

ГРАВИТАЦИЯ, КОСМОЛОГИЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОЛЯ*******

УДК 524.8

© Березин В. А., 2019

**КОСМОЛОГИЯ ОТ АДАМА И ЕВЫ ДО АЛЕКСЕЯ СТАРОБИНСКОГО.
ЧАСТЬ 3**Березин В. А.^{a,1}^a Институт ядерных исследований РАН, г. Москва, 117312, Россия.

Лекция, прочитанная в ходе Зимней школы «Петровские чтения» 2018 года, посвященной 70-летию академика Алексея Александровича Старобинского. Обзор развития космологических воззрений и моделей до наших дней.

Ключевые слова: 4-я Международная зимняя школа-семинар по гравитации, космологии и астрофизике «Петровские чтения-2018», Старобинский Алексей Александрович.

COSMOLOGY FROM ADAM AND EVE TO ALEXIS STAROBINSKY. PART 3Beresin V. A.^{a,1}^a Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia.

Lecture delivered during the Winter school "Peter's readings"2018, dedicated to the 70th anniversary of academician Alexei Alexandrovich Starobinsky. Review of the development of cosmological views and models to the present day.

Keywords: 4th International Winter School-Seminar on gravitation, cosmology, and astrophysics «Petrov School-2018», Alexei Alexandrovich Starobinsky.

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.3.4-10

Алексей Старобинский

Заключительная часть наших лекций посвящена, как легко догадаться из названия, Алексею Александровичу Старобинскому.

После «вступительных» статей Зельдовича и Зельдовича и Питаевского начинается реализация заложенных там идей, рассуждений и предположений. То есть, следующий этап: выбор модели и конкретные расчеты. Этим и занялся, вместе с Зельдовичем, Алексей Старобинский, тогда еще совсем молодой аспирант.

Нужно признать, задача перед ними стояла грандиозная. Необходимо было подробно изучить поведение квантованных полей в искривленном пространстве-времени, вычислить темп рождения частиц — квантов этих полей, постараться учесть обратное влияние на метрику пространства-времени не только тензора энергии-импульса рожденных частиц, но и поляризацию вакуума квантовых полей. Все неизвестно, все приходится начинать, практически, с нуля. Согласитесь, что, на

¹E-mail: berezin@ms2.inr.ac.ru



Рис. 1. А.А. Старобинский

этом фоне, теория стационарной Вселенной Хойла-Нарликара кажется и детской игрушкой, и гаданием на кофейной гуще.

Чтобы не быть голословным в последнем утверждении, поясню. Для решения квантовой задачи нужно «правильно» поставить граничные условия (обычно на бесконечности). Чтобы знать, какие граничные условия вообще допустимы в данной задаче, нужно решить гравитационные уравнения, в нашем случае — космологические уравнения. А источником гравитационного поля является тензор энергии-импульса, в том числе усредненный (по вакууму) тензор энергии-импульса квантованных полей, решения для которых все еще неизвестны. Это — замкнутый круг, по которому можно тупо ходить до опупения. Искушенный читатель может возразить: все потому, что здесь смешиваются чисто квантовые явления с чисто классическими уравнениями для гравитации. Правильно, но как быть, если квантовая гравитация пока не создана, и неясно, возможно ли ее применять (и если можно, то как?) к такому объекту как наша конкретная Вселенная. Приходится обходиться некоторыми приближениями.

Кроме того, в квантовой теории поля неизбежно возникают бесконечности, которые нужно научиться вычитать в искривленном пространстве-времени или делать перенормировки первоначально заданных параметров. В общем, проблем уйма. И решать их можно различными способами. Какой предпочесть?

Совершенно необходимо сказать, что примерно в то же самое время еще две группы ученых заинтересовались такими же проблемами. Одна из них — американская — Леонард Паркер и Стивен Фуллинг, другая — питерская (= ленинградская) — Андрей Анагольевич Гриб, Сергей Георгиевич Мамаев и Владимир Михайлович Мостепаненко. Каждая шла своим путем, но вот физические результаты оказались одинаковыми.

