

---

---

## Апории Зенона и квантовый микромир: о чем говорят атории\*

© 2022 г. И.А. Карпенко

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва, 109028, Покровский бульвар, д. 11.

E-mail: [gobzev@hse.ru](mailto:gobzev@hse.ru)

Поступила 13.05.2022

В статье рассматриваются новые подходы к четырем апориям Зенона: «Стрела», «Ахиллес», «Дихотомия» и «Стадион». Атории анализируются в свете актуальных исследований в области физики элементарных частиц и перспективных направлений разработки квантовой теории гравитации. Физические концепции, снабженные необходимой философской интерпретацией, используются в целях прояснения аторий Зенона и поиска ответов на них. Показывается, что привлечение современных подходов не эффективно при решении аторий по той причине, что атории теряют свое содержание при анализе через оптику физики микромира (на сверхмалых масштабах). Главная часть работы отводится демонстрации этого обстоятельства – вопросы, которые ставят атории, лишаются возможности ответов (по крайней мере при их классической интерпретации). В качестве возможного объяснения обосновывается позиция, что в формулировке аторий совершается смешение свойств макромира и микромира (что исторически правомерно, учитывая интуитивную однородность большого и малого, и возникновение неклассической физики – квантовой механики – только в XX веке); то есть, от наблюдения больших физических объектов осуществляется неправомерный переход к описанию бесконечно малого, в то время как их устройство различается. Принципы организации пространства на сверхмалых масштабах начинают в общих чертах проясняться только сейчас, и, возможно, они могут оказаться довольно далеки от классических представлений о фундаментальной физической реальности.

**Ключевые слова:** атории Зенона, философия науки, макромир, микромир, дуальность, пространство, время, движение, непрерывность.

DOI: 10.21146/0042-8744-2022-10-132-142

Цитирование: Карпенко И.А. Атории Зенона и квантовый микромир: о чем говорят атории // Вопросы философии. 2022. № 10. С. 132–142.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00450, <https://rscf.ru/project/22-18-00450/>

# Zeno's Paradoxes and the Quantum Microworld: What do Paradoxes Mean\*

© 2022 Ivan A. Karpenko

HSE University, 11, Pokrovsky Bulvar, Moscow, 109028, Russian Federation.

E-mail: [gobzev@hse.ru](mailto:gobzev@hse.ru)

Received 13.05.2022

The article discusses the new approaches to the four Zeno's Paradoxes: "The Arrow", "The Achilles", "The Dichotomy" and "The Moving Rows". Paradoxes are analyzed in relation to the current research in the field of elementary particle Physics and promising areas of the quantum theory of gravity development. Provided with the necessary philosophical interpretation Physics concepts are used to clarify Zeno's Paradoxes and to search for answers to them. The involvement of modern approaches is shown to be ineffective in solving the paradoxes due to their scope losses when analyzed by the microworld Physics on ultra-small scales. The work's main part is devoted to demonstrating this circumstance – the questions posed by paradoxes are deprived of the possibility of getting the answers (at least, in their classical interpretation). As a possible explanation stands the ground of mixing the properties of the macroworld and the microworld in the paradoxes statements (which is historically justified given the intuitive homogeneity of big and small, and the origin of non-classical Physics – quantum mechanics – only in the 20th century), meaning the transition from observation of the large physical objects to the infinitely small in terms of discreteness and continuity. However, the principles of space organization on ultra-small scales are beginning to be clarified in general terms only now, and, perhaps, these principles may turn out to be quite far from classical ideas on fundamental physical reality.

**Keywords:** Zeno's aporias, philosophy of science, macrocosm, microcosm, duality, space, time, motion, continuity.

DOI: 10.21146/0042-8744-2022-10-132-142

Citation: Karpenko, Ivan A. (2022) "Zeno's Paradoxes and the Quantum Microworld: What do Paradoxes Mean", *Voprosy filosofii*, Vol. 10 (2022), pp. 132–142.

Апории Зенона обсуждались в философской и научной литературе в течение столетий, и до сих пор, спустя два с лишним тысячелетия после их формулировки ведутся дискуссии по поводу их значения. Некоторые полагают, что апории решены и не представляют серьезной проблемы, другие, напротив, настаивают, что решение еще не найдено.

