

УДК 539.1

ГИДРОДИНАМИКА СИСТЕМЫ ГРАВИТИРУЮЩИХ ЗАРЯДОВ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДЖИНСА

© 2024 г. С. А. Тригер

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: satron@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 09.07.2024 г.

В связи с недавним экспериментом по падению антиводорода в гравитационном поле Земли рассмотрена задача о модификации неустойчивости Джинса для двухкомпонентной среды с гравитационным притяжением и отталкиванием. Из-за возможности существования, наряду с гравитационным притяжением одноименных гравитационных зарядов, гравитационного отталкивания частиц и античастиц гидродинамика такой системы приобретает нестандартный вид. Найдены дисперсионное уравнение, инкремент модифицированной неустойчивости Джинса при произвольной фракции отталкивающей массы антиводорода, а также звуковая мода.

DOI: 10.31857/S0040364424040025

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2023 года в журнале Nature [1] были опубликованы результаты уникального эксперимента по падению антиводорода в гравитационном поле Земли. Этот готовившийся много лет эксперимент (так называемый эксперимент ALPHA-g) ставил целью проверку известной гипотезы о гравитационном отталкивании между частицами и античастицами, предложенной и обсуждавшейся в работах [2–5].

Гипотеза о гравитационном отталкивании античастиц представляет фундаментальный интерес, а также является весьма привлекательной для объяснения эволюции ранней Вселенной и ее наблюдаемых свойств, в частности барионной асимметрии [6], обнаруженного в конце 1990-х гг. ускоренного расширения Вселенной [7, 8], ее плоскостности на больших масштабах и др. Теоретическому развитию гипотезы гравитационного отталкивания античастиц посвящено множество работ, в которых в разных модификациях рассматривались модели гравитации в рамках ньютоновской теории (см., например, [9, 10] и цитируемую там литературу). Результаты работы [11] показали на примере неустойчивости Джинса (НДЖ), что применение общей теории относительности приводит к инкременту, близкому к соответствующему резуль-

тату в ньютоновском приближении. Численное молекулярно-динамическое моделирование системы двух сортов кластеров, в которой кластеры одного типа гравитационного заряда притягиваются, а разных типов гравитационных зарядов отталкиваются, было проведено в [12] и показало хорошее согласие с астрономическими наблюдениями по расширению Вселенной (в [12] приведен также подробный список работ по различным моделям гравитации с отталкиванием материи и антиматерии).

При этом предполагалось, что барионная симметрия при наличии гравитационного отталкивания между частицами и античастицами может быть полностью восстановлена, т.е. число частиц и античастиц во Вселенной одинаково, однако кластеры вещества и антивещества в силу гипотезы отталкивания разлетаются, обосновывая как закон Хаббла, так и ускоренное расширение, и не могут аннигилировать друг с другом, находясь на больших расстояниях и не имея возможности сблизиться. Те античастицы, которые наблюдаются в условиях Земли, являются результатом либо элементарных процессов столкновений частиц в космическом пространстве, либо получаются в лабораториях на ускорителях.

Вместе с тем результаты эксперимента [1] продемонстрировали отсутствие полностью отталкивающей гравитации античастиц и частиц,

показав для антиводорода ($\bar{H}$) эффективное ускорение силы тяжести $a_{\bar{H}} = (0.75 \pm 0.29)g$, где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ есть стандартное ускорение силы тяжести вблизи Земли. Хотя среднее значение $a_{\bar{H}} \approx 0.75g$ совместимо с нормальным значением ускорения силы тяжести $a_{\bar{H}} = g$ для антиводорода в поле Земли с учетом значительной ошибки эксперимента, оно дает серьезные основания как для продолжения экспериментов с повышением точности, так и для теоретического исследования вопроса о механизме возможного ослабленного притяжения частиц и античастиц.

