

УДК 53.043

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПОЗИТРОНОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

© 2021 г. М. Г. Гапочка¹, В. И. Денисов¹, И. П. Денисова², А. Ф. Королев¹, Н. Н. Кошелев¹ *

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

*E-mail: n.koshelev@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.

После доработки 25.09.2020 г.

Принята к публикации 28.10.2020 г.

Изучена нелинейная динамика позитронов в модифицированных теориях с учетом новых гипотез о массе заряженных частиц и массе гравитона. На основе проведенных расчетов получены законы вертикального движения позитронов в постоянном магнитном поле, электрическом поле Барнхилла–Шиффа и гравитационном поле Земли. Предложены эксперименты, позволяющие проверить эти новые гипотезы.

DOI: 10.31857/S0367676521020095

ВВЕДЕНИЕ

Функция действия для электрически заряженных частиц в электромагнитном и гравитационном полях в общей теории относительности Эйнштейна имеет вид:

$$S = -mc \int ds - \frac{q}{c} \int A_k dx^k,$$

где m – масса частицы, A_k – 4-потенциал электромагнитного поля, $ds = \sqrt{g_{ik} dx^i dx^k}$ – интервал, g_{ik} – метрический тензор.

Из этой функции действия следуют уравнения движения для частицы с электрическим зарядом q , которые в наиболее общей четырехмерной форме принимают вид:

$$mc \left\{ \frac{dU^n}{ds} + \Gamma_{ik}^n U^i U^k \right\} = \frac{q}{c} F^{nk} U_k, \quad (1)$$

где $U^i = dx^i/ds$ – четырехвектор скорости частицы, F^{nk} – тензор электромагнитного поля, Γ_{ik}^n – символы Кристоффеля по метрике g_{ik} :

$$\Gamma_{ik}^n = \frac{1}{2} g^{nm} \left[\frac{\partial g_{mi}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^i} + \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m} \right],$$

а тензор g^{nm} по известному тензору g_{mk} определяется из системы уравнений: $g^{mn} g_{mk} = \delta_k^n$.

Уравнения (1) имеют первый интеграл:

$$g_{ik} U^i U^k = 1. \quad (2)$$

Таким образом, движение электрически заряженных частиц в электромагнитном и гравитационном полях описывается нелинейной системой уравнений в обыкновенных производных второго порядка. Интегрирование уравнений (1), (2) из-за их нелинейности представляет собой серьезную математическую задачу.

Но в настоящее время появились физические гипотезы, которые значительно усложняют вид уравнений движения для электрически заряженных частиц в электромагнитном и гравитационном полях.

НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ О НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В теории гравитации Эйнштейна [1] квант гравитационного поля – гравитон является безмассовой частицей. Однако в последнее время появились статьи [2–4], в которых уравнения Эйнштейна модифицируются так, чтобы гравитон был массивным. Во всех этих теориях предполагается, что масса гравитона $m_g \sim 10^{-66}$ г настолько мала, чтобы ее присутствие при современной чувствительности измерительной техники не проявлялось во всех экспериментах, выполненных в гравитационном поле Солнечной системы.

Теории гравитации с массивным гравитоном с необходимостью являются биметрическими, в которых используются два метрических тензора: псевдоевклидова пространства-времени η_{ik} , которое рассматривается [4] как экспериментальный факт, и псевдориманова пространства-времени g_{ik} , по геодезическим линиям которого движется вещество. Кроме того, в таких теориях используются два типа масс для каждой частицы: инертная масса m_I и пассивная гравитационная масса m_G . Функция действия для электрически заряженных частиц в электромагнитном и гравитационном полях в этом случае принимает вид:

$$S = -m_G c \int ds - (m_I - m_G) c \int d\sigma - \frac{q}{c} \int A_k dx^k,$$

где $u^n = dx^n/d\sigma$, $d\sigma = \sqrt{\eta_{ik} dx^i dx^k}$ — интервал в псевдоевклидовом пространстве-времени.