Интересный и важный, но, конечно, не полный обзор проблемы дан А. Койре в работе «Заметки о парадоксах Зенона» [Койре 1985]. Он проводит подробный анализ каждой апории, критикуя известные подходы и интерпретируя их в разных аспектах, и делает выводы о причинах трудности их решения. Действительно, выбор направления возможных решений может зависеть от интерпретации того, что, собственно, сообщают эти апории. Также заслуживает внимания монография В.Я. Комаровой, полностью посвященная аргументам Зенона, их текстологическому, историко-философскому

---

\* The study was funded by RSCF, grant No. 22-18-00450, <https://rscf.ru/project/22-18-00450/>

и математическому анализу [Комарова 1988]. Более современная попытка логико-математического осмысления апорий предложена А.М. Анисовым, где опять же подчёркивается их актуальность в контексте современной науки [Анисов 2000]. В то же время заслуживает внимания мнение, что интерпретация апорий исключительно в контексте современной науки не раскрывает их аутентичное содержание и трактовать их следует в духе логики Парменида, где раскрывается нераздельность человеческих существ в их бытии [Calenda, 2013]. Поэтому, во избежание неясностей, мы оговариваемся, что речь пойдет об интерпретации, ставшей возможной только благодаря развитию науки XX в., и о которой, вполне очевидно, элеаты и доксографы не могли знать.

Мы будем исходить преимущественно из понимания, предложенного Койре, оно находится в рамках традиционной дискуссии (и основано на формулировках апорий Аристотелем в книгах IV (главы 2, 3), VI (главы 2, 9) и VIII (глава 8) его «Физики» [Аристотель 1976]), но в тех местах, где это потребуется, будем ссылаться на более современные исследования. Анализ коснётся апорий «Ахиллес и черепаха», «Дихотомия», «Стрела» и «Стадион». В этих апориях говорится о невозможности движения с двух позиций – непрерывности и дискретности пространства и времени; независимо от того, непрерывно или дискретно пространство, вывод один: движение невозможно.

Нам представляется, что интерпретировать апории нужно в смысле противоречия между логикой (классической интеллектуальной интуицией) и классической физикой (а также, как будет показано, неклассической – квантовой теорией). В том плане, что апории не отрицают в действительности движения, а указывают на это самое противоречие между физикой и логикой: очевидно, движение есть, оно является наблюдаемым фактом. Но при анализе движения в пространстве-времени мы приходим к выводу, что оно невозможно именно с точки зрения логики. Таким образом, проблема не в том, что движения действительно нет, а в том, что возникает противоречие между наблюдаемой реальностью и нашим способом мышления о ней.

Почему возникает это противоречие? Настоящая работа посвящена в основном попытке ответа на этот вопрос. Здесь будет показано, что апории затрагивают вопросы, которые едва ли в принципе могут быть решены в рамках классической интеллектуальной интуиции, включающей соответствующие физические представления, поскольку в них осуществляется неправомерный переход с макроуровня повседневных наблюдений (возможностей человека, сформированных в ходе эволюции) на микроуровень, где ключевую роль играют квантовые процессы, и глубже – где пока нет удовлетворительного теоретического описания для тех категорий, которые принято считать фундаментальными. Сама по себе идея, что апории не могут быть решены, не является новой, но мы попытаемся объяснить, почему они не могут быть решены. Гипотеза заключается в том, что постановка вопроса в том виде, в каком он сформулирован на данный момент, возможно, не имеет смысла.

### **Апории и некоторые традиционные возражения**

Апории «Дихотомия» и «Ахиллес» исходят из гипотезы непрерывного пространства и времени (инфинитраной гипотезы).

«Дихотомия» говорит о том, что если полагать пространство непрерывным, то есть делимым до бесконечности, то движение никогда не сможет начаться, так как для преодоления любого ничтожно малого расстояния надо преодолеть часть этого расстояния и так далее до бесконечности, таким образом, чтобы хотя бы начать движение, нужно преодолеть бесконечность.

На это были различные попытки ответа, один из них касается того, что само движение следует рассматривать как единый неделимый процесс с того момента, когда оно начинается и когда завершается. В самом деле, если представлять движение неделимым, то, на первый взгляд, проблема снимается. Неделимое движение – это плавное, не квантованное движение, которое просто проходит все точки, нигде не останавливаясь. Это кажется убедительным, действительно, ведь движущееся тело «...ни в какое

мгновение оно не есть в какой-либо точке своего движения: дело ограничивается лишь тем, что оно все эти точки проходит» [Койре 1985, 37] и «Движущееся движется в каждой точке своей траектории» [Там же, 32]. Но при этом парадоксально получается, что в каждой фиксированной, неделимой точке движения нет, нет его и в начале и конце движения – тогда непонятно, когда оно вообще есть.

Апория «Ахиллес», утверждая, что Ахиллес никогда не догонит черепаха, по сути, говорит о бесконечной делимости, из-за чего черепаха всегда будет впереди (за то время, что Ахиллес будет достигать точки, где раньше была черепаха, она отползет сколько-то, значит Ахиллесу надо будет достигнуть теперь той точки, но она опять еще немного отползет и так далее до бесконечности). Фактически, ни черепаха, ни Ахиллес даже не начнут движения в силу разобранной уже «Дихотомии».