В работе [13] была предложена теоретическая модель, объясняющая возможное ослабление гравитационного притяжения антиводорода к Земле на основе детального рассмотрения структуры антипротона, вносящего основной вклад в массу антиводорода. Масса позитрона пренебрежимо мала, и ею при рассмотрении гравитационных свойств можно пренебречь. Следует отметить, что рассмотрение в [13] основывается на некоторых важных общефизических концепциях, которые обсуждаются ниже. Как для любой составной частицы (атома, молекулы), энергия протона (или антипротона) складывается из энергий составляющих его частиц (кварков) и энергии связи, которая в случае барионов, к которым относится и протон, осуществляется посредством безмассовых глюонов, обладающих «цветом».

В применении к атому подобная концепция наиболее проста и хорошо известна. А именно, энергия атома водорода при исключении его движения как целого складывается из масс покоя протона и электрона и энергии связи между протоном и электроном, имеющей отрицательные дискретные значения. Аналогом такого разделения в протоне (как и в антипротоне) служат энергии кварков (для протона p это комбинация кварков, имеющая структуру u, u, d ; для антипротона $\bar{p}$ структура соответственно $\bar{u}, \bar{u}, \bar{d}$, где черта над буквой означает античастицу) и энергии связи E_B (binding energy) между ними, определяемая их взаимодействием через безмассовые квазичастицы — глюоны, обладающие цветовым зарядом.

В случае атомов и молекул энергия связи очень мала (для атома водорода в основном состоянии $m_p = 938.272 \text{ МэВ/с}^2$, $m_e = 0.511 \text{ МэВ/с}^2$, $E_B = -13.595 \text{ эВ/с}^2$), поэтому она не может играть существенной роли в определении массы атома. Следствием эквивалентности массы и энергии является уменьшение массы устойчивой составной частицы за счет энергии связи E_B . На простейшем примере атома водорода это означает, что масса атома водорода меньше, чем сумма масс изолированных протона и электрона. Разность $m_p + m_e - m_H > 0$ равна модулю энер-

гии связи и называется дефектом массы (см., например, [14]).

Принятие этой концепции в применении к протонам и антипротонам приводит к важным следствиям. Согласно существующим расчетам в квантовой хромодинамике на решетке (Lattice-QCD) [15], энергия связи в протоне превосходит массу движущихся в протоне кварков. При этом, согласно [5, 13], эта энергия не меняется при зарядовом сопряжении, преобразующем частицы в античастицы. В свою очередь, при таком сопряжении гравитационное притяжение движущихся кварков, согласно гипотезе о гравитационном отталкивании частиц и античастиц, сменяется на отталкивание, что могло бы привести к гравитационному отталкиванию антипротона от Земли. Однако поскольку лишь часть общей массы протона, не относящаяся к его энергии связи E_B , изменяет гравитационные свойства, то степень отталкивания зависит от соотношения E_B и полной энергии протона. Согласно теории, развитой в [13] и основанной на Lattice-QCD, сумма энергии связи для протона $E_{B,p}$ и кинетической энергии глюонов составляет порядка $\approx 67\%$ от полной энергии и, следовательно, лишь $\approx 33\%$ при зарядовом сопряжении переходит в антипротоне в массу другого гравитационного знака. При этом в [13] было найдено значение ускорения силы тяжести для антипротона в поле Земли $a_{\bar{H}} \approx 0.33g$ с оценкой максимальной ошибки $0.1g$, что существенно меньше, чем усредненное значение $a_{\bar{H}}$, наблюдавшееся в эксперименте.

О МЕХАНИЗМЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ОТТАЛКИВАНИЯ В МОДЕЛИ С АНТИМАТЕРИЕЙ

Согласно [16], бесконечный однородный газ неустойчив относительно малых возмущений плотности и линеаризация по этим возмущениям уравнений идеальной гидродинамики и уравнения Пуассона для гравитационного потенциала приводит к дисперсионному уравнению, описывающему НДЖ в гравитирующем газе:

$$\omega^2 = c^2 k^2 - \Omega^2,$$

где $\Omega = (4\pi G\rho)^{1/2}$ — частота, определяющая инкремент НДЖ, $\rho = nM$ — массовая плотность вещества, $c = (\gamma_0 T/M)^{1/2}$ — адиабатическая скорость звука при температуре газа T в энергетических единицах, $\gamma_0 = 5/3$ — отношение теплоемкостей, n и M — концентрация частиц и их масса.

