

Оценка локальной плотности темной энергии в пространственном масштабе нескольких мегапарсек

В. П. Долгачев, Л. М. Доможилова^a, А. Д. Чернин

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13.
E-mail: ^adom@sai.msu.ru

Статья поступила 23.04.2009, подписана в печать 28.05.2009.

Изучение динамики местной хаббловской ячейки (Местная группа галактик вместе с потоком разбегания вокруг нее) на основе новейших наблюдательных данных, полученных с помощью космического телескопа «Хаббл», позволяет найти новые свидетельства в пользу существования темной энергии на расстояниях в несколько мегапарсек. При этом ячейка оказывается естественным измерительным прибором для количественного определения двух важнейших физических характеристик ближней Вселенной — полной массы темной материи (и барионов) в объеме Местной группы галактик и локальной плотности темной энергии. Новая независимая оценка локальной плотности темной энергии показывает, что ее величина близка к глобальному значению, известному по наблюдениям на расстояниях в несколько тысяч мегапарсек, а возможно, обе плотности точно равны друг другу.

Ключевые слова: галактики, группы галактик, темная энергия.

УДК: 524.7. PACS: 04.50.+h, 98.80.-k.

Введение

Темная энергия — невидимая антигравитирующая среда, на которую приходится 70–75% всей энергии/массы наблюдаемой Вселенной. Ее физическая природа и микроскопическая структура остаются неизвестными — это одна из острых нерешенных проблем фундаментальной физики. Тем не менее факт существования темной энергии и ее вклад в наблюдаемый энергетический баланс Вселенной можно считать надежно установленными (см., напр., [1, 2]). Темная энергия была открыта в астрономических наблюдениях на самых больших космологических расстояниях порядка тысячи мегапарсек (Мпк) [3, 4]. В этом глобальном масштабе создаваемое ею антитяготение сильнее тяготения, и оно заставляет далекие галактики разбегаться с возрастющей со временем скоростью, что и было зарегистрировано в наблюдениях [3, 4], а затем и в ряде других исследований, выполненных за последние 10 лет.

Существует ли темная энергия на относительно малых астрономических расстояниях? И если да, то насколько сильными могли бы быть ее локальные динамические эффекты? Опираясь на макроскопическую интерпретацию темной энергии в духе эйнштейновской идеи космологической постоянной, принятую в стандартной космологической модели, мы показали, что создаваемое темной энергией антитяготение способно быть сильнее тяготения в масштабе порядка одного Мпк (см. обзоры [5, 6]) и обсуждаемые в них оригинальные работы.

В настоящей статье мы продолжаем изучение темной энергии в ближней Вселенной. Мы рассматриваем Местную группу галактик и поток разбегания вокруг нее как единую физическую систему, связанную общим происхождением и эволюцией. Системы такого вида — локальные хаббловские ячейки — типично население ближней Вселенной. Используя местную хаббловскую

ячейку в качестве естественной измерительной установки для количественного исследования эффектов антитяготения, мы находим оценку локальной плотности темной энергии. Одновременно с этим оказывается возможным дать новую независимую оценку массы темной материи и барионов, содержащихся в галактиках Местной группы.

1. Задача двух тел на фоне темной энергии

Наша Галактика и Туманность Андромеды (M31) — гигантские галактики, составляющие гравитационно связанный двойной систему. Центры двух гигантских галактик находятся на расстоянии 0.7 Мпк друг от друга, и галактики движутся навстречу друг другу со скоростью 120 км/с. Вместе с примерно 50 галактиками-карликами они образуют Местную группу галактик, которая располагается в объеме с попечником в 2–2.5 Мпк. В классической модели Кана и Волтье [7] динамика двойной системы описывается — в первом и главном приближении — в рамках прямолинейной задачи двух тел. Модель позволяет найти нижний и верхний пределы для массы Местной группы, так что ее величина оказывается в интервале $M = (1-3) \cdot 10^{12} M_{\odot}$. Эта масса примерно в 10 раз больше суммарной массы светящегося вещества (барионов) Местной группы. Таким путем полвека назад была открыта темная материя в двух гигантских галактиках Местной группы.

В новой постановке задачи Кана–Волтье, предложенной нами в работе [8], учитывается присутствие в пространстве темной энергии, плотность которой считается однородной в пространстве и постоянной во времени. Значение плотности, $\rho_v = 0.75 \cdot 10^{-29}$ г/см, считается известным по глобальным космологическим наблюдениям. Двойная система Галактика–M31, а также Местная группа в целом и поток разбегания вокруг нее погружены в темную энергию, и это привносит в задачу новый динамический фактор — антитяготение.