В качестве возражения известен математический аргумент о сходимости рядов – сумма бесконечного числа временных интервалов сходится и будет равна 1, в результате чего Ахиллес догонит черепаха. Но Гилберт и Бернайс справедливо замечают, что «...это рассуждение абсолютно не затрагивает один существенно парадоксальный момент, а именно парадокс, заключающийся в том, что некая бесконечная последовательность следующих друг за другом событий, последовательность, завершаемость которой мы не можем себе даже представить (не только физически, но хотя бы в принципе), на самом деле все-таки должна завершиться» [Гилберт, Бернайс 1979, 40].

Можно установить взаимно-однозначное соответствие: каждой точке пути Ахиллеса сопоставить точку движения черепахи и наоборот и, следовательно, они пройдут равный путь, и он ее настигнет. Однако это не так, они эквиваленты, но не равны. Можно установить взаимно-однозначное соответствие между множеством натуральных чисел и множеством чётных чисел, но это не значит, что они равны. Вариант решения «Ахиллеса», как и в случае «Стрелы» заключается в том, чтобы полагать само движение неделимым, в таком случае оно просто минует точки, не измеряя их в какие-то моменты времени. Это решение само по себе трудно для понимания: в таком случае мы не можем сказать: «движущийся объект находится в точке А, сейчас 12.00», ведь тогда в точке А он не движется. Но можно сказать «движущийся объект миновал точку А в 12.00», то есть исключительно ретроспективно. С этой точки зрения апории говорят не столько о невозможности движения, сколько о невозможности неподвижности. На это уже было обращено внимание [Bathfield 2018, 649–679], и этот подход близок современным квантово-механическим представлениям.

Главная проблема в обеих апориях – в непрерывности пространства: почему мы считаем возможным делить его на отрезки? В таком случае это уже не непрерывность, раз есть точки деления (ограничивающие пределы) – эти точки мы не предполагаем делимыми, мы делим отрезки между ними. Точка обособлена, более того, в этих точках движения не может быть, в противном случае они были бы протяженными. Но не может быть движения и вне точек, если полагать непрерывное составленным из них. Но тогда это вообще не непрерывное. Если же мы можем делить и сами точки (границы отрезка непрерывного), то нет и самих границ, они раздвигаются в бесконечность, и движения так же не может быть.

Вторая группа апорий: «Стрела» и «Стадион» рассматривают пространство-время как имеющие пределы деления, то есть дискретные (финитарная гипотеза). Суть «Стрелы» в следующем. Если есть пределы деления пространства и времени, то есть пространственные интервалы и временные не делимы далее, то стрела не сможет двигаться, так как если она движется, то измеряет эти интервалы и следовательно они становятся делимыми. Иначе говоря, в каждый неделимый момент времени в каждой точке пространства она покоится, так как в них она двигаться не может. Остаётся предположить, что стрела телепортируется из точки в точку (что теоретически возможно). «Стрела» – одна из самых популярных апорий в современной физике и математике. Для ее решения предлагается использовать нильпотентные бесконечно малые отрезки времени [Reeder 2015]. Нам это не подходит, потому что бесконечно малое – это как раз то, что является одной из причин парадоксов, разъединяя наблюдаемое

и мыслимое. Нам ближе подход, предлагающий новую версию апории стрелы, которая оказывается неклассическим (квантово-механическим) расширением ньютоновской механики и использует такие свойства, как появление частицы во многих местах одновременно [Angel 2002].

4) «Стадион» исходит из той же финитарной гипотезы. Здесь могут быть различные интерпретации, возьмём следующую. Пусть есть три ряда объектов, в каждом по четыре (ряд А, состоящий из объектов А1, А2, А3 и А4, ряд В, состоящий из объектов В1, В2, В3, В4 и ряд С, состоящий из объектов С1, С2, С3, С4 (можно рассматривать эти ряды как прямые и тогда рассмотрение будет с точки зрения инфинитарной гипотезы). Пусть первый ряд (А) неподвижен, а ряды В и С движутся в один неделимый момент времени на один неделимый интервал пространства в разные стороны (например В влево, а С вправо). Происходит следующее: в то время как ряды В и С смещаются относительно ряда А на один интервал пространства за один интервал времени, относительно друг друга они смещаются на два интервала пространства. И, следовательно, говорит Зенон, половина равна целому.

