I. Двузнаковая гравитация. Гравитация, частицы и античастицы

А. В. Клименко, В. А. Клименко

Аннотация

Показано, что не вступая в противоречие с известными экспериментами и наблюдениями, можно гипотетически предполагать, что гравитация различает частицы и античастицы. Они противоположным образом реагируют на действие гравитационного поля. Их вклады в создание этого поля следует брать с разными знаками. Между ними существует не тяготение, а антитяготение. Теория гравитации, различающая частицы и античастицы, названа двузнаковой гравитацией. Показано, что в рамках этой теории может быть дано убедительное решение давно известных фундаментальных физических проблем: тёмной материи, тёмной энергии, барионной асимметрии и других.

Ключевые слова: гравитация, антитяготение, частицы, античастицы, двузнаковая гравитация

1 Введение

Эта статья является первой в серии статей, под общим названием "Двузнаковая гравитация"(ДГ). Они посвящёны доказательству необходимости кардинального уточнения современной теории гравитации (ОТО). Показано, что в рамках этой теории может быть дано убедительное решение давно известных фундаментальных физических проблем. Они давно известны, но пока нет убедительного их решения.

Перечислим лишь некоторые из них:

1 Проблема барионной асимметрии;

2 Проблема тёмной материи;

3 Проблема антитяготения;

4 Проблема физического вакуума в гравитации;

5 Проблема сингулярных решений в гравитации;

6 Проблема плоскостности, однородности и изотропности Вселенной.

Обычно эти проблемы обсуждаются и безуспешно решаются в рамках общей теории относительности [1–3]. Считаем, что современная теория гравитации (ОТО) является ограниченной и не пригодна для их решения [4]. Покажем, что есть веские основания предполагать, что ОТО, а также и современная квантовая теория поля (КТП), неправильно описывают гравитационное взаимодействие частиц и античастиц, а также гравитационные свойства главной и определяющей компоненты космической среды — физического вакуума.

В [4] предложена теория гравитации существенно уточняющая ОТО. Главные отличия этой теории от общей теории относительности заключаются в следующем:

1 Считается, что между частицами и античастицами существует не тяготение, а антитяготение.

2 Главной компонентой космической среды является не тёмная энергия, а физический вакуум. В отличие от представлений современной квантовой теории поля, см.,например, гл. 8 [13] , предполагается, что он не только электро-, но и гравитационно-нейтрален.

3 Реальные частицы и античастицы являются возбуждёнными состояниями вакуума. Они отличаются знаком энергии. Полная энергия Вселенной равна нулю.

Предлагаемое уточнение существующей теории гравитации является кардинальным. Оно учитывает первоначальную идею Дирака о фундаментальном различии частиц и античастиц как состояний, отличающихся знаком энергии. В двузнаковой гравитации эта идея Дирака и идея Эйнштейна об энергии, как источнике гравитации, являются основополагающими. В отличие от ОТО, ДГ различает частицы и античастицы.

2 Дираковские электроны. Частицы и античастицы

Приведём некоторые данные об античастицах, которые будем учитывать.

Идея о существовании античастиц была впервые высказана П. Дираком. Она возникла у него при анализе решений написанного им квантового релятивистского уравнения для электрона [14]. Открытие К. Андерсоном позитрона [15] подтвердило правильность этой идеи.

Из релятивистского уравнения Дирака для электрона следовало, что его описание даётся четырёхкомпонентной волновой функцией. Она учитывает наличие у электрона внутренних свойств — спина S, а также возможность его существования в состояниях как с положительной, так и с отрицательной энергией. Состояния дираковских электронов, имеющих электрический заряд $(-e)$, как его обычно обозначают, могут отличаться:

- либо проекциями спина $S(\pm 1/2)$;

- либо знаками энергии;

- либо и тем и другим.

На примере нерелятивистских дираковских электронов, покажем, что электроны с положительной и отрицательной энергиями (с массами $m > 0$ и $-m < 0$, соответственно) в электромагнитном поле ведут себя как две различные частицы. При

одинаковых условиях (положении и скорости) они испытывают равные по величине, но противоположно направленные ускорения. Это различие и послужило поводом для того, чтобы их считать античастицами друг друга.

