zuber, M. L. Litvak, and N. E. Demidov, *Geophysical Research Letters* **34**, id. L18102 (2007).
28. I. G. Mitrofanov, M. L. Litvak, A. B. Varenikov, Y. N. Bartakov, *Space Science Reviews* **170**, 559 (2012).
29. D. I. Lisov, M. L. Litvak, A. B. Sanin, A. R. Vasavada, *Journal of Geophysical Research: Planets*, **127**, id. e2022JE007327 (2022).
30. D. S. McKay, E. K. Gibson, K. L. Thomas-Keptra, H. Vali, Hojatollah, et al., *Science* **273**, 924 (1996).
31. М. Я. Маров, И. И. Шевченко, *Экзопланеты. Физика. Динамика. Космогония* (Физматлит, М., 2022).
32. V. I. Vernadsky. The Transition from the Biosphere to the Noosphere. Excerpts from “Scientific Thought as a Planetary Phenomenon”. 21st Century Science & Technology, Spring-Summer 2012.
33. М. Я. Маров, *Ноосфера* № 3, 111 (2013).
34. G. Cocconi, P. Morrison, *Nature* **184**, 844 (1959).
35. В. С. Троицкий. Развитие внеземных цивилизаций и физические закономерности. В Сб.: “Проблема поиска внеземных цивилизаций”, с. 5–28 (Наука, М., 1981).
36. Н. С. Кардашев. Стратегия и будущие проекты SETI. В Сб.: “Проблема поиска внеземных цивилизаций”, с. 29–45 (Наука, М., 1981).
37. C. Sagan *Pale Blue Dot* (Random House, NY, 1994).
38. C. B. Cosmovici, S. Bower, D. Werthimer (Eds.) *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, Editrice Compositori, 1997.
39. Ch. A. Beichman, in: *The Astronomy Revolution: 400 Years of Exploring the Cosmos*, eds D. G. York, O. Gingerich. Looking for Life, Searching the Solar System (Cambridge University Press, 2005).
40. А. С. Монин, Н. И. Солнцева. *Жизнь и разум* (Наука, М., 2007).
41. М. В. Озеров. *От Гринвича до экватора* (Советский писатель, М, 1984).

ASTRONOMICAL AND COSMOCHEMICAL ASPECTS OF THE LIFE ORIGIN PROBLEM

M. Ya. Marov^a

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The fundamental properties of a known form of life are briefly considered, including the fundamental ideas about the chemical evolution of matter and the properties of living matter, which are based on biogeochemistry and molecular biology. The concepts underlying the modern understanding of the origin of life based on chemical and biological evolution are discussed. The basics of astrobiology and the intriguing problem of the existence of extraterrestrial intelligence and the search for life in the Universe are briefly touched upon.

Keywords: astronomy, biogeochemistry, molecular biology, abiogenesis, panspermia, evolution, astrobiology, extraterrestrial intelligence

НОВЫЕ ФОРМЫ МАТЕРИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

© 2023 г. А. М. Черепашук^{1,*}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: cherepashchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В статье представлен обзор развития наших представлений о новых формах материи во Вселенной.

Ключевые слова: темная материя, темная энергия, черные дыры, кротовые норы, многоканальная астрономия

DOI: 10.31857/S0004629923080030, **EDN:** HJHOLJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Генеральной ассамблеей ООН 2009 г. был объявлен Международным годом астрономии. Тем самым было признано выдающееся значение астрономии в жизни человечества. Больше четырех сот лет тому назад Галилей впервые навел свой телескоп на небо и увидел пятна на Солнце, горы на Луне, спутники Юпитера, положив начало наблюдательной астрономии. Проведение астрономических наблюдений привело к революционному прорыву в понимании окружающего нас мира. Замечательно то, что и сейчас мы являемся свидетелями новой революции в астрономии, связанной с применением новых средств наземных и космических наблюдений. Земная атмосфера непрозрачна для подавляющего большинства видов излучений, идущих из Космоса. До середины прошлого столетия астрономы наблюдали небо в основном лишь в узком оптическом “окне” прозрачности земной атмосферы, в котором длина волны принимаемого электромагнитного излучения меняется всего примерно в 2 раза. Запуск первого советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. положил начало эре космических исследований. Вынос астрономических телескопов за пределы земной атмосферы привел к чрезвычайно сильному расширению исследуемого диапазона электромагнитного излучения. Сейчас астрономы изучают небо не только в оптическом, но и в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом, инфракрасном и радиодиапазонах спектра. При этом диапазон длин волн принимаемых космических излучений меняется не в 2 раза, а в 10^{16} раз!

Это привело к тому, что надежность результатов интерпретации современных астрономических наблюдений сравнялась с надежностью результатов лабораторных физических эксперимен-

тов. И это несмотря на то, что астрономические объекты удалены от нас на громадные расстояния в тысячи, миллионы и миллиарды световых лет.

Астрономические исследования последних трех десятилетий привели к радикальному пересмотру наших представлений об окружающем мире (рис. 1). Выяснилось, что известная нам форма материи — атомы и молекулы (так называемая барионная форма) — это всего лишь около 4% от полного количества материи Вселенной. Остальные 96% — это, в основном, так сказать, темный сектор, состоящий из двух пока загадочных форм материи: темной материи (примерно 26%) и темной энергии (примерно 70%). Еще одна новая форма материи — это черные дыры, которые в нашей Галактике по массе суммарно составляют около 1% от массы барионного вещества, т.е. примерно 10^9 масс Солнца. Кроме того, в последние годы астрономы все увереннее говорят о возможности существования во Вселенной так называемых “кротовых нор”. Это еще одна возможная новая форма материи. Она пока не открыта, но уже предложены методы наблюдений, позволяющие, в принципе, отличить “кротовую нору” от черной дыры.

Необычность новых форм материи поражает воображение (подчеркнем, что эти формы мы называем новыми, поскольку они открыты сравнительно недавно).

Темная материя ничего не излучает и не поглощает, является гравитационно-сгущающей (т.е. состоит из отдельных темных тел или частиц неизвестной природы) и концентрируется к большим массам барионного вещества, проявляя себя лишь своим гравитационным притяжением.

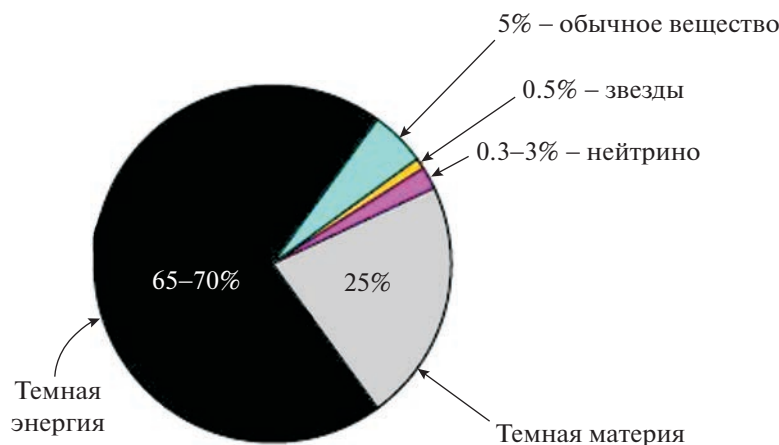


Рис. 1. Состав "энергетической смеси" Вселенной.

Темная энергия гравитационно не сгущается (по-видимому, это поле неизвестной природы), ничего не излучает и не поглощает, равномерно заполняет пространство и проявляется в виде гравитационного отталкивания. По мере накопления наблюдательных данных имеет место удивительная сходимость параметров темной энергии к характеристикам поля, введенного А. Эйнштейном с помощью Λ -члена в уравнения Общей теории относительности (ОТО).

Черные дыры образуются при катастрофическом сжатии (коллапсе) массивных объектов (мы не рассматриваем здесь возможность образования черных мини-дыр при столкновении элементарных частиц очень высоких энергий на современных ускорителях, например, Большом адронном коллайдере). Это идеально симметричные объекты, которые характеризуются всего лишь тремя параметрами: массой, угловым моментом вращения и электрическим зарядом. В центре черной дыры расположена сингулярность (область с формально бесконечной плотностью), куда сколлапсировало падающее вещество (в сопутствующей системе отсчета) и где царят пока неизвестные нам законы квантовой гравитации. Эта сингулярность окружена горизонтом событий — световой поверхностью в пространстве-времени, на которой ход времени с точки зрения далекого наблюдателя останавливается. Следует подчеркнуть, что поскольку центральная квантовая сингулярность расположена в будущем по отношению к горизонту событий, незнание законов квантовой гравитации не мешает исследователям описывать в рамках ОТО свойства горизонта событий, эргосферы и подавляющей части внутренней черной дыры.

Хотя постепенное накопление наблюдательных данных для многих сотен кандидатов в черные дыры дает все больше и больше свидетельств в пользу реальности существования черных дыр

во Вселенной, имеются теории гравитации, отличные от ОТО, в которых отвергается существование черных дыр. Например, как следует из работ А.А. Логунова и Л.П. Гришука, если добавить в уравнения ОТО члены, соответствующие ненулевой массе покоя гравитона (кванта гравитационного поля), то горизонт событий у массивного коллапсирующего объекта не образуется и черная дыра при этом не формируется. Этот вывод радикально отличается от предсказания ОТО, что делает проблему поиска и исследования черных дыр особенно интригующей и интересной.

Сейчас, благодаря достижениям гравитационно-волновой астрономии и межконтинентальной радиоастрономии сверхвысокого углового разрешения, существование черных дыр во Вселенной можно считать доказанным.

"Кротовые норы" также образуются при коллапсе массивных объектов, но помимо барионного вещества в процессе коллапса должна присутствовать так называемая экзотическая материя, обладающая отрицательным давлением. Впервые о возможности образования туннелей в пространстве-времени (которые в дальнейшем получили название кротовых нор) писали Эйнштейн и Розен в 1935 г. В последние годы в нашей стране теорией "кротовых нор" активно занимаются Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, А.А. Шацкий. В отличие от черной дыры, "кротовая нора" не имеет сингулярности и не обладает горизонтом событий. Поэтому в принципе в "кротовую нору" можно как войти, так и выйти из нее. С "кротовыми норами" связаны надежды ученых на создание машины времени.

Таким образом, современная астрономия ставит серьезные задачи перед фундаментальной наукой. Благодаря астрономии человечество в последние годы осознало огромную меру незнания окружающего нас мира. Это является чрезвычайно сильным стимулом для развития науки и, в

частности, астрономии. Развитые страны тратят миллиарды долларов на создание новых уникальных наземных и космических телескопов и обсерваторий.

Свойства описанных выше новых форм материи столь экзотичны, что в их существование верится с трудом. И все же новейшие наблюдательные данные, полученные в различных диапазонах электромагнитного излучения и в различных каналах наблюдений, позволяют судить о реальности существования темной материи, темной энергии и черных дыр во Вселенной. Опишем кратко эти наблюдательные данные.

2. ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Существует по крайней мере десяток независимых свидетельств существования темной материи во Вселенной. Перечислим некоторые из них.

2.1. Движения галактик в скоплениях

В 1932 г. немецкий астроном Ф. Цвикки обратил внимание на то, что галактики в богатом скоплении в созвездии Волосы Вероники, содержащем тысячи звездных систем, подобных нашей Галактике, двигаются с очень большими скоростями — порядка 1000 км/с. Чтобы удержать столь быстро движущиеся галактики в объеме скопления, требуется тяготение, которое не способны создать одни только видимые массы светящихся галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и, как подсчитал Цвикки, здесь необходимы дополнительные, невидимые массы, которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы скопления [1]. Вывод Цвикки об аномально больших скоростях движения галактик в скоплениях в настоящее время подтвержден исследованиями большого числа скоплений галактик. Так что наличие темной материи следует из наблюдений многочисленных скоплений галактик.

Наряду с гипотезой о темной материи для объяснения аномально больших скоростей движения галактик в скоплениях предпринимались также попытки модификации закона тяготения Ньютона на больших расстояниях. Такие же попытки использовались и для объяснения аномально больших скоростей вращения периферийных частей галактик (см. ниже). До сих пор в солидных научных журналах появляются статьи, в которых предлагаются варианты так называемой модифицированной ньютоновской динамики (МОНД). Однако все варианты МОНД страдают общим недостатком: в применении к разным скоплениям и галактикам приходится вводить разные модификации закона тяготения Ньютона, что делает МОНД непривлекательной.

2.2. Вращение спиральных галактик

Если бы темной материи не было, основная масса галактики была бы сосредоточена в ее центральных частях, и скорость вращения периферийных частей галактики должна убывать с расстоянием от галактического центра обратно пропорционально корню квадратному из расстояния. Ничего подобного в галактиках не наблюдается. Зависимость скорости вращения спиральных галактик от расстояния до их центров известна к настоящему времени для многих десятков изолированных галактик [2]. Эта зависимость уверенно прослеживается вплоть до расстояний, в 3–10 раз превышающих видимый радиус звездной системы (по движению облаков нейтрального водорода). В области вне видимого диска галактики — там, где доминирует темная материя галактического гало, — кривая вращения становится, как правило, плоской, так что скорость вращения не зависит от расстояния и составляет весьма большую величину — сотни км/с (рис. 2). Во всех случаях столь высокие скорости вращения периферийных частей галактик определенно указывают на присутствие темной материи и внутри звездной системы, и вне ее. Причем масса темной материи в гало галактики в 3–10 раз превышает массу видимой звездной системы.

2.3. Рентгеновский газ в скоплениях галактик

Богатые скопления галактик наблюдаются в рентгеновском диапазоне спектра с помощью орбитальных обсерваторий. Эти наблюдения позволили открыть горячий ионизованный газ в объеме скоплений. Этот разреженный газ и служит источником рентгеновского излучения. Температура горячего газа близка к ста миллионам градусов, и этой температуре соответствуют средние скорости движения протонов — частиц плазмы, которые составляют, как и скорости галактик, тысячи км/с. Без темной материи этот горячий газ улетучился бы из скопления в бесконечность. Тем самым рентгеновские наблюдения дают независимый довод в пользу наличия темной материи в скоплениях галактик: горячий газ в скоплениях не разлетается в окружающее пространство, потому что погружен в глубокую потенциальную яму, создаваемую в основном мощным тяготением темной материи, суммарная масса которой примерно в 10 раз превышает массу звездных компонентов всех галактик скопления.

2.4. Эффект гравитационной линзы

Скопления галактик демонстрируют эйнштейновский эффект отклонения луча света в поле тяготения. Источником света в данном случае служит далекая галактика или квазар. Из-за искривления лучей света от далекого квазара в гра-

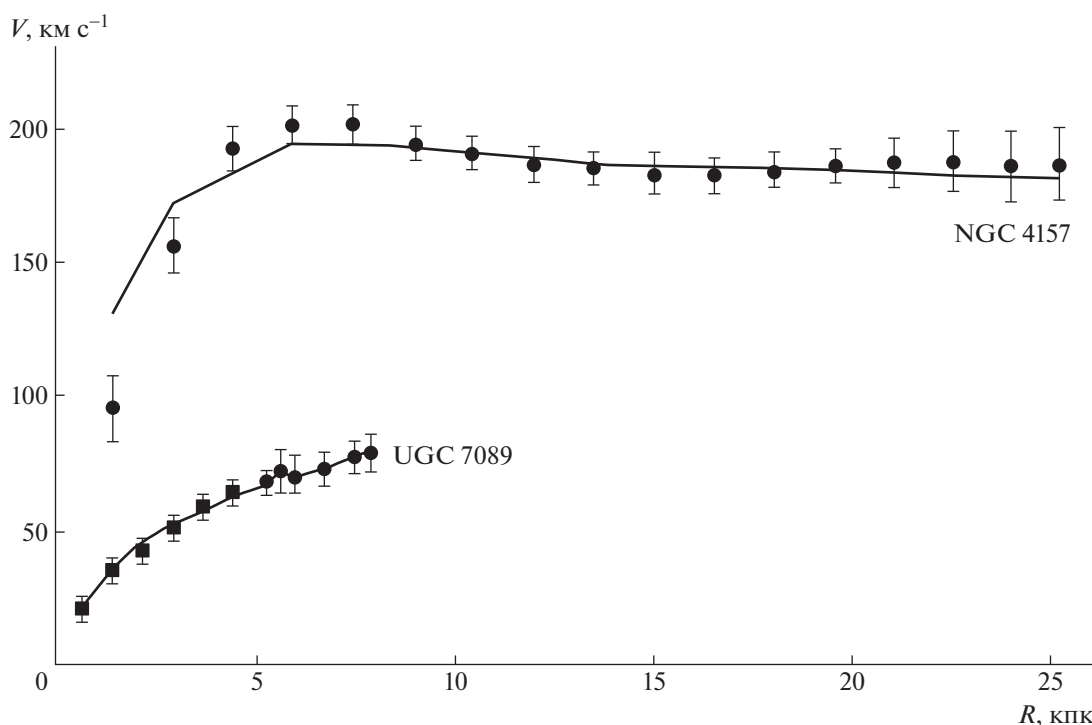


Рис. 2. Распределение линейной скорости вращения галактик по радиусу. На периферии скорость вращения становится почти постоянной и равна большой величине, порядка нескольких сотен км/с. Это свидетельствует о наличии темной материи.

витационном поле более близкого скопления галактик наблюдаются многочисленные изображения (“духи”) далекой галактики или квазара (эффект сильного гравитационного линзирования). Кроме того, изображения самих далеких галактик, проецирующихся на периферию скопления, могут слегка искажаться из-за эффекта линзирования в гравитационном поле переднего скопления (эффект слабого гравитационного линзирования). В обоих случаях эти эффекты позволяют оценить полную массу скопления галактик. Она оказывается на порядок больше массы всех видимых галактик скопления. Это служит независимым указанием на наличие темной материи в скоплениях.

2.5. Движения галактик в Местной группе

Наша Галактика вместе с туманностью Андромеды и несколькими десятками других (более мелких) галактик образует систему, называемую Местной группой. Две основные галактики группы сближаются одна с другой, причем расстояние между ними и их относительная скорость сближения могут иметь наблюдаемые значения лишь в том случае, если в объеме Местной группы имеется темная тяготеющая материя, масса которой примерно в 5–10 раз больше суммарной массы всех видимых галактик.

Кроме перечисленных фактов, имеется еще ряд независимых наблюдательных свидетельств существования темной материи, например, движения спутников нашей Галактики, тройные системы галактик, результаты моделирования крупномасштабной структуры Вселенной и т.п. Во всех этих случаях для объяснения наблюдаемых эффектов с необходимостью приходится привлекать гипотезу о существовании темной материи во Вселенной.

Замечательно то, что все перечисленные независимые результаты находятся в полном количественном согласии друг с другом. Это выглядит так, как если бы десять различных линий пересекались в одной точке! Вот какова прочность эмпирической базы для обоснования гипотезы существования темной материи.

Для объяснения природы темной материи привлекаются, в основном, две гипотезы: это либо тела, связанные с барионной материей (планеты, астероиды, холодные белые карлики, нейтронные звезды, звездные черные дыры и т.п.), либо пока не открытые слабо взаимодействующие элементарные частицы, подобные нейтрино, но много более массивные (с массой примерно в 1000 раз больше массы протона). Ученые надеются, что эксперименты по столкновению частиц на Большом адронном коллайдере (Швейцария) позволят открыть такие элементарные частицы.

3. ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Имеется по крайней мере пять независимых свидетельств существования темной энергии, которая доминирует в общем энергетическом балансе Вселенной (составляя около 70%). Перечислим важнейшие из них.

3.1. Ускорение космологического расширения

В 1998–1999 гг. две международные группы наблюдателей, одной из которых руководили Б. Смит и А. Рисс, а другой — С. Перлмуттер [3, 4], установили, что наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением, так что скорости удаления галактик возрастают со временем. Это открытие было сделано с помощью изучения вспышек далеких сверхновых звезд типа Ia, которые, как показал профессор Ю.П. Псковский (ГАИШ), могут служить “стандартными свечами”. Из-за исключительно большой светимости сверхновых в максимуме блеска их можно наблюдать на очень больших расстояниях, в тысячи мегапарсек от нас. Именно на столь больших расстояниях и проявляется эффект ускоренного расширения Вселенной.

Обычное вещество не способно ускорять галактики, а лишь тормозит их разлет, так как взаимное тяготение стремится сблизить галактики. Поэтому открытый астрономами факт ускоренного расширения Вселенной указывает, что наряду с обычным веществом, создающим тяготение, во Вселенной присутствует неизвестная нам ранее ни по астрономическим наблюдениям, ни по физическим экспериментам особая космическая энергия, создающая не тяготение, а антитяготение — всеобщее отталкивание тел Природы. При этом в космологическом масштабе в нашу эпоху антитяготение оказывается сильнее тяготения. Эта новая необычная форма материи получила название темной энергии.

Вначале феномен ускоренного расширения Вселенной был открыт по наблюдениям нескольких десятков далеких сверхновых звезд. В настоящее время этот удивительный космологический феномен подтвержден данными наблюдений многих сотен далеких сверхновых звезд. Планируются специальные космические эксперименты для детального изучения ускоренного расширения Вселенной и уточнения уравнения состояния новой формы материи — темной энергии.

В октябре 2011 г. С. Перлмуттер, А. Рисс и Б. Смит были удостоены Нобелевской премии за открытие ускоренного расширения Вселенной по наблюдениям вспышек сверхновых типа Ia.

3.2. Анизотропия реликтового излучения

Реликтовое излучение с температурой около трех градусов Кельвина осталось от Большого Взрыва, приведшего к формированию наблюдаемой Вселенной. Точные измерения слабой ($\Delta T/T \sim 10^{-5}$) анизотропии реликтового фона, детальное изучение углового распределения его пятнистой структуры указывают, что пространство Большого Взрыва является или строго плоским, или практически плоским. Но согласно фридмановской теории геометрия пространства однозначно связана с соотношением между полной плотностью всех видов материи во Вселенной и так называемой критической плотностью, которая определяется темпом расширения мира и выражается через постоянную Хаббла H (связь между скоростью V относительного удаления галактик и расстоянием r между ними описывается законом Хаббла $V = Hr$). В случае плоского пространства полная плотность всех видов материи во Вселенной равна критической. Зная постоянную Хаббла (которая известна сейчас с точностью около 10%), можно оценить современную плотность мира, т.е. суммарную космическую плотность всех видов материи во Вселенной. Так как плотности темной материи, барионов, нейтрино и излучения известны из других независимых данных, можно оценить плотность темной энергии, вклад которой оказывается равным 70%. Эта оценка прекрасно согласуется с оценкой плотности темной энергии, следующей из анализа ускоренного расширения Вселенной.

3.3. Формирование и эволюция крупномасштабных структур

Компьютерное моделирование процессов формирования и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной и, прежде всего, скоплений галактик, дает наилучшие результаты, если в нем учитывается не только темная материя, но и темная энергия, причем требуемая относительная плотность темной энергии должна иметь как раз ее наблюдаемое значение около 70%.

3.4. Возраст Вселенной

Задолго до открытия темной энергии ученых тревожила одна трудная проблема: в космологических моделях, которые в 1960–1980 гг. считались стандартными, время, протекшее от начала космологического расширения, оказывалось весьма малым — меньше возраста самых старых звезд шаровых звездных скоплений. Уже тогда советские астрофизики И.С. Шкловский, Н.С. Кардашев и Я.Б. Зельдович высказывали предположение, что эту проблему можно было бы решить с помощью введения всемирного космологического отталкивания, которое описывается

Эйнштейновским Λ -членом в уравнениях общей теории относительности. В моделях с отличным от нуля Λ -членом возраст мира получается достаточно большим, и проблема существования старых шаровых скоплений снимается. Так что сам по себе большой возраст самых старых наблюдаемых объектов Вселенной является указанием на существование темной энергии и антитяготения.

3.5. Местный Хаббловский поток

В работах А.Д. Чернина дана оценка локальной плотности темной энергии в скоплениях галактик, которая практически совпадает с глобальной плотностью темной энергии, оцененной из исследований ускоренного расширения Вселенной. Тот факт, что оценки локальной плотности темной энергии, выполненные независимо для пяти различных скоплений галактик, хорошо согласуются друг с другом, свидетельствует о надежности этой методики.

Как мы видим, в случае темной энергии имеет место “пересечение” в одной точке, по крайней мере, пяти различных и не зависящих друг от друга линий аргументации. О природе темной энергии мы можем сказать еще меньше, чем о природе темной материи. Известно лишь, что темная энергия — это поле или совокупность полей, обладающее отрицательным давлением, что и приводит, в конечном счете, к гравитационному отталкиванию. Связь между давлением p и плотностью энергии ϵ в случае темной энергии дается выражением $p = -W\epsilon$, где W — некоторый коэффициент, близкий к единице и известный в настоящее время с точностью до десяти процентов. Если $|W| = 1$, то темная энергия обладает свойствами вакуума, плотность энергии которого одинакова во всех системах отсчета. Поэтому относительно вакуума невозможно различить состояния покоя и движения. Свойства этого вакуума в уравнениях ОТО описываются Эйнштейновским Λ -членом. Если $|W| < 1$, темную энергию называют квинтэссенцией, а если $|W| > 1$, то темная энергия называется фантомной энергией. Свойства этих видов энергии, особенно фантомной энергии, удивительны. Однако с повышением точности определения коэффициента W , он становится все ближе и ближе к единице, что свидетельствует в пользу того, что, скорее всего, темная энергия — это особый вид вакуума. Хотя окончательно судить об этом еще рано, и дело — за дальнейшими наземными и космическими наблюдениями.

4. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Под черной дырой понимается область пространства-времени, для которой вторая космиче-

ская скорость равна скорости света в вакууме (300 000 км/с). Парадоксальные свойства черных дыр настолько необычны, что эти объекты с полным основанием можно отнести к новому, особому виду материи. Действительно, свойства внутренних частей черной дыры (расположенных под горизонтом событий) не зависят от типа и характеристик вещества, из которого черная дыра образовалась. Как уже отмечалось, черная дыра однозначно характеризуется всего тремя параметрами: массой, угловым моментом вращения и электрическим зарядом. Поэтому состояние материи внутри черной дыры нельзя называть ни твердым, ни жидким, ни газообразным, ни плазменным. Это особое, сколлапсированное состояние материи с квантовой сингулярностью, которое реализуется при плотности, превышающей некоторую критическую величину.

Например, чтобы образовать черную дыру из земного шара, нужно с помощью некоторого воображаемого сверхмощного сферического пресса сжать Землю до размеров 9 мм. При этом плотность составит чудовищную величину 2×10^{27} г/см³, что на 13 порядков выше плотности атомного ядра. При достижении такой плотности, согласно предсказанию ОТО, материя сама, без помощи пресса, будет сжиматься до сингулярного состояния (в сопутствующей системе отсчета), что приведет к образованию черной дыры с радиусом горизонта событий, равным 9 мм. Заметим, что размер черной дыры характеризуется так называемым гравитационным радиусом $r_g = 2GM/c^2$, где M — масса тела, G — постоянная тяготения, c — скорость света. Для невращающейся черной дыры гравитационный радиус совпадает с радиусом горизонта событий. Следует отметить, что для очень массивных черных дыр величина критической плотности может иметь не столь экстремально большое значение. Например, для сверхмассивной черной дыры с массой 10 млрд. солнечных масс в ядре галактики радиус горизонта событий равен 200 а.е. (что в 5 раз больше радиуса Солнечной системы), а величина соответствующей критической плотности весьма мала: примерно 0.2×10^{-3} г/см³, что в несколько раз меньше плотности воздуха у поверхности Земли.

Из наблюдений следует (после учета эффектов наблюдательной селекции), что полное число черных дыр звездной массы в нашей Галактике составляет около 10 миллионов. Поскольку средняя масса звездной черной дыры составляет примерно 10 солнечных масс, полная масса, представленная черными дырами в Галактике составляет примерно 10^9 масс Солнца или 1% от полной массы барионного вещества Галактики (заключенного в звездах, газе и пыли). Один процент — немалая величина, что дает основания считать

черные дыры в Галактике действительно особой, новой формой материи.

4.1. Черные дыры звездной массы

Массы звездных черных дыр измеряются по движению оптических звезд в рентгеновских двойных системах. Рентгеновская двойная система состоит из оптической звезды — донора вещества — и релятивистского объекта, аккрецирующего вещество соседней звезды. Возможность наблюдений аккрецирующих черных дыр по рентгеновскому “ореолу” вокруг них была предсказана в 1964 г. Я.Б. Зельдовичем и Е.Е. Салпитером. Теория дисковой аккреции вещества в двойной системе на черную дыру была развита в 1972–1973 гг. в работах Н.И. Шакуры, Р.А. Сюняева, Дж. Прингла, М. Риса, И.Д. Новикова и К. Торна.