Этой апории посвящена статья [Sattler 2015], в которой отмечается, что она недооценена в истории философии и науки, и её рассматривают либо как наивную, либо неверно интерпретируют, как другой атомистический парадокс, хотя в действительности она затрагивает глубинную связь пространства, времени и движения (см. также [Davey 2007], в этой работе дана история вопроса и предложены главные интерпретации «Стадиона»).

Рассматривая все четыре апории, Койре приходит к выводу, что с какой бы позиции мы ни подходили к каждой из них – непрерывности пространства и времени или их дискретности, они одинаково неразрешимы (например, к «Ахиллесу» и «Дихотомии» с позиций финитарной гипотезы могут быть применены аргументы «Стадиона»).

### **Две позиции: гладкое пространство-время и квантованное**

Будем в анализе апорий исходить из двух позиций: общей теории относительности и квантовой теории поля (а также с точки зрения следствий, возникающих в результате попытки их объединения). В первом случае (теории гравитации Эйнштейна) мы имеем дело с гладким пространством-временем. В том смысле, что оно не квантуется и является непрерывным. Непрерывность пространства-времени технически отсылает нас к первым двум апориям. Здесь мы имеем классическую интерпретацию апорий и споры относительно того, как понимать движение.

В классической физике движение определяется следующим образом: движение – это изменение пространственного положения тела или его частей относительно других тел с течением времени. Действительно, движение происходит во времени (вспомним аристотелевское «время – мера движения», но можно сказать и наоборот: движение – мера времени).

Свойства пространства и времени в общей теории относительности (далее ТО) не абсолютны, а относительны. Это, в частности, означает, что для различных наблюдателей (различных систем отсчёта) время течёт по-разному или, говоря иначе, не существует одновременных событий (относительность одновременности). Можно преобразовать ТО так, что будет иметь место аналогичное явление, но в отношении пространства – объекты будут иметь разные размеры для разных наблюдателей. В ТО есть предел скорости перемещения в пространстве – скорость света (кроме того, она постоянна, даже если Черепаша будет догонять свет со скоростью меньшей скорости света на 1 км/с, он будет улетать от неё не со скоростью 1 км/с, а со своей постоянной скоростью). Это означает, что при движении со скоростью света время предельно замедляется – для тех, кто наблюдает за объектами, движущимися с такой скоростью, для самого объекта время идет по-прежнему; это как раз следствие относительности времени.

В классической трактовке апории Зенона рассматриваются с точки зрения механики Ньютона. У Ньютона пространство и время абсолютны, пространство не искривляется,

время течет везде одинаково, гравитация распространяется мгновенно. Отличия ТО от механики Ньютона начинают играть роль только в экстремальных условиях (при очень больших массах/энергиях и высоких скоростях). Но апории в своих обычных формулировках описывают ситуации чисто ньютоновские и не затрагивают эффекты ТО.

Чтобы попытаться затронуть их, можно сделать следующее: предположить, что Черепаха и Ахиллес частицы, которые способны развивать сверхвысокие скорости. В этом случае ситуация выглядит следующим образом. Известно, что Ахиллес быстрее черепахи. Но есть предел скорости – скорость света. Значит, максимальная скорость Ахиллеса – скорость света. Следовательно, черепаха движется медленнее. Допустим, Ахиллес движется со скоростью света, это означает, что как бы быстро ни бежала Черепаха, он будет двигаться относительно нее со скоростью света и с ее точки зрения он будет преодолевать пространство почти без затрат времени (и не стареть – что в нашем случае неважно). Позволяет ли это как-то решить апорию? По всей видимости нет. Ахиллес всё так же ее не догонит до тех пор, пока мы выделяем точки в непрерывном.

А вот в случае со «Стадионом» ситуация может и измениться. Дело в том, что в ТО играет роль не только скорость и направление, но и расстояние между движущимися объектами. Если три ряда разнесены в пространстве достаточно далеко (в действительности очень далеко во вселенной), то это обстоятельство сыграет роль – не будет наблюдаться одновременного движения в разные стороны рядов В и С в силу относительности одновременности. Что для одного наблюдателя будет казаться одновременным, для других наблюдателей нет, и ряд С стартует позже ряда В. Но это экзотические ситуации, которые вряд ли имеет смысл здесь рассматривать, поскольку мы анализируем классический вариант апорий, где имеет место единство места, времени и действия. Важно, что в ТО движение происходит не в пространстве и времени по отдельности, а в пространстве-времени, как едином континууме. В таком случае апории «Стадион» и «Стрела» в классической трактовке не имеют смысла – рассмотрение пространства и времени по отдельности оказывается неправомерным.

