
**К ПРОБЛЕМЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ
В ГРАВИТАЦИИ И КОСМОЛОГИИ**
(посвящается моему научному руководителю
Абраму Леонидовичу Зельманову)

В.Д. Захаров

Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ)

Вопрос о том, является ли Вселенная как целое наблюдаемым объектом, рассматривается в аспекте метафизики (в противоположность позитивистскому подходу). Показана роль хронометрически инвариантного формализма А.Л. Зельманова в преодолении позитивизма в Общей теории относительности. Однако парадоксальный результат А.Л. Зельманова о зависимости пространственной бесконечности Вселенной от движения наблюдателя бросает вызов всей геометрической парадигме в современной теоретической физике.

Ключевые слова: Метафизика, позитивизм, пространство, бесконечность, система отсчёта, хронометрическая инвариантность, геометрическая парадигма, гравитационные волны.

Что такое наблюдаемость?

Вопрос о том, что мы наблюдаем и что в принципе можно наблюдать, с точки зрения современной теоретической физики, не столь тривиален, как это может показаться нашему «здравому смыслу». Например, наблюдали ли вы такой объект, как «мир» или «Вселенная»? Состоит ли Вселенная только из того, что мы наблюдаем или способны наблюдать? Русский философ Н. Бердяев написал книгу «О рабстве и свободе человека» [1], в которой говорит о многих видах человеческого рабства, в том числе о «рабстве человека у мира», рабстве человеческого ума, соблазнённого видимым миром. Мы «уверовали», что реален только этот видимый мир, очевидно, потому, что это самая лёгкая, прагматическая, идолопоклонническая вера. «Поверив» в этот мир, мы стали «знать» его. «Мы видим и знаем то, – пишет Бердяев в другом месте [2. С. 51], – что полюбили и избрали, а то, от чего отпали и что отвергли, то перестаём видеть и знать. Лишь новым актом избрания, лишь новым актом любви можно сделать невидимые вещи видимыми и узнать их».

«Новый акт избрания», делающий прежде невидимое «видимым», сейчас называют онтологическим подходом в физике, противопоставляя его подходу чисто эмпирическому. В другой терминологии, онтологию называют метафизикой, а эмпиризм – позитивизмом.

В этой статье я рассматриваю тот вклад в преодоление позитивизма в ОТО (Общей теории относительности) и основанной на ней космологии, ко-

торый внёс А.Л. Зельманов, столетие со дня рождения которого отмечается в текущем 2014 г. Предложенный им «новый акт избрания» реальности был высказан им в 1944 г. в его диссертации, а опубликован впервые в очень сжатом виде в 1956 г. Он основан на новом способе определения системы отсчёта в ОТО, который сделал «невидимую» для нас Вселенную видимой.

Всегда ли следует предоставлять ученикам свободу?

Поскольку Абрам Леонидович был моим научным руководителем и по дипломной работе (1962 г.), и по диссертации (1966 г.), то я не могу не рассматривать данную публикацию как юбилейную, в которой хотел бы рассказать не только о личных научных результатах моего учителя, но и о его работе с учениками и его влиянии на них.

Конечно, одно от другого полностью неотделимо. Нам давалась возможность выбирать темы для своих курсовых и дипломных работ в рамках исследований нашего учителя. Этим А.Л. Зельманов принципиально отличался от других научных руководителей, тех, которые предоставляли выбор темы самим ученикам, то есть фактически предоставляли их самим себе. С одной стороны, это давало ученикам полную свободу исследования, но с другой – было чревато и тем, что в таких условиях они не смогут самостоятельно найти свой собственный путь в науке. Не всегда свобода оказывается благом.

Примером был сам Абрам Леонидович, которому его научный руководитель по аспирантуре (между прочим, крупный учёный-космолог, академик АН СССР В.Г. Фесенков) дал полную свободу выбора. Его «научное руководство» проявилось лишь в том, что он принёс своему аспиранту обширный список мировой литературы по космологии: изучай сам и ориентируйся. Когда А.Л. Зельманов освоил эту литературу, он решил, что пора обратиться к руководителю за консультацией, чтобы выяснить возникшие вопросы. «Консультация» оказалась чрезвычайно краткой и состояла всего из одной фразы: «А вы подумайте!» (я помню эту фразу слово-в-слово от Абрама Леонидовича).

Вы можете посчитать, что это огорчило моего учителя. Нисколько! Он был именно из тех, для кого свобода оказалась благом. Однажды он сказал мне, что навсегда остался благодарным своему «руководителю» за предоставленную ему свободу действий, в том числе и выбор темы для своей диссертации. Он определил её сам: это была теория анизотропной неоднородной Вселенной.