Рентгеновские наблюдения со спутников и оптические наблюдения с поверхности Земли прекрасно дополняют друг друга. Рентгеновские наблюдения свидетельствуют о наличии в двойной системе очень компактного объекта, причем по быстрой переменности интенсивности рентгеновского излучения можно оценить характерные размеры этого объекта. Оптические наблюдения (спектральные и фотометрические) позволяют изучать движение оптической звезды в гравитационном поле компактного объекта и, с использованием методов небесной механики, измерять массу компактного объекта. Согласно теории эволюции звезд с учетом эффектов ОТО, если масса ядра звезды, вещество которого переработано в термоядерных реакциях, больше трех солнечных масс, на поздних стадиях эволюции ядра происходит его коллапс с образованием черной дыры. Для звездных ядер меньших масс в конце эволюции образуется нейтронная звезда или белый карлик. Если измеренная масса компактного объекта в рентгеновской двойной системе оказывается более трех солнечных масс, а его оцененный размер близок к радиусу горизонта событий (который определяется массой объекта), то мы с полным основанием можем считать изучаемый компактный объект кандидатом в черные дыры.

В настоящее время в рентгеновских двойных системах измерены массы нескольких десятков кандидатов в звездные черные дыры, которые лежат в пределах 4–20 солнечных масс. Замечательно, что ни с одним из этих массивных компактных объектов не связаны феномены рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, характерные для аккрецирующих нейтронных звезд. Таким образом, по мере накопления сведений о массах релятивистских объектов, постепенно выкристаллизовывается очень красивый результат: аккрецирующие черные дыры и нейтронные звезды различаются не только по

массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с предсказанием ОТО!

Открытие слияния черных дыр в двойных системах с помощью современных лазерных гравитационно-волновых обсерваторий LIGO, Virgo и др. позволило окончательно доказать существование звездных черных дыр во Вселенной. В 2017 г. американские ученые К. Торн, Р. Вайсс и Б. Бариш были удостоены нобелевской премии за открытие гравитационных волн от слияния черных дыр в двойных системах.

4.2. Сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик

Массы сверхмассивных черных дыр (включенные в диапазоне 10^6 – 10^{10} солнечных масс) измеряются по движению “пробных тел” (звезд, газовых облаков, газовых дисков) в их гравитационном поле. Радиусы сверхмассивных черных дыр можно непосредственно измерять с помощью наземных и космических интерферометров. Например, в центре нашей Галактики расположена черная дыра массой $4 \cdot 10^6$ солнечных. Эта масса надежно измерена по движениям соседних звезд. Радиус горизонта событий, соответствующий этой массе, составляет 17 солнечных радиусов. На расстоянии 8 килопарсек (расстояние от Солнца до центра Галактики) эта величина смотрится под углом 10^{-5} угловой секунды. Если же учесть искривление лучей света от ближайших окрестностей горизонта событий (внутренние части аккреционного диска), то видимый угловой размер фотонной сферы и внутренней области аккреционного диска возрастает примерно в 3 раза.

Построение теней черных дыр в ядрах галактики M87 и нашей Галактики с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой на коротких волнах (эксперимент Event Horizon Telescope) окончательно доказало существование сверхмассивных черных дыр во Вселенной. В 2020 г. М. Майору, Д. Кело и Р. Пенроузу была присуждена нобелевская премия за исследования черных дыр.

К настоящему времени измерены массы многих сотен сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Появилась новая область астрофизики — демография черных дыр. Обнаружена надежная статистическая связь между массой сверхмассивной черной дыры и массой балджа галактики (балдж — это сферическое сгущение старых маломассивных звезд вблизи ядра галактики). Наблюдается также четкая корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и дисперсией скоростей звезд в балдже галактики. Выявляется некоторая корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и массой галактического гало, состоящего из темной материи. Все эти зависи-

мости накладывают ограничения на механизмы образования и роста сверхмассивных черных дыр.

Открытие ряда квазаров с красными смещениями $z \sim 6$ показывает, что сверхмассивные черные дыры (с массой порядка 10^8 – 10^9 солнечных масс) успели сформироваться за время менее миллиарда лет, а недавнее открытие очень массивной черной дыры с массой 2.3×10^{10} солнечных масс в квазаре с красным смещением $z \sim 3.9$ показывает, что черная дыра с массой более 20 миллиардов солнечных масс успела сформироваться за время порядка миллиарда лет. В этой связи, ученые обсуждают вопрос о том, что первично во Вселенной — образование сверхмассивной черной дыры в ядре галактики или образование самой галактики.

Таким образом, черные дыры, как особая, новая форма материи, уже завоевали “права гражданства” среди классических объектов Вселенной — звезд, галактик, галактических скоплений и т.п.

5. КРОВОТЫЕ НОРЫ

Кротовая нора, как и черная дыра, является очень компактным объектом, с радиусом “горловины”, близкой к радиусу горизонта событий черной дыры той же массы. Однако в отличие от черной дыры она не имеет горизонта событий и не обладает сингулярностью в центре. Поэтому в пространстве-времени кротовой норы можно перемещаться в прямом и в обратном направлении. Как уже отмечалось, для образования кротовой норы необходимо присутствие экзотической материи с отрицательным давлением. В работах Н.С. Кардашева, И.Д. Новикова и А.А. Шацкого рассматриваются теоретические проблемы, связанные с формированием кротовых нор и проблемы устойчивости этих в высшей степени экзотических объектов при прохождении через них разных видов материи.

Поиск кротовых нор во Вселенной — актуальная задача современной астрофизики. Наблюдаемые свойства черных дыр и кротовых нор очень похожи, поэтому различить их непросто. И тем не менее астрономы придумали ряд методов, позволяющих отличить кротовую нору от черной дыры. Прежде всего, из-за различия метрики пространства-времени вблизи черной дыры и кротовой норы лучи далекой звезды фона по-разному искривляются в гравитационном поле этих объектов. Это позволяет отличить кротовую нору от черной дыры по эффектам гравитационного микролинзирования (в случае черных дыр и кротовых нор звездной массы). Н.С. Кардашев приводит около десятка наблюдаемых различий черных дыр и кротовых нор. Важнейшая особенность кротовой норы — наличие у нее монополюсного магнитного поля. Сложение этого поля с диполь-

ным магнитным полем аккреционного диска приводит к появлению одностороннего коллимированного выброса релятивистской плазмы — джета. Такие односторонние джеты, по-видимому, наблюдаются у некоторых квазаров, например, у знаменитого квазара 3C273.

Еще одна возможность отличить кротовую нору от черной дыры появляется при наличии очень высокого углового разрешения интерферометра. Поскольку кротовая нора не обладает горизонтом событий, в этом случае можно наблюдать наличие сверхтонкой структуры в изображении кротовой норы на размерах, меньших радиуса “горловины” кротовой норы. У черной дыры сверхтонкая структура изображения на масштабах, меньших радиуса горизонта событий, должна отсутствовать. Астрономы активно занимаются поиском кротовых нор, который, в связи с предстоящим вводом в строй новых наземных и космических телескопов и интерферометров, не кажется безнадежным.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Галилей наблюдал небо в телескоп с объективом в несколько сантиметров диаметром и совершил революционный прорыв в представлении об окружающем мире. Современные астрономы имеют в своем распоряжении неизмеримо более мощные и разнообразные средства наблюдений, которые позволяют им открывать принципиально новые, ранее неизвестные формы материи.

Более того, современная астрономия стала не только всеволновой, но и многоканальной (multi-messenger astronomy). Она изучает Вселенную как в электромагнитном канале, так и в каналах нейтрино, космических лучей, а также в гравитационно-волновом канале. Это приводит к получению качественно новых астрофизических результатов.

Можно быть уверенными, что в ближайшие годы мы станем свидетелями новых революционных открытий в такой увлекательнейшей области исследований, как астрономия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *F. Zwicky*, *Astrophys. J.* **86**, 217 (1937).
2. *Y. Sofue, V. Rubin*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **39**, 137 (2001).
3. *A.G. Riess, A.V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti et al.*, *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).
4. *S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R.A. Knop et al.*, *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
5. *N.S. Kardashev, V.V. Khartov, V.V. Abramov, V.Yu. Avdeev et al.*, *Astronomy Reports* **57**, 153 (2013).

NEW FORMS OF MATTER IN THE UNIVERSE**A. M. Cherepashchuk^a**^a *Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

The article presents an overview of the development of our ideas about new forms of matter in the Universe.

Key words: dark matter, dark energy, black holes, wormholes, multi-messenger astronomy

ТОНКИЕ И ТОЛСТЫЕ ДИСКИ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР И КРотовых НОР

© 2023 г. С. В. Чернов^{1,*}

¹Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: chernov@lpi.ru

Поступила в редакцию 30.12.2022 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В работе исследуется распределение вещества в толстых дисках вокруг черных дыр и кротовых нор численно и аналитически. Рассматриваются метрики Керра и Лами. Выписываются точные аналитические решения. Учитывается влияние тороидального магнитного поля на структуру толстого диска. Строятся образы тонкого диска в зависимости от значений параметров метрики.

Ключевые слова: черные дыры, кротовые норы, диски, магнитные поля

DOI: 10.31857/S0004629923080042, **EDN:** HLBOIY

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из научных задач обсерватории Миллиметрон является задача о возможности наблюдения кротовых нор [1, 2]. Главная проблема, которая здесь возникает, заключается в том, чтобы отличить кротовую нору от черной дыры. Одним из наблюдательных проявлений, который позволяет наблюдательно отличить черную дыру от кротовой норы, является наличие системы фотонных колец. Фотонные кольца характеризуются присутствием круговых фотонных орбит, благодаря чему фотоны могут совершать бесконечное число оборотов вокруг черной дыры или кротовой норы. Каждый такой оборот будет проявляться в виде кольца (и/или серпа) в образе черной дыры или кротовой норы. Наблюдательно это будет проявляться в виде быстрых осцилляций в функции видности на базах больше диаметра Земли [3]. Анализируя функции видности на таких базах, можно будет сделать вывод о присутствии в центрах активных ядер галактик черных дыр или кротовых нор [4, 5].

Другим наблюдательным проявлением, с помощью которого можно отличить черную дыру от кротовой норы, являются вспышки вблизи горизонта событий черной дыры или горловины кротовой норы [6]. Вспышки могут проявляться в виде ярких пятен в образах. По расположению и количеству пятен в образах можно сделать вывод о наличии в источнике черной дыры или кротовой норы [6].

Для непосредственного наблюдения образов черных дыр или кротовых нор необходим источ-

ник излучения. В активных ядрах галактик таким источником является аккреционный диск, который подсвечивает черную дыру или кротовую нору. В литературе исследуется два вида аккреционных дисков: геометрически тонкие, но оптически толстые [7] и геометрически толстые, но оптически тонкие диски [8]. Считается, что вокруг источников SGR A* и M87* расположены геометрически толстые диски. Различают два вида геометрически толстых дисков. Первый тип со стандартной и нормальной эволюцией (SANE) и второй тип с захваченным магнитным полем (MAD) [9]. Изучение таких дисков имеет важное значение как в теоретическом плане, так и в наблюдательном. В данной работе изучается распределение материи в толстых дисках вокруг черных дыр и кротовых нор.

Для этого рассматривается метрика Лами, которая максимально близко приближена к метрике черной дыры Керра. Отличие метрики Лами от метрики Керра заключается в том, что параметр метрики масса не является постоянной величиной, а есть функция радиальной координаты [10]. Простейший способ это сделать — добавить магнитный заряд в центр черной дыры [11]. В зависимости от величины этого магнитного заряда данная метрика может быть как метрикой черной дыры, так и метрикой кротовой норы [10]. В предельном случае, когда магнитный заряд стремится к нулю, метрика Лами переходит в метрику вращающейся черной дыры Керра. В разделе 2 выписывается метрика Лами и изучаются основные свойства данной метрики. В разделе 3 выведено новое точное аналитическое решение рас-

пределения материи в толстом диске в метрике Лами. В разделе 4 обобщается полученное решение на случай наличия тороидального магнитного поля. В разделе 5 численно построены образы метрики Лами для тонкого диска в зависимости от параметров метрики и угла наклона между лучом зрения наблюдателя и осью вращения черной дыры или кротовой норы.

В статье принята система единиц, в которой гравитационная постоянная и скорость света равны единице, $G = c = 1$.

2. ПРОСТРАНСТВО–ВРЕМЯ КРОВОЙ НОРЫ

Рассмотрим метрику Лами, которая впервые была рассмотрена в работе [10]. В этой работе авторы обобщили сферически-симметричное решение, полученное в работе [12] в случае вращения. Данная метрика имеет вид

$$ds^2 = -e^{2\nu} dt^2 + e^{2\psi} (d\phi - \omega dt)^2 + e^{2\lambda} dr^2 + e^{2\mu} d\theta^2, \quad (1)$$

где введены стандартные обозначения:

$$e^{2\mu} = \Sigma, \quad e^{2\lambda} = \frac{\Sigma}{\Delta}, \quad \omega = \frac{2arM(r)}{(r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta},$$

$$e^{2\psi} = \frac{(r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma} \sin^2 \theta,$$

$$e^{2\nu} = \frac{\Delta \Sigma}{(r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta},$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta = r^2 - 2rM(r) + a^2.$$

Эта метрика отличается от метрики вращающейся черной дыры Керра тем, что параметр массы M не является постоянной величиной, а есть функция радиальной координаты вида [10]:

$$M(r) = m \frac{|r|^3}{|r|^3 + 2mb^2}. \quad (2)$$

В этом случае, параметр m является постоянной величиной и мы будем называть его параметром массы, а параметр b , как было показано в работе [11], является магнитным зарядом. В данной работе параметр b является макропараметром и может принимать значения в диапазоне $0 \leq b \leq m$. В случае, когда магнитный заряд равен нулю, $b = 0$, данная метрика совпадает с метрикой вращающейся черной дыры Керра. Без потери общности будем считать, что параметр массы равен единице, $m = 1$. В этом случае магнитный заряд принимает значения от нуля до единицы, $0 \leq b \leq 1$. Как было показано в работе [10], данное многообразие является геодезически полным и не сингулярным во всем пространстве-времени $-\infty < r < \infty$.

Это означает, что два асимптотически плоских пространства-времени соединены между собой в точке $r = 0$. Из выражения (2) можно видеть, что величина $M(r) \geq 0$ всегда больше или равна нулю для любого радиуса, $-\infty < r < \infty$. В Приложении А приведены метрические коэффициенты и символы Кристоффеля для метрики (1) с функцией (2).

Данная метрика обладает координатными особенностями, которые соответствуют горизонтам событий в случае метрики Керра. Эти условия определяются выражением $\Delta = r^2 - 2rM(r) + a^2 = 0$. Для случая, когда магнитный заряд равен нулю, $b = 0$, данное уравнение имеет два корня, которые соответствуют горизонтам событий в метрике Керра $r = 1 \pm \sqrt{1 - a^2}$. В случае, когда параметр вращения в метрике Лами равен нулю, $a = 0$, данное уравнение имеет один корень $r_1 = 0$ для случая, когда магнитный заряд $b > 4\sqrt{3}/9$, два корня $r_1 = 0$ и $r_2 = 4/3$ для случая, когда магнитный заряд равен $b = 4\sqrt{3}/9$, и три корня $r_1 = 0$, $r_2 = 4/3 \cos(\phi - 2\pi/3) + 2/3$ и $r_3 = 4/3 \cos(\phi) + 2/3$, где $\phi = 1/3 \arccos(1 - 27b^2/8)$, для случая, когда магнитный заряд принимает значения в интервале $0 < b < 4\sqrt{3}/9$.

В общем случае, когда оба параметра a и b не равны нулю, уравнение $\Delta = 0$ решается численно. В статье [10], рис. 4 показаны случаи, когда данное уравнение имеет один, два и три корня. Данные корни уравнения $\Delta = 0$ будем называть горизонтами событий по аналогии с корнями уравнения в метрике Керра. Если метрика Лами обладает двумя или одним (экстремальный случай) горизонтом событий, то данная метрика соответствует метрике черной дыры, в противном случае – кротовой норе.

3. ТОЛСТЫЕ ДИСКИ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР И КРОВОЙ НОР

Нас будет интересовать распределение вещества вокруг метрики Лами. Вещество будем описывать тензором энергии-импульса идеальной жидкости, который имеет вид

$$T^{\alpha\beta} = (P + \rho)u^\alpha u^\beta + Pg^{\alpha\beta}, \quad (3)$$

где P – давление, ρ – плотность энергии, а u^α – четыре-скорость. Будем рассматривать идеализированную модель в предположении, что радиальный и полярный компоненты скорости равны нулю $u^r = u^\theta = 0$. Также предполагается, что течение осесимметричное $\partial/\partial\phi$ и стационарное $\partial/\partial t$. В этом случае ненулевые компоненты четыре-скорости u^t , u^ϕ являются функциями двух перемен-

ных r и θ . Тогда уравнения непрерывности и адиабатичности будут выполняться автоматически,

$$(nu^\alpha)_{;\alpha} = 0, \quad (4)$$

$$u^\alpha s_{;\alpha} = 0, \quad (5)$$

где n — плотность и s — удельная энтропия вещества. Остается только система из двух уравнений: нормировки скорости и дивергенции тензора энергии-импульса,

$$g_{\alpha\beta}u^\alpha u^\beta = -1, \quad (6)$$

$$T^{\alpha\beta}_{;\beta} = 0. \quad (7)$$

Легко видеть, что временной t и азимутальный ϕ компоненты в уравнении дивергенции тензора энергии-импульса удовлетворяются тождественно. Тогда оставшиеся уравнения можно переписать в развернутом виде:

$$g_{tt}u^{t2} + 2g_{t\phi}u^t u^\phi + g_{\phi\phi}u^{\phi2} = -1, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial a} (P\sqrt{-g}) = \frac{1}{2} g_{\gamma\delta,a} T^{\gamma\delta}, \quad (9)$$

где обозначение a принимает два значения, либо $a = r$, либо $a = \theta$. После несложных преобразований из двух приведенных выше уравнений можно получить одно выражение вида:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p + \rho} \frac{\partial P}{\partial a} &= \frac{1}{2} g_{tt,a} u^{t2} + g_{t\phi,a} u^t u^\phi \\ &+ \frac{1}{2} g_{\phi\phi,a} u^{\phi2} = -v_{,a} + u_t u_\phi \omega_a e^{-2v} \\ &+ u_\phi^2 (\omega \omega_a e^{-2v} + (\psi_{,a} - v_{,a}) e^{-2\psi}). \end{aligned} \quad (10)$$

Нетрудно видеть, что данное выражение совпадает с уравнением (2.10) из статьи [13]. Это основное наше уравнение, которое мы будем решать ниже аналитически при разных предположениях. В работе [13] авторы предположили, что величина $l = u_\phi u^t$ есть полный угловой момент толстого диска, и она является постоянной величиной. В Приложении Б приведено точное решение этого уравнения при таком условии, основанное на интегрировании уравнения (10). В работе [14] было предположено, что другая величина, $l = -u_\phi/u_t$, является полным угловым моментом толстого диска и также является постоянной величиной. В Приложении В выписано точное решение в этом предположении, основанное на интегрировании уравнения (10). В данной работе сделано другое предположение, которое позволяет найти новое точное аналитическое решение.

Предположим, что величина $l = u_\phi u^t$ остается постоянной. В этом случае уравнение (10) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{p + \rho} \frac{\partial P}{\partial a} &= -v_{,a} + l(\psi_{,a} - v_{,a}) + \\ &+ \frac{z_{,a}(1 + 2l)z \pm \sqrt{4l(l+1)z + z^2}}{2z(1-z)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где была введена величина $z = \omega^2 e^{2\chi}$.

Если ввести функцию энтальпии, которая определяется соотношением $h = \frac{P + \rho}{n}$, и использовать первое начало термодинамики $dP = ndh$ для энтропийного течения, то приведенное выше выражение (11) легко проинтегрировать в явном виде. В результате получаем:

$$\begin{aligned} \ln(h) &= -v + l(\psi - v) - \frac{1 + 2l}{4} \ln(1 - z) \pm \\ &\pm \frac{1}{4} \left[(1 + 2l) \ln \frac{4l(l+1) + \sqrt{z} + (1 + 2l)\sqrt{4l(l+1) + z}}{4l(l+1) - \sqrt{z} + (1 + 2l)\sqrt{4l(l+1) + z}} \times \right. \\ &\times \left. \frac{1 + \sqrt{z}}{1 - \sqrt{z}} - 2 \ln(\sqrt{z} + \sqrt{4l(l+1) + z}) \right] - \ln(h_{in}). \end{aligned} \quad (12)$$

Данное аналитическое решение является точным и описывает толстый диск в метрике Лами. В предельном случае, когда магнитный заряд равен нулю, $b = 0$, данное решение будет описывать толстый диск вокруг черной дыры Керра. Постоянная интегрирования $\ln(h_{in})$ определяется аналогичным образом, как и в работах [13, 14] (см. также Приложения Б и В), на внутренней границе диска $r = r_{in}$, в плоскости, перпендикулярной оси вращения $\theta = \pi/2$, предполагая, что $\ln(h) = 0$ при $r = r_{in}$. Величину l можно найти из условия максимальности плотности (энтальпии) $dh/dr|_{r=r_{max}, \theta=\pi/2} = 0$ в экваториальной плоскости диска. В данном случае эта величина определяется из квадратного уравнения

$$\begin{aligned} &l^2 (\chi'^2 - \omega'^2 e^{2\chi}) - \\ &- l (2\chi' v' + (\psi' + v') \omega \omega' e^{2\chi} + \omega'^2 e^{2\chi}) + \\ &+ v' (v' - \omega'^2 e^{2\chi} \psi' - \omega \omega' e^{2\chi}) = 0 \end{aligned}$$

в точке $r = r_{max}$ и $\theta = \pi/2$. В приведенном выше выражении штрих означает дифференцирование по радиальной координате. Таким образом, задавая значения r_{in} и r_{max} , мы определяем неизвестные постоянные h_{in} и l и получаем общее аналитическое решение. На рис. 1 показаны контуры границ величины энтальпии $\ln h = -0.0005; 0.0; 0.0005$ для метрики Лами с параметрами $a = 1$,

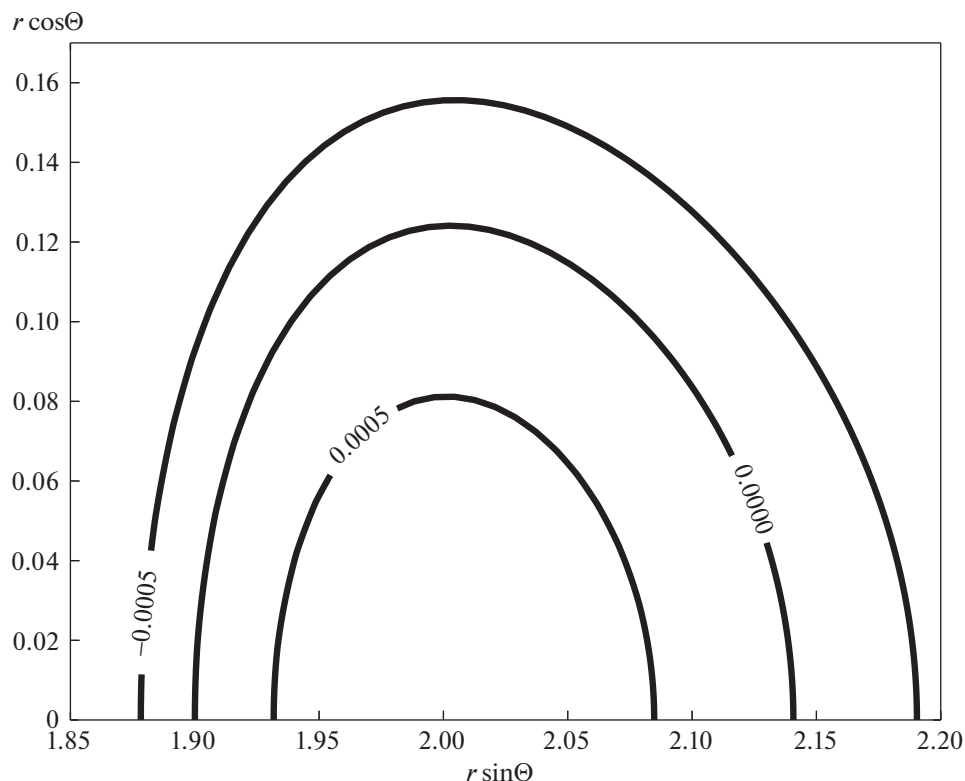


Рис. 1. Контуры энthalпии $\ln(h) = -0.0005, 0.0$ и 0.0005 аналитического решения (13) для метрики Лами с параметрами $a = 1, b = 0.5, r_{in} = 1.9$ и $r_{max} = 2$.

$b = 0.5$. Данные параметры соответствуют случаю, когда метрика Лами не имеет горизонтов и является кротовой норой. Параметры диска задавались следующим образом: $r_{in} = 1.9, r_{max} = 2$. Данное решение описывает торообразное распределение материи в виде толстого диска вокруг кротовой норы в метрике Лами.

4. ТОЛСТЫЕ ДИСКИ С ТОРОИДАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР И КРотовых НОР

Следуя работе [15], можно обобщить приведенное выше решение на случай наличия тороидального магнитного поля в толстом диске. Для этого рассмотрим тензор энергии-импульса, который состоит из двух частей: тензора энергии-импульса идеальной жидкости и тензора энергии-импульса электромагнитного поля,

$$T^{\alpha\beta} = (P + \rho)u^\alpha u^\beta + Pg^{\alpha\beta} + F_\delta^\alpha F^{\beta\delta} - \frac{1}{4}g^{\alpha\beta}F_{\gamma\delta}F^{\gamma\delta},$$

где $F^{\alpha\beta}$ — тензор электромагнитного поля. Будем предполагать, что жидкость является идеальным

проводником. Это означает, что выполняются условия

$$F^{\mu\nu}u_\nu = 0. \quad (13)$$

Удобно ввести величину b^μ , которая является четырех-вектором магнитного поля и определяется следующим образом:

$$b^\mu = \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\kappa\lambda}u_\nu F_{\kappa\lambda}. \quad (14)$$

Тогда тензор энергии-импульса можно переписать в виде [15]

$$T^{\alpha\beta} = (P + \rho + b^2)u^\alpha u^\beta + \left(P + \frac{1}{2}b^2\right)g^{\alpha\beta} - b^\alpha b^\beta.$$

Величина b^2 является сверткой четырех-вектора магнитного поля, $b^2 = b_\mu b^\mu$. Условие идеальной проводимости (13) переписывается в виде

$$b_\mu u^\mu = 0.$$

Как и в гидродинамическом случае, предположим, что радиальный и полярный компоненты четырех-скорости равны нулю, $u^r = u^\theta = 0$. Тогда из уравнения (14) легко получить, что радиальный и полярный компоненты четырех-векто-

ра магнитного поля b^α также равны нулю, $b^r = b^\theta = 0$. Тогда из системы уравнений,

$$\begin{aligned} g_{\alpha\beta} u^\alpha u^\beta &= -1, \quad T_{;\beta}^{\alpha\beta} = 0, \quad (nu^\alpha)_{;\alpha} = 0, \\ u^\alpha s_{;\alpha} &= 0, \quad F_{\mu\nu,\lambda} + F_{\nu\lambda,\mu} + F_{\lambda\mu,\nu} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

допуская осесимметричные и стационарные условия $\partial/\partial\phi = 0$, остается только первое уравнение и r и θ компоненты второго уравнения. Остальные уравнения выполняются тождественно. Перепишем второе уравнение в развернутом виде

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial a} \left(\sqrt{-g} \left(P + \frac{1}{2} b^2 \right) \right) = \frac{1}{2} g_{\gamma\delta,a} T^{\gamma\delta},$$

где, как и раньше, параметр a принимает два значения $a = r, \theta$. В развернутом виде, после несложных преобразований, данное уравнение запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{P + \rho + b^2} \frac{\partial}{\partial a} \left(P + \frac{1}{2} b^2 \right) &= \\ &= \left(\omega \omega_{,a} e^{2\psi} + \omega^2 \psi_{,a} e^{2\psi} - v_{,a} e^{2v} \right) \left[u^t u^t - \frac{b^t b^t}{P + \rho + b^2} \right] + \\ &+ \psi_{,a} e^{2\psi} \left[u^\phi u^\phi - \frac{b^\phi b^\phi}{P + \rho + b^2} \right] - \\ &- (\omega_{,a} + 2\omega \psi_{,a}) e^{2\psi} \left[u^t u^\phi - \frac{b^t b^\phi}{P + \rho + b^2} \right]. \end{aligned}$$

Используя первое уравнение из системы (15) и выражая временной компонент четыре-скорости, в результате получаем

$$\begin{aligned} \frac{1}{P + \rho + b^2} \frac{\partial}{\partial a} \left(P + \frac{1}{2} b^2 \right) &= -v_{,a} + \omega_{,a} e^{-2v} u_t u_\phi + \\ &+ \left(\omega \omega_{,a} e^{-2v} + (\psi_{,a} - v_{,a}) e^{-2\psi} \right) u_\phi^2 - \\ &- b^2 \frac{\psi_{,a} + \omega_{,a} e^{-2v} u_t u_\phi + \left(\omega_{,a} \omega e^{-2v} + (\psi_{,a} - v_{,a}) e^{-2\psi} \right) u_\phi^2}{P + \rho + b^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Это есть окончательно уравнение, которое мы будем решать аналитически для каждого рассмотренного случая отдельно. Так же, как и в работе [15], введем параметр β , который определяется отношением полной энергии к энергии магнитного поля и задается следующим образом:

$$\beta = \frac{P + \rho}{b^2}. \quad (17)$$

Также нам понадобится уравнение состояния идеальной жидкости. Для простоты будем рассматривать баротропное уравнение состояния вида:

$$P = k\rho^\gamma, \quad (18)$$

где $\gamma = \text{const}$ — постоянная величина. Далее везде будем предполагать, что параметр β является постоянной величиной. Предельный случай $\beta \rightarrow \infty$ соответствует чисто гидродинамической модели, обратный случай $\beta \rightarrow 0$ — электромагнитной модели.

