

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

А.И. Малышев

Невидимая Вселенная

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлению 010700 «Физика» и специальности 010701 «Физика»

Нижний Новгород
2008

УДК 524.8+530.12:531.51

ББК 22.313

М 20

М 20 Малышев А.И. НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2008. – 26 с.

Рецензент:

доцент кафедры информационных технологий в физических исследованиях ННГУ, к.ф.-м.н. **Бурланков Д.Е.**

В настоящем пособии представлен краткий обзор современных наблюдательных данных о Вселенной, интерпретация которых в рамках общей теории относительности как современной теории гравитации приводит к необходимости введения понятий тёмной материи и тёмной энергии. Начинается же изложение с обсуждения экспериментальных данных, касающихся подтверждения реальности существования чёрных дыр – объектов также невидимых по определению, однако гораздо более известных не только по научной, но и по научно-популярной и научно-фантастической литературе.

Материал пособия призван дополнить содержание учебного курса общей теории относительности, читаемого на физическом факультете ННГУ.

УДК 524.8+530.12:531.51

ББК 22.313

© Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2008

Введение

Анализ современного состояния теории гравитации показывает, что знания одной лишь общей теории относительности (далее ОТО), к сожалению, недостаточно для адекватного описания всех имеющих место эффектов. И если на масштабах Солнечной системы ОТО с очень хорошей точностью описывает поворот орбиты Меркурия и отклонение луча света в поле тяготения Солнца, то на космологических расстояниях оказывается невозможным обойтись без *тёмной материи* и *тёмной энергии*. Эти два понятия вошли в науку относительно недавно, но за последние годы в связи с появлением всё новых и новых наблюдательных данных о Вселенной, говорящих в пользу их существования, серьёзно укоренились в сознании. В то же время преподавание классического учебного курса ОТО без обсуждения «свежих» экспериментальных результатов (например, WMAP) также бессмысленно, поскольку любая пусть даже самая хорошая теория сама по себе ничего не стоит. Таким образом, изучение ОТО в отрыве от понятий тёмной материи и тёмной энергии было бы просто неадекватно современному состоянию космологии.

В настоящем пособии представлен краткий обзор существующих на сегодняшний день наблюдательных данных, интерпретация которых при нынешнем состоянии теории гравитации требует привлечения к рассмотрению новых понятий – тёмной материи и тёмной энергии. В качестве некоторого введения служит обсуждение экспериментальных подтверждений существования во Вселенной чёрных дыр.

Причиной, послужившей объединению трёх этих вопросов в одном пособии, служит, во-первых, простой формальный признак – соответствующие субстанции являются по определению невидимыми. Во-вторых, с большим сожалением приходится констатировать, что среди физиков, не связанных в своей научной деятельности с ОТО, астрофизикой, космологией, далеко не каждый способен отличить одно от другого – скажем, тёмную материю от чёрных дыр. В связи с этим, данное пособие преследует также цель на доступном уровне внести определённую ясность в вопросы, касающиеся невидимой части окружающего нас мира, *невидимой Вселенной*.

Автор благодарит рецензента настоящего пособия Д.Е. Бурланкова за ряд замеченных им неточностей, а также несколько полезных замечаний, несомненно, способствовавших улучшению стилистики материала.

Используемые далее обозначения и сокращения:

- c – скорость света
- G – гравитационная постоянная
- M_{\odot} – масса Солнца
- ОТО – общая теория относительности

I. Чёрные дыры

Начать разговор о невидимых компонентах Вселенной хотелось бы с чёрных дыр, поскольку это объекты хорошо известные очень многим уже со школьной скамьи хотя бы по научно-популярной или научно-фантастической литературе.

В настоящее время под чёрной дырой принято понимать область в пространстве, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света. Граница этой области называется *горизонтом событий*, а ее радиус (если она сферически симметрична) называют *гравитационным радиусом*:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (1)$$

Здесь M – масса чёрной дыры. Нетрудно установить, что гравитационный радиус Земли составляет 9 мм, а для Солнца – 3 км.

Прежде чем обратиться к наблюдательным данным, указывающим на существование чёрных дыр, следует сделать несколько принципиальных замечаний. Дело в том, что вопрос о реальности чёрных дыр в соответствии с данным выше определением во многом связан с тем, насколько верна теория гравитации, из которой следует существование таких объектов. В современной физике такой теорией является ОТО (существование чёрных дыр возможно также и в рамках некоторых других теоретических моделей гравитации), поэтому наблюдательные данные анализируются и интерпретируются, прежде всего, в её контексте. Однако, строго говоря, эта теория не является экспериментально подтверждённой для условий, соответствующих обсуждаемой проблеме. Поэтому утверждения о непосредственных доказательствах существования чёрных дыр, строго говоря, следовало бы понимать в смысле подтверждения существования невидимых объектов, таких плотных и массивных, что их можно было бы интерпретировать как чёрные дыры ОТО.

Кроме того, чёрными дырами часто называют объекты, не строго соответствующие данному выше определению, а лишь приближающиеся к нему по своим свойствам, – например, коллапсирующие звёзды на поздних стадиях коллапса. В современной астрофизике этому различию не придаётся большого значения, так как наблюдательные проявления «почти сколлапсировавшей» («замороженной») звезды и «настоящей» чёрной дыры практически одинаковы.

Сам термин *чёрная дыра* был предложен Джоном Уиллером и использован им впервые в публичной лекции «*Our Universe: the Known and Unknown*» 29 декабря 1967 года. А вот идея о возможном существовании объектов, вторая космическая скорость для которых равна скорости света, впервые была высказана еще в 1784 г. Джоном Митчеллом, а чуть позже – в 1796 г. – и Пьером Симоном Лапласом. Однако долгое время на этот факт особого внимания не обращали, поскольку в ньютоновской механике скорость света особой роли не играет. С появлением в 1905 г. специальной теории относительности скорость

света оказалась предельной скоростью, которую может развить физическое тело, что радикально изменило значимость чёрных дыр как физических объектов.

В 1915 г. на смену ньютоновской теории гравитации пришла общая теория относительности Альберта Эйнштейна, а уже в конце того же года немецким астрономом Карлом Шварцшильдом было получено первое точное решение её уравнений. Метрика Шварцшильда описывает пространство-время вне сферически симметричного тела массы M :

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (2)$$

Из этого решения, в частности, следует динамика гравитационного коллапса умирающей звезды: для внешнего бесконечно удалённого наблюдателя израсходовавшая ядерное горючее звезда сжимается под действием собственной гравитации (фактически, «падает» сама на себя) сначала по-ньютоновски ускоренно, а затем, при приближении её радиуса к r_g , с замедлением и полной «заморозкой» при $r = r_g + \varepsilon$ ($\varepsilon \rightarrow 0$). Таким образом, чёрная дыра Лапласа стала частным случаем решения Шварцшильда в ОТО.

Можно ввести среднюю плотность вещества чёрной дыры:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r_g^3} = \frac{3c^6}{32\pi M^2 G^3}. \quad (3)$$

Как видно, эта плотность быстро уменьшается при увеличении массы. Так, если подставить вместо M массу Солнца, средняя плотность будет превышать внутреннюю, ввиду чего к возможности существования чёрных дыр поначалу относились весьма скептически. Однако астрономические наблюдения указали на наличие во Вселенной звёзд с массами, превышающими солнечную в миллионы и миллиарды раз, а для звезды с массой, например, в 140 миллионов Солнц средняя плотность приблизительно равняется плотности воды. Таким образом, для получения чёрной дыры вовсе необязательно сжимать вещество до колоссальных плотностей, а можно пойти и экстенсивным путем, попросту накапливая вещество в большом количестве.

С астрофизической точки зрения чёрные дыры подразделяют на две категории:

- чёрные дыры, образовавшиеся в результате коллапса массивных звёзд и обладающие массой порядка нескольких единиц-десятков солнечных масс;
- чёрные дыры в центрах галактик – их масса превышает массу Солнца в миллионы и миллиарды раз; предполагается, что все крупные галактики, включая нашу, имеют в центре свою чёрную дыру.

В настоящее время имеется достаточно наблюдательных данных, свидетельствующих о реальности существования чёрных дыр во Вселенной. Однако поскольку чёрные дыры невидимы, так сказать, по определению, об их наличии в той или иной области Вселенной судят лишь по косвенному признаку – её гравитационному воздействию на объекты в окружающем пространстве.

