

УДК 524.8

ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ: ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

© 2014 В. В. Орлов^{1,2*}, А. А. Райков²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 19 мая 2014 года; принята в печать 5 августа 2014 года

Обсуждаются проблемы, связанные с динамическими свойствами темной материи. Рассмотрено движение массивного тела в среде, состоящей из частиц темной материи. Приведены формулы для оценки ускорения (замедления) тела в зависимости от плотности и распределения скоростей частиц среды. Сделана оценка темпа аккреции темной материи на компактные объекты в ядрах галактик. Имеется существенная разница между черными дырами и другими компактными объектами (нейтронными звездами, плотными звездными скоплениями и т.п.): в то время как черные дыры поглощают все налетающие частицы темной материи в пределах сечения захвата, другие объекты практически прозрачны для этих частиц, возможен только гравитационный захват. Предложен новый космологический тест, основанный на анализе зависимости от красного смещения отношения масса—светимость для галактик и систем галактик. Обсуждается комплекс проблем, связанных с взаимодействием темной и обычной материи.

Ключевые слова: *тёмная материя — космология*

1. ВВЕДЕНИЕ

О возможности присутствия в галактиках и системах галактик темной материи (dark matter) или скрытой массы (hidden mass) писали еще Оорт [1] и Цвикки [2, 3] в 30-е годы прошлого века. В отличие от других открытий наблюдательной астрофизики первой трети XX века (таких как зависимость период—светимость цефеид, диаграмма Герцшпрунга—Рассела и закон Хаббла) загадка скрытой массы по сей день остается нерешенной и ставит все новые и новые вопросы.

Три основных проявления темной материи — необычно большие отношения масса—светимость в группах и скоплениях галактик, «плоские» кривые вращения на периферии дисковых галактик и избыточное гравитационное линзирование объектов заднего фона на скоплениях галактик. Обзор космологических моделей с учетом темной материи дан, например, в статье Бартелманна [4]. Наблюдения и модели галактик и систем галактик на разных масштабах с учетом темной материи обсуждаются, например, в работе Йепеса и др. [5].

Альтернативой темной материи является модифицированная ньютоновская динамика (MOND) или модифицированная гравитация (MOG). Обзор модифицированных теорий гравитации дан, например, в работах Моффата [6], а также Фамея и

МакГау [7]. В этих теориях модифицируется закон всемирного тяготения для случая малых ускорений. В ряде случаев альтернативные теории неплохо согласуются с данными наблюдений, однако всеобъемлющего согласования пока добиться не удается. Поэтому на данном этапе развития наших представлений о физике и динамике внегалактических объектов парадигма темной материи является основной. Отметим, что гипотеза о скрытой массе опирается на представления классической физики, тогда как модифицированные теории гравитации требуют введения принципиально иных представлений, можно сказать, создания новой физики, по крайней мере, для гравитационного взаимодействия.

В литературе широко обсуждалась и обсуждается природа темной материи. Обзор современных представлений о составе и природе темной материи дан, например, в работах Портера и др. [8], Стригари [9], Профумо [10], Ченга и Сэнфорда [11]. В этих статьях авторы также обсуждают различные способы прямого и косвенного детектирования темной материи. Утверждается, что подавляющая часть темной материи имеет небарионную природу и практически не взаимодействует с барионной материей отличными от гравитации способами. Однако может существовать и диссипативная часть темной материи, частицы которой за счет столкновений охлаждаются. Эти частицы могут формировать «темные диски», тогда как бесстолкновительная

*E-mail: vorvor1956@yandex.ru

темная материя формирует «темные гало» галактик и систем галактик (см., например, Фан и др. [12]).

Принято условно разделять темную материю на три сорта в зависимости от скоростей движения частиц, составляющих её: холодная, теплая и горячая. В первом случае скорости движения частиц сравнимы со скоростями движения объектов, состоящих из обычной материи, — звезд и галактик. В третьем случае скорости сравнимы со скоростью света. Второй случай носит промежуточный характер. Весьма вероятно одновременное существование нескольких сортов частиц темной материи, обладающих различной массой и различными характерными скоростями.