Уравнения движения в этих теориях являются более сложными, чем уравнения (1), (2):

$$m_G c g_{pn} \left\{ \frac{dU^n}{ds} + \Gamma_{ik}^n U^i U^k \right\} + (m_I - m_G) c \eta_{pn} \left\{ \frac{du^n}{d\sigma} + \gamma_{ik}^n u^i u^k \right\} \frac{d\sigma}{ds} = \frac{q}{c} F_{pk} U^k, \quad (3)$$

где Γ_{ik}^n — символы Кристоффеля по метрике g_{ik} , а γ_{ik}^n — символы Кристоффеля по метрике η_{ik} :

$$\gamma_{ik}^n = \frac{1}{2} \eta^{nm} \left[\frac{\partial \eta_{mi}}{\partial x^k} + \frac{\partial \eta_{mk}}{\partial x^i} + \frac{\partial \eta_{ik}}{\partial x^m} \right].$$

Несложно убедиться, что при умножении уравнения (3) на $U^p = dx^p/ds$, или на $u^p = dx^p/d\sigma$, получаем, как это и должно быть, тождество $0 = 0$.

Таким образом, для проверки гипотезы о существовании не равной нулю массы у гравитона необходимо исследовать нелинейную динамику, предсказываемую уравнениями (3), и, в первую очередь, выяснить соотношение между инертной и гравитационными массами.

Согласно принципу эквивалентности Эйнштейна [1], любое электрически незаряженное пробное тело в гравитационном поле должно двигаться по траектории, не зависящей от его структуры и состава. Для электрически нейтральных частиц и тел это означает равенство гравитационной и инертной масс.

Однако в настоящее время существуют теории гравитации [5–7], согласно уравнениям которых, гравитационная масса электрически заряженной частицы может зависеть от величины ее заряда и поэтому может быть не равной ее инертной массе: $M_G^q = M_I^q + kq$, где q — электрический заряд частицы, k — коэффициент, M_G^q — гравитационная масса частицы, M_I^q — ее инертная масса.

Из этих соотношений следует, что гравитационная масса любого электрически незаряженного тела должна совпадать с его инертной массой, так как электрически нейтральное тело содержит одинаковое число электронов и протонов. Эксперименты Брагинского и Панова [8] с телами макроскопических размеров подтвердили этот вывод с большой точностью.

Измерения отношения гравитационной массы к ее инертной массе для электрически заряженных частиц до сих пор не проводились. Такие эксперименты, казалось бы, удобнее начинать с электрона [9]. Однако таким измерениям мешает эффект Барнхилла–Шиффа [10]: в области вакуума, огражденной проводящей оболочкой, существует индуцированное гравитацией электрическое поле, действие которого на нерелятивистски движущийся электрон полностью компенсирует действие на него силы гравитации. В результате этой компенсации нерелятивистский электрон в вакуумной области в вертикальном направлении движется с постоянной скоростью. Эксперименты Уитборна–Файербенка, проведенные в прошлом веке [11], подтвердили это предсказание теории.

Для того чтобы нарушить компенсацию гравитационной силы силой Барнхилла–Шиффа, действующими на электрон, необходимо использовать слабо релятивистские электроны [12], в результате чего постановка соответствующего эксперимента оказывается значительно сложнее эксперимента Уитборна–Файербенка.

Кроме электрически заряженных частиц в природе существуют и соответствующие им античастицы. В настоящее время в ЦЕРНе, в рамках экспериментов Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest [13, 14] и Aegis [15], было показано, что отношение гравитационной массы электрически нейтрального атома антиводорода, состоящего из позитрона и антипротона, к инертной массе этого атома, такое же, как и у обычного атома водорода. Но из этих экспериментов нельзя сделать выводов о гравитационных свойствах отдельно взятых позитронов или отдельно взятых антипротонов. Вполне может оказаться так, что в соответствии с гравитационными теориями [5–7] гравитационная масса позитрона может быть на некоторую величину ke_0 больше его инертной массы, а гравитационная масса антипротона окажется на такую же величину ke_0 меньше инертной массы антипротона:

$$m_G = m_I + ke_0, \quad M_G = M_I - ke_0,$$

где M_G и m_G — гравитационные массы антипротона и, соответственно, позитрона, M_I и m_I — их инертные массы, e_0 — электрический заряд позитрона. И при этих условиях гравитационная мас-

са антиводорода будет равна его инертной массе: $M_G + m_G = M_I + m_I$.

