УДК 524.7

Кинетика газа в галактических дисках объясняет кривые вращения спиральных галактик без привлечения тёмной материи.

А. А. Липовка

Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, Mexico

E-mail: anton.lipovka@unison.mx

В настоящей работе показано, что повсеместно используемые методы классической механики не могут применяться для вычисления кривых вращения во внешних частях дисков, где влияние столкновений в газе на его динамику становится доминирующим. Более того, гидродинамический подход так же не применим для этих целей в силу крайней разреженности газа в галактических дисках. В этом случае должен быть развит новый аппарат для описания динамики разреженного газа во внешних областях дисков, где динамика газа определяется преимущественно столкновениями. В работе выводятся уравнения описывающие динамику газа, но свободные от ограничений налагаемых на гидродинамику. Полученные уравнения связывают две величины: тангенциальную скорость газа, как функцию расстояния от центра галактики (кривую вращения) и радиальное распределение плотности газа. Показано, что при корректном учёте физических свойств разреженного газа, не требуется введение тёмной материи и «нефизичные» (не Кеплеровы) кривые вращения для внешних частей галактик являются ветровыми хвостами, описываемыми в рамках обычной кинетической теории газа. Для иллюстрации правильности полученной модели (уравнение 14), рассмотрены две галактики с плоскими кривыми вращения (NGC7331 и NGC3198). Получено прекрасное согласие между плотностями рассчитанными из кривой вращения (используя выражение 14) и наблюдаемыми величинами, что подтверждает корректность используемой модели. Таким образом «нефизичные» кривые вращения спиральных галактик, для объяснения которых привлекается тёмная материя – это всего лишь ветровые хвосты, образующиеся в разреженном газе и для их объяснения не требуется привлечение концепции тёмной материи. Вычислены полные массы галактик NGC7331 и NGC3198. Обсуждаются следствия для космологии.

Ключевые слова: Тёмная материя, Кривые вращения, Гравитационный потенциал, Массы спиральных галактик, Кинетика газа.

© Липовка А. А.,

MSC 85A05

Gas kinetics of galactic disk explains rotation curves of S-type galaxies without a need for Dark Matter.

DOI: 10.1142/S0217751X22501718

A. A. Lipovka

Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, Mexico

E-mail: anton.lipovka@unison.mx

Present work argues that the commonly used methods of classical mechanics cannot be applied to calculate rotation curves for the outer parts of galactic disks, where the influence of collisions in gas on its dynamics becomes dominant. Moreover, the hydrodynamic approach is also not applicable for these purposes due to the extreme rarefaction of the gas. In this case, an alternative approach is developed to describe the dynamics of the rarefied gas in the outer regions of galactic disks, where the gas dynamics is determined mainly by collisions. Equations describing the gas dynamics, but free from the restrictions imposed on hydrodynamics, are derived. The resulting equations relate two quantities: the tangential velocity of the gas as a function of the distance from the galactic center (rotation curve) and the radial distribution of gas density.

It is shown that if the physical properties of the rarefied gas are fully taken into account, then dark matter is not required and "non-physical"(non-Keplerian) rotation curves for the outer parts of galactic disks are tailwinds and can be described in the framework of ordinary gas kinetics. To illustrate the legitimacy of the model obtained, two galaxies with flat rotation curves (NGC7331 and NGC3198) are considered. From the given rotation curves, a good agreement was obtained between the gas densities calculated by expression (14) and their observed values. This coincidence is an additional argument in favor of the considered model. Thus, the nonphysical rotation curves of spiral galaxies are tailwinds of gas, the dynamics of which should be described by kinetic equation, without involving the concept of dark matter.

The total masses of the galaxies NGC7331 and NGC3198 have been calculated. The implications for cosmology are discussed.

Key words: Dark Matter; Rotation Curves; Gravitational Potential; Mass of spiral galaxy; gas kinetics.

© Lipovka A. A. ,

Это только часть полной статьи, опубликованной в International Journal of Modern Physics A. Полный вариант статьи может быть загружен со страницы журнала. Anton A. Lipovka, (2022) International Journal of Modern Physics A, v.37, 2250171, <https://doi.org/10.1142/S0217751X22501718>

1. Введение

Сложности с объяснением динамики небесных объектов в рамках Кеплеровых законов были впервые отмечены Джинсом (James Jeans) и Каптейном (Jacobus Kapteyn) в 1922, и затем подтверждены Оортом (Jaap Oort) в 1932 и Цвикки (Fritz Zwicky) в 1933. Для объяснения не-Кеплеровых движений, было предложено ввести некую невидимую, ненаблюдаемую массу (тёмную материю), распределённую внутри объекта и влияющую на его динамику. Следует отметить, что упомянутые наблюдения проводились в оптическом диапазоне, и по этой причине Тёмная Материя (ТМ) являлась единственным разумным выходом из создавшейся ситуации. Такой выход был вполне приемлем, поскольку с одной стороны, в самом деле, имеется много объектов не видимых в оптике. С другой стороны, тогда речь не шла о ТМ в нашем нынешнем понимании (как некоей сущности, не взаимодействующей с обычным веществом электромагнитно), напротив, тогда под ТМ подразумевалась невидимая в оптике барионная материя.