В среде гравитирующих частиц с взаимным притяжением НДЖ является основным механизмом начального формирования галактических облаков на ранней стадии образования Вселенной после эпохи рекомбинации. Очевидно, что наличие античастиц и гипотеза гравитационно-

го отталкивания между частицами и античастицами могут влиять на инкремент НДЖ. При этом степень влияния, как видно из дальнейшего рассмотрения, зависит от доли E_B в полной энергии частиц. В предположении, что E_B эквивалентно массе и при зарядовом сопряжении участвует в гравитационном отталкивании частиц и античастиц, НДЖ была рассмотрена в [17]. Однако, если E_B не меняет своих гравитационных свойств при зарядовом сопряжении, оставаясь всегда гравитационно притягивающей материю частью полной массы частицы, картина усложняется.

Ниже запишем уравнения двухжидкостной гидродинамики для такой системы. Поскольку точность теоретической модели кристаллической структуры протона (и антипротона) не является вполне ясной, при рассмотрении гидродинамических уравнений доля энергии связи E_B в общей массе частиц здесь не фиксируется. При этом электроны в атомах и позитроны в антиатомах, обеспечивая электрическую нейтральность, не влияют на гравитационные свойства ввиду малой массы. Для общности рассмотрим два типа точечных электронейтральных объектов (нейтроны и антинейтроны, атомы водорода и антиводорода или облачные скопления атомов и антиатомов) в предположении, что их «гравитационные заряды», т.е. часть их масс, обладают свойством гравитационного отталкивания по отношению к объектам антиматерии, сохраняя гравитационное притяжение как между частицами материи, так и между частицами антиматерии. Инерциальные массы этих объектов обозначим как M_1 и M_2 соответственно (ниже для сокращения записи $M_{1,2}$). Гравитационные массы каждого сорта этих объектов включают отталкивающую часть массы $M_{1,2}^- = f_{1,2} M_{1,2}$ и притягивающую часть массы $M_{1,2}^+ = (1 - f_{1,2}) M_{1,2}$ (для материи, т.е. в случае частиц и отсутствия античастиц $f_{1,2} = 0$).

Коэффициент $f_{1,2}$ показывает уровень гравитационной асимметрии объекта (частицы или античастицы) и введен в [13] при рассмотрении массовой структуры антипротона с целью объяснить данные эксперимента ALPHA-g. Для модели гравитационно-нейтральной Вселенной [17] с равными числами атомов водорода (индекс 1) и антиводорода (индекс 2) $f_1 = 0, f_2 = 1$. Согласно результату эксперимента ALPHA-g [1], усредненное значение ускорения падения в поле тяжести Земли для антиводорода $\ddot{H}$, следует принять $f_{\ddot{H}} = 0.125$ в соответствии с ускорением $a_{\ddot{H}} \approx 0.75g$. Теория [13] с использованием модели Lattice-QCD [15] приводит к значениям $f_{\ddot{H}} \approx 0.33$ и $a_{\ddot{H}} \approx 0.34g$. В общем случае, величина этого коэффициента лежит в интервале $0 \leq f_{\ddot{H}} \leq 1$.

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ С МАТЕРИЕЙ И АНТИМАТЕРИЕЙ

Сформулируем двухкомпонентную гидродинамическую модель для системы электрически нейтральных объектов (частиц и античастиц) с целью рассмотреть влияние изменения доли внутренней энергии составной частицы на НДЖ. Запишем уравнения движения для частиц и античастиц ($a = 1, 2$) в виде

$$M_a n_a \left[\frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial t} + (\mathbf{V}_a \cdot \nabla) \mathbf{V}_a \right] = - \frac{\partial p_a}{\partial \mathbf{r}} + n_a \mathbf{F}_a, \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_a = -M_a^\alpha \nabla \Phi^\alpha,$$

где n_a — плотность частиц типа a , $p_a = n_a(\mathbf{r}, t) T$ — давление (постоянная γ_0 может быть включена в эффективную температуру T). Инерциальные массы всегда положительны и равны соответственно $M_{1,2}$. Индекс α учитывает наличие притягивающей и отталкивающей фракций в массе объекта и определен ниже. Уравнения непрерывности имеют стандартный вид, поскольку для простоты процессы аннигиляции здесь не рассматриваются.

