

КАК ФРИДМАН ЭЙНШТЕЙНА ПОДКОВАЛ

HOW FRIEDMANN HAD SHOD EINSTEIN

В. О. Соловьёв,

доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник отдела теоретической физики ФГБУ ГИЦ «Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт»

Публикация подготовлена на основе доклада, представленного автором на семинаре, посвященном памяти академика А. А. Логунова и 100-летию общей теории относительности (ОТО). Рассказывается о событиях, относящихся к рождению современной космологии, и о степени участия в этих событиях российских ученых, об их последующих работах (от Фридмана до Логунова) и о роли ОТО в современной физической науке.

Ключевые слова: открытие, общая теория относительности, специальная теория относительности, фундаментальная наука, физика, математика, вселенная, космология, теория гравитации

V. O. Soloviev,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Associate, Theoretical Physics Department, Institute for High Energy Physics (IHEP) – National Research Centre “Kurchatov Institute”

This article is based on a talk given by the author at the Seminar devoted to the memory of academician A. A. Logunov and to 100 Years of General Relativity. We display events related to the birth of the modern cosmology and to the role played by Russian scientists. We also mention their following work (from Friedmann to Logunov) and the place of General Relativity in the modern physical science.

Keywords: discovery, General Relativity, Special Relativity, fundamental science, physics, mathematics, universe, cosmology, gravitation theory

Немного от себя

Окончив физфак МГУ, мы, однокурсники, договорились встречаться каждые 5 лет в последнюю субботу мая на ступенях факультета. И встречаемся. Кто-то берет на себя подготовку – у каждой встречи есть программа, включающая речи в Центральной физической аудитории. В последний раз там выступал и Юрий Григорьевич Павленко, во время оно куратор нашего курса и преподаватель теоретической механики. И вот он сказал, что, увы, никто из физиков нашей страны не сделал по-настоящему великих открытий. И возражений мы не услышали. Все вспомнили Л. Д. Ландау, П. Л. Капицу, Н. Г. Басова, А. М. Прохорова, других наших нобелевских лауреатов и подумали, что, да, их достижения как-никак, а уступают открытиям А. Эйнштейна, В. Гейзенберга, В. Паули, П. Дирака, Э. Шредингера... Но позже, сначала готовясь к лекциям по теории гравитации для аспирантов ИФВЭ, потом к докладам на конференциях, я прочитал внимательно работы Александра Фридмана, написанные в 1922–23 гг., и стало понятно, что куратор ошибался.

Природа с красоты своей
Покрова снять не позволяет,
И ты машинами не вынудишь у ней
Чего твой дух не угадает.

*(из «Фауста» В. Гёте,
перевод В. С. Соловьёва (1853–1900))*

Эти стихи льют бальзам на душу теоретика, надеющегося открыть тайны мироздания с помощью своих серых клеточек. Как же случаются открытия в физике? Приведу несколько примеров.

Пример первый

Джеймс Клерк Максвелл не только объединил в 1864 г. в систему уравнений все известные до него законы электромагнетизма, но и открыл новый закон, введя «ток смещения». Догадка, возможно, родилась из предположения о математической красоте и симметрии, которой должны обладать уравнения новой физической теории. Ещё в 1832 г. Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции и закон, преподаваемый сейчас всем школьникам: переменное магнитное поле создает

вихревое электрическое поле. А Максвелл предсказал новый закон, симметричный фарадеевскому: переменное электрическое поле также создает вихревое магнитное. Это был по тем временам слишком слабый, ненаблюдаемый эффект, открытый Генрихом Герцем лишь в опытах 1887–88 гг.

Догадка Максвелла породила сразу несколько великих открытий: предсказание электромагнитных волн (будущего радио, телевидения, мобильной связи и прочего), объяснение природы света – он тоже оказался электромагнитной волной, наконец, третьим, скрытым, была будущая теория относительности (точнее, та ее часть, которая игнорирует гравитацию – специальная теория относительности, сокращенно СТО). Ей предстояло появиться только в 1905 г., и она стала красивой комбинацией принципа относительности Галилея и уравнений Максвелла.

