

# ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ И ГЕОМЕТРИЯ

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-1-59-65

## К 100-ЛЕТИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КОСМОЛОГИИ

С. Котсакис, А.П. Ефремов

*Институт гравитации и космологии  
Российского университета дружбы народов  
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3*

**Аннотация.** Математическая космология – область теоретической физики, содержащая серию сложных и нерешенных проблем. В этой статье мы излагаем свое видение места и значения этой области в общем здании теоретической физики и предлагаем историческую периодизацию развития этой области, начиная со статической вселенной Эйнштейна и до настоящего времени. Мы также перечисляем основные достижения, методы и направления, характеризующие каждый из периодов развития, а также отмечаем проблему сложности изучения разрозненных сведений о результатах этих исследований. В качестве системного решения этой проблемы мы анонсируем издание специального выпуска «Будущее математической космологии» старейшего в мире научного журнала *Philosophical Transactions of the Royal Society (A)*, для составления и редактирования которого были приглашены авторы данной статьи.

**Ключевые слова:** релятивистская теория гравитация, математическая космология, модели Вселенной

В поиске физических закономерностей природы кажется естественным выделить три основных пространственных масштаба. С одной стороны, эти области в некотором смысле соответствуют дальности действия превалирующих на этом масштабе фундаментальных сил и, следовательно, «содержат и представляют» разную физику. Это микромасштаб (сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия), макромасштаб (электромагнитные и гравитационные взаимодействия) и мегамасштаб (гравитационные силы). С другой стороны, наличие такой примерной классификации областей пространства является отражением фактической истории изучения физики, но, конечно, с иной логикой последовательности перечисления. Здесь на первом месте, безусловно, макромасштаб, характерный размер которого должен был быть (и, конечно, стал) сопоставимым с размерами человека. На этом масштабе в

XVII–XIX вв. сформировалась так называемая классическая физика – механика, электродинамика, термодинамика и статистическая физика. Эта важнейшая для развития цивилизации часть знаний человечества была получена главным образом благородным эмпирическим путем: сначала сотни опытов, на основе их результатов составление таблиц и построение графиков, затем подбор соответствующих математических формул. И эта методика прекрасно сработала. К началу XX в. на базе классической физики построены тепловые и электрические машины, разработаны простейшие транспортные системы и системы дальней коммуникации. Все это послужило отнюдь не благородному делу создания гигантских арсеналов оружия с последующим его безжалостным применением в новом веке. К этому новому времени физических проблем на макромасштабе практически не осталось. Это, собственно, и имел в виду Филипп Жюли, отговаривая Макса Планка от занятий теоретической физикой.

Помимо технической революции классическая физика – пожалуй именно она – произвела на свет научную периодику. В середине XVI в. в Париже и Лондоне почти одновременно начали издаваться научные журналы: *Le Journal des Sçavans* (Париж) и *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Лондон). И если первый затем был переименован и неоднократно закрывался, то *Phil-Transa* Британской академии наук без перерывов выходит в течение уже 357 лет. В его первых номерах публикации Ньютона, Бойля, Гюйгенса, Лейбница. И до сих пор это один из самых уважаемых в научном мире журналов, автором публикации в котором можно стать только по приглашению Британской академии.

А в целом сегодня в мире ежегодно публикуются тысячи статей по физике в сотнях научных (и квазинаучных коммерческих) журналах. Конечно, теперь мы не ожидаем серьезных новых результатов наблюдений (и размышлений), касающихся объектов и явлений на масштабе, сопоставимом с размерами собственно человека. Единственной настоящей загадкой такого «классического» масштаба остался, пожалуй, только сам человек.

