



Проблемы логики и методологии науки

УДК 160.1

РЕАЛИЗАЦИЯ ИДЕЙ ОБЪЕДИНЕНИЯ В ХОДЕ РАЗРАБОТКИ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ*

Безлепкин Е.А., Сторожук А.Ю.

The Implementation of Unification Ideas in the Development of General Relativity

Bezlepkin, E.A., Storozhuk, A.Y.

Аннотация. Процесс объединения, происходящий при разработке теории, может быть рассмотрен с точки зрения различных уровней общности. Начальным является концептуальный уровень, на котором осуществляется анализ и трансформация базовых понятий пространства, времени, материи. Затем на уровне суждений формируются основные принципы, составляющие «твердое ядро» программы, а на функциональном уровне происходит формализация теории. Результатом разработки теории становятся масштабная унификация подходов, универсализация принципов и обобщение понятий.

Ключевые слова: объединение в физических теориях, общая теория относительности

Abstract. We may consider the process of unification which takes place in the development of the theory in the aspect of different generality levels. The initial level is that of concepts; basic concepts of space, time and matter are analyzed and transformed at this level. Then, at the level of presumptions there form main principles making up a “hard core” of the program. At the functional level, the theory formalizes. The development of the theory results in a large-scale unification of approaches, universalization of principles, and generalization of concepts.

Keywords: the unification in physics, general relativity

* Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, проект № 13-03-00065.

В данной статье выявляется структура процессов объединения, реализованных в ходе разработки общей теории относительности. Под объединением понимается сведение к общему основанию понятий и принципов, ранее рассматривавшихся как независимые. Под структурой процессов объединения будет подразумеваться выделение уровней понятий, суждений и функций. Цель нашего исследования состоит в выявлении роли философских оснований в процессах объединения, происходящих в физических теориях. Для достижения поставленной цели выделим несколько структурных уровней, с точки зрения которых будет производиться анализ.

Концептуальный уровень содержит основные понятия, которые являются как эмпирическими, т.е. имеющими поставленную в соответствие процедуру измерения (например, понятия массы, пространства, времени, скорости света и т.д.), так и теоретическими, т.е. не связанными с опытом непосредственно, а функционирующими как математические абстракции (например, система координат, законы природы, преобразование).

Уровень суждений фиксирует связь основных понятий друг с другом, задает основные постулаты и принципы, как несущие методологическую нагрузку, так и онтологические. В качестве примеров суждений сошлемся на статью Эйнштейна «Принципиальное содержание общей теории относительности», где Эйнштейн формулирует три принципа, на которых, по его мнению, покоится общая теория относительности: «а) Принцип относительности: законы природы являются лишь высказываниями о пространственно-временных совпадениях; поэтому они находят свое естественное выражение в общековариантных выражениях; б) Принцип эквивалентности: инерция и тяжесть тождественны; отсюда и из результатов специальной теории относительности неизбежно следует, что симметричный “фундаментальный тензор” ($g_{\mu\nu}$) определяет метрические свойства пространства, движение тел по инерции в нем, а также и действие гравитации» [Эйнштейн, 1965: 613]. Далее Эйнштейн приводит еще один принцип, называемый им «принципом Маха», однако указывает, что его выполнение не обязательно.

Функциональный уровень содержит нормативные правила, предписания и запреты. В частности, уравнения ОТО должны быть ковариантны относительно произвольных преобразований, что обеспечивает их универсальность.

Философские основания присутствуют на всех уровнях данной структуры, поскольку уровень понятий ОТО включает в себя наиболее

общие философские категории (пространство, время, материя), уровень суждений включает методологические принципы и задает определенную онтологию, характерную для данной теории, и, наконец, функциональный уровень носит операциональный и нормативный характер (как образец действия) и имеет отношение к аксиологии.

Заметим, что понятия пространства и времени, рассматривавшиеся ранее как независимые, были объединены в понятие четырехмерного многообразия пространства-времени в специальной теории относительности, сформулированной для инерциальных систем. Задача Эйнштейна состояла в распространении релятивистских идей на произвольные системы, что и было проделано в ОТО. В результате на концептуальном уровне была показана связь между пространством-временем и материей-энергией. Конкретизация типа этой связи задается основным уравнением ОТО – уравнением Эйнштейна.