3 Дираковские электроны в электромагнитном поле

Уравнения движения для нерелятивистских электронов, имеющих электрический заряд $(-e)$, с положительной $(m > 0)$ и отрицательной $(-m < 0)$ энергиями (массами) имеют вид:

$$m\frac{d\bar{V}}{dt} = -e\bar{E} - \frac{e}{c}[\bar{V}, \bar{B}], \tag{1}$$

$$-m\frac{d\bar{V}}{dt} = -e\bar{E} - \frac{e}{c}[\bar{V}, \bar{B}], \tag{2}$$

соответственно, где $\bar{V}$ — их скорость, $\bar{E}$ и $\bar{B}$ — напряжённости электрического и магнитного полей.

Производя замену $-m \Rightarrow m, t \Rightarrow -t$, и не меняя знака электрического заряда, уравнение (2), описывающее движение электрона с отрицательной энергией (античастицы для электрона с положительной энергией), можно рассматривать как записанное для электрона с положительной энергией (массой), но движущегося во времени вспять. Такая интерпретация античастиц, как частиц с положительной инертной массой, но движущихся во времени вспять часто рассматривается. Её обычно связывают с именем Фейнмана [16]. По Фейнману, в электродинамике, античастица — это частица, но движущаяся во времени вспять. При замене $t \Rightarrow -t$ следует учитывать, что $\vec{E} \Rightarrow \vec{E}, \vec{B} \Rightarrow -\vec{B}$, а $\vec{V} \Rightarrow -\vec{V}$ [17, § 17]. В двузнаковой гравитации считается, что эта идея Фейнмана справедлива и для гравитационного взаимодействия.

Утверждение о том, что масса частиц не может быть отрицательной, поскольку это противоречит принципу наименьшего действия, см., например, [18, § 4] не является правильным. Не учтено, что стрела времени для античастиц противоположна стреле времени для частиц.

Более широкое распространение в физике частиц получила другая точка зрения на античастицы. Она заключается в следующем. Уравнение (2) для электронов с отрицательной энергией переписывают в виде:

$$m\frac{d\bar{V}}{dt} = e\bar{E} + \frac{e}{c}[\bar{V}, \bar{B}], \tag{3}$$

и рассматривают как описывающее движение частицы с положительной инертной массой, равной массе обычного электрона, но имеющей электрический заряд противоположного с ним знака, т.е. не $-e$, а $+e$.

Дальнейшее развитие теории показало, что идея рассматривать частицы и античастицы, как отличающиеся не знаком инертной массы, а знаком электрического заряда, применима не только к электронам, но и ко всем другим заряженным частицам.

В настоящее время эта идея обобщена на случай сильных и слабых взаимодействий. Считается что каждая частица имеет «двойника» — античастицу. Они имеют одинаковые с частицами положительные инертные массы, спин, время жизни, но отличаются знаками всех зарядовых квантовых чисел: электрического, лептонного, барионного и некоторых других [19]. В настоящей работе показано, что, не вступая

в противоречие с наблюдениями, можно гипотетически предполагать, что они отличаются друг от друга ещё и знаком квантового зарядового числа, определяющего их гравитационные свойства. Эта гипотеза, в теоретическом плане поддержана идеей Дирака о различии частиц и античастиц знаком энергии и идеей Эйнштейна о энергии как источнике гравитации.

В настоящее время полагают, что в некоторых случаях частица и её античастица тождественны друг другу и являются истинно-нейтральными. К таким частицам относят γ-кванты, π^0-мезоны и некоторые другие мезоны. В ДГ эта идея не считается правильной. В этой теории предполагается, что любая частица обладает энергией и равноправно с ней существует соответствующая ей античастица с противоположным знаком энергии. Частицы и античастицы отличаются знаком зарядового квантового числа, определяющего их гравитационные свойства. У любой частицы, в том числе и у фотона, существует соответствующая ей античастица и их гравитационные свойства противоположны.

4 О взаимосвязи инертной и тяжёлой масс

Основополагающей идеей, лежащей в основе ОТО, является гипотеза согласно которой любые тела, при одинаковых начальных условиях (одинаковых положении и скорости), в гравитационном поле движутся одинаково [3; 20].