Позднее, с возникновением радиоастрономических методов, стало возможным наблюдать диски галактик так же и в радиодиапазоне. Оказалось, что крупномасштабные движения газа тоже могут не подчиняться закону Кеплера, и было вполне логично предположить, что в данном случае мы имеем дело со все той же темной материей. Более 90 лет ТМ широко обсуждается как астрономами, так и физиками, но всё еще не была зарегистрирована в лабораториях, оставаясь одной из самых удивительных загадок.

Как известно, потребность в концепции ТМ возникает в первую очередь для объяснения трёх проблем: 1) Наблюдаемые не-Кеплеровы кривые вращения спиральных галактик, 2) Проблема объяснения наблюдаемой структуры Вселенной, для образования которой необходимо наличие в дорекомбинационную эпоху гравитирующей и не взаимодействующей электромагнитно ТМ, и 3) Косвенные свидетельства о наличии дополнительной невидимой массы в скоплениях галактик, приводящей к наблюдаемой гравитационной связанности скоплений, а также к аномально большому гравитационному линзированию, создаваемому скоплениями. Подчеркнём, что вторая проблема возникает только в Римановом мире, в то время как в более общих геометриях с несимметричными связностями, такой проблемы не возникает. По этой причине вряд ли можно признать вторую проблему столь острой (см. так же обсуждение в разделе "Выводы и дискуссия"). Что касается третьей проблемы, то с одной стороны, в последнее время был достигнут значительный прогресс в поиске недостающей барионной массы в скоплениях [1]. Авторы утверждают, что недостающая барионная материя находится в крупномасштабных нитевидных структурах образованных тёплым и горячим межгалактическим газом, наблюдаемым в линиях ионизованного кислорода OVII и OVI (см. [2] и [3]). С другой стороны, следует упомянуть об отмеченной в [4] необходимости корректно учитывать диффузный линзированный сигнал, пренебрежение вкладом от которого приводит к переоценке величины линзирующей массы. Учитывая сказанное, проблема наличия или отсутствия ТМ в скоплениях галактик так же не стоит остро и может найти объяснение в

рамках ортодоксальной физики, без привлечения ненаблюдаемых сущностей вроде ТМ. В то же время первая проблема ("нефизичные" кривые вращения спиральных галактик) является наиболее интригующей и, на первый взгляд, никакими разумными способами не решается.

Однако это ещё не всё, и здесь следует упомянуть ещё пару неприятностей с кривыми вращения галактик. Первая связана с т.н. правилом Ренцо (Renzo's Rule). Оно гласит: "каждой детали на профиле светимости галактики имеется соответствующая деталь на кривой вращения, и наоборот". Недавно были опубликованы более аккуратные данные наблюдений, которые показали значительную корреляцию между особенностями (деталью) галактических кривых вращения и соответствующими спиральными структурами, состоящими из барионной материи. Авторы пишут: "Тёмная маэстрия и барионная масса жёстко связаны"[5] (см. так же работы [6, 7, 8]). Понятно, что такую корреляцию между наблюдаемыми неоднородностями распределения барионной материи и имеющимися максимумами и минимумами кривой вращения, крайне затруднительно (если вообще возможно) объяснить в рамках общепринятой модели сферически-симметрично и однородно распределённой ТМ, в которой ТМ взаимодействует с барионами только гравитационно [9, 10, 11, 12, 13]. Отметим здесь, что ТМ не взаимодействующая электромагнитно - это требование Римановой космологии (см. упомянутую выше проблему 2). Так же добавим, что наблюдения кривой вращения объекта подобного шаровому скоплению в ультрадиффузной галактике NGC1052 - DF2 показало недостаток тёмной материи в этой галактике [14].

Вторая неприятность заключается в том, что в рамках стандартной (или хотя бы просто разумной) модели ТМ весьма затруднительно найти объяснение уменьшению тангенциальной скорости газа по мере увеличения высоты над плоскостью галактики. [15].