Квантовая механика утверждает, что пространство квантуется. Как предполагается, существуют элементарные частицы, неделимые далее. В Стандартной модели физики элементарных частиц это кварки, лептоны, калибровочные бозоны. Проблема, правда, в том, что с математической точки зрения в Стандартной модели частицы могут быть бесконечно малы. Предел, на котором работает квантовая теория поля – планковская длина: около  $10^{-35}$  метра, далее энергии и взаимодействия становятся настолько велики (бесконечно велики), что частицы взаимодействуют с вероятностью больше 1, что не имеет смысла. Один из главных принципов квантовой механики заключается в том, что чем меньше расстояние, которое мы ходим исследовать, тем больше требуется на это энергии, а большая энергия – это большая масса в силу эквивалентности массы и энергии. Это означает, что на бесконечно малых расстояниях (что допускает непрерывность) гравитация станет бесконечно сильной (в силу закона обратных квадратов и связи гравитации и массы), и такая масса при малом объёме и огромной плотности схлопывается в черную дыру. Это одна из причин, почему нельзя совместить квантовую механику и общую теорию относительности – чем меньше масштаб, тем выше энергии, массы и сильнее квантовые флуктуации, и теории в этих условиях перестают работать.

Квантование, в отличие от гладкого пространства теории относительности, утверждает дискретность пространства (ячеистость) и дискретные порции энергии (элементы можно рассматривать как энергию опять же в силу эквивалентности массы и энергии). Как уже отмечалось, проблема в том, в что Стандартной модели физики элементарных частиц нет ограничения на минимальный размер этих частиц и ячеек. Они могут быть бесконечно малы и непрерывны – запрета на это нет, хотя теория и дает бессмысленные ответы в условиях бесконечных значений. Это выглядит как непрерывность со всеми ее нюансами, скрытая в дискретности.

В этом случае имеет смысл рассмотреть апории Зенона с точки зрения того, как частицы преодолевают пространство. Если оно непрерывно, то на первый взгляд

повторяется всё то же самое – частицы вынуждены преодолевать бесконечность и тем самым движение невозможно. Однако на микроуровне является обычным эффект туннелирования – способность частиц преодолевать энергетический барьер, величина которого превышает энергию этих частиц (подробное описание процесса дано в [Razavy 2003]). Туннельный эффект невозможен в классической физике, он имеет исключительно квантово-механическую природу. Это означает, что Черепаха может обогнать Ахиллеса (если они элементарные частицы), и Ахиллес черепахе, причём появившись впереди неё, даже не пробегая мимо. В принципе существует вероятность туннелирования и для макроскопических объектов (и реальная черепаха может, преодолев энергетический барьер, оказаться впереди Ахиллеса), но поскольку макрообъекты очень сложны (и декогерированы), ждать этого события придётся намного дольше, чем существует вселенная. Но важно, что это вероятно. Причём не имеет значения, непрерывно пространство или состоит из дискретных ячеек планковской длины, неделимых далее, ситуация одинаковая. О стреле из апории «Стрела» можно сказать, что она телепортируется из ячейки в ячейку (то же в случае «Стадиона»), но в таком случае само движение делимо. Можно ли назвать это движением в обычном смысле? Мы не можем дать ответ.

Но важно понимать, что детерминизм классической механики, который используется при обычном анализе апорий, не работает на микроуровне (а именно с этим уровнем мы имеем дело, бесконечно деля непрерывное и даже разделяя дискретное, выделяя в нем точки). Не работает, потому что частица, до тех пор, пока она не локализована в эксперименте, характеризуется волновой функцией, эволюцию во времени которой задает уравнение Шрёдингера. Это означает, что пока мы частицу не наблюдаем, она находится сразу везде, где только возможно (описывается суперпозицией всех вероятных положений). В примере с частицей-Ахиллесом и частицей-Черепашей мы не то чтобы не знаем, где они находятся друг относительно друга, наоборот мы точно знаем – они находятся друг относительно друга во всех возможных позициях (в копенгагенской интерпретации так происходит до акта измерения, в момент измерения происходит коллапс волновой функции и частица локализуется в одном из вероятных мест, чаще всего в самом вероятном; в многомировой интерпретации реализуются все исходы, но в параллельных мирах). Если нам удалось локализовать с большой точностью положение частицы-Ахиллеса и частицы-Черепашки, то мы в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга (см. об этом [Вилесов 2002]) ничего не знаем об их скорости (быстроте и направлении движения), и разговор о том, догонит кто-то кого-то или не догонит, теряет смысл.

