

Реляционный вариант модифицированной ньютоновской динамики (MOND)

Ю. С. Владимиров* М. Ю. Ромашка†

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра теоретической физики.**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**(Статья поступила 07.03.2013; Подписана в печать 24.04.2013)*

Модифицированная ньютоновская динамика (MOND) призвана описать кривые вращения галактик и ряд других астрофизических явлений без привлечения гипотезы тёмной материи, которая испытывает на сегодняшний день серьёзные трудности. Будучи весьма простой и содержательной по своим следствиям, она оставляет ряд вопросов относительно того, какая физика лежит в её основе. В данной работе после краткого обсуждения двух предложенных ранее вариантов MOND предлагается третий, реляционный вариант, основанный, во-первых, на статистическом подходе к природе пространства-времени и, во-вторых, на идее П. К. Ращевского об изменении классических пространственно-временных отношений на больших расстояниях. В рамках предложенного подхода рассмотрен эффект отклонения лучей света массивным телом.

PACS: 04.50.Kd.

УДК: 530.1.

Ключевые слова: кривые вращения галактик, модифицированная ньютоновская динамика, реляционная теория, прямое межчастичное взаимодействие, статистическая природа пространства-времени, модифицированное расстояние, отклонение света массивным телом.

1. ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМА КРИВЫХ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК

Одной из проблем современной астрофизики является объяснение кривых вращения галактик. Согласно большому количеству накопленных наблюдательных данных, почти во всех известных спиральных и дисковых галактиках скорости звёзд и газовых облаков, определяемые с помощью эффекта Доплера, не превышают 300–350 км/с. Центробежные ускорения этих объектов, траектории которых в хорошем приближении можно считать плоскими и круговыми, также достаточно малы (по крайней мере, за пределами плотного ядра). Всё это говорит о том, что движение этих объектов должно описываться в рамках нерелятивистской механики Ньютона. Однако, это не имеет места.

Поясним это на упрощённой модели. Пусть имеется сферически симметричное однородное тело массой M (грубая модель ядра галактики), вокруг которого движется по окружности пробное тело массой m . Согласно второму закону Ньютона и закону всемирного тяготения имеем

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}, \quad (1)$$

откуда следует, что вне массивного ядра скорость пробного тела на круговой орбите убывает с расстоянием в соответствии с формулой

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}. \quad (2)$$

Однако наблюдения (см., например, [1–3]) демонстрируют другую закономерность: начиная с некоторого характерного расстояния r_0 , индивидуального для каждой галактики, скорости объектов выходят на постоянную величину, т. е. практически перестают зависеть от r . Учёт полного распределения масс в галактиках не решает проблему. То же самое относится к эллиптическим и сфероидальным галактикам: скорости достаточно удалённых от центра объектов значительно превышают теоретически предсказанные.

Помимо того, что кривые вращения выходят на плато, было обнаружено, что во всех рассматриваемых галактиках отклонения от предсказаний механики Ньютона начинают быть заметными при одном и том же ускорении $a_0 \sim 10^{-10} \text{ м/с}^2$, т. е. для объектов, движущихся с ускорением, большим a_0 , механика Ньютона достаточно хорошо работает, а при движении с малым ускорением (меньшим a_0) наблюдаются отклонения.

Обсуждаются два пути решения данных проблем. Первый путь основан на введении так называемой «тёмной материи», способной обосновать экспериментально наблюдаемые закономерности. Большинство исследователей пошло по этому пути. Однако это означает переключивание трудности из космологии в физику элементарных частиц, поскольку непонятно, какой вид полей или частиц может претендовать на роль тёмной материи.

Другой путь состоит в модификации ньютоновской динамики (MOND), в которой, в частности, вводится новая константа a_0 с размерностью ускорения (иногда называемая «фундаментальным ускорением»).