Линеаризованное уравнение Пуассона в фурье-представлении имеет вид (здесь и ниже под n_i понимается возмущение плотности в отличие от (1), где так обозначается полная плотность частиц сорта i)

$$-k^2 \Phi^\alpha = 4\pi G^{\alpha\beta} \sum_i n_i M_i^\beta, \quad (2)$$

где $G^{\alpha\beta}$ является матрицей с элементами $G^{\alpha\alpha} = G$, $G^{\alpha\beta} = -G$ при $\alpha \neq \beta$ (α, β обозначают $+$, $-$, учитывая возможность притяжения и отталкивания гравитирующих объектов). Отталкивающая часть массы в M_1 равна $M_1^- = M_1 f_1$ ($f_1 = M_1^- / M_1$ — доля отталкивающей фракции в M_1), притягивающая часть $M_1^+ = M_1 (1 - f_1)$; то же самое для M_2 , а именно $M_2^- = M_2 f_2$, $M_2^+ = M_2 (1 - f_2)$. Следовательно, f_1 и f_2 являются фракциями антиматерии соответственно в M_1 и M_2 . Необходимо отметить, что в рассматриваемом подходе гравитационные массы всегда положительны и равны инерционным. Это непосредственно следует из равенства $M_i = M_i^- + M_i^+$. Гравитационное отталкивание материи и антиматерии описывается введением матрицы $G^{\alpha\beta}$ в уравнение Пуассона (2). Эта процедура соответствует изменению знака гравитационной постоянной в гравитационной силе, как это реализовано в [13] на основе ньютоновского предела обобщения уравнений общей теории относительности в [18]. Отметим, однако, что утверждение о соблюдении слабого принципа эквивалентности Эйнштейна в подхо-

де, предложенном в [18], не является общепринятым. С дискуссией по этому вопросу можно ознакомиться, например, в [19, 20].

Линеаризация силы $\mathbf{F}_1$ в уравнении (1) приводит к выражению

$$\begin{aligned} n_1^0 \mathbf{kF}_1 = & +i4\pi k^2 n_1^0 G \times \\ & \times \left\{ n_1 M_1^2 \left[(1-f_1)^2 - 2(1-f_1)f_1 + f_1^2 \right] + \right. \\ & + n_2 M_1 M_2 \left[(1-f_2)(1-f_1) - \right. \\ & \left. \left. - (1-f_1)f_2 - (1-f_2)f_1 + f_1 f_2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где невозмущенная плотность частиц сорта 1 обозначена n_1^0 , а возмущения плотностей — как n_1 и n_2 . Аналогичное выражение возникает для $\mathbf{kF}_2$ с заменой индексов $1 \rightleftharpoons 2$.

В частном случае, когда оставлены только перекрестные члены, результат аналогичен по структуре силе, полученной в [13] для двух частиц:

$$\begin{aligned} n_1^0 n_2 G M_1 M_2 \left[(1-f_2)(1-f_1) - \right. \\ \left. - (1-f_1)f_2 - (1-f_2)f_1 + f_1 f_2 \right]. \end{aligned}$$

Положив $f_1 = 0$ (что отвечает реалистической ситуации отсутствия отталкивающей фракции в водороде) и $f_2 \neq 0$ (в антиводороде отталкивающая фракция произвольна $0 \leq f_2 \leq 1$), получаем, что выражение $n_1^0 \mathbf{kF}_1$ пропорционально величине $n_1^0 n_2 M_1 M_2 G(1 - 2f_2)$.

В случае $f_1 = 0, f_2 = 1$ приходим к результату [17] для $n_1^0 \mathbf{kF}_1$ в модели полностью гравитационно нейтральной системы $n_1^0 G M_1 (n_1 M_1 - n_2 M_2)$. Подобное выражение возникает и для $n_2^0 \mathbf{kF}_2$.