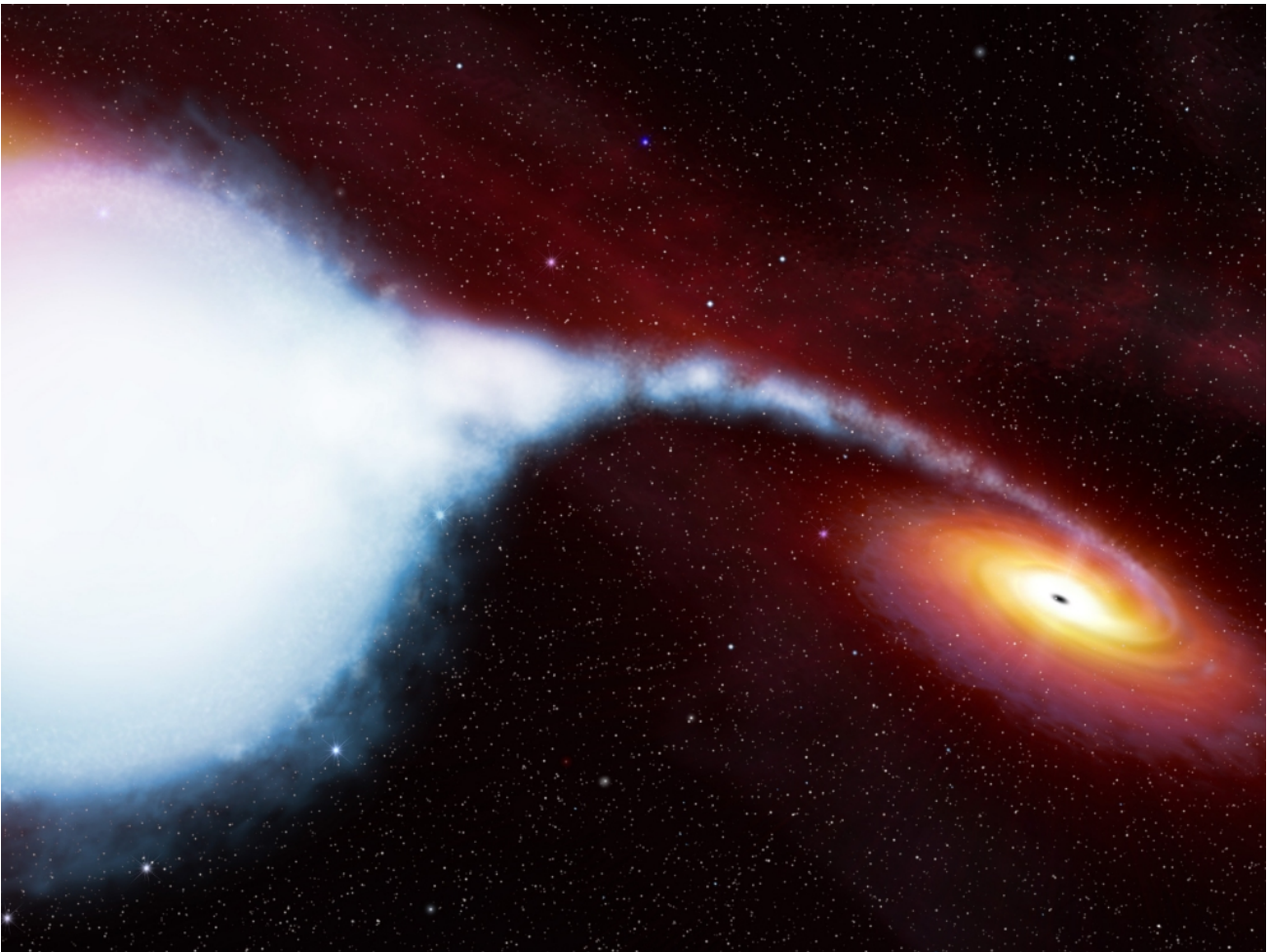


Рис. 1. Двойная система Лебедь X-1. Рисунок со страницы Европейского космического агентства: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/> (Date: 16 Dec 2002; Copyright: ESA. Illustration by Martin Kornmesser, ESA/ECF)

По-видимому, первым кандидатом в чёрные дыры в начале 1970-х годов оказался невидимый компаньон двойной системы Лебедь X-1 – одного из ярчайших рентгеновских источников на небе. Согласно расчётам, компактный невидимый объект в этой системе имеет массу около $9 M_{\odot}$. О его наличии говорит лишь гравитационное воздействие, оказываемое им на вещество видимого компонента. На рис. 1 показано, как художник представляет себе систему Лебедь X-1. Слева находится яркий голубой сверхгигант, оценка его массы – около $30 M_{\odot}$. Кандидат в чёрные дыры в Лебеде X-1 показан справа, он соединен со сверхгигантом потоком из газа и окружен впечатляющим аккреционным диском. С захватом вещества видимой звезды ее невидимым спутником как раз и связано то сильное рентгеновское излучение данной двойной системы, благодаря которому она и была открыта.

Невидимый объект соотносят с чёрной дырой, поскольку, если даже сильно пофантазировать, *очень сложно придумать другую физическую сущность, которая обладала бы столь большой массой, малыми размерами и оставалась при этом невидимой.*

В апреле 2008 г. NASA [сообщило](#) об открытии самой маленькой чёрной дыры: невидимый массивный объект в двойной системе XTE J1650, располо-

женной в созвездии Жертвенника в Южном полушарии, имеет массу всего $3.8 M_{\odot}$, а в поперечнике не превышает 24 км, что при его массе лишь на 7% больше удвоенного гравитационного радиуса. Само открытие этого объекта состоялось еще в 2001 году с помощью орбитального рентгеновского телескопа России, однако определить его массу до сих пор было затруднительно.

Обнаружение настолько легкой чёрной дыры имеет большую важность для астрофизики, поскольку находится совсем близко к *пределу Оппенгеймера-Волкова* (по современным оценкам – от 2.5 до $3 M_{\odot}$), разделяющему звёзды на те, что после своей смерти порождают чёрные дыры, и те, что превращаются в нейтронные звёзды. Ранее самой легкой считалась чёрная дыра GRO 1655-40 с массой $6.3 M_{\odot}$.

Очень убедительное доказательство реальности чёрных дыр получено несколько лет назад для нашей галактики. Примечательно, что оно вытекает не из

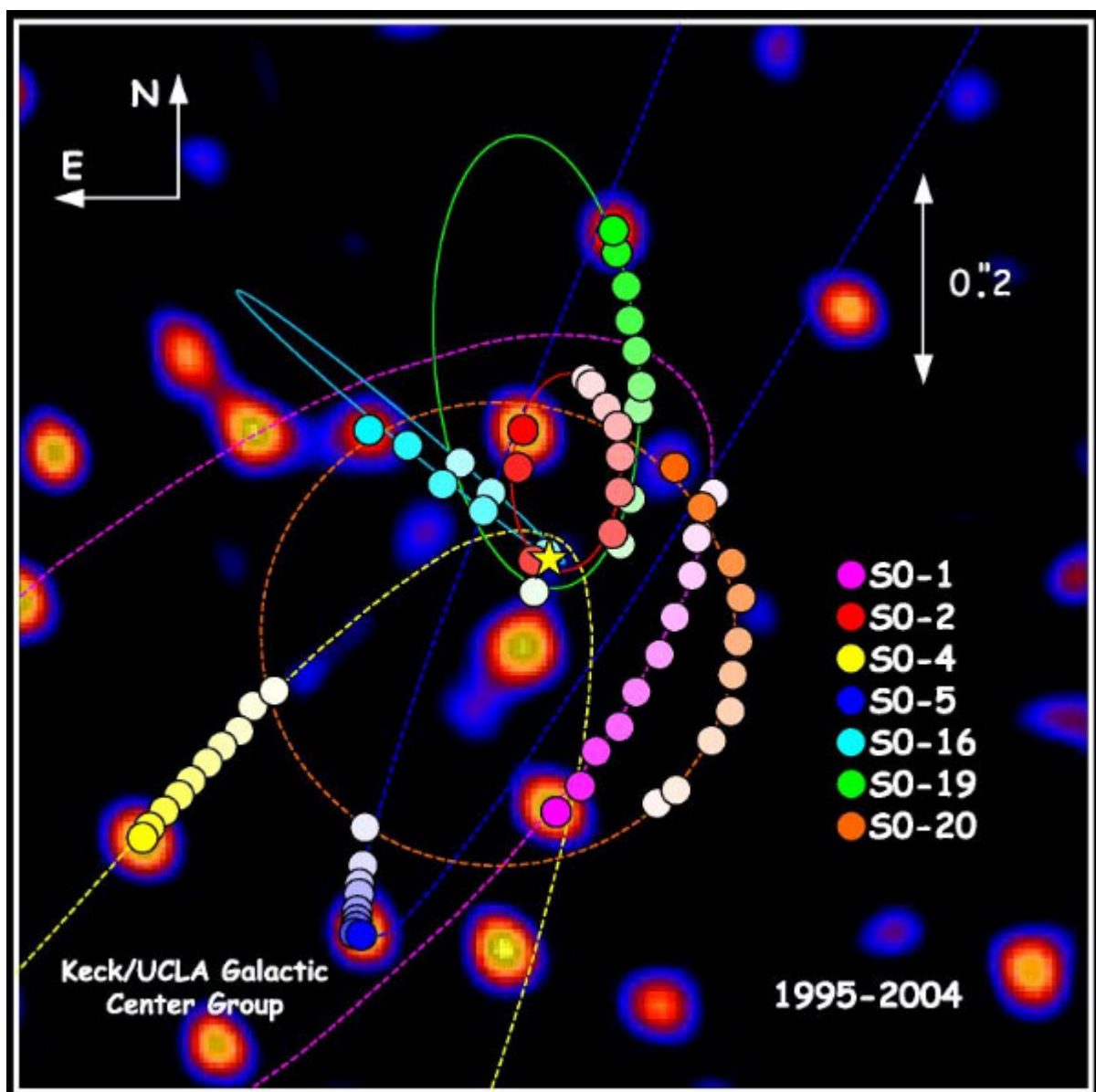


Рис. 2. Орбиты звёзд в ядре нашей Галактики. Длина двухконечной стрелки в верхнем правом углу равна приблизительно 1600 а.е. Иллюстрация с сайта [UCLA Division of Astronomy and Astrophysics](http://www.ucla.edu/~galactic).

каких-то сложных теорий, а из простой ньютоновской механики, описывающей движение спутника вокруг главного тела.

На протяжении последнего десятилетия группа ученых из калифорнийского университета ([UCLA Division of Astronomy and Astrophysics](#)) отслеживала движение нескольких звезд в ближайшей окрестности геометрического центра галактики «Млечный путь» [2]. Так на рис. 2 показаны последовательные положения семи звезд за промежуток времени с 1995 по 2004 годы, а для наглядности прорисованы и их траектории (в предположении о том, что движение звезд осуществляется вокруг общего центра, отмеченного звездочкой). При этом перемещение звезд S0-1, S0-2 и S0-16 в плоскости неба происходит по часовой стрелке, а четырех остальных – против. Расчеты показывают, что невидимый объект, заставляющий звезды двигаться по таким траекториям должен иметь массу $(3.7 \pm 0.2) \times 10^6 M_{\odot}$.