С учетом антитяготения оценка (по той же процедуре, что и в [9]) нижнего и верхнего пределов для массы группы дает [8]: $M_1 < M < M_2$, где $M_1 = 3.3 \cdot 10^{12} M_\odot$, $M_2 = 4.1 \cdot 10^{12} M_\odot$.

Как мы видим, масса системы оказывается заметно больше, чем в задаче [7]. Причина состоит в том, что антитяготение темной энергии, заключенной в объеме системы, частично компенсирует тяготение барионов и темного вещества галактик. Поэтому для разгона двух тел до той же взаимной скорости при том же расстоянии между ними за то же время требуется заметно больше тяготеющей массы. Этот эффект «спрятанной массы» оказывается весьма сильным в масштабе Местной группы: он меняет оценку массы не на проценты, а в полтора-три раза.

2. Потенциал тяготения–антитяготения

Вокруг Местной группы на расстояниях 1.5–3 Мпк наблюдается местный поток разбегания, который образован тремя десятками галактик-карликов, удаляющихся от центра группы. В динамической картине местной хаббловской ячейки, рассматриваемой как единная изолированная физическая система, удаляющиеся галактики-карлики потока можно считать пробными частицами, движущимися в потенциале тяготения–антитяготения, создаваемом галактиками группы и общим фоном темной энергии. Этот потенциал имеет характер, показанный на рис. 1. Во внутренней области группы он определяется в основном тяготением двойной системы Галактика-М31; здесь потенциал имеет характерную двухкомпонентную структуру в пространстве и зависит от времени из-за относительного движения галактик двойной системы. На больших расстояниях от барицентра системы изопотенциальные поверхности приближаются к сферической форме; по этой причине потенциал практически перестает зависеть от времени. Как видно из рис. 1, в области потока, т. е. на расстояниях 1.5–3 Мпк от барицентра, потенциал тяготе-

ния–антитяготения оказывается практически сферически-симметричным и (по этой причине) статическим.

С учетом этого обстоятельства можно считать, что на каждую малую галактику потока действует ньютоновская сила притяжения к группе, $F_N = -GM/R^2$, созданная массой M в системе отсчета, связанной с барицентром группы (здесь R — расстояние данной галактики от барицентра системы). На эту частицу действует (в той же системе отсчета) также эйнштейновская сила всемирного антитяготения, созданная фоном темной энергии (см., напр., [5, 6]): $F_E = -\frac{4\pi}{3}G\rho_{v\text{ eff}}R^3/R^2 = +\frac{8\pi}{3}G\rho_v R$, где $\rho_{v\text{ eff}} = \rho_v + 3p_v$ — эффективная гравитирующая плотность темной энергии, определяемая в соответствии с общей теорией относительности. Тяготение и антитяготение точно компенсируют друг друга при $R = R_0$, где $R_0 = \left(\frac{3M}{8\pi\rho_v}\right)^{1/3} \simeq (M/(10^{12} M_\odot))^{1/3}$ Мпк.

Величина R_0 — радиус нулевого тяготения, ключевая физическая характеристика хаббловской ячейки, критическое расстояние, разделяющее две области ячейки — внутреннюю, где преобладает тяготение Местной группы, и внешнюю, где преобладает антитяготение космического вакуума (см. [5, 6]). Принимая найденный выше (разд. 1) интервал значений массы Местной группы $M = (3.3\text{--}4.1) \cdot 10^{12} M_\odot$, найдем, что радиус нулевого тяготения лежит в довольно узких пределах: $R_0 = (1.4\text{--}1.6)$ Мпк.

3. Локальная плотность темной энергии

Можно ли решить для радиуса нулевого тяготения обратную задачу: найти величину R_0 непосредственно из наблюдательных данных о местной хаббловской ячейке? Наиболее полные и самые точные наблюдательные данные о Местной группе и местном потоке, полученные с помощью космического телескопа «Хаббл» и других крупных астрономических инструментов, представлены в работе [9].

Очевидно, что Местная группа как гравитационно-связанная система может существовать только внутри области $R < R_0$, где тяготение сильнее антитяготения; так оно и есть: по данным [9], галактики-спутники движутся в пределах расстояний 1.2–1.3 Мпк от барицентра группы и полный объем, занятый группой, не выходит за эти пределы. Тогда расстояние в 1.2 Мпк нужно считать нижней границей для радиуса нулевого тяготения R_0 . С другой стороны, на расстояниях 1.5–1.6 Мпк и более наблюдается довольно регулярная кинематическая структура локального потока разбегания. Скорости удаления в потоке близко следуют линейной зависимости от расстояния (закон Хаббла). Дисперсия скоростей весьма мала и не превосходит 30 км/с. Если эта регулярность действительно обязана антитяготению темной энергии, как показано в [5, 6] и цитируемых там работах, то величину 1.6 Мпк нужно считать верхней границей для R_0 .