Космология однородной изотропной Вселенной

Само построение космологии анизотропной неоднородной Вселенной является задачей необозримой сложности, которая не решена и по сей день. Не случайно к началу 1930-х гг. была разрешена только задача построения

модели, удовлетворяющей так называемому «космологическому принципу», а он и заключался в постулировании однородности и изотропии Вселенной. Этот Принцип утверждал высокую степень симметрии структуры пространства – времени, что радикально упрощало решение уравнений гравитационного поля (в частности, оно сводило 10 уравнений поля к одному-единственному уравнению). Однако постулат, как известно, не доказательство, и было совсем не очевидно, что так описываемая Вселенная соответствует реальному миру. К тому же решение, полученное на основе космологического принципа А. Фридманом и Дж. Леметром, содержало одну принципиальную неприятность: «начальную сингулярность». Она означала, что некоторое (конечное) время назад Вселенная должна была начать свою эволюцию из состояния, обладающего бесконечной плотностью и кривизной. Идеи квантовой космологии и возможности рождения Вселенной из квантовой флуктуации (впоследствии названного инфляционным Большим взрывом) никому тогда ещё не приходили в голову, да и до сих пор «квантовую гравитацию», которая разрешила бы проблему согласования ОТО (Общей теории относительности) Эйнштейна с «квантовым дрожанием» пространства – времени на планковских масштабах, нельзя считать последовательной теорией.

Всё это привело к тому, что А. Эйнштейн, формально признавший математическую корректность решения Фридмана – Леметра, отнёсся к нему как к некоторому математическому упражнению, не имеющему связи с действительностью. Сам он продолжал придерживаться идеи стационарной (вечной) Вселенной, и чтобы получить свою стационарную модель, ввёл в свои уравнения новое космологическое поле чисто геометрической природы, назвав его Λ -членом. При $\Lambda > 0$ это поле уравновешивало притягательное действие гравитации, оставляя неизменным принцип вечности Вселенной («небеса делятся из вечности в вечность»). Проблема сингулярности при этом исчезала сама собой: ведь ещё не было открыто расширение Вселенной.

Возвращаясь к А.Л. Зельманову, следует сказать, что в этой ситуации ему следовало, во-первых, преодолеть априорность (предзаданность) Космологического принципа и, во-вторых, решить проблему сингулярности, которая теперь возникла вновь в связи с наблюдательным открытием Э. Хаббла в 1929 г. расширения Вселенной.

Для решения этих задач ему пришлось построить новый математический аппарат в ОТО, называемый сейчас формализмом хронометрических инвариантов. Спрашивается: почему его не удовлетворила космология однородной изотропной вселенной, уже завершённая к тому времени и блестяще подтверждённая открытием Хаббла? Неужели чисто умозрительным (априорным) характером Космологического принципа? (На сингулярность Вселенной при $t = 0$ космологи до сих пор смотрят сквозь пальцы и надеются на разрешение этой проблемы с помощью новой, хотя и тоже ещё не созданной «квантовой космологии».)

Борьба метафизики с позитивизмом в космологии

По поводу же умозрительного, абстрактного характера Космологического принципа следует возразить: а разве вся теоретическая физика XX в. не создавалась чисто умозрительно? Уже Эйнштейн при создании СТО (Специальной теории относительности) провозгласил, что нельзя создавать науку на пути восхождения от фактов к теории. Этот путь использовали позитивисты, исповедовавшие принцип: действительное тождественно наблюдаемому. Иными словами, теория должна быть сформулирована в терминах, которые могут быть определены операционально, то есть прямо связаны с некоторой измерительной процедурой. Этот методологический принцип («принцип наблюдаемости») действительно сыграл свою роль в становлении физики, пока речь не шла о Вселенной как целом. Здесь Эйнштейн провозгласил уже другой принцип, неприемлемый для позитивистов: «Только теория решает, что именно можно наблюдать» [3. С. 192].

В применении к Вселенной уже с 1930-х гг. выяснилось, что не всё действительное является наблюдаемым в традиционном смысле. Возникло понятие «тёмной материи», а затем и «тёмной энергии», так что с конца XX в. наблюдениями уже было установлено, что в основном (на 96 %) Вселенная именно не наблюдаема. Можно ли на основе одних только наблюдений экстраполировать свойства наблюдаемой части Вселенной (например, её однородность и изотропию в масштабах, превышающих 200 мПс) на всю Вселенную как целое?