Интересуясь далее использованием выражения (3) и подобного ему для $\mathbf{kF}_2$ в уравнениях движения, когда отталкивающая фракция у частиц отсутствует ($f_1 = 0$), приходим к линеаризованным уравнениям движения

$$\begin{aligned} -i\omega M_1 n_1^0 \mathbf{kV}_1 = & -ik^2 n_1 T + \\ & + i\Omega_1^2 \left[n_1 M_1 + n_2 M_2 (1-2f_2) \right], \\ -i\omega M_2 n_2^0 \mathbf{kV}_2 = & -ik^2 n_2 T + i\Omega_2^2 \times \\ & \times \left\{ n_2 M_2 \left[(1-f_2)^2 - 2(1-f_2)f_2 + f_2^2 \right] + \right. \\ & \left. + n_1 M_1 (1-2f_2) \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где введены обозначения $\Omega_1^2 = 4\pi G n_1^0 M_1$ и $\Omega_2^2 = 4\pi G n_2^0 M_2$.

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ И МОДЫ

Используя линеаризованные уравнения непрерывности для исключения линеаризованных скоростей в (4), (5), приходим к дисперсионному уравнению в виде

$$\begin{aligned} \omega^4 + \omega^2 \left[\Omega_2^2 P - k^2 (c_1^2 + c_2^2) + \Omega_1^2 \right] + \\ + c_1^2 c_2^2 k^4 - k^2 (c_1^2 \Omega_2^2 P + c_2^2 \Omega_1^2) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $c_{1,2}^2 = T/M_{1,2}$, $P = (1 - 2f_2)^2$, $-1 < 1 - 2f_2 < 1$, $0 < P < 1$. Если $k = 0$, то из (6) следует

$$\omega^4 + \omega^2 (\Omega_2^2 P + \Omega_1^2) = 0.$$

Для произвольной фракции отталкивающей массы f_2 инкремент неустойчивости равен

$$\gamma = \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2 (1 - 2f_2)^2}.$$

Рассмотрим модель с равными плотностями водорода и антиводорода $n_1^0 = n_2^0$, принимая равенство масс $M_1 = M_2 = M$ и, следовательно, частот $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$. Тогда инкремент приобретает вид

$$\gamma = \Omega \sqrt{1 + (1 - 2f_2)^2}. \quad (7)$$

Этот результат соответствует обычной НДЖ $\gamma_J = \Omega\sqrt{2}$ ($\omega_1 \equiv i\gamma$) в системе $2n$ частиц при $f_2 = 0$ (чисто притягивающая гравитация [16]). Для варианта симметричной гравитации с отталкиванием материи—антиматерии [17] $f_2 = 1$ имеем то же значение $\gamma = \gamma_J = \Omega\sqrt{2}$. Использование экспериментального значения [1] для модели ранней Вселенной в стадии после рекомбинации, содержащей водород—антиводород, приводит к модификации стандартной модели НДЖ. Считая, что E_B при зарядовом сопряжении не меняется и сохраняет свойство притяжения, как в [5, 13], и принимая соответствующее эксперименту значение $f_2 \approx 0.125$, находим для инкремента

$$\gamma_{J,\text{exp}} \approx 1.25\Omega.$$

Если использовать теоретическую оценку модели Lattice-QCD [15] для действующей массы антипротона и приближение [13] $f_2 \approx 0.33$, приходим к инкременту НДЖ

$$\gamma_{J,\text{theor}} \approx 1.06\Omega.$$

Как следует из (7), минимальное значение инкремента $\gamma_{\min} = \Omega$ соответствует $f_2 = 0.5$.