Одной из важнейших задач было экспериментальное решение вопроса о точности утверждения об одинаковости ускорений, сообщаемых гравитационным полем разным телам. Обычно это утверждение формулируется как принцип эквивалентности инертной m_i и тяжёлой m_g массы. Часто этот принцип поясняют следующим образом [21]. В уравнениях движения тела в поле тяжести

$$m_i \frac{d^2\bar{r}}{dt^2} = -m_g \nabla U, \tag{4}$$

слева стоит инертная m_i масса, а справа тяжёлая m_g (i-inertial, g-gravity). Если для любых тел $m_{\mathrm{i}} = \alpha m_{\mathrm{g}}$, то масса слева и справа сокращаются и приходят к выводу об одинаковости ускорений, которые испытывают любые тела в гравитационном поле при одинаковых условиях. Множитель α зависит от единиц измерения и его выбирают равным единице, считая, что $m_i \equiv m_g$.

В результате высокоточных измерений, проведённых Роллом, Кротковым, Дикке [22], Брагинским и Пановым [23] было показано, что отношение тяжёлой и инертной масс для различных тел состоящих из различных веществ отличается от единицы не более чем на $10^{-10} \div 10^{-12}$.

На основании этих измерений был сделан также вывод о том, что тяжёлая масса тел определяется их полной энергией, а не количеством протонов, нейтронов и электронов, содержащихся в них. При получении этого вывода учитывали что энергия связи протонов и нейтронов в ядрах различных атомов может отличаться [24]. Считали, что если бы тяжёлая масса тел определялась количеством элементарных частиц из которых оно состоит, а инертная масса, как показывают эксперименты на ускорителях, их полной энергией, то для тел состоящих из различных веществ, отношение тяжёлой и инертной масс могло отличаться на величину порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$. Эксперименты [22; 23], проведённые с телами, состоящими из веществ различного химического состава, этого отличия не выявили, что и явилось основанием для вы-

вода о том, что и тяжёлая и инертная массы тел определяются их полной энергией. Эта идея лежит в основе и ОТО и ДГ.

При интерпретации результатов экспериментов, доказывающих эквивалентность инертной и тяжёлой масс любых тел, делается одно неявное предположение. Считается, что тяжёлые массы тел, состоящих из вещества и антивещества не только равны своим инертным массам по величине, но и имеют с ними одинаковый положительный знак. Полагаем, что из работ [22; 23] и аналогичных им этот вывод не следует, поскольку эксперименты проводились лишь для тел, состоящих из вещества.

В ОТО гипотетически предполагается, что гравитация не различает частицы и античастицы. Считается, что они имеют тяжёлые массы, тождественно совпадающие с их инертными положительными массами (принцип эквивалентности).

Другая гипотеза лежит в основе ДГ [4]. В этой теории считается, что гравитация различает частицы и соответствующие им античастицы. Предполагается, что их инертные массы, как это принято в теории частиц, положительны и равны по величине. В то же время их тяжёлые массы равны по величине, но имеют противоположные знаки. Принятие этой гипотезы кардинально меняет свойства гравитации. Как и в ОТО, согласно ДГ, все частицы, вне зависимости от их массы, движутся в гравитационном поле, при заданных начальных условиях, одинаковым образам. То же самое справедливо и для античастиц. В то же время в ДГ, в отличие от ОТО, частицы и античастицы в гравитационном поле, при одинаковых начальных условиях, движутся различным образом. В ДГ принцип эквивалентности тяжелой и инертной масс справедлив для частиц и отдельно для античастиц .

Предполагая равноправие частиц и античастиц и полную симметрию по ним, в двузнаковой гравитации считаем, что Вселенная не только электро-, но и гравитационно- нейтральна.

На простом примере покажем, как согласно ДГ, различие гравитационных свойств частиц и античастиц должно проявляться в наблюдениях.

5 Гравитационное взаимодействие двух тел

В рамках ОТО и ДГ, с учетом существующих в теории частиц представлений о веществе и антивеществе, рассмотрим гравитационное взаимодействие двух нерелятивистских макроскопических тел, инертные массы которых m_{1i} и m_{2i}, а их тяжёлые массы m_{1g} и m_{2g}. Для простоты, считаем, что $m_{2i} \gg m_{1i}$, тело 2 покоится и находится в начале системы координат, $\bar{V} = \frac{d\bar{R}}{dt}$ — скорость тела 1, $|\bar{V}| \ll c$. Рассмотрим различные теоретически допустимые случаи, поясняющие идею ДГ о двузнаковости тяжёлых масс.

