

# «Gauge freedom» и проблема интеграции для пространства-времени

Сухарева Виктория (ИФиП УрО РАН)

## ПРОБЛЕМА

Есть ли у нас на самом деле истины о пространстве-времени, и как мы их узнаем?

Есть ли пространство-время на самом деле?

## ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ НЕ СУЩЕСТВУЕТ

**Калибровочная свобода (gauge freedom)** – это ситуация, возникающая в физической теории, когда одна и та же физическая ситуация описывается разными математическими структурами.

Калибровочная свобода не всегда представляет проблему для физической теории.

Калибровочная свобода становится проблемой только в том случае, когда мы не можем доказать, что рассматриваемые математические структуры действительно описывают одну и ту же физическую ситуацию. О возникновении такого случая, в частности, можно говорить, когда соответствующая физическая ситуация индивидуализируется исключительно посредством описывающих её математических структур. Проще говоря, калибровочная свобода представляет проблему для *ненаблюдаемых* (непосредственно) физических ситуаций, одинаково допустимых с точки зрения законов физической теории.

Проблема калибровочной свободы – аналог проблемы множественной редукции Бенаццерафа.

### • Аргумент дырки (the hole argument)

Представьте пустую область пространства-времени  $L$ , окруженную материей. В этой области не происходят никакие материальные процессы (потому что в нем нет ни электромагнитных полей, ни частиц, и т.п.); в этой области исчезает тензор энергии-импульса материи  $T_{\mu\nu}$ . Обычно точки пространства-времени индивидуализируются посредством материальных элементов, которые используются в качестве отметок для соответствующих мест в пространстве-времени. Однако в пустом пространстве точки пространства-времени могут индивидуализироваться только своими координатами. Тогда, если мы знаем значение метрического тензора  $g_{\mu\nu}$  для уравнений гравитационного поля внутри  $L$ , общая ковариантность этих уравнений позволяет ввести новую систему координат  $x'^{\mu}$  такую, что  $x_{\nu} = x'_{\mu}$  на границе области  $L$ , но  $x_{\nu} \neq x'_{\mu}$  внутри нее. Теперь все можно рассматривать относительно этой новой первичной системы, в которой для материи за пределами области  $L$ :  $T'_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$ , а для гравитационного поля внутри области  $L$ :  $g'_{\mu\nu} \neq g_{\mu\nu}$ . Таким образом, то, что  $T'_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$  за пределами  $L$ , не влечет, что  $g'_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}$  внутри  $L$ . Иначе говоря, возможно, что система  $[T_{\mu\nu}]$  соответствует сразу несколько систем  $[g_{\mu\nu}]$ .

Системы с разными значениями метрического тензора для одной и той же пространственно-временной области репрезентируют различные возможности – разные физические ситуации. При этом ни законы физической теории, ни наблюдение не позволяет обнаружить, какая из этих ситуаций реальна.

### • Аргумент ускоренного мира (boosted world)

Мир  $W$  – точно такой же, как наш, за одним исключением: вся материальная история мира дрейфует в пространстве с постоянной скоростью, скажем, 5 км/ч в направлении от Москвы к Вашингтону.  $W$  подобен актуальному миру в том, что касается пространственных отношений между всеми телами в любой данный момент времени. Но в  $W$  каждое материальное тело движется через пространство с другой скоростью.

Если ускоренный мир  $W$  возможен, тогда должно существовать бесконечно много разных возможных ускоренных миров. Но с точки зрения наблюдателя, нет никакого реального различия между любыми двумя ускоренными мирами, поскольку движение всего мира в целом никак не отражается на том, как протекают события внутри мира. Таким образом, все возможные ускоренные миры неразличимы.

### • Аргумент сдвинутого мира (shifted world)

Мир  $W^*$  – точно такой же, как наш, за одним исключением: вся материальная история мира разворачивается на 5 метров вправо от того места, где она разворачивается в действительности. Сдвинутый мир – это мир, в котором вся материальная история мира равномерно смещена на некоторое расстояние в каком-то направлении.

Если сдвинутый мир  $W^*$  возможен, тогда должно существовать бесконечно много разных возможных сдвинутых миров. Но с точки зрения наблюдателя, нет никакого реального различия между любыми двумя сдвинутыми мирами, поскольку смещение всего мира в целом никак не отражается на том, как протекают события внутри мира. Таким образом, все возможные сдвинутые миры неразличимы.

## ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ СУЩЕСТВУЕТ

Данная позиция опирается на буквальное прочтение онтологии математической физики. Модели физических теорий включают множество четырехмерных точек, задающихся тремя пространственными координатами и одной временной координатой, а также различные поля и частицы, определяемые на этом множестве. Естественно полагать, что физические теории репрезентируют реально существующее пространство-время, состоящее из четырехмерных точек.

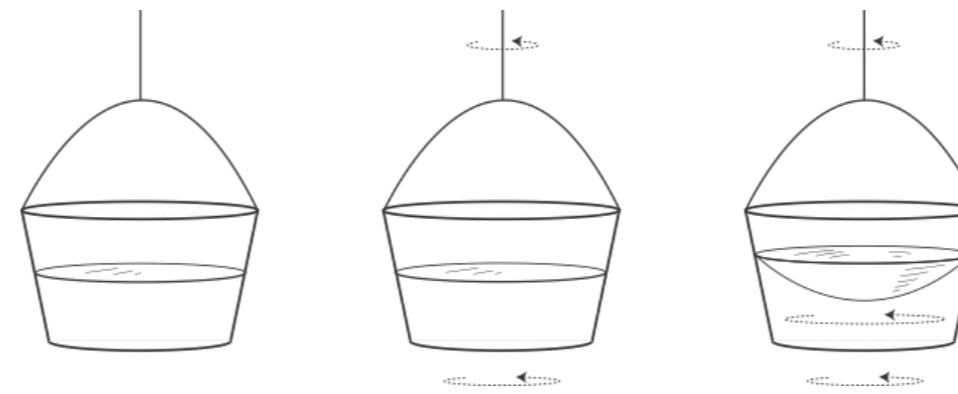
**Основание для предпочтения буквального прочтения онтологии физической теории:** если часть теории репрезентирует что-то реальное, то это наилучшим образом объясняло бы, почему теория способна объяснять и предсказывать наблюдаемые явления.