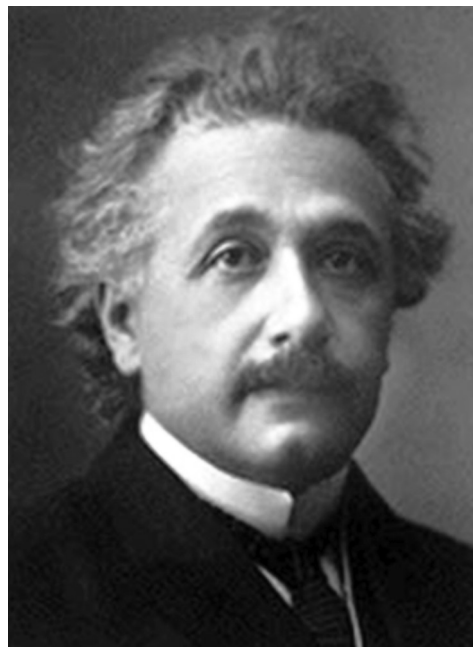
Второй пример

Поль Андре Мари Дирак в свои 26 лет открыл новое необычное уравнение для электрона. Оно объединило только что найденные законы квантовой механики и СТО. Но это уравнение имело больше решений, чем хотелось Дираку. Обнаружились решения с отрицательной энергией – нечто до сих пор небывалое. Что придумал Дирак для их объяснения? «Море Дирака» – бесконечное число уровней энергии с отрицательной энергией, где все места, однако, заняты! Почему электроны могут занять все места, как люди в театре? Это объясняется знаменитым принципом Вольфганга Паули – каждое «место» может быть занято только одним электроном, никак не двумя. Этим принципом объясняется периодический закон таблицы Менделеева, существование твердых тел и многое другое в устройстве нашего мира. Но раз мы живём в квантовом мире, где возможны внезапные скачки, то электроны из «моря Дирака» иногда могут выскакивать на сушу, в самом «море» при этом должны появляться «дырки», чего никто до тех пор не видел! Это мучило Дирака, к счастью для него, недолго – в 1932 г. был открыт позитрон, а затем постепенно и целый мир античастиц, например, на протвинском ускорителе были открыты ядра антигелия-3.

Третий пример

В этом году физики отмечают 100-летие рождения ОТО (общей теории относительности), которая является теорией гравитации, обобщающей СТО. Таким образом, ОТО – это синтез идей Галилея (принцип относительности), Ньютона (закон всемирного тяготения) и Максвелла (электромагнитные волны). Разумеется, как и в случае СТО, задача объединения была настоящим вызовом для теоретика. Этот вызов

принял и внес наибольший вклад в решение задачи Альберт Эйнштейн – такой же революционер XX в. для физики, каким был его ровесник Лев Бронштейн для жизни общества.



Альберт Эйнштейн (1879–1955)

Как и в двух предыдущих примерах, новая теория родилась сразу в новом математическом обличье. Это значит, что основной массе физиков пришлось учить новый для себя математический аппарат: в случае Максвелла – векторный анализ, в случае Дирака – исчисление 4-спиноров и гамма-матриц, в случае Эйнштейна – тензорный анализ и риманову геометрию. Надо отметить существенный и прямой вклад в создание ОТО математиков (Марсель Гроссман, Давид Гильберт), которых Эйнштейн привлекал к обсуждениям и совместной работе. Окончательные уравнения теории были получены Гильбертом и Эйнштейном практически одновременно, причём между учёными поддерживалась интенсивная переписка.

Итак, в конце 1915 г., во время кровопролитнейшей Первой мировой войны, в Германии, с которой Россия воевала, рождается новая физическая теория. Какова была реакция российских учёных? Они просто ничего об этом не знали. Почтового обмена не было, науч-



Давид Гильберт (1862–1943)

ные журналы из Германии не присылались в российские библиотеки до 1921 г. Чем занят наш будущий герой? Он на фронте, организует воздушную разведку и прицельную бомбежку немецких и австрийских позиций. Проявляет себя отличным организатором, не первый и не последний раз рискует жизнью. В это же время другой учёный из России, барон Всеволод Константинович Фредерикс, оказался в Геттингене, в Германии и должен был быть интернирован. Но Давид Гильберт, крупнейший математик XX в., берёт Фредерикса под свою защиту и оформляет своим «частным ассистентом», оплачивая его труд из собственных средств. Именно Гильберт был одним из создателей ОТО, и именно Геттинген был тем местом, где следовало изучать новую теорию, чем Фредерикс и занялся.