Обычно считается, что с объектами, состоящими из барионов, частицы темной материи взаимодействуют только гравитационно. Взаимодействия частиц темной материи друг с другом не исследованы. Например, в работе Лоеба и Вайнера [13] для гипотетических ядер из темной материи в карликовых галактиках рассматривался потенциал взаимодействия, аналогичный потенциалу Юкавы.

Отметим, что недавно появился обзор Понтзена и Говернато [14] о роли темной материи в формировании и эволюции галактик и о взаимодействии темной материи со звездами и газом в пределах отдельно взятых галактик.

Целью нашей работы является рассмотрение взаимодействия темной и обычной материи — динамическое трение обычных объектов о темную материю, аккреция темной материи на компактные объекты (черные дыры и звездные системы) и захват темной материи скоплениями и группами галактик. Рассмотрение носит качественный характер в силу ненадежности и неполноты наблюдательных данных. В заключении обсуждается комплекс проблем, связанных с динамическими свойствами темной материей.

2. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ О ТЕМНУЮ МАТЕРИЮ

Можно ожидать торможение движущихся объектов в среде, состоящей из частиц темной материи, за счет динамического трения (см., например, книгу Бинни и Треймана [15]). Пусть скорости частиц темной материи распределены изотропно, а распределение модулей скоростей равно $f(v)$. Тогда ускорение (замедление) движущегося объекта массой M с хорошей точностью определяется по приближенной формуле Чандрасекара [16, 17]:

$$\frac{d\mathbf{v}_M}{dt} = -4\pi G^2 M m n \ln \Lambda \int_0^{v_M} f(v) dv \frac{\mathbf{v}_M}{v_M^3}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{v}_M — вектор скорости объекта, m — масса частицы темной материи, n — концентрация частиц

темной материи, $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм, G — гравитационная постоянная. Формула (1) имеет асимптотику при больших скоростях объекта $v_M \gg v$ (см. [15]):

$$\frac{d\mathbf{v}_M}{dt} \approx -4\pi G^2 M m n \ln \Lambda \frac{\mathbf{v}_M}{v_M^3}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (1), тормозящее действие оказывают только частицы темной материи, движущиеся со скоростями, не превышающими по модулю скорость объекта. Формула (1) является оценочной, но, как утверждает Чандрасекар [17], ошибка ее мала, поскольку более быстрые частицы, двигающиеся в противоположные стороны, компенсируют воздействие друг друга.

Вид распределения $f(v)$ играет существенную роль. В частности, если темная материя состоит из нескольких сортов частиц, то распределение $f(v)$ может быть мультимодальным. Если сечение частиц темной материи отлично от нуля, то происходит столкновительная релаксация частиц и распределение скоростей должно стремиться к максвелловскому, если популяция одна, или к суперпозиции нескольких максвелловских распределений, если популяций несколько.

Таким образом, согласно Чандрасекару [16, 17], существенный вклад в динамическое трение вносят только частицы темной материи, двигающиеся со скоростями, меньшими, чем скорость движения рассматриваемого объекта (например, звезды или галактики) сквозь среду, состоящую из частиц темной материи. Поэтому горячая темная материя, и тем более ультрарелятивистская темная материя, не должна тормозить объекты, состоящие из барионной материи. В случае холодной темной материи динамическое трение существенно.

Наряду с торможением объектов должно наблюдаться формирование сгущений темной материи в кильватере движущегося объекта. Проблема состоит в том, можем ли мы каким-либо образом обнаружить такие «шлейфы». Шлейфы могут притягивать обычную барионную материю и проявлять себя как гравитационные линзы. В таком случае их можно обнаружить как вытянутые структуры повышенной яркости («хвосты»), тянущиеся за галактиками или скоплениями галактик. В литературе появляются работы, в которых обнаруживаются волокнистые структуры, связанные со скоплениями галактик (см., например, Дитрих и др. [18]).