Размеры невидимого массивного объекта при этом оказываются весьма малы. Так, например, звезда S0-16 подходит к нему на минимальное расстояние порядка 45 а.е.¹ Естественно, любой тяготеющий объект может быть только меньше орбиты своего спутника. Для сравнения заметим, что бывшая планета Плутон находится на расстоянии от Солнца, изменяющимся в пределах от 30 до 49 а.е. Таким образом получается, что миллионы солнечных масс вещества упакованы в размер Солнечной системы и остаются при этом невидимыми!

Наличие чёрной дыры в центре нашей галактики «Млечный путь» на сегодняшний день, по-видимому, является наиболее простым объяснением представленных наблюдательных данных. Однако это, безусловно, не гарантирует, что в будущем не будет найдено ещё более простое решение.

¹ Астрономическая единица – исторически сложившаяся единица измерения расстояний в астрономии, равная среднему расстоянию между центрами масс Земли и Солнца (по состоянию на 2003 г. 1 а.е. = 149 597 870,691 км).

II. Модели Фридмана и данные эксперимента WMAP

Прежде, чем начать разговор о тёмной материи и тёмной энергии, хотелось бы совершить небольшой экскурс в историю, а также напомнить об одном недавнем интересном эксперименте.

Как известно, в рамках ОТО существуют *решения Фридмана*, описывающие нашу Вселенную как однородную и изотропную. Александром Фридманом в начале 20-х годов XX века были рассмотрены ситуации, когда пространство Вселенной имеет постоянную положительную (так называемая *закрытая модель*) и постоянную отрицательную кривизну (*открытая модель*). Известно также и промежуточное решение – модель Эйнштейна-де Ситтера – для нулевой кривизны пространства Вселенной. Для наглядности на рис. 3 показаны примеры двумерных поверхностей – с положительной (поверхность сферы), отрицательной (седловая поверхность) и нулевой кривизной (обычная плоскость).

В рамках перечисленных моделей была установлена связь между скоростью изменения радиуса кривизны пространства \dot{r} (или масштаба – для модели с нулевой кривизной) и плотностью энергии материи ρ , распределённой во Вселенной:

$$\frac{\varepsilon}{r^2} + \left(\frac{\dot{r}}{r}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho. \quad (4)$$

Закрытой модели здесь отвечает значение $\varepsilon = +1$, для открытой модели $\varepsilon = -1$, а для модели Эйнштейна-де Ситтера $\varepsilon = 0$. Заметим также, что точкой над r здесь обозначена производная по ct . Интересно, что

$$c \frac{\dot{r}}{r} = H, \quad (5)$$

где H – постоянная Хаббла, определенная впервые в 1929 году астрономом Эдвином Хабблом на основе наблюдений за рядом галактик.

Параметром, отделяющим одну модель Вселенной от другой (в рамках ОТО), является плотность энергии. Согласно (4) и (5), нулевой кривизне пространства Вселенной отвечает значение плотности энергии (называемое также критическим):

$$\rho_{cr} = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (6)$$

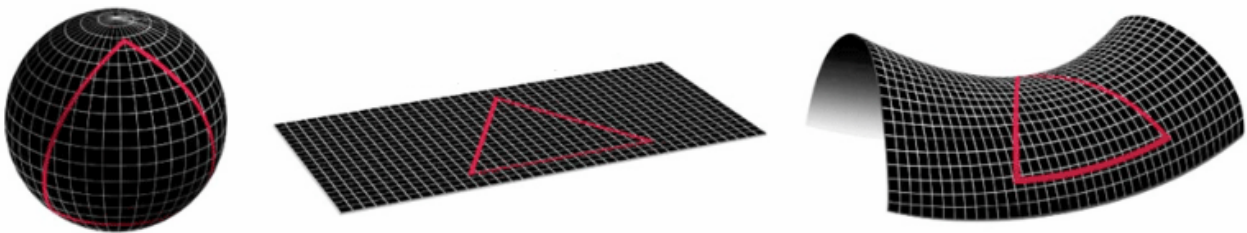


Рис. 3. Примеры двумерных пространств с положительной, нулевой и отрицательной кривизной. Рисунок из [публичной лекции проф. А. Линде](#).

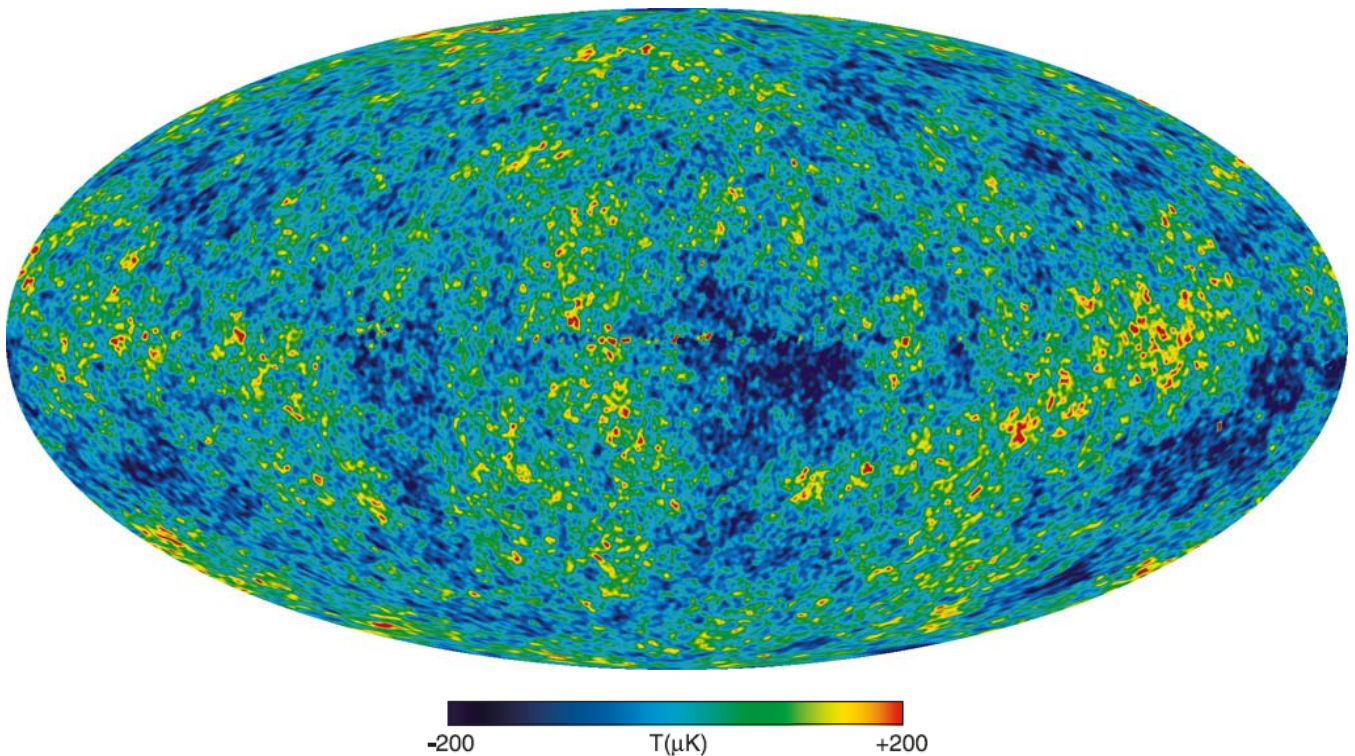


Рис. 4. Карта флуктуаций температуры реликтового излучения относительно среднего значения 2.725 К по результатам 5 лет работы аппарата WMAP [4].

Если бы астрономические наблюдения указывали, например, на бóльшую плотность энергии, то согласно (4) следовало бы сделать вывод о том, что пространство Вселенной обладает положительной кривизной, а по топологии, соответственно, близко к трехмерной сфере. Если же реальная плотность энергии оказалась бы меньше ρ_{cr} , это говорило бы о том, что кривизна пространства отрицательна.

Что же говорят астрономические наблюдения?

Уже в течение нескольких лет продолжается полет [WMAP](#) (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) – космического аппарата NASA, предназначенного, как следует из его названия, для изучения анизотропии реликтового излучения. Одним из первичных результатов работы этой летающей лаборатории, расположенной в полутора миллионах километров от нас, вблизи одной из точек Лагранжа² системы Солнце-Земля, стала карта флуктуаций температуры реликтового излучения (см. рис. 4) с разрешением, чуть превышающим видимые угловые размеры Луны или Солнца ($\approx 0.5^\circ$).

Анализ данных, выполненный по итогам 5 лет работы этой космической станции [4], говорит о том, что наш мир с высокой степенью точности является плоским, а полная плотность энергии ρ по сравнению с критической плотностью такова:

$$\frac{\rho}{\rho_{cr}} = 1.0052 \pm 0.0064. \quad (7)$$

² Точки Лагранжа (точки либрации, L-точки) – точки в системе из двух массивных тел, находясь в которых третье тело с пренебрежимо малой массой может оставаться относительно них неподвижным.

Очевидно, что при этом не исключается и их строгое равенство друг другу. Чрезвычайно интересно следующее – для так называемой барионной материи

$$\frac{\rho_B}{\rho_{cr}} = 0.0462 \pm 0.0015, \quad (8)$$

т.е. с учётом фактического равенства $\rho = \rho_{cr}$ её вклад в эволюцию Вселенной составляет приблизительно 4,6 %. А барионная материя – это, между прочим, всё, что мы видим вокруг: атомы, молекулы, планеты, звёзды, галактики и их скопления, межзвёздный газ. Сюда же входят и чёрные дыры, о которых говорилось ранее.

