

I. Двухзнаковая гравитация. Гравитация, частицы и античастицы

А. В. Клименко, В. А. Клименко

Аннотация

Эта статья является первой в серии под общим названием "Двухзнаковая гравитация посвящённой доказательству необходимости кардинального уточнения современной теории гравитации (ОТО). 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 двухзнаковой гравитацией. В статьях серии показано, что в рамках этой теории может быть дано простое и убедительное решение давно известных фундаментальных физических проблем: тёмной материи, тёмной энергии, барионной асимметрии и других.

Ключевые слова: гравитация, тяготение, антитяготение, частицы, античастицы, двухзнаковая гравитация

1 Введение

В современной физике существуют фундаментальные проблемы. 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]. В цикле работ, из которых настоящая является первой, покажем, что есть веские основания предполагать, что ОТО неправильно описывает 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. Авторами она названа двузнаковой гравитацией (ДГ). 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 квантовой теории поля. 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 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.

В этой и следующих статьях цикла, более точно, чем в [4], изложим основополагающие идеи двузнаковой гравитации. Покажем, что в рамках этой теории, существующие проблемы теории гравитации и космологии, находят простые и естественные решения.

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 [13]. Открытие К. Андерсоном позитрона [14] 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:

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

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

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 [15]. По Фейнману, 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 $\vec{V} \Rightarrow -\vec{V}$ [16, § 17].

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:

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

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 [17]. В настоящей работе показано, что, не вступая в противоречие с наблюдениями, можно предполагать, что они отличаются друг от

друга ещё и знаком квантового зарядового числа, определяющего их гравитационные свойства.

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, а соответствующая ей античастица отличается знаком зарядового квантового числа, определяющего их гравитационные свойства.

4 О взаимосвязи инертной и тяжёлой масс

Основопологающей 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; 18].

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 [19]. В уравнениях движения тела в поле тяжести

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -m_g \nabla U, \quad (4)$$

слева стоит инертная m_i масса, а справа тяжёлая m_g , i-inertial, g-gravity. Если для любых тел $m_i = \alpha m_g$, 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 [20], Брагинским и Пановым [21] 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 [22]. 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 [20; 21], проведённые с телами, состоящими из веществ различного химического состава, этого отличия не выявили, что и явилось основанием для вывода о том, что и тяжёлая и инертная массы тел определяются их полной энергией. Считается, что инвариантных элементарных гравитационных зарядов – аналогов элементарных электрических зарядов, в природе не существует.

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 [20; 21] 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.

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 при одинаковых условиях равны по величине. В то же время их тяжёлые массы равны по величине, но имеют противоположные знаки. Принятие этой гипотезы кардинально меняет свойства гравитации. Эта гипотеза аналогична принимаемой в электродинамике. В последней считается, что электрически заряженные частицы и соответствующие им античастицы имеют одинаковые и положительные инертные массы, но в то же время их электрические заряды, равные по величине, имеют противоположные знаки. 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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

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 и он является главным и определяющим элементом материального мира.

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 [16; 18].

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 квантового свойства — грависпина — значение которого, пока 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.

Уравнения для гравитационного поля, описываемого в рамках ДГ, обсуждаются в статье [?].

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. [23]. Соответствующая работа проводилась в ЦЕРНЕ коллаборацией ALPNA, 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 [Nature](#) (сентябрь 2023г.). Он заключается в следующем:

действие антитяготения на атомы антиводорода не обнаружено.

Эксперимент, проводившийся коллаборацией ALPNA, является чрезвычайно сложным с точки зрения возможности его повторения. Есть веские основания считать, что полученный результат коллаборацией ALPNA, 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 ALPNA, 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. При этом мы убеждались, что предлагаемая нами теория гравитации, названная двузнаковой гравитацией (ДГ), значительно 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. 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. Критическое осмысление ДГ показало, что учёт антитяготения между веществом и антивеществом, является не только разумным, но и необходимым для существенного улучшения прикладных возможностей существующей теории гравитации и её идейного сближения с квантовой теорией поля. Считаем, что многочисленные примеры успешного применения ДГ для решения фундаментальных проблем физики 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, в статьях серии, предлагаем, кроме ее всесторонней проверки на задачах астрофизики и космологии, провести серию лабораторных экспериментов. Они, как мы предполагаем, могут быть осуществлены и перепроверены в различных исследовательских центрах. Здесь, забегаая вперед, опишем идею одного из них.