С помощью параметра β уравнение (16) перепишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{p + \rho} \frac{\partial p}{\partial a} + \frac{1}{2b^2\beta} \frac{\partial b^2}{\partial a} &= -\frac{1}{\beta} (\psi_{,a} + v_{,a}) - v_{,a} + \\ &+ \omega_{,a} e^{-2v} u_t u_\phi + \left(\omega \omega_{,a} e^{-2v} + (\psi_{,a} - v_{,a}) e^{-2\psi} \right) u_\phi^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Как и в разделе 3, предполагая, что $l = u_\phi u^\phi = \text{const}$ и, используя уравнение состояния (18), приведенное выше уравнение легко интегрируется явно. Решение данного уравнения запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln(1 + k\rho^{\gamma-1}) + \frac{1}{2\beta} \ln(b^2) &= \\ &= -\frac{1}{\beta} (\psi + v) + \ln(h_{hyd}), \end{aligned} \quad (20)$$

где $\ln(h_{hyd})$ обозначает правую часть выражения (12). Как и должно быть, в предельном случае, когда $\beta \rightarrow \infty$, данное решение переходит в гидродинамическое решение (12). Постоянная интегрирования определяется из условия того, что левая часть выражения (20) равна нулю на внутреннем радиусе диска $r = r_{in}$ в экваториальной плоскости $\theta = \pi/2$. Постоянная величина l определяется из условия экстремума левой части выражения (20). Задав внутренний и экстремальный радиус, мы полностью определяем решение задачи.

На рис. 2 показан пример торообразного распределения материи в толстом диске для контура, когда левая часть выражения (20) равна нулю для разных случаев параметра β . Параметры метрики и толстого диска соответствуют параметрам на рис. 1. Сплошная кривая соответствует параметру $\beta = 1000$ и с хорошей точностью соответствует кривой $\ln(h) = 0$ на рис. 1. Штриховая кривая соответствует случаю $\beta = 10$, пунктирная кривая — $\beta = 1$. Из рис. 2 видно, что с увеличением влияния тороидального магнитного поля торообразное распределение материи уширяется в вертикальном направлении.

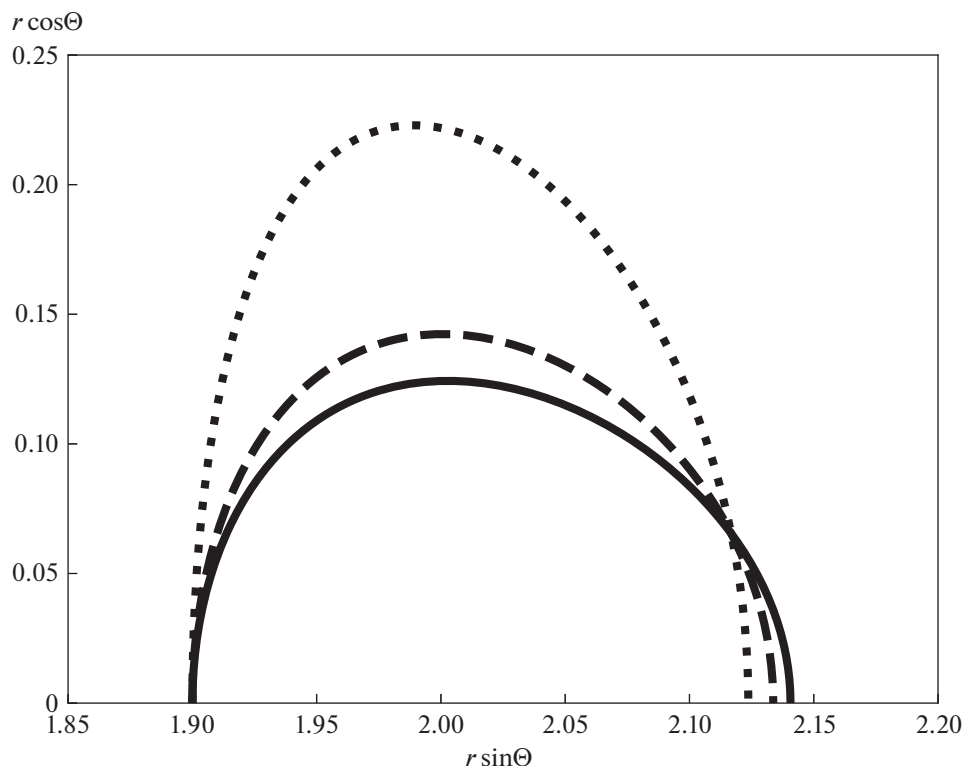


Рис. 2. Торообразное распределение материи в толстом диске для контура, когда левая часть выражения (20) равна нулю, для разных случаев параметра β , равного 1000 (сплошная кривая), 10 (штриховая кривая) и 1 (пунктирная кривая). Параметры метрики и толстого диска те же, что на рис. 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $r_{in} = 1.9$ и $r_{max} = 2$.

5. ОБРАЗЫ ЧЕРНЫХ ДЫР И КРОВОТЫХ НОР

В данном разделе будут представлены результаты моделирования образов черных дыр и кротовых нор для геометрически тонкого диска. Предполагается, что тонкий диск расположен в экваториальной плоскости черной дыры или кротовой норы и излучает изотропно во все стороны. Пространство-время описывается метрикой Лами (1) с параметром вращения $a = 0.9$. Магнитный заряд задавался в диапазоне $0 \leq b \leq 2$. Внутренний радиус диска выбирается равным $r_{in} = 8$ (такой радиус выбирался из условий, чтобы образ диска не пересекался с образом колец, и кольца отчетливо изображались в образах), а наблюдатель расположен на расстоянии $r_o = 50$ под углами $i = 17^\circ, 45^\circ$ и 80° к оси вращения черной дыры или кротовой норы. Для построения образов использовался метод обратной трассировки лучей. Уравнения геодезических решались численно методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности. На рис. 3 показаны примеры образов черной дыры и кротовой норы для углов наклона $i = 17^\circ, 45^\circ$ и 80° (слева направо) и величины магнитного заряда, равного $b = 0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 2.0$ (сверху вниз). Случай $b = 0$ соответствует чер-

ной дыре Керра, остальные случаи — кротовой норе. Образы показаны в масштабе от -10 до $+10$ в единицах GM/c^2 и с разрешением 2500×2500 пикселей. Цветом показан азимутальный угол (ϕ) прихода луча из диска к наблюдателю, нормированный на 2π . Другими словами, один и тот же цвет соответствует одному и тому же азимутальному углу в диске.

Из рис. 3 видно, что образы тонкого диска для метрики Лами имеют более богатую и сложную структуру, чем для метрики Керра. Это связано с тем, что радиальный потенциал для нулевых геодезических в метрике Лами является полиномом седьмой степени, а не четвертой, как для метрики Керра [10]. Следовательно, радиальный потенциал для некоторых траекторий фотонов может иметь более одной экстремальной точки [10], а следовательно, и несколько круговых орбит. Это приводит к тому, что часть колец будет иметь не кольцевую форму, а серповидную. Серповидная форма образуется из слияния кольцевых колец в зависимости от параметров модели. Так, например, в третьем, четвертом и пятом ряду рис. 3 видно, как происходит слияние колец и образование серповидного кольца с увеличением угла наклона

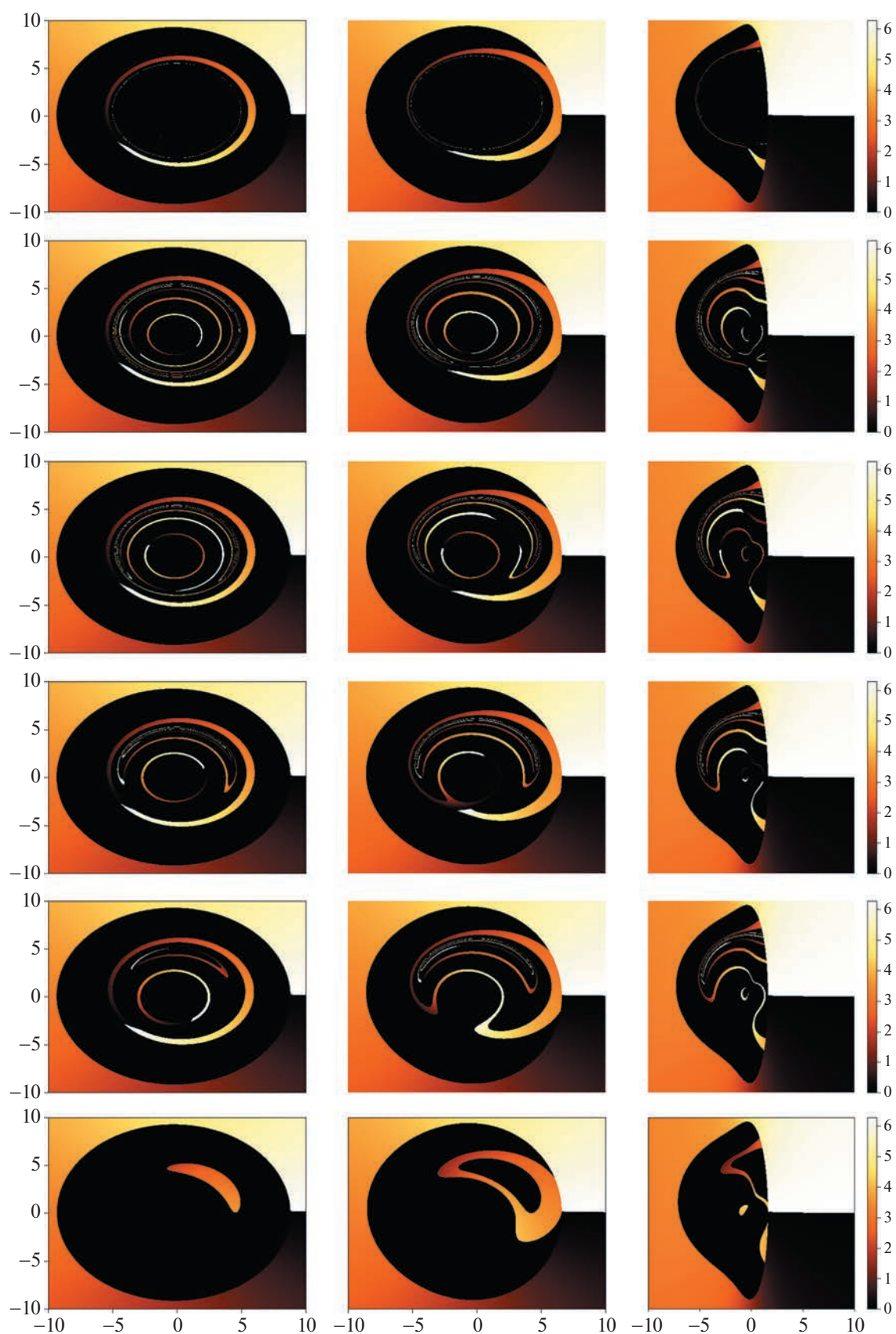


Рис. 3. Образы черных дыр и кротовых нор в зависимости от наклона луча зрения наблюдателя i к оси вращения черной дыры или кротовой норы, $i = 17^\circ, 45^\circ, 80^\circ$ (слева направо) и магнитного заряда b , $b = 0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 2$ (сверху вниз). Масштаб от $-10 GM/c^2$ до $10 GM/c^2$.

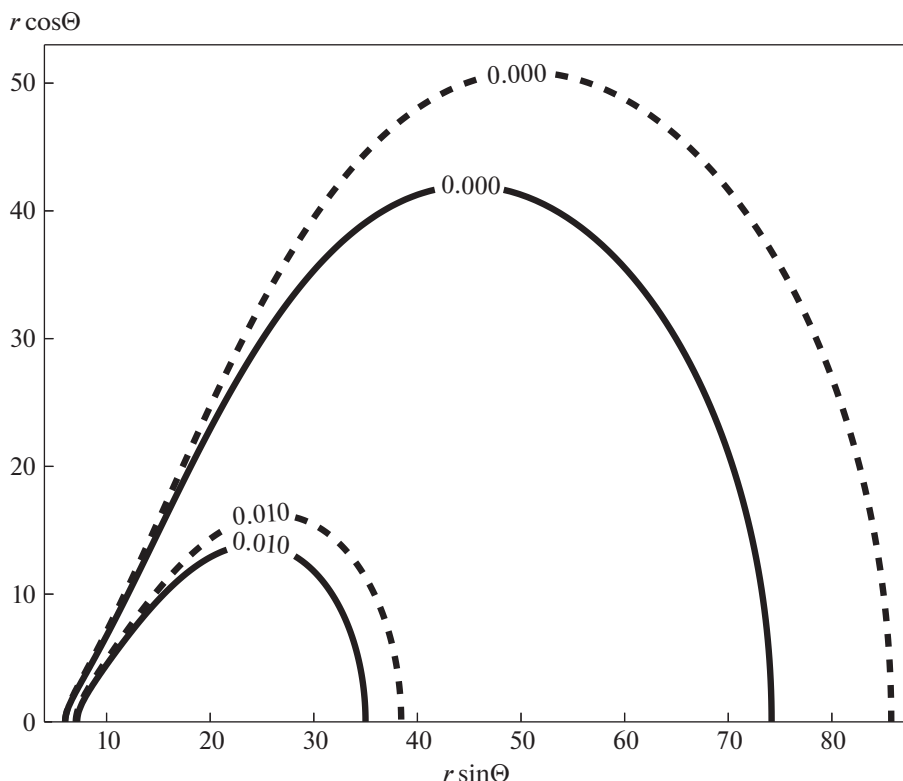


Рис. 4. Контуры энthalпии для случая $\ln h = 0$ и 0.01 для метрик Керра и Лами. Сплошная кривая соответствует метрике Керра с параметром $a = 1$, штриховая — метрике Лами с параметрами $a = 1$ и $b = 0.9$. Внутренний радиус задан равным $r_{\text{in}} = 6$, а радиус максимальной плотности $r_{\text{max}} = 12.9$.

луча зрения наблюдателя к оси вращения кротовой норы.

В зависимости от величины магнитного заряда, данные образы имеют следующие характеристики. При величине магнитного заряда меньше, чем $b \sim 0.5$, образ содержит центральное темное пятно, которое при увеличении величины магнитного заряда и угла наклона может разрываться и увеличиваться до исчезновения кольцевой структуры. При больших углах наклона в центре появляется светлое кольцо, которое с увеличением величины магнитного заряда стягивается в пятно.

Также в метрике Лами наблюдается система ярких узких и широких колец, которые образуются за счет сильно линзированных фотонов. Такие фотоны выполняют множество оборотов вокруг черной дыры или кротовой норы, прежде чем достигнут наблюдателя. Данные кольца можно разделить на фотонные кольца и субкольца, которые определяются числом n полупериодов между точками остановки в угловом потенциале. Число и расположение колец определяются параметрами метрики (массой, спином, магнитным зарядом) и углом наклона луча зрения наблюдателя к оси вращения. С увеличением величины магнитного

заряда число субколец увеличивается. Это связано с тем, что радиальный потенциал покрывает полностью все многообразие, на котором имеется более одной точки экстремума и, следовательно, более сложное разнообразие в структуре фотонных колец.

В Приложении Е показан пример исследования зависимости образов от расстояния до наблюдателя. Качественно из этих исследований следует, что образы, полученные для наблюдателя, расположенного на расстоянии $r_o \geq 50$, дают достаточно точную картину образов, необходимую для их построения.

Стоит отметить, что фотонные кольца можно будет наблюдать с помощью космической РСДБ сети в миссии Миллиметрон [3, 16], а по количеству фотонных колец, ширине, структуре, диаметру, эллиптичности и асимметрии яркости [17] можно будет отличить черную дыру от кротовой норы. Здесь возникают трудности, связанные с выделением полезного сигнала из зашумленного, вызванного сложной топологией фотонных колец [17].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена модель толстых и тонких дисков в метрике Лами. Данная метрика выбиралась по следующим причинам. Она описывает модель как кротовой норы, так и черной дыры. В предельном случае, при малых параметрах магнитного заряда, метрика Лами совпадает с метрикой вращающейся черной дыры Керра. На малых масштабах данная метрика может существенно отличаться от метрики Керра, а на больших масштабах совпадать с ней. Следовательно, изучение фотонных колец и их наблюдательных проявлений может выявить отличия от метрики черной дыры. Данные исследования помогут лучше понять высоколинзирующие характеристики образов в сильном гравитационном поле и являются альтернативой при сравнении с наблюдательными данными командой телескопа Горизонта Событий.

Были получены точные аналитические выражения торообразного распределения материи вокруг черных дыр и кротовых нор, которые могут быть использованы при построении численных моделей эволюции толстых дисков вокруг кротовых нор. Данные решения являются новыми или обобщают ранее полученные результаты на случай метрики Лами с тороидальным магнитным полем. Для случая тонкого диска были построены образы черных дыр и кротовых нор в зависимости от параметров модели. Из-за сильного отличия метрики Лами от метрики Керра на масштабах порядка $r \sim M \sim b$, система фотонных колец имеет заметные отличия. Данные отличия возможно удастся непосредственно наблюдать с помощью РСДБ методов в миллиметровом диапазоне на базах больше диаметра Земли [3].

Приложение А

Метрические коэффициенты метрики Лами равны:

$$\begin{aligned} g_{tt} &= \omega^2 e^{2\psi} - e^{2\nu} = -\left(1 - \frac{2M(r)r}{\Sigma}\right), & g_{rr} &= e^{2\lambda} = \frac{\Sigma}{\Delta}, \\ g_{\theta\theta} &= e^{2\mu} = \Sigma, \\ g_{\phi\phi} &= e^{2\psi} = \frac{\sin^2 \theta}{\Sigma} \left((r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta \right), \\ g_{r\phi} &= -\omega e^{2\psi} = -\frac{2M(r)ra \sin^2 \theta}{\Sigma}, \\ g_{t\phi} &= -e^{2\nu} = -\frac{(r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma \Delta}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g^{rr} &= e^{-2\lambda} = \frac{\Delta}{\Sigma}, & g^{\theta\theta} &= e^{-2\mu} = \frac{1}{\Sigma}, \\ g^{\phi\phi} &= e^{-2\psi} - \omega^2 e^{-2\nu} = \frac{\Delta - a^2 \sin^2 \theta}{\Delta \Sigma \sin^2 \theta}, \\ g^{t\phi} &= -\omega e^{-2\nu} = -\frac{2M(r)ra}{\Sigma \Delta}. \end{aligned}$$

Определитель метрики равен

$$g = -e^{2\lambda+2\mu+2\psi+2\nu} = -\Sigma^2 \sin^2 \theta.$$

Символы Кристоффеля равны:

$$\begin{aligned} \Gamma_{tt}^t &= \Gamma_{t\phi}^t = \Gamma_{rr}^t = \Gamma_{r\theta}^t = \Gamma_{\theta\theta}^t = \Gamma_{\phi\phi}^t = \Gamma_{t\theta}^t = 0, \\ \Gamma_{tr}^r &= \Gamma_{t\theta}^r = \Gamma_{r\phi}^r = \Gamma_{\theta\phi}^r = \Gamma_{\theta r}^r = \Gamma_{r\theta}^r = \Gamma_{\theta\phi}^r = 0, \\ \Gamma_{tt}^\phi &= \Gamma_{t\phi}^\phi = \Gamma_{rr}^\phi = \Gamma_{r\theta}^\phi = \Gamma_{\theta\theta}^\phi = \Gamma_{\phi\phi}^\phi = 0, \\ \Gamma_{tr}^r &= -\frac{(p + rM'/\Sigma)B}{\Delta}, & \Gamma_{t\theta}^\theta &= \frac{2qa \cos \theta}{\Sigma \sin \theta}, \\ \Gamma_{r\phi}^t &= \frac{a \sin^2 \theta}{\Delta} (B(p + rM'/\Sigma) + 2qr), \\ \Gamma_{\theta\phi}^t &= -\frac{qa^3}{\Sigma} \sin^2 \theta \sin 2\theta, & \Gamma_{\theta\theta}^r &= -\frac{r\Delta}{\Sigma}, \\ \Gamma_{tt}^r &= -\frac{\Delta}{\Sigma} (p + rM'/\Sigma), & \Gamma_{r\theta}^\theta &= \frac{r}{\Sigma}, \\ \Gamma_{rr}^r &= \frac{r}{\Sigma} + \frac{M - r + rM'}{\Delta}, & \Gamma_{r\theta}^r &= -\frac{a^2 \sin 2\theta}{2\Sigma}, \\ \Gamma_{\theta\theta}^\theta &= -\frac{a^2 \sin 2\theta}{2\Sigma}, & \Gamma_{rr}^\theta &= \frac{a^2 \sin 2\theta}{2\Sigma \Delta}, \\ \Gamma_{\phi\phi}^r &= -\frac{\Delta \sin^2 \theta}{\Sigma} (r + (p + rM'/\Sigma)a^2 \sin^2 \theta), \\ \Gamma_{t\theta}^t &= \frac{qa^2 \sin 2\theta}{\Sigma}, \\ \Gamma_{tt}^\theta &= \frac{qa^2 \sin 2\theta}{\Sigma^2}, & \Gamma_{t\phi}^r &= \frac{a\Delta \sin^2 \theta}{\Sigma} (p + rM'/\Sigma), \\ \Gamma_{t\phi}^\theta &= -\frac{qaB \sin 2\theta}{\Sigma^2}, & \Gamma_{tr}^\phi &= -\frac{a}{\Delta} (p + rM'/\Sigma), \\ \Gamma_{\phi\phi}^\theta &= -\frac{\sin 2\theta}{2\Sigma} \left[B - 2a^2 q \sin^2 \theta \left(2 + \frac{a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma} \right) \right], \\ \Gamma_{r\phi}^\phi &= \frac{r}{\Delta} (1 + 2q) + \frac{a^2 \sin^2 \theta}{\Delta} (p + rM'/\Sigma), \\ \Gamma_{\theta\phi}^\phi &= \frac{\cos \theta}{\Delta \sin \theta} \left[(1 + 2q) (B - 2qa^2 \sin^2 \theta) - \frac{2qa^2 B \sin^2 \theta}{\Sigma} \right], \end{aligned}$$

где введены обозначения $B = r^2 + a^2$, $q = -\frac{rM(r)}{\Sigma}$, $p = M(r) \frac{\Sigma - 2r^2}{\Sigma^2}$. Обозначение M' означает про-

изводную параметра M по радиусу r , которая равна $M' = \frac{6m^2 b^2 r |r|}{(2mb^2 + |r|^3)^2}$.

Приложение Б

В данном разделе приведено решение, полученное в работе [13] на случай метрики Лами. Согласно выводам [13] угловой момент определяется выражением вида, $l = u_\phi u^t$. Используя это выражение, уравнение (10) можно переписать в виде

$$\frac{1}{p + \rho} \frac{\partial P}{\partial a} = -v_{,a} - l\omega_{,a} + \frac{-1 + \sqrt{1 + 4l^2 e^{-2\chi}}}{2} \chi_{,a}, \quad (21)$$

где было введено обозначение $\chi = \psi - v$ [13]. Приведенное выше выражение (21) интегрируется явно. В итоге получаем

$$\ln(h) = -v - l\omega + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \sqrt{1 + 4l^2 e^{-2\chi}} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4l^2 e^{-2\chi}} - \ln(h_{in}).$$

Данное решение можно переписать в более развернутом виде, подставив метрические коэффициенты

$$\ln(h) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4l^2 \Sigma^2 \Delta}{A^2 \sin^2 \theta}}}{\frac{\Sigma \Delta}{A}} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4l^2 \Sigma^2 \Delta}{A^2 \sin^2 \theta}} - \frac{2arM(r)l}{A} - \ln(h_{in}). \quad (22)$$

Это выражение совпадает с выражением (3.6) работы [13] в случае, когда магнитный заряд равен нулю $b = 0$. Величина $\ln(h_{in})$ является постоянной интегрирования и определяется из начальных условий. В работе [13] начальные условия задавались следующим образом. На внутреннем радиусе диска в плоскости, перпендикулярной оси вращения черной дыры (в данном случае черной дыры или кротовой норы), энтальпия равна нулю. Из этого условия следует, что

$$\ln(h_{in}) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4l^2 \Sigma_{in}^2 \Delta_{in}}{A_{in}^2}}}{\frac{\Sigma_{in} \Delta_{in}}{A_{in}}} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4l^2 \Sigma_{in}^2 \Delta_{in}}{A_{in}^2}} - \frac{2ar_{in}M(r_{in})l}{A}. \quad (23)$$

Обозначение “ in ” означает, что радиальная координата берется при внутреннем радиусе диска $r = r_{in}$, в плоскости, перпендикулярной оси вращения $\theta = \pi/2$.

Величину углового момента l можно определить из условия того, что в экваториальной плоскости в точке максимума плотности (давления) производная энтальпии по радиальной координате равна нулю. Это условие имеет вид

$$[\ln(h(r_{\max}, \pi/2))]_{,r} = 0.$$

Данное выражение в развернутом виде есть

$$-\frac{1}{2}(v' + \psi') - l\omega' \pm \frac{\sqrt{1 + 4l^2 e^{-2\chi}}}{2} \chi' = 0,$$

где штрих означает дифференцирование по радиальной координате. Из этого уравнения следует, что величина углового момента определяется формулой

$$l = \frac{\omega'(v' + \psi') + \chi' \sqrt{\omega'^2 + 4v'\psi' e^{-2\chi}}}{2(\chi'^2 e^{-2\chi} - \omega'^2)}. \quad (24)$$

Данная величина берется в точке максимума плотности диска $r = r_{\max}$ в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения черной дыры (кротовой норы) $\theta = \pi/2$. Таким образом, задавая два параметра r_{in} и $r_{\max}$, решение определяется однозначно. На рис. 4 показаны контуры границы энтальпии $\ln h = 0$; 0.01 для метрики Керра с параметром вращения $a = 1$ (сплошная кривая) и для метрики Лами с параметрами вращения $a = 1$ и $b = 0.9$ (штриховая кривая). Эти параметры были выбраны таким образом, чтобы метрика Лами соответствовала кротовой норе. Внутренний радиус задавался равным $r_{in} = 6$, а радиус максимальной плотности $r_{\max} = 12.9$. Сплошная кривая для метрики Керра совпадает с аналогичной кривой, изображенной в статье [13], рис. 2.

Из рис. 4 видно, что для выбранных параметров качественное распределение идеальной жидкости в метриках Керра и Лами не сильно отличается друг от друга. Это связано с тем, что сильное отличие будет заметно на масштабах горизонта событий $r \approx 2m$ или радиуса горловины $r \approx b$.