Если присмотреться к истории развития физики, то можно убедиться, что учёные в процессе создания теории руководствовались не позитивистским принципом наблюдаемости, а некоторыми иными принципами, которые сейчас можно назвать метафизическими. Разве не были метафизическими постулаты Ньютона об абсолютных пространстве и времени, а также о мгновенности распространения взаимодействий? Ведь они не только не подтверждались никакими наблюдениями, но даже, как потом выяснилось, противоречили некоторым из них. Между тем построенная на них теория с величайшей точностью описывала все наблюдавшиеся тогда явления на Земле и в небесах. Это было то, что философ К. Поппер назовет потом принципом фальсифицируемости теории, призванным заменить принцип наблюдаемости: теория только тогда может претендовать на научность, когда содержит в себе самый принцип, позволяющий её наблюдательно опровергнуть. Только в этом случае соответствие теории наблюдениям может считаться настоящим доказательным подтверждением теории [4. С. 63].

В XX в. предметом физики стали метафизические объекты – ноумены (в отличие от чувственно данных нам явлений – феноменов). Так, основное уравнение квантовой механики записано для принципиально ненаблюдаемого объекта – Ψ-функции, а основным объектом ОТО является также ненаблюдаемый объект – тензор кривизны 4-мерного пространства – времени $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ (индексы в нём пробегают значения 0, 1, 2, 3). Именно эта ненаблю-

даемая в обычном трёхмерном пространстве V^3 величина описывает испытываемое нами притяжение тел. Только в пространстве – времени V^4 существуют инварианты общей группы преобразований всех 4 координат, лежащей в основе ОТО:

$$x^{\mu} = x^{\mu}(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad (1)$$

и обобщающей линейные преобразования Лоренца специальной теории относительности (СТО). Сами же пространства с координатами $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$ и время t не инвариантны относительно общих преобразований. Выбором общих координат им можно придать любые свойства, например, плоское (евклидово) пространство сделать искривлённым, и наоборот. Плоское же пространство нельзя считать признаком отсутствия кривизны пространства – времени V^4 , так как в этом случае искривляется время.

Что такое Вселенная?

Мы подошли к ключевому понятию космологии – к понятию «Вселенной как целостного объекта исследования». Как мы можем его понимать в рамках ОТО, на которой основана космология? Например, космологическая модель Фридмана – Леметра основана на некотором решении уравнений ОТО Эйнштейна в пространстве-времени V^4 . Однако «Вселенную» мы рассматриваем как некий трёхмерный объект, то есть он локализован для нас в трёхмерном пространстве с координатами x^i , ($i = 1, 2, 3$), при $x^0 = const$. В геометрии это называется пространственным сечением в пространстве-времени. Про это пространственное сечение мы задаёмся вопросами: 1) конечно оно или нет? 2) является ли оно плоским или искривлённым? 3) вечно ли его пребывание во времени? Мы, например, говорим, что Вселенная возникла 13,4 млрд лет назад, а по каким часам мы измеряем это время? Есть ли единое время для космологии и что такое вообще есть время?

Сначала о понятии «Вселенная как целое». Со времён И. Канта астрономы понимают её как «всё, что доступно нашему чувственному опыту». Уже в конце XIX в. датский философ Х. Гёфдинг отметил, что такое понятие никогда не может быть логически завершено, так как к имеющимся данным опыта добавляются новые данные, которые не могут быть объединены каким-либо общим понятием. По этой причине Гёфдинг [5. С. 40] назвал слово «мир» ложным понятием. Именно на этой ложности наших представлений о мире основана кантианская антиномия о Вселенной, согласно которой Вселенная одинаково может считаться конечной и бесконечной как в пространстве, так и во времени. И. Кант хотел доказать невозможность метафизики и именно для этого хотел показать, что мышление, оторванное от образов наших чувственных созерцаний, неизбежно приходит к внутренним противоречиям – неразрешимым антиномиям. Так, неразрешимость своей антиномии Кант доказывает приведением к абсурду, ибо приходится «принять эти две бессмыслицы – наличие пустого пространства вне мира и пустого времени до мира» [6. С. 409]. Здесь Канту можно задать вопрос: а почему про-

странство и время, существующие без всякого «мира», бессмысленны? Чтобы утверждать это, надо было бы предварительно дать определение понятия пространства и времени независимо от понятия «мир». В своём критицизме, пишет А.Ф. Лосев [7. С. 119], Кант не отнёсся критически именно к этим понятиям – времени и пространства, а догматически навязал им такую роль чувственной интуиции, чтобы производить синтетические априорные суждения, осуществляющие «познаваемость» мира. Между тем Кант и к слову «мир» тоже не отнёсся критически, вследствие чего в его философии наш разум способен познавать лишь «феномены», то есть явления чувственного опыта. Вне сферы явлений разум обнаруживал свою ложность, что и показывали кантианские антиномии.

