



## *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.

© Безлепкин Е.А., Сторожук А.Ю., 2014

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  $\rho$ . 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