Принципы представляют собой примеры объединения, придавая универсальный характер уравнениям и задавая отношения тождества между двумя понятиями массы – гравитационной и инертной, которые рассматривались ранее как независимые, поскольку каждому понятию соответствовала своя эмпирическая процедура.

Начнем с принципа эквивалентности, который постулирует, что количественно тождественные гравитационная масса и инертная масса также сущностно тождественны. Из этого предположения следует, что локальное гравитационное поле в любой точке пространства можно заменить локальной системой отсчета, движущейся ускоренно. Принятие этого принципа ведет к тому, что избранная декартова система координат, относительно которой тело движется равномерно и прямолинейно по инерции, перестает быть обособленной: постулируется равноправие любой координатной системы. Применение векторного и скалярного подходов не дало результатов, что указывало на тензорный характер уравнений [Визгин, 2001: 1350]. Отсюда возникает требование общей ковариантности уравнений, которые описывают движение частиц и энергии в пространстве-времени, относительно любых точечных преобразований. Это требование приводит к расширению специального принципа относительности и одновременно к обобщению принципа постоянства скорости света. Запаздывание луча света под действием гравитации объясняется искривлением траектории светового луча при сохранении постоянства скорости света.

Следует отметить, что принцип эквивалентности не универсален. К примеру, существует явление, называемое приливным эффектом – это

«общая особенность гравитационных полей, которая не может быть “исключена” с помощью свободного падения. Приливной эффект служит мерой неоднородности ньютоновского гравитационного поля» [Пенроуз, 2003: 170].

Теперь перейдем к общему принципу относительности. Для более точного анализа необходима по крайней мере еще одна формулировка, которую возьмем в работе «Основы общей теории относительности»: «Общие законы природы должны быть выражены через уравнения, справедливые во всех координатных системах, т.е. эти уравнения должны быть ковариантными относительно любых подстановок (общековариантными)» [Эйнштейн, 1965: 459].

Принцип относительности по сравнению с предыдущими версиями теории претерпел расширение и обобщение. Осуществлен переход от инерциальной системы координат и, соответственно, от преобразований Лоренца к произвольной системе координат относительно любых преобразований. В анализируемом виде принцип относительности получает универсальную формулировку.

Следует подчеркнуть, что помимо указанных принципов в построении ОТО важную роль играет также принцип соответствия. Он выражается в том, что при предельном переходе в бесконечно малую область пространства-времени в этой области справедливы законы СТО, и поэтому выполняет эвристическую функцию, помогая перенести результаты, полученные в СТО, на ОТО.

Эйнштейн пишет об этом следующее: «Для бесконечно малой области координаты всегда можно выбрать таким образом, что гравитационное поле будет отсутствовать в ней. Тогда можно считать, что в такой бесконечно малой области выполняется специальная теория относительности. Тем самым общая теория относительности связывается со специальной теорией относительности, и результаты последней переносятся на первую» [Эйнштейн, 1965: 423].

Философская значимость основных принципов ОТО проявляется в их влиянии на онтологические, методологические и операциональные элементы теории. Задается определенная онтология, находящая свое отражение в таких понятиях, как энергия гравитационного поля, искривление пространства-времени. Указывается определенная эквивалентность гравитационных полей и ускоренно движущихся систем. Методологическая роль этих принципов состоит в придании уравнениям общековариантного вида, в применении геометрических методов при расчетах уравнений движения. В ОТО формируется но-

вый тип рассуждений, связанный с использованием нового для физики того времени математического аппарата. Аксиологическая ценность постулатов ОТО состоит в задании «жесткого ядра» релятивистских теорий, т.е. в формулировке принципов, которые должны выполняться в любых условиях. Кроме того, основополагающие принципы ОТО соответствуют требованиям проверяемости и наблюдаемости, т.е. могут служить образцом ценностной установки, которая была сформулирована Ньютоном как требование исследовать только фактическое.