А.Л. Зельманов на основе теории Эйнштейна сумел показать, что ложен не разум, а «действительность», если пространство и время воспринимать как продукт нашего «опыта». ОТО допускала такие нетривиальные (не приводящие к плоскому пространству – времени) решения уравнений тяготения, которые не содержат никакой материи, то есть ничего доступного нашему чувственному опыту. Гравитация может существовать и без «порождающей» её материи.

Это позволило А.Л. Зельманову определить пространство и время безотносительно к материи, к которой они могли бы быть привязаны как к «телу отсчёта», для которого записывается решение. Система отсчёта, в которой получено решение Фридмана–Леметра, сопутствовала материи, то есть скорость любой точки материи в ней была равна нулю. А что если обойтись без сопутствия материи и рассмотреть только пустые модели? (Существование пустых космологических моделей как решений уравнений Эйнштейна в вакууме было доказано Виллемом де Ситтером в 1918 г.). Тогда, казалось бы, можно было ответить на вопрос, по каким «часам» мы измеряем время самого существования Вселенной.

Всё ли в мире каузально обусловлено?

Время, как физическая величина, доступная измерению, и область его применения были определены строго математически в связи с понятием физической причинности (каузальности), которое было установлено в релятивистской (эйнштейновской) физике. Именно теория относительности дала инвариантное 4-мерное определение причинной связи между событиями, покончив с понятием «сплошной связи всех явлений в контексте природы», о которой со времён Канта говорили позитивисты.

Каузальная связь оказалась невозможной между событиями, разделёнными пространственноподобным интервалом; физическая причинность осуществляется только с помощью сигналов, распространяющихся по временноподобным линиям. Новое, геометрическое определение причинности дало возможность геометривать время: его измерение теперь сводилось к измерению пространственных длин. В областях же акаузальности время как

физическая величина отсутствует. Вне границ светового конуса сама временноподобная координата t (или $x^0 = ct$) становится мнимой, ибо становится мнимым 4-мерный интервал между двумя мировыми точками: для любого события в этой области пространства-времени $s^2 = c^2 t^2 < 0$. Мнимость «времени» означает, что оно перестаёт определять физическую причинность, а значит, утрачивает физический смысл. Это видно хотя бы из того, что в области комплексных чисел утрачивает смысл главное характеристическое свойство времени – его направленность, так как для комплексных чисел нельзя определить упорядоченность типа больше – меньше.

Таким образом, понятие «геометрическое время» имеет смысл лишь тогда, когда есть вещество, распространяющееся с подсветовой скоростью. Время только тогда возникло, когда в процессе Большого взрыва, после стадии инфляции, появились первые элементарные частицы. Этот момент есть точка отсчёта геометрического времени, для которого никакого «до того» не существует. «До того» не было никакой физической причинности; Вселенная, следовательно, не могла возникнуть причинным образом, то есть во времени. Неслучайно говорят (см. Грин Б. [8. С. 528]), что «теория Большого взрыва не включает в себя взрыв». Большой взрыв не есть событие, которое произошло «в момент времени нуль», приведя Вселенную к существованию. Нельзя ставить вопрос о том, где и когда произошёл Большой взрыв, потому что ни времени (геометрического), ни пространства, ни самой системы отсчёта, в которой они определены, в условиях самой задачи не могло существовать.

Понятие геометрического времени дало возможность определить, что такое означает объём (конечный или бесконечный) трёхмерного пространства космологической модели. Выяснилось, что это понятие имеет смысл не во всех системах отсчёта, допустимых в ОТО. Сама система отсчёта (как физический объект, в отличие от системы координат) в ОТО определяется именно как совокупность (конгруэнция) линий времени, или мировых линий, вдоль которых изменяется только временноподобная координата x^0 . Чёткое определение пространства данной системы отсчёта было дано А.Л. Зельмановым. Пространство в ОТО определяется не абсолютно, а лишь как «пространство в данный момент времени», или пространственное сечение ($t = const$) в 4-мерном мире Эйнштейна, а оно в разных системах отсчёта по-разному ориентировано относительно линий времени. Пространство имеет смысл (то есть однозначно определено) лишь в том случае, если оно голономно, а это значит: в любой мировой точке пространственные сечения ортогональны линиям времени. (Тогда для всего 4-мерного мира существует однозначно определённое время, так и называемое – мировым временем.) А.Л. Зельманов получил инвариантное (в пределах данной системы отсчёта, то есть «хронометрически инвариантное») условие голономности пространства данной системы отсчёта.

В общем случае анизотропной неоднородной Вселенной понятие пространства не имеет однозначного смысла. Так, если система отсчёта сопут-

ствуется вращающейся материи, то её пространство не может быть голономным. (В такой системе отсчёта теряет смысл также понятие единого геометрического времени, потому что отсутствует единый способ синхронизации событий.) В случае же фридмановских моделей всегда существует (сопутствующая веществу) система отсчёта с голономным пространством, и можно ставить вопрос о величине его объёма, решаемый вычислением тройного интеграла по пространственным координатам.