Гравитационные свойства элементарных частиц из-за чрезвычайной малости гравитационного взаимодействия в настоящее время экспериментально изучены очень слабо. Особенно это касается античастиц, гравитационные свойства которых до сих пор не проверялись на эксперименте.

Поэтому возникает необходимость проанализировать возможности постановки экспериментов по измерению отношения гравитационной массы к инертной массе для электрически заряженных частиц. Для электронов такой анализ был проведен в работе [16]. Рассмотрим кратко имеющиеся возможности по постановке таких экспериментов с позитронами, которые являются античастицами для электронов.

ВОЗМОЖНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГРАВИТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЗИТРОНОВ

Вообще говоря, возможны две постановки экспериментов с электрически заряженными элементарными частицами по измерению отношения их гравитационных масс к инертным массам. В первой из них, как и в эксперименте Уитборна–Файербенка, используются нерелятивистские частицы, а во второй, как предложено в работе [12], слабoreлятивистские частицы. В обоих случаях в вакуумной области экспериментальной установки с помощью соленоида должно быть создано вертикально направленное магнитное поле $B \approx 100$ Гс.

Рассмотрим схематически обе постановки экспериментов для измерения отношения гравитационной массы позитрона к его инертной массе. В обоих случаях в качестве источника позитронов необходимо использовать β^+ активные элементы, обладающие достаточно большим периодом полураспада и не очень большой энергией позитрона. Наиболее подходящим нестабильным элементом для этих целей является изотоп церия ^{139}Ce . У него период полураспада составляет 138 дней, с энергией вылетающих позитронов 166 кэВ. При такой энергии позитрон считается слабoreлятивистским и его можно не замедлять при втором методе экспериментов. Другим нестабильным элементом, позитроны которого после замедления в постоянном электрическом поле можно использовать в описываемых экспериментах, является изотоп натрия ^{22}Na . У него период полураспада значительно больше, чем у ^{139}Ce и составляет 2.6 лет. Однако и энергия позитронов, вылетающих при β^+ распаде ^{22}Na , почти в три раза больше, чем у изотопа церия и равна 546 кэВ. Такая энергия позитронов требует при проведении эксперимента предварительного их замедления.

Следует сразу же отметить, что серьезным недостатком этого эксперимента является аннигиляция позитронов при их столкновении с остатками газа в вакуумной области экспериментальной установки. Однако этот недостаток в значительной степени может быть уменьшен созданием более глубокого вакуума в рабочей области экспериментальной установки. Во всяком случае, в настоящее время этот недостаток не мешает проводить эксперименты с позитронами на ускорителях [17] и в экспериментальной физике элементарных частиц.

Расчеты с использованием уравнений (3) показывают, что проводить эксперименты по измерению отношения гравитационной массы нерелятивистского позитрона к его инертной массе удобнее по схеме Уитборна–Файербенка. В этом случае вертикально движущиеся позитроны в соответствии с уравнениями (3) должны двигаться с ускорением a_z , направленным к Земле и равным:

$$a_z = -\frac{m_G}{m_I} \left[1 + \frac{m_G^e}{m_I} \right] g, \quad (4)$$

где g — ускорение свободного падения, m_G и m_I — гравитационная, и соответственно, инертная масса позитрона, m_G^e — гравитационная масса электрона.

В это выражение входят два множителя: m_G/m_I и m_G^e/m_I . Из экспериментов на ускорителях следует, что инертные массы позитрона и электрона с большой точностью совпадают. Однако экспериментальных данных о том, равны или не равны их гравитационные массы, мы в настоящее время не имеем. Поэтому будем пока рассматривать m_G/m_I и m_G^e/m_I как два независимых параметра. Для их определения необходимо провести эксперименты с позитронами в другой постановке.