Я.Б.Зельдович и А.А.Старобинский выбирают простейшее из возможных полей — квантовое безмассовое скалярное поле (безмассовое — потому что безмассовые частицы рождают «легче», их энергия ограничена только размерами вселенной: чем больше, тем меньше энергия). Также они выбирают простейшую из возможных космологических моделей — пространственно плоскую. Чуть-чуть забегаю вперед, сразу отмечу, что «в лоб» использовать однородную и изотропную модель Фридмана с $k = 0$ не удалось, поскольку оказалось, что квантовое безмассовое скалярное поле, «наложенное» на него, частицы не рождает вовсе. Пришлось немного испортить ее и рассматривать слабо анизотропную модель.

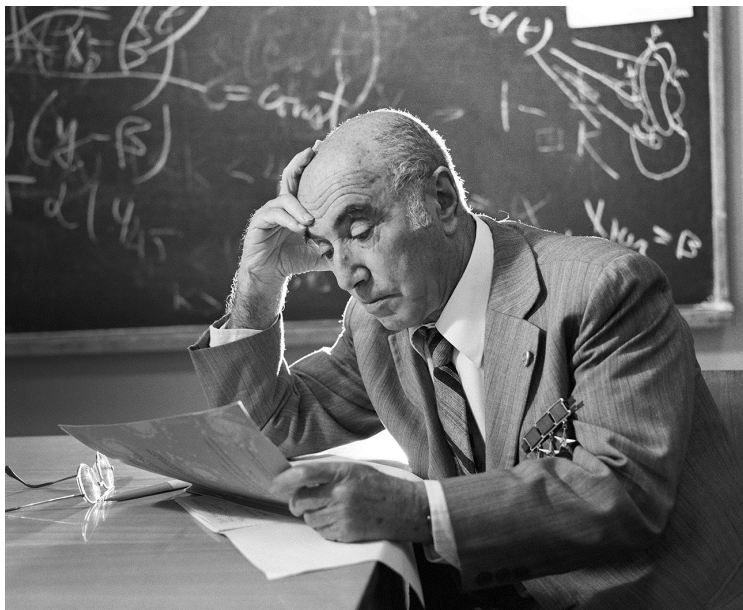


Рис. 2. Я.Б. Зельдович

Конечно же, появились бесконечности при вычислении вакуумного среднего квантованного скалярного поля. Часть из них удалялась стандартной процедурой перенормировки параметров, именно, перенормировкой гравитационной постоянной G , что вполне тривиально, и космологической постоянной Λ , что не вполне тривиально, так как это означало, что даже если «исходный» Λ -член отсутствовал, то он обязательно появлялся в квантовой теории. Но были и другие бесконечности, не столь безобидные. Это квадраты тензора Риччи, R_{ik} , квадраты скаляра кривизны R и его ковариантные производные. Их можно было удалить, если в гравитационное действие ввести дополнительно квадрат скаляра кривизны, формально, с бесконечным коэффициентом.

Чрезвычайно интересно, что в искривленном пространстве-времени квантованное безмассовое скалярное поле приобретает так называемую конформную аномалию: след усредненного по вакууму тензора энергии-импульса не равен нулю, как можно было бы ожидать, исходя из свойств классического поля. И как раз конформная аномалия играет важнейшую роль в процессе рождения частиц. Так, Зельдович и Старобинский (позднее, в 1977 году) показали, что темп рождения (число рожденных частиц в единице объема в единицу времени) пропорционален квадрату тензора Вейля. Тензор Вейля есть полностью бесследовая часть тензора кривизны, и он тождественно равен нулю для любой однородной и изотропной модели (вот почему пришлось вводить анизотропию!).

Ничто не ново под Луной! Космологический Λ -член возник, как мы узнали только что, как следствие перенормировки в квантовой теории скалярного поля. Но еще раньше, в 1965 году, питерский (= ленинградский) физик-теоретик Эраст Борисович Глинер предложил смотреть на него как на тензор энергии-импульса вакуума с ненулевой плотностью энергии ϵ , давлением p и необычным уравнением состояния $\epsilon = -p$.

В своей статье, опубликованной в Журнале экспериментальной и теоретической физики, Э.Б. Глинер. ЖЭТФ 49 (1965) 542, он подробно описал «кинематические» свойства такого вакуума. Наконец-то, Λ -член, изобретенный в отчаянии Эйнштейном, получил прекрасную физическую интерпретацию, поддерживаемую, к тому же, теорией квантованных полей.