Здесь мне хотелось бы, забежая немного вперед, подчеркнуть, что обе упомянутые выше "неприятности" (правило Ренцо и уменьшение скорости вращения с высотой над плоскостью галактики) легко и естественно объясняются в рамках модели, предложенной в данной работе. А именно, если правильно учесть кинетику газа, то, разумеется, скорость газа будет зависеть от его параметров, и оба эти явления получают логичное и естественное объяснение.

Хотелось бы так же отметить интересную особенность нашей Галактики, а именно - двойное гало Млечного Пути, которое показывает как прямое, так и обратное вращение звёзд гало с максимумами в распределении скоростей, расположенными приблизительно на +60 и -60 км/с. [16].

Кроме того, проблемы наблюдаются так же и в космологии базирующейся на предположении существования ТМ. Так, постоянная Хаббла измеряемая для ранней Вселенной, отличается от её значения, измеряемого в наше время: [17], что явно указывает на кризис Λ CDM модели [18], и возможно требует ревизии Λ CDM модели как таковой.

Поиск ТМ в лабораториях также безуспешен, несмотря на беспрецедентные усилия многих международных коллабораций. Так, эксперимент FERMI по поиску аннигиляции ТМ и анти-ТМ четко показывает отрицательный результат [19]. В рамках XENON эксперимента, был обнаружен радиоактивный распад ^{123}Xe вследствие двойного электронного захвата, характеризуемый временем полураспада 1.8×10^{22} лет (напомню, что время жизни Вселенной сегодня полагают равным приблизительно 10^{10} лет). Это указывает на беспрецедентную чувствительность применяемого ме-

тогда, однако никаких признаков наличия ТМ не было обнаружено [20]. Результаты работы коллаборации SENSEI так же негативны. Сообщают об наилучшем ограничении сверху на присутствие тёмной материи по ТМ - электрон рассеянию для масс между 500 кэВ и 5 МэВ. [21].

Все вышеперечисленное свидетельствует о серьезных проблемах, возникающих из-за наивного моделирования динамики спиральных галактик и распределения их масс, с использованием только методов классической механики Ньютона, основанных на предположении о доминирующей роли силы тяготения. Более того, перечисленные проблемы указывают на необходимость пересмотра фактически используемых моделей и наводят на мысль, что действительно требуется более точное моделирование галактической барионной компоненты и адекватный учет всех разумных физических эффектов. Принимая во внимание, что кривые вращения для наиболее важной - внешней части диска наблюдаются в основном в линиях молекул и 21 см линии нейтрального водорода, становится ясно, что как минимум следует корректно оценить влияние столкновений атомов и ионов водорода на образование стационарных газовых потоков.

На первый взгляд, стандартным методом расчета в этом случае мог бы стать гидродинамический подход. Но его вряд ли можно применить по двум причинам.

1) Нас не интересуют локальные мелкомасштабные движения, напротив, нам нужно рассчитать глобальный ход кривой вращения внешней части квазистационарного галактического диска.

2) Гидродинамический подход не может быть применен из-за чрезвычайно низкой плотности газа, а значит, значительной длины свободного пробега. Крайняя разреженность газа приводит к нарушению условий применимости гидродинамических уравнений $L_k \gg l_{fp}$, которые предполагаются выполненными в момент интегрирования уравнений кинетики при выводе уравнений гидродинамики. Здесь L_k - характерный размер гидродинамических расчетов (соответствует размеру шага расчетной сетки или характерному размеру, при котором физические свойства газа существенно меняются), а l_{fp} - длина свободного пробега частицы. Так, например, типичная плотность внешних частей диска составляет $10^{-3} - 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$, что приводит к $l_{fp} = 3 - 30 \text{ pc}$. По этой причине гидродинамический подход становится неуместным, поскольку характерные длины L_k , на которых значения (плотность, температура, давление и т. д.) значительно меняются, становятся сопоставимыми или даже меньше, чем l_{fp} .

Единственный надежный и не громоздкий метод может быть получен непосредственно из кинетических уравнений так же, как это было сделано при выводе уравнений гидродинамики. А именно, кинетические уравнения необходимо сначала усреднить по объему, чтобы избежать вышеупомянутых ограничений, накладываемых на область применения уравнений гидродинамики, и только после этого полученные уравнения можно проинтегрировать по импульсу. В этой статье я впервые иду именно по этому пути. Таким образом, в работе получено уравнение диффузии с модифицированным коэффициентом диффузии и оценен газокинетический вклад в образование кривых вращения.