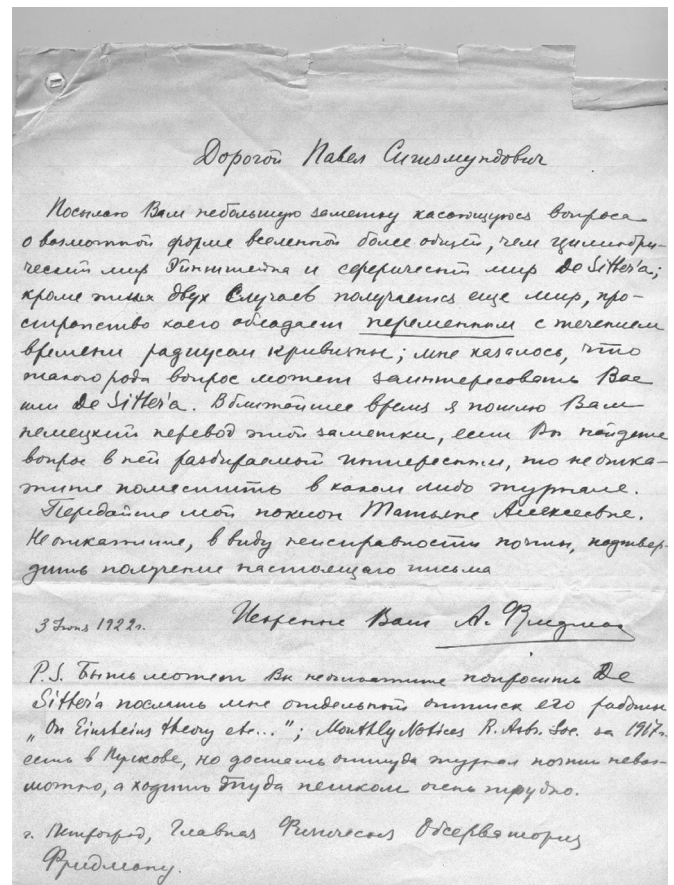
Всеволод Константинович Фредерикс (1885–1943)

После всех мировых потрясений в 1920 г. в Петербурге встретились Фредерикс, вернувшийся из Германии, и Фридман, вернувшийся из Перми (где власть переходила от красных к Колчаку и от Колчака к красным). Тогда они решили совместно заняться большим принципом относительности, так в России тогда называли ОТО, и написать солидный учебник. Написать успели только первую часть из запланированных пяти – «Начала тензориального исчисления». Организовали регулярный семинар для всех интересующихся. В числе участников был будущий академик Владимир Фок. Вокруг говорили: «Скоро мы разберемся в этих вопросах – Фридман принялся за изучение теории относительности!». Одновременно Фридман организовывал работу по метеорологии в Главной геофизической обсерватории, руководил большой группой, работал в Политехническом институте. Он пишет фундаментальный труд «Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости». Фридман говорил друзьям: «Нет, я невежда, я ничего не знаю, надо ещё меньше спать, ничем посторонним не заниматься, так как вся эта так называемая «жизнь» – сплошная потеря времени».

