

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-1-66-70

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМ

М.Л. Фильченков, Ю.П. Лаптев

*Институт гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

Аннотация. Рассмотрена зависимость безразмерных констант гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий от энергии. Приведены классификации элементарных частиц в зависимости от их спина и дуалистических парадигм. Последние базируются на различных комбинациях физических категорий пространства-времени, частиц материи и полей–переносчиков взаимодействий. Рассмотрено гравитационное излучение и статические гравитационные поля как на основе лагранжевого формализма, так и ОТО, а также ньютоновская космологическая модель МакКри–Милна. Перечислены как пертурбативные, так непертурбативные подходы к квантованию гравитации. Указаны преимущества и недостатки описания гравитации в рамках теоретико-полевой и геометрической парадигм.

Ключевые слова: взаимодействия элементарных частиц, дуалистические парадигмы, природа гравитации

Введение

Гравитация – один из самых загадочных феноменов, известный с незапамятных времён, но до конца не понятый до сих пор. Казалось бы, ОТО уточнила ньютоновскую теорию гравитации и решила вопрос в пользу её геометрической трактовки. В то же время в силу последней гравитация выпадает из известного ряда физических взаимодействий, включающего, помимо неё, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия, которые удовлетворительно описываются в рамках теоретико-полевой парадигмы. В мире элементарных частиц гравитационное взаимодействие оказывается слишком слабым, поэтому им пренебрегают по сравнению с другими взаимодействиями. В астрономических масштабах гравитационное взаимодействие играет определяющую роль.

Ниже гравитационное взаимодействие будет рассмотрено в рамках теоретико-полевой и геометрической парадигм.

Взаимодействия

Как известно, существует четыре физических взаимодействия между элементарными частицами: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Константы взаимодействия:

$$\alpha_i = \frac{g_i^2}{\hbar c}, \quad (1)$$

где g_i – заряд взаимодействия. При энергиях меньше 100 МэВ константой электромагнитного взаимодействия является постоянная тонкой структуры:

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}. \quad (2)$$

При переходе от электромагнитного взаимодействия между зарядами $\pm e$ к гравитационному между массами M и m закон Кулона заменяется на закон Ньютона (всемирного тяготения), и безразмерная константа гравитационного взаимодействия принимает вид

$$\alpha_g = \frac{GMm}{\hbar c}, \quad (3)$$

где G – гравитационная постоянная. Кулоновское взаимодействие между двумя зарядами $\pm e$ сильнее гравитационного взаимодействия между двумя равными массами m при $m < \frac{e}{\sqrt{G}} = 2 \cdot 10^{-6}$ г, а при $m > \frac{e}{\sqrt{G}}$ гравитационное взаимодействие сильнее кулоновского.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия имеют бесконечный радиус действия, а сильные и слабые являются короткодействующими. Константы взаимодействия, вообще говоря, зависят от энергии. При низких энергиях

$$\alpha_s > \alpha_w > \alpha_e, \quad (4)$$

где $\alpha_s \cong 10$ – константа сильного взаимодействия, $\alpha_w = \frac{1}{30}$ – константа слабого взаимодействия. С ростом энергии константы сильного и слабого взаимодействий убывают, а константа электромагнитного взаимодействия растёт. При энергии Великого объединения $\sim 10^{15}$ ГэВ константы сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия сливаются и становятся равными $\frac{1}{40}$, а при приближении к энергии $m_{pl}c^2 = 10^{19}$ ГэВ константы всех взаимодействий (включая гравитационное) стремятся к единице [1 – 8].

Элементарные частицы

Элементарные частицы состоят из частиц материи – фермионов и бозонов, переносящих взаимодействия между ними. В зависимости от массы фермионы делятся на три поколения кварков (с дробными зарядами) и лептонов (электрон, мюон, нейтрино, τ – лептон). Переносчиком гравитационного взаимодействия является частица со спином 2 – гравитон. Переносчиками остальных взаимодействий являются безмассовые векторные частицы со спином 1: фотон – электромагнитного, глюон – сильного и массивные Z^0, W^\pm – слабого, масса которых, согласно Стандартной модели элементарных частиц, обусловлена взаимодействием со скалярным полем, квантом которого является массивная частица со спином 0 – бозон Хиггса. При энергии Великого объединения кварки объединяются с лептонами в лептокварки. В рамках

суперсимметрии возможны переходы между бозонами и фермионами с образованием суперпартнёров калибровочных бозонов (фотино, глюино, вино, зино) со спином $\frac{1}{2}$, суперпартнёра гравитона со спином $\frac{3}{2}$ (гравитино) и суперпартнёров фермионов со спином 0 (скварки, слептоны).

Дуалистические парадигмы

Таким образом, в фундаментальной физике используются три физические категории: пространство-время, частицы и поля. Эти категории лежат в основе трёх дуалистических парадигм: теоретико-полевой, объединяющей частицы и поля; геометрической, объединяющей пространство-время и поля; и реляционной, объединяющей частицы и пространство-время.

В рамках теоретико-полевой парадигмы в пространстве Минковского строится квантовая теория поля, основанная на квантовании классических калибровочных полей, квантами которых являются векторные частицы, и полей материи, квантами которых являются фермионы. В геометрической парадигме вместо гравитационного поля рассматривается искривлённое пространство-время, описываемое с помощью пространства Римана. Реляционная парадигма вместо частиц и пространства-времени использует системы отношений.