Нулевой год XX в. стал началом сдвига внимания физиков в область микромасштабов, в первую очередь благодаря гипотезе Планка о квантовании действия. За ней последовали опыты Резерфорда, подтверждающая планетарную структуру атома модель Бора, а затем – целая серия экспериментов и эвристических теорий: волновая гипотеза Де Бройля, уравнения Шредингера и Гейзенберга, спиновая добавка Паули, и, наконец, релятивистская версия Дирака. В целом развитие знаний о физике на этом масштабе пошло по классической схеме: экспериментальное открытие частиц в ускорителях с последующим подбором вариантов описания с механистическими представлениями о взаимодействиях. Здесь яркие достижения – квантование полей в теории Фейнмана–Бете, теория электрослабого взаимодействия Вайнберга–Салама–Глэшоу и предсказание структуры «элементарных» частиц в теории Гелл-Манна–Цвейга. Можно сказать, что эта процедура исследований действует и сегодня, но с новым коллаيدرмом, а также с «готовой» схемой стандартной модели и бозона Хиггса. Но кажется, что эти исследования идут

как-то с «меньшим драйвом» и меньшими возможностями для широкого круга научных работников. И причины этого в том, что доступ к сверхдорогим экспериментальным установкам (суть работы которых – бомбардировки частиц все с большими энергиями), конечно, строго ограничен, но также и потому, что есть трудности с новыми вариантами теоретического объяснения явлений микромира.

Наблюдение природы в ее мегамасштабах, конечно, началось с того момента, как человек обратил свой взор к небу. Однако научные исследования космоса начались, пожалуй, с законов Кеплера и изобретения телескопов в том же XVII в. В последующие двести лет состоялось множество замечательных открытий – и в околосолнечном пространстве (почти на макромасштабе), и в Галактике. Но ньютоновская вселенная оставалась вечной и бесконечной. Гений Эйнштейна, талант и настойчивость Фридмана и Хаббла в начале XX в. впервые – сначала теоретически, а затем и экспериментально – убедительно продемонстрировали, что наша огромная Вселенная расширяется. Действительно, общая теория относительности предоставила человечеству, пожалуй, первый в истории физики пример, когда не формула подгонялась под экспериментальные данные, а, наоборот, – результат наблюдений подтвердил предсказание теории. В цепочке теоретических открытий – уравнения электродинамики, теория относительности, релятивистская теория гравитации – по сути, родилась теоретическая физика, а с ней – математическая космология, изучающая законы физики на сверхгигантских пространственных масштабах.

Сегодня изучение Вселенной – одно из самых востребованных и приоритетных направлений науки, привлекающее тысячи высококвалифицированных исследователей. В известном смысле ситуация здесь почти вернулась к классической: мощные наблюдательные инструменты дают большой объем новой информации о структуре галактик, скорости их разбега, и это требует существенной теоретической корректировки ранее предложенных космологических моделей. Но у этих исследований есть еще один неординарный аспект, это анализ поведения Вселенной в период времени, близкий к начальному моменту ее возникновения, а в ряде случаев – попытки гипотетических построений и до этого момента. Число таких исследований и публикаций по этим темам с каждым годом неуклонно множится, при этом в них используются практически все методы и приемы современной теоретической физики.

Представляется, что эта ситуация заслуживает некоторой – пусть промежуточной – систематизации. Инициаторами этой идеи выступили сотрудники Института гравитации и космологии РУДН, и она была поддержана британскими учеными. Идея реализуется в специальном выпуске (март 2022 г.) того самого старшего в мире научного журнала *Philosophical Transactions of Royal Society (A)*, о котором сказано выше. Выпуск носит название «Будущее математической космологии», в нем публикуются статьи ведущих специалистов всех основных направлений математической космологии.

Ниже представим тезисы большой вступительной статьи к этому выпуску, подготовленной авторами и настоящей публикации “100 years of mathematical cosmology: Models, theories, and problems”.

В этой статье мы вводим и очерчиваем в общих чертах область «математической» космологии, или «теоретической космологии» [1]. Мы полагаем, что практически все разделы этой темы могут быть полностью изложены без детального описания имеющихся результатов наблюдений или слишком сложных математических выкладок. Такого рода определения космологии, как представляется, имеют оттенки субъективности, но, безусловно, могут (и должны) быть дополнены теми результатами исследований, которые в настоящее время ассоциируются с понятием «физической космологии» – отдельной областью знаний, основанной на эмпирических данных.