В связи с этим следует отметить, что задолго до обнаружения названных закономерностей ряд авторов высказывал мысль о том, что классические пространственно-временные представления справедливы

*E-mail: yusvlad@rambler.ru

†E-mail: michaelromashka@gmail.com

ливы лишь при описании макроскопических явлений в определенном, ограниченном с двух сторон, масштабе. В частности, что в работах В. А. Фока, Д. Д. Иваненко и ряда других авторов обращалось внимание на проблематичность распространения выводов ОТО на Вселенную в целом. Так, В. А. Фок писал: «Вообще любая теория — пусть это будет даже теория тяготения Эйнштейна — имеет предел применимости, и неограниченно экстраполировать ее нельзя. Рано или поздно становится необходимым введение существенно новых физических понятий, соответствующих свойствам изучаемых объектов и применяемым средствам их познания, а тогда выявляются и пределы применимости теории, притом возникают новые гносеологические вопросы» [4, с. 200].

Современные астрофизические наблюдательные данные подкрепляют высказанные соображения и служат основанием для поиска путей модификации как общей теории относительности, так и ньютоновской гравитации.

2. ДВА ВАРИАНТА МОДИФИЦИРОВАННОЙ НЬЮТОНОВСКОЙ ДИНАМИКИ (MOND)

Для описания закономерностей в галактиках была предложена так называемая модифицированная ньютоновская динамика (MOND) (См. М. Милгром, 1983 [5, 6], обзоры [1–3, 7]), причем рассматриваются два варианта построения MOND. Первый путь основан на модификации второго закона Ньютона при сохранении неизменным закона всемирного тяготения, а второй путь, — наоборот, основан на изменении закона всемирного тяготения при сохранении второго закона Ньютона.

В первом варианте MOND предлагается модифицировать второй закон Ньютона посредством введения в него дополнительного множителя $\mu(z)$, зависящего от z — отношения ускорения тела a к константе a_0 :

$$m\mu(z)\vec{a} = \vec{F}; \quad z = a/a_0. \quad (3)$$

Полагается, что множитель $\mu(z)$, называемый интерполяционной функцией или просто мю-функцией, обладает следующими асимптотическими свойствами: $\mu(z) \approx 1$ при $a \gg a_0$ и $\mu(z) \approx a/a_0$ при $a \ll a_0$. Определенная таким образом мю-функция, или точнее, множество функций с данными асимптотиками, приводит модифицированную теорию в согласие с наблюдениями: при больших ускорениях $a \gg a_0$ выполняется обычная механика Ньютона, а в пределе малых ускорений $a \ll a_0$ возникает «глубокий MOND-режим», для которого характерно следующее:

$$v = (GMa_0)^{1/4} = Const, \quad a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r} \quad (4)$$

То есть, при малых ускорениях скорости объектов перестают зависеть от радиусов их орбит, и кривая вращения выходит на плато.

Можно указать ряд примеров интерполяционной функции $\mu(z)$, удовлетворяющей асимптотическим условиям. Наиболее обсуждаемыми в литературе являются т. н. стандартная функция

$$\mu(z) = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}}, \quad (5)$$

простая функция

$$\mu(z) = \frac{z}{1+z}, \quad (6)$$

а также содержащее их семейство вида

$$\mu(z) = \frac{z}{(1+z^n)^{1/n}}, \quad (7)$$

где n — целое число, отличное от нуля.

В работах ряда авторов отмечается, что на сегодняшний день «оптимальная» функция, подходящая для описания наблюдаемых закономерностей, находится где-то между стандартной и простой функциями. Существует ряд попыток найти такую функцию; их обзор, а также ряд примеров, можно найти в обзоре [1].

Во втором варианте построения MOND модифицируется закон всемирного тяготения при сохранении неизменным второго закона Ньютона. Это делается аналогично первому варианту посредством введения функции $\mu(z)$, только теперь в выражение для силы:

$$F = \frac{GMm}{r^2\mu(z)} = \frac{GMm}{r^2\mu(F/ma_0)}. \quad (8)$$

Явное выражение для силы зависит от конкретного вида мю-функции. Например, для функции (6) сила представляется в виде:

$$F = \frac{GMm}{2r^2} \left(1 + \sqrt{1 + 4\frac{r^2}{r_0^2}} \right), \quad (9)$$

где введена величина

$$r_0 = \sqrt{\frac{GM}{a_0}}, \quad (10)$$

задающая характерный масштаб расстояний в конкретной галактике.