Заметим, что на эволюцию распределения скоростей частиц темной материи должны оказывать влияние сближения частиц с массивными объектами (например, с галактиками и скоплениями галактик). С одной стороны, за счет динамического трения массивные объекты должны терять кинетическую энергию в системе отсчета, связанной

с микроволновым фоном. С другой стороны, согласно закону сохранения энергии, частицы темной материи должны в среднем увеличивать свои скорости в той же системе отсчета. То есть должен происходить разогрев частиц темной материи в результате их взаимодействия с массивными объектами, такими как галактики, группы и скопления галактик.

Следует отметить, что имеют место по меньшей мере два фактора, определяющие эволюцию распределения скоростей частиц темной материи: космологическое расширение и взаимодействие с массивными объектами. Первый фактор приводит к глобальному уменьшению пекулярных скоростей. Второй действует двояким образом: с одной стороны, частицы, связанные с массивными объектами, формируют вириализованные гало из темной материи вокруг этих объектов; с другой стороны, свободные частицы, не связанные с массивными объектами, за счет динамического трения увеличивают свои пекулярные скорости и испытывают глобальный разогрев. Встает вопрос, какой из двух факторов доминирует. Предварительные оценки величин ускорений, обусловленных этими факторами, показывают, что в основном доминирует первый фактор.

3. АККРЕЦИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ НА КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Аккреции обычной барионной материи на компактные объекты, в том числе и черные дыры, посвящено большое количество работ (см., например, обзор Росас-Гуевары и др. [19]). Авторы получают аналитические оценки темпа аккреции, выполняют численное моделирование в рамках различных гидродинамических схем и т.д. В то же время имеются лишь единичные работы, посвященные аккреции темной материи на компактные объекты, в частности на черные дыры.

Можно предложить по крайней мере два сценария аккреции темной материи на черные дыры (при этом для нас не важен сам механизм образования черных дыр):

- аккреция на компактные объекты в ядрах уже сформировавшихся галактик (эти объекты наблюдаются и допускают сравнение с моделями);
- аккреция на первичные черные дыры (это гипотетические объекты, и здесь возможно только моделирование и наложение каких-то ограничений на свойства этих объектов).

В данной работе мы рассматриваем первый случай, допускающий наблюдательную проверку для компактных объектов в ядрах галактик. Предположим, что плотность среды, состоящей из частиц

темной материи, не зависит от времени ($\rho = \text{const}$), и характерные скорости частиц также не зависят от времени. Если допустить, что поперечные сечения частиц темной материи равны нулю (для всех видов взаимодействий кроме гравитационного), то захват этих частиц каким-то телом (или системой тел), не обладающим горизонтом событий, может иметь место только в результате гравитационного взаимодействия. С другой стороны, объект с горизонтом событий (черная дыра) должен поглощать все частицы темной материи, попадающие внутрь сферы радиусом сечения захвата с центром в центре черной дыры. Радиус сечения захвата, так называемый радиус аккреции, равен (см., например, обзор Чакрабартти [20]):

$$R_A = \frac{2GM_{\text{ВН}}}{v^2}, \quad (3)$$

где v — скорость частицы темной материи на значительном удалении от черной дыры, $M_{\text{ВН}}$ — масса черной дыры. Темп роста массы черной дыры можно оценить по следующей формуле (см., например, книгу Шапиро и Тьюкольски [21]):

$$\dot{M}_{\text{ВН}} = \frac{16\pi G^2}{c^2} \frac{M_{\text{ВН}}^2 \rho}{v}, \quad (4)$$

где ρ — плотность частиц темной материи, c — скорость света.