Приложение В

В данном разделе выпишем решение, полученное в работе [14] на случай метрики Лами. Согласно работе [14] угловой момент определяется

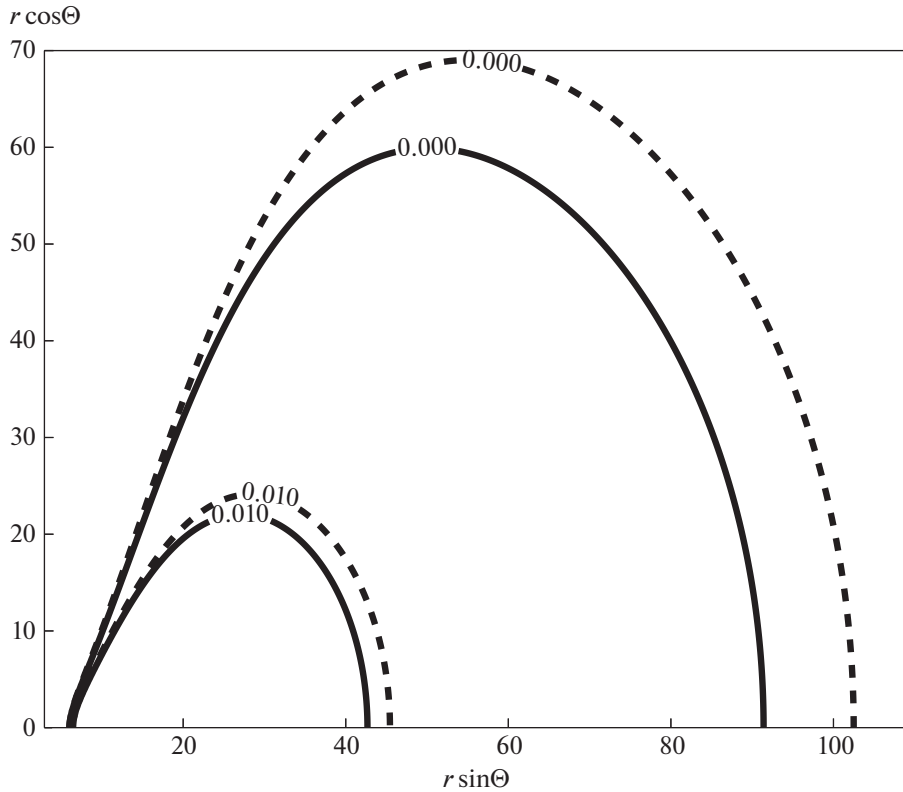


Рис. 5. Контуры энthalпии $\ln h = 0$ и 0.01 для случая толстого диска в метриках Керра и Лами. Сплошная кривая соответствует метрике Керра с параметром $a = 1$, штриховая кривая соответствует метрике Лами с параметрами $a = 1$ и $b = 0.9$. Метрика Лами с выбранными параметрами соответствует кротовой норе. Внутренний радиус задавался равным $r_{in} = 6$, а радиус максимальной плотности $r_{max} = 11$.

выражением $u_\phi = -lu_t$. Используя это выражение, уравнение (10) можно переписать в виде

$$\frac{1}{p + \rho} \frac{\partial P}{\partial a} = -v_{,a} + \frac{1}{2} \left(\ln \left((1 - \omega l)^2 - l^2 e^{2\nu - 2\psi} \right) \right)_{,a}.$$

Приведенное выше выражение легко проинтегрировать в явном виде. В итоге получаем решение вида

$$\ln(h) = -\nu + \frac{1}{2} \ln \left((1 - \omega l)^2 - l^2 e^{2\nu - 2\psi} \right) - \ln(h_{in}),$$

где, как и раньше, величина $\ln(h_{in})$ является постоянной интегрирования. Подставляя значения метрических коэффициентов, данное решение перепишем в виде

$$\ln(h) = \frac{1}{2} \ln \left(\left(1 - l \frac{2arM}{A} \right)^2 - l^2 \frac{\Delta \Sigma^2}{A^2 \sin^2 \theta} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\Delta \Sigma}{A} \right) - \ln(h_{in}). \quad (25)$$

Постоянная интегрирования $\ln(h_{in})$ может быть определена аналогичным образом, как в предыдущем случае. В результате получаем

$$\ln(h_{in}) = \frac{1}{2} \ln \left(\left(1 - l \frac{2ar_{in}M(r_{in})}{A_{in}} \right)^2 - l^2 \frac{\Delta_{in}\Sigma_{in}^2}{A_{in}^2} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\Delta_{in}\Sigma_{in}}{A_{in}} \right).$$

Аналогичным образом, из условия максимума плотности (давления) можно получить величину углового момента l . Несложные вычисления приводят к выражению вида

$$l = \frac{\omega' - 2\omega\nu' + \sqrt{\omega'^2 + 4\nu'\psi'e^{-2\chi}}}{2(\omega\omega' + \psi'e^{-2\chi} - \omega^2\nu')},$$

где величина l задается в точке максимума плотности $r = r_{max}$ в плоскости, перпендикулярной вращению черной дыры (кротовой норы) $\theta = \pi/2$.

На рис. 5 показаны контуры границ величины $\ln h = 0; 0.01$ для метрики Керра с параметром вращения $a = 1$ (сплошная кривая), и для метрики Лами с параметрами вращения $a = 1$ и $b = 0.9$ (штриховая кривая). Метрика Лами с выбранными параметрами соответствует кротовой норе.

Внутренний радиус задавался равным $r_{in} = 6$, а радиус максимальной плотности $r_{max} = 11$.

Приложение Г

В данном разделе обобщим решение, полученное в работе [13], на случай присутствия тороидального магнитного поля в метрике Лами. В данном решении угловой момент является постоянной величиной и определяется выражением вида $l = u_\phi u^t$. Используя параметр β и выражая четырехскорость через угловой момент l , уравнение (16) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\beta}{1+\beta} \frac{1}{P+\rho} \frac{\partial P}{\partial a} + \frac{1}{2(1+\beta)b^2} \frac{\partial b^2}{\partial a} = \\ & = -v_{,a} - l\omega_{,a} + 0.5\chi_{,a} \left(-1 + \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}} \right) - \\ & - \frac{\psi_{,a} - l\omega_{,a} + 0.5\chi_{,a} \left(-1 + \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}} \right)}{1+\beta}. \end{aligned} \quad (26)$$

Данное уравнение легко проинтегрировать явно аналитически. После интегрирования получаем решение в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\beta}{1+\beta} \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln(1+k\rho^{\gamma-1}) + \frac{1}{2(1+\beta)} \ln b^2 = \\ & = -v - \omega l + 0.5 \ln \left(1 + \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}} \right) - \\ & - 0.5 \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}} - \\ & - \frac{\psi - l\omega + 0.5 \ln \left(1 + \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}} \right)}{1+\beta} - \\ & - \frac{0.5 \sqrt{1+4l^2 e^{-2\chi}}}{1+\beta} - \ln h_{in}, \end{aligned} \quad (27)$$

где h_{in} — является постоянной интегрирования и определяется на внутреннем радиусе диска ($r = r_{in}$) в плоскости, перпендикулярной оси вращения черной дыры или кротовой норы ($\theta = \pi/2$), аналогичным образом, как в Приложении Б.

Угловой момент l определяется из условия экстремума правой части выражения (27) в экваториальной плоскости диска $\theta = \pi/2$. Приравняв к нулю правую часть выражения (26) и считая, что $a = r$, после несложных преобразований по-

лучаем выражение для углового момента l в точке экстремума r_{max} :

$$\begin{aligned} l = & \frac{1}{2(\chi'^2 e^{-2\chi} - \omega'^2)} \left(\omega'(\psi' + v') \frac{2+\beta}{\beta} + \right. \\ & \left. + \chi' \sqrt{(\psi' + v')^2 e^{-2\chi} \frac{(2+\beta)^2}{\beta^2} + \omega'^2 - \chi'^2 e^{-2\chi}} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

В предельном случае, когда параметр $\beta \rightarrow \infty$, данное выражение сводится к выражению (24) без тороидального магнитного поля.

На рис. 6 показаны контуры правой части выражения (27) для случая, когда левая часть выражения (27) равна нулю для тех же начальных параметров $r_{in} = 6$ и $r_{max} = 12.9$, как и на рис. (4). Сплошная кривая, которая соответствует параметру $\beta = \infty$, совпадает с штриховой кривой на рис. 4 для $\ln h = 0$.

Из рис. 6 видно, что даже при больших параметрах β отклонения от решения без тороидального поля довольно сильные. Это связано с тем, что при большом, но конечном параметре β , изменяется параметр l . А малые изменения параметра l приводят к большим изменениям правой части решения (27).

Приложение Д

В данном разделе обобщим решение, полученное в работе [14], на случай наличия тороидального магнитного поля в метрике Лами. В данном решении угловой момент определяется выражением вида $u_\phi = -lu_t$. Используя приведенное выше условие, уравнение (16) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{P+\rho+b^2} \frac{\partial}{\partial a} \left(P + \frac{1}{2} b^2 \right) = -v_{,a} + \\ & + \frac{l^2(\psi_{,a} - v_{,a})e^{2v-2\psi} - l\omega_{,a}(1-\omega l)}{(1-l\omega)^2 - l^2 e^{2v-2\psi}} - \frac{b^2}{P+\rho+b^2} \times \\ & \times \left[\psi_{,a} + \frac{l^2(\psi_{,a} - v_{,a})e^{2v-2\psi} - l\omega_{,a}(1-l\omega)}{(1-l\omega)^2 - l^2 e^{2v-2\psi}} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Данное уравнение интегрируется аналитически. В результате получаем

$$\begin{aligned} & \frac{\beta}{1+\beta} \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln(1+k\rho^{\gamma-1}) + \frac{1}{2(1+\beta)} \ln b^2 = \\ & = -v + 0.5 \left(\ln \left((1-l\omega)^2 - l^2 e^{2v-2\psi} \right) \right) - \\ & - \frac{1}{1+\beta} \left(\psi + 0.5 \left(\ln \left((1-l\omega)^2 - l^2 e^{2v-2\psi} \right) \right) \right) - \ln h_{in}, \end{aligned} \quad (30)$$

где $\ln h_{in}$ является постоянной интегрирования, которая определяется на внутреннем радиусе диска в плоскости, перпендикулярной оси вра-

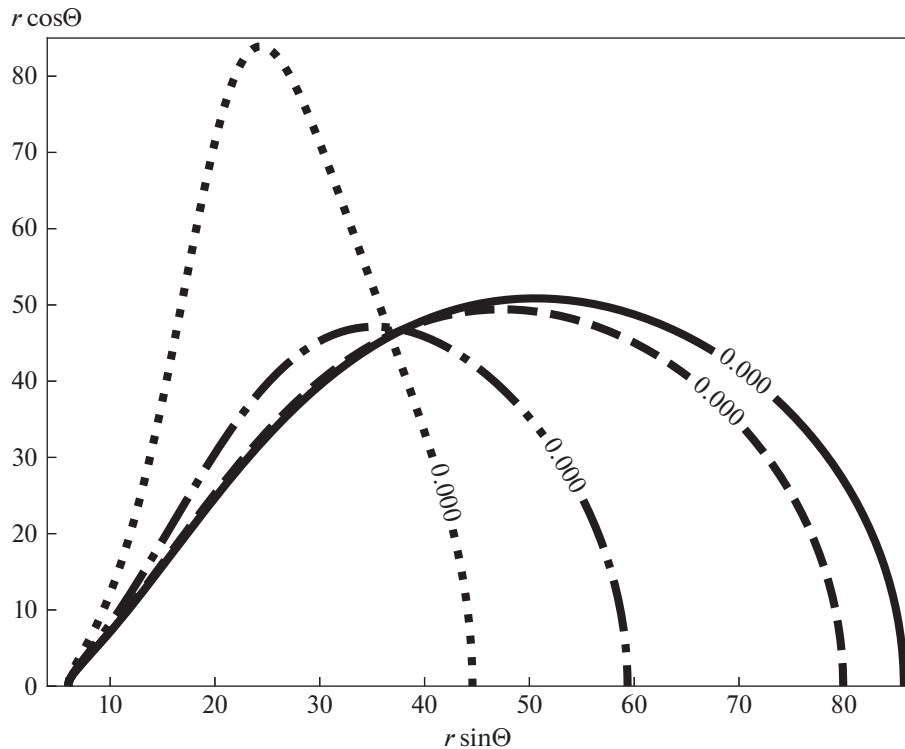


Рис. 6. Контуры правой части выражения (27) для случая, когда левая часть выражения (27) равна нулю для метрики Лами с параметрами $a = 1$, $b = 0.9$. Приведены кривые для параметра $\beta = \infty$ (сплошная линия), 1000 (штриховая), 100 (штрихпунктирная) и 20 (пунктирная).

щения черной дыры или кротовой норы ($\theta = \pi/2$) аналогичным образом, как в Приложении В.

Величина углового момента l определяется из условия экстремума правой части выражения (30) в плоскости, перпендикулярной оси вращения черной дыры или кротовой норы. Приравняв правую часть выражения (29) нулю и считая, что $a = r$, после несложных преобразований получаем квадратное уравнение относительно углового момента l в точке экстремума:

$$l^2 \left[\psi' e^{-2\chi} - v' \omega^2 + \frac{\beta \omega \omega' - \psi' \omega'^2 + v' e^{-2\chi}}{1 + \beta} \right] + l \left[2\omega v' + \frac{2\omega \psi' - \beta \omega'}{1 + \beta} \right] - v' - \frac{\psi'}{1 + \beta} = 0,$$

решение которого имеет вид

$$l = \left(-2\omega v' + \frac{\beta \omega' - 2\omega \psi'}{1 + \beta} + \sqrt{4v' \psi' e^{-2\chi} + 4e^{-2\chi} \frac{\psi'^2 + v'^2}{1 + \beta} + \frac{\beta^2 \omega'^2 + 4\psi' v' e^{-2\chi}}{(1 + \beta)^2}} \right) \times \left(2 \left(\psi' e^{-2\chi} - v' \omega^2 - \frac{\psi' \omega'^2 - v' e^{-2\chi} - \beta \omega \omega'}{1 + \beta} \right) \right)^{-1}.$$

На рис. 7 показаны контуры правой части выражения (30) для случая, когда левая часть выражения (30) равна нулю для тех же начальных параметров $r_{in} = 6$ и $r_{max} = 11$, как и на рис. 5. Сплошная кривая, которая соответствует параметру $\beta = \infty$, совпадает с штриховой кривой на рис. 5 для $\ln h = 0$. Даже при больших параметрах β отличия данного решения от решения без магнитного поля становятся существенными.

Приложение E

В данном разделе приведены сравнения образов кротовых нор в зависимости от расстояния до наблюдателя. Задавались следующие параметры модели: параметр вращения $a = 0.9$, магнитный заряд $b = 0.3$, угол наклона наблюдателя к оси вращения $i = 45^\circ$. Разрешение образов выбиралась равным 500×500 точек. Наблюдатель располагался на расстоянии $r_o = 50$ и $r_0 = 250$. Для наблюдателя, расположенного на расстоянии $r_o = 50$, образ показан во втором столбце, во втором ряду сверху на рис. 3. На рис. 8 показана разность между образами. Если не брать во внимание фотонные кольца, где из-за маленького разрешения и небольшого сдвига кольцам сложно

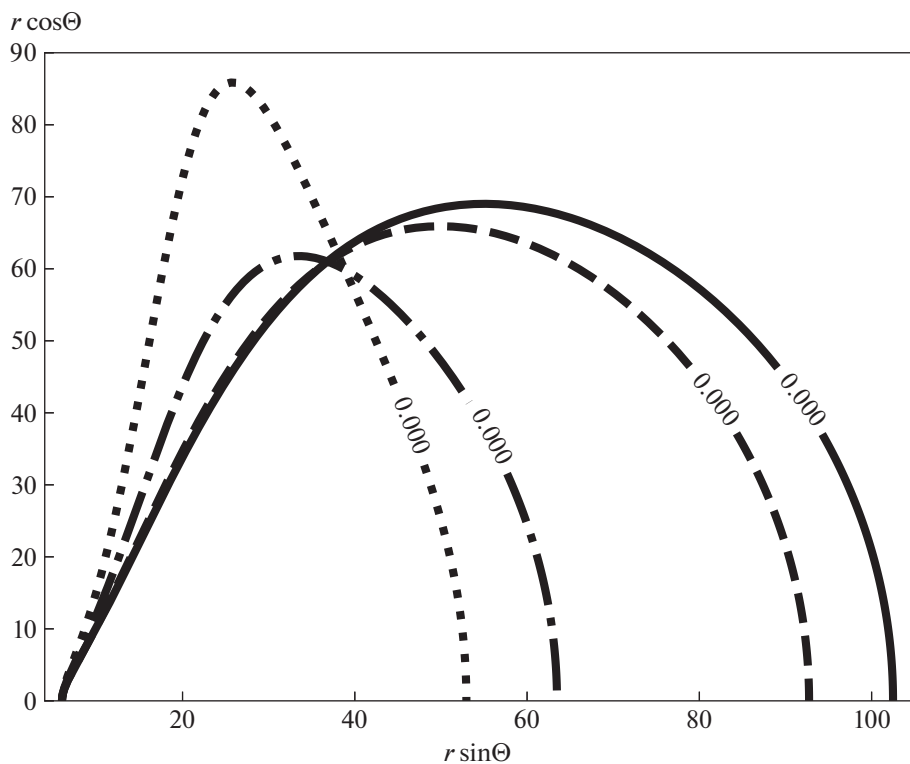


Рис. 7. Контурсы правой части выражения (30) для случая, когда левая часть выражения (30) равна нулю для метрики Лами с параметрами $a = 1$, $b = 0.9$. Приведены кривые для параметра $\beta = \infty$ (сплошная линия), 1000 (штриховая), 100 (штрихпунктирная) и 40 (пунктирная).

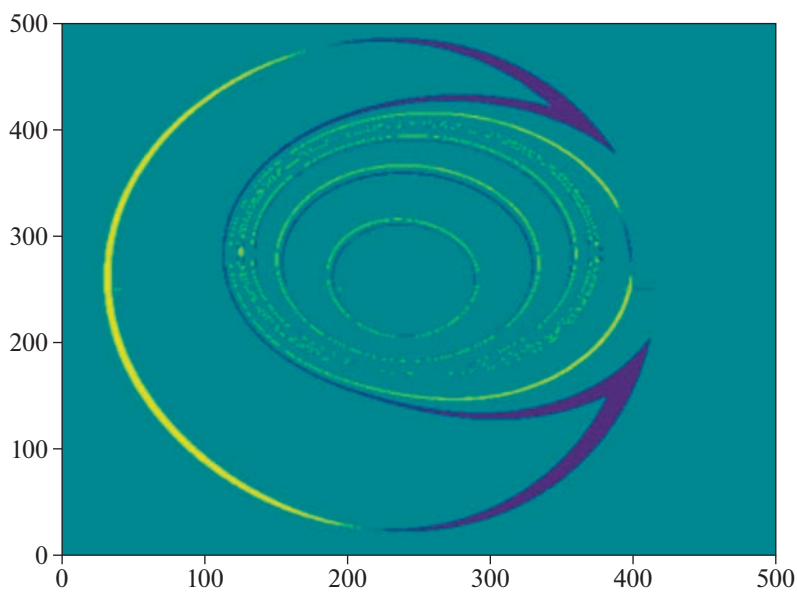


Рис. 8. Разность образов, полученных для наблюдателя, расположенного на расстояниях $r_0 = 50$ и 250. Параметры модели: $a = 0.9$, $b = 0.3$, $i = 45^\circ$.

точно соответствовать друг другу, то из образа диска видно, что присутствует небольшой сдвиг, связанный с разным положением наблюдателя. Величина сдвига и знак зависят от параметров метрики и угла наклона луча зрения наблюдателя к оси вращения. В целом качественно картина не зависит от расстояния наблюдателя до кротовой норы, но для более точных численных расчетов необходимо как можно дальше располагать наблюдателя от центрального источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Н. С. Кардашев, И. Д. Новиков, В. Н. Лукаш, С. В. Пилипенко, и др.*, Успехи физ. наук **184** (12), 1319 (2014).
2. *И. Д. Новиков, С. Ф. Лухачёв, Ю. А. Шекинов, А. С. Андрианов, и др.*, Успехи физ. наук **191** (4), 404 (2021).
3. *M. D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, G. N. Wong, et al.*, Science Advances **6**, 1310 (2020).
4. *S. F. Likhachev, A. G. Rudnitskiy, M. A. Shchurov, A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, S. V. Chernov, and V. I. Kostenko*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **511**, 668 (2022).
5. *A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, H. Falcke, I. A. Girin, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **500**, 4866 (2021).
6. *A. Andrianov, S. Chernov, I. Girin, S. Likhachev, A. Lyakhovets, and Yu. Shchekinov*, Phys. Rev. D. **105**, id. 063015 (2022).
7. *N. I. Shakura and R. A. Sunyaev*, Astron. and Astrophys. **24**, 337 (1973).
8. *R. Narayan and I. Yi*, Astrophys. J. Letters **428**, L13 (1994).
9. *П. Б. Иванов, Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш, А. М. Малиновский, С. В. Чернов, А. С. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лухачёв*, Успехи физ. наук **189** (5), 449 (2019).
10. *F. Lamy, E.ourgoulhon, T. Paumard, and F. H. Vincent*, Classical and Quantum Gravity **35** (11), id. 115009 (2018).
11. *Z.-Y. Fan and X. Wang*, Phys. Rev. D **94**, id. 124027 (2016).
12. *S. A. Hayward*, Phys. Rev. Letters **96**, id. 031103 (2006).
13. *L. G. Fishbone and V. Moncrief*, Astrophys. J. **207**, 962 (1976).
14. *M. Kozłowski, M. Jaroszynski, and M. A. Abramowicz*, Astron. and Astrophys. **63** (1–2), 209 (1978).
15. *S. S. Komissarov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **368**, 993 (2006).
16. *С. В. Чернов*, ЖЭТФ **159** (6), 1018 (2021).
17. *P. Tiede, M. D. Johnson, D. W. Pesce, D. C. M. Palumbo, D. O. Chang, and P. Galison*, arXiv:2210.13498 [astro-ph.HE] (2022).

THIN AND THICK DISKS AROUND BLACK HOLES AND WORMHOLES

S. V. Chernov^a

^a*Lebedev Physical Institute, Astro Space Center, Moscow, Russia*

The paper investigates the distribution of matter in thick disks around black holes and wormholes numerically and analytically. Metrics are considered Kerr and Lamy. Accurate analytical solutions are written out. The influence of a toroidal magnetic field on the structure of a thick disk is taken into account. Images of a thin disk are constructed depending on the values of the metric parameters.

Keywords: black holes, wormholes, disks, magnetic fields

СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ МАССЫ МЛЕЧНОГО ПУТИ

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1,*}, А. Т. Байкова¹

¹Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулковое, Россия

*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Дан обзор различных методов, применяемых для оценки массы Галактики. Включены результаты, полученные на основе анализа кривой галактического вращения, по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути, по шаровым скоплениям, по шлейфам карликовых галактик, по далеким звездам гало, по скоростям убегания, по динамике Местной группы галактик, а также в результате моделирования. Рассмотрены оценки массы Галактики M вида а) $M(<r)$, т.е. масса, заключенная внутри сферы радиусом r , б) M_{200} , где $r = 200$ кпк, и в) вириальные оценки, M_{vir} . Такие оценки отобраны нами по литературным данным, значительная часть которых получена в эпоху Gaia. По 20 индивидуальным оценкам найдено среднее значение $\bar{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. По 28 индивидуальным оценкам получено $\bar{M}_{\text{vir}} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Ключевые слова: галактика Млечный Путь, кривая вращения, масса Галактики

DOI: 10.31857/S0004629923080029, **EDN:** HIUYRU

1. ВВЕДЕНИЕ

Значение массы является важнейшим параметром при построении динамической модели Галактики. Применяются разнообразные методы для оценивания этой величины. Все они основаны на анализе кинематики звезд и шаровых скоплений, принадлежащих Галактике, окружающих ее карликовых галактиках-спутниках с их шлейфами, а также кинематики соседних галактик.

Еще совсем недавно оценки массы Галактики, полученные различными авторами, отличались в разы. Например, $M(<r = 385 \text{ кпк}) = 0.7 \times 10^{12} M_{\odot}$ [1], или $M(<r = 200 \text{ кпк}) = 3.0 \times 10^{12} M_{\odot}$ [2]. Здесь дана оценка массы Галактики $M(<r)$, которая заключена внутри сферы радиусом r . В последнее время, благодаря различным факторам, дисперсия таких оценок постепенно уменьшается.

Отметим публикации Karukes et al. [3] и Wang et al. [4], посвященные оценкам массы Галактики, послужившие нам образцом. Эти авторы сделали интересные обзоры с классификацией методов получения оценок. Мы продолжаем такую работу с добавлением ряда новых оценок.

Большое значение в этой задаче имеют точности определения расстояний до анализируемых объектов и их скоростей. Ведь основными объектами для анализа являются разнообразные звезды, например, цефеиды, красные гиганты, гиганты ветви, переменные типа RR Lyr, звезды в шаровых скоплениях, звезды в шлейфах шаровых скоплений и галактиках-спутниках Млечного Пути.

В настоящее время источниками наиболее точных массовых кинематических данных являются каталоги с измеренными тригонометрическими параллаксами и собственными движениями звезд. Это каталоги, полученные в результате космических наблюдений, такие как Gaia [5], или измерения скоростей шаровых скоплений и галактик-спутников Млечного Пути с борта космического телескопа им. Хаббла [6]. Наиболее востребованной является версия каталога Gaia DR3 (Gaia Data Release 3 [7]), содержащая массовые значения лучевых скоростей звезд. При этом в Gaia DR3 значения параллаксов и собственных движений звезд просто скопированы из версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3 [8]), где тригонометрические параллаксы около 500 млн.

звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги.

Расстояния до звезд, расположенных от центра Галактики далее ~ 20 кпк, оцениваются фотометрическим способом. Только в последнее время появились всенебесные фотометрические обзоры неба в ближнем инфракрасном диапазоне, крайне необходимые для надежного учета межзвездного поглощения, такие как WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer [9]) или GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-plane Survey Extraordinaire [10]), полученные в результате космических наблюдений.

Для этих целей важны массовые спектроскопические обзоры неба, такие как SDSS (Sloan Digital Sky Survey [11]), APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment [12, 13]), LAMOST (Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope [14]), RAVE (Radial Velocity Experiment [15]), или GALAH (GALactic Archaeology with HERMES spectroscopic survey [16]), содержащие информацию о спектрах и лучевых скоростях сотен тысяч звезд.

Целью настоящей работы являются обзор методов, которые применяются для оценки массы Галактики, обзор результатов, полученных в последнее время по самым надежным данным, и вывод среднего значения массы Млечного Пути.

2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Непосредственно из наблюдений имеем лучевую скорость V_r и компоненты собственного движения звезды $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ , с использованием которых можем получить две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74 \mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74 \mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, r — гелиоцентрическое расстояние звезды.

Через компоненты V_r , V_l , V_b вычисляются скорости U , V , W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей гелиоцентрической системы координат x, y, z . Скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V в направлении вращения Галактики, и W — на северный галактический полюс. Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость V_{circ} , направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{\text{circ}} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Расстояние от звезды до оси вращения Галактики R вычисляется на основе соотношения $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Фактически здесь задана цилиндрическая система координат $R\theta z$.

3. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ МАССЫ ГАЛАКТИКИ

3.1. По кривой вращения

Кривая вращения — это зависимость круговых скоростей вращения звезд V_{circ} вокруг оси вращения Галактики от расстояния до ее оси вращения R . На рис. 1 даны две кривые вращения Галактики, найденные по выборкам классических цефеид, имеющих высокоточные оценки расстояний, а также по большой выборке красных гигантов. Красной линией на рисунке дана кривая вращения, вычисленная нами в работе [17].

Кривая галактического вращения служит для определения параметров подходящей модели гравитационного потенциала Галактики $\Phi(R, z)$. Современные модели потенциала являются многокомпонентными, содержащими вклады от основных галактических подсистем, таких, например, как центральный балдж, диск и гало. В этом случае $\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z))$, где $\Phi_b(r(R, z))$ — вклад балджа, $\Phi_d(r(R, z))$ — вклад диска и $\Phi_h(r(R, z))$ — вклад гало темной материи. Можно указать наиболее распространенные конкретные выражения в модели потенциала, применяемые в настоящее время для описания этих подсистем.