Через 100 лет после рождения ОТО мы можем спросить: что же стало её самым неожиданным и удивительным предсказанием? Двух мнений здесь быть не может. Открытие это за 100 лет много раз подтвердилось, мы уже привыкли к нему почти так же, как к тому, что Земля вращается вокруг Солнца. Из уравнений ОТО через 6 лет после их появления

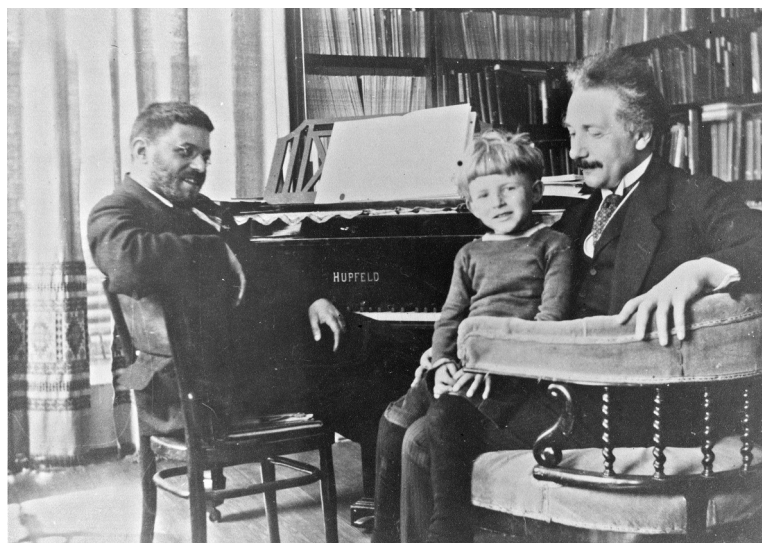
на свет было получено решение, открывшее для нас, что вся огромная наблюдаемая Вселенная, как и мы, ничтожно малые для её масштабов организмы, была рождена, пережила свое детство, юность, сейчас находится в самом расцвете сил, а когда-нибудь её, по всей видимости, ожидает старость и смерть. Причем возраст Вселенной, как и её прошлое, нам теперь известны достаточно точно, исключая подробности рождения и самых-самых первых долей секунды.

Именно это решение и было найдено Александром Александровичем Фридманом, о чём он сообщал в своем письме от 3 июня 1922 г. выдающемуся физику-теоретику Паулю Эренфесту, приложив рукопись бессмертной работы.



Письмо А.А. Фридмана П. Эренфесту с сообщением об открытии

В доме Эренфеста, приезжая в Лейденский университет, всегда останавливался Эйнштейн. Эренфест переписывался практически со всеми крупнейшими физиками своего времени. Его архив сохранился и сейчас доступен любому пользователю Интернета. Письмо и рукопись Фридмана написаны по-русски – хотя родиной Эренфеста была Австро-Венгрия, начало жизни он провёл в Вене, но Павел Сигизмундович, как его называли русские друзья, женился на Татьяне Алексеевне Афанасьевой, выпускнице Высших бестужевских курсов по



В доме Павла Сигизмундовича Эренфеста (за роялем).
На коленях у Эйнштейна Павлик Эренфест

физико-математическому отделению и стажёрке Геттингенского университета. Пять лет молодые супруги прожили в Санкт-Петербурге, где Эренфест весьма оживил общество физиков и математиков, организовав в своей квартире семинар, который посещал и Фридман. «...несомненно, что Россия могла бы стать моей родиной в самом глубоком значении этого слова, если бы я получил здесь постоянную преподавательскую работу где бы то ни было. Несмотря на моё недостаточное владение языком, я не ощущаю себя чужим в кругу здешних людей (исключая политических чиновников)», – писал Эренфест Хендрику Лоренцу в Лейден. Однако постоянную работу в России Эренфест так и не получил, и стареющий Лоренц предложил Эренфесту занять своё место профессора.

Почему «дифференциальное уравнение Бога» открыл не создатель ОТО физик Эйнштейн, обратившийся к проблеме космологии на 5 лет раньше, а математик из поколения «детей страшных лет России», ровесник доктора Живаго, Александр Фридман?