Природа гравитации

Проанализируем гравитационное взаимодействие в рамках двух первых дуалистических парадигм.

В рамках теоретико-полевой парадигмы рассматривается квантование слабого гравитационного поля, которое описывается симметричным тензором второго ранга, квантом которого является гравитон – безмассовая частица со спином $s = 2$, которая испускается при квадрупольных переходах с изменением орбитального момента $\Delta l = 2$ (так как дипольное излучение отсутствует при отношении гравитационного заряда к массе, равному постоянной величине). Формула Эйнштейна для интенсивности гравитационного излучения получается из формулы квадрупольного электрического излучения при замене заряда на массу, умноженную на \sqrt{G} , и спина фотона $s = 1$ на спин гравитона, что приводит к умножению на 4 (так как интенсивность пропорциональна квадрату спина испускаемого кванта).

Для статических полей с центральной симметрией выбор лагранжиана с нелинейной зависимостью от гравитационного потенциала φ_g в виде

$$L = -mc^2 \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(1 + \frac{2\varphi_g}{c^2}\right)} \quad (5)$$

позволяет получить закон движения и траекторию частицы в статическом гравитационном поле (включая деситтеровский вакуум) в пространстве Минковского, совпадающие с формулами, полученными в ОТО.

Однородная изотропная космология описывается в рамках ньютоновской модели МакКри–Милна путём замены радиальной координаты r в ньютоновском потенциале на масштабный фактор $a(t)$, являющийся радиусом шара, расширяющегося в евклидовом пространстве. Оказывается, что уравнения этой модели полностью совпадают с уравнениями Фридмана, используемыми в ОТО.

Теория Великого объединения, суперсимметричные модели и теория суперструн также относятся к теоретико-полевой парадигме.

В геометрической парадигме для описания гравитационного взаимодействия используется риманово пространство общей теории относительности. Для статического гравитационного поля временная метрика g_{00} геометрической парадигмы связана с гравитационным потенциалом теоретико-полевой парадигмы соотношением

$$g_{00} = 1 + \frac{2\varphi_g}{c^2}. \quad (6)$$

Существующие подходы квантования гравитации (квантовая механика в гравитационном поле, квантование слабого гравитационного поля, квантовая теория поля в искривлённом пространстве-времени, квантовая геометродинамика и петлевая квантовая гравитация, теория суперструн) относятся как к теоретико-полевой парадигме, так и геометрической.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что теоретико-полевая парадигма позволяет рассматривать все взаимодействия, включая гравитационное, единым образом, например, в рамках М-теории. В теоретико-полевой парадигме не возникают проблемы, связанные с отсутствием законов сохранения для свободного гравитационного поля, в отличие от ОТО, на что указывал ещё Гильберт. Всё это позволяет считать, что теоретико-полевая интерпретация справедлива для гравитационного излучения, статических полей и космологической модели МакКри–Милна, наряду с геометрической, аналогично тому, как в квантовой теории сосуществуют копенгагенская, статистическая и многомировая интерпретации.

Литература

1. Пенроуз Р. Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 912 с.
2. Пенроуз Р. Новый ум короля. М.: Едиториал УРСС, 2003. 384 с.
3. Владимирцов Ю.С. Метафизика и фундаментальная физика. Кн. 2: Три дуалистические парадигмы XX века. М.: ЛЕНАНД, 2017. 248 с.
4. Фильченков М.Л., Лантев Ю.П. Многогранность квантовой теории // Метафизика. 2015. № 2 (16). С. 91–98.
5. Фильченков М.Л., Лантев Ю.П. Об интерпретациях общей теории относительности // Метафизика. 2017. № 4 (26). С. 126–130.

6. Фильченков М.Л., Лаптев Ю.П. О проблеме квантования в теории гравитации // Метафизика. 2019. № 2 (32). С. 108–112.
7. Фильченков М.Л., Копылов С.В., Евдокимов В.С. Гравитация, астрофизика, космология: Дополнительные главы курса общей физики. М.: ЛЕНАНД, 2020. 104 с.
8. Фильченков М.Л., Лаптев Ю.П. Квантовая гравитация: от микромира к мегамиру. М.: URSS, 2021. 304 с.

GRAVITATIONAL INTERACTION FROM THE STANDPOINT OF FIELD-THEORETICAL AND GEOMETRIC PARADIGMS

M.L. Fil'chenkov, Yu.P. Laptev

*Institute of Gravitation and Cosmology,
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation*

Abstract. Considered are energy dependences of the dimensionless constants of the electromagnetic, strong and weak interactions. Elementary particle classification depending on their spin is presented as well as dualistic paradigms based on are physical categories of space-time, matter particles and field-carriers of interactions. Gravitational radiation and static gravitational fields are considered both in the framework of the Lagrangian formalism and GR as well as MacCrea–Milne's Newtonian cosmological model. Both perturbative and nonperturbative approaches to gravity quantization are listed. Advantages and disadvantages of gravity description in the framework of field-theoretical and geometric paradigms have been indicated.

Keywords: particle interactions, dualistic paradigms, the nature of gravity