Очевидно, что этот вариант MOND эквивалентен обсужденному выше первому варианту при решении задачи двух тел. Однако, в случае задачи многих тел, или при наличии других взаимодействий, помимо гравитации, эти формулировки будут давать различные результаты. В пределах одной галактики эти формулировки практически неразличимы [7].

3. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ДВУХ ВАРИАНТОВ MOND

На сегодняшний день установлено, что MOND достаточно хорошо описывает движение объектов в галактиках всех типов [1]. В частности, было показано,

что полученные соотношения находятся в согласии с эмпирически установленным законом Талли–Фишера, который связывает светимость L спиральной галактики с «амплитудой» скорости вращения её объектов (т.е. со скоростью на плато кривой вращения): $L \sim v_0^4$. С другой стороны, светимость пропорциональна полной массе галактики: $L \sim M$. Это согласуется с формулой (4), из которой следует, что масса галактики (если её приближённо считать равной массе центрального тела M) пропорциональна четвёртой степени скорости на плато. Таким образом, закон Талли–Фишера подтверждает MOND.

Из наблюдений следует лишь то, что во всех галактиках отклонения от ньютоновской механики начинаются на одном и том же масштабе ускорений, что позволяет говорить о новой универсальной константе. Но оказалось, что величина a_0 каким-то образом связана со свойствами Вселенной в целом. Как пишет Милгром, «Это приблизительно то ускорение, которое нужно объекту, чтобы разогнаться от состояния покоя до скорости света за время существования Вселенной. Также оно близко к недавно обнаруженному ускорению Вселенной» [9]. Из численных соотношений с хорошей точностью следует отметить связь a_0 с постоянной Хаббла $2\pi a_0 \approx H_0 c$, а также с космологической постоянной [3] в моделях, где тёмная энергия моделируется лямбда-членом. Отсюда вытекает, что космологическое красное смещение может быть эффективно представлено как гравитационное красное смещение в однородном поле с напряжённостью $2\pi a_0$.

Одной из трудностей первых вариантов MOND, рассмотренных выше, явилось то, что в них не выполняются законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса). Поэтому вскоре Милгром и последователи пришли к выводу [2], что основное соотношение MOND не является точным, а служит приближением какой-то более точной формулы. Попытки найти эту более точную формулу были предприняты на основе лагранжева формализма [2].

К главным недостаткам обсуждаемых ныне вариантов MOND следует отнести следующее:

1. В пределах галактик MOND не описывает гравитационное линзирование света. Это одно из оснований критики MOND в пользу тёмной материи.
2. MOND недостаточно хорошо описывает динамику на сверхгалактических масштабах (в скоплениях, сверхскоплениях, Вселенной в целом). По-прежнему требуется тёмная материя, однако, плюсом MOND можно считать то, что тёмной материи требуется меньше (примерно столько же, сколько наблюдаемой).
3. На сегодняшний день отсутствует последовательная релятивистская версия MOND. Имеется ряд попыток построить такую теорию (их обзор

можно найти в [1]), но ни одна из них не является общепризнанной. Нерелятивистские версии не претендуют на описание Вселенной в целом, не описывают космологическое красное смещение и т.д.

4. MOND в описанных двух вариантах остаётся феноменологической теорией, в которой не указываются первичные фундаментальные принципы, объясняющие вводимые соотношения. Иными словами, не найдена теоретическая основа для MOND.

Попытки найти теоретическую основу для MOND предпринимались различными авторами, начиная с самого Милгрота [8]. К таким попыткам относятся механистические модели [8], мембранные модели [8], «диэлектрическая аналогия» [1], гравитация как энтропийный эффект (ссылки в [3]) и другие. Ни один из этих подходов пока не дал вполне последовательную физическую картину, так что исследования продолжают.

4. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИДЕИ РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В данной статье предлагается взглянуть на закономерности MOND с позиций реляционного подхода к природе пространства-времени и физических взаимодействий – третьего миропонимания, альтернативного ныне широко известным теоретико-полевым и геометрическим. Истоки реляционного миропонимания были заложены в работах Г. Лейбница, Э. Маха и ряда других мыслителей. В XX веке это направление развивалось в трудах А. Фоккера, Я. И. Френкеля, Р. Фейнмана, Ф. Хойла, Дж. Нарликара, Г. В. Рязанова и ряда других авторов [10, 11]. Известно, что А. Эйнштейн пришел к созданию общей теории относительности, следуя реляционным идеям Маха, а Р. Фейнман в своей нобелевской лекции сказал, что результаты, за которые ему была присуждена премия, были получены на основании соображений дальнего действия, присущего реляционному подходу.

Именно в рамках реляционного подхода возможна постановка и решение главной проблемы фундаментальной физики XXI века — вывода классических пространственно-временных отношений из более элементарных физических закономерностей вместо того, чтобы строить физику на базе априорно заданного пространства-времени.

Для того, чтобы выйти на решение как названной проблемы, так и ряда других, в частности, на обоснование MOND, следует учесть следующие три блока идей, выдвигавшихся в рамках реляционного подхода:

1. реляционное понимание природы пространства-времени и физических взаимодействий [10–12];

2. идеи о статистической природе классических пространственно-временных понятий;
3. соображения П. К. Рашевского о догмате натурального ряда.

Напомним главные моменты названных трех блоков идей.

1. Концепция дальнего действия и реляционный подход к природе пространства-времени.

В реляционном подходе ключевыми понятиями являются отношения между парами событий или взаимодействующих частиц, в качестве которых, в частности, выступает действие. Для случая электромагнитного взаимодействия таковым является фоккеровское действие, имеющее вид [13]:

$$S_{int}^{(e)}(i, k) = -\frac{1}{c} \int \int j_{(i)}^\mu \eta_{\mu\alpha} j_{(k)}^\alpha \delta(s^2(i, k)) ds_{(i)} ds_{(k)}, \quad (11)$$

где $j^\mu = u^\mu e$ — токи двух взаимодействующих частиц i и k , $\eta_{\mu\alpha}$ — компоненты метрического тензора Минковского, интегрирование производится по траекториям этих частиц, а

$$\delta(s^2(i, k)) = \frac{1}{2|r_{(i,k)}|} [\delta(ct_{(i,k)} - r_{(i,k)}) + \delta(ct_{(i,k)} + r_{(i,k)})] \quad (12)$$

— дираковская дельта-функция от квадрата интервала между событиями на двух мировых линиях взаимодействующих частиц.

Принципиально важным обстоятельством всего реляционного подхода является отсутствие полей переносчиков взаимодействий среди первичных понятий теории. Электромагнитное поле отсутствует и в фоккеровском действии [11]. В него входят лишь характеристики взаимодействующих частиц, что означает использование концепции дальнего действия. Поля можно ввести, но лишь в качестве вспомогательных понятий и лишь в местах нахождения частиц.

Таким образом, реляционный подход уже означает отсутствие каких-либо промежуточных полей, претендующих на роль темной материи.

Далее следует отметить, что фоккеровское действие может быть записано и для линейаризованного гравитационного взаимодействия между парами массивных частиц [14]:

$$S_{int}^{(g)}(i, k) = G \frac{m_i m_k}{c} \int \int u_{(i)}^\mu u_{(i)}^\nu (\eta_{\mu\alpha} \eta_{\nu\beta} + \eta_{\mu\beta} \eta_{\nu\alpha} - \eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta}) u_{(k)}^\alpha u_{(k)}^\beta \delta(s^2(i, k)) ds_{(i)} ds_{(k)}, \quad (13)$$

где m_i и m_k — массы взаимодействующих частиц.

В работе [12] показано, что для описания нелинейных слагаемых для гравитационного взаимодействия следует рассматривать трех-, четырех- и т. д. частичные отношения.

Кроме того, следует обратить внимание на тот факт, что действия фоккеровского типа содержат в себе под знаком интеграла два вида отношений: пространственно-временные (аргумент дельта функции) и токовые (произведения токов или скоростей взаимодействующих частиц). В общем случае эти отношения имеют самостоятельный характер.

2. Идея о статистической природе классического пространства-времени.