Процессы объединения на функциональном уровне отчетливо видны в ходе поиска основного уравнения теории относительности, связавшего геометрические и динамические характеристики. Кратко проследим логическую последовательность шагов, приведших к фундаментальному уравнению ОТО, основываясь на статьях Эйнштейна «Основы общей теории относительности» и «Сущность теории относительности».

Прежде всего выберем в бесконечно малой области гравитационного поля такую определенную, движущуюся с ускорением систему координат, что поле в ней отсутствует (принцип эквивалентности). Тогда в этой системе, независимо от ориентации, будет существовать инвариантный интервал, вид которого определен в СТО (принцип соответствия). Требуя, чтобы интервал оставался инвариантом не только для линейных преобразований, но также и для преобразований произвольного вида (обобщенный принцип относительности), мы получаем следующее соотношение:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu.$$

Это соотношение является квадратичной формой, которая обобщает линейный элемент СТО (таким образом выполняется принцип соответствия).

Величины (коэффициенты) $g_{\mu\nu}$ называются фундаментальным метрическим тензором. Их физический смысл состоит в том, что они описывают гравитационное поле относительно заданной системы координат. С точки зрения геометрии они описывают метрические соотношения в пространственно-временном континууме, т.е. его искривление. По этому поводу Эйнштейн писал: гравитационное поле «представляет собой физическое состояние пространства, одновременно определяющее тяготение, инерцию и метрику. В этом заключается углубление и объединение основ физики» [Эйнштейн, 1965: 424].

Следующая задача – установить вид дифференциальных уравнений, позволяющих определить величины $g_{\mu\nu}$, а также установить закон движения материальной точки в пространстве. Эйнштейн начинает с закона движения. Здесь появляется плодотворная в аналитической механике концепция вариационных принципов. Б.Г. Кузнецов по этому поводу замечает: «Свободная частица движется таким образом, что ее мировая линия между двумя мировыми точками, состоящая из бесконечно малых четырехмерных интервалов ds , оказывается кратчайшей. Пространство специальной теории относительности – эвклидово пространство, поэтому кратчайшая линия является здесь прямой. ... Движение частиц в гравитационном поле, так же как и движение свободной частицы, определяется кратчайшей мировой линией» [Кузнецов, 1957: 98].

Эйнштейн использует принцип наименьшего действия в форме Гамильтона:

$$\delta \left\{ \int ds \right\} = 0 ,$$

где ds – интервал в форме ОТО. Выполняя варьирование, определяют кратчайшую линию между двумя событиями – так называемую геодезическую, которая описывается следующим уравнением:

$$\frac{d^2 x_\mu}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx_\alpha}{ds} \frac{dx_\beta}{ds} = 0 ,$$

где первое слагаемое представляет собой действие на материальную точку сил инерции, а второе – действие сил тяготения.

С помощью уравнения геодезической находится уравнение движения материальной точки в гравитационном поле. Классическое уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \Delta \varphi .$$

Именно ввиду того обстоятельства, что в уравнение не входит масса (принцип эквивалентности), тяготение и может быть представлено в качестве геометрического свойства пространственно-временного мира.

Далее решается задача нахождения уравнений гравитационного поля, действующего в области, лишенной материи, т.е. в области, где отсутствуют источники поля. В классической теории поля – это уравнение Лапласа, которое имеет следующий вид:

$$\Delta\varphi = 0.$$

Скалярный потенциал, выражающий напряженность гравитационного поля в классической теории гравитации, заменяется тензорной величиной, а именно тензором Римана ($R_{\alpha\beta}^{\mu}$), который составлен из величин, играющих роль потенциалов поля. Физический смысл этого тензора заключается в том, что «обращение его в нуль служит достаточным условием... того, что континуум евклидов» [Эйнштейн, 1966: 59], а значит, в координатной системе такого континуума справедлива СТО.

Итак, в области гравитационного поля, свободного от материи, тензор Римана обращается в нуль, и, таким образом, пространственно-временной континуум оказывается неискривленным, т.е. евклидовым.