**Основания для отказа от буквального прочтения онтологии физической теории:**

- 1) При устранении понятия пространства из теории объяснительный потенциал теории не уменьшается.
- 2) При сведении понятия пространства к какому-то другому понятию объяснительный потенциал теории не уменьшается.

### • Аргумент ведра (the bucket argument)

Представьте ведро с водой, подвешенное на веревке. Если скрутить веревку и отпустить, ведро начнет вращаться. Через некоторое время вода в ведре тоже начнет вращаться. Постепенно вода начнет подниматься по стенкам ведра, и её поверхность примет вогнутую форму. Почему это происходит?



Вода движется – вращается – с ускорением. Движение – это изменение позиции объекта в пространстве с течением времени. Движение с ускорением – это особый вид движения, определяемый как вторая производная положения объекта по времени.

**Если допустить, что пространства не существует, придется изменить как определение движения, так и определение ускорения.** Например, движение можно переопределить как перемещение тела относительно других материальных тел: двигаться – означает, что расстояние движущегося тела до других материальных тел меняется с течением времени.

**Однако какие материальные тела тогда следует выбрать в качестве системы отсчета для объяснения эффекта изгибания поверхности воды при вращении?**

**Вариант 1:** ведро. Этот вариант не подходит, потому что относительно ведра вода находится в состоянии покоя. Более того, когда ведро только начинало вращаться, вода находилась относительно него в движении, но ее поверхность при этом не была вогнутой. Поэтому движение воды относительно ведра не объясняет эффект изгибания ее поверхности.

**Вариант 2:** стены комнаты. Этот вариант тоже не подходит, потому что, если поставить стены комнаты на колеса и начать вращать их вокруг ведра, поверхность воды в ведре не начнет изгибаться.

Изгибание поверхности воды внутри вращающегося ведра – это явление, относящееся к широкому классу явлений, носящих название «инерциальные эффекты». Инерциальные эффекты в физике наилучшим образом объясняются именно фактом ускоренного движения относительно пространства.

Данный аргумент демонстрирует:

- 1) Неустрашимость понятия пространства, по крайней мере из некоторых физических теорий;
- 2) Несводимость пространства к пространственным отношениям между телами.

## ВЫВОДЫ

Есть ли у нас на самом деле истины о пространстве-времени, и как мы их узнаем?

Пространство-время нельзя наблюдать непосредственно. Мы узнаем о физических свойствах пространства-времени только из его математических описаний. Однако имеется много различных математических описаний пространства-времени, и у нас нет достаточного критерия для предпочтения одного из них. Значит, математические описания нельзя считать описаниями пространства-времени и истинами о пространстве-времени.

Есть ли пространство-время на самом деле?

Если пространство-времени не существует, то у нас не может быть истин о нем. Следовательно, все, что представляется нам истинами о пространстве-времени, является истинами о чем-то другом, к чему пространство-время сводится. Если бы это было так, то мы могли бы убрать (или заменить) понятие пространства-времени из наших физических теорий без ущерба для них. Однако без понятия пространства-времени физические теории теряют свою объяснительную силу.

Со стороны метафизики не все так плохо, как может показаться. Да, пространство-время не является непосредственно наблюдаемым физическим объектом. Но оно и не является абстрактным объектом. Понятие пространства-времени получает вполне конкретное физическое содержание, когда оно применяется для анализа отношений между материальными объектами. При этом можно утверждать, что множественные математические описания в конечном счете являются описаниями одной и той же физической ситуации. Поэтому пространство-время можно считать опосредованно наблюдаемым физическим объектом, а множественность математических описаний – следствием несовершенства наших средств опосредованного наблюдения.

С другой стороны, наличие калибровочной свободы в рамках физических теорий пространства-времени скорее свидетельствует о наличии проблем с различением предмета исследования и средств исследования на уровне метатеории. Высказывания физических теорий не являются высказываниями о пространстве-времени самом по себе. Это высказывания о пространственно-временных траекториях материальных тел. Говорить о пространственно-временных траекториях самих по себе, безотносительно к материальным телам – значит неправильно использовать концептуальный инструментарий физических теорий и превращать средства исследования в предмет исследования.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Dasgupta, S. Substantivalism vs Relationalism About Space in Classical Physics // Philosophy Compass. – 2015. – № 10(9). – P. 601–624.
2. Giovanelli, M. Nothing but Coincidences: The Point-Coincidence Argument and Einstein's Struggle with the Meaning of Coordinates in Physics // European Journal for Philosophy of Science. – 2021. – Vol. 11.
3. Norton, J. D. The Hole Argument // The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2022 Edition), URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2022/entries/spacetime-holearg/>.
4. Peacocke, C. Being Known. Oxford: Oxford University Press, 1999.
5. Sider, T. The Tools of Metaphysics and the Metaphysics of Science. Oxford: Oxford University Press, 2020.