В статье обосновывается необходимость учёта кинетики газа при моделировании динамики дисков спиральных галактик. Показано, что пренебрежение кинетикой газа при таком моделировании приводит к неверной (чисто Кеплеровой) модели вращения галактик и, как следствие, к неправильной оценке гравитирующих масс и их распределения (именно это обстоятельство и приводит к необходимости искусствен-

но добавлять ТМ). Для решения поставленной задачи в работе получено модифицированное уравнение диффузии (14) показывающее, что кривая вращения газа (как функция расстояния от центра) действительно зависит от плотности газа. Таким образом, если такая зависимость будет наблюдаться, это будет прямым свидетельством исключительной роли газовой кинетики в формировании кривых вращения галактических дисков. На примере двух галактик с большим наклоном NGC7331 и NGC3198 показано, что наблюдаемые газовые распределения действительно соответствуют кривым вращения, и они взаимосвязаны именно уравнением (14), как это и должно быть. Таким образом обосновывается, что именно газовая кинетика доминирует в формировании кривых вращения спиральных галактик на больших расстояниях от центра. Фактически кривые вращения на больших расстояниях от центра следует рассматривать как попутный ветер (ветровой хвост) барионного газа, который следует за предшествующей барионной материей в случае, если газ подчиняется обычным законам термодинамики и газовой кинетики. По этой причине концепция ТМ становится не нужной для объяснения кривых вращения спиральных галактик.

Статья организована следующим образом:

Во втором разделе делаются предварительные оценки основных параметров газа в диске спиральной галактики. Сделанные грубые предварительные оценки показывают, что кинетика разреженного газа действительно должна играть доминирующую роль в формировании ветровых хвостов в разреженных неравновесных средах.

Но если это так, то в реальности должна наблюдаться жёсткая корреляция между формой внешней части кривой вращения с одной стороны и распределением плотности газа с другой (вспомним правило Ренцо). Чтобы проверить так ли это, в третьей части выводятся дифференциальные уравнения, описывающие установившееся течение газа (см. уравнения (10) и (14)). Решение полученных уравнений даёт объемную плотность газа, в то время как из наблюдений мы получаем измеренную лучевую концентрацию вдоль луча зрения. Поэтому в разделе 4 вычисляется соответствующая лучевая концентрация, чтобы сравнить ее с наблюдаемой.

Наиболее интригующими и интересными являются плоские кривые вращения, проявляющиеся во внешних частях дисков. В качестве примера мы рассматриваем две галактики S-типа характеризуемых большим наклоном, для которых имеются измеренные кривые вращения и лучевые концентрации в линии водорода 21 см в зависимости от расстояния R от центра галактики. Для этих галактик, используя полученные уравнения (14), аналитически вычислена лучевая концентрация газа, как функция расстояния. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2, и превосходно согласуются с данными наблюдений. В заключение резюмируются основные результаты статьи и обсуждаются некоторые важные следствия.

2. Предварительные оценки

Полный текст доступен для загрузки с сайта журнала.

3. Плотность газа как функция расстояния и её связь с кривой вращения

Полный текст доступен для загрузки с сайта журнала.

4. Лучевая концентрация

Полный текст доступен для загрузки с сайта журнала.

5. Выводы и дискуссия

Хорошо известно, что ветер в галактиках - понятие не новое. Например, ветер вызванный вспышкой звездообразования - это хорошо известное явление, которое широко обсуждается в литературе [34, 35, 36]. Однако в случае крупномасштабных движений и крайне низких плотностей газа во внешней части дисков, которые нас интересуют, стандартный гидродинамический подход не может быть применен из-за ограничений, упомянутых выше. Таким образом, попутный ветер (ветровой хвост), образующий кривые вращения, нужно описывать иначе. В данной статье показано, что общепринятое объяснение кривых вращения спиральных галактик, основанное на наивном моделировании динамики спиральных галактик и распределения масс в предположении доминирующей роли гравитационного взаимодействия, не является полным и не может считаться удовлетворительным.

В настоящей статье было показано, что влияние кинетики газа на формирование кривых вращения чрезвычайно важно и является доминирующим для внешней части галактического диска, то есть физические свойства газа должны быть приняты во внимание для определения квазистационарной динамической структуры газовых дисков, называемых кривыми вращения (напомним, что кривые вращения для самой интригующей - внешней части дисков галактик наблюдаются в линиях молекул и линии 21 см нейтрального водорода). Поэтому влияние кинетики газа на формирование стационарных газовых потоков необходимо, по крайней мере, правильно учитывать. В данной статье построена такая модель. На основе построенной модели, показано, что кривая вращения газа и его плотность связаны друг с другом модифицированными уравнениями диффузии (14). Такая зависимость доказывает важность газовой кинетики в формировании внешней части кривых вращения галактик. Чтобы проиллюстрировать правильность полученного общего уравнения (14), в качестве примера были рассмотрены две галактики NGC7331 и NGC3198 с плоскими кривыми вращения, характеризующиеся сильно отличающимися массами и размерами. Оказалось, что наблюдаемые распределения плотностей газа действительно соответствуют кривым вращения обеих галактик и они связаны между собой именно уравнением (14). Основываясь на оценках полученных во втором разделе настоящей работы, а так же на прекрасном совпадении рассчитанных с помощью уравнения (14) распределений плотности с наблюдаемыми величинами, можно сделать вывод, что именно кинетика газа доминирует в формировании кривых вращения спиральных галактик на больших расстояниях, и нет нужды во введении концепции "тёмной материи" для объяснения "нефизических" кривых вращения галактик.