Что же тогда представляют собой оставшиеся более 95 % энергии во Вселенной? Согласно результатам WMAP [4]:

$$\frac{\rho_{DM}}{\rho_{cr}} = 0.233 \pm 0.013, \quad (9)$$

т.е. примерно 23 % – это так называемая *тёмная материя*, и

$$\frac{\rho_{DE}}{\rho_{cr}} = 0.721 \pm 0.015, \quad (10)$$

т.е. примерно 72 % – это так называемая *тёмная энергия*. Суммарный вклад от электромагнитного излучения и нейтрино составляет не более 1 %.

Интересно, что расчёты, выполняемые в рамках проекта WMAP, позволяют установить баланс энергий не только в современной Вселенной, но и в той, какой она была на момент разделения вещества и излучения, т.е. в возрасте 375938^{+3148}_{-3115} лет (см. рис. 5). Для справки стоит упомянуть также и полный возраст Вселенной: по данным WMAP сейчас ей $(13.73 \pm 0.12) \times 10^9$ лет.

Теперь можно обратиться и к более подробному рассмотрению понятий тёмной материи и тёмной энергии.

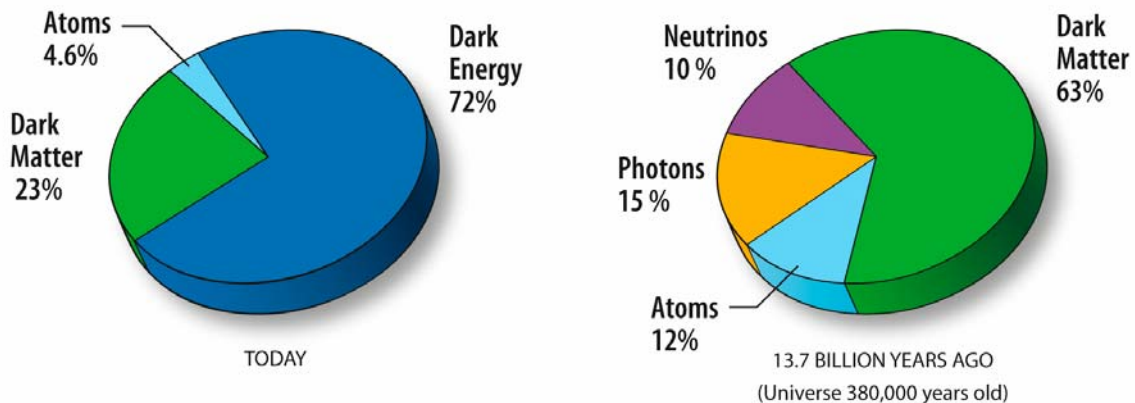


Рис. 5. Баланс энергий в современной Вселенной и на момент разделения вещества и излучения. Как видно из правой диаграммы, в «молодой» Вселенной основной вклад в энергию давала тёмная материя, вклад от тёмной энергии был пренебрежимо мал, а вклады от барионной материи (Atoms), излучения (Photons) и нейтрино (Neutrinos) по порядку величины были одинаковы. В современной Вселенной совокупный вклад от излучения и нейтрино не превышает 1 %, поскольку при расширении Вселенной они потеряли свою энергию. Плотность тёмной энергии с расширением Вселенной не менялась, отчего в настоящее время она играет доминирующую роль. Иллюстрация со страницы NASA [«WMAP Mission Results»](#).

III. Тёмная материя

1. Экспериментальные предпосылки

Идею о существовании тёмной материи впервые высказал астроном Фриц Цвики: еще в 30-х годах XX века он обратил внимание на то, что скорости движения галактик в скоплениях слишком велики, чтобы их удержать. Во всяком случае видимой материи для этого явно не хватает. В связи с этим и было сделано предположение о существовании в скоплениях чего-то ещё, невидимого, но обладающего гравитационным полем.

С развитием рентгеновской астрономии в скоплениях галактик было обнаружено рентгеновское излучение горячего (разогретого до температур порядка 10^6 К) газа, заполняющего межгалактическую среду. Таким образом, оказалась найденной часть изначально скрытой массы скоплений. Однако суммарной массы галактик и горячего межгалактического газа по-прежнему было недостаточно.

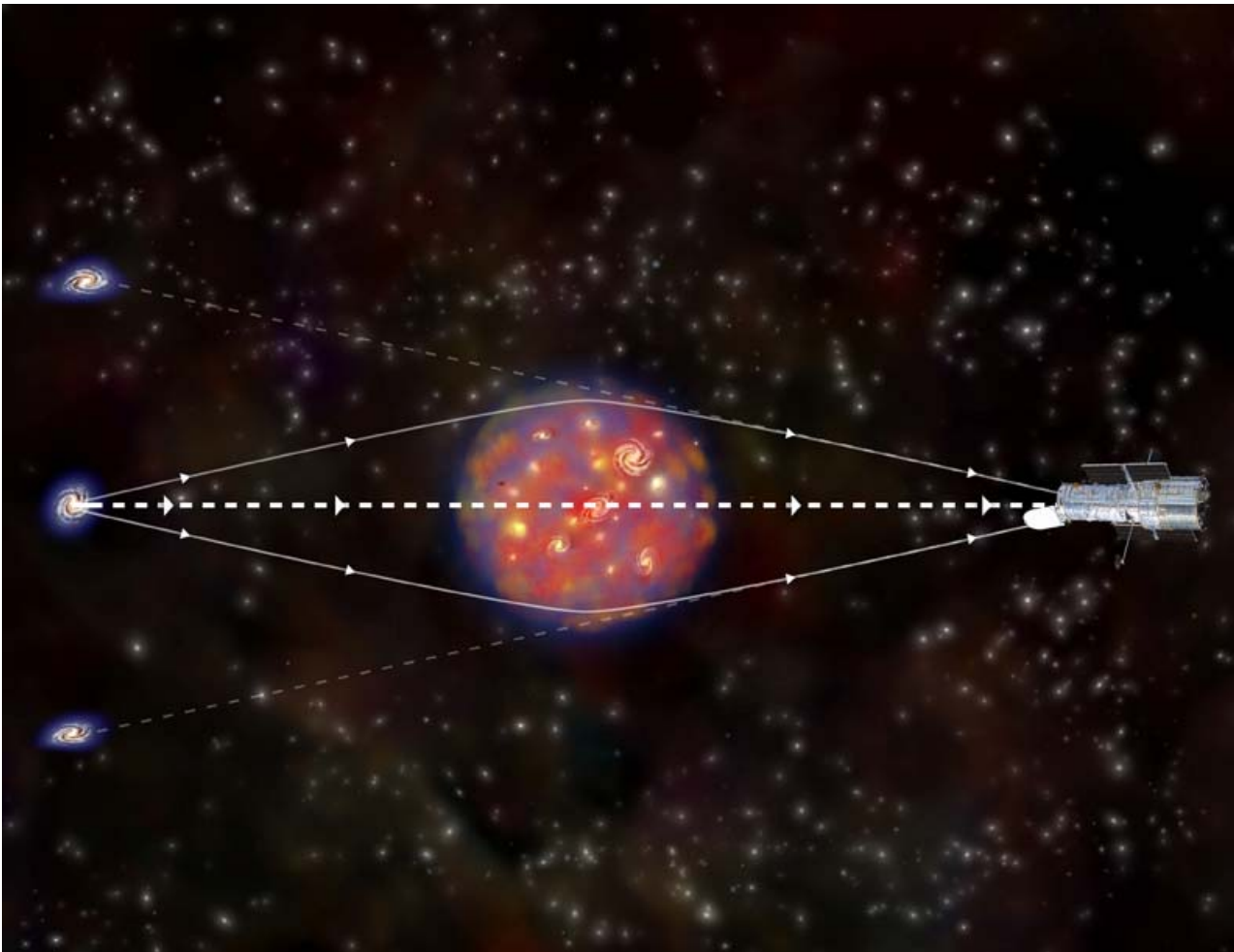


Рис. 6. Иллюстрация эффекта гравитационного линзирования. Скопление галактик (в центре) отклоняет лучи света, идущие от далёкой галактики (слева), так, что наблюдатель «видит» эту галактику дважды. Принадлежность обоих наблюдаемых изображений одному объекту определяется по идентичности спектров их излучения. Иллюстрация с сайта <http://chandra.harvard.edu/>, credit: NASA/CXC/M.Weiss.

В пользу существования тёмной материи в настоящее время говорят измерения гравитационного поля как в скоплениях галактик, так и внутри отдельных галактик. Эти измерения носят косвенный характер и базируются на *эффекте гравитационного линзирования*, который был предсказан еще в рамках ОТО. Как известно, этот эффект заключается в следующем (см. рис. 6): если на пути между наблюдателем и далёкой галактикой имеется массивный объект (например, скопление галактик), то возможно появление нескольких её мнимых изображений, поскольку этот объект будет отклонять лучи далёкой галактики подобно обычной линзе.

На рис. 7 представлено комбинированное изображение галактического скопления 1E 0657-56, известного также как «Пуля». Розовым цветом показано скопление межгалактического газа, который излучает в рентгеновском диапазоне. Галактический кластер «Пуля» образовался в результате столкновения двух скоплений галактик и за форму правого газового облака получил свое название. Интересно то, что именно в газовом скоплении и сосредоточена основная масса известной нам материи.

Голубым цветом здесь же показано распределение материи, восстановленное на основании данных о гравитационном линзировании кластером «Пуля» света далёких галактик – галактик фона. Как видно, распределение материи, управляющей гравитацией и всеми соответствующими эффектами, практически не связано с распределением обычного вещества, однако её излучение



Рис. 7. Комбинированное изображение галактического кластера 1E 0657-56 «Пуля» (иллюстрация со страницы [«1E 0657-56: NASA Finds Direct Proof of Dark Matter»](#)).