Ошибка Эйнштейна стало то, что он слишком доверился своей физической интуиции. Даже гении имеют предрассудки, причём не только боязнь чёрных кошек или перебегающих дорогу зайцев, но и научные. Во времена Коперника верили во вращение небесных сфер вокруг Земли, во времена Фридмана – в вечную и бесконечную Вселенную. Эйнштейн придумал, каким должно быть решение для Вселенной, подставил его в уравнения ОТО для проверки, а оно не подошло! Тогда Эйнштейн изменил уравнения теории, не радикально, а чуть-чуть – он ввел космологическую постоянную, что означало ослабевание силы всемирного тяготения на сверхбольших расстояниях, иными словами, он ввел для Вселенной силу всемирного отталкивания. Вывод Эйнштейна был

радикальным, он утверждал, что пространство Вселенной замкнуто и конечно (вскоре выяснилось, что это совсем не необходимо), но он оказался недостаточно радикальным — мир Эйнштейна не менялся во времени.

Примерно 30 лет спустя Георгий Гамов, который успел в 28 лет стать членом-корреспондентом АН СССР, но затем уехал в США, предсказавший в конце 1940-х гг. вместе со своими учениками реликтовое излучение и его температуру, так прокомментировал это в своей книге «Рождение Вселенной» (1952 г.): «Русский математик Фридман показал, что статическая природа Вселенной Эйнштейна была следствием алгебраической ошибки (а именно, деления на ноль), сделанной в ходе вычислений».



Георгий Антонович Гамов (1904–1968)

Фридман верил в математику! Он не угадывал решений, а просто решал уравнения. Сохранив основное предположение Эйнштейна о том, что вещество во Вселенной на сверхбольших расстояниях распределено равномерно и скорости его относительного движения невелики по сравнению со скоростью света, Фридман заметил, что уравнения ОТО вовсе не требуют постоянства «радиуса мира». Напротив, он получил дифференциальное уравнение, связывающее скорость изменения радиуса мира со средней плотностью вещества во Вселенной, которая, в свою очередь, зависит от радиуса мира. В простейшем случае, когда вещество ведет себя подобно неподвижно висящей в пространстве пыли, оно не

создает давления, и плотность материи оказывается обратно пропорциональной кубу мирового радиуса. Итак, единственной динамической переменной уравнения Фридмана оказался радиус мира, а найти требовалось его зависимость от времени. Но тогда решение проблем космологии доступно любому студенту, имеющему оценку «отлично» по математическому анализу? В математике одинаковые уравнения имеют одинаковые решения, вне зависимости от того, из какой реальной (физической, экономической или биологической) задачи эти уравнения получены. И уравнение Фридмана, описывающее жизнь Вселенной в целом, оказалось таким же, как уравнение, связывающее кинетическую и потенциальную энергию материальной точки в механике Ньютона. Полная энергия и масса этой точки известны. Потенциальная энергия тоже известна, она состоит из двух слагаемых: одно из них – ньютоновская гравитационная энергия притяжения к неподвижной точечной массе, другое – энергия пружины (закон Гука), но (!) – со знаком минус.

Конечно, не следует думать, что решение Эйнштейна не удовлетворяет уравнениям ОТО! Просто оно – лишь одно из множества решений, найденных Фридманом, и притом неустойчивое, а значит, нереализуемое в природе.

Фридман любил повторять слова из «Божественной комедии»: «Воды, в которые я вступаю, не пересекал ещё никто». В оригинале текст выглядит так:

L'acqua ch'io prendo già mai non si corse;
Minerva spira, e conducemi Appollo,
e nove Muse mi dimostran l'Orse¹.

И в самом известном переводе М. Л. Лозинского:

Здесь не бывал никто по эту пору;
Минерва веет, правит Аполлон,
Медведиц – Музы указуют взору.

Разбирая возможные случаи эволюции Вселенной, Фридман классифицирует их как 1) монотонный мир первого рода (эволюция начинается с нулевого радиуса мира и продолжается вечно, радиус всё время возрастает); 2) монотонный мир второго рода (эволюция начинается с конечного радиуса, и затем радиус также бесконечно растёт за бесконечное время) и 3) периодический мир, где радиус возрастает от нуля до конечного значения, а потом снова убывает до нуля.

¹ LA DIVINA COMMEDIA di Dante Alighieri, Paradiso, Canto II, 7/ Данте (Рай, песнь II).