Несколько слов следует сказать о редких звездах, образующихся во внешней части диска. Известно, что кривые вращения для внешней части диска измеряются не только в 21 см или в молекулярных линиях, но иногда и в оптике по спектрам редких и молодых звезд, которые образовались в этой области. В этом случае примерно такие же (как и у газа) тангенциальные скорости удаленных редких звезд, движущихся вне зоны R_0 , можно объяснить законом сохранения импульса, передаваемого от газа (из которого образуются звёзды) - молодым звёздам. Элементарные оценки

показывают, что эти молодые звезды в большинстве случаев будут гравитационно связаны и двигаться по эллиптическим Кеплеровым орбитам.

Основные результаты работы можно резюмировать следующим образом:

1) На основе сделанных оценок утверждается, что ни методы Ньютоновской механики, ни гидродинамический подход не применимы для расчета кривых вращения. По этой причине для правильного описания наблюдаемого профиля кривых вращения спиральных галактик необходимо учитывать не только гравитационное взаимодействие, но и физические свойства газа, используя правильную модель, включающую кинетику газа.

2) Показано, что кривые вращения состоят из двух частей. Одна (внутренняя часть) образована бесстолкновительным идеальным «газом», состоящим из звезд, и в этом случае в самом деле преобладает гравитационное взаимодействие. В то же время другая часть (локализованная во внешней области диска) образована в основном обычным разреженным газом. В этом случае движение газа должно описываться полным кинетическим уравнением, в гамильтониан которого входит гравитационный потенциал. При этом именно кинетическое уравнение ответственно за формирование стационарных газовых потоков - ветровых хвостов (и, как следствие, за формирование внешней части наблюдаемых кривых вращения). Для описания динамики разреженного газа, в настоящей работе было впервые получено уравнение, подобное уравнению диффузии, с модифицированным коэффициентом диффузии. Указанное уравнение было получено в предположении малости гравитационного взаимодействия, что всегда выполняется для внешних частей дисков галактик.

3) На основе выведенного уравнения (14) получена прямая и точная связь между кривой вращения галактики и функцией плотности газа $n(\rho)$, где ρ есть прицельный параметр (видимое расстояние от центра галактики до точки измерения лучевой концентрации). По измеренным кривым вращения вычислены лучевые концентрации HI как функции расстояния ρ для двух галактик с большим наклоном: NGC7331 и NGC3198. Рассчитанные лучевые концентрации превосходно согласуются с наблюдаемыми.

4) Принимая во внимание доказанные выше факты (что кривая вращения состоит из двух разных частей, обусловленных преимущественно Ньютоновской гравитацией и законами физической кинетики газов, соответственно), были вычислены полные массы двух спиральных галактик с большим наклоном. Полученная оценка масс для NGC7331 составляет: $M_{7331} = 32.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ и для NGC3198 полная масса составляет $M_{3198} = 7.3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

Показано, что нет необходимости использовать темную материю для объяснения не-Кеплеровых кривых вращения галактик S-типа, поскольку потребность в темной материи возникает только в случае применения наивной модели, основанной на классической механике, которая не учитывает физические свойства разреженного газа и явно не применима для внешних областей галактических дисков.

В рамках предложенной полной модели, правильно учитывающей газовую кинетику, эффект уменьшения скорости вращения с высотой над плоскостью галактики [15] получает естественное объяснение. Действительно, учитывая, что длина свободного пробега атома водорода равна $t_{fp} = (N\sigma V_t)^{-1}$, становится ясно, что с уменьшением плотности газа (плотность газа уменьшается с увеличением высоты над галактической плоскостью), длина свободного пробега увеличивается. Это приводит к уменьшению количества столкновений и, следовательно, к менее эффективной передаче момента движения. Таким образом, даже из качественных рассуждений

становится очевидным, что скорость вращения должна уменьшаться с увеличением высоты над диском галактики, и стремиться к Кеплеровой скорости (расчитанной без аксиоматического введения тёмной материи).