Парадокс Зельманова: относительность бесконечности в ОТО

Известно, что космология Фридмана не даёт однозначного ответа на вопрос о конечности или бесконечности пространства: она допускает как замкнутые модели (при $k = +1$, где k – параметр пространственной кривизны), так и открытые (при $k = 0$ и $k = -1$). Причём конечность и бесконечность пространства рассматриваются как взаимоисключающие возможности. Таким образом, космология никак не разрешала вопрос, конечна или бесконечна Вселенная в пространстве. Как замечает А.Л. Зельманов, это происходило только потому, что сам вопрос о конечности и бесконечности пространства решался только по отношению к одной, физически преимущественной системе отсчёта – сопутствующей веществу. Тем самым обходился вопрос о возможной зависимости конечности или бесконечности пространства от движения системы отсчёта. Между тем в теории относительности инвариантны, то есть независимы от выбора движения системы отсчёта, лишь свойства 4-мерного мира, но не его расщепление на пространство и время. «В таком случае, – спрашивает А.Л. Зельманов, – не может ли зависимость свойств рассматриваемых порознь пространства и времени от движения системы отсчёта простираться так далеко, чтобы затрагивать конечность или бесконечность пространства?» [9. С. 314].

Чтобы получить ответ, надо было рассмотреть вопрос в чистом виде, то есть отрешиться от привилегированных систем отсчёта – избавиться от сопутствия их материи, а проще всего – совсем изгнать из фридмановских моделей материю. ОТО допускает такие модели (называемые пустыми), ибо в ней искривленное пространство-время может существовать автономно, без порождающей кривизну материи. Для таких моделей А.Л. Зельманов и получил свой замечательный результат [10]: бесконечное пространство одной системы отсчёта может оказаться конечным с точки зрения другой системы отсчёта, движущейся относительно неё. Наиболее выразительным этот результат оказался для 4-мерных миров де Ситтера – пустых миров при $\Lambda > 0$ (Λ – космологическая постоянная; это космическое поле сейчас считается ответственным за наблюдаемое ускорение расширения Вселенной). А.Л. Зельманов рассмотрел три типа таких миров, 4-мерная метрика которых задана в системах отсчёта Ланцоша («мир Ланцоша»), Леметра и Робертсона (миры Леметра и Робертсона). Каждый из миров Леметра и Робертсона в своей системе отсчёта обладает бесконечным пространством.

Однако из координатной связи этих миров с миром Ланцоша следует, что эти миры составляют лишь часть мира Ланцоша, в системе которого они, однако, имеют конечные пространства.

Для случая непустых фридмановских моделей результат А.Л. Зельманова принципиально остаётся тем же, поскольку для них сохраняется понятие пространства. Ставить же вопрос о конечности и бесконечности пространства анизотропной неоднородной Вселенной, вообще говоря, невозможно, потому что теряет смысл сам объект, пространство. Вывод таков: в тех случаях, когда пространственный объём Вселенной существует как понятие, его конечность или бесконечность относительна, то есть зависит от наблюдателя.

Зависимость рассматриваемых по отдельности пространства и времени от движения системы отсчёта естественным образом порождает и другой вопрос: не простирается ли она столь далеко, чтобы затрагивать конечность и бесконечность времени? И в этом случае вопрос также имеет смысл лишь там, где само понятие времени имеет смысл. Так как Вселенная как целое не могла возникнуть во времени (геометрическом), вопрос можно ставить лишь для отдельных её объектов (подсистем). Для отдельного объекта всегда можно ввести преимущественную, сопутствующую ему систему отсчёта, геометрическое время которой называется собственным временем объекта. Тут оказалось, что существуют (в геометрическом времени) объекты, для которых время протекания одного и того же процесса в одной системе отсчёта конечно, а в другой – бесконечно. Объект такого рода был теоретически предсказан в работе Оппенгеймера и Снайдера ещё в 1939 г. [11]. Это сфера из идеальной жидкости, неограниченно сжимающаяся (коллапсирующая) под действием собственных гравитационных сил. Неограниченное сжатие приводит к тому, что эта сфера за конечный промежуток собственного времени достигает размеров собственного гравитационного радиуса (r_g) и, переходя далее внутрь сферы этого радиуса («сингулярной сферы Шварцшильда»), сжимается до точечного состояния. Вместе с тем в статической системе отсчёта внешнего наблюдателя одно лишь время приближения этой сферы к гравитационному радиусу бесконечно. Таким образом, в бесконечное время статической системы отсчёта укладывается лишь часть процесса сжатия сферы. Моменту достижения радиуса $r = r_g$ отвечает время $t = \infty$ внешнего наблюдателя. Никаких логических противоречий в этом нет: это – относительность хода геометрического времени в своём крайнем выражении.