1) Сферой Пламмера [21] моделируется галактический балдж:

$$\Phi_b(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2 + b_b^2}}; \quad (2)$$

2) сжатым сфероидом моделируется диск в форме, предложенной Миямото и Нагаи [22]:

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left[a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right]^2}}; \quad (3)$$

3) гало темной материи моделируется согласно работе [23], такой подход называется моделью Наварро—Френка—Уайта:

$$\Phi_h(r) = -\frac{GM_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right), \quad (4)$$

где M_b , M_d , M_h — массы компонентов, b_b , a_d , b_d , a_h — масштабные параметры компонентов. В на-

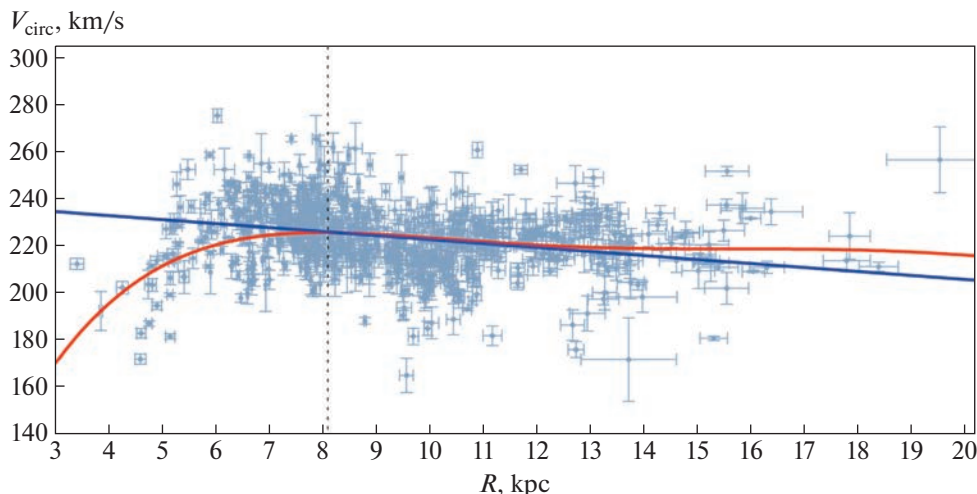


Рис. 1. Круговые скорости выборки классических цефеид V_{circ} , вычисленные нами в работе [17] с использованием расстояний из [18] и собственными движениями из Gaia EDR3. Красной линией дана найденная нами по цефеидам кривая вращения, а синей линией (линейная зависимость) дана кривая вращения из работы [19], найденная по большой выборке красных гигантов с собственными движениями из версии каталога Gaia DR2 [20], положение Солнца отмечено вертикальной штриховой линией.

ших работах [24–27] подход на основе соотношений (3)–(4) соответствует модели III.

Зная параметры потенциала $\Phi(R, z)$, можно оценить массу Галактики, содержащуюся в сфере радиусом r :

$$M(<r) = \frac{r^2}{G} \frac{d\Phi(r)}{dr}, \quad (5)$$

где G — гравитационная постоянная, массу $M(<r)$ в дальнейшем будем обозначать через M_r . Например, M_{200} обозначает массу внутри сферы радиусом 200 кпк.

В самом простом случае сферически симметричного распределения звездной плотности масса вещества в сфере радиусом r может быть оценена по формуле:

$$M(<r) = \frac{rV^2}{G}, \quad (6)$$

которая получена путем приравнивания центростремительной силы к силе притяжения.

Интересно отметить работу [28], в которой осесимметричная модель гравитационного потенциала Галактики включала четыре компонента: балдж, тонкий и толстый диски, а также гало темной материи. Для построения кривой вращения Галактики были использованы кинематические данные о примерно 54000 звезд, принадлежащих ветви красных гигантов. Данные о параллаксах и собственных движениях звезд были взяты из каталога Gaia EDR3, а спектральная информация — из обзоров APOGEE и LAMOST. Была использована фотометрия в ближнем ин-

фракрасном диапазоне из каталога 2MASS [29]. В итоге этими авторами была получена оценка $M_{\text{vir}} = (0.805 \pm 0.115) \times 10^{12} M_{\odot}$ с найденным значением вириального радиуса $r_{\text{vir}} = 192.37 \pm 9.24$ кпк.

Вириальная масса M_{vir} определяется как масса, заключенная в пределах вириального радиуса гравитационно связанной системы r_{vir} , где r_{vir} — радиус, в пределах которого система подчиняется теореме вириала. Согласно этой теореме, система находится в равновесии с внешней средой, если удвоенное значение усредненной кинетической энергии T системы равно потенциальной энергии U , т.е. $2\langle T \rangle = -\langle U \rangle$.

Иногда применяется следующий способ оценки M_{vir} [30–32]:

$$M_{\text{vir}} = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{crit}} \Omega_m \delta_{\text{th}} r_{\text{vir}}^3, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$ — критическая плотность Вселенной (с которой должна сравниваться плотность Галактики), Ω_m — вклад видимой материи в критическую плотность, δ_{th} — критическая сверхплотность при вириализации. Например, в работе [30] было принято $\Omega_m = 0.3$, $\delta_{\text{th}} = 40$, $H_0 = 65$ км/с/Мпк. Таким образом, оценка M_{vir} , каким бы способом ее не вычисляли, сильно зависит от принятой модели.

В настоящей работе рассматриваем оценки трех видов: M_r , M_{200} и M_{vir} . Для этого мы постарались сформировать по возможности полную вы-

борку современных результатов, значительная часть которых получена уже в эпоху Gaia.

В работе [33] кривая вращения Галактики построена по выборке из 3500 классических цефеид. Для всех этих цефеид были собраны фотометрические данные в инфракрасном диапазоне и получены оценки расстояния с использованием соотношения период-Весенхейт согласно калибровкам из работы [34]. Для кинематического анализа, правда, было отобрано 1078 цефеид с измеренными лучевыми скоростями. В итоге были уточнены параметры гравитационного потенциала Галактики и получена новая вириальная оценка массы Галактики, $M_{\text{vir}} = (0.822 \pm 0.052) \times 10^{12} M_{\odot}$, где значение вириального радиуса Галактики найдено равным $r_{\text{vir}} = 191.84 \pm 4.12$ кпк.

В работе [19] для построения кривой вращения Галактики было использовано $\approx 25\,000$ красных гигантов, расположенных в интервале расстояний $R \sim 5\text{--}25$ кпк. Кинематические данные были взяты из каталога Gaia DR2, спектральная информация из обзора APOGEE, а фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне — из каталога 2MASS. В работе [19] была получена оценка вириальной массы Галактики $M_{\text{vir}} = (0.725 \pm 0.025) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Bhattacharjee et al. [35] построили кривую вращения Галактики по данным, распространяющимся вплоть до $R \sim 200$ кпк. Для этого использовались кинематические характеристики разнообразных объектов. В частности, участвовали водородные облака, рассеянные звездные скопления, ОВ-звезды, цефеиды, углеродные звезды, разнообразные гиганты, шаровые скопления и карликовые галактики-спутники Млечного Пути. Это еще не полный список. В итоге была получена оценка $M_{200} = (0.68 \pm 0.41) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работах [24–27] в процесс построения кривой вращения Галактики мы добавили мазеры с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами, а для более далекого интервала использовали данные из работы [35]. Протестированы были шесть моделей галактического потенциала. Отметим, что по кривой вращения Галактики, построенной по скоростям объектов во всем интервале $R \sim 0\text{--}200$ кпк, получаем более надежную оценку массы M_{200} по сравнению с той, что получают в результате экстраполирования. На основе наиболее подходящей модели (модель III) мы получили оценку $M_{200} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Для очень далеких объектов (далее ≈ 50 кпк от центра Галактики), таких как шаровые скопления и карликовые галактики, трудно найти круговые скорости вращения V_{circ} непосредственно

по формуле (1). Для этого используют косвенные оценки скорости V_{circ} , основанные на применении уравнения Джинса, через дисперсии радиальных скоростей звезд. Один из вариантов подхода [36] выглядит так:

$$V_{\text{circ}}^2(R) = -\frac{r}{\rho} \frac{d(\rho \sigma_r^2)}{dt} - 2\beta \sigma_r^2, \quad (8)$$

где

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_r^2}. \quad (9)$$

Здесь $\sigma_r(r)$ и $\sigma_t(r)$ — дисперсии радиальных и тангенциальных скоростей соответственно, $\rho(r)$ — звездная плотность, а β — параметр анизотропии. Такой подход, например, использован в работе [30] для вычисления круговых скоростей голубых гигантов горизонтальной ветви, где была получена оценка $M_{60} = (0.40 \pm 0.07) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Huang et al. [31] кривая вращения Галактики построена по звездам, которые довольно плотно заполняют интервал расстояний вплоть до ~ 100 кпк. Для этого были использованы данные о водородных облаках HI во внутренней части Галактики, около 16 000 звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, а также около 5700 гигантов гало спектрального класса K. В итоге эти авторы получили оценку $M_{\text{vir}} = (0.90_{-0.08}^{+0.07}) \times 10^{12} M_{\odot}$ с найденным значением $r_{\text{vir}} = 255.7 \pm 7.7$ кпк. Для вычисления круговых скоростей далеких K-гигантов этим авторам также пришлось использовать подход, основанный на уравнении Джинса (8).

Отметим, что в работе [37] была построена модель потенциала Галактики только по данным о мазерах с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и получено $M_{100} = (0.82 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}$. Софу [1] построил кривую вращения Галактики, с охватом огромного диапазона расстояний, вплоть до $R \sim 1$ Мпк. Привлечены были данные о скоростях галактических шаровых скоплений и карликовых галактиках, окружающих Млечный Путь и туманность Андромеды. Оценка массы Галактики составила

$M_{365} = (0.703 \pm 0.101) \times 10^{12} M_{\odot}$, где значение середины расстояния между Млечным Путем и туманностью Андромеды было выбрано в качестве радиуса вмещающей сферы $r = 365$ кпк. Для оценки массы Галактики проводилось “честное” интегрирование плотности вещества в соответствии с подобранной моделью потенциала Галактики.

Оценки M , в частности, M_{200} , кроме всего прочего, зависят от конкретного выражения

для моделирования потенциала гало темной материи. В работе [26] рассмотрены шесть моделей гравитационного потенциала с шестью формами потенциала гало темной материи. Из анализа одних и тех же измерительных данных мы нашли, что оценки M_{200} лежат в интервале значений $[0.47-1.45] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В последнее время появились работы [38–40], в которых найдены очень маленькие значения массы Галактики на основе применения модели Эйнаста [41]. В работах [38–40] при оценивании по тем же данным оценки массы Галактики получаюся в 2–3 раза меньшими, чем на основе модели Наварро–Френка–Уайта (4). Однако кривые вращения в работах [38–40] строились по цефеидам из каталога Gaia DR3, которые распределены в достаточно узком интервале расстояний $r < 30$ кпк. Например, в работе [38] путем интерполирования кривой вращения до расстояния $r = 112$ кпк найдено $M_{112} = (0.27^{+0.31}_{-0.05}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.2. По шаровым скоплениям Млечного Пути

Шаровые скопления очень важны для анализа. Для них имеется возможность вычислить средние значения расстояний и скоростей с относительно высокой точностью. Принадлежат шаровые скопления сферической составляющей Галактики. Распределены они в огромной области Галактики, дальше встречаются только карликовые галактики-спутники Млечного Пути. Поэтому шаровые скопления часто используют для построения кривой вращения Галактики как в комбинации с другими данными, так и отдельно.

Sohn et al. [42] выполнен анализ 20 галактических шаровых скоплений. Значения их средних собственных движений были вычислены по наблюдениям космического телескопа им. Хаббла. Эти авторы нашли $M_{39.5} = (0.61^{+0.18}_{-0.12}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{vir}} = (2.05^{+0.97}_{-0.79}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [43] проанализированы собственные движения 75 шаровых скоплений, которые были вычислены по данным из каталога Gaia DR2. Затем в выборку были включены еще 20 удаленных шаровых скоплений, значения средних собственных движений которых были получены с помощью космического телескопа им. Хаббла. В работе [43] была получена оценка $M_{20} = (0.191^{+0.018}_{-0.017}) \times 10^{12} M_{\odot}$. В работе [44] для анализа использовали 34 шаровые скопления. Вычисления кинематических характеристик этих скоплений сделано по данным каталога Gaia DR2 и наблюдениям с борта космического телескопа

им. Хаббла. В работе [44] найдено $M_{39.5} = (0.42^{+0.07}_{-0.06}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [45] по данным Gaia DR2 были вычислены средние собственные движения 150 шаровых скоплений. В настоящее время это самый массовый каталог шаровых скоплений с известными оценками расстояний, собственных движений и лучевых скоростей. Из анализа кривой вращения, построенной на основе двухкомпонентной (диск и гало) модели потенциала, была получена оценка $M_{100} = (0.85^{+0.33}_{-0.20}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [46] кривая вращения Галактики построена с использованием средних собственных движений 150 шаровых скоплений, которые были вычислены по данным каталога Gaia EDR3. В итоге авторы работы [46] заключили, что общая масса Галактики составляет от $M_{200} = (0.536^{+0.081}_{-0.068}) \times 10^{12} M_{\odot}$ до $M_{200} = (0.784^{+0.308}_{-0.197}) \times 10^{12} M_{\odot}$ в зависимости от модели гало. Причем эти оценки сделаны с учетом вклада Большого Магелланова Облака (БМО). То есть учет вклада БМО на интервале расстояний < 100 кпк слегка уменьшает анализируемые круговые скорости объектов. Поэтому авторы работы [46] говорят о заниженных значениях оценок M_{200} по сравнению с известными.

В работе [47] кривая вращения Галактики построена по 159 шаровым скоплениям. Их средние собственные движения были вычислены по данным каталога Gaia EDR3. Авторы работы [47] нашли $M_{200} = (1.11^{+0.25}_{-0.18}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Приливные хвосты или звездные шлейфы образуются в результате разрушения рассеянных звездных скоплений, шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Когда такие шлейфы имеют большую протяженность, то фактически вычерчивают историю движения скопления или карликовой галактики на протяжении большого промежутка времени в поле притяжения Галактики. Анализ таких шлейфов дает еще один динамический метод оценки массы Галактики.

Отметим Kupper et al. [48], в которой изучен шлейф от шарового скопления Palomar 5. Эти авторы получили оценку массы Галактики внутри сферы радиусом 19 кпк, который равен радиусу апогалактической орбиты скопления Palomar 5: $M_{19} = (0.21 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, и даже оценили значение $M_{200} = (1.69 \pm 0.42) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.3. По кинематике галактик-спутников

Практически все авторы, которые анализируют галактические орбиты карликовых галактик-спутников Млечного Пути, отмечают, что получаемые по этим объектам оценки массы Галактики сильно зависят от кинематических свойств галактики Leo I (см., напр., [49]). Эта наиболее удаленная ($d = 261$ кпк) из карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Даже привлечение измерений ее собственного движения с борта космического телескопа им. Хаббла [50] пока не позволяет однозначно сказать [25], гиперболическая ли ее орбита или эллиптическая, т. е. связана она гравитационно с Галактикой или нет. В частности, авторы работы [49] проанализировали движение галактики Leo I с использованием измерений ее собственных движений, полученных с помощью космического телескопа им. Хаббла. В итоге они получили оценку массы Галактики $M_{\text{vir}} = 1.6 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Eadie et al. [51] исследована объединенная выборка из шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Эти авторы получили оценку массы Галактики $M_{260} = (1.37 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$. В работе Fritz et al. [52] выполнен анализ 45 карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Собственные движения и лучевые скорости звезд для вычисления средних значений были взяты из каталога Gaia DR2. Fritz et al. [52] получили оценку значения вириальной массы Галактики $M_{308} = (1.51^{+0.45}_{-0.40}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.4. По шлейфам галактик-спутников

В Галактике обнаружено достаточно много шлейфов, образовавшихся в результате разрушения шаровых скоплений и карликовых галактик. Подробный обзор таких структур можно найти в работе [53].

Gibbols et al. [54] изучили шлейфы, образованные карликовой галактикой-спутником Млечного Пути в Стрельце. Эти авторы получили оценку $M_{100} = (0.41 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, а экстраполяция на более далекое расстояния дала $M_{200} = (0.56 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Данные о шлейфе GD-1 были использованы в работе [55] для уточнения модели гравитационного потенциала Галактики. В итоге авторы работы [55] нашли $M_{20} = (0.25 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Интересно отметить работу Vasiliev et al. [56], в которой проведено N -body моделирование эволюции потока Стрельца с учетом гравитационного влияния БМО. Vasiliev et al. [56] пришли к вы-

воду о том, что наблюдаемые свойства потока Стрельца не описываются хорошо в статичном Млечном Пути. Для адекватного же описания необходимо учитывать взаимодействие потока с Галактикой, что приводит к изменению формы гало темной материи Галактики со временем. В конечном итоге, Vasiliev et al. [56] нашли $M_{100} = (0.56 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M_{200} = (0.80 \pm 0.10) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{vir}} = (0.90 \pm 0.13) \times 10^{12} M_{\odot}$, $r_{\text{vir}} = 250 \pm 12$ кпк.

Взаимодействие между Млечным Путем и БМО создает возмущения в распределении и кинематике удаленных звезд гало, шаровых скоплений и галактик-спутников. Такие возмущения могут искажать оценки массы Млечного Пути. В работе [57] представлен метод компенсации этих возмущений, основанный на интегрировании траекторий Млечного Пути и БМО. При этом были использованы кинематические данные версии Gaia EDR3. Авторы работы [57] показали, что модели с БМО, имеющим массу в диапазоне $M_{\text{LMC}} = (1-2) \times 10^{11} M_{\odot}$, лучше соответствуют наблюдаемому распределению индикаторов, и дают оценку массы Галактики $M_{100} = (0.75 \pm 0.10) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.5. По скоростям вылета из Галактики

Значения скоростей вылета из Галактики, или скоростей убегания из ее гравитационного поля, зависят от расстояния R . Анализ таких скоростей позволяет уточнить модель гравитационного потенциала Галактики. При этом выражение (5) для оценки массы Галактики может быть преобразовано к следующему виду [58]:

$$M(<r) = -\frac{r^2 V_{\text{esc}}^2}{G} \frac{dV_{\text{esc}}}{dr}, \quad (10)$$

где V_{esc} — скорость убегания.

В работе [58] были использованы три звездные выборки, содержащие индикаторы гало: MSTO (main-sequence turn-off stars), К-гиганты и BHBs (голубые звезды горизонтальной ветви) по данным из каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey [59]). Звезды MSTO многочисленны, но в основном наблюдаются на расстояниях до ≈ 3 кпк от Солнца. Статистические данные об этих звездах позволяют найти ограничения на значение скорости убегания в области Солнца. Количество К-гигантов и BHBs меньше, но они яркие и наблюдались на расстояниях ≈ 50 кпк от Солнца, что увеличило пространственную протяженность используемой выборки до диапазона $R \approx 40$ кпк. В итоге было найдено значение $M_{50} = (0.30^{+0.07}_{-0.05}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

По убегающим переменным типа RR Лиры с расстояниями $r < 28$ кпк в работе [60] было найдено значение $M_{20} = (0.21^{+0.02}_{-0.01}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{200} = (0.83^{+0.29}_{-0.16}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Данные для этого исследования были взяты из каталогов Gaia EDR3, PanSTARRS-1 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System [61]) и SDSS. Из нескольких тысяч анализируемых звезд были найдены 9 звезд со статусом убегающих.

3.6. По звездам гало

В работе Dason et al. [62] произведен анализ голубых звезд горизонтальной ветви с измеренными лучевыми скоростями, распределенных в области $R > 80$ кпк. Dason et al. [62] нашли $M_{150} \sim [0.5-1.0] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [63] проведено интересное изучение скоростей звезд гало. Было построено распределение эллипсоидов скоростей звезд гало на плоскости $Z - R$. В итоге сделано заключение о том, что $M_{50} \approx 0.45 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [64] для построения кривой галактического вращения использованы 860 переменных типа RR Lyr, принадлежащих звездному гало. Для этих звезд были определены высокоточные расстояния и лучевые скорости. Они распределены в интервале $r \sim 0-60$ кпк. Круговые скорости оценивались на основе уравнения Джинса. А на основе соотношения (6) была найдена масса Галактики $M_{50} = (0.375 \pm 0.133) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [32] по К-гигантам гало нашли $M_{200} = (0.55^{+0.15}_{-0.11}) \times 10^{12} M_{\odot}$, а по голубым гигантам ветви $M_{200} = (1.00^{+0.67}_{-0.33}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Среди звезд гало относительно недавно были обнаружены так называемые гиперскоростные звезды, летящие из центра Галактики со скоростями ≈ 700 км/с [65]. То есть это убегающие звезды, поэтому они дают возможность оценить массу Галактики. В работе [66] с использованием выборки гиперскоростных звезд гало была получена оценка вириальной массы Галактики $M_{\text{vir}} = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ для найденного значения $r_{\text{vir}} = 300$ кпк. По данным о гиперскоростных звездах авторы работы [67] нашли, что масса Галактики заключена в интервале $[1.2-1.9] \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.7. По динамике Местной группы галактик

Из анализа кривой вращения Галактики Софу [68], также как и другие авторы [69, 70], заключил,

что масса Туманности Андромеды слегка превышает массу Млечного Пути. А вот авторы работы [71], хотя и получили непротиворечивую оценку массы Местной группы, $M(\text{MW})_{200} + M(\text{M31})_{200} = (2.3 \pm 0.7) \times 10^{12} M_{\odot}$, утверждают, что масса Галактики немного превосходит массу туманности Андромеды, так как их отношение масс составляет $0.54^{+0.23}_{-0.17}$.

Имеются методы оценки массы Галактики без построения кривой ее вращения. Например, в работе [69] получена оценка полной массы Местной группы $M_{\text{LG}} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$. Отношения масс Галактики и М31 составило 4: 5, т.е., М31 со своим окружением немного массивнее системы Млечного Пути. Для этой оценки использованы эффект торможения местного Хаббловского потока и данные о расстояниях и лучевых скоростях галактик в окрестностях Местной группы. Полученная этим независимым методом полная масса Галактики составляет $M_{350} = (0.84 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В настоящее время нет согласия в оценке общей массы Местной группы галактик. Например, в работе [72] найдено $M_{\text{LG}} = M(\text{MW})_{\text{vir}} + M(\text{M31})_{\text{vir}} = (3.17 \pm 0.57) \times 10^{12} M_{\odot}$ с привлечением космических измерений собственных движений звезд в галактике М31. Здесь примерно половина массы приходится на массу Млечного Пути.

В работе [73] из анализа измерений собственного движения галактики М31 было найдено $M(\text{MW})_{200} + M(\text{M31})_{200} = (2.40^{+1.95}_{-1.05}) \times 10^{12} M_{\odot}$, что лучше согласуется с описанными нами индивидуальными оценками массы Млечного Пути.

В работе [74] можно найти обзор более десятка работ с оценками массы Местной группы галактик. Все эти оценки заключены в интервале $M_{\text{LG}} \sim [2.5-5.6] \times 10^{12} M_{\odot}$. Поэтому можем грубо оценить интервал оценок массы Млечного Пути как $M_{\text{MW}} \sim [1-2.5] \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.8. Некоторые результаты моделирования

Конечно, все перечисленные выше оценки в разной степени модельные. Здесь мы отметим результаты N -body моделирования, полученные путем генерирования модельных выборок и дальнейшей подгонкой к какому-то набору известных параметров.

В работе Zhai et al. [75] было выполнено N -body космологическое моделирование высокого разрешения с целью исследования формирования аналогов Местной группы галактик. Из ана-

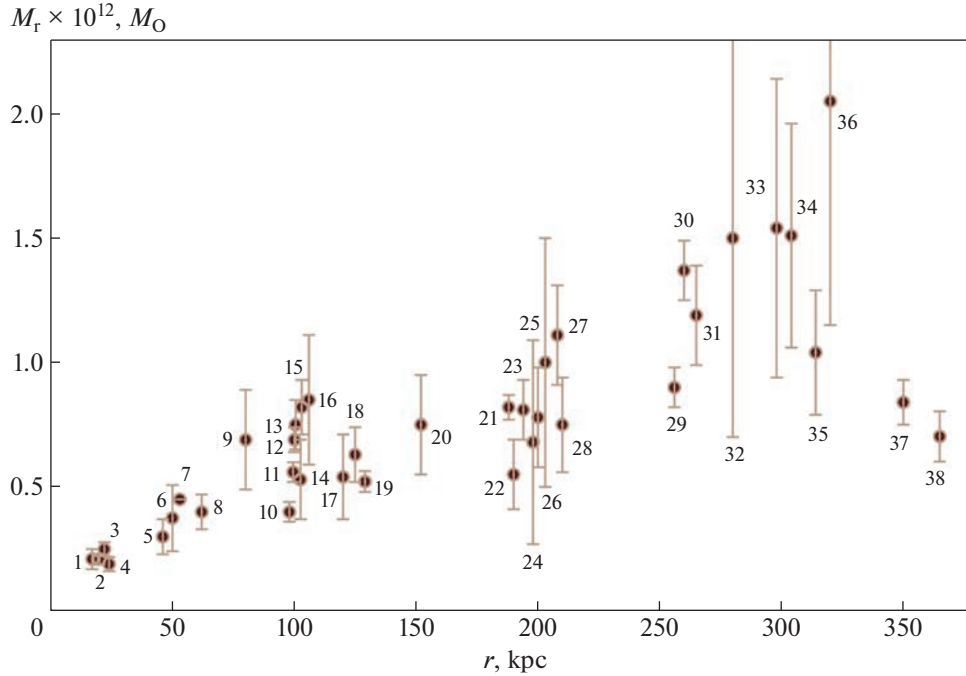


Рис. 2. Оценки массы Галактики вида M_r : 1 – Küpper et al. [48]; 2 – Malhan, Ibata [55]; 3 – Prudil et al. [60]; 4 – Posti, Helmi [43]; 5 – Williams et al. [58]; 6 – Ablimit, Zhao [64]; 7 – Williams, Evans [63]; 8 – Xue et al. [30]; 9 – Gnedin et al. [66]; 10 – Gibbons et al. [54]; 11 – Vasiliev et al. [56]; 12 – Shen et al. [79]; 13 – Magnus, Vasiliev [57]; 14 – Eadie, Jurić [80]; 15 – McMillan [37]; 16 – Vasiliev [45]; 17 – Battaglia et al. [81]; 18 – Eadie et al. [82]; 19 – Eadie, Harris [83]; 20 – Deason et al. [62]; 21 – Ablimit et al. [33]; 22 – Bird et al. [32]; 23 – Zhou et al. [28]; 24 – Bhattacharjee et al. [35]; 25 – Wang et al. [46]; 26 – Bird et al. [32]; 27 – Sun et al. [47]; 28 – Bajkova, Bobylev [24]; 29 – Huang et al. [31]; 30 – Eadie et al. [51]; 31 – Patel et al. [84]; 32 – Zhai et al. [85]; 33 – Watkins et al. [70]; 34 – Fritz et al. [52]; 35 – Peñarrubia et al. [86]; 36 – Sohn et al. [42]; 37 – Karachentsev et al. [69]; 38 – Sofue [1].

лиза орбитального движения сформированных аналогов Млечного Пути и туманности Андромеды Zhai et al. [75] нашли $M_{\text{MW}} = (1.5^{+1.4}_{-0.7}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [76] предложен метод поиска ограничения на массу Млечного Пути с использованием данных о температуре газовой короны в рентгеновском диапазоне. Для заданного профиля плотности короны здесь получается распределение ее температуры в предположении об обобщенной модели равновесия с поддержкой нетеплового давления. Например, в предположении о распределении материи по закону Наварро–Фрэнк–Уайта (4), авторы работы [76] нашли $M_{\text{vir}} \sim [1.19\text{--}2.95] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [77] N -body моделирование членов Местной группы галактик выполнялось с использованием двух пакетов IllustrisTNG и SIMBA. В итоге авторы работы [77] получили несколько результатов, заключенных в интервале $M_{\text{MW}} \sim [1.0\text{--}2.6] \times 10^{12} M_{\odot}$ с ошибками индивидуальных оценок $\sim 1 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Наконец, недавно Carlesi et al. [78] применили методы моделирования и машинного обучения для изучения скоростей Млечного Пути и

туманности Андромеды в рамках стандартной Λ CDM космологической модели. В итоге эти авторы нашли $M_{\text{LG}} = (3.31^{+0.79}_{-0.67}) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M_{\text{MW}} = (1.15^{+0.25}_{-0.22}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{M31}} = (2.01^{+0.65}_{-0.39}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Соотношение масс составляет $M_{\text{M31}}/M_{\text{MW}} = 1.75^{+0.54}_{-0.28}$, где масса туманности Андромеды почти в два раза превышает массу Млечного Пути.

4. ГРАФИКИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ

Описанные в предыдущем разделе основные результаты отражены на рис. 2, где даны оценки массы Галактики внутри определенного радиуса r . В интервале $r \sim 0\text{--}200$ кпк оценки закономерно возрастают с ростом расстояния. На всем интервале расстояний отлично виден рост дисперсии оценок с увеличением расстояния r . При $r > 200$ кпк оценки массы Галактики в основном являются вириальными, причем даны самые интересные. При этом на рис. 2 нанесено существенно больше точек по сравнению с аналогичным рисунком из нашего предварительного обзора [87]. Отметим, что для большего числа вириальных оценок дан отдельный рисунок (рис. 3).

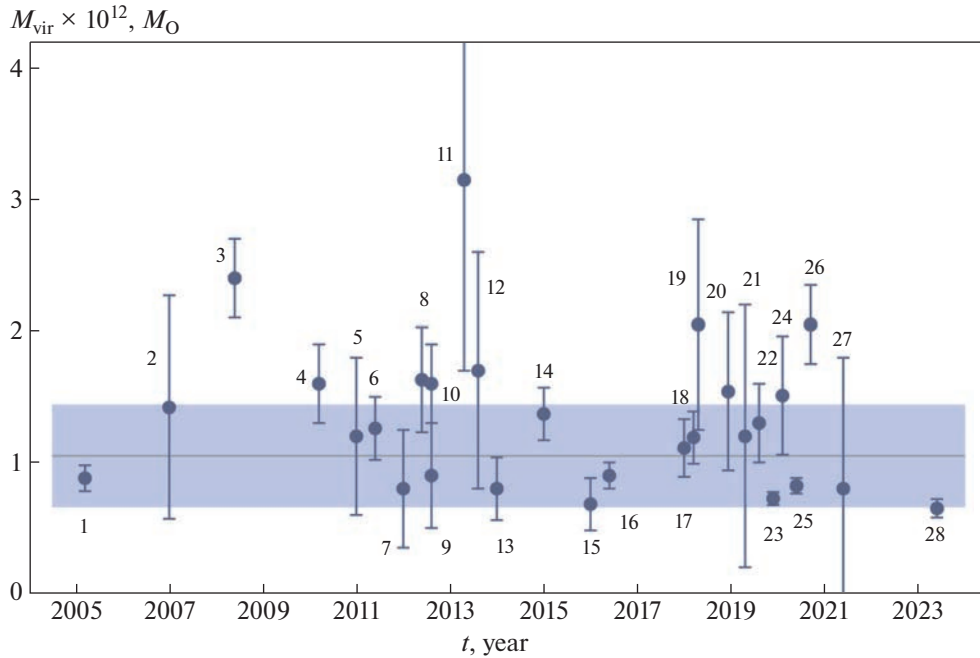


Рис. 3. Вириальные оценки массы Галактики M_{vir} в зависимости от года публикации, 1 – Battaglia et al. [81]; 2 – Smith et al. [88]; 3 – Li, White [89]; 4 – Gnedin et al. [66]; 5 – Busha et al. [90]; 6 – McMillan [91]; 7 – Bovy et al. [92]; 8 – Marel et al. [72]; 9 – Kafle et al. [93]; 10 – Boylan-Kolchin et al. [49]; 11 – Sohn et al. [50]; 12 – Rashkov et al. [94]; 13 – Kafle et al. [95]; 14 – Eadie et al. [51]; 15 – Eadie, Harris [83]; 16 – Huang et al. [31]; 17 – Zhai et al. [75]; 18 – Patel et al. [84]; 19 – Sohn et al. [42]; 20 – Watkins et al. [44]; 21 – Vasiliev [45]; 22 – Posti, Helmi [43]; 23 – Eilers et al. [19]; 24 – Fritz et al. [52]; 25 – Ablimit et al. [33]; 26 – Guo et al. [76]; 27 – Li et al. [96]; 28 – Labini et al. [97].

Имеется достаточное для отдельного рассмотрения количество оценок вида M_{200} . Полученные путем интегрирования кривой вращения (см. формулу (5)), по нашему мнению, они являются более строгими, по сравнению с оценками M_{vir} . Следуя подходу [3], мы построили рис. 4, на котором отобразили только оценки M_{200} . Эти оценки взяты при условии, что их нашли с использованием кривой вращения Галактики и авторы точно указывают M_{200} , не отождествляя с вириальной. Отметим хорошее согласие в поведении данных на нашем рис. 2 и в обзоре [3], рис. 9.

Известно (например, [108]), что оценки M_{200} и M_{vir} связаны между собой соотношением $M_{200} \approx 0.85 M_{\text{vir}}$. Нам интересно повторить вычисление средних по расширенной статистике, сравнить дисперсии оценок. Для этого были вычислены среднее $\bar{M}_{200}$ и средневзвешенное с использованием весов, обратно пропорциональных ошибкам индивидуальных оценок $w = 1/\sigma$, $(\bar{M}_{200})_w$:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{200} &= (0.94 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\bar{M}_{200})_w &= (0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (11)$$

где указаны ошибки среднего и средневзвешенного соответственно, а дисперсии σ этих двух

оценок составляют $0.27 \times 10^{12} M_{\odot}$ и $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$. На рис. 4 темной линией показано среднее $(\bar{M}_{200})_w = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$, а заливкой дана доверительная область, соответствующая уровню ошибки 68% (уровню $1\sigma = 0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$).

Некоторые авторы приводят две оценки M_r и M_{vir} . Часть таких оценок M_r дана на рис. 2. На рис. 3 даны 28 оценок M_{vir} , полученных различными методами по разнообразным данным. Как можно видеть из этого рисунка, ошибки отдельных оценок и разброс результатов здесь больше по сравнению с данными рис. 4. Средние значения $\bar{M}_{\text{vir}}$ и $(\bar{M}_{\text{vir}})_w$, вычисленные по этим данным, таковы:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\text{vir}} &= (1.33 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\bar{M}_{\text{vir}})_w &= (1.05 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (12)$$

где указаны ошибки среднего и средневзвешенного соответственно, а дисперсии оценок, σ , составляют $0.58 \times 10^{12} M_{\odot}$ и $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ соответственно. Видим меньшее согласие между двумя оценками и большими их ошибками по сравнению с результатом (11).

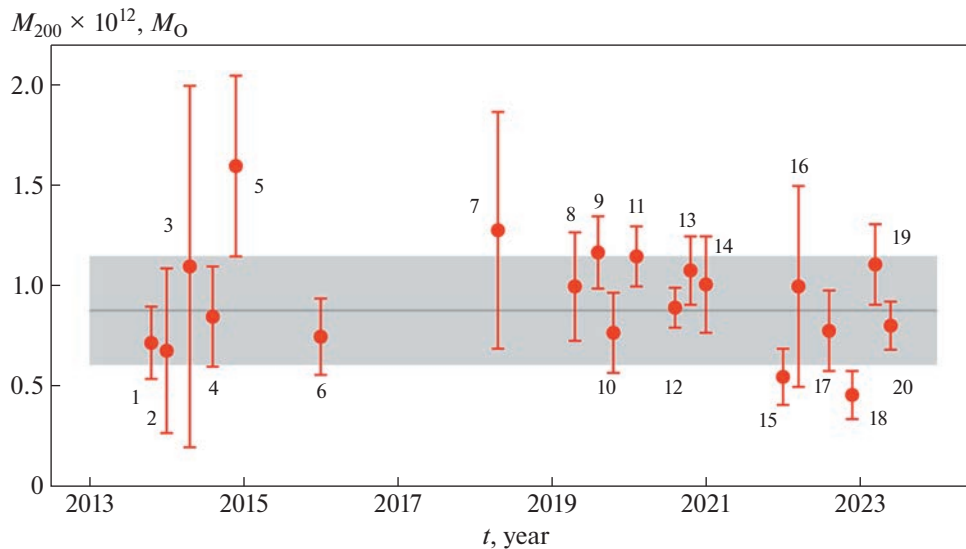


Рис. 4. Оценки массы Галактики вида M_{200} в зависимости от года публикации: 1 — Kafle et al. [95]; 2 — Bhattacharjee et al. [35]; 3 — Barber et al. [98]; 4 — Cautun et al. [99]; 5 — Piff1 et al. [100]; 6 — Bajkova, Bobylev [24]; 7 — Monari et al. [101]; 8 — Deason et al. [102]; 9 — Callingham et al. [103]; 10 — Eadie, Jurić [80]; 11 — Li et al. [104]; 12 — Karukes et al. [3]; 13 — Cautun et al. [105]; 14 — Deason et al. [106]; 15 — Bird et al. [32]; 16 — Bird et al. [32]; 17 — Wang et al. [46]; 18 — Necib, Lin [107]; 19 — Sun et al. [47]; 20 — Zhou et al. [28].

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Не все, однако, согласны с тем, что масса Галактики $\leq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$. Например, Zaritsky et al. [109] промоделировали аналоги Млечного Пути. Для таких объектов эти авторы подобрали из литературы измерения массы газа в звездах и дисках, измерения масс газа в гало, а также использовали хорошо установленное значение космологической доли барионов. Таким образом, нижнюю границу массы Галактики они оценивали способом, не зависящим от динамики. В итоге Zaritsky et al. [109] отвергают оценки малой массы Галактики ($\leq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$), поскольку такие величины подразумевают долю галактической барионной материи, значительно превышающую общемировое значение. По их мнению, сближение между динамическими оценками массы и оценками, основанными на барионной массе, является важной вехой в понимании эволюции галактик.

В нашем предварительном обзоре [87] по меньшим выборкам данных были получены следующие оценки: $\bar{M}_{200} = (0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $\bar{M}_{\text{vir}} = (1.02 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В обзоре [108] были найдены следующие средние значения массы Галактики $\bar{M}_{200} = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $\bar{M}_{\text{vir}} = (1.3 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ внутри сферы радиусом $r_{\text{vir}} = 282 \pm 30$ кпк. Можно видеть, что эти результаты не противоречат нашим

(11) и (12), а в пределах погрешностей средние находятся в хорошем согласии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены оценки массы Галактики, полученные различными авторами, следующими наиболее часто применяемыми динамическими способами

- из анализа кривой галактического вращения,
- по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути и шаровым скоплениям,
- по шлейфам карликовых галактик,
- по скоростям убегания,
- по далеким гигантам гало,
- по динамике Местной группы галактик,
- некоторые результаты моделирования.

Отметим, что в диапазоне $R \sim 5\text{--}25$ кпк имеется отличное согласие кривых вращения Галактики, построенных различными авторами по современным кинематическим данным. Имеется хорошее согласие в оценивании значения массы Галактики вида M_r вплоть до расстояний 0–150 кпк, где в настоящее время возможно построить кривую вращения Галактики по реальным объектам.

Как нам представляется, особенно ценными являются такие методы, как оценивание массы Галактики по длинной (далее ~ 100 кпк) кривой вращения Галактики, анализ галактических ор-

бит далеких шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути или анализ скоростей убегания звезд. То есть методы, использующие гравитационный потенциал Галактики, основанные на анализе орбит звезд, шаровых скоплений и карликовых галактик. Методы, позволяющие напрямую оценить значение M_{200} .

Построены графики с оценками массы Галактики вида M_r , отдельно рассмотрены оценки вида M_{200} и M_{vir} . Показано, что современные оценки общей массы Галактики M_{vir} лежат в диапазоне $[0.5-3.5] \times 10^{12} M_\odot$, а оценки M_{200} — в диапазоне $[0.4-1.6] \times 10^{12} M_\odot$.

По 20 индивидуальным оценкам найдено средневзвешенное значение $\bar{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_\odot$ с дисперсией $0.24 \times 10^{12} M_\odot$ и ошибкой средневзвешенного $0.06 \times 10^{12} M_\odot$. По 28 индивидуальным вириальным оценкам получено $\bar{M}_{vir} = 1.05 \times 10^{12} M_\odot$ с дисперсией $0.44 \times 10^{12} M_\odot$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_\odot$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Y. Sofue*, Publ. Astron. Soc. Japan **64**, 75 (2012).
2. *A. Irrgang, B. Wilcox, E. Tucker, and L. Schiefelbein*, Astron. and Astrophys. **549**, 137 (2013).
3. *E. V. Karukes, M. Benito, F. Iocco, R. Trotta, and A. Geringer-Sameth*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 05, id. 033 (2020).
4. *W. Wang, J. Han, M. Cautun, Z. Li, and M. N. Ishigaki*, Sci. China Phys. Mechanics and Astronomy **63** (10), id. 109801 (2020).
5. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016).
6. *M. Libralato, A. Bellini, L. R. Bedin, E. Moreno, et al.*, Astrophys. J. **854**, id. 45 (2018).
7. *A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, arXiv:2208.00211 [astro-ph.GA] (2022).
8. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **649**, id. A1 (2021).
9. *E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al.*, Astron. J. **140**, 1868 (2010).
10. *R. A. Benjamin, E. Churchwell, B. L. Babler, T. M. Bania, et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacific **115**, 953 (2003).
11. *D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., F. Scott, et al.*, Astron. J. **120**, 1579 (2000).
12. *D. J. Eisenstein, D. H. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, et al.*, Astron. J. **142** (3), id. 72 (2011).
13. *S. R. Majewski, R. P. Schiavon, P. M. Frinchaboy, C. Allende Prieto, et al.*, Astron. J. **154** (3), id. 94 (2017).
14. *L.-C. Deng, H. J. Newberg, C. Liu, J. L. Carlin, et al.*, Res. Astron. and Astrophys. **12** (7), 735 (2012).
15. *M. Steinmetz, T. Zwitter, A. Siebert, F. G. Watson, et al.*, Astron. J. **132** (4), 1645 (2006).
16. *S. Buder, S. Sharma, J. Kos, A. M. Amarsi, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **506**, 150 (2021).
17. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, Res. Astron. and Astrophys. **23**, id. 045001 (2023).
18. *D. M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, et al.*, Science **365** (6452), 478 (2019).
19. *A.-C. Eilers, D. W. Hogg, H.-W. Rix, and M. K. Ness*, Astrophys. J. **871** (1), id. 120 (2019).
20. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **616**, id. A1 (2018).
21. *H. C. Plummer*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **71**, 460 (1911).
22. *M. Miyamoto and R. Nagai*, Publ. Astron. Soc. Japan **27**, 533 (1975).
23. *J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White*, Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
24. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Astron. Letters **42**, 567 (2016).
25. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Astron. Rep. **61**, 727 (2017).
26. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Open Astronomy **26**(1), 72 (2017).
27. *V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, and A. O. Gromov*, Astron. Letters **43**, 241 (2017).
28. *Y. Zhou, X. Li, Y. Huang, and H. Zhang*, Astrophys. J. **946**, id. 73 (2023).
29. *M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al.*, Astron. J. **131** (2), 1163 (2006).
30. *X. X. Xue, H. W. Rix, G. Zhao, P. Re Fiorentin, et al.*, Astrophys. J. **684** (2), 1143 (2008).
31. *Y. Huang, X.-W. Liu, H.-B. Yuan, M.-S. Xiang, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **463** (3), 2623 (2016).
32. *S. A. Bird, X.-X. Xue, C. Liu, C. Flynn, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **516** (1), 731 (2022).
33. *I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S. A. Bird*, Astrophys. J. **895**, id. L12 (2020).
34. *S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng*, Astrophys. J. **852** (2), id. 78 (2018).
35. *P. Bhattacharjee, S. Chaudhury, and S. Kundu*, Astrophys. J. **785**, id. 63 (2014).
36. *J. Binney and S. Tremaine*, Galactic Dynamics (Princeton: Princeton Univ. Press, 1987).
37. *P. J. McMillan*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **465**, 76 (2017).
38. *Y. Jiao, F. Hammer, H. Wang, and Y. B. Yang*, Astron. and Astrophys. **654**, id. A25 (2021).
39. *Y. Jiao, F. Hammer, H. Wang, J. Wang, and Y. Yang*, arXiv:2306.05461 [astro-ph.GA] (2023).
40. *X. Ou, A.-C. Eilers, L. Necib, and A. Frebel*, arXiv:2303.12838 [astro-ph.GA] (2023).
41. *J. Einasto*, Trudy Astrofiz. Instit. Alma-Ata **5**, 87 (1965).
42. *S. T. Sohn, L. L. Watkins, M. A. Fardal, R. P. van der Marel, A. J. Deason, G. Besla, and A. Bellini*, Astrophys. J. **862** (1), id. 52 (2018).
43. *L. Posti and A. Helmi*, Astron. and Astrophys. **621**, id. A56 (2019).
44. *L. L. Watkins, R. P. van der Marel, S. T. Sohn, and N. W. Evans*, Astrophys. J. **873**, id. 118 (2019).

45. *E. Vasiliev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **484**, 2832 (2019).
46. *J. Wang, F. Hammer, and Y. Yang*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **510**, 2242 (2022).
47. *G. Sun, Y. Wang, C. Liu, R. J. Long, X. Chen, and Q. Gao*, Res. Astron. and Astrophys. **23** (1), id. 015013 (2023).
48. *A. H. W. Küpper, E. Balbinot, and A. Bonaca*, Astrophys. J. **803**, id. 80 (2015).
49. *M. Boylan-Kolchin, J. S. Bullock, S. T. Sohn, G. Besla, and R. P. van der Marel*, Astrophys. J. **768** (2), id. 140 (2013).
50. *S. T. Sohn, G. Besla, R. P. van der Marel, M. Boylan-Kolchin, S. R. Majewski, and J. S. Bullock*, Astrophys. J. **768** (2), 139 (2013).
51. *G. M. Eadie, W. E. Harris, and L. M. Widrow*, Astrophys. J. **806**, id. 54 (2015).
52. *T. K. Fritz, A. Di Cintio, G. Battaglia, C. Brook, and S. Taibi*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **494**, 5178 (2020).
53. *C. J. Grillmair and J. L. Carlin*, *Stellar Streams and Clouds in the Galactic Halo. B: Tidal Streams in the Local Group and Beyond*, edited by H. J. Newberg and J. L. Carlin, Astrophys. Space Sci. Library **420**, 87 (2016).
54. *S. L. J. Gibbons, V. Belokurov, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **445**, 3788 (2014).
55. *K. Malhan and R. A. Ibata*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **486**, 2995 (2019).
56. *E. Vasiliev, V. Belokurov, and D. Erkal*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **501**, 2279 (2021).
57. *L. C. Magnus and E. Vasiliev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **511**, 2610 (2022).
58. *A. A. Williams, V. Belokurov, A. R. Casey, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **468**, 2359 (2017).
59. *C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. A. Prieto, Anderson, F. Scott, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **203**, id. 21 (2012).
60. *Z. Prudil, A. J. Koch-Hansen, B. Lemasle, E. K. Grebel, et al.*, Astron. and Astrophys. **664**, id. A148 (2022).
61. *B. Sesar, N. Hernitschek, S. Mitrović, Ž. Ivezić, et al.*, Astron. J. **153**(5), 204 (2017).
62. *A. J. Deason, V. Belokurov, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **425**, 2840 (2012).
63. *A. A. Williams and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **454**, 698 (2015).
64. *I. Ablimit and G. Zhao*, Astrophys. J. **846**, id. 10 (2017).
65. *W. R. Brown, M. J. Geller, S. J. Kenyon, and A. Diaferio*, Astron. J. **139**, 59 (2010).
66. *O. Y. Gnedin, W. R. Brown, M. J. Geller, and S. J. Kenyon*, Astrophys. J. Letters **720**, L108 (2010).
67. *G. Fragione and A. Loeb*, New Astronomy **55**, 32 (2017).
68. *Y. Sofue*, Publ. Astron. Soc. Japan **61**, 153 (2009).
69. *I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov, and R. B. Tully*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **393**, 1265 (2009).
70. *L. L. Watkins, N. W. Evans, and J. H. An*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **406**, 264 (2010).
71. *J. Peñarrubia, Y.-Z. Ma, M. G. Walker, and A. McConnachie*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **443**, 2204 (2014).
72. *R. P. van der Marel, M. Fardal, G. Besla, R. L. Beaton, S. T. Sohn, J. Anderson, T. Brown, and P. Guhathakurta*, Astrophys. J. **753**, id. 8 (2012).
73. *R. E. González, A. V. Kravtsov, and N. Y. Gnedin*, Astrophys. J. **793**, id. 91 (2014).
74. *K. Chamberlain, A. M. Price-Whelan, G. Besla, E. C. Cunningham, N. Garavito-Camargo, J. Peñarrubia, and M. S. Petersen*, Astrophys. J. **942** (1), id. 18 (2023).
75. *M. Zhai, X.-X. Xue, L. Zhang, C.-D. Li, G. Zhao, and C.-Q. Yang*, Res. Astron. and Astrophys. **18** (9), id. 113 (2018).
76. *F. Guo, R. Zhang, and X.-E. Fang*, Astrophys. J. **904**, id. L14 (2020).
77. *P. Villanueva-Domingo, F. Villaescusa-Navarro, S. Genel, D. Anglés-Alcázar, et al.*, arXiv:2111.14874 [astro-ph.GA] (2021).
78. *E. Carlesi, Y. Hoffman, and N. I. Libeskind*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **513**, 2385 (2022).
79. *J. Shen, G. M. Eadie, N. Murray, D. Zaritsky, et al.*, Astrophys. J. **925** (1), id. 1 (2022).
80. *G. Eadie and M. Jurić*, Astrophys. J. **875**, id. 159 (2019).
81. *G. Battaglia, A. Helmi, H. Morrison, P. Harding, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **364**, 433 (2005).
82. *G. M. Eadie, A. Springford, and W. E. Harris*, Astrophys. J. **838**, id. 76 (2017).
83. *G. M. Eadie and W. E. Harris*, Astrophys. J. **829**, id. 108 (2016).
84. *E. Patel, G. Besla, K. Mandel, and S. T. Sohn*, Astrophys. J. **857**, id. 78 (2018).
85. *M. Zhai, Q. Guo, G. Zhao, Q. Gu, and A. Liu*, Astrophys. J. **890** (1), id. 27 (2020).
86. *J. Peñarrubia, F. A. Gómez, G. Besla, D. Erkal, and Y.-Z. Ma*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **456**, L54 (2016).
87. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, arXiv:2305.18408 [astro-ph.GA] (2023).
88. *M. C. Smith, G. R. Ruchti, A. Helmi, R. F. G. Wyse, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **379**, 755 (2007).
89. *Y.-S. Li and S. D. M. White*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **384**, 1459 (2008).
90. *M. T. Busha, P. J. Marshall, R. H. Wechsler, A. Klypin, and J. Primack*, Astrophys. J. **743**, 40 (2011).
91. *P. J. McMillan*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **414**, 2446 (2011).
92. *J. Bovy, C. A. Prieto, T. C. Beers, D. Bizyaev, et al.*, Astrophys. J. **759** (2), id. 131 (2012).
93. *P. R. Kafle, S. Sharma, G. F. Lewis, and J. Bland-Hawthorn*, Astrophys. J. **761**, id. 98 (2012).
94. *V. Rashkov, A. Pillepich, A. J. Deason, P. Madau, C. M. Rockosi, J. Guedes, and L. Mayer*, Astrophys. J. Letters **773**, id. L32 (2013).
95. *P. R. Kafle, S. Sharma, G. F. Lewis, and J. Bland-Hawthorn*, Astrophys. J. **794**, id. 59 (2014).
96. *H. Li, F. Hammer, C. Babusiaux, M. S. Pawlowski, Y. Yang, F. Arenou, C. Du, and J. Wang*, Astrophys. J. **916**, id. 8 (2021).
97. *F. S. Labini, Ž. Chrobáková, R. Capuzzo-Dolcetta, and M. López-Corredoira*, Astrophys. J. **945**, id. 3 (2023).

98. *C. Barber, E. Starkenburg, J. F. Navarro, A. W. McConachie, and A. Fattahi*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **437**, 959 (2014).
99. *M. Cautun, C. S. Frenk, R. van de Weygaert, W. A. Hellwing, and B. J. T. Jones*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 2049 (2014).
100. *T. Piffl, C. Scannapieco, J. Binney, M. Steinmetz, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **562**, id. A91 (2014).
101. *G. Monari, B. Famaey, I. Carrillo, T. Piffl, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. L9 (2018).
102. *A. J. Deason, A. Fattahi, V. Belokurov, N. W. Evans, R. J. J. Grand, F. Marinacci, and R. Pakmor*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **485**, 3514 (2019).
103. *T. M. Callingham, M. Cautun, A. J. Deason, C. S. Frenk, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **484**, 5453 (2019).
104. *Z.-Z. Li, Y.-Z. Qian, J. Han, T. S. Li, W. Wang, and Y. P. Jing*, *Astrophys. J.* **894** (1), id. 10 (2020).
105. *M. Cautun, A. Benitez-Llambay, A. J. Deason, C. S. Frenk, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **494**, 4291 (2020).
106. *A. J. Deason, D. Erkal, V. Belokurov, A. Fattahi, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **501**, 5964 (2021).
107. *L. Necib and T. Lin*, *Astrophys. J.* **926**, id. 189 (2022).
108. *J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016).
109. *D. Zaritsky and H. Courtois*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**, 3724 (2017).

MODERN ESTIMATES OF THE MASS OF THE MILKY WAY

V. V. Bobylev^a and A. T. Baykova^a

^a*The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, Saint-Petersburg, Russia*

An overview of various methods used to estimate the mass of the Galaxy is given. The results obtained on the basis of the analysis of the galactic rotation curve, on the kinematics of dwarf satellite galaxies of the Milky Way, on globular clusters, on the streams of dwarf galaxies, on distant halo stars, on escape velocities, on the dynamics of the Local group of galaxies, as well as results of N-body modeling are included. Estimates of the mass of the Galaxy M of the form (i) $M(< r)$, i.e. the mass enclosed inside a sphere with a radius of r , (ii) M_{200} , where $r \geq 0$ kpc, and (iii) virial estimates, M_{vir} . Such estimates were selected by us based on literary data, a significant part of which was obtained in the Gaia era. According to 20 individual estimates, the average value was found $\bar{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ with a variance of $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. According to 28 individual estimates we obtained $\bar{M}_{\text{vir}} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ with variance $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Keywords: Milky Way galaxy, rotation curve, mass of the Galaxy

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ ОДНОРОДНОГО ШАРА

© 2023 г. Г. С. Бисноватый-Коган^{1,2,3,*}, Е. А. Патраман^{1,3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

*E-mail: gkogon@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Рассмотрены модели нейтронных звезд в случае однородного распределения плотности. Получено алгебраическое уравнение равновесия, справедливое для любого уравнения состояния. Данное уравнение позволяет приближенно оценить массу звезды заданной плотности, не прибегая к интегрированию дифференциальных уравнений. Модели однородных нейтронных звезд для разных уравнений состояния, представленные в работе, отличаются в области максимума массы от точных решений, получаемых при численном интегрировании дифференциальных уравнений, не более, чем на $\sim 20\%$.

Ключевые слова: нейтронные звезды, однородная модель, Общая теория относительности (ОТО)

DOI: 10.31857/S0004629923080017, **EDN:** HIQYGP

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании строения белых карликов было обнаружено, что их равновесие возможно только для масс, не превышающих некоторый предел, который известен под именем Чандрасекаровского. Для углеродно-кислородного химического состава, где на один электрон приходится два бариона, $\mu_e = 2$, этот предел равен $\approx 1.46 M_\odot$. Впервые вывод о существовании верхнего предела массы для холодных звезд, равновесие которых поддерживается давлением вырожденных электронов, был сделан в работе Стонера [1], который рассматривал модель белого карлика однородной плотности. Он обобщил рассмотрение давления вырожденных электронов, сделанное в работах [2, 3], на случай большой плотности в условиях ультрарелятивистского вырождения, в котором уравнение состояния для холодного вещества принимает вид [4]:

$$P(\rho) = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \frac{\hbar c}{(\mu_e m_u)^{4/3}} \rho^{4/3} = K \rho^{4/3}. \quad (1)$$

Здесь μ_e — количество барионов на один электрон, m_u — атомная единица массы, равная $1/12$ массы изотопа ^{12}C . Масса политропной звезды, соответствующая $\gamma = 1 + 1/n = 4/3$, $n = 3$, соглас-

но теории Эмдена, не зависит от плотности, и однозначно определяется параметром K в виде [4]:

$$M_p = 4\pi \left(\frac{K}{\pi G} \right)^{3/2} M_3, \quad M_3 = 2.01824. \quad (2)$$

Используя (2), Чандрасекар [5] и Ландау [6], независимо и почти одновременно, получили для уравнения состояния (1) предельную массу белого карлика в виде

$$M_{wd} = \frac{\sqrt{3\pi} (\hbar c)^{3/2}}{2 G} \frac{M_3}{(\mu_e m_u)^2} = \frac{5.83}{\mu_e^2} M_\odot. \quad (3)$$

Для определения предельной массы наблюдаемых белых карликов Чандрасекар [5], следуя Стонеру [1], использовал $\mu_e = 2.5$, получив значение $M_{wd} = 0.933 M_\odot$. Это уточняло полученное Стонером $M_{wd} = 1.1 M_\odot$, вычисленное при том же значении $\mu_e = 2.5$ в модели с однородной плотностью. Из теории эволюции звезд, а также из наблюдений следует, что почти все белые карлики состоят из смеси углерода ^{12}C и кислорода ^{16}O , для которой $\mu_e = 2$ [7], а $M_{wd} = 1.46 M_\odot$. В работе [6] впервые было получено реалистическое значение предела массы белого карлика, который заслуживает более справедливое название, такое как предел Стонера–Чандрасекара–Ландау (Stoner–Chandrasekhar–Landau limit). Здесь использованы уточненные современные значения вели-

чин для всех констант [8], что привело к отличию на несколько процентов от величин, приведенных в оригинальных работах.