На первый взгляд, отсутствие темной материи может сильно повлиять на современную космологию, поскольку считается, что ТМ играет ключевую роль в формировании наблюдаемой структуры во Вселенной. Это в самом деле так, но только в рамках (псевдо-) Римановой геометрии. Очевидно, что в отсутствие темной материи космологическое время, необходимое для образования наблюдаемой структуры, должно быть увеличено. Наиболее естественным образом это можно сделать с помощью геометрии с несимметричными связностями (которые, кстати, содержат космологическую постоянную возникающую из самой геометрии, т.е. её не надо вводить в модель искусственным путём). Ярким представителем является, например, активно развиваемая в настоящее время космологическая модель основанная на Финслеровой геометрии. Такое расширение геометрии дает необходимое время для формирования наблюдаемой структуры. Следует так же подчеркнуть, что (псевдо-) Риманова геометрия является очень частным случаем Финслеровой, и нет никаких веских причин которые заставляли бы нас ограничиваться очень частным случаем (псевдо-) Римановой геометрии.

Более того, есть и другие серьезные аргументы в пользу того, что мы живем именно на Финслеровом, а не на Римановом многообразии.

Во-первых, как уже упоминалось, геометрии с несимметричными связностями содержат в себе космологическую постоянную, которая возникает естественным образом из самой геометрии. Более того, они так же имеют другую положительную сторону - они свободны от сингулярности, присущей космологии основанной на (псевдо-) Римановой геометрии.

Во-вторых в таких геометриях, в рамках расширяющейся Вселенной становится возможным свести квантовую теорию к геометрической основе. А именно, в рамках геометрии с асимметричными связностями возможно не только вычислить главный параметр квантовой теории - постоянную Планка из первых принципов [37], [38], но и выписать полную систему уравнений электродинамики, описывающую как классические, так и квантовые системы [38].

Следует подчеркнуть, что в рамках геометрии с асимметричными связностями постоянная Планка, рассчитанная из первых принципов (на основе геометрии и измеренных космологических параметров), совпадает со своим экспериментальным значением с точностью до второй значащей цифры, то есть погрешность обусловлена только ошибками измерения космологических параметров (постоянной Хаббла и космологической постоянной) [38], тогда как если расчёты выполнить для (псевдо-) Риманова мира, мы обнаружим, что постоянная Планка будет отличаться от своего точного значения на множитель $3/2$ [39].

Фактически в этом случае мы используем свободное электромагнитное поле в качестве зонда для проверки реальной геометрии пространства. Если пространство Риманово, то при его наблюдаемом расширении только постоянная Хаббла войдет в адиабатический инвариант электромагнитного поля. В результате мы получим постоянную Планка на $1/3$ больше экспериментально измеренного значения. Однако, если мы предположим, что космологическая постоянная имеет геометрическое происхождение (геометрия Финслера), то и постоянная Хаббла, и космологическая постоянная должны быть включены в адиабатический инвариант электромагнитного поля. В этом случае рассчитанный адиабатический инвариант с точностью до оши-

бок измерения совпадает с лабораторно измеренной постоянной Планка. Это прямое доказательство геометрической природы космологической постоянной, т.е. мы живем не в Римановой, а Финслеровской вселенной.

Это более чем серьезные аргументы в пользу Финслеровой геометрии. Если мы также добавим к этому подтвержденное наблюдениями отсутствие темной материи в ранней Вселенной и ее отсутствие в лабораторных экспериментах (см. Введение), ее отсутствие в дисках галактик (эта работа), то необходимость перехода от Римановой геометрии к Финслеровой станет очевидный. В качестве бонуса мы также получим решение космологической core-cusp problem [33]. Разумеется, углы гравитационного линзирования также следует пересчитывать с использованием метрики Финслера.

6. Благодарности

Мне бы хотелось выразить мою глубочайшую признательность Игорю Владимировичу Госачинскому за полезные обсуждения наблюдательных данных и физики газа нашей Галактики.

Мне так же приятно поблагодарить доктора Рыжкова Владислава Андреевича за внимательное прочтение рукописи и полезные комментарии.

Автор посвящает эту работу светлой памяти своего преподавателя высшей математики Сергея Ростиславовича Тихомирова - удивительного, светлого человека, любившего математику и своё дело, посветившего всю свою жизнь студентам.