## Время и движение

Рассматривать время как дискретное едва ли представляется возможным. Выделять неделимые атомы времени – означает обнаруживать между ними интервалы безвремени, и непонятно, как в таком случае может быть движение во времени. Связь движения и времени представляется вполне очевидной. В мысленном эксперименте, который предполагает полную остановку времени, становится ясным, что прекратится и всякое движение – так как если нечто продолжает двигаться, можно задать временные координаты движения тела, и, значит, оно происходит во времени. В этой трактовке время в принципе не может остановиться даже с приближением энтропии к максимуму, потому что квантовые флуктуации (которые можно рассматривать опять же как движение) происходят всегда. Таким образом, время тесно связано с движением и абсолютных остановок быть не может – состояния абсолютного покоя (неподвижности и безвремени).

Возвращаясь к дискретности – ее допущение как раз и предполагает такие абсолютные остановки времени. Следовательно время корректнее рассматривать как непрерывное (как оно и рассматривается в классической физике. Но здесь появляются те же сложности, что и с пространством – как возможно выделять точки, отрезки

в непрерывном? Ведь непрерывное не может иметь ни начала, ни конца, иначе в каком-то месте непрерывное становится прерывным. В произвольный фиксированный момент  $A$  движения нет, нет его и ни в какой другой момент, но движение все эти моменты проходит. В этом плане момент – это остановка и времени, и движения. Остаётся полагать эти точки и отрезки – условными, удобным математически приёмом, приближением. Вообще, это выглядит как уловка – говорить о непрерывном в терминах дискретности. Но делать это приходится потому что, существуя в непрерывном, мы мыслим дискретно.

### Вариант с ограничениями

Рассмотрим еще один вариант, где дискретность возникает в теории суперструн – попытке объединить общую теорию относительности и кантовую механику. Приставка «супер» означает требование симметрии, которая должна быть нарушена определённым образом, чтобы соответствовать наблюдаемым в нашем мире частицам и взаимодействиям (также требуются дополнительные пространственные измерения, чтобы теория давала адекватные предсказания). При доступных в экспериментах на сегодняшний день энергиях подтвердить или отринуть теорию струн не представляется возможным, тем не менее её математический аппарат оказался эффективным при решении ряда задач.

Ключевая идея теории заключается в том, что существуют мельчайшие частицы – струны, которые имеют фиксированный размер. Они не могут быть меньше планковской длины. Это, как уже отмечалось, позволяет избежать бесконечных энергий на микроскопических масштабах. Различные моды струн (типы колебаний) соответствуют различным типам частиц. Помимо струн есть также браны (многомерные объекты), которые могут быть как предельно малы, так и бесконечно велики. Идея состоит в том, что нет нужды говорить о бесконечно-малых масштабах, так как есть предел деления – планковская длина. Тем не менее, это не означает классической дискретности, вроде античного деления на атомы и пустоту – пустоты нет, самое пустое, что есть – вакуум – состояние с низкой энергией, а это означает, что в нём есть обычные частицы, виртуальные частицы, энергия и масса. Можно трактовать это в том смысле, что минимальное возможное расстояние между частицами имеет масштаб планковской длины, которое само не является пустым. В этом сценарии играет роль то, что есть минимальный размер, меньше которого нет смысла рассматривать. Такое положение можно понимать как дискретность. Как происходит движение частиц в этих условиях?

В теории суперструн есть два варианта. Струны бывают двух типов – замкнутые и открытые. Замкнутые струны прикреплены своими концами к поверхности бран, на которых они находятся (могут прикрепляться также и к другим бранам), и могут перемещаться только в пространстве этих бран, открытые же удерживаются бранами и способны перемещаться в многомерном пространстве (например, гравитон). На способ перемещения влияет размерность пространства, поскольку каждое новое измерение открывает новый возможный путь. В микромире теории суперструн открываются дополнительные измерения и частицы могут двигаться в этих измерениях. Иначе говоря, из точки  $A$  в точку  $B$  существует множество путей и не обязательно самый короткий – прямой отрезок между ними. Здесь возникает вопрос о том, что есть движение в дополнительных измерениях. С точки зрения классического подхода (онтологии макромира), проблема остаётся на месте, но в теории есть интересный математический приём, который позволяет взглянуть на проблему по-новому. Речь идёт о дуальности, используемой в математике струн. Она показывает, что теории с разным числом измерений пространства могут быть эквиваленты друг другу и иметь одно и то же описание (и одни и те же следствия).

Т-дуальность говорит о том, что одно большое измерение может быть заменено на другое малое (свёрнутое в окружность). Это означает, что две, на первый взгляд, разные теории (одна с большим измерением, другая с малым) описывают одну и ту же

физическую реальность. Но самое удивительное, что если большое измерение одной теории бесконечно велико, то малое измерение дуальной ей теории будет равно нулю. Таким образом, теории с разным количеством пространственных измерений могут описывать одну ту же вселенную. Принять это с классической точки зрения довольно сложно, и напрашиваются вопросы по поводу конкретизации понятий «измерение» и «пространство».