Таким образом, с точки зрения удалённого наблюдателя, гравитационный коллапс приводит к возникновению как бы навек «застывшего» тела, от которого в окружающее пространство не приходят никакие сигналы. Оно «застыло» не потому, что находится в равновесии (ибо равновесия нет), но потому, что, с точки зрения внешнего наблюдателя, на сингулярной сфере «застыло» (остановилось) время. Лишь впоследствии, когда выяснилось, что звёзды достаточно больших масс действительно могут сжиматься неограниченно, рассматриваемым гипотетическим объектам был присвоен статус ре-

альности – как одного вида тёмной материи, получившего название чёрная дыра, или коллапсар.

Идея относительности бесконечности закономерно пришла на смену антиномии Канта, когда методология физики в XX в. решительно отказалась от позитивистского «предметного» знания и перешла на почву онтологии (метафизики). В отличие от антиномии Канта, отнесённость бесконечности к наблюдателю не означает противоречия для разума в области чисто метафизического мышления. Разум не приходит к противоречию с самим собой, если мир понимать не опытно, а онтологически, или, как теперь можно говорить, метафизически.

А.Л. Зельманов решил вопрос об определении системы отсчёта независимо от вещества, объявив физически преимущественными не произвольные величины, ковариантные относительно общих преобразований 4-мерных координат (1), а лишь те, которые ковариантны относительно преобразований пространственных координат:

$$x^{i'} = x^i(x^1, x^2, x^3), \quad (2)$$

обладающих свойством $\partial x^{i'} / \partial x^0 = 0$, а также преобразования

$$x^{0'} = x^0(x^0, x^1, x^2, x^3). \quad (3)$$

(«хронометрическая инвариантность»).

Очевидно, преобразования (2) – (3), в которых $x^0 = ct$ – временноподобная координата, есть наиболее общие преобразования, связывающие системы координат, покоящихся относительно заданного (и теперь уже геометрически определённого) тела отсчёта, а хронометрически инвариантные трёхмерные величины, инвариантные относительно преобразований (3), можно рассматривать как наблюдаемые величины в ОТО, то есть величины, непосредственно связанные с физическими измерениями.

Так появилась возможность описывать общековариантные понятия в ОТО в виде наблюдаемых, заданных в хронометрически инвариантном трёхмерном пространстве, определённой формулами (2) и (3). Это трёхмерное пространство («пространство данной системы отсчёта») характеризовалось хронометрически инвариантными векторами и тензорами, смысл которых был ясен из классической механики сплошных сред: «гравитационно-инерциальной силы» F_i , тензора A_{ik} угловой скорости абсолютного вращения выбранного пространства системы отсчёта относительно локально сопутствующей геодезической системы, а также тензора скоростей деформации D_{ik} трёхмерного пространства системы отсчёта – относительно локально сопутствующей геодезической системы. Для каждой из этих величин А.Л. Зельмановым были получены выражения через хронометрически инвариантные: трёхмерную метрику

$$h_{ik} = -g_{ik} + \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}},$$

операторы дифференцирования по времени x^0

$${}^* \partial_0 = \frac{1}{\sqrt{g_{00}}} \partial_0$$

и по пространственным координатам ${}^* \partial_i = \partial_i - \frac{g_{0i}}{g_{00}} \partial_0$.

Вызов геометрической парадигме

Полученная зависимость конечности или бесконечности пространства от собственного движения наблюдателя оставляет неясным вопрос: по каким же часам мы определяем время существования Вселенной? Ведь само это «время» теперь становилось неопределенным. Какого «наблюдателя» следовало выбрать для определения времени жизни Вселенной? Остается ответить: такого наблюдателя нет, его не допускает ОТО. ОТО рассматривает только геометрическое время, а оно, как мы убедились, существует только вместе с уже возникшей материей. Формализм Зельманова наглядно показал, что отделить время от пространства (рассмотреть их «порознь») не удаётся без признания факта зависимости течения времени от наблюдателя. Представляется, что решить вопрос о времени жизни Вселенной, можно только выйдя за рамки ОТО, в которой время и пространство никогда не существуют порознь, но всегда соединены в единое пространство – время V^4 . Это V^4 в ОТО рассматривается догматически: как некоторая изначально заданная нам «арена», на которой осуществляются взаимодействия. Задание такой арены означает принятие «геометрической парадигмы» нашего сознания. Многие физики чувствовали свою жёсткую связанность с геометрической парадигмой и задавались вопросом: должны ли мы ограничивать теорию, заставляя её действовать в уже существующих рамках пространства-времени? Нельзя ли научиться определять пространство и время порознь и независимо друг от друга, а для этой цели вывести их из более общей концепции, выходящей за рамки геометрической парадигмы?