В реляционном подходе к природе пространства-времени ставится задача вывода метрики (длин, интервалов и т. д.) из наложения огромного числа неких физических микрофакторов. Она ставилась в работах ряда авторов: Е. Циммермана [15], П. К. Рашевского [16], Р. Пенроуз [17] и других. Так, в книге П. К. Рашевского «Риманова геометрия и тен-

зорный анализ» писалось: «Возможно, что и сам четырехмерный пространственно-временной континуум с его геометрическими свойствами окажется в конечном счете образованием, имеющим статистический характер и возникающим на основе большого числа простейших физических взаимодействий элементарных частиц. Но, конечно, подходы к этому вопросу должны носить совсем иной характер, поскольку они должны базироваться на квантовой механике — теории совершенно иного стиля, чем теория относительности» [16].

В развиваемой в нашей группе программе предлагается выводить понятие расстояния (интервала) из наложения огромного числа фазовых вкладов от излучений в окружающем мире. В частности, это означает, что расстояния между звездами внутри галактик в значительной степени определяются процессами в этой галактике. Не вдаваясь в конкретное описание этой зависимости, естественно высказать предположение, что классические расстояния неким образом должны модифицироваться, причем эта модифи-

кация должна зависеть от характеристик соответствующей галактики (ее массы, размеров и т. д.).

3. Идея о модификации расстояний на больших масштабах.

В связи с изложенными соображениями о реляционно-статистической природе классического пространства-времени уместно напомнить еще одно соображение, высказанное П. К. Рашевским в статье «О догмате натурального ряда»: «Быть может, положение с натуральным рядом в настоящее время имеет смысл сравнить с положением евклидовой геометрии в XVIII в., когда она была единственной геометрической теорией, а потому считалась некой абсолютной истиной, одинаково обязательной и для математиков, и для физиков. Считалось само собой понятным, что физическое пространство должно идеально точно подчиняться евклидовой геометрии (а чему же еще?). Подобно этому мы считаем сейчас, что пересчеты как угодно больших расстояний в физическом пространстве и т. п. должны подчиняться существующим схемам натурального ряда и числовой прямой (а чему же еще?)» [18, с. 243–246].

Эту идею Рашевского развил В. Л. Рвачев, который в своих работах [19] построил обобщенный вариант арифметики с максимально возможным значением чисел и показал, что такая измененная арифметика уже воплощена в физике в виде закономерностей специальной теории относительности — в пространстве скоростей, где имеется максимальная скорость c . Рвачев писал: «Прав был П. К. Рашевский, когда выступал против догматического взгляда на натуральный ряд. Что же касается ответа на вопрос, к каким последствиям для физических теорий может привести разрушение «монопольного положения натурального ряда», то его должны дать физики» [19].

Тем не менее, опираясь на ряд проявлений симметрии между координатным и импульсным пространствами, Рвачев сам попробовал применить обобщенную арифметику для описания космологии и показал, что это автоматически приводит к появлению космологического красного смещения.

Учитывая эти соображения, можно предположить, что известное правило сложения длин имеет место лишь для привычного классического масштаба, а на больших расстояниях оно изменяется. Это означает, что следует различать два вида расстояний: классическое расстояние r , для которого имеет место общепринятые правила сложения, и модифицированное расстояние ρ .

5. ТРЕТИЙ, РЕЛЯЦИОННЫЙ ВАРИАНТ MOND

Имея в виду ситуацию в пространстве скоростей, предположим, что имеется некая константа размерности длины ρ_0 , зависящая от характеристик данной

галактики, которая описывает отклонение модифицированных расстояний от классических. Положим, что модифицированное расстояние ρ выражается через классическое r и введенную константу следующим образом

$$\rho = \frac{r}{(1 + (r/\rho_0)^n)^{1/n}}, \tag{14}$$

где n — отличное от нуля число. Очевидно, что при малых расстояниях ρ практически совпадает с r , а при больших стремится к значению ρ_0 . Можно показать, что формула (14) приводит к правильной (соответствующей MOND) зависимости скорости v от расстояния r при малых и больших r , если допустить, что модифицированная скорость совпадает с классической, а константа ρ_0 равна

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{GM}{a_0}}, \tag{15}$$

т. е. определяет характерный масштаб длины в каждой конкретной галактике так же, как и в MOND (ср. с формулой (10)).