Другой интересный результат получил Х. Малдасена [Maldacena 1998] – самая цитируемая на сегодняшний день работа в физике высоких энергий. Он показал, что четырехмерная квантовая теория поля дуальна десятимерной теории гравитации (в которой пять из десяти измерений свернуты, а остальные пять образуют пространство анти-де Ситтера). Дуальность опять же здесь означает, что эти теории описывают одну и ту же реальность. Пример одинаковых следствий – объект, который движется в пятом измерении, в дуальной четырехмерной теории выглядит, как объект, который растёт или сжимается. Бегущие Ахиллес и Черепаха в пятом измерении, в четырехмерном будут увеличиваться в размерах (или наоборот). И то, и другое – формы движения.

Укажем на ещё одну интересную модель – так называемую матричную теорию. Теория изучает  $D0$ -браны (точечноподобные браны) в десятимерном пространстве. Теория не содержит гравитацию, но  $D0$ -браны ведут себя аналогично гравитонам, в результате получается теория, очень похожая на теорию супергравитации в одиннадцатимерном пространстве (видимо, она дуальна этой теории, которая, вероятно, является  $M$ -теорией). Самое интересное свойство теории заключается в том, что невозможно определить положение  $D0$ -бран, когда они находятся слишком близко друг к другу. С математической точки зрения это означает, что вопрос о положении  $D0$ -браны в пространстве не имеет смысла – его нельзя задать в конфигурационном пространстве. Иначе говоря, это означает, что пространственные измерения исчезают, когда браны оказываются слишком близко друг к другу. Это в свою очередь означает, что пространство не является фундаментальным, а скорее, абстракцией, возникающей при интерпретации наблюдаемого (что близко известной идее И. Канта о пространстве и времени, как априорных формах чувственности). Апории Зенона в этих условиях не могут иметь удовлетворительного решения (в своей традиционной формулировке), поскольку в них обсуждаются результаты наблюдения за поведением макрообъектов, не отражающие фундаментальную природу этого поведения и самих объектов – и проблема в них возникает именно потому, что, начиная осмысливать их в терминах дискретности и непрерывности, мы обращаемся как раз к тому фундаментальному, удовлетворительной теории чего у нас нет. Таким образом, сама постановка вопроса в апориях может оказаться неверной, как исходящая из некорректных представлений о реальности.

## Заключение

Независимо от того, какими мы полагаем пространство и время: непрерывными или дискретными, проблема сохраняется. Зенон совершенно прав – но прав он именно в том, что есть очевидное противоречие между наблюдаемым макроскопическим движением и интеллектуальной интуицией, которое возникает в тот момент, когда мы в рассуждении переходим к микроуровню – начинаем выделять точки в непрерывном. Если пытаться обойти эту проблему и рассматривать, например, Ахиллеса и Черепаху как элементарные частицы, то ситуация в целом не меняется, за исключением того, что включаются квантово-механические эффекты, которые выставляют апорию как лишённую смысла, поскольку микромир ведет себя в принципе иначе, чем макромир.

На микроуровне движение характеризуется соотношением неопределённостей – мы не знаем, где находятся частицы (Ахиллес и Черепаха), а если получается более или менее их локализовать, то не ясно, куда они движутся и с какими скоростями. Зная один параметр точно, мы не знаем о втором ничего (хотя совершенно точно нельзя

знать даже один параметр) и вынуждены (учитывая также эффект туннелирования) говорить, что он, конечно, ее обгонит при каких-то обстоятельствах, так как вероятность такого исхода не равна нулю. Но на всё это можно возразить, что Ахиллес и Черепаха не частицы, а декогерировавшие макрообъекты, для которых непосредственно не работают указанные принципы квантовой механики. Но Ахиллес и Черепаха, так же как Стрела и Стадион – всего лишь удобные конструкты (очевидно, Зенон и его первые интерпретаторы не могли знать, как поведение микромира отличается от поведения макромира), а подлинный центр проблемы – проблема движения. На сверхмалых масштабах классические понятия расстояния и движения перестают работать, и апории Зенона начинают спрашивать о том, чего там нет. Более того, апории описывают движение в трехмерном мире, но оно может оказаться частным случаем многомерной реальности, и значит они говорят не о движении вообще. Проблема остаётся в любом случае и, видимо, она заключается в том, что нет полной ясности относительно того, что такое движение, пространство и время.

Рассмотренные примеры с дуальностью в теории суперструн наводят на мысль о том, что пространство не фундаментально (то же самое может касаться времени и движения) и есть иная базовая физическая действительность, для которой эти категории являются приблизительными описаниями её свойств. Как справедливо заметил Койре: «Следует сказать, что все опровержения, относящиеся только к проблеме движения, в самой своей основе ошибочны» [Койре 1985, 27].