5.1 Взаимодействие частица-частица

В этом случае и в ОТО и в ДГ $m_{1g} = m_{1i} > 0$ и $m_{2g} = m_{2i} > 0$. Уравнение движения частицы 1 в гравитационном поле частицы 2 имеет вид:

$$m_{1i}\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{Gm_{1g}m_{2g}}{R^3}\bar{R} \Rightarrow \frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{Gm_{2i}}{R^3}\bar{R}. \tag{5}$$

Имеет место обычный закон всемирного тяготения Ньютона.

5.2 Взаимодействие античастица-античастица

В этом случае, согласно ОТО, $m_{1g} = m_{1i} > 0, m_{2g} = m_{2i} > 0$, в то же время, согласно ДГ, $m_{1g} = -m_{1i} < 0, m_{2g} = -m_{2i} < 0$. Уравнение, описывающее движение античастицы 1 в гравитационном поле античастицы 2 и в ОТО и в ДГ имеет вид:

$$m_{1i}\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{Gm_{1g}m_{2g}}{R^3}\bar{R} \Rightarrow \frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{Gm_{2i}}{R^3}\bar{R}. \tag{6}$$

Оно не отличается от аналогичного уравнения для частиц. Это означает, что при замене всех частиц на античастицы, и наоборот, различие знаков тяжёлых масс у частиц и античастиц не проявится. Согласно ДГ, как и в ОТО, между античастицами, как и частицами, существует гравитационное притяжение.

5.3 Взаимодействие частица-античастица

В этом случае, согласно ДГ, $m_{1g} = m_{1i} > 0$, а $m_{2g} = -m_{2i} < 0$. При этом уравнение движения частицы в гравитационном поле античастицы имеет вид:

$$m_{1i}\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{Gm_{1g}m_{2g}}{R^3}\bar{R} \Rightarrow \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{Gm_{2i}}{R^3}\bar{R}. \tag{7}$$

Из него следует, что между частицей и античастицей существует антитяготение, а вовсе не тяготение, как считается в ОТО. В этом состоит одно из главных различий двузнаковой гравитации и общей теории относительности.

6 Ньютоновский предел в ОТО и ДГ

В ОТО, уравнение для гравитационного поля в ньютоновском пределе имеет вид:

$$\triangle\ \Phi = 4\pi G(\rho_g + \bar{\rho}_g) = 4\pi G(\rho + \bar{\rho}), \tag{8}$$

где ρ и $\bar{\rho}$ — плотность инертных масс вещества и антивещества, соответственно, а $\rho_g = \rho$ и $\bar{\rho}_g = \bar{\rho}$ — плотности соответствующих им тяжёлых масс.

Принципиально другая ситуация в ДГ. Согласно этой теории, $\rho_g = \rho$, но $\bar{\rho}_g = -\bar{\rho}$. С учётом этого, уравнение для гравитационного поля в ньютоновском пределе в ДГ имеет вид:

$$\triangle\ \Phi = 4\pi G(\rho_g + \bar{\rho}_g) = 4\pi G(\rho - \bar{\rho}). \tag{9}$$

Из (7) и (9) видно, что в ДГ частицы и античастицы в гравитационном поле проявляют себя по-разному не только в пассивном, но и в активном смыслах. Они по-разному движутся в гравитационном поле и по-разному участвуют в его создании. То что для частиц является полем тяготения, для античастиц — полем антитяготения и наоборот. Среды, в которых в каждой точке $\rho = \bar{\rho}$ гравитационного поля не создают. К ним, как считается в двузнаковой гравитации, относится физический вакуум. Согласно ДГ, он является универсальной однородной безграничной средой, состоящей из вакуумных виртуальных частиц , входящих в него совершенно равноправно и имеющих противоположные гравитационные свойства. В следующей работе цикла [6]II., покажем, что гравитационные свойства вакуума ДГ кардинально отличаются от предполагаемых в квантовой теории поля [13].

7 Источники гравитационного поля в ОТО и ДГ

Понятие «тяжёлая масса» не в полной мере определяет свойства материи как источника гравитации. В общей теории относительности источником гравитационного поля является более общее, чем «тяжёлая масса» свойство материи, им является тензор энергии-импульса материи. ОТО не различает частицы и античастицы и поэтому их вклады в этот тензор суммируются [17; 20].

В двузнаковой гравитации гипотетически считается, что любая частица и соответствующая ей античастица, имеют противоположные гравитационные свойства. Считается, что действия на них гравитационного поля являются противоположно направленными. Противоположными являются и их вклады в искривление пространства-времени. С учётом этого, в этой теории, в отличие от ОТО, вклады частиц и античастиц в тензор, являющийся источником гравитационного поля, берутся с противоположными знаками, то есть не суммируются, а вычитаются.