Формируя стройную теорию квантованных полей, физики-теоретики столкнулись с проблемой бесконечной энергии вакуума, и решили они ее очень просто: отбросили напрочь, поскольку «ни на что не влияет». Однако, при учете гравитации, этого сделать просто так нельзя, любая энергия гравитирует. А Глинер привел в порядок феноменологию вакуумного состояния. И он же

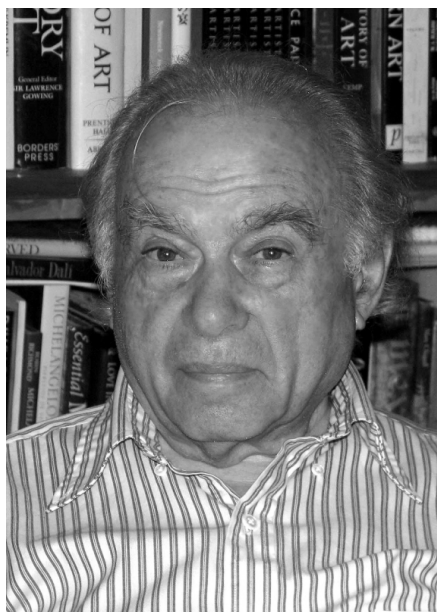


Рис. 3. Э.Б. Глинер

первым предположил, что мир де Ситтера, как чрезвычайно симметричный (группа де Ситтера — десяти-параметрическая, как и группа Пуанкаре для вакуума мира Минковского), может оказаться начальным состоянием нашей Вселенной. Заметим, что в связи с этим большим (не боясь высоких слов) открытием имя Эраста Борисовича не упоминается, притворяются, что «все уже давно все знали». Негоже!

Но, был один человек, который с самого начала поддержал Глинера и помог опубликовать еще одну статью на ту же тему, представив (будучи академиком) ее в журнал « Доклады Академии наук » (ДАН). Это Андрей Дмитриевич Сахаров (1921 — 1989).

Гениальный физик, «отец советской водородной бомбы», «интеллектуальная машина, работающая на неизвестном нам принципе» - характеристика, данная Зельдовичем, Андрей Дмитриевич оставил неизгладимый след и в космологии. Он первым предложил решение барионной асимметрии Вселенной (почему нет антивещества в сопоставимом количестве). Кроме того, он в научном мире известен как автор «индуцированной гравитации». Его идея заключается в том, что, возможно, гравитационного поля как самостоятельного, отдельного взаимодействия, не существует вовсе, это «всего лишь» натяжения вакуума всех остальных квантованных полей (конформные аномалии и т.п.). Поэтому в эффективное гравитационное действие необходимо включать не только скаляр кривизны, как у Гильберта, но и квадраты тензора кривизны и тензора Риччи и, вообще говоря, функции от этих тензоров и их производных. Все это было опубликовано аж в 1967 году, т.е. более полувека тому назад.

Разумеется, идеи и работы Э.Б.Глинера и А.Д.Сахарова были прекрасно известны и Зельдовичу, и Старобинскому.

И вот в 1980 году появляется статья Алексея Старобинского про новый тип изотропных космологических моделей без начальной сингулярности (A.A. Starobinsky A New Type of Isotropic Cosmological Models without Singularity. Phys. Lett. **91B** (1980) 99–102). Он нашел способ защититься от Большого взрыва!

Как?

А вот так!

Как выглядит цепочка рассуждений Алексея Александровича с высоты сегодняшнего знания и понимания?

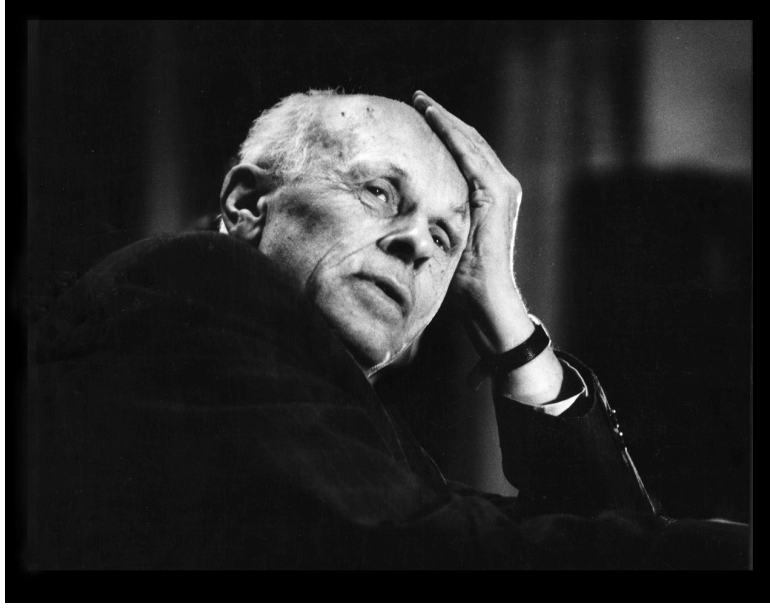


Рис. 4. А.Д. Сахаров

Ньютон — всемирное тяготение

Эйнштейн — гравитация суть искривленное риманово пространство-время. Тяготееет энергия