### ***Источники и переводы – Primary Sources and Translations***

Аристотель 1976 – *Аристотель*. Физика // Сочинения в четырёх томах. Т. 3. М.: Мысль, 1976 (Aristotle, *Physics*, Russian Translation).

Гилберт, Бернайс 1979 – *Гильберт Д., Бернайс П.* Основания математики. Логические исчисления и формализация арифметики. М.: Наука, 1979 (Gilbert, David, Bernays, Paul, *Foundations of mathematics*. *Logical calculus and formalization of arithmetic*, Russian Translation).

Койре 1985 – *Койре А.* Заметки о парадоксах Зенона // Очерки истории философской мысли. О влиянии философских концепций на развитие научных теорий. М.: Прогресс, 1985. С. 25-70 (Koyre, Alexandre, *Notes on Zeno's Paradoxes*, Russian Translation).

### ***Ссылки – References in Russian***

Анисов 2000 – *Анисов А.М.* Апории Зенона и проблема движения // Труды научно-исследовательского семинара Логического центра ИФ РАН. Вып. XIV. М.: ИФ РАН, 2000. С. 139-155.

Вилесов 2002 – *Вилесов Ю.В.* Апории Зенона и соотношение неопределенностей Гейзенберга // Вестник МГУ, серия 7 (философия). 2002. № 6. С. 20-28.

Комарова 1988 – *Комарова В.Я.* Учение Зенона Элейского: попытка реконструкции системы аргументов. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988.

### ***References***

Angel, Leonard (2002) “Zeno's Arrow, Newton's Mechanics, and Bell's Inequalities”, *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 53, No. 2, pp. 161-182.

Anisov, Alexander M. (2000) “Zeno's Aporias and the problem of motion”, *Proceedings of the scientific research seminar of the Logic Center of the IF RAS*, Iss. XIV, IF RAS, Moscow, pp. 139-155 (in Russian).

Banks, Thomas, Fischler, Willy, Shenker, Stephen, Susskind, Leonard (1997) “M-theory as a matrix model: a conjecture”, *Physical Review D*, Vol. 55, pp. 5112-5128.

Bathfield, Maël (2018) “Why Zeno's Paradoxes of Motion Are Actually About Immobility”, *Foundations of Science*, Vol. 23, No. 4, pp. 649-679.

Calenda, Guido (2013) “Are Zeno's Arguments Unsound Paradoxes?”, *Peitho*, Vol. 4, No 1, pp. 125-140.

Davey, Kevin (2007) “Aristotle, Zeno, and the Stadium Paradox”, *History of Philosophy Quarterly*, Vol. 24, No. 2, pp. 127 - 146.

Gomes, Henrique, Koslowski, Tim (2012). “Frequently asked questions about Shape Dynamics”, *Foundations of Physics*, Vol. 43, No. 12, pp. 1428-1458.

Karpenko, Ivan. (2016) "What is Time in Modern Physics?", *Epistemology and Philosophy of Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 105–123.

Komarova, Vera Ya. (1988) *The Teachings of Zenon Eleisky: an attempt to reconstruct the system of arguments*, Leningrad University Press, Leningrad (in Russian).

Maldacena, Juan (1998) "The Large N limit of superconformal field theories and supergravity", *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, Vol. 2, pp. 231–252.

Razavy, Mohsen (2003) *Quantum theory of tunneling*, River Edge; World Scientific, Singapore.

Reeder, Patrick (2015) "Zeno's Arrow and the Infinitesimal Calculus", *Synthese*, Vol. 192, No. 5, pp. 1315–1335.

Sathiapalan, Bala (1987) "Duality in Statistical Mechanics and String Theory", *Physical Review Letters*, Vol. 58, No. 16, pp. 1597–1599.

Sattler, Barbara (2015) "Time is Double the Trouble: Zeno's Moving Rows", *Ancient Philosophy*, Vol. 35, No. 1, pp. 1–22.

Vilesov, Yuri F. (2002) "Zeno's Aporias and the Heisenberg uncertainty relation", *Bulletin of Moscow State University, series 7 (Philosophy)*, Vol. 6, pp. 20–28 (in Russian).

Witten, Edward (1998) "Anti-de Sitter space and holography", *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, Vol. 2, No. 2, pp. 253–291.

### **Сведения об авторе**

**КАРПЕНКО Иван Александрович** –  
кандидат философских наук, доцент школы  
философии и культурологии НИУ ВШЭ.

### **Author's Information**

**KARPENKO Ivan A.** –  
CSc in Philosophy, associated professor,  
HSE University.