В данной работе однородное распределение плотности принимается для построения приближенных моделей холодных нейтронных звезд произвольной массы, используя алгебраические уравнения, полученные при использовании Общей теории относительности (ОТО). В рамках этой модели все результаты, включая значения для предельных масс нейтронных звезд, получаются аналитически, из полученных алгебраических уравнений, для любых уравнений состояния.

2. ОДНОРОДНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Для построения реалистических моделей нейтронных звезд (НЗ) необходимо использовать ОТО, ввиду того, что значение гравитационного потенциала достигает десятых долей от c^2 , а радиус НЗ R_{ns} составляет всего несколько гравитационных радиусов $r_g = 2GM/c^2$. При построении моделей невращающихся НЗ используется метрика типа метрики Шварцшильда, в виде [9–11]:

$$ds^2 = e^{v(r)} c^2 dt^2 - e^{\lambda(r)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2),$$

$$e^{-\lambda} = 1 - \frac{2Gm}{rc^2},$$

$$e^v = \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right) \exp \left[\int_0^{P(r)} \frac{2dP}{P + \rho(P)} \right],$$

где

$$m(r) = 4\pi \int_0^r \rho r'^2 dr', \quad M = m(R_{ns}),$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{E_T}{c^2}\right).$$

В ОТО рассматривается полная плотность вещества ρ , включающая в себя полную плотность энергии покоя ρ_0 и внутреннюю энергию E_T . Масса M является полной тяготеющей массой, включающей в себя энергию тяготения, так что полная энергия НЗ есть $E = Mc^2$, а полная энергия e внутри радиуса r равна $e(r) = m(r)c^2$. Из уравнений ОТО следует связь концентрации барионов n с числом барионов $f(r)$ внутри радиуса r , в виде [4]

$$f(r) = 4\pi \int_0^r n r'^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r'}\right)^{-1/2} dr,$$

$$N = f(R_{ns}), \quad \rho_0 = nm_u, \quad M_0 = Nm_u,$$

где M_0 — барионная масса покоя НЗ. Для однородной НЗ, в которой n, ρ_0, E_T, ρ не зависят от радиуса, интеграл в выражении (6) вычисляется аналитически, приводя к выражению [12]:

$$f(r) = \frac{2\pi n}{D^{3/2}} \left[\frac{1}{\arcsin(r\sqrt{D})} - r\sqrt{D(1-r^2D)} \right],$$

$$D = \frac{8\pi\rho G}{3c^2}.$$

Для нахождения связи радиуса НЗ R с плотностью ρ нужно найти экстремум функции $M(\rho_0)$ при фиксированном значении числа барионов в звезде N , которые записываются в виде:

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3 = \frac{4\pi}{3c^2} \rho_0 (c^2 + E_T) R^3,$$

$$N = \frac{2\pi\rho_0}{m_u D^{3/2}} \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} - R\sqrt{D(1-R^2D)} \right].$$

Если не задаваться определенной функцией распределения плотности, то применяя вариационный принцип, с использованием выражений (6), (8) для получения дифференциального уравнения и нахождения функции распределения плотности [4], находим уравнение равновесия звезды в ОТО, полученное Оппенгеймером и Волковым [11]. Как показано в [4], с. 407, для этого необходимо найти вариацию полной энергии (массы), как функционала от вариации радиуса $\delta r(v)$, где $v \equiv f(r)$, полученного в выражении (7).

2.1. Вычисление дифференциалов

Беря дифференциалы от обеих функций в (8), получаем

$$dM = \frac{4\pi}{3c^2} \left[3R^2 \rho_0 (c^2 + E_T) dR + (c^2 + E_T) R^3 d\rho_0 + \rho_0 R^3 dE_T \right],$$

$$dN = \frac{2\pi}{m_u} \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} - R\sqrt{D(1-R^2D)} \right] \times$$

$$\times \left(\frac{d\rho_0}{D^{3/2}} - \frac{3\rho_0}{2D^{5/2}} dD \right) + \frac{2\pi\rho_0}{m_u D^{3/2}} \left[\frac{RdD + 2DdR}{2\sqrt{D(1-R^2D)}} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{1-R^2D} \left(\sqrt{D} dR + \frac{R}{2\sqrt{D}} dD \right) + \right.$$

$$\left. + R\sqrt{D} \frac{R^2 dD + 2DRdR}{2\sqrt{1-R^2D}} \right].$$

Из термодинамических соотношений, получаем [13]:

$$\begin{aligned} dE_T &= \left(\frac{P}{\rho_0^2} \right) d\rho_0, \\ dD &= \frac{8\pi G}{3c^2} d\rho = \frac{8\pi G}{3c^2} \left(1 + \frac{E_T}{c^2} \right) d\rho_0 + \\ &+ \frac{8\pi G}{3c^2} \frac{P}{c^2 \rho_0} d\rho_0 = \frac{8\pi G}{3c^2} \left(1 + \frac{E_T}{c^2} + \frac{P}{c^2 \rho_0} \right) d\rho_0. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом (11), получаем из (9), (10) выражения для дифференциалов $dM(d\rho_0, dR)$, $dN(d\rho_0, dR)$. Рассматривая вариации при сохраняющемся числе барионов с $dN = 0$, получаем из последнего соотношения связь между дифференциалами dR и $d\rho_0$. Равновесие однородной звезды соответствует экстремуму функции $M(\rho_0)$, в котором

$$\frac{dM}{d\rho_0} = 0. \quad (12)$$

Тогда из выражений для дифференциалов получаем соотношение для связи радиуса R однородной звезды в ОТО с полной плотностью $\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{E_T}{c^2} \right)$ в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{\sqrt{1-R^2D}}{2R^3\sqrt{D^3}} \left[R\sqrt{D(1-R^2D)} - \frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} \right] + \\ &+ \frac{2\pi G\sqrt{1-R^2D}\rho c^2 + P}{c^2 \frac{2R^2D^2}{3c^2}} \times \\ &\times \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})R\sqrt{D}} - \frac{1-\frac{1}{3}R^2D}{\sqrt{1-R^2D}} \right] + \frac{\rho c^2 + P}{3\rho c^2} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Соотношение (13) остается справедливым для любых уравнений состояния, позволяя находить приближенно массу звезды заданной плотности из алгебраического уравнения, не прибегая к интегрированию дифференциальных уравнений.

Вывод выражений для дифференциалов dM и dN можно получить, используя интегральные формулы для этих величин, следующие из (5), (6), в виде:

$$\begin{aligned} M &= 4\pi \int_0^R \rho r^2 dr, \\ N &= 4\pi \int_0^R n r^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} \right)^{-1/2} dr, \\ m &= \frac{4\pi}{3} \rho r^3, \quad \rho_0 = m_u n. \end{aligned} \quad (14)$$

Вычисление dM с использованием интегрального выражения в (5) не приводит к упрощениям, но вычисление dN с помощью интегрального выражения значительно упрощается. Интегралы, возникающие после использования (14), вычисляются аналитически, что в результате приводит к соотношению

$$\begin{aligned} dN &= \frac{4\pi\rho_0}{m_u} \frac{R^2 dR}{\sqrt{1-R^2D}} + \frac{2\pi\rho_0}{m_u} \frac{R^3}{\sqrt{1-R^2D}} \frac{dD}{D} + \\ &+ \frac{2\pi\rho_0}{m_u D^{3/2}} \left(\frac{d\rho_0}{\rho_0} - \frac{3}{2} \frac{dD}{D} \right) \times \\ &\times \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} - R\sqrt{D(1-R^2D)} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

определяющему связь dR и $d\rho_0$, и позволяющую записать дифференциал dM в виде

$$\begin{aligned} dM &= 4\pi\rho R^3 \left[-\frac{1}{6} \frac{dD}{D} - \frac{\sqrt{1-R^2D}}{2D^{3/2}R^3} \times \right. \\ &\times \left. \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} - R\sqrt{D(1-R^2D)} \right] \left(\frac{d\rho_0}{\rho_0} - \frac{3}{2} \frac{dD}{D} \right) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате из (16), с учетом (12) получаем алгебраическое уравнение, определяющее равновесие однородной звезды, совпадающее с (13).

$$\begin{aligned} &\frac{1}{6} \frac{d\rho}{d\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x^3} \left[\frac{1}{\arcsin(x)} - x\sqrt{1-x^2} \right] \times \\ &\times \left(1 - \frac{3}{2} \frac{d\rho}{d\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho} \right) = 0, \\ &\frac{d\rho}{d\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{1 + \frac{E_T}{c^2} + \frac{P}{c^2 \rho_0}}{1 + \frac{E_T}{c^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для удобства записи здесь использованы обозначения

$$\begin{aligned} x &= R\sqrt{D} = \sqrt{\frac{R_g}{R}}, \quad R_g = \frac{2GM}{c^2}, \\ \frac{dD}{D} &= \frac{d\rho}{\rho} = \frac{1 + \frac{E_T}{c^2} + \frac{P}{c^2 \rho_0}}{1 + \frac{E_T}{c^2}} \cdot \frac{d\rho_0}{\rho_0}. \end{aligned} \quad (18)$$

Алгебраическое уравнение (17) запишется в виде

$$\begin{aligned} &\frac{d\rho}{d\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho} \left[\frac{1}{6} - \frac{3}{2} \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x^3} \left(\frac{1}{\arcsin(x)} - x\sqrt{1-x^2} \right) \right] + \\ &+ \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x^3} \left(\frac{1}{\arcsin(x)} - x\sqrt{1-x^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом определения $\frac{d\rho}{\rho} \frac{\rho_0}{\rho}$ в (17), получаем из (19) соотношение для давления в виде:

$$\frac{P}{\rho c^2} = \frac{\Phi_0(x)}{\Phi_1(x)}, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_0(x) &= 2x^3 - 3\sqrt{1-x^2} \left(\frac{1}{\arcsin(x)} - x\sqrt{1-x^2} \right) = \\ &= x(3-x^2) - \frac{3\sqrt{1-x^2}}{\arcsin(x)}, \\ \Phi_1(x) &= -2x^3 + 9\sqrt{1-x^2} \left(\frac{1}{\arcsin(x)} - x\sqrt{1-x^2} \right) = \\ &= x(7x^2-9) + \frac{9\sqrt{1-x^2}}{\arcsin(x)}. \end{aligned} \quad (21)$$

3. ПОСТНЬЮТОНОВСКАЯ АСИМПТОТИКА, $x^2 \ll 1$

В пределе слабой гравитации при $x \ll 1$ в (18), получаем из (20) в постньютоновском приближении следующее уравнение:

$$\frac{P}{\rho c^2} = \frac{x^2}{10} \left(1 + \frac{61}{70} x^2 \right), \quad (22)$$

где

$$x^2 = \frac{R_g}{R} = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho R^2 = \frac{2G}{c^2} \left(\frac{4\pi\rho}{3} \right)^{1/3} M^{2/3}.$$

Используя разложения [12], получаем следующие соотношения

$$\begin{aligned} N &= \frac{2\pi\rho_0}{m_u D^{3/2}} \left[\frac{1}{\arcsin(R\sqrt{D})} - R\sqrt{D(1-R^2D)} \right] \approx \\ &\approx \frac{4\pi\rho_0 x^3}{3m_u D^{3/2}} \left(1 + \frac{3}{10} x^2 \right), \quad N_0 = \frac{4\pi\rho_0 R_0^3}{3m_u}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$x^2 = DR^2 = \frac{2GM}{c^2 R}, \quad R_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad R_{g0} = \frac{2GM_0}{c^2}.$$

Индекс “0” обозначает ньютоновские величины. Из условия сохранения числа барионов при изменении радиуса звезды находим связь радиуса в ОТО R с ньютоновским радиусом R_0 в постньютоновском пределе $x^2 \ll 1$ в виде:

$$N = N_0, \quad R^3 \left(1 + \frac{3}{10} x^2 \right) \approx R_0^3. \quad (24)$$

С использованием (23), (24) получаем постньютоновское соотношение между значениями массы в ОТО и в ньютоновской метрике в виде

$$M = M_0 \left(1 + \frac{E_T}{c^2} - \frac{3}{10} \frac{R_{g0}}{R_0} \right). \quad (25)$$

Первое постньютоновское соотношение в (22) запишем в виде

$$\frac{P}{\rho_0^{4/3}} = \frac{1}{5} \frac{GM\rho}{\rho_0^{4/3} R} \left(1 + \frac{61}{70} \frac{R_{g0}}{R_0} \right). \quad (26)$$

Отсюда, с учетом постньютоновской связи ньютоновских и релятивистских величин в (24), (25), получаем постньютоновское алгебраическое уравнение равновесия однородной звезды в виде:

$$\begin{aligned} \frac{P}{\rho_0^{4/3}} &= \frac{1}{5} \frac{GM_0}{\rho_0^{1/3} R_0} \left(1 + \frac{2E_T}{c^2} + \frac{47}{70} \frac{R_{g0}}{R_0} \right), \\ \frac{R_{g0}}{R_0} &= \frac{2}{c^2} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} GM_0^{2/3} \rho_0^{1/3}. \end{aligned} \quad (27)$$

В малом втором члене в (27) воспользуемся равенством гравитационной и тепловой энергиями в ньютоновской политропной звезде с показателем 4/3 в виде [8]:

$$\begin{aligned} P &= K \rho_0^{4/3}, \quad \gamma = \frac{d \ln P}{d \ln \rho_0} = \frac{4}{3}, \\ E_T &= \frac{3}{5} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} GM_0^{2/3} \rho_0^{1/3}. \end{aligned} \quad (28)$$

С учетом (28) уравнение равновесия (27) примет вид

$$\frac{P}{\rho_0^{4/3}} = \frac{1}{5} \frac{GM_0}{\rho_0^{1/3} R_0} \left[1 + \frac{89}{35c^2} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} GM_0^{2/3} \rho_0^{1/3} \right]. \quad (29)$$

Для уравнения состояния (28) уравнение равновесия однородной звезды запишется в виде:

$$K = \frac{1}{5} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} GM_0^{2/3} \left[1 + \frac{89}{35c^2} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} GM_0^{2/3} \rho_0^{1/3} \right]. \quad (30)$$

Это уравнение точно совпадает с соответствующим уравнением из работы [8], полученным исходя из постньютоновских разложений, приведенных в [10].

4. ОДНОРОДНЫЕ МОДЕЛИ ПРИ ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ ПЛОТНОСТЯХ

При уменьшении до нуля знаменателя в правой части (20) отношение $\frac{P}{\rho c^2}$, а также сама плотность ρ стремятся к бесконечности. Абсцисса

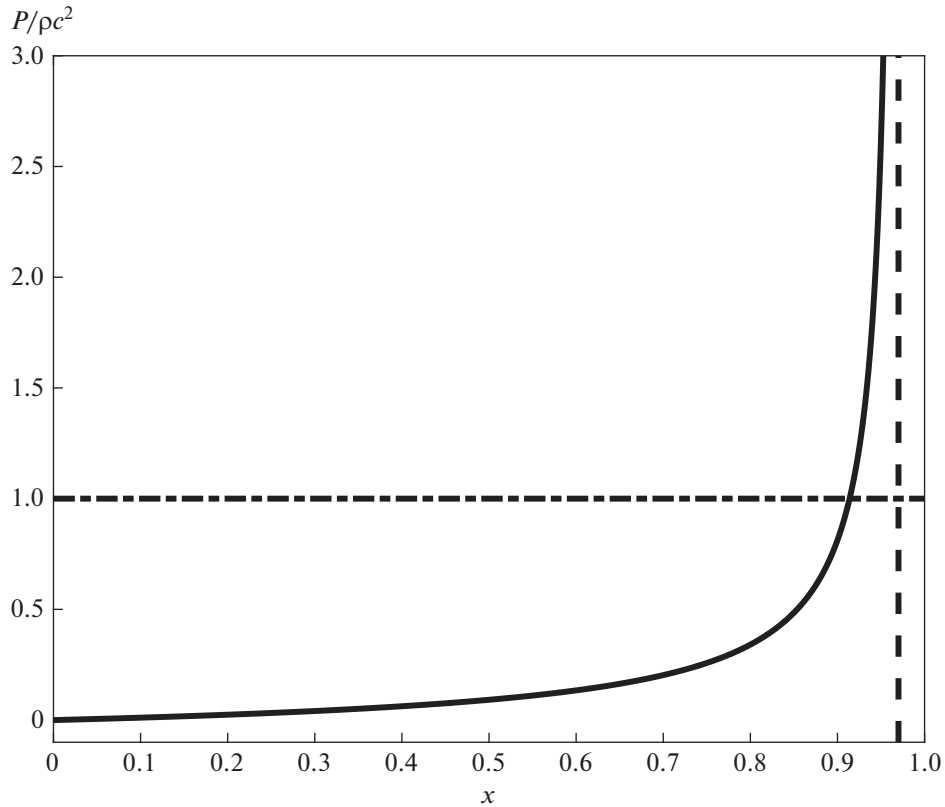


Рис. 1. Зависимость $\frac{P}{\rho c^2}$ от параметра x , согласно (20) (сплошная линия). Абсцисса вертикальной штриховой линии $x = x_l$ соответствует нулевому корню знаменателя уравнения (20), $x_l = 0.9849$. Горизонтальная штрихпунктирная линия $\frac{P}{\rho c^2} = 1$ отделяет физически допустимую область от верхней области, где нарушается принцип причинности.

вертикальной штриховой линии $x = x_l$ на рис. 1 соответствует нулевому корню знаменателя уравнения (20), $x_l = 0.9849$. Горизонтальная штрихпунктирная линия $\frac{P}{\rho c^2} = 1$ отделяет физически допустимую область от верхней области, где нарушается принцип причинности, согласно которому скорость звука в веществе не может превышать скорость света. Как следует из строгих расчетов, основанных на численном решении дифференциального уравнения равновесия Оппенгеймера-Волкова [4, 10], нейтронные звезды при различных уравнениях состояния становятся неустойчивыми при существенно меньших значениях параметра $x = \frac{R_g}{R} \sim \frac{1}{3}$, который может быть немного больше, или немного меньше $\frac{1}{3}$, для различных уравнений состояния. Соответствующие параметры нейтронных звезд в рамках однородной модели рассчитаны в последующих разделах.

Асимптотическое решение уравнения (20) при $x \rightarrow x_l$ получается аналитически при использовании разложений

$$x = x_l - \delta, \quad \Phi_1(x) = \Phi_1(x_l) - \Phi_1'(x_l)\delta. \quad (31)$$

С учетом того, что $\Phi_1(x_l) = 0$, асимптотическое решение уравнения (20) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{P}{\rho c^2} &\simeq \frac{\Phi_0(x_l)}{-\Phi_1'(x_l)\delta} \simeq \frac{0.02493}{\delta}, \\ \Phi_0(x_l) &= x_l(3 - x_l^2) - \frac{3\sqrt{1-x_l^2}}{\arcsin(x_l)} \simeq 1.275, \\ \Phi_1'(x_l) &= 21x_l^2 - \frac{9x_l}{\sqrt{1-x_l^2}}\arcsin(x_l) \simeq -51.15. \end{aligned} \quad (32)$$

Эта асимптотика приведена на рис. 1.

Интересно, что в однородной звезде зависимость $M(\rho)$ для неустойчивых моделей вблизи порога $x = x_l$ имеет универсальный характер и не зависит от уравнения состояния. Действительно,

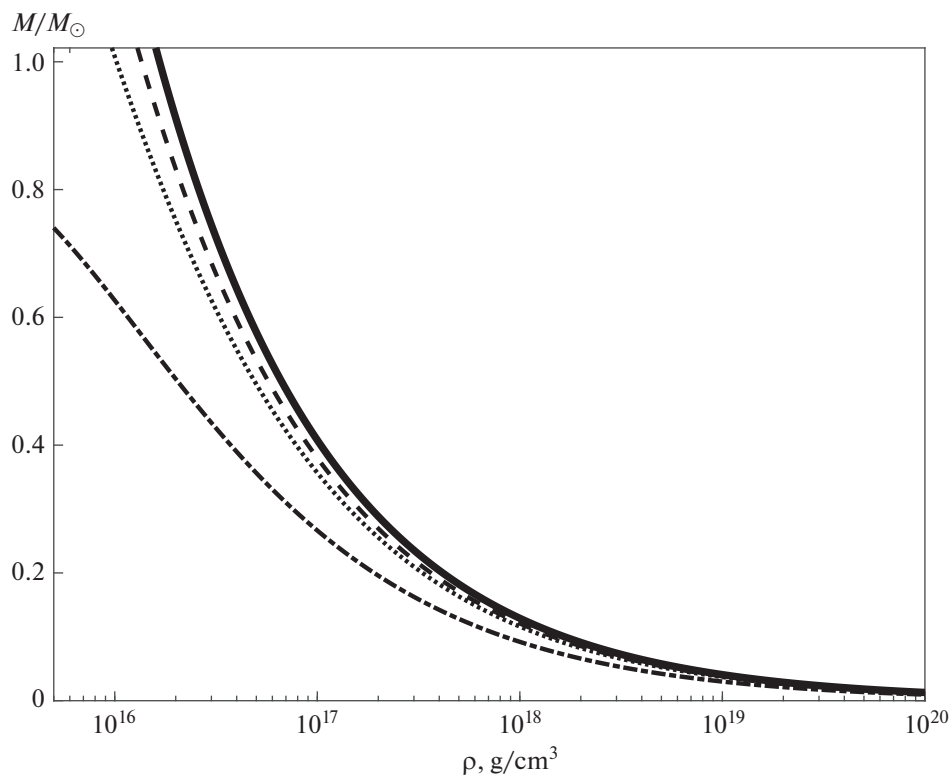


Рис. 2. Зависимость $M(\rho)$ для различных уравнений состояния. Сплошной линией дана асимптотика (34). Штриховая линия демонстрирует, как спадает $M(\rho)$ в модели I H, пунктирная относится к вырожденному нейтронному газу с квадратичной поправкой, штрихпунктирная линия соответствует вырожденному нейтронному газу.

вблизи границы $x = x_l$ соотношения из (18) для M и x^2 записываются в виде:

$$\begin{aligned} M &= \frac{4\pi}{3} \rho R^3, \\ x^2 = x_l^2 &= 0.9845^2 = 0.97 = \frac{2GM}{c^2 R}, \\ M &= 0.97 \frac{c^2 R}{2G}. \end{aligned} \quad (33)$$

Отсюда, из двух выражений для M , получаем асимптотические зависимости для $R(\rho)$ и $M(\rho)$ в виде:

$$R = \left(\frac{0.97c^2}{2G\rho} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{3}{4\pi}}, \quad M = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \left(\frac{0.97c^2}{2G} \right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}}. \quad (34)$$

Асимптотическая зависимость $M(\rho)$, одинаковая для всех уравнений состояния, приведена на рис. 2.

Решения вблизи предельной величины не имеют особого физического смысла, т.к. получены из приближенной однородной модели, которая в целом неприменима для неустойчивых моделей звезд при плотностях, существенно превышающих плотность максимальной массы, когда кривая $M(\rho)$ качественно отличается от точных

решений с произвольным числом степеней свободы [14, 15]. Отметим возможность применения метода Галеркина для получения равновесных решений [16], когда плотность представляется в виде суммы по заданным функциям с коэффициентами, которые минимизируют функционал энергии. Это приведет к увеличению числа степеней свободы, и получению более точного, по сравнению с однородным распределением, решения, которое определяется системой алгебраических уравнений. Увеличение числа функций приведет к качественному улучшению решения при очень больших плотностях. С ростом числа используемых функций растет плотность, при которой имеет место качественная достоверность решения. Полученная зависимость $M(\rho)$ соответствует выводу работы [17] о метастабильности любой массы относительно релятивистского коллапса, и о том, что для любой гравитирующей массы имеются, как минимум, два равновесных состояния, из которых устойчиво только состояние с наименьшей плотностью. Эти состояния разделены большим потенциальным барьером с ничтожно малой, но конечной вероятностью проникновения через него, и последующего релятивистского коллапса.

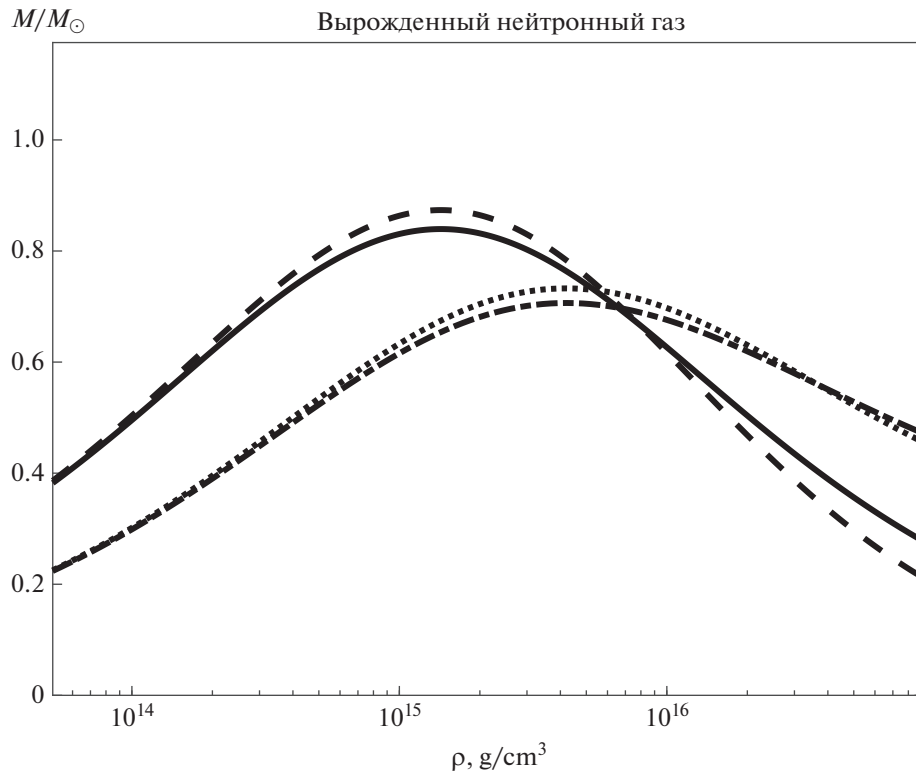


Рис. 3. Вырожденный нейтронный газ. Сплошной линией обозначена зависимость $M(r)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(r)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели.

Считается, что для реалистических моделей звезд выполняется принцип причинности, согласно которому скорость звука не может превышать скорость света. Для выполнения этого условия должно [18] выполняться неравенство $P \leq \rho c^2$, что определяется горизонтальной линией при ординате $y = 1$ на рис. 1, а также вертикальными линиями на рис. 2 (и последующих рисунках), соответствующими плотностям, где $P = \rho c^2$. Давление в асимптотических моделях определяется уравнением состояния с использованием (32).

5. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ РАВНОВЕСНОЙ КРИВОЙ $M(\rho)$ ДЛЯ ОДНОРОДНОЙ МОДЕЛИ ЗВЕЗДЫ С ЗАДАННЫМ УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Построение зависимостей $M(\rho)$ или $M(\rho_0)$, $M(R)$ можно сделать, используя следующую процедуру.

1. Выбираем уравнение состояния $P(\rho)$, $P(\rho_0)$, задаваемое формулами или таблицами.

2. Задаем отношение гравитационного радиуса звезды к физическому радиусу $x^2 = \frac{R_g}{R}$.

3. Из уравнения (20) находим отношение давления к плотности.

4. Используя формулы или таблицы, задающие уравнение состояния, определяем значение плотности, при которой удовлетворяется соотношение (20).

5. Радиус модели находим из определения x в виде $R^2 = \frac{3c^2 x^2}{8\pi G \rho}$.