«Жизненный цикл» математической космологии фактически стартовал в 1917 г., когда Эйнштейн предложил первую модель описания «всей Вселенной в целом»; при этом пришлось заметно «подправить» уже существующую общую теорию относительности, которая в отличие от теории гравитации Ньютона позволяла строить глобальные структуры такого рода [2]. Эта «статическая вселенная» явилась отправной точкой для будущих разработок, и введенное здесь понятие «космологическая модель» стало одной из центральных идей в математической космологии. В данном выпуске мы посчитали необходимым представить элементарный обзор математической космологии, начиная с упомянутой фундаментальной статьи Эйнштейна и до настоящего времени.

Весь этот период развития только сейчас начал раскрывать огромную важность многолетних усилий разрозненных исследовательских групп по формулировке и предложенным решениям различных космологических проблем и анализу многочисленных и сложных особенностей этой системы знаний как области теоретической физики. И как это обычно бывает и в других разделах физики, в математической космологии постановка проблемы открывает новый аспект исследования.

Развитие системы знаний о возможных космологических моделях может быть удобно представлено в виде ряда временных интервалов, содержащих ключевые достижения и четко сформулированные проблемы, которые продолжают формировать эту область до сегодняшнего дня. Для получения общей (но достаточной) информации, содержащей описание всех периодов развития мы предлагаем ознакомиться с [9], нашим основным справочником. Для более детального, современного, высокоуровневого изложения теоретической космологии с различных точек зрения мы предлагаем ознакомиться с публикациями [3–6]; другие полезные сведения (вводные обзоры) содержатся в книгах [7; 8]. Итак, предлагается следующая периодизация развития математической космологии.

*Первый период (1917–1960 гг.).* Этот интервал времени может быть дополнительно разделен на два подынтервала примерно равной продолжительности в 20 лет. Первый имеет дело в основном с однородными моделями, в то время как второй (1940–1960 гг.) – имеет дело в основном с неоднородными космологиями. Фундаментальные космологические концепции, впервые появившиеся в этот период, по-прежнему актуальны. Это: модели Вселенной как решения уравнений поля; космологическая постоянная и энергия

вакуума; однородность вселенной; неоднородные и анизотропные модели; расширение и сжатие вселенных; эволюция модели в сравнении со статическим состоянием; большой взрыв и модели с отскоком; гравитационная устойчивость и возмущения; учет прошлых состояний; причинно-следственные связи и путешествие во времени; локальная и глобальная структура. К наиболее интересным моделям этого периода относятся статическая вселенная Эйнштейна, пространство де Ситтера, решение Фридмана, вселенная Леметра, вселенная Эйнштейна – де Ситтера, модель с отскоком Толмана, вселенная Леметра–Толмана, вселенные Лифшица, модели стационарного состояния и Геделя, горячий большой взрыв и классификация космологических моделей в различных группах в соответствии с их симметрией и другими критериями.

*Второй период (1960–1980 гг.).* Здесь возникают новые идеи, значительно расширившие первоначальные рамки: геометрические расширения общей теории относительности; теоремы о сингулярности, глобальные методы анализа; гипотеза ВКЛ (Белинского – Халатникова – Лившица); Вселенная Миксмастера и космологические горизонты; физика элементарных частиц и классические особенности. Этот период характеризуется более широким взглядом на основные аспекты этой области. Здесь отмечается появление релятивистских альтернатив общей теории относительности (включая первые признаки идей квантовой теории или теории частиц в космологии), внедрение глобальных аналитических методов изучения структуры пространства-времени и природы особенностей в сильных гравитационных полях.

*Третий период (1980–2000 гг.).* Этот период характеризуется формированием более правдоподобной картины строения ранней Вселенной. Наиболее заметные особенности – внедрение в космологию идей и методов из физики элементарных частиц, квантовой теории поля и теории струн: инфляционная космология; мультивселенная; волновая функция вселенной; проблема космологической меры; «детские» вселенные и кротовые норы; вселенные Калуцы–Клейна; космология струн; серия  $f(R)$ -версий гравитации и космологии; проблема космологической стабильности. Данные новые направления внесли большой вклад в то, чтобы сделать всю область более привлекательной. Еще более важно, что математической космологией заинтересовалась большая группа, подняв ее популярность в теоретической физике.