Мы рассмотрели частный случай гравитационного поля, лишенного материи. Следующий шаг заключается в том, чтобы вывести уравнение общего вида, которое будет включать описание источников гравитационного поля. Ссылаясь на классическую теорию поля, Эйнштейн пишет, что ищет аналог уравнения Пуассона:

$$\Delta\varphi = 4\pi K\rho,$$

Уместно далее процитировать Эйнштейна. Во-первых, «источником гравитационного поля является плотность вещества ρ . Также должно быть и в общей теории относительности (принцип соответствия. – *Авт.*). Но специальная теория относительности показывает, что вместо скалярной плотности вещества мы должны оперировать с тензором энергии» [Эйнштейн, 1966: 63]. Во-вторых, «если в общей теории относительности существует уравнение, аналогичное уравнению Пуассона, то оно должно быть тензорным уравнением для тензора гравитационного потенциала $g_{\mu\nu}$. Правая часть его должна содержать тензор энергии материи, а левая – тензор, составленный из производных от $g_{\mu\nu}$ (т.е. метрический тензор Римана. – *Авт.*)» [Эйнштейн, 1966: 64].

Таким образом, Эйнштейн приходит к уравнению

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} = -\chi T_{\mu\nu}$$

Физический смысл уравнения заключается в следующем. Оно описывает характер кривизны пространственно-временного континуума, т.е. характер тяготения в зависимости от наличия и распределения энергии и импульса (т.е. массы) в этом континууме. Иначе можно сказать, что распределение и движение масс в пространственно-временном континууме влияют на геодезические линии, т.е. на тяготение. Следует отметить нелинейность уравнений по отношению к переменным, а это означает, что гравитационное поле порождает само себя.

Остается еще раз подчеркнуть роль аналогий между классической и тензорной теориями поля, диктуемых принципом соответствия между СТО и ОТО. Приведем сводную таблицу соответствующих друг другу физических величин. С геометрической точки зрения изменение метрического тензора характеризует меру кривизны пространства, производные $g_{\mu\nu}$ выражают меру искривления, а символы Кристоффеля $\Gamma^{\sigma}_{\mu\nu}$ выражают искривление координат в различных направлениях. Именно в отождествлении пространства-времени и тяготения – суть мысли Эйнштейна и ОТО.

Величина	Классическая	Тензорная
Напряженность силового поля	$g = F/m$	Символы Кристоффеля
Потенциал поля	$g = -\nabla\varphi$	Коэффициенты метрического тензора $g_{\mu\nu}$
Уравнение Лапласа	$\Delta\varphi = 0$	$R_{\mu\nu} = 0$
Уравнение Пуассона	$\Delta\varphi = 4\pi K\rho$	$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} = -\chi T_{\mu\nu}$
Кратчайшая линия (геодезическая) – вариационный принцип	Принцип Гамильтона, из которого находится уравнение геодезической	
Инвариант	$ds^2 = \sum_{i=1}^3 dx_i^2$	$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$
Единица измерения	Скаляр, вектор	Тензоры различных рангов

В заключение нашего анализа перечислим произведенные в ОТО объединения и обобщения.

Расширяется (обобщается) область применимости принципа относительности с инерциальных систем на неинерциальные, вследствие чего появляется понятие ковариантности уравнений, формализуется и расширяется понятие системы отсчета.

Постулируется равенство гравитационной и инертной масс ввиду их количественной тождественности. Принцип эквивалентности позволил отождествить искривление пространственно-временного континуума с тяготением, что привело к более тесному объединению динамических и геометрических характеристик на концептуальном уровне теории.

Разрабатываются основополагающие идеи физической геометрии, устанавливается связь метрических и динамических характеристик. «...Тождество гравитационных и метрических полей, связь между метрикой и сосредоточиями масс – уже не физическая идея в старом смысле и не собственно математическая. Это – идея физической геометрии» [Кузнецов, 1957: 97].