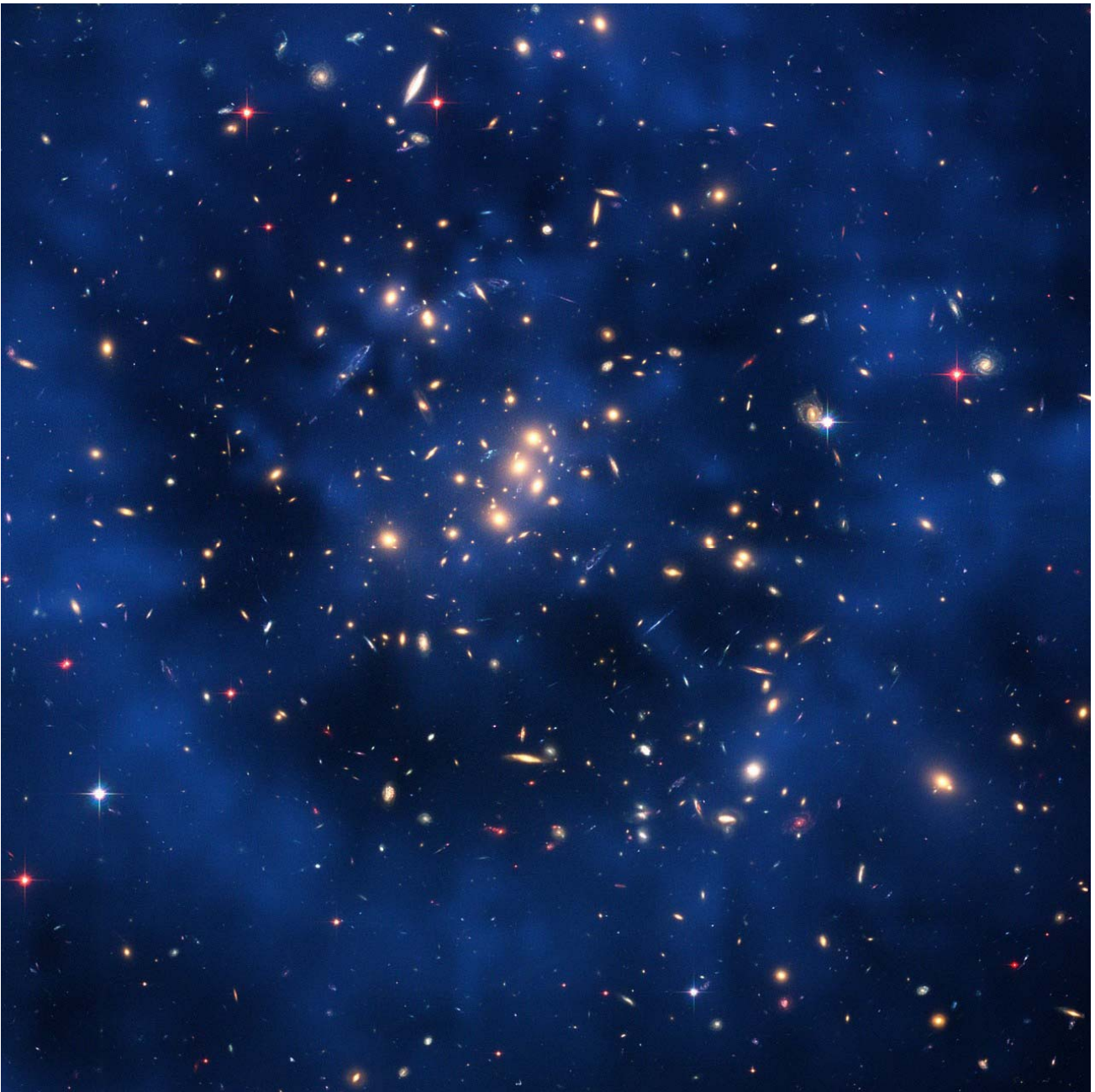


Рис. 8. Галактическое скопление 0024+17. Голубое кольцеобразное облако, а также облако в центре скопления – распределение гравитирующей материи, восстановленное на основании данных о гравитационном линзировании галактик фона (Иллюстрация из [«Image Gallery»](#) на сайте NASA).

не удаётся обнаружить ни в одном из диапазонов. Расчёты показывают, что невидимыми оказываются порядка 85 % массы скопления.

На рис. 8 показаны результаты наблюдения за галактическим скоплением 0024+17. Здесь хорошо заметны мнимые изображения далеких галактик, являющиеся следствием гравитационного линзирования – они имеют вид тонких дуг голубого цвета (см. два отдельных фрагмента в увеличенном масштабе на рис. 9). На основании данных об их расположении было восстановлено и распределение материи, ответственное за него – оно также показано на рис. 8 голубым цветом. Как видно, основная масса скопления сосредоточена в некоем кольце и никак не связана с видимой материей.

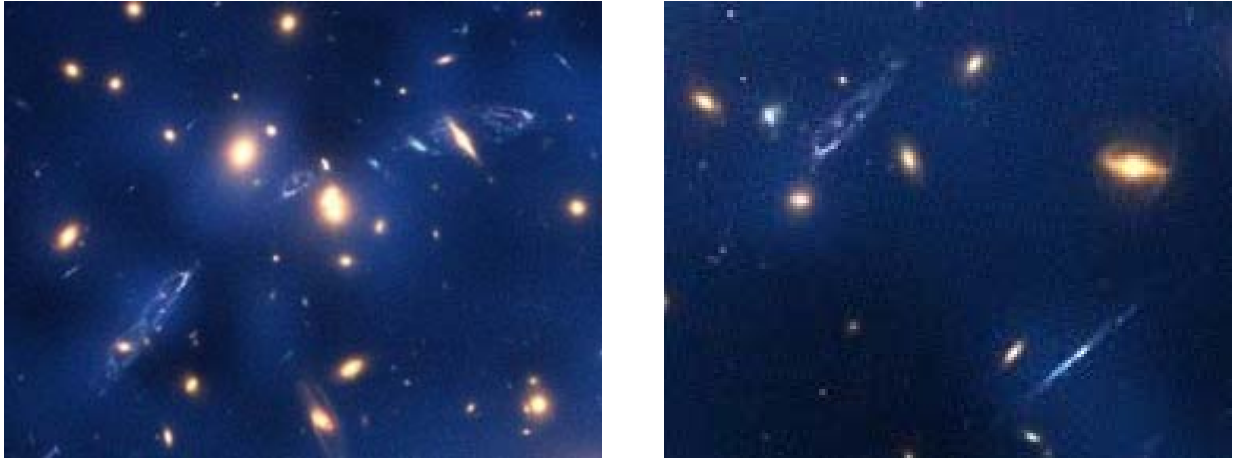


Рис. 9. Увеличенные фрагменты изображения, приведенного на рис. 8. Галактики здесь имеют желто-оранжевый цвет, а тонкие ярко-голубые линии отвечают мнимым изображениям галактик фона.

Другим экспериментальным фактом, также указывающим на существование тёмной материи, являются аномальные величины скоростей звёзд на периферии спиральных галактик.

Для отдельной звезды массой m закон всемирного тяготения

$$G \frac{mM(r)}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (11)$$

даёт следующую функцию скорости вращательного движения:

$$v = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}}. \quad (12)$$

Здесь $M(r)$ – масса материи внутри сферы радиуса r (в случае сферической или цилиндрической симметрии влияние массы, расположенной вне этой сферы, взаимно компенсируется). В первом приближении центральную область галактики можно считать сферической со средней плотностью материи $\bar{\rho}$, тогда

$$M(r) = \frac{4}{3} \pi r^3 \bar{\rho}, \quad (13)$$

откуда для скорости находим:

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \pi G \bar{\rho} r^2} \propto r. \quad (14)$$

Таким образом, во внутренней части галактики можно ожидать линейный рост скорости вращения с увеличением расстояния от центра. При рассмотрении движения отдельной звезды на периферии галактики массу $M(r)$ можно считать приблизительно постоянной, откуда для скорости вращения получаем

$$v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}. \quad (15)$$

Подводя итог проведенному здесь анализу, можно заключить, что зависимость скорости вращения звезд от расстояния до центра галактики качественно должна быть похожа на кривую, представленную на рис. 10.

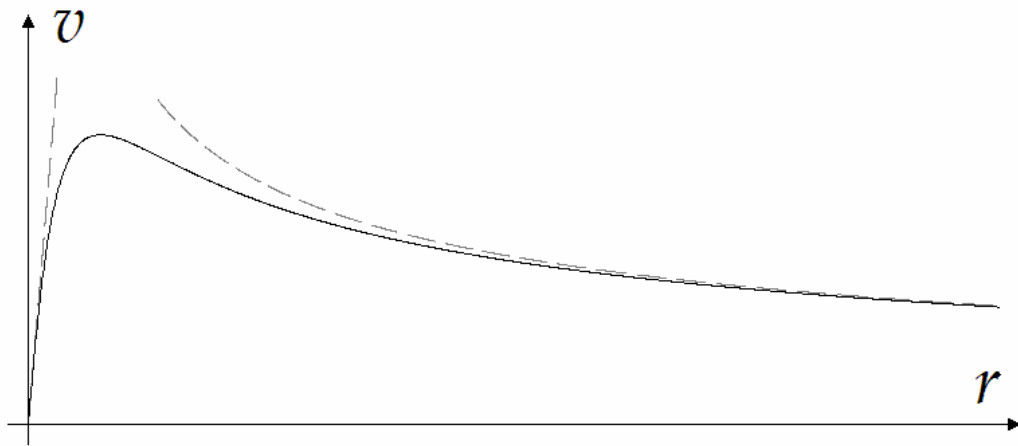


Рис. 10. Ожидаемый вид ротационной кривой для спиральных галактик, построенный на основе асимптотик (14) и (15).