Предполагаем, что противоположность гравитационных свойств частиц и античастиц связано с наличием у них определённого внутреннего свойства. Оно может быть описано введением в теорию гравитации квантового числа — грависпина — значение которого, условно, считаем для частиц равным плюс единице, а для античастиц — минус единице. Полагаем, что эта характеристика гравитационных свойств частиц и античастиц получит свое точное описание в квантовой теории двузнаковой гравитации. Считаем, что введение в ДГ грависпина , будет способствовать сближению теории гравитации с квантовой теорией поля. Позволит понять, почему гравитация, по-видимому, игнорирует все, что о сложностях вакуума известно в рамках современной квантовой теории поля [13].

8 Об экспериментальной проверке ДГ

Пока не существует прямых экспериментальных убедительных подтверждений или опровержений одной из гипотез: о неразличимости в гравитации частиц и античастиц (гипотеза ОТО) или, наоборот, об их противоположном поведении в гравитации (гипотеза ДГ). Поясним, с чем связаны трудности экспериментальной проверки этих гипотез.

Для макроскопических тел соответствующие экспериментальные исследования пока не проведены, в силу отсутствия в окружающем нас мире тел, состоящих из антивещества.

На микроскопических масштабах гравитационное взаимодействие массовых частиц и античастиц более, чем на тридцать порядков слабее электромагнитного. Исключить влияние последнего до уровня, когда станет возможным чётко увидеть существует ли различие влияния гравитации на частицы и античастицы, или его нет, долгое время не удавалось, см. [25]. Соответствующая работа проводилась в ЦЕРНЕ коллаборацией ALPHA, в течение более десяти лет. Искали ответ на вопрос: существует ли действие антитяготения на атомы антиводорода в поле тяжести, или его нет? Последние данные о результате их многолетней работы опубликованы в [26]. Он заключается в следующем:
действие антитяготения на атомы антиводорода не обнаружено.

Эксперимент, проводившийся коллаборацией ALPHA, является чрезвычайно слож-

ным с точки зрения возможности его повторения. Есть веские основания считать, что полученный результат коллаборацией ALPHA, об отсутствии антитяготения между веществом и антивеществом, требует всесторонней проверки в более чистых от помех и легко повторяемых экспериментах. Приведем аргументы в пользу такого утверждения.

В 2011-2012 годах мы искали регулярный механизм разделения вещества и антивещества в ранней Вселенной на космологических масштабах. Предположили, что, возможно, этот механизм связан с тем, что на любую античастицу или антивещество со стороны вещества действует не тяготение, а антитяготение. Исследовали, как это предположение согласуется с фундаментальными законами физики и не противоречит ли оно достоверно установленным экспериментальным фактам. Убедились, что с учётом этих требований, это предположение допустимо. Так, по-видимому, считали и в коллаборации ALPHA, начиная свои исследования.

Уточненную, с учётом гипотезы об антитяготении между веществом и антивеществом теорию, мы стали применять к решению сложных, для современной теории гравитации, проблем, а также для интерпретации различных астрономических наблюдений [4]. При этом мы убеждались, что предлагаемая нами теория гравитации, названная двузнаковой гравитацией (ДГ), лучше, чем существующая теория гравитации, подходит для их решения. Сравнение расчетов и предсказаний ДГ с наблюдениями, показывало их хорошее согласие. Это явилось для нас важным аргументом в пользу правильности гипотезы об антитяготении между веществом и антивеществом. В то же время, мы видели, что существует масса случаев, когда без предположения об антитяготении между частицами и античастицами, как реальными, так и виртуальными, решение давно известных проблем, а также интерпретация важнейших астрономических наблюдений, оказываются затруднительными.

Считаем, что многочисленные примеры успешного применение ДГ для решения фундаментальных проблем гравитации и интерпретации астрономических наблюдений, являются сильным аргументом в пользу правильности основополагающей гипотезы этой теории согласно которой

между веществом и антивеществом действует не тяготение, а антитяготение.

Чтобы доказать правильность или ложность ДГ, необходимы дальнейшие,более подробно математически проработанные проверки этой теории на задачах астрофизики и космологии. Необходимы также эксперименты, которые могут быть сравнительно легко осуществлены и перепроверены в различных исследовательских центрах. В этом плане, большую надежду мы связываем с исследованиями поведения фотонов в гравитационных полях[11]. Считаем, что такие исследования являются важными и позволят решить две фундаментальные задачи.