6. В заключение находим массу однородной модели $M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$. Результаты расчетов для нескольких уравнений состояния представлены на рис. 2–9.

6. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ МАССЫ ОДНОРОДНОЙ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ

Как показал Я.Б. Зельдович [19] (см. также [4, 10, 15, 20, 21]), потеря гидродинамической устой-

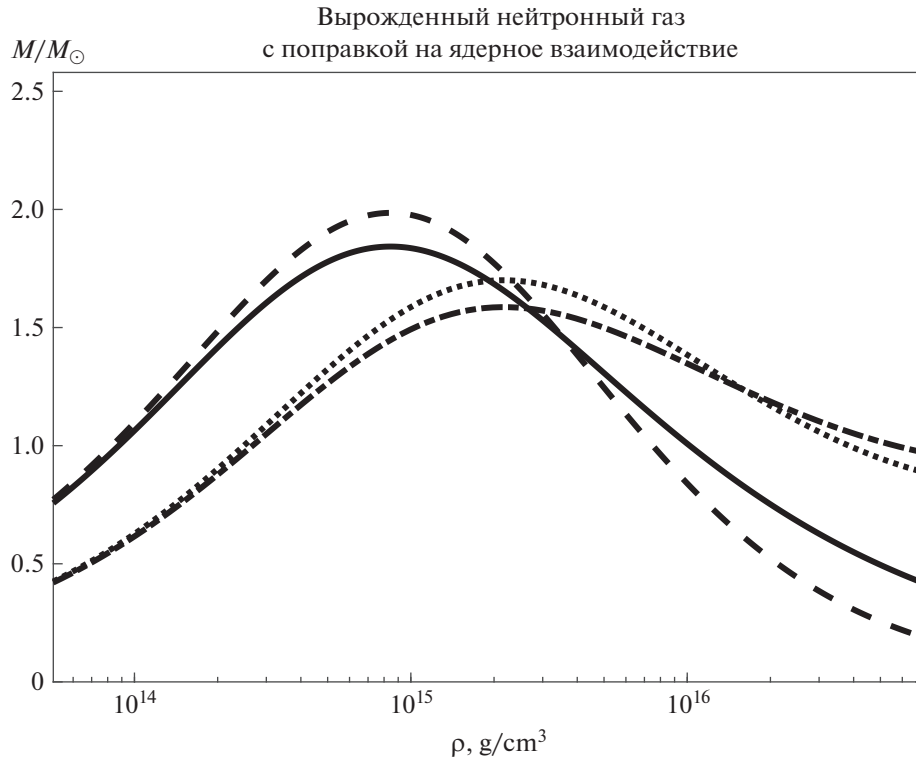


Рис. 4. Вырожденный нейтронный газ с поправкой на ядерное взаимодействие. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели.

чивости звезды происходит в точке кривой зависимости массы от плотности, где масса имеет максимальное значение. В ОТО максимумы кривых $M(\rho)$ и $M(\rho_0)$ совпадают [10], поэтому можно использовать любую из этих кривых. Рассмотрим зависимость $M(\rho)$. Уравнение (20), с учетом (21) запишем в следующем виде:

$$g(\rho) = \Phi(\rho, M), \quad (35)$$

где

$$g(\rho) = \frac{P}{\rho c^2}, \quad \Phi(\rho, M) = \frac{\Phi_0(x)}{\Phi_1(x)},$$

$$x = R\sqrt{D} = \sqrt{\frac{R_g}{R}} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} M^{2/3} \rho^{1/3}}, \quad R = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{M}{\rho} \right)^{1/3}.$$

Дифференцируя выражение (35), получим

$$\frac{dg(\rho)}{d\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial M} \frac{dM}{d\rho} + \frac{\partial \Phi}{\partial \rho}. \quad (36)$$

Учитывая, что в максимуме массы $\frac{dM}{d\rho} = 0$, получаем для определения параметров критического

состояния нейтронной звезды $M_{\max}$ и ρ_{cr} следующую систему уравнений:

$$g(\rho) = \Phi(\rho, M), \quad \frac{dg(\rho)}{d\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial \rho}. \quad (37)$$

Здесь правые части уравнений (37) имеют одинаковый вид для всех уравнений состояния, и вычисляются из формулы (35). Левые части уравнений (37) определяются уравнением состояния, задаваемого аналитической формулой, или таблично.

7. ВЫЧИСЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для построения решений алгебраического уравнения для различных уравнений была использована система, состоящая из уравнений (18), (20). Решение проводилось методом Ньютона [22] с принятой относительной точностью 10^{-7} . Построены модели холодных НЗ с использованием уравнения состояния вырожденного нейтронного газа и с более реалистичными уравнениями состояниями из работ [23, 24]. Аналитические

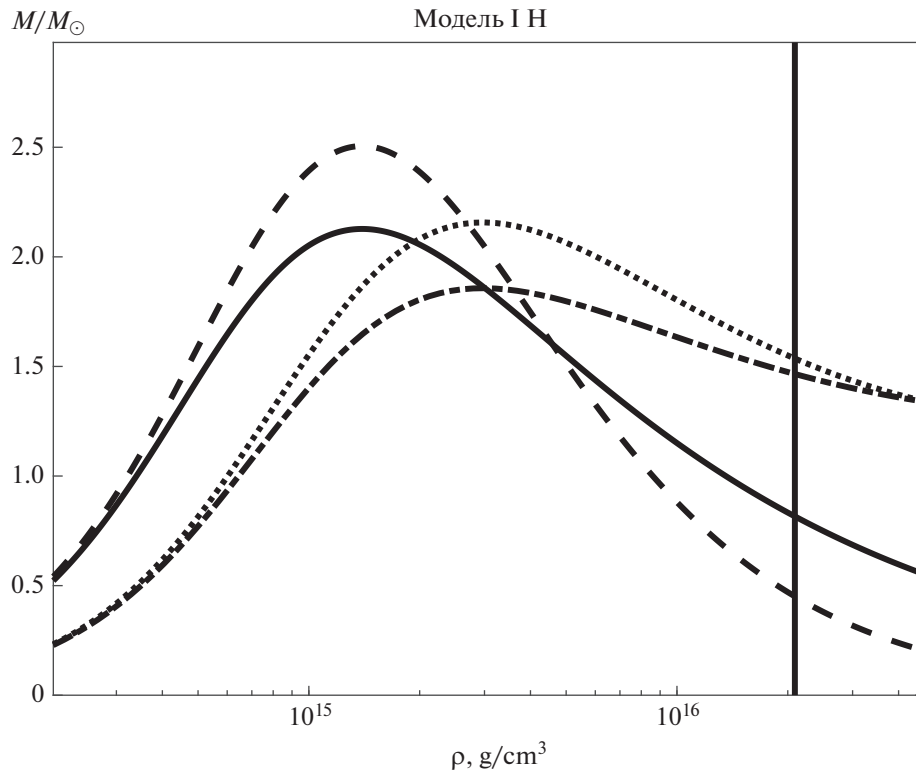


Рис. 5. Модель I H. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели. Вертикальная сплошная линия показывает, на какой плотности $v_s = c$, $\rho = 2.2 \times 10^{16}$ г/см³.

выражения для P и $\mathcal{E}$ (полная плотность энергии) в моделях 3–6 (см. ниже) получены в результате аппроксимации табличных данных в работе [24].

1. *Модель вырожденного нейтронного газа.* Наиболее простой случай, не учитывающий взаимодействия [11] (см. рис. 3).

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \frac{m^4 c^5}{24\pi^2 \hbar^3} \left(y(2y^2 - 3)\sqrt{1 + y^2} + 3 \sinh^{-1} y \right) = \\ &= 6.859 \times 10^{35} \times \\ &\times \left(y(2y^2 - 3)\sqrt{1 + y^2} + 3 \sinh^{-1} y \right) \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} &= \frac{m^4 c^5}{24\pi^2 \hbar^3} \left(3y(2y^2 + 1)\sqrt{1 + y^2} - 3 \sinh^{-1} y \right) = \\ &= 6.859 \times 10^{35} \times \\ &\times \left(3y(2y^2 + 1)\sqrt{1 + y^2} - 3 \sinh^{-1} y \right) \text{ эрг/см}^3, \\ y &= \left(\frac{3\pi^2 \rho_0}{m} \right)^{1/3} \frac{\hbar}{mc} = \left(\frac{\rho_0}{6.1 \times 10^{15} \text{ г/см}^3} \right)^{1/3}. \end{aligned} \right.$$

2. *Модель вырожденного нейтронного газа с квадратичной поправкой по плотности.* Данное уравнение состояния приближенно учитывает ядерное взаимодействие [25] (см. рис. 4).

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \frac{m^4 c^5}{24\pi^2 \hbar^3} \left(y(2y^2 - 3)\sqrt{1 + y^2} + 3 \sinh^{-1} y \right) + \\ &+ \frac{6\pi \hbar^3}{m_p^4 c} \rho_0^2 = 6.859 \times 10^{35} \times \\ &\times \left(y(2y^2 - 3)\sqrt{1 + y^2} + 3 \sinh^{-1} y \right) + \\ &+ 0.9421086 \times 10^5 \rho_0^2 \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} &= \frac{m^4 c^5}{24\pi^2 \hbar^3} \left(3y(2y^2 + 1)\sqrt{1 + y^2} - 3 \sinh^{-1} y \right) + \\ &+ \frac{6\pi \hbar^3}{m_p^4 c} \rho_0^2 = 6.859 \times 10^{35} \times \\ &\times \left(3y(2y^2 + 1)\sqrt{1 + y^2} - 3 \sinh^{-1} y \right) + \\ &+ 0.9421086 \times 10^5 \rho_0^2 \text{ эрг/см}^3. \end{aligned} \right.$$

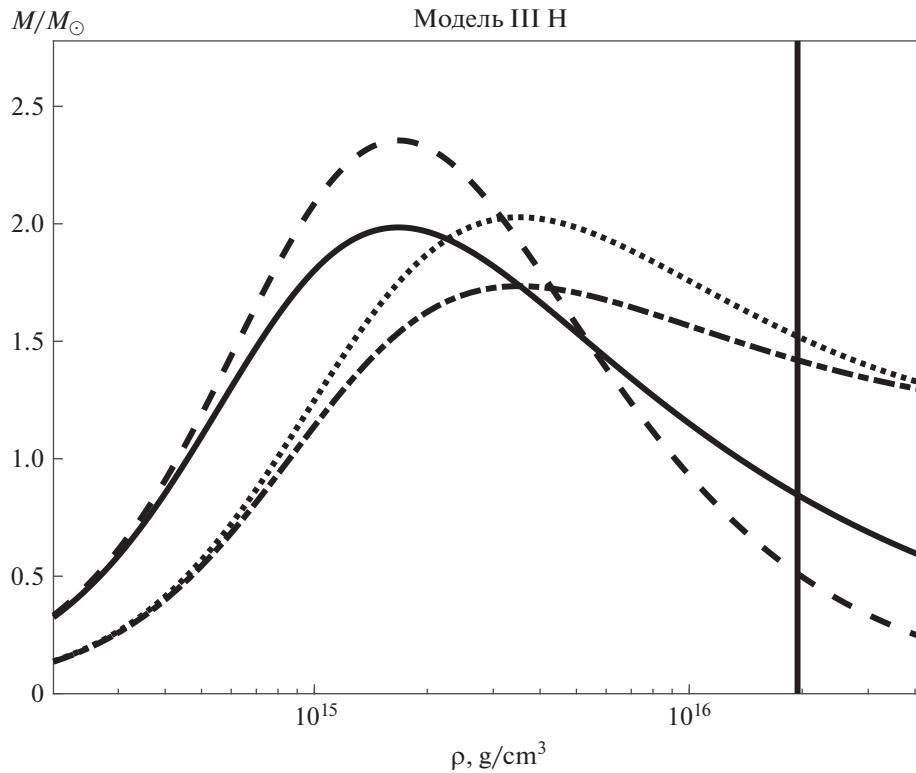


Рис. 6. Модель III Н. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели. Вертикальная сплошная линия показывает, на какой плотности $v_s = c$, $\rho = 1.91 \times 10^{16}$ г/см³.

3. *Модель I Н. Основана на потенциале Рейда, одинаковом для всех барионов* (см. рис. 5).

$$\begin{cases} P = 586 \left(\frac{\rho}{m_n \times 10^{39}} \right)^{2.48} \times 10^{33} \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} = n(15.05 + 3.96n^{1.48}) \times 10^{35} \text{ эрг/см}^3, \\ n = \frac{\rho_0}{m_n}. \end{cases}$$

4. *Модель III Н. Основана на более реалистичном потенциале для пр-взаимодействия* (см. рис. 6).

$$\begin{cases} P = 474 \left(\frac{\rho}{m_n \times 10^{39}} \right)^{2.55} \times 10^{33} \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} = n(15.05 + 3.06n^{1.55}) \times 10^{35} \text{ эрг/см}^3. \end{cases}$$

5. *Модель V Н. Аналогична модели V N (см. ниже), но с учетом рождения гиперонов* (см. рис. 7).

$$\begin{cases} P = 403 \left(\frac{\rho}{m_n \times 10^{39}} \right)^{2.33} \times 10^{33} \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} = n(15.05 + 3.03n^{1.33}) \times 10^{35} \text{ эрг/см}^3. \end{cases}$$

6. *Модель V N. Модель взаимодействия нуклонов с учетом экспериментальных данных по образованию ω -мезона при высоких энергиях* (см. рис. 8).

$$\begin{cases} P = 490 \left(\frac{\rho}{m_n \times 10^{39}} \right)^{2.508} \times 10^{33} \text{ дин/см}^2, \\ \mathcal{E} = n(14.89 + 3.25n^{1.508}) \times 10^{35} \text{ эрг/см}^3. \end{cases}$$

7. *Предельно жесткое уравнение состояния* (см. рис. 9).

$$P = P^* + (\mathcal{E} - \mathcal{E}^*).$$

Для подтверждения правильности расчетов и сравнения однородных и неоднородных моделей НЗ были построены модели холодных НЗ в случае неоднородного распределения плотности. Для нахождения моделей с различными уравнениями состояния необходимо проинтегрировать уравнения Оппенгеймера-Волкова с термодинамическими функциями 1–7, указанными выше.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dr} = -\frac{G}{r^2 c^2} \frac{(\mathcal{E} + P) \left(m + \frac{4\pi r^3 P}{c^2} \right)}{1 - \frac{2Gm}{rc^2}}, \\ \frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \frac{\mathcal{E}}{c^2}. \end{cases}$$

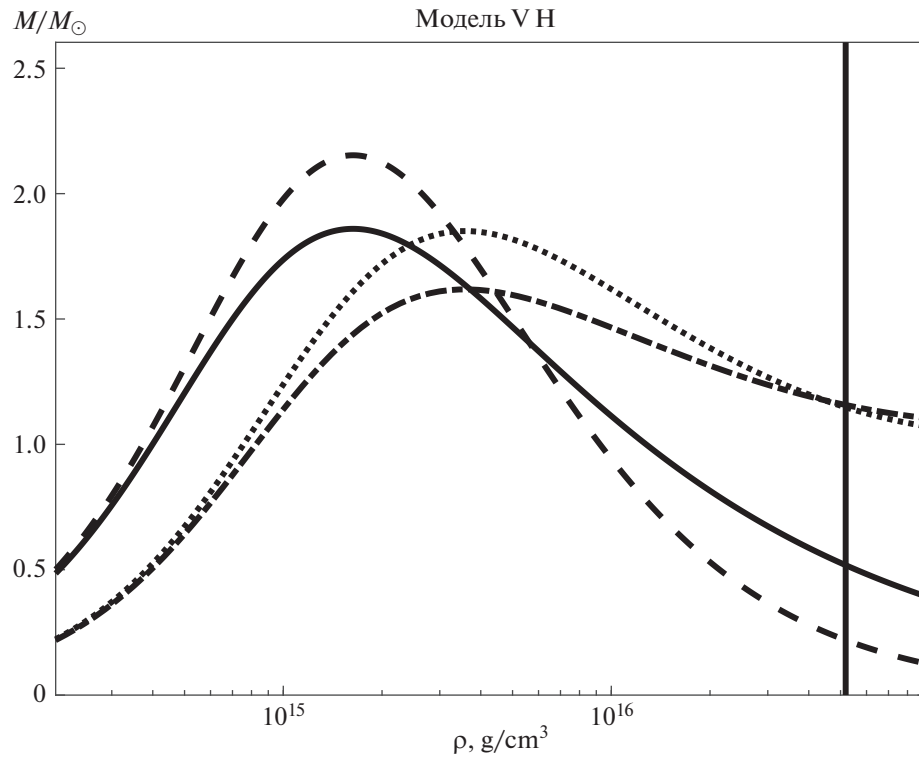


Рис. 7. Модель V H. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели. Вертикальная сплошная линия показывает, на какой плотности $v_s = c$, $\rho = 2.15 \times 10^{16}$ г/см³.

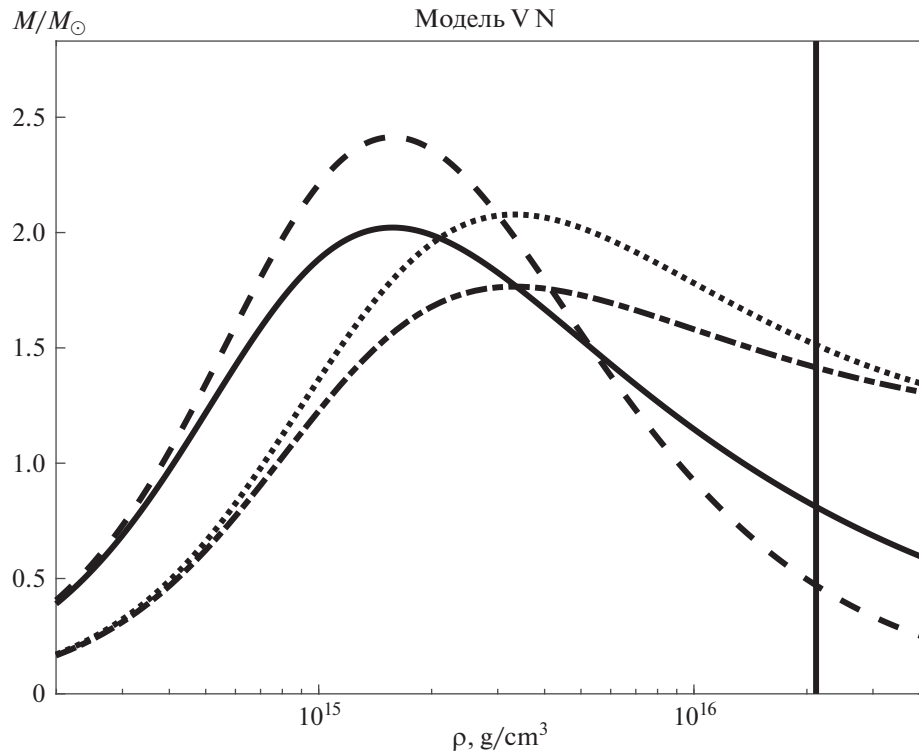


Рис. 8. Модель V N. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная — в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная — в точной модели. Вертикальная сплошная линия показывает, на какой плотности $v_s = c$, $\rho = 6.64 \times 10^{16}$ г/см³.

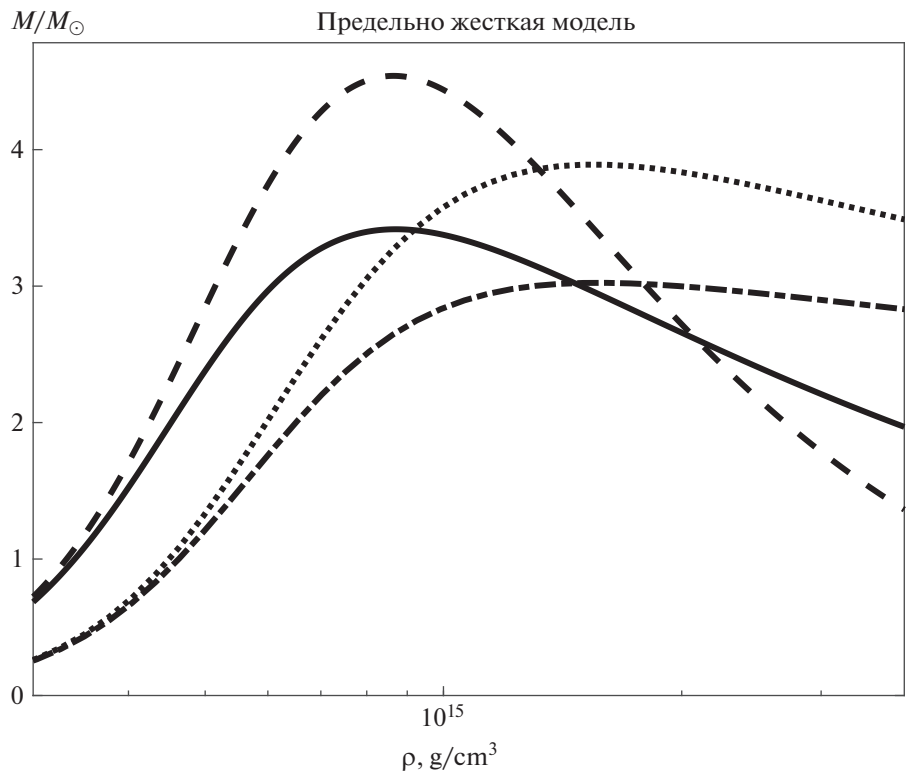


Рис. 9. Предельно жесткая модель. Сплошной линией обозначена зависимость $M(\rho)$ в случае однородного распределения плотности, штрихпунктирная – в точной модели. Штриховая линия показывает зависимость $M_0(\rho)$ в однородном случае, пунктирная – в точной модели.

Таблица 1. Критические параметры нейтронных звезд для различных уравнений состояния

Однородное распределение плотности							
Параметр	Модель						
	1	2	3	4	5	6	7
$\rho_0, 10^{15} \text{ г/см}^3$	1.3	0.74	1.2	1.44	1.4	1.37	0.76
$\rho, 10^{15} \text{ г/см}^3$	1.43	0.84	1.39	1.68	1.63	1.57	0.87
$M/M_\odot$	0.84	1.84	2.13	1.98	1.86	2.02	3.42
$M_0/M_\odot$	0.87	1.99	2.5	2.36	2.15	2.41	4.54
$R, \text{ км}$	6.54	10.1	8.99	8.27	8.16	8.49	12.3
Точная модель							
$\rho_{c0}, 10^{15} \text{ г/см}^3$	3.54	1.68	2.15	2.54	2.62	2.43	1.07
$\rho_c, 10^{15} \text{ г/см}^3$	4.2	2.17	2.97	3.52	3.59	3.33	1.57
$M/M_\odot$	0.706	1.59	1.86	1.73	1.62	1.77	3.02
$M_0/M_\odot$	0.733	1.7	2.16	2.03	1.85	2.08	3.9
$R, \text{ км}$	9.14	12.8	9.9	9.06	9.17	9.35	12.7

Примечание. Номер модели соответствует нумерации в разделе 7: 1 – модель вырожденного нейтронного газа; 2 – модель вырожденного нейтронного газа с квадратичной поправкой по плотности ρ^2 ; 3 – модель I Н; 4 – модель III Н; 5 – модель V Н; 6 – модель V Н; 7 – модель с предельно жестким уравнением состояния.

Интегрирование было проведено методом Рунге–Кутты 4 порядка точности с автоматическим выбором шага [22]. Помимо построения зависимостей $M(\rho)$, представленных на рис. 3–9, были построены зависимости массы покоя от плотности $M_0(\rho)$ в случаях однородного и неоднородного распределения плотности. Для однородных НЗ данная зависимость строится относительно просто, используя уравнения (5), см. рис. 3–9. В случае неоднородной модели необходимо интегрировать следующее уравнение:

$$m_0 = 4\pi \int_0^r \frac{\rho r'^2}{\sqrt{1 - \frac{2Gm'}{r'c^2}}} dr'; \quad M_0 = m_0(R).$$

Интегрирование также было проведено с использованием метода Рунге–Кутты 4 порядка. Параметры критического состояния НЗ приведены в табл. 1. Значения плотностей в случае неоднородной модели, в пределах ошибок, совпадают со значениями, приведенными в [24].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках точной ОТО мы получили алгебраическое уравнение (20), позволяющее приближенно определить параметры сверхплотной звезды (нейтронной или кварковой) в модели с однородной плотностью. Уравнение имеет вид, универсальный для любого уравнения состояния $P(\rho)$, где ρ учитывает вклад всех видов энергии. Оно позволяет найти приближенные зависимости $M(\rho)$, $R(\rho)$ для равновесных звезд, и найти критическую массу звезды, которая является максимально допустимой в равновесии для заданного уравнения состояния. По достижении плотности, соответствующей этой максимальной массе на кривой $M(\rho)$, звезда становится неустойчивой, и должна коллапсировать с образованием черной дыры. Сравнение наших результатов для однородных моделей с точными решениями дифференциальных уравнений равновесия при различных уравнениях состояния из работы [24] показывает, что приближенное значение критической массы звезды может превышать точное не более, чем на $\sim 20\%$. Критические плотности в однородных моделях оказываются существенно меньше значений центральных плотностей в точных моделях (см. табл. 1), и сопоставимы со средними плотностями этих моделей.

Заметим, что существование предельной массы холодного белого карлика было впервые открыто Стонером [1] в рамках приближенной ньютоновской однородной модели. Полученное им значение массы на $\sim 20\%$ превышало точное значение этой массы, полученное позже [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. C. Stoner, London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: Ser. 7 **9** (60), 944 (1930).
2. R. H. Fowler, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **87**, 114 (1926).
3. J. Frenkel, Zeitschrift für Physik **50** (3–4), 234 (1928).
4. Г. С. Бисноватый–Коган, *Физические вопросы теории звездной эволюции* (М.: Наука, 1989).
5. S. Chandrasekhar, Astrophys. J. **74**, 81 (1931).
6. L. D. Landau, Phys. Zs. Sowjet. **1**, 285 (1932).
7. E. L. Schatzman, *White dwarfs* (Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1958).
8. Г. С. Бисноватый–Коган, Е. А. Патраман, *Астрофизика* **64** (4), 551 (2021).
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория поля* (М.: Физматгиз, 2001).
10. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, *Теория тяготения и эволюция звезд* (М.: Наука, 1971).
11. J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, Phys. Rev. **55**, 374 (1939).
12. I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series and products*, edited by Yu. V. Geronimus and M. Yu. Tseytlin, (4th ed.) (New York: Academic Press, 1965).
13. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Статистическая физика* (М.: Наука, 1976).
14. Н. А. Дмитриев, С. А. Холин, в кн. *Вопросы космогонии*, т. 9, 254 (М.: Изд-во АН СССР, 1963).
15. S. H. Harrison, K. S. Thorne, M. Wakano, and J. A. Wheeler, *Gravitational theory and gravitational collapse* (Univ. Chicago Press, 1965).
16. G. S. Bisnovaty–Kogan and A. V. Dorodnitsyn, *Gravitation and Cosmology* **4**(3), 174 (1998).
17. Я. Б. Зельдович, *ЖЭТФ* **42** (2), 641 (1962).
18. Я. Б. Зельдович, *ЖЭТФ* **41** (5), 1609 (1962).
19. Я. Б. Зельдович, *Гидродинамическая устойчивость звезды*, в кн. *Вопросы космогонии*, т. 9, 157 (М.: Изд-во АН СССР, 1963).
20. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, *Успехи физ. наук* **86** (7), 447 (1965).
21. С. Шапиро, С. Тюкольский, *Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды*, Т. 1, 2 (М.: Мир, 1985).
22. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes* (Cambridge University Press, 2007).
23. H. A. Bethe and M. B. Johnson, Nuclear Phys. A **230**, 1 (1974).
24. R. C. Malone, M. B. Johnson, and H. A. Bethe, Astrophys. J. **199**, 741 (1975).
25. G. S. Bisnovaty–Kogan, *Astrophysics*, **4** (2), 79 (1968).

NEUTRON STARS IN A UNIFORM DENSITY APPROXIMATION**G. S. Bisnovaty-Kogan^{a,b,c} and E. A. Patraman^{a,c}**^a*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*^b*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

Models of neutron stars are considered in the case of a uniform density distribution. A universal algebraic equation is obtained that is valid for any equation of state. This equation allows us to find the approximate mass of a star of a given density without resorting to the integration of differential equations. Solutions for various equations of state, including more realistic ones, are presented in the paper and differ from the exact solutions obtained by numerical integration of differential equations by no more than 20%.

Keywords: neutron stars, uniform model, general theory of relativity