Александр Александрович Фридман (1888–1925)

Кроме решения Эйнштейна Фридман обсуждает также решение Виллема де Ситтера (1917 г.), которое, к сожалению, не допускает наличия во Вселенной вещества. Сейчас считается, что решение де Ситтера описывает очень раннюю Вселенную в эпоху так называемой инфляции.

«Время, прошедшее от сотворения мира, характеризует время, прошедшее от момента, когда пространство было точкой, до нынешнего его состояния...»

А. Фридман

Вторую ошибку Эйнштейн совершил, увидев номер журнала со статьей Фридмана. Эту ошибку также можно объяснить только предубеждением. Для уравнений ОТО имеется тождество, из которого следует закон сохранения энергии–импульса для вещества. В этом законе присутствуют так называемые ковариантные (или удлиненные) производные. Эйнштейн заменил ковариантную производную обычной и таким образом получил ошибочную формулу,

которая противоречила выводам Фридмана. Поторопившись, Эйнштейн послал в журнал сообщение, что в статье Фридмана содержится элементарная ошибка. На ответное письмо Фридмана с разъяснениями Эйнштейн просто не обратил внимания. Но у Фридмана были хорошие друзья! Юрий Александрович Крутков, будущий член-корреспондент АН СССР, на стажировке за границей с помощью Эренфеста добился внимания Эйнштейна и растолковал ему его ошибку («В понедельник 7 мая 1923 года читал с Эйнштейном статью Фридмана...»); 18 мая: «Победил Эйнштейна в споре о Фридмане. Честь Петрограда спасена!»). Наконец, 21 мая 1923 г. редакция получила второе сообщение Эйнштейна: «В предыдущей заметке я подверг критике названную выше работу. Однако моя критика, как я убедился из письма Фридмана, сообщенного мне г-ном Крутковым, основывалась на ошибке в вычислениях. Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет...».



Юрий Александрович Крутков (1890–1952)

Сразу вслед за статьей Фридман пишет книгу «Мир как пространство и время» для более широкого круга читателей, намечалась её публикация в философском журнале «Мысль». Здесь автор смог изложить подробнее, эмоциональнее и раскованнее своё понимание ОТО и новой космологии. Этот труд Фридмана можно сравнить с сочинениями, которые писал вдохновленный своими открытиями Галилео Галилей. В списке литературы Фридман рекомендует для чтения книги Германа Вейля, Макса Лауэ, сэра Артура Стэнли Эддингтона и статью Давида Гильберта.

Книга начинается эпитафией из «Исторических материалов Федота Кузьмича Пруткова (деда)»: «...Скажи, мудрец, сколько звезд на сем небе? – Мерзавец! Никто необъятного объять не может!» От своего имени автор начинает иначе: «...как бы ничтожна ни была сумма людских знаний, всегда находились среди мыслящего человечества ... [люди], пытающиеся, на основании постоянно ничтожных научных данных, воссоздать картину мира».

По поводу своих собственных результатов Фридман пишет: «Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев: для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира, начиная с некоторого значения, постоянно возрастает с течением времени; возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто)², затем, снова из точки доводит свой радиус до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т.д. Невольно вспоминается сказание индусской мифологии о периодах жизни; является возможность также говорить о «сотворении мира из ничего...» А заканчивает он книгу так: «Теория Эйнштейна оправдывается на опыте; она объясняет старые, казавшиеся необъяснимыми явления и предвидит новые поразительные соотношения. Вернейший и наиболее глубокий способ изучения, при помощи теории Эйнштейна, геометрии мира и строения нашей Вселенной состоит в применении этой теории ко всему миру и в использовании астрономических исследований. Пока этот метод немного может дать нам... Но в этих обстоятельствах нельзя не видеть лишь затруднений временных; наши потомки, без сомнения, узнают характер Вселенной, в которой мы обречены жить...».

Наконец, Фридман закрывает книгу, открытую словами Пруткова-деда, цитатой из Г. Р. Державина:

Измерить океан глубокий,
Сочечь пески, лучи планет,
Хотя и мог бы ум высокий –
Тебе числа и меры нет!