Для сравнения оценим темп аккреции частиц темной материи на звездное скопление с той же массой, радиусом R и дисперсией скоростей звезд σ^2 . С этой целью воспользуемся результатами из работы Минца и др. [22]. В этой работе были оценены вероятности захвата звезд поля, пролетающих сквозь звездное скопление, в зависимости от модуля скорости и массы звезды поля, а также масс звезд скопления. В нашем случае в качестве звезды поля рассматривается частица темной материи. Ее масса много меньше, чем массы звезд скопления, и можно использовать асимптотику формул из работы [22]. Если скорости частиц темной материи много больше, чем дисперсия скоростей звезд скопления, то темп роста массы скопления за счет захвата частиц темной материи приблизительно равен

$$\dot{M}_{\text{SC}} = \frac{64\sqrt{\pi} N^2 G^3 m^3 \rho}{3Rv^5} \exp\left(-\frac{v^2}{8\sigma^2} - \frac{1}{4}\right), \quad (5)$$

где N — число звезд, и m — средняя масса звезды в скоплении.

Оценим отношение темпов аккреции на черную дыру и звездное скопление той же массы:

$$\frac{\dot{M}_{\text{ВН}}}{\dot{M}_{\text{SC}}} = \frac{3\sqrt{\pi}}{4Gc^2} \frac{Rv^4}{m} \exp\left(\frac{v^2}{8\sigma^2} + \frac{1}{4}\right). \quad (6)$$

Это отношение сильно зависит от скоростей частиц темной материи. Рассмотрим для примера скопление радиусом 10 пк, состоящее из звезд с массами, равными массе Солнца. Тогда при $v > 100 \text{ км с}^{-1}$ темп аккреции на черную дыру будет больше, чем на скопление той же массы. Например, при $v = 10\sigma \approx 200 \text{ км с}^{-1}$ отношение

$$\frac{\dot{M}_{\text{ВН}}}{\dot{M}_{\text{SC}}} \approx 2 \times 10^5. \quad (7)$$

Таким образом, из формул (6) и (7) видно, что при значительных скоростях (примерно 100 км с^{-1} и более) частиц темной материи ее аккрецией на звездные скопления можно пренебречь по сравнению с аккрецией на черные дыры сравнимых масс.

С помощью формулы (4) можно оценить прирост массы черной дыры за счет аккреции на нее частиц темной материи из межгалактической среды. Наши оценки по порядку величины показали, что в моделях с космологическим расширением прирост масс черных дыр, образовавшихся в результате коллапса звезд населения III, за прошедшее с момента коллапса время составляет не более 0.01% от начальной массы черной дыры. Заметим, что в современную эпоху для обеспечения прироста в одну массу Солнца черная дыра должна аккрецировать на себя всю межгалактическую темную материю из шара радиусом примерно 1 кпк.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что черные дыры значительных масс, находящиеся в ядрах галактик (порядка миллионов и миллиардов солнечных масс), не могут быть эффективными поглотителями межгалактической темной материи (наряду с обычной барионной материей). Процесс роста массы галактических черных дыр может идти в основном за счет поглощения окружающей среды из родительской галактики, плотность которой на несколько порядков выше.

4. СООТНОШЕНИЕ МАССА–СВЕТИМОСТЬ КАК КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ ТЕСТ

В стандартной космологической модели постулируется следующее соотношение для параметра Хаббла

$$H(z) = H_0 [\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}. \quad (8)$$

Здесь $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ — космологические параметры плотности для материи и темной энергии; $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ — современное значение параметра Хаббла. В величину Ω_M входит как темная материя, так и обычная (звезды, газ, пыль и т.п.). В формулу (8) обе составляющие материи входят равноценно, что заранее предполагает одинаковые законы гравитационного взаимодействия

для частиц темной и обычной материи. Если эти законы различаются (например, для темной материи справедлив закон Юкавы), то формула (8) будет иметь другой вид.