1. Докажут, что у фотона существует соответствующая ему античастица – антифотон и их различие явно проявляется в гравитации.

2. Докажут, что основополагающая идея двузнаковой гравитации: частицы и античастицы имеют противоположные гравитационные свойства , является правильной.

9 Заключение

В работах цикла покажем, что ОТО имеет ограниченную область применимости. Её нельзя применять для описания динамики космической среды на галактических и больших масштабах, а также релятивистских астрофизических объектов в которых с огромной скоростью могут протекать процессы рождения и уничтожения частиц и античастиц. Двузнаковая гравитация переходит в ОТО в тех случаях, когда отсутствует антивещество, а эффекты гравитационной поляризации вакуума являются пренебрежимо малыми.

В следующей статье цикла: [6] приведены аргументы в поддержку гипотезы, согласно которой не тёмная энергия, а электро- и гравитационно- нейтральный вакуум является главной и определяющей компонентой космической среды. Предложен вариант экспериментальной проверки этой гипотезы.

Список литературы

1. Вайнберг, С. Космология / С. Вайнберг. М. : Платон, 2008.

2. Горбунов, Д. С. Введению в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория / Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков. М. : КРАСАНД, 2010.

3. Зельдович, Я. Б. Строение и эволюция Вселенной / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. М. : Наука, 1975. 736 с.

4. Клименко А.В. Двузнаковая гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. Челябинск : изд-во Челябинского гос. университета, 2017. Уточненное изложение идей этой монографии содержится в статьях:

5. I. Двузнаковая гравитация. Частицы, античастицы и гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/1.pdf

6. II. Двузнаковая гравитация. Вакуум пространство-время. Анизотропия вакуума / А.В. Клименко, В.А. Клименко., С.В. Клименко / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/2.pdf

7. III. Двузнаковая гравитация. Основополагающие принципы / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/3.pdf

8. IV. Двузнаковая гравитация. Космология / А.В. Клименко, В.А. Клименко., С.В. Клименко / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/4.pdf

9. V. Двузнаковая гравитация. Миры и антимиры / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/5.pdf

10. VI. Двузнаковая гравитация. Вакуум и гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/6.pdf

11. VII. Двузнаковая гравитация. Фотоны и антифотоны / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/7.pdf

12. VIII. Двузнаковая гравитация. Природа сил инерции / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] https://cosmoway.ru/articles/ra/8.pdf.

13. Вильчек, Ф. Тонкая физика. Масса. Эфир и объединение всемирных сил СПб. ,: изд-во ,"Питер 2017.

14. Dirac P.A.M. F Theory of Electrons and Photons, Proceedings of the Royal Society (London), 1930.

15. Anderson Carl D. The Positive Electron. Physical Review, 1933.

16. Feynman R. P. Phys.Rev., 74, 939, 1948.

17. Ландау, Л. Д. Теория Поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Наука, 1988. 512 с.

18. Ландау, Л. Д. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Наука, 1988. 216 с..

19. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц / Л. Б. Окунь. М. : Наука, 1988.

20. Эйнштейн, А. Основы общей теории относительности / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов: в 4 т. Т. I: Работы по теории относительности 1905–1920 гг. М. : Наука, 1965. С. 452–504.

21. Зельдович Я. Теория тяготения и эволюция звезд./ Я. Б Зельдович, И. Д. Новиков. М. : Наука, 1971.

22. Roll, P. G. The equivalence of inertial and passive gravitational mass / P. G. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke // Annals of Physics. 1964. № 26. P. 442–517.

23. Брагинский, В. Б. Эквивалентность инертной и гравитационной масс / В. Б. Брагинский, В. И. Панов // УФН. 1971. Т. 105, № 4.

24. Широков, Ю. М. Ядерная физика / Ю. М.Широков, Н П. Юдин. М. : Наука, 1980.

25. Charman, A.E. Description and First Application of a New Technique to Measure the Gravitational Mass of Antihydrogen [Электронный ресурс] / The ALPHA Collaboration & A. E. Charman //Nature communications. — 2013. — URL: http://www.nature.com/ncomms/journal/v4/n4/full/ncomms2787.html.

26. Anderson, E. K. Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter Nature, Vol 621, 2023.