Список литературы

- [1] Kovács O.E.; Bogdán, A.; Smith, R.K.; Kraft, R.P.; Forman, W.R. Detection of the missing baryons toward the sightline of H 1821+643. *Astrophys. J.* 2019, 872, 83–95. DOI: 10.3847/1538-4357/aaef78 ; arXiv: 1812.04625
- [2] Nicastro, F.; Kaastra, J.; Krongold, Y.; Zappacosta, L. Observations of the Missing Baryons in the warm-hot intergalactic medium. *Nature* 2018, 558, 7710. DOI: 10.1038/s41586-018-0204-1
- [3] Mathur, S.; Gupta, A.; Das, S.; Krongold, Y.; Nicastro, F. Probing the Warm-Hot Circumgalactic Medium with broad OVI and X-rays. *Astrophys. J.* 2021, 908, 69. DOI: 10.3847/1538-4357/abd03f arXiv:2010.02312 (2020)
- [4] Biernaux, J.; Magain, P.; and Hauret, C. Analysis of luminosity distributions of strong lensing galaxies: subtraction of diffuse lensed signal. *Astron. & Astrophys.* 2017, 604, A46. DOI: 10.1051/0004-6361/201730907
- [5] McGaugh, S.S.; Lelli, F.; Schombert, J.M. The radial Acceleration Relation in rotationally supported galaxies. *Phys. Rev. Lett.* 2017, 117, 201101. arXiv:1609.05917
- [6] McGaugh, S.S. The Imprint of Spiral Arms on the Galactic Rotation Curve. *Astrophys. J.* 2019, 885, 87. DOI: 10.3847/1538-4357/ab479b ; ArXiv:1909.11158 [astro-ph.GA]
- [7] Sancisi, R. Dark Matter in Galaxies. In *IAU Symposium 220*; Ryder, S., Pisano, D., Walker, M., Freeman, K. 2004, 220, 233. arXiv:astro-ph/0311348
- [8] Möller, O.; Noordermeer, E. The kinematical structure of gravitationally lensed arcs. *MNRAS* 2006, 365, 496.
- [9] Navarro, J.F.; Frenk, C.S.; White, S.D.M. The structure of cold dark matter halos. *Astrophys. J.* 1996, 462, 563–579.
- [10] Merritt, D.; Graham, A.W.; Moore, B.; Diemand, J.; Terzic, B. Empirical models for dark matter halos. I. nonparametric construction of density profiles and comparison with parametric models. *Astron. J.* 2006, 132, 2685–2700.
- [11] Katz, H.; Brook, C.B.; Lelli, F.; McGaugh, S.S.; Di Cintio, A.; Schombert, J.M. Testing feedback-modified dark matter haloes with galaxy rotation curves: estimation of halo parameters and consistency with Lambda-CDM scaling relations. *MNRAS* 2017, 466, 1648–1668. doi:10.1093/mnras/stw3101