Тогда из выражения для R_0 можно найти соответственно верхний и нижний пределы, в которых должна лежать масса Местной группы: $M < M_3 = 3.9 \cdot 10^{12} M_\odot$; $M > M_4 = 1.7 \cdot 10^{12} M_\odot$. Легко видеть, что эти пределы близки к тем, что были найдены выше из динамики

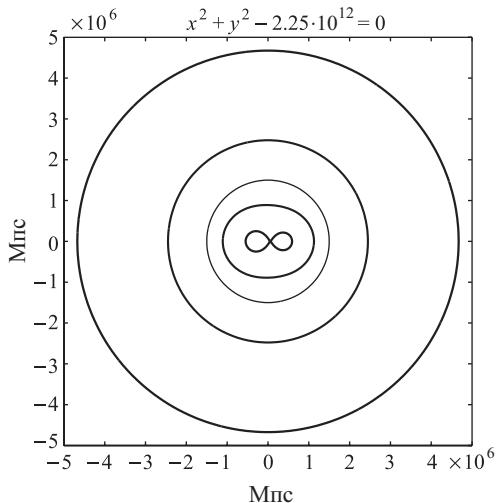
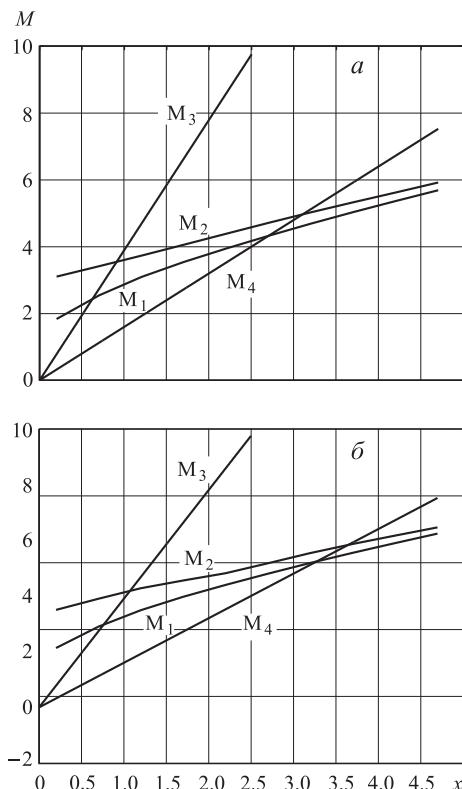


Рис. 1. Потенциал тяготения-антитяготения в объеме местной хаббловской ячейки. Показаны эквипотенциальные поверхности в сечении плоскостью, проходящей через ось симметрии системы. Для определенности принято, что масса Местной группы $M = 3.5 \cdot 10^{12} M_\odot$

двойной системы Галактика–М31 с учетом фона темной энергии. Это означает, что в рассматриваемой задаче существует определенного рода непротиворечивость и самосогласованность.

Придадим теперь задаче о динамике местной хаббловской ячейки более общий вид. Именно не будем считать *a priori*, что локальная плотность темной энергии (обозначим ее теперь как ρ_x) в пространственном масштабе порядка нескольких Мпк тождественно равна глобальному значению ρ_v , известному по наблюдениям в масштабе Вселенной как целого. Тогда эта величина станет в нашей задаче неизвестной, подлежащей определению. При этом верхний и нижний пределы массы Местной группы M_1 и M_2 , введенные в разд. 1, станут функциями локальной плотности или отношения $x = \rho_x/\rho_v$; эти функции, вычисленные по уравнениям работы [8], показаны на рис. 2, а. Величины M_3 и M_4 также являются теперь функциями переменной $x = \rho_x/\rho_v$; они показаны на диаграмме рис. 2, а как лучи, даваемые соотношениями $M_3(x) = 4.1 \cdot 10^{12} M_\odot$ и $M_4(x) = 1.7 \cdot 10^{12} M_\odot$. Лучи ограничивают слева и справа область возможных значений массы Местной группы. Тем самым возникает новая оценка массы Местной группы: $M = (3.2\text{--}5.4) \cdot 10^{12} M_\odot$. Этот результат находится в хорошем согласии с данными «Millennium Simulation» [10], полученными при численном моделировании происхождения и эволюции систем типа местной хаббловской ячейки в рамках стандартной космологической модели.



Особенно интересно, что диаграмма рис. 2, а позволяет получить независимую оценку локальной плотности темной энергии: $\rho_x = (0.8\text{--}3)\rho_v$. Значение, при котором локальное и глобальное значения плотности точно совпадают, $\rho_x = \rho_v$, лежит внутри этого интервала.