Чтобы прийти к этому результату, нужно допустить, что в модифицированных координатах выполняются все соотношения механики Ньютона, а затем перейти от модифицированных координат к классическим. При этом мы полагаем центральное тело (источник тяготения) сферически симметричным и считаем, что изменяется только радиальная координата в соответствии с формулой (14), тогда как угловые координаты остаются неизменными. В итоге для случая движения пробного тела (например, звезды в галактике) по окружности получаем уравнение

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} \left(1 + \left(\frac{r}{\rho_0}\right)^n\right)^{1/n}, \tag{16}$$

из которого видно, что при больших r скорость пробного тела стремится к постоянному значению в согласии с астрофизическими наблюдениями.

Возникает вопрос: при каком значении n формула (16) наилучшим образом соответствует наблюдениям? Простейшим критерием является сопоставление с MOND: нужно найти такое n , при котором график функции (16) лежит между аналогичными графиками MOND, получаемыми с помощью интерполяционных функций (5) и (6). Нетрудно убедиться, что среди целых значений n такое значение существует, единственно и равно $n = 2$.

6. ОТКЛОНЕНИЕ ЛУЧЕЙ СВЕТА МАССИВНЫМ ТЕЛОМ В РЕЛЯЦИОННОМ ВАРИАНТЕ MOND

Применим изложенные соображения для оценки эффекта отклонения света галактиками, т. е. факти-

чески эффекта гравитационного линзирования на галактиках. Напомним, что в первых вариантах MOND имелись трудности в описании этого эффекта.

Как известно, угол отклонения света, проходящего на расстоянии R от массивного источника, в ньютоновской теории гравитации определяется формулой

$$\theta_N = \frac{2GM}{c^2 R}. \quad (17)$$

В общей теории относительности угол отклонения подсчитывается в метрике Шварцшильда и оказывается ровно в два раза больше записанного значения.

В рамках реляционного варианта MOND следует заменить в (17) классическое расстояние R на модифицированное согласно (14). Выбирая значение $n = 2$, приходим к выражению

$$\theta = \frac{2GM}{c^2 R} \sqrt{1 + \frac{R^2}{\rho_0^2}} = \frac{2GM_{eff}}{c^2 R}, \quad (18)$$

где возникающий дополнительный множитель, обусловленный модификацией расстояний в галактиках, можно объединить со значением массы галактики, введя эффективную массу

$$M_{eff} = M \sqrt{1 + \frac{R^2}{\rho_0^2}}. \quad (19)$$

Поскольку в этом выражении истинная масса галактики M умножается на коэффициент, заведомо больший единицы, то этот факт может соответствовать в общепринятом подходе наличию темной материи. Оценки показывают, что для реальных галактик коэффициент в (19) может иметь порядок 5–10, что вполне может соответствовать современным оценкам, по которым наблюдаемая материя составляет порядка 4%, а темная материя — 25–30% от необходимой массы для сохранения выводов ОТО при ее экстраполяции на Вселенную в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение подчеркнем, что данная здесь интерпретация MOND самым существенным образом опи-

рается на реляционный подход к природе классического пространства-времени, т.к. только в нем можно ставить и решать фундаментальную проблему вывода пространственно-временных отношений из наложения огромного числа (фазовых) вкладов от явлений всего окружающего мира. Обсуждение этого вопроса выходит за пределы данной работы, однако сам факт постановки данной задачи обосновывает возможность (или даже необходимость) модификации классических расстояний на разных масштабах.

Согласно данному подходу становятся естественными открывающиеся перед нами факты: в микромире отклонения от классических пространственно-временных представлений проявляются в виде квантовомеханических закономерностей, в макромасштабах солнечной системы они описываются закономерностями общей теории относительности, в масштабах галактик они проявляются в виде закономерностей MOND, ныне трактуемых посредством гипотезы о темной материи. В данной работе на основе изложенных выше соображений и результатов, достигнутых исследователями MOND, приведены более или менее реалистичные формулы для модификации расстояний в масштабах галактик.