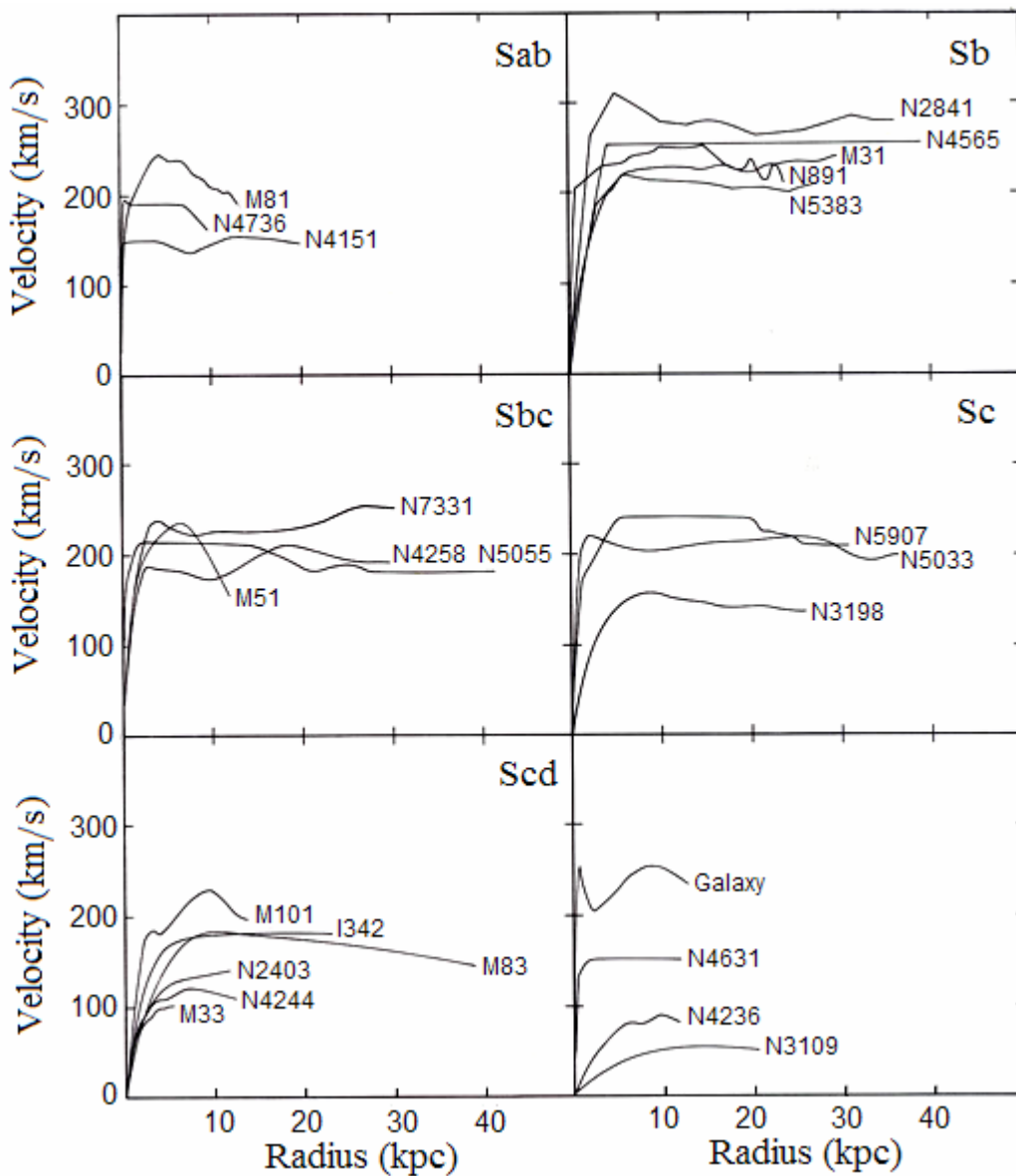


Рис. 11. Ротационные кривые по результатам астрономических наблюдений для 25 галактик различного типа по классификации Хаббла [7].

На графиках, представленных на рис. 11, приведены экспериментально полученные ротационные кривые для 25 галактик различного типа по классификации Хаббла. Нетрудно заметить, что лишь некоторые из этих кривых похожи на ожидаемую (см. рис. 10), а для основной же массы характерно отсутствие спадающего участка: скорость вращения долго не убывает, оставаясь при этом практически постоянной. Последнее означает, что звёзды удерживаются на своих орбитах каким-то мощным гравитационным полем, не связанным со звёздами и прочей обычной материей галактики, а вызванным тяготением какого-то невидимого источника. Заметим, что на роль этого невидимого источника известные нам чёрные дыры не подходят, поскольку при движении в их мощном поле тяготения скорости должны также спадать по закону (15), а этого не наблюдается.

Согласно (12), постоянство скорости вращения при больших значениях радиуса означает, что масса $M(r)$ при этом также увеличивается: $M(r) \propto r$. На основе этого факта было постулировано существование сферического гало тёмной материи, окружающего галактику и ответственного за неубывающее поведение ротационных кривых. Кроме того, сферическое гало могло бы способствовать и стабильности формы диска галактик. Модельные вычисления, выполненные для Млечного Пути, с помощью которых удалось воспроизвести ротационные кривые, приняв во внимание наличие гало, указывают на то, что значительная часть массы должна находиться именно в нём.

2. Детектирование частиц тёмной материи³

На сегодня принято считать [3, 11], что тёмная материя, скорее всего, состоит из довольно тяжелых (с массой порядка $10^2 - 10^3$ масс протона) электрически нейтральных частиц, стабильных и чрезвычайно слабо взаимодействующих с обычным веществом (ввиду чего они до сих пор и не были обнаружены). Для них придумано условное наименование – *вимп* (WIMP – *weakly interacting massive particle*). В нашей галактике в области Солнечной системы тёмной материи должно быть примерно столько же, сколько и обычной, а это значит, что вокруг нас в каждом кубическом метре пространства в среднем может быть от тысячи до десяти тысяч вимпов. В рамках существующей сейчас теории элементарных частиц для тёмной материи места нет, поэтому её частицы, видимо, являются представителями какого-то нового семейства элементарных частиц.

Буквально в апреле 2008 года появилась информация о том, что зафиксировано взаимодействие частиц тёмной материи с обычным веществом [8]. Речь идет о продолжающемся уже более десяти лет итальянском эксперименте DAMA/LIBRA (носившем ранее название DAMA/NaI). Его суть состоит в том,

³ Уже после того, как данное пособие было подготовлено и прошло стадию рецензирования, в № 11 за 2008 г. журнала «Успехи физических наук» был опубликован обзор [«Поиски частиц тёмной материи»](#) [22]. В нём обсуждаются возможные «кандидаты» на роль частиц тёмной материи, а также приведён скрупулёзный обзор нескольких десятков различных методов, используемых в настоящее время в разных уголках мира для их детектирования. Чтобы не перерабатывать уже обретший целостность материал пособия, здесь ограничимся лишь ссылкой на эту новую работу, отсылая заинтересованного читателя непосредственно к ней.

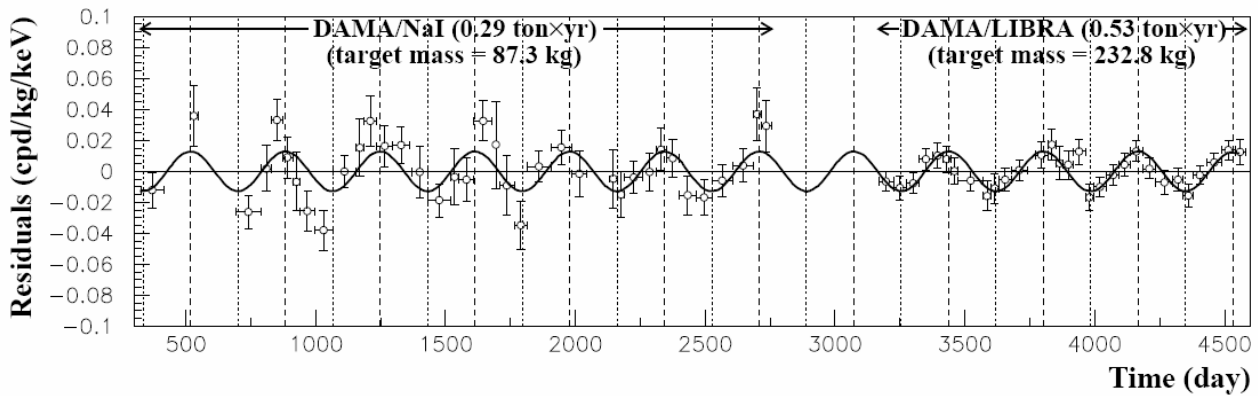


Рис. 12. Данные эксперимента DAMA/LIBRA и его ранней версии DAMA/NaI [8]. Начало отсчета времени приходится на 1 января 1995 г. – первого года работы DAMA/NaI. Вертикальные пунктирные линии отвечают второму июня, а точечные – второму декабря каждого года.

что Солнечная система, двигаясь по своей галактической орбите сквозь газ частиц тёмной материи, должна чувствовать встречный «вимповый ветер». А поскольку Земля вдобавок к этому еще движется вокруг Солнца, то мы, находясь на Земле, должны чувствовать то более сильный, то более слабый встречный поток вимпов, с периодом в один год. Экспериментальная установка, призванная это обнаружить, в основе своей состоит из 25-ти сверхчистых кристаллов NaI, в сумме имеющих массу около 250 кг. Проходящий через них поток вимпов должен с ними изредка взаимодействовать, выбивая из атомов электроны, что может быть зафиксировано окружающими детекторами.