Разумеется, это литературное обрамление – лишь предостережение от чрезмерной гордыни, как и знаменитые слова Ньютона: «Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу, развлекающимся тем, что от поры до времени отыскиваю камешек

² Это, вероятно, первое упоминание явления неограниченного гравитационного коллапса, с которым связывают и чёрные дыры – объекты пока гипотетические (прим. автора).

более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины растилается передо мною неисследованным».

Через год, в ноябре 1923 г. Фридман завершил ещё одну статью, в которой представил новые космологические решения с отрицательной кривизной пространства. Она также была опубликована в переводе на немецкий язык в ведущем физическом журнале.

Эпилог

Открытая Фридманом картина мироздания давно стала фундаментом современной космологии, уже в конце 1920-х годов астрономы обнаружили, что Вселенная расширяется. Место Фридмана в качестве первооткрывателя (хотя его первая статья появилась лишь в 1927 г.) занял Жорж Леметр, как нарочно, католический аббат. Внезапная смерть Фридмана в 1925 г. остановила развитие космологии в СССР на долгие десятилетия. Наступили времена, когда жандармы от философии грозили физикам ярлыком «агентуры леметрианства» и называли уравнение Фридмана «дифференциальным уравнением Бога». Только в 1960-е гг. у нас начинается новый расцвет науки о Вселенной, связанный с именами Я. Б. Зельдовича и А. Д. Сахарова, а позднее И. Д. Новикова, А. А. Старобинского, В. Ф. Муханова, А. Д. Линде и многих других.

В ИФВЭ работа в области гравитации началась благодаря интересу Анатолия Алексеевича Логунова, отдавшего последние десятилетия своей жизни труднейшей задаче обобщения ОТО на случай, когда гравитационное поле становится массивным. А. А. Логуновым, М. А. Мествиришвили и С. С. Герштейном³ было показано, что основное космологическое уравнение в новой теории гравитации сохраняет вид, полученный Фридманом, за одним исключением. Место космологической постоянной занимает однозначно определенная функция от масштабного фактора (того, что во времена Фридмана называли радиусом мира). Геометрия пространства оказывается плоской, а эволюция Вселенной – циклической, чередующей расширения от минимального до максимального радиуса и сжатия в обратном направлении.

Технические возможности исследователей неба неизмеримо выросли, оптические и рентгеновские телескопы выводятся в космос. Нас ждут новые фундаментальные открытия. Наблюдения последних лет указывают на доминирующую в современной Вселенной, по сравнению с видимой материей,



Анатолий Алексеевич Логунов (1926–2015)

роль тёмной энергии, которая ведет себя подобно космологической постоянной. Кроме того, масса галактик и их скоплений включает в себя вклад загадочной невидимой, то есть прозрачной, материи, которую по традиции чаще называют тёмной материей. Делаются попытки объяснить эти наблюдения и путём изменения общей теории относительности. Но в той или иной форме, пусть включающей новые слагаемые, уравнение Фридмана остаётся основным инструментом космологии.

Литература

1. Письма и рукописи статей Фридмана в архиве Пауля Эренфеста. http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/Friedmann_archive/
2. Успехи физических наук (Спецвыпуск к 75-летию со дня рождения). 1963. <http://ufn.ru/ru/articles/1963/7/>
3. Тропп Э. А., Френкель В. Я., Чернин А. Д. Александр Александрович Фридман: Жизнь и деятельность. Изд. 2-е, стереотипное. М.: КомКнига, 2006.
4. Бельский Ари. Воды, в которые я вступаю, не пересекал еще никто. Александр Фридман и истоки современной космологии // Наука из первых рук. 2012. № 5(47). Декабрь. <http://scfh.ru/papers/vodyi-v-kotorye-ya-vstupayu-ne-peresekal-eshe-nikto-aleksandr-friedman-i-istoki-sovremennoy-kosmologii/>
5. Долгов А. Д. Космология: от Померанчука до наших дней. (2014) <http://ufn.ru/ru/articles/2014/2/k/>

³ С. С. Герштейн, как оказалось, учился в МГУ вместе с сыном В. К. Фредерикса (прим. автора).