Обобщается принцип инерции на основе понятия геодезической. «...Существуют прямые мировые линии в евклидовом мире, они изображают движения тел не испытывающих движения сил; все остальные движения происходят под действием сил... Общая теория относительности исключает из такого определения инерционных движений только одно требование – “в евклидовом мире” и заменяет его более широким “в римановом мире”. Тогда... инерционное движение объединяется с движением под действием силы (только силы тяжести!) одним определением: существуют геодезические линии в римановом мире, по которым движутся все тела» [Кузнецов, 1957: 140–141].

Постулируется постоянство скорости света, процесс замедления распространения светового луча в поле гравитации объясняется искривлением пространства, т.е. увеличением длины геодезической. Поскольку скорость света является предельной скоростью распространения сигнала, отсюда следует наличие предельной скорости взаимодействия между частицами [Алешкевич, 2012: 1303].

Сохранение пространства Минковского в римановой геометрии позволяет сравнивать ход времени в инерциальных и неинерциальных системах отсчета, причем в последних «изменение хода времени ведет к появлению силы» [Герштейн и др., 2006: 1209]. Гравитационное поле обладает как свойством замедлять течение времени, так и свойством останавливать это замедление.

Происходит обобщение четырехмерного псевдоевклидова пространства на четырехмерное псевдориманово. Координаты псевдоевкли-

дова пространства становятся частным случаем римановых координат, где компоненты тензора Римана обращаются в нуль и пространство становится евклидовым. Уравнения СТО оказываются частным случаем в пространстве с нулевой кривизной.

Специальная теория относительности становится предельным случаем общей теории относительности при переходе к бесконечно малым областям пространства-времени, а следовательно, ОТО – обобщение не только СТО, но и соответствующих формул классической механики. Движение пробных тел всегда происходит внутри как риманового конуса, так и конуса пространства Минковского, что обеспечивает геодезическую полноту и выполнение принципа причинности [Герштейн и др., 2006: 1208].

Уравнения ОТО приобретают тензорный характер. «С общей точки зрения можно говорить об одних тензорах, считая закономерным образом скаляры тензорами нулевого ранга, векторы – тензорами 1-ого ранга и рассматривая спиноры... как тензоры ранга $\frac{1}{2}$ и других полуцелых рангов. Тем самым было произведено глубокое объединение разнообразных величин» [Иваненко, 1959: 292].

Обобщаются законы сохранения как четыре (по числу измерений пространства-времени) аспекта единой, абсолютной, инвариантной, четырехмерной кривизны мира [Кузнецов, 1957: 111].

С точки зрения формирования структуры теории первым шагом к объединению стала проработка концептуального уровня – анализ понятий пространства, времени, массы, ускоренного движения. Следом разрабатывался уровень суждений – формулировались основные постулаты и принципы теории, а далее, на функциональном уровне, разрабатывался математический формализм теории. Итогом развития ОТО является онтологическое единство, ставшее основой для дальнейшего поиска теории объединения.

Библиография

- Алешкевич В.А.* О преподавании специальной теории относительности на основе современных экспериментальных данных // УФН. – 2012. – № 12. – С. 1301–1318.
- Визгин В.П.* Об открытии уравнений гравитационного поля Эйнштейном и Гильбертом (новые материалы) // УФН. – 2001. – Т. 171. – С. 1347–1363.
- Герштейн С.С., Лозунов А.А., Мествиришвили М.А.* Самоограничение гравитационного поля и его роль во Вселенной // УФН. – 2006. – Т. 176. – С. 1207–1225.
- Кузнецов Б.Г.* Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. – М. Изд-во АН СССР, 1957. – 326 с.

- Ланцош К.* Вариационные принципы механики. — М.: Физматгиз. 1965. — 408 с.
- Пенроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. — М.: УРСС, 2003. — 382 с.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов: В 4 т. Том 1: Работы по теории относительности. 1905–1920. — М.: Наука, 1965. — 702 с.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов: В 4 т. Том 3: Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики. 1901–1955. — М.: Наука, 1966. — 632 с.

Дата поступления 19.05.2014

Институт философии и права
СО РАН, г. Новосибирск

evgeny-bezlepkin@mail.ru
storozhuk@philosophy.nsc.ru