На рис. 12 представлен график отклонения частоты актов такого взаимодействия от среднего значения, демонстрирующий очень хорошее согласие наблюдательных данных с ожидаемой зависимостью. Экспериментально полученные точки с учётом погрешностей очень хорошо ложатся на синусоиду $A \cos \omega(t - t_0)$ с периодом в один год (с точностью до десятых процента!) и $t_0 = 152.5$ суток, что соответствует второму июня. Эта дата также важна, поскольку, как показывает анализ, именно в этот день каждого года скорость вращения Земли вокруг Солнца оказывается сонаправленной вектору скорости движения Солнечной системы внутри галактики. В связи с этим и встречный «вимповый ветер» в этот день имеет максимальную интенсивность. Минимум приходится на 2-е декабря, когда соответствующие скорости ориентированы в противоположных направлениях.

В заключение отметим, что к результатам эксперимента DAMA/LIBRA научная общественность относится пока весьма скептически, поскольку другие группы исследователей этих данных не подтверждают.

Серьёзные надежды научный мир возлагает на запущенный в сентябре 2008 года [Большой Адронный Коллайдер](#) (LHC – *Large Hadron Collider*), на котором в реакции протон-протонного столкновения планируется достигнуть энергии в 14 ТэВ. Само сооружение и запуск этого ускорителя, расположенного на территории двух стран – Франции и Швейцарии, сравнивают с высадкой человека на Луну. Среди положительных прогнозов относительно результатов работы LHC, в частности, значится обнаружение бозона Хиггса, среди отрица-

тельных – рождение в ядерных реакциях микро-«чёрных дыр», которые погубят всю Вселенную. После запуска ЛHC даже родилась шутка – наша Вселенная образовалась от того, что в прошлой Вселенной кто-то запустил ЛHC.

Ну а если серьёзно, то, судя по всему, нужно запастись терпением, по крайней мере, еще на несколько лет. От ЛHC не стоит ждать быстрых результатов: столкновение тех же протонов занимает мгновение, а на обработку, обсчёт экспериментальных данных могут уйти месяцы и даже годы.

3. Тёмная материя: а материя ли?

Возможен и качественно иной подход к интерпретации и объяснению результатов гравитационного линзирования и аномалий ротационных кривых отдельных галактик. Дело в том, что все комментарии, которые сопровождают данные упомянутых экспериментов, даются, так или иначе основываясь на ОТО как современной, проверенной теории гравитации. Однако не будет большим откровением заметить, что *не существует экспериментов, подтверждающих теорию*, – это теория может лишь согласовываться или не согласовываться с результатами экспериментов. Таким образом, если ОТО с достаточной точностью описывает некоторые эффекты, то вполне могут существовать и другие теории, которые делают это не с худшей точностью. И в то же время, если в ОТО для объяснения, например, невыполнения зависимости (15) требуется привлечение тёмной материи, в рамках какой-либо альтернативной теории гравитации то же самое может быть объяснено и без привлечения *новых сущностей*.

В этом смысле полезно напомнить читателю о важном методологическом принципе, известном как *бритва Оккама*: «Не следует множить сущности без необходимости». В современной науке под бритвой Оккама обычно понимают более общий принцип, утверждающий, что если существует несколько логически непротиворечивых определений или объяснений какого-либо явления, то следует считать верным самое простое из них.

В настоящее время можно насчитать, по крайней мере, несколько десятков альтернативных теорий гравитации, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки в объяснении тех или иных явлений. Довольно подробная классификация этих теорий приведена на странице [«Альтернативные теории гравитации»](#), где указано и более 60-ти ссылок на оригинальные работы. Однако в рамках настоящего пособия не хотелось бы глубоко уходить в эту непростую область науки, подробному рассмотрению которой можно посвятить, по крайней мере, несколько толстых томов. Здесь хотелось бы упомянуть лишь одну теорию, информации о которой на упомянутой Интернет-странице найти не удастся.

Существует так называемая *теория глобального времени* (далее ТГВ) [12, 20]. Её принципиальным преимуществом перед многими другими альтернативными теориями является то, что она не перечеркивает ОТО, являясь, фактически, результатом её дальнейшего развития по пути эволюции. ТГВ также базируется на принципе эквивалентности, а её объектом является трёхмерное

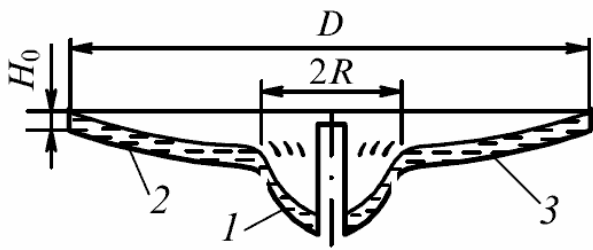


Рис. 13. Вторая модификация установки «Спираль» [9]: 1 – центральная часть, вращающаяся с угловой скоростью Ω_1 , 2 – наружная часть, вращающаяся с угловой скоростью Ω_2 , 3 – слой мелкой воды. Части 1 и 2, имеют форму параблоидов. $D = 60$ см, $R = 8$ см.

риманово пространство, динамика которого во времени подчиняется определённым уравнениям. Самое важное здесь то, что формально, математически эта теория как бы обобщает ОТО, расширяя класс её решений. Так вот, с точки зрения ТГВ спиральная структура галактик связана с пространственными вихрями, а звёзды как лёгкие пылинки, попавшие в этот вихрь, позволяют лишь их визуализировать. Таким образом, форма ротационных кривых в ТГВ оказывается вовсе не связанной с гравитацией звёзд (оказывается возможным ей пренебречь!), отчего и асимптотическая зависимость (15) также не обязана выполняться.

Косвенным указанием на верную идеологию ТГВ, касающуюся рассмотрения трёхмерного пространства как эволюционирующего во времени динамического поля, можно, пожалуй, считать тот факт, что уже в течение трёх последних десятилетий спиральная структура галактик моделируется на Земле на установках с вращающейся «мелкой водой» (см. обзор [9]). На рис. 13 приведена схема такой установки. Принцип её работы заключается в следующем. Жидкость вовлекается дном во вращение, при этом между центральной частью и периферией образуется скачок скорости вращения с радиусом R и шириной, близкой к глубине жидкости H_0 . В результате слой мелкой воды приобретает скачок на радиальном профиле скорости вращения, имитирующий скачок на кривой вращения галактики, способный вызвать генерацию спиральных волн плотности. Это позволило авторам исследования использовать установку «Спираль» для моделирования динамических процессов в газовом галактическом диске со скачком на ротационной кривой. (Согласно астрономическим наблюдениям, такой скачок в 10-15 % имеют около половины спиральных галактик.) Интересно то, что эксперименты с мелкой водой позволили открыть и изучить некоторые особенности спиральных структур, которые уже позже были обнаружены в реальных галактиках.

Важным результатом этих исследований является указание на большую роль гидродинамических эффектов в формировании спиральной структуры галактик (до этого её связывали лишь с гравитацией). Таким образом, динамические свойства галактик более чем адекватно моделируются гидродинамическими процессами в сплошной среде. Не похожа ли, случайно, эта сплошная среда на пространство в ТГВ? Аналогия станет, пожалуй, ещё полнее, если в описанном выше эксперименте на поверхность воды высыпать, например, деревянные опилки: последние будут моделировать отдельные звёзды, чья гравитация в формировании вихревой структуры галактик с точки зрения ТГВ играет пренебрежимо малую роль.

IV. Тёмная энергия

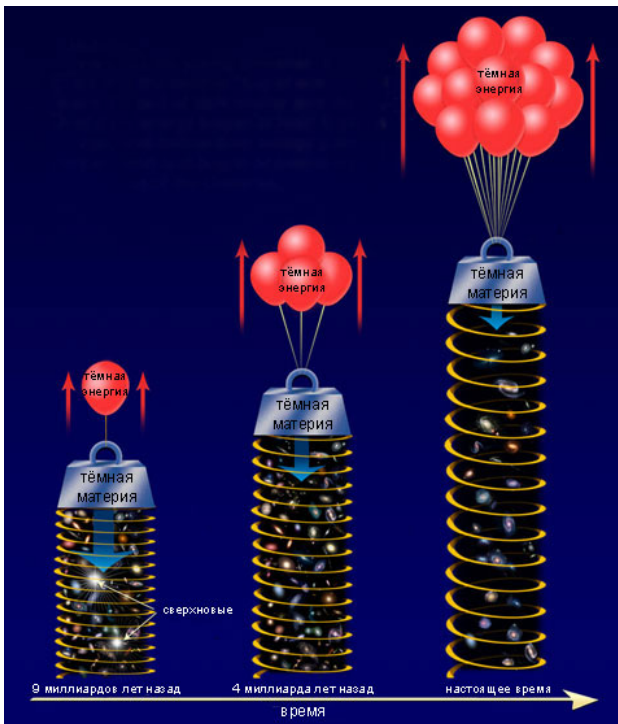
Как уже говорилось, согласно данным эксперимента WMAP, наш мир с высокой степенью точности – плоский. С другой стороны, согласно решению Эйнштейна-де Ситтера (уже упоминавшейся здесь модели ОТО, отвечающей нулевой кривизне пространства Вселенной) масштаб расстояний в такой Вселенной должен расти со временем пропорционально $t^{2/3}$, а, значит, скорость расширения должна меняться пропорционально $t^{-1/3}$, т.е. со временем убывать. Парадокс же заключается в том, что *наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением*.

Это ускоренное расширение связывают со своего рода *антитяготением*, вызванным неизвестным источником – тёмной энергией. По характеристике академика РАН В.А. Рубакова [15] тёмная энергия не собирается в сгустки, как, например, тёмная материя, а однородно разлита по Вселенной. Она не проявляет себя ни в излучении, ни в поглощении или рассеянии света и имеет отрицательное давление.