Возможным ответом на вопрос является развиваемая Ю.С. Владимировым и его учениками (см., например, [12]) реляционная парадигма, заменяющая метафизику субстанций на метафизику отношений. В ней физическая причинность теории Эйнштейна уступила место обобщённому принципу Маха – принципу зависимости любых состояний в мире от состояния всей Вселенной. Характер такой «бинарной системы комплексных отношений» – надвременной и надпространственной, что в применении к микромиру означает квантовую нелокальность.

Вопрос о гравитационных волнах

А.Л. Зельманов опубликовал свой формализм (1956 г.) без какой-либо прямой нацеленности на космологию, так что он мог быть использован при

решении любых других проблем ОТО. Тут и открылось широкое поле исследований для его учеников. Как мною уже отмечалось, сам он предлагал свои темы на выбор, лишь математический аппарат предлагался один – хронометрические инварианты. Меня заинтересовала тема, которая называлась «Гравитационные волны и хронометрические инварианты». Никто из теоретиков определённо не знал, как можно описывать поле гравитационных волн в ОТО. Ведь гравитационные волны – это не волны какого-либо поля, распространяющегося в пространстве-времени, а волны самого пространства-времени. Как же описывать его распространение, подобное, например, распространению скалярных или электромагнитных волн во внешнем пространстве-времени? Хронометрически инвариантный формализм позволил подойти к проблеме с практической точки зрения. Ведь эти «волны», если они существуют, должны как-то быть зафиксированы приёмным устройством. Это означало, что они должны быть записаны в терминах наблюдаемых величин. Если заранее отмести методологию позитивизма, можно было обратиться к хронометрическим инвариантам. Многие решения уравнений Эйнштейна выражались через метрику $g_{\mu\nu}$, коэффициенты которой обнаруживали зависимость от аргумента $x - ct$, но эта волновая зависимость, характерная для плоского пространства-времени, утрачивалась в той же системе отсчёта при использовании преобразований координат (2) или (3). Требовалось найти запись волнового уравнения, инвариантную относительно этих преобразований. Абрам Леонидович всегда вникал в ход поисков его учеников, и его удовлетворило лишь хронометрически инвариантное уравнение вида

$${}^*\square P = Q. \quad (4)$$

Здесь введены обозначения:

$${}^*\square = {}^*\nabla^2 - \frac{1}{a^2} {}^*\partial^* \partial, \quad {}^*\nabla^2 = h^{ik} {}^*\nabla_i {}^*\nabla_k,$$

так что ${}^*\square$ есть хронологически инвариантный пространственно-ковариантный оператор Даламбера, a – скалярная функция, выраженная скорость распространения волн, а правая часть Q не должна явно содержать вторых производных от «волновой функции» P .

Оказалось, что уравнение (4) действительно выполняется для ряда уже известных решений уравнений Эйнштейна (это решения Переса, Такено и др.), обнаруживающих привычные для нас «волновые» свойства, но отнюдь не для всех, а только для тех, что принадлежали к типу N (вырожденному II типу) по известной классификации тензоров кривизны, предложенной А.З. Петровым.

Что это было – случайность или закономерность? Кроме этого вопроса, надо было выяснить другой вопрос: а не выражает ли уравнение (4) эффект чисто инерциальный, то есть обусловленный случайным выбором системы отсчёта? Так, И.Д. Новиков сказал накануне защиты моей дипломной работы, что, по его мнению, уравнение (4) не выражает ничего, кроме волн

инерциальных, когда волновые свойства проявляет лишь система отсчёта, а не само пространство-время.

Абрам Леонидович тоже предвидел эту трудность и поэтому заранее предложил мне использовать в качестве гравитационно-волнового критерия не хронометрическое, а общековариантное обобщение волнового оператора в виде $D = g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$), где символ ∇_μ обозначал ковариантное дифференцирование относительно произвольных преобразований координат (1), употребляемое в ОТО. Выяснилось, что все метрики, удовлетворяющие уравнению (4), удовлетворяют также уравнению

$$DR_{\alpha\beta\gamma\delta} = 0, \quad (5)$$

то есть выражают чисто гравитационный, а не инерциальный эффект. Хронометрически инвариантный подход к исследованию гравитационных волн оправдал себя.