Заключение

Изучение динамики местной хаббловской ячейки на основе новейших наблюдательных данных о ней дает новые свидетельства в пользу существования темной энергии в масштабе нескольких Мпк. При этом хаббловская ячейка, погруженная в темную энергию, служит в качестве измерительного прибора, подаренного нам природой для количественного определения двух самых важных физических характеристик ближней Вселенной — полной массы темной материи (и барионов) в объеме Местной группы галактик и локальной плотности темной энергии. Полученная выше новая оценка локальной плотности темной энергии показывает, что величина ρ_x близка к глобальному значению ρ_v ; при этом не исключается, что обе величины тождественно равны. Результат согласуется с нашими прежними оценками [5, 6]. Преимущество новой независимой оценки состоит в том, что она не нуждается в специальном предположении о величине массы Местной группы. Обе величины, ρ_x и M , находятся в рамках общей для них обеих самосогласованной процедуры.

Заметим, что в работе [9] астрономы-наблюдатели предлагают принять в расчет наличие в Местной группе крупных (хотя и карликовых) спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды (М31) — это соответственно Большое Магелланово Облако (БМО) и галактика Треугольник (М33). Если оставаться в рамках задачи двух тел, это обстоятельство можно эффективно учесть, пересчитав наблюдаемую относительную скорость двух масс таким путем, чтобы это была в действительности относительная скорость центров масс пары Млечный Путь–БМО и пары М31–М33. По данным [9], эта скорость составляет 109 км/с в современном состоянии системы. Если ее принять, то процедура, описанная выше в разд. 3, даст новое значение полной массы группы (см. рис. 2, б): она будет лежать в интервале $M = (0.8\text{--}2.7) \cdot 10^{12} M_\odot$. Как мы видим, оценка полной массы системы оказывается довольно устойчивой — при весьма заметном изменении исходных данных о скорости она изменяется не очень сильно: с точностью до первой значащей цифры результат остается прежним. Столь же устойчивой оказывается и оценка локальной плотности темной энергии: $\rho_x = (0.6\text{--}4.5)\rho_v$.

Подчеркнем, что при обеих оценках локальная и глобальная величины плотности темной энергии близки, если точно не совпадают друг с другом. Это обстоятельство служит дополнительным эмпирическим аргументом в пользу интерпретации темной энергии как среды с постоянной (во времени и пространстве) плотностью, соответствующей эйнштейновской идеи космологической постоянной.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Ефремову, В. М. Липунову, А. М. Черепашку за ценные замечания, сделанные при обсуждении работы на семинаре

памяти Я. Б. Зельдовича (ГАИШ, 13 марта 2009 г.).
Мы благодарны также М. Валтонену, П. Теерикорпи,
Дж. Берду за сотрудничество.

Список литературы

1. Weinberg S. Cosmology. Oxford, 2008.
2. Черепащук А.М., Чернин А.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 5, С. 3.
3. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. // Astron. J. 1998. **116**. P. 1009.
4. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. // ApJ. 1999. **517**. P. 565.
5. Чернин А.Д. // УФН. 2008. **171**. С. 1153.
6. Чернин А.Д. // УФН. 2008. **178**. С. 267.
7. Kahn F.D., Woltjer L. // Astrophys. J. 1959. **130**. P. 705.
8. Chernin A.D., Teerikorpi P., Valtonen M.J. et al. // arXiv. 2009. 0902.3871.
9. Karachentsev I.D., Kashibadze O.G., Makarov D.I., Tully R.B. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. **393**. P. 1265.
10. Li Y.-S., White S.M.D. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008. **384**. P. 1459.

Estimation of the local density of dark energy on the spatial scale of a few megaparsec

V. P. Dolgachev, L. M. Domozhilova^a, A. D. Chernin

Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^adom@sai.msu.ru.

Dynamical studies of the local Hubble cell (the Local group of galaxies together with the expansion flow around it) with the use of the recent observation data from the Hubble Space Telescope provide new evidence for the dark energy existence on the distances of a few megaparsec. The cell proves to be a natural measurement setup for the quantitative determination of the two most important physical characteristics of the nearby Universe which are the total mass of dark matter (and baryons) in the group volume and the local density of dark energy. It is found that the estimated local density is close (if not exactly equal) to the global value known from the observations on the distances of about 1000 megaparsec.

Keywords: galaxies, galaxy groups, dark energy.

PACS: 04.50.+h, 98.80.-k.

Received 23 April 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2009).

Сведения об авторах

1. Долгачев Валентин Петрович — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.; тел.: 939-16-50.
2. Доможилова Людмила Михайловна — научн. сотр.; тел.: 939-16-50, e-mail: dom@sai.msu.ru.
3. Чернин Артур Давидович — докт. физ.-мат. наук, профессор; гл. научн. сотр.; тел.: 939-16-22, e-mail: chernin@sai.msu.ru.