В Λ CDM модели в процессе расширения пространства должно происходить охлаждение темной материи. Следовательно, с уменьшением красного смещения все больше и больше темной материи будет захватываться протяженными массивными объектами. Если начальное распределение гравитационного потенциала GM/R (R — характерный размер) этих объектов было мультимодальным, то процесс захвата также должен быть немонотонным. Вначале наступает эпоха захвата темной материи на объекты, обладающие более мощным гравитационным потенциалом, поскольку убывающие со временем характерные скорости частиц темной материи раньше достигают скорости захвата $V_{\text{св}} \sim \sqrt{GM/R}$ именно для таких объектов; затем начинается захват объектами второго пика и т.д. При этом захват объектами с более сильным потенциалом продолжается. В результате отношение масса–светимость $\frac{M}{L}$ должно убывать с ростом красного смещения, причем эта зависимость может иметь ступенчатый характер.

Исследование зависимости $\frac{M}{L}(z)$ для галактик, их групп и скоплений с учетом морфологии, структуры и гравитационного потенциала этих объектов является отдельной задачей. Первые шаги в этом направлении сделаны. Так, в работе Бакалл и Кулье [23] показано, что для групп и скоплений галактик величина $\frac{M}{L_i}$ слабо зависит от кратности и размера системы в пределах приблизительно до 15 Мпк и равна 286 ± 16 солнечных единиц при $0.1 < z < 0.3$. Для 9 скоплений галактик с $0.4 < z < 0.8$, рассмотренных в работе Генно и др. [24], получена оценка $\frac{M}{L_V} = 160 \pm 21$ солнечных единиц. В обоих случаях принято значение постоянной Хаббла $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Однако следует заметить, что наблюдения проводились в разных фильтрах, а светимости рассматриваемых объектов сильно зависят от фотометрической полосы, поэтому приведенное выше сравнение [23] и [24] не является корректным.

В то же время работа в этом направлении представляется перспективной с учетом имеющихся наблюдательных ресурсов, хотя она и сопряжена со значительными трудностями ввиду разнообразия морфологии и спектральных свойств объектов. Для реализации теста нужны обширные массивы данных многоцветной фотометрии групп и скоплений

галактик в широком диапазоне красных смещений. Для этого необходимы результаты однородных наблюдений, выполненных по специальной программе на больших наземных и/или космических инструментах.

5. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

В литературе уделяется много внимания темной материи, в частности ее составу и возможностям прямого или косвенного детектирования (см. ссылки во Введении). Однако ряд вопросов, связанных с динамикой темной материи и с ее взаимодействием с обычной материей, до сих пор оставался без должного внимания.

Первая проблема — средняя плотность темной материи в том случае, если она распределена однородно, и сечение взаимодействия частиц темной материи с барионами и между собой равны нулю или очень близки к нулю. В таком случае мы можем детектировать темную материю только гравитационно. Однако однородная субстанция никак себя не проявит при любой плотности (даже при такой экстремально высокой плотности как, например, плотность воздуха или плотность воды). Гравитационно проявят себя лишь неоднородности в распределении темной материи, такие как скопления, волокна или пустоты. Однако эти неоднородности (как волны на поверхности океана) могут составлять лишь ничтожную часть от глобального распределения плотности. С другой стороны, имеются оценки космологического параметра плотности $\Omega_M \approx 0.3$ в рамках стандартной Λ CDM модели, что накладывает сильные ограничения на среднюю плотность темной материи в современную эпоху (порядка 10^{-29} г/см³). Однако оценка средней плотности сильно зависит от принятой модели. Например, если взаимодействие частиц темной материи между собой имеет потенциал типа потенциала Юкавы со сравнительно небольшой характерной длиной, то ситуация изменится радикально, и средняя плотность темной материи может быть значительно выше. Проблема состоит в том, чтобы предложить наблюдательные тесты для определения средней плотности темной материи.