Как следует понимать отрицательность давления тёмной энергии? Если, к примеру, взять сосуд, в котором находится некоторое количество обычного газа, то внутри него будет определённое давление. Если теперь то же количество газа запустить в сосуд бóльшего объёма, давление в нём при отсутствии теплообмена станет меньше. Почему уменьшается давление газа? Потому что газ уменьшил свою плотность, стремясь занять весь возможный объём. II-й закон термодинамики при этом так связывает изменение внутренней энергии газа dE с изменением объёма dV :

$$dE = -pdV . \quad (16)$$

У тёмной энергии плотность неизменна, поэтому при увеличении объёма количество тёмной энергии в нём возрастает. Тогда, согласно (16), следует констатировать, что давление рассматриваемой среды отрицательно.



На рис. 14 показано, как художник изображает расширение Вселенной. Тёмная энергия представлена здесь воздушными шариками, расширяющими Вселенную, причём, чем больше она становится, тем больше становится и шариков, в результате чего расширение ускоряется. Изображённый здесь процесс хорошо согласуется и с диаграммами, приведёнными на рис. 5: количество обычной материи и тёмной

материи и тёмной энергии. На рис. 14 показано, как художник изображает расширение Вселенной. Тёмная энергия представлена здесь воздушными шариками, расширяющими Вселенную, причём, чем больше она становится, тем больше становится и шариков, в результате чего расширение ускоряется. Изображённый здесь процесс хорошо согласуется и с диаграммами, приведёнными на рис. 5: количество обычной материи и тёмной

Рис. 14. Интерпретация влияния тёмной энергии на эволюцию Вселенной (Credit: NASA, ESA, A. Field/STScI).

в целом не изменилось, однако плотность их энергии уменьшилась ввиду расширения пространства. Плотность тёмной энергии с расширением Вселенной не менялась, отчего в настоящее время в общем энергетическом балансе она играет доминирующую роль.

Каким образом в рамках ОТО можно было бы описать тёмную энергию и объяснить эффект «антитяготения»? Ещё в начале XX века Эйнштейн, стремясь слегка модифицировать уравнения ОТО, ввёл в них так называемый Λ -член:

$$G_i^j = \frac{8\pi G}{c^4} T_i^j \quad \Rightarrow \quad G_i^j + \Lambda \delta_i^j = \frac{8\pi G}{c^4} T_i^j. \quad (17)$$

Важно понимать, что чисто математически это ниоткуда не следовало, но, с другой стороны, ничему и не противоречило: в уравнениях ОТО Λ -член мог бы играть роль своего рода константы интегрирования. Создатель ОТО ввёл в свои уравнения дополнительное слагаемое, главным образом, для того, чтобы получить решения, описывающие вечную неизменную Вселенную, какой она тогда всем казалась. Однако в 1922 г. появились модели Фридмана, описывающие расширяющуюся Вселенную, а в 1929 г. Хаббл экспериментально показал, что расширение действительно имеет место. После этого Эйнштейн отказался от Λ -члена, назвав его самой большой ошибкой своей жизни.

Однако несмотря на это, интерес многих физиков к этому слагаемому во все не ослабел, а в последние два десятилетия ещё и активизировался, как раз в связи с возможным приложением к феномену тёмной энергии.

Еще в 60-е годы XX века возникла так сказать «материальная» интерпретация Λ -члена. Дело в том, что в уравнениях ОТО левая часть – «геометрическая», а правая – «материальная». Λ -член изначально был помещен в «геометрическую» часть уравнений, а будучи перенесён вправо, он мог бы быть физически связан с некоторой однородной средой с неизменной во времени плотностью:

$$\rho = \frac{c^2 \Lambda}{8\pi G}. \quad (18)$$

Интересно, что эта плотность должна быть также одинакова и во всех системах отсчета.

Одним из возможных кандидатов на роль тёмной энергии является, как это ни покажется парадоксальным, энергия вакуума. С другой стороны, немного порассуждав, нетрудно прийти к выводу, что вакуум является единственно возможной однородной средой с постоянной плотностью, одинаковой во всех системах координат, средой с отрицательным давлением. Подводя некоторый итог, заметим, что в настоящее время некоторыми учёными энергия вакуума однозначно отождествляется с Λ -членом в уравнениях ОТО и наоборот [11].

Как и в случае с тёмной материей, существуют и альтернативные подходы к объяснению ускоренного расширения Вселенной. Есть, например, версии, что тёмная энергия – это энергия какого-то нового сверхслабого поля, которое называют также квинтэссенцией, фантомным полем и т.п. Возможно, тёмная энергия «всего лишь» следствие иных законов гравитации на космологических расстояниях.

В рамках уже упоминаемой ранее теории глобального времени вопрос о тёмной энергии решается предельно просто. В ТГВ существуют решения, описывающие однородно расширяющуюся Вселенную вообще без материи (что категорически невозможно в ОТО) за счёт динамических свойств самого пространства. Тут можно провести некую аналогию, например, с электродинамикой: электромагнитное поле может существовать без зарядов и токов, так сказать, само по себе.

Таким образом, само пространство может вести себя так, как мы это наблюдаем, и никакой тёмной энергии для объяснения этого поведения вовсе не требуется.

Какая из нынешних версий окажется ближе к истине – покажет время. На сегодня мы можем лишь констатировать, что проблема тёмной энергии, впрочем, как и тёмной материи, остаётся актуальной с точки зрения не только теории гравитации и космологии – она важна для всей современной фундаментальной физики.

Литература

- [1]. И.Д. Новиков, В.П. Фролов, *Чёрные дыры во Вселенной* // [УФН 171, 307 \(2001\)](#).
- [2]. A.M. Ghez *et al*, *Stellar Orbits Around the Galactic Center Black Hole* // *Astrophys.J.* **620**, 744-757 (2005); [arXiv:astro-ph/0306130v2](#)
- [3]. В.А. Рубаков, *Иерархии фундаментальных констант (к пунктам 16, 17 и 27 из списка В.Л. Гинзбурга)* // [УФН 177, 407 \(2007\)](#).
- [4]. Научные отчеты по экспериментам WMAP (см. ссылки на странице *Bibliography of WMAP Science Team Publication: Five Year Data Scientific Papers*, http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/map_bibliography.cfm)
- [5]. Заметка «*IE 0657-56: NASA Finds Direct Proof of Dark Matter*» и ссылки в ней // сайт о работе телескопа «Чандра» (<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/index.html>)
- [6]. Статья «*NASA – Dark Matter*» и ссылки в ней // сайт NASA (http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_827.html)
- [7]. [A. Bosma, *The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types*, PhD Thesis, Groningen Univ., \(1978\).](#)
- [8]. R. Bernabei *et al*, *First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI*, <http://arxiv.org/abs/0804.2741>
- [9]. А.М. Фридман, *Предсказание и открытие новых структур в спиральных галактиках* // [УФН 177, 121 \(2007\)](#).
- [10]. А.Д. Чернин, *Тёмная энергия и всемирное антитяготение* // [УФН 178, 267 \(2008\)](#).
- [11]. В.Н. Лукаш, В.А. Рубаков, *Тёмная энергия: мифы и реальность* // [УФН 178, 301 \(2008\)](#).
- [12]. Д.Е. Бурланков, *Время, пространство, тяготение*. Москва-Ижевск: РХД, 2006 (см. ссылки на странице <http://www.nifti.unn.ru/burlankov/>).

Кроме того, можно порекомендовать и ряд «надежных» научно-популярных источников:

- [13]. Д. Вибе, *Откуда астрономы это знают?* // *Элементы* (<http://elementy.ru/lib/430399>)
- [14]. Х. Малдасена, *Чёрные дыры и структура пространства-времени* // *Элементы* (<http://elementy.ru/lib/25531>)
- [15]. В.А. Рубаков, *Тёмная материя и тёмная энергия во Вселенной* // *Элементы* (<http://elementy.ru/lib/25560>)
- [16]. И.А. Сокальский, *Тёмная материя* // «Химия и жизнь» **11**, 24 (2006) (доступно также по адресу <http://elementy.ru/lib/430380>)
- [17]. D. Shiga, *Ring of dark matter surrounds cosmic collision* // *New Scientist Space* (<http://space.newscientist.com/article/dn11860-ring-of-dark-matter-surrounds-cosmic-collision.html>)

- [18]. *Jigsaw Puzzle of the Universe Invisible Dark Mystery, Dark Matter* // Science Mode (<http://sciencemode.com/2007/10/01/jigsaw-puzzle-of-the-universe-invisible-dark-mystery-dark-matter/>)
- [19]. И. Иванов, *Эксперимент ДАМА по-прежнему «видит» частицы тёмной материи* // Элементы (<http://elementy.ru/news/430713>)
- [20]. Д.Е. Бурланков, *Пространство, время, космос, кванты*. Н.Новгород: ННГУ, 2007 (Доступно в электронном виде [здесь](#). См. также ссылки на странице <http://www.nifti.unn.ru/burlankov/>).
- [21]. А.Д. Линде, *Многоликая Вселенная* // Элементы (<http://elementy.ru/lib/430484>)

Дополнительно можно рекомендовать «свежий» обзор, посвящённый детектированию частиц тёмной материи и вышедший уже после того, как настоящее пособие было окончательно оформлено и прошло рецензирование (см. сноску на стр. 17):

- [22]. В.А. Рябов, В.А. Царёв, А.М. Цховребов, *Поиски частиц тёмной материи* // [УФН 178, 1129 \(2008\)](#).

Содержание

Введение	3
I. Чёрные дыры	4
II. Модели Фридмана и данные эксперимента WMAP	9
III. Тёмная материя	12
1. <i>Экспериментальные предпосылки</i>	12
2. <i>Детектирование частиц тёмной материи</i>	17
3. <i>Тёмная материя: а материя ли?</i>	19
IV. Тёмная энергия	21
Литература	24

Александр Игоревич Малышев

НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Учебно-методическое пособие

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать **XX.11.2008**