- [12] Di Cintio, A.; Brook, C.B.; Macciò, A.V.; Stinson, G.S.; Knebe, A.; Dutton, A.A.; Wadsley, J. . MNRAS 2014, 437, 415.
- [13] Di Cintio, A.; Brook, C.B.; Dutton, A.A.; Macciò, A.V.; Stinson, G.S.; Knebe, A. . MNRAS 2014, 441, 2986.
- [14] van Dokkum, P.; Danieli, S.; Cohen, Y. Merritt, A. Romanowsky, A.J.; et al. A galaxy lacking dark matter. *Nature Lett.* 2018, 555, 629. doi:10.1038/nature25767
- [15] Fraternali, F.; Oosterloo, T.; Sancisi, R.; Swaters, R. The extra-planar neutral gas in the edge-on spiral galaxy NGC891. *Proc. of the Extra-planar Gas Conference*, June 7-11, 2004, Dwingeloo 2005, ASP Conf.Ser. 331, 239, ed. R. Braun ; arXiv:astro-ph/0410375.
- [16] Carollo, D.; Ivezi, Z.; An, D.; Chiba, M.; Freeman, K.C.; Lee, Y.S.; Munn, J.A.; et al. The case for the dual halo of the Milky Way. *The Astrophysical Journal* 2012 , 746:34; doi:10.1088/0004-637X/746/1/34
- [17] Verde, L.; Treu, T.; Riess, A.G. Tensions between the early and late Universe. *Nature Astron.* 2019, 3, 891–895. doi: 10.1038/s41550-019-0902-0
- [18] Riess, A.G. The expansion of the Universe is faster than expected. *Nat. Rev. Phys.* 2020, 2, 10–12. doi: 10.1038/s42254-019-0137-0
- [19] Albert A.; Anderson B.; Bechtol K.; Drlica-Wagner A.; Meyer M.; et al. The Fermi-LAT, DES Collaborations Searching for Dark Matter Annihilation in Recently discovered Milky Way Satellites with Fermi-LAT. *Astrophys. J.* 2017, 834, N2. DOI: 10.3847/1538-4357/834/2/110
- [20] Aprile, E.; Aalbers, J.; Agostini, F.; Alfonsi, M.; Althueser, L.; Amaro, F.D.; et al. Observation of two-neutrino double electron capture in ^{124}Xe with XENON1T. *Nature* 2019, 568, 532–535.
- [21] Abramoff, O.; Drlica-Wagner, A.; Barak, L.; Essig, R.; Bloch, I.M.; Estrada, J.; et al. SENSEI: Direct-Detection Constraints on Sub-GeV Dark Matter from a Shallow Underground Run Using a Prototype Skipper CCD. *Physical Review Letters* 2019, 122, 161801.
- [22] Lang, K.R. *Astrophysical Formulae*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New-York 1974
- [23] Dalcanton, J.J.; Stilp, A.M. Pressure support in galaxy disks: Impact on rotation curves and dark matter density profiles. *Astrophys. J.* 2010, 721, 547–561. DOI: 10.1088/0004-637X/721/1/547
- [24] Joung, M.R.; Mac Low, M-M.; Bryan, G.L. . *Astrophys. J.* 2009, 704, 137–149.
- [25] Rosdahl, J.; Schaye, J.; Dubois, Y.; Kimm, T.; Teyssier, R. Snap, crackle, pop: sub-grid supernova feedback in AMR simulations of disc galaxies. *MNRAS* 2017, 466, 11–33. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3034>
- [26] Landau, L.D.; Lifshitz, E.M. *Course of Theoretical Physics, V.10, Physical Kinetics*, Pergamos press Ltd., Headington Hill, Oxford OX3 0BW, England, 1981.
- [27] Begeman, K.G. PhD thesis, Univ. of Groningen, (1987)
- [28] Begeman, K.G. HI rotation curves of spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics* 1989, 223, 47–60.
- [29] Bigiel, F.; Leroy, A.; Walter, F.; Blitz, L.; Brinks, E.; et al. Extremely inefficient star formation in the outer disks of nearby galaxies. *Astron. J.* 2010, 140, 1194–1213. Doi: 10.1088/0004-6256/140/5/1194
- [30] de Blok, W.J.G.; Walter, F.; Brinks, E.; Trachternach, C.; Oh, S-H.; Kennicutt Jr., R.C. High-resolution rotation curves and galaxy mass models from THINGS. *Astron. J.* 2008, 136, 2648–2719.
- [31] Lipovka, A.A. Improved analytical model for the mass distribution in S-type galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2018, 70, Issue 5, 86. doi: 10.1093/pasj/psy082 PASJ.
- [32] Rubin, V.C.; Burbridge, E.M.; Burbridge, G.R.; Crampin, D.J.; Prendergast, K.H. The rotation and mass of NGC 7331. *Astrophys. J.* 1965, 141, 759R.
- [33] Karukes, E.V.; Salucci, P.; Gentile, G. The dark matter distribution in the spiral NGC 3198 out to 0.22 R_{vir}. *Astronomy & Astrophysics* 2015, 578, A13. DOI: 10.1051/0004-6361/201425339
- [34] Jones, T.J.; Dowell, C.D.; Rodriguez, E.L.; Zweibel, E.G.; Berthoud, M.; et al. SOFIA Far-infrared Imaging Polarimetry of M82 and NGC 253: Exploring the Supergalactic Wind. *Astrophys. J. Lett.* 2019, 870, L9–L20.
- [35] Sharp, R.G.; Bland-Hawthorn, J. . *Astrophys. J.* 2010, 711, 81.

- [36] Rekola, R.; Richer, M.G.; McCall, M.L.; et al. . MNRAS 2005, 361, 330.
- [37] Lipovka, A.A. Planck Constant as Adiabatic Invariant Characterized by Hubble's and Cosmological Constants. Journal of Applied Mathematics and Physics 2014, 2, 61–71. doi: 10.4236/jamp.2014.25009.
- [38] Lipovka, A.A. Physics on the Adiabatically Changed Finslerian Manifold and Cosmology. Journal of Applied Mathematics and Physics 2017, 5, 582–595. doi: 10.4236/jamp.2017.53050.
- [39] Cardenas,I.A.; Lipovka, A.A. Variation of the fine structure constant. Mod. Phys. Lett. A. 2019, 34, No38, 1950315. DOI: 10.1142/S0217732319503152

Поступила в редакцию / Original article submitted: 21.08.2021