Требовалось разобраться, случайно ли волновые решения связаны с типом N по Петрову. Лишь позднее мне удалось показать, что любое пространство Эйнштейна, для которого тензор $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ удовлетворяет уравнению (5), принадлежит к типу N и, наоборот, любое пространство Эйнштейна типа N удовлетворяет уравнению (5). Так удалось связать алгебраические и волновые свойства тензора Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$, и этот результат вошёл в мою книгу «Гравитационные волны в теории тяготения Эйнштейна» [13], изданную потом также на английском языке.

Поскольку этот очерк посвящён А.Л. Зельманову, не могу не рассказать, какую роль мой учитель сыграл в получении этого результата. В 1961 г. А.З. Петров, заведовавший в то время кафедрой теории относительности и гравитации в Казанском госуниверситете, посетил первую гравитационную конференцию в Москве. Я воспользовался этим случаем, чтобы поговорить с ним о гравитационных волнах. Первый же его вопрос смутил меня: «А что Вы называете гравитационными волнами?» Он не знал ещё о хронометрических инвариантах и имел в виду, как и все теоретики, общековариантное определение гравитационных волн, в то время как я, настроившись на хронометрически инвариантный формализм, рассматривал гравитационные волны только в выбранной системе отсчёта. А.З. Петров связался с Абрамом Леонидовичем, предложив послать меня в г. Казань на преддипломную практику для ознакомления с многочисленными статьями по гравитационным волнам, поступавшим к нему из разных стран мира. Мне никогда не забыть, как мой учитель лично звонил в ректорат Казанского университета, чтобы договориться о моей командировке. Именно тогда я вплотную познакомился с техникой записи алгебраических условий на тензор Римана на языке бивекторных представлений А.З. Петрова. Это в дальнейшем позволило мне записать уравнение (5) для пространств Эйнштейна ($R_{\alpha\beta} = \lambda g_{\alpha\beta}$) на эквивалентном алгебраическом языке и доказать указанную мною теорему. Узнав об этой теореме, Абрам Леонидович решил, что опубликовать её следует в Докладах Академии наук СССР, а для этого надо было показать мою статью

кому-либо из академиков. Он устроил мне личную встречу с В.А. Фоком на его квартире. После одобрения со стороны А.З. Петрова и В.А. Фока статья была опубликована в ДАН СССР (1965 г.). Следующую мою статью В.А. Фок представил в ДАН уже без посредников.

Из сказанного видно, что Абрам Леонидович всегда активно работал со своими учениками над темой, выбранной ими из предложенного им материала. Однако я не знаю ни одного случая, когда бы он поставил свою подпись под статьёй, под которой стояла подпись его ученика. Он отдавал своим ученикам всё, что мог отдать, в том числе и своё заслуженное авторство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердяев Н.Н. О рабстве и свободе человека (опыт персоналистической философии). – Париж: YMCA. – PRESS, 1939.
2. Бердяев Н.Н. Философия свободы. – М.: Правда, 1989.
3. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. – М.: Наука, 1989.
4. Поппер К. Логика и рост научного знания. – М.: Прогресс, 1983.
5. Гёфдинг Х. Философия религии. – СПб.: Общественная польза, 1912.
6. Кант И. Критика чистого разума // Соч.: в 6 т. – Т. 3. – М., 1964.
7. Лосев А. Ф. Диалектические основы математики // Лосев А. Ф. Хаос и структура. – М., 1997.
8. Грин Б. Ткань Космоса. Пространство, время и текстура реальности. – М., 2009.
9. Зельманов А.Л. Многообразие материального мира и проблема бесконечности Вселенной // Бесконечность и Вселенная. – М.: 1969.
10. Зельманов А.Л. К постановке вопроса о бесконечности пространства в общей теории относительности // Докл. АН СССР. – Т. 124. – № 5. – 1959. – С. 1030–1033.
11. Oppenheimer J., Snyder H. // Phys. Rev. – V. 56. – 1939. – P. 455.
12. Владимиров Ю.С. Физика дальнего действия (природа пространства-времени). – М.: URSS, 2012.
13. Захаров В.Д. Гравитационные волны в теории тяготения Эйнштейна. – М.: Наука, 1972.

TOWARDS THE PROBLEM OF OBSERVABILITY IN GRAVITATION AND COSMOLOGY (This article is dedicated to my academic advisor, Dr. Abraham Zelmanov)

V.D. Zakharov

The question whether the Univers as an whole object is observable is decided as that of metaphysics but not that of phenomenology. The role of Zelmanov's chronometric invariants in the overcoming of the positive methodology in general relativity is shown. However, Zelmanov's paradox about the relativity of the Univers infinity is a challenge to all the geometric paradigm in the theoretical physics.

Key words: Metaphysics, positivism, space, infinity, frame, chronometric invariance, geometric paradigm, gravitational waves.