Вторая проблема — взаимодействие частиц темной материи между собой. Из данных наблюдений галактик и систем галактик следует, что темная материя притягивает обычную барионную материю по закону всемирного тяготения Ньютона в случае малых скоростей (по сравнению со скоростью света). При скоростях, сравнимых со скоростью света, справедливы формулы общей теории относительности. Что касается взаимодействия частиц темной материи между собой, то здесь возможны

различные варианты: (1) отсутствие взаимодействия; (2) закон взаимодействия такой же, как и для барионной материи; (3) взаимодействие по закону, подобному закону Юкавы (с экспоненциальным убыванием силы на больших расстояниях). В принципе, возможны и другие варианты. Проблема состоит в том, чтобы сформулировать возможные варианты и предложить тесты для их проверки.

Третья проблема — распределение скоростей частиц темной материи. Темные гало отдельных галактик, групп и скоплений галактик, скорее всего, находятся в состоянии, близком к вириальному равновесию. Следовательно, они состоят из холодной темной материи, частицы которой движутся со скоростями, не превышающими тысяч километров в секунду. Встает вопрос — имеется ли теплая и/или горячая темная материя, не связанная с системами галактик, частицы которой движутся со скоростями порядка $0.1c$ или c ? Возможно ли существование одновременно нескольких сортов темной материи, движущихся с различными характерными скоростями? Заметим, что некоторые соображения о распределении скоростей частиц темной материи высказаны в работе Каванаха и Грин [25]. Еще один вопрос — эволюция распределения скоростей частиц темной материи (по крайней мере, ее бездиссипативной компоненты) в зависимости от красного смещения. В этом плане темная материя может существенно отличаться от барионной материи. Представляет интерес получить количественные оценки степени разогрева частиц темной материи за счет их гравитационного взаимодействия с массивными объектами — галактиками и скоплениями галактик — в сочетании с охлаждением темной материи за счет космологического расширения.

Четвертая проблема — поведение объектов, состоящих из барионной материи, движущихся сквозь среду, образованную частицами темной материи. Если какая-то доля частиц темной материи холодная, то есть имеет скорости порядка 1000 км/с⁻¹ и меньше, то эти частицы темной материи будут тормозить движение объектов из-за эффекта динамического трения. Соответствующие ускорения (замедления) можно оценить по формулам (1) и (2). Задача состоит в том, чтобы предложить тесты для количественной оценки эффекта торможения, а также осуществить проверку по данным наблюдений. Обнаружение и количественная оценка эффекта динамического трения объектов обычной материи о частицы темной материи позволит сделать определенное суждение и о скоростях частиц темной материи (*третья проблема*). В этой связи представляет интерес судьба объектов, движущихся с высокими скоростями в системе отсчета, связанной с микроволновым фоном. Динамическое трение о темную материю

будет тормозить подобные объекты. Представляет интерес оценить характерные времена торможения и характерные скорости, которые достигаются за эти времена, в зависимости от начальных условий.

Пятая проблема — влияние движущихся объектов (в первую очередь, галактик и скоплений галактик) на крупномасштабное распределение темной материи. Можно предположить, что за счет эффекта динамического трения за движущимся сквозь среду массивным объектом будет формироваться «шлейф» повышенной плотности темной материи. Шлейфы, «волочащиеся» за отдельными галактиками и скоплениями галактик, могут наблюдаться в различных диапазонах длин волн — от радио до рентгеновского. Заметим, что на снимках некоторых скоплений галактик мы можем заметить вытянутые образования, напоминающие по форме хвосты комет (см., например, статьи Карталтепе и др. [26], Феретти и др. [27], Канталупо и др. [28]). Кроме того, наблюдения и модели N тел крупномасштабного распределения галактик показывают наличие многочисленных волокнистых структур (см., например, статьи Шпрингеля и др. [29], Массея и др. [30]), которые также могли сформироваться за счет динамического трения массивных объектов о среду, состоящую из темной и барионной материи.