В еще больших — межгалактически — масштабах следует ожидать иные закономерности в модификации пространственно-временных отношений, проявления которых ныне принято трактовать через темную энергию и другие гипотетические свойства окружающей Вселенной.

Поскольку в настоящее время, по-видимому, еще не существует общей теории, позволяющей описать пространственно-временные отношения на всех названных масштабах, то большинство современных теоретиков предпочитают использовать общую теорию относительности, внося в нее ряд гипотез типа темной материи, темной энергии и других экзотических понятий.

Авторы благодарны А. В. Соловьеву и С. В. Болохову, а также В. В. Аристову за плодотворное обсуждение затронутых в данной работе вопросов.

[1] *Famaey B., McGaugh S.* arXiv: 1112.3960v2 (2011).
 [2] *Bekenstein J. D.* arXiv: 0701848v2 (2007).
 [3] *Milgrom M.* arXiv: 1101.5122v1 (2011).
 [4] *Фок В. А.* Квантовая физика и современные проблемы. Сб. «Ленин и современное естествознание» (М.: Мысль, 1969).
 [5] *Milgrom M.* *Astrophys. J.* **270**. P. 365. (1983).
 [6] *Milgrom M.* *Astrophys. J.* **270**. P. 371. (1983).
 [7] *Milgrom M.* *Astrophys. J.* **270**. P. 384. (1983).

[8] *Milgrom M.* arXiv: 0207231v2 (2002).
 [9] Dark-matter heretic. Interview of Physicist Mordehai Milgrom. *American Scientist* **91**, N 1. P. 1. (2003).
 [10] *Владимиров Ю. С.* Между физикой и метафизикой. Книга 4. Вслед за Лейбницем и Махом. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012.
 [11] *Владимиров Ю. С.* Основания физики. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2008.
 [12] *Владимиров Ю. С., Турыгин А. Ю.* Теория прямого

- межчастичного взаимодействия. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [13] *Wheeler J. A., Feynman R. P.* Rev. Mod. Phys. **17**. P. 157. (1945).
- [14] *Грановский Я. И., Пантошин А. А.* Изв. Каз. ССР. сер. физ.-мат. **2**. С. 65. (1965).
- [15] *Zimmerman E. J.* Am. J. Phys. **30**. P. 97. (1962).
- [16] *Рашевский П. К.* Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 1967.
- [17] *Пенроуз Р.* Структура пространства-времени. М.: Мир, 1973.
- [18] *Рашевский П. К.* УМН **XXVIII**, вып. 4(172). С. 243. (1973).
- [19] *Рвачев В. Л.* Релятивистский взгляд на развитие конструктивных средств математик. Харьков: Препринт Института проблем машиностроения АН УССР, 1990.

A relational version of modified newtonian dynamics (MOND)

Yu. S. Vladimirov^a, M. Yu. Romashka^b

Department of Theoretical Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^ayusvlad@rambler.ru, ^bmichaelromashka@gmail.com

Modified newtonian dynamics (MOND) is intended for description of galaxy rotation curves and some other astrophysical phenomena without introduction of the dark matter hypothesis, which seems to encounter serious difficulties. Being rather simple and rich of its consequences, it leaves several questions concerning what physics underlies it. In present work, after brief discussion of the well-known versions of MOND, a new, relational version is proposed, which is based, firstly, on statistical approach to the nature of space-time, and secondly, on the idea of P. K. Rashevsky about modification of classical space-time relations at large distances. In the framework of the proposed approach the effect of gravitational deflection of light is considered.

PACS: 04.50.Kd

Keywords: galaxy rotation curves, modified newtonian dynamics, relational theory, direct interparticle action, statistical nature of space-time, modified distance, gravitational deflection of light.

Received 07 March 2013.

Сведения об авторах

1. Владимиров Юрий Сергеевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 335-70-74, e-mail: yusvlad@rambler.ru.
 2. Ромашка Михаил Юрьевич — мл. науч. сотр.; e-mail: michaelromashka@gmail.com.
-