*Четвертый период (2000 г. – по настоящее время).* За последние двадцать лет вся область математической космологии «повзрослела» до неузнаваемости – если сравнивать с началом ее развития. К показателям ее текущей эволюции можно отнести следующие разделы: М-теория и космология; миры на Бране; космологический ландшафт; топологические проблемы и динамическая эволюция; вопросы универсальности в космологии; модели темной энергии. Для получения более подробной информации об этом продвинутом наборе тем мы предлагается ознакомиться с работой [9].

**Перспективы.** Предложенное обсуждение призвано подчеркнуть огромный интерес к математической космологии, разделяемый научным сообществом в третьем десятилетии XXI века.

Этот интерес дополнительно задокументирован и развит рядом материалов, которые включены в тематический выпуск «Будущее математической космологии», отредактированный авторами и данных заметок и представленный к публикации в двух отдельных томах в журнале *Философские труды Королевского общества (А)* [10].

Исследования в области математической космологии в настоящее время чрезвычайно активны во всех областях, указанных выше. Отличительной чертой этих исследований сегодня является то, что они разбросаны в различных публикациях и различных областях физики, зачастую вместе с другими, очень разнонаправленными исследованиями. В этом смешении жанров легко потеряться ориентиры и «сигнальные огни» уникального слияния физических идей и математических методов одного из наиболее рациональных подходов к получению фундаментальных знаний о мире, который представляет собой математическая космология. Поэтому, включив большое число важнейших результатов исследований широкого круга авторитетных экспертов в специальный выпуск журнала *Королевского общества*, мы рассчитываем представить репрезентативный временной срез всей области математической космологии. Мы надеемся дать заинтересованному читателю представление о направлениях развития исследований в области космологии сегодня и в ближайшие годы, а также показать, почему исследования в этой области будут важны для развития теоретической физики будущего.

*Мы благодарны профессору Юрию Сергеевичу Владимирову за комментарии по содержанию этой статьи и за проявленный интерес к данной работе.*

### Литература

1. *Landau L.D., Lifshitz E.M.* Quantum Mechanics, 3rd. ed. Pergamon Press, 1977.
2. *Einstein A., Preuss S.B.* Akad. Weiss. 1917. 142. English translation in *The Principle of Relativity* / Eds. H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski and H. Wey. Dover, 1923. P. 173.
3. *Ellis G.F.R., Maartens R., MacCallum M.A.H.* Relativistic cosmology. CUP, 2012.
4. *Peter P., Uzan J-P.* Primordial Cosmology. OUP, 2009.
5. *Weinberg S.W.* Cosmology. OUP, 2007.
6. *Gasperini M.* Elements of String Cosmology. CUP, 2007.
7. *Harrison E.* Cosmology: The science of the universe. 2nd ed. CUP, 2000.
8. *Barrow J.D.,* The book of universes. Bodley Head, 2011.
9. *Cotsakis S., Yefremov A.P.* 100 years of mathematical cosmology: Models, theories and problems, to appear in the *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2022. Vol. 1.
10. *Cotsakis S., Yefremov A.P.* (eds). *The Future of Mathematical Cosmology* // *Phil. Trans. Roy. Soc. A: In two Volumes.* 2022.

## **ON THE 100TH ANNIVERSARY OF MATHEMATICAL COSMOLOGY**

**Spiros Cotsakis, Alexander P. Yefremov**

*Institute of Gravitation and Cosmology,  
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation*

**Abstract.** Mathematical cosmology is that branch of theoretical physics where some of the most intricate, complex, and deeply unresolved issues lie. Beginning with the Einstein static universe in 1917, in this brief paper we freely float above all major developments that shaped the field until today. We discuss highlights that are further documented in the authors' recent survey '100 years of mathematical cosmology' scheduled to appear in the Theme Issue 'The Future of Mathematical Cosmology'. This Theme Issue is to be published in two parts by the Philosophical Transactions of the Royal Society A, and contain a number of important contributions by key researchers in the field.

**Keywords:** General relativity, mathematical cosmology, models of the Universe