Таким образом, мы обсудили комплекс проблем, связанных с динамическим взаимодействием темной и обычной материи. Решение (хотя бы частичное) этих проблем позволит прояснить некоторые динамические свойства темной материи и, возможно, пролить свет на ее природу и эпоху ее формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. H. Oort, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **6**, 249 (1932).
2. F. Zwicky, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933).
3. F. Zwicky, *Astrophys. J.* **86**, 217 (1937).
4. M. Bartelmann, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 331 (2010).
5. G. Yepes, S. Gottlieber, and Y. Hoffman, *New Astron. Rev.* **58**, 1 (2014).
6. J. W. Moffat, *Int. J. Mod. Phys. D* **16**, 2075 (2007).
7. B. Famaey and S. S. McGaugh, *Living Rev. Relativity* **15**, 10 (2012).
8. T. A. Porter, R. P. Johnson, and P. W. Graham, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 155 (2011).
9. L. E. Strigari, *Phys. Rep.* **531**, 1 (2013).
10. S. Profumo, arXiv:1301.0952 (2013).
11. C. Cheung and D. Sanford, *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* **02**, id. 011 (2014).
12. J. Fan, A. Katz, and J. Shelton, arXiv:1312.1336 (2013).
13. A. Loeb and N. Weiner, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 171302 (2011).
14. A. Pontzen and F. Governato, *Nature* **506**, 171 (2014).
15. J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (John Wiley, Princeton, 2008).
16. S. Chandrasekhar, *Astrophys. J.* **97**, 255 (1943).
17. S. Chandrasekhar, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 383 (1949).
18. J. P. Dietrich, N. Werner, D. Clowe, et al., *Nature* **487**, 202 (2012).
19. Y. M. Rosas-Guevara, R. G. Bower, J. Schaye, et al., arXiv:1312.0598 (2013).
20. S. K. Chakrabarti, *Phys. Rep.* **266**, 229 (1996).
21. S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (John Wiley, New York, 1983).
22. A. A. Mints, P. Glaschke, and R. Spurzem, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **379**, 86 (2007).
23. N. A. Bahcall and A. Kulier, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2505 (2014).
24. D. Guennou, C. Adami, C. Da Rocha, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, id. A64 (2012).
25. B. J. Kavanagh and A. M. Green, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 031302 (2013).
26. J. S. Kartaltepe, H. Ebeling, C. J. Ma, and D. Donovan, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389**, 1240 (2008).
27. L. Feretti, G. Giovannini, F. Govoni, and M. Murgia, *Astron. Astrophys. Rev.* **20**, id. 54 (2012).
28. S. Cantalupo, F. Arrigoni-Battaia, J. X. Prochaska, et al., *Nature* **506**, 63 (2014).
29. V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, et al., *Nature* **435**, 629 (2005).
30. R. Massey, J. Rhodes, R. Ellis, et al., *Nature* **445**, 286 (2007).

Dark Matter: Dynamical Problems**V.V. Orlov and A.A. Raikov**

We discuss the issues related to the dynamic properties of dark matter, considering the motion of a massive body in the medium consisting of dark matter particles. The formulas for estimating the acceleration (deceleration) of the body depending on the density and velocity distribution of particles in the medium are given. We estimate the dark matter accretion rate onto the compact objects in the galactic nuclei. There is a significant difference between the black holes and other compact objects (neutron stars, dense star clusters, etc.): while the black holes absorb all the incident particles of dark matter within the capture cross-section, other objects are virtually transparent to these particles, making only the gravitational capture possible. We propose a new cosmological test based on the analysis of redshift dependence of the mass–luminosity ratio for the galaxies and galactic systems. A set of problems linked with the interaction of dark and ordinary matter is discussed.

Keywords: *dark matter—cosmology: miscellaneous*