В случае $k \neq 0$ существует звуковая мода

$$\omega^2 = k^2 c_0^2, \quad c_0^2 \equiv \frac{c_1^2 \Omega_2^2 P + c_2^2 \Omega_1^2}{\Omega_2^2 P + \Omega_1^2}.$$

Для $M_1 = M_2$ и $n_1^0 = n_2^0$ корни уравнения (6) равны ($c_1 = c_2 = c$)

$$\omega_1 = kc \sqrt{\frac{2}{1+P}},$$

$$\omega_2 = \sqrt{k^2 c^2 - \Omega^2 (1+P)} = \sqrt{k^2 c^2 - \Omega^2 [1 + (1 - 2f_2)^2]}.$$

Следовательно, стабилизация обобщенной НДЖ для конечного размера возмущений появ-

ляется при $0 < f < 1$ для меньших значений k (более длинных волн), чем для предельных значений $f_2 = 0$ и $f_2 = 1$. Минимальное значение стабилизирующего волнового вектора равно $k_{\min} = \Omega/c$ для $f_2 = 0.5$. Затухание звуковой волны, связанное с аннигиляцией частиц и античастиц, в настоящей работе не рассматривалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недавно проведенный в CERN эксперимент [1], призванный подтвердить или опровергнуть гипотезу о гравитационном отталкивании частиц и античастиц не исключил возможности уменьшения ускорения падения антиводорода в поле Земли по сравнению с ускорением g . Из-за больших погрешностей эксперимента пока рано делать окончательные выводы о подтверждении гипотезы о существовании и величине гравитационного отталкивания материи и антиматерии. Контрольные эксперименты с более высокой точностью желательны, и их планируется провести в ближайшее время. Возможное объяснение уменьшения ускорения силы тяжести антиводорода было предложено в [13] на основе рассмотрения кварк-глюонной структуры протона и антипротона [15]. Большая величина энергии связи E_b в протоне и концепция, утверждающая, что связанная с ней масса при зарядовом сопряжении, преобразуящем протон в антипротон, остается неизменной, не участвуя в гравитационном отталкивании, приводит к уменьшению ускорения силы тяжести антиводорода $a_{\bar{H}}$ к Земле. Очевидно, что такой механизм появления гравитационного отталкивания может привести к изменению представлений об эволюции ранней Вселенной, в которой восстанавливается барионная симметрия по числу частиц и античастиц, но не по гравитирующим массам. В настоящей работе сформулированы уравнения двухкомпонентной гидродинамики системы двух типов гравитирующих зарядов («гравитационной плазмы»), в которой гравитационное взаимодействие описывается недиагональной матрицей. На этой основе в линейном по возмущениям приближении найдено дисперсионное уравнение, описывающее модифицированную НДЖ и звуковую моду колебаний. Показано, что НДЖ существенным образом зависит от той доли массы протона, которая приводит к гравитационному отталкиванию при зарядовом сопряжении. Для возмущений с конечной длиной волны получены условия стабилизации неустойчивости.

Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего теоретического анализа и согласования астрономических наблюдений с те-

орией (в частности, за счет расширения диапазона возможных значений инкремента НДЖ), для исследования проблемы гравитационного взаимодействия частиц и античастиц, для развития представлений о процессах в ранней Вселенной, для обобщения гидродинамических моделей плазмоподобных сред, а также для понимания квантовых свойств составных «элементарных» частиц. Последнее связано с углублением представлений о гравитационных свойствах энергии связи E_b , в том числе о ее неизменности при зарядовом сопряжении в рамках гипотезы о гравитационном отталкивании материи и антиматерии.

Такая особенность энергии связи, постулированная в [5, 13], не является очевидной. Более того, возникает вопрос о свойствах энергии связи вне проблемы зарядового сопряжения. Это общий вопрос, соотносящийся с понятием дефекта массы для различных видов взаимодействий между частицами, составляющими более сложный объект. К таким взаимодействиям относятся электромагнитное, определяющее образование атомов и молекул, сильное взаимодействие ответственное за образование ядер, а также гравитационное, формирующее компактные астрономические объекты. Из соотношения Эйнштейна, связывающего энергию и массу покоя тела $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$, следует, что масса покоя всегда эквивалентна энергии. Простейшим подтверждением этого является аннигиляция паропозитрония с образованием двух фотонов, не имеющих массы покоя, но обладающих безмассовой энергией. Тем самым, энергия может существовать в безмассовой форме, т.е. не всегда эквивалентна массе покоя, не только для фотона, но и, например, в форме энергии кинетического движения. Является ли энергия связи в различных формах, перечисленных выше, а также в нуклонах, состоящих из кварков, связанных цветовым глюонным взаимодействием, эквивалентом массы покоя, образуя так называемый дефект массы, или же энергия связи является безмассовой, по крайней мере для некоторых типов взаимодействия? Этот важный вопрос нуждается в дальнейшем исследовании и экспериментальной проверке. Более подробное обсуждение проблемы выходит за рамки данной работы и дано в [21].