Эксперимент «Фотоны в гравитационном поле» В этом эксперименте предполагается проверить следующие гипотезы ДГ. У любой частицы, в том числе и у фотона, существует соответствующая ей античастица и гравитации их различает [11]. Учитывая гипотезу ДГ о существовании антифотонов, предлагаем повторить эксперимент Паунда и Ребки (1959 г.) [25] и убедиться, что кроме гамма квантов, испытывающих красное гравитационное смещение, при подъёме в гравитационном поле Земли, возможно, одновременно существуют ещё и анти- гамма кванты, отличающиеся от гамма квантов спиральностью, и испытывающие фиолетовое гравитационное смещение. Предполагаем, что резонансное мессбауэровское поглощение будет наблюдаться не только когда поглотитель приближают к источнику с определенной скоростью, но и когда он удаляется от источника с такой же скоростью. Считаем, что проведение такого эксперимента является важным. Возможно, он сможет решить две фундаментальные задачи.

1. Докажет, что у фотона существует соответствующая ему античастица – антифотон и их различие явно проявляется лишь в гравитации.
2. Докажет, что основополагающая идея двузнаковой гравитации: на частицы и античастицы в гравитационном поле действуют противоположно направленные силы, 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 протекают процессы рождения и уничтожения частиц и античастиц. Двухзнаковая гравитация переходит в ОТО в тех случаях, когда отсутствует антивещество, а эффекты гравитационной поляризации вакуума являются пренебрежимо малыми.

В следующей статье цикла: [6] приведём аргументы в поддержку гипотезы, согласно которой не тёмная энергия, а электро- и гравитационно-нейтральный вакуум является главной и определяющей компонентой космической среды. Предложим 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. Двухзнаковая гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. Челябинск : изд-во Челябинского гос. университета, 2017. Уточненное изложение идей этой монографии содержится в статьях:
5. I. Двухзнаковая гравитация. Частицы, античастицы и гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/1.pdf>
6. II. Двухзнаковая 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. Двухзнаковая гравитация. Основополагающие принципы / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/3.pdf>
8. IV. Двухзнаковая гравитация. Космология / А.В. Клименко, В.А. Клименко., С.В. Клименко / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/4.pdf>
9. V. Двухзнаковая гравитация. Миры и антимир / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/5.pdf>
10. VI. Двухзнаковая гравитация. Вакуум и гравитация / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/6.pdf>
11. VII. Двухзнаковая гравитация. Фотоны и антифотоны / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/7.pdf>
12. VIII. Двухзнаковая гравитация. Природа сил инерции / А.В. Клименко, В.А. Клименко. / [Электронный ресурс] <https://cosmoway.ru/articles/ra/8.pdf>
13. Dirac P.A.M. F Theory of Electrons and Photons, Proceedings of the Royal Society (London), 1930.
14. Anderson Carl D. The Positive Electron. Physical Review, 1933.
15. Feynman R. P. Phys.Rev., 74, 939, 1948.
16. Ландау, Л. Д. Теория Поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Наука, 1988. 512 с.
17. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц / Л. Б. Окунь. М. : Наука, 1988.

18. 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.
19. Зельдович Я. Теория тяготения и эволюция звезд./ Я. Б Зельдович, И. Д. Новиков. М.: Наука, 1971.
20. 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.
21. Брагинский, В. Б. Эквивалентность инертной и гравитационной масс / В. Б. Брагинский, В. И. Панов // УФН. 1971. Т. 105, № 4.
22. Широков, Ю. М. Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. М.: Наука, 1980.
23. 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>.
24. Anderson, E. K. Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter Nature, Vol 621, 2023.
25. Pound, R. V. Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance / R. V. Pound, Jr. G. Rebka // Phys. Rev. Lett. 1959. Vol. 3. P. 439–441