Если использовать схему слабoreлятивистского эксперимента, то позитроны в вакуумной области экспериментальной установки должны иметь слабoreлятивистскую скорость в горизонтальной плоскости и существенно не релятивистскую скорость в вертикальном направлении. Тогда из расчетов следует, что движение позитронов в вертикальном направлении будет происходить с ускорением a_z , направленным к Земле и равным:

$$a_z = -\frac{m_G}{m_I} \left[1 + \frac{m_G^e}{m_I} \sqrt{1 - \beta^2} \right] g, \quad (5)$$

где β — отношение скорости позитрона к скорости света.

В выражение (5) параметры m_G/m_I и m_G^e/m_I входят иначе, чем в выражение (4). Поэтому измеряя вертикальную компоненту ускорения в

обоих постановках экспериментов, можно определить эти параметры по отдельности.

Следует отметить, что результирующие формулы (4) и (5) помимо гравитационной и инертной масс позитрона содержат и гравитационную массу электрона из-за наличия индуцированного гравитацией электрического поля Барнхилла–Шиффа $E_z = -m_G^e g / e_0$.

В обоих рассмотренных случаях предлагаемый гравитационный эксперимент является радиофизическим по своей постановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. М.: Наука, 1965. 700 с.
2. *Freund P.G., Maheshwari A., Schonberg E.* // *Astrophys. J.* 1969. V. 157. P. 857.
3. *Visser M.* // *Gen. Relat. Gravit.* 1998. V. 30. P. 1717.
4. *Babak S.V., Grishchuk L.P.* // *Phys. Rev. D.* 1999. V. 61. Art. No 024038.
5. *Dittus H., Lammerzahl C., Selig H.* // *Gen. Relat. Gravit.* 2004. V. 36. P. 571.
6. *Rohrlich F.* // *Found. Phys.* 2000. V. 30. P. 621.
7. *Goto M., Natti P.L., Takano Natti E.R.* // *Class. Quant. Grav.* 2010. V. 27. Art. No 025005.
8. *Брагинский В.Б., Панов В.И.* // *ЖЭТФ.* 1971. Т. 61. № 3. С. 873; *Braginsky V.B., Panov V.I.* // *Sov. Phys. JETP.* 1971. V. 34. P. 464.
9. *Королев А.Ф., Кошелев Н.Н.* // *Вестн. МГУ. Сер. физ.* 2018. № 2. С. 46; *Korolev A.F., Koshelev N.N.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2018. V. 73. P. 168.
10. *Schiff L.I., Barnhill M.V.* // *Phys. Rev.* 1966. V. 151. P. 1067.
11. *Witteborn F.C., Fairbank W.M.* // *Phys. Rev. Lett.* 1967. V. 19. P. 1049.
12. *Denisov V.I., Denisova I.P., Gapochka M.G. et al.* // *Mod. Phys. Lett. A.* 2018. V. 33. № 33. Art. No 1850192.
13. *Voronin A.Yu., Kupriyanova E.A., Lambrecht A. et al.* // *J. Phys. B.* 2016. V. 49. No 20. Art. No 205003.
14. *Crepin P.-P., Kupriyanova E.A., Guerout R. et al.* // *EPL.* 2017. V. 117. No 3. Art No 33001.
15. *Antonello M., Belov A., Bonomi G. et al.* // *Nucl. Inst. Meth.* 2020. V. 960. Art No 163637.
16. *Гапочка М.Г., Денисова И.П., Королев А.Ф. и др.* // *Вестн. МГУ. Сер. физ.* 2019. № 3. С. 39; *Gapochka M.G., Denisova I. P., Korolev A.F. et al.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2019. V. 74. P. 337.
17. *Niang S., Charlton M., Choi J.J. et al.* // *Acta Phys. Pol. A.* 2020. V. 137. P. 164.

The nonlinear dynamics of positrons in the electromagnetic and gravitational fields

M. G. Gapochka^a, V. I. Denisov^a, I. P. Denisova^b, A. F. Korolev^a, N. N. Koshelev^{a,*}

^a*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

**e-mail: n.koshelev@mail.ru*

The nonlinear dynamics of positrons in modified theories is considered, taking into account new hypotheses about the mass of charged particles and the mass of the graviton. Based on the calculations, the laws of vertical movement of positrons in a constant magnetic field, the Barnhill–Schiff electric field and the Earth’s gravitational field are obtained. Experiments are proposed to test these new hypotheses.