Автор благодарен М.В. Федорову и S. Menary за полезные обсуждения и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson E.K., Granum P., Hangst J.S. et al. Observation of the Effect of Gravity on the Motion of Antimatter // Nature. 2023. V. 621. P. 716.

2. *Matz D., Kaempffer F.A.* Some Considerations on the Gravitational Mass of Antimatter // *Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II.* 1958. V. 3. P. 317.
3. *Morrison P.* Approximate Nature of Physical Symmetries // *Am. J. Phys.* 1958. V. 26. P. 358.
4. *Schiff L.I.* Sign of the Gravitational Mass of a Positron // *Phys. Rev. Lett.* 1958. V. 1. P. 254.
5. *Schiff L.I.* Gravitational Properties of Antimatter // *Proc. Nat. Acad. Sci. (PNAS).* 1959. V. 45. P. 69.
6. *Сахаров А.Д.* Нарушение СР-инвариантности, С-асимметрии и барионной асимметрии Вселенной // *ЖЭТФ.* 1967. Т. 5. С. 24.
7. *Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurement of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophys. J.* 1999. V. 517 (2). P. 565.
8. *Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astronom. J.* 1998. V. 116 (3). P. 1009.
9. *Bonnor W.B.* Jeans' Formula for Gravitational Instability // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1957. V. 117. P. 104.
10. *Gribov I.A., Trigger S.A.* Gravitationally Neutral Dark Matter—Dark Antimatter Universe Crystal with Epochs of Decelerated and Accelerated Expansion // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 774. P. 012045.
11. *Лифшиц Е.М.* О гравитационной устойчивости расширяющегося мира // *ЖЭТФ.* 1946. Т. 16. С. 587.
12. *Dimopoulos C., Stamokostas G.L., Gkouvelis L., Trigger S.* Hubble Law and Acceleration Curve Energies in a Repulsive Matter-Antimatter Galaxies Simulation // *Astropart. Phys.* 2023. V. 147. P. 102806.
13. *Menary S.* What Exactly is Antimatter (Gravitationally Speaking)? // *arXiv:2401.10954v1 [physics.gen-ph]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10954>. 2024.
14. *Хлопов М.Ю.* Дефект массы // *Физическая энциклопедия* / Гл. ред. Прохоров А.М. М.: Сов. энциклопедия, 1988.
15. *Ji X.-D.* Proton Mass Decomposition: Naturalness and Interpretations // *Front. Phys.* 2021. V. 16. P. 64601.
16. *Jeans J.H.* The Stability of a Spherical Nebula // *Philos. Trans. R. Soc. London.* 1902. V. A199. P. 1.
17. *Trigger S.A., Gribov I.A.* Jeans Instability and Antiscreening in the System of Matter—Antimatter with Antigravitation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 653. P. 012121.
18. *Villata M.* CPT Symmetry and Antimatter Gravity in General Relativity // *Europhys. Lett.* 2011. V. 94. P. 20001.
19. *Cabbolet M.J.T.F.* Comment to a Paper of M. Villata on Antigravity // *Astrophys. Space Sci.* 2012. V. 337. P. 5.
20. *Villata M.* Reply to «Comment to a Paper of M. Villata on Antigravity» // *Astrophys. Space Sci.* 2012. V. 337. P. 15.
21. *Trigger S.A.* Binding Energy and Gravitational Mass // *Research Gate.* 2024. July 10. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10605.81122>.