Глинер — энергия вакуума, вообще говоря, отлична от нуля и описывается космологическим Λ -членом

Сахаров — гравитация есть не что иное как натяжения вакуума всех квантованных полей

Зельдович и Старобинский — в простейшем случае безмассового квантованного скалярного поля на фоне метрики простой космологической модели требуется ввести в эффективное действие контрчлен, пропорциональный квадрату скалярной кривизны

Старобинский — а что может быть всемирней вакуума? Давайте объединим все это. И вместо действия Эйнштейна-Гильберта запишем для космологической модели

$$S_{\text{grav}} = -\frac{1}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} dx \Rightarrow -\frac{1}{16\pi G} \int \left(R + \frac{R^2}{6M^2} \right) \sqrt{-g} dx.$$

Здесь M — свободный параметр модели. Вакуумные уравнения можно записать в виде уравнений Эйнштейна с неким тензором энергии-импульса (как это выглядит в статье Старобинского):

$$\begin{aligned} \langle T_{ik} \rangle = & \frac{k_2}{2880\pi^2} (R^l_i R_{kl} - \frac{2}{3} R R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R_{lm} R^{lm} + \frac{1}{4} g_{ik} R^2 \\ & + \frac{k_3}{2880\pi^2} \frac{1}{6} (2R_{;i;k} - 2g_{ik} R_{;l} R^{;l} - 2R R_{ik} + \frac{1}{2} g_{ik} R^2). \end{aligned}$$

Напомним, что точка с запятой означает ковариантную производную. Формулы выглядят устрашающе. Но нас спасет космологический принцип — однородность и изотропия. Хотя и здесь все гораздо сложнее, чем раньше — я имею в виду уравнения Фридмана.

Прежде всего, заметьте, что из гравитационного интеграла действия исчез «врожденный» Λ -член. Но, при этом, мир де Ситтера является решением космологических уравнений, причем значение космологического члена определяется параметрами модели:

$$\Lambda = 3 \frac{2880\pi^2}{k_2}.$$

Страшно интересно! Чем не «первичный атом» Леметра? У Леметра первичный атом, едва появившись, сразу же взрывается. Это и есть Большой Бабах. Кстати, а как и откуда он появляется? — неизвестно и непонятно. А как у Старобинского?



Рис. 5. А.А. Старобинский

А у Старобинского космологические уравнения уже не второго порядка (скорость + ускорение), а четвертого порядка по производным. И решение же Ситтера оказывается неустойчивым — малейшая флуктуация, и начинается распад (но не взрыв!). Именно поэтому Алексей выбрал мир де Ситтера в качестве начального состояния вселенной (другими словами, Большой Бабах был просто вырезан, как кадры их киноленты). А что было до того? Ответ может быть двояким. Первый вариант: мир де Ситтера существовал вечно, пока любая флуктуация не нарушала его покой. Это — чисто классическая картина. Вариант второй: был какой-то чисто квантовый мир, а затем вселенная туннелировала (под каким-то потенциальным барьером) в классический мир де Ситтера. Это вариант возникновения вселенной «из ничего» разрабатывался А.В. Вилекиным, начиная с 1986 года. Как тут не вспомнить «фантастическое» предположения А.А. Фридмана?

Бытует мнение, что мир де Ситтера расширяется. Но тут есть некоторая тонкость. Решение де Ситтера — вакуумное, в нем нет реальных наблюдателей, которые зафиксировали бы такое расширение (пробные частицы, двигающиеся по геодезическим и удаляющиеся друг от друга — не в счет). Вспомните вселенную Милна, тоже как бы расширяющуюся, но это всего-навсего плоское пространство-время Минковского, «переписанное» в космологических координатах. А вот флуктуации, вызывающие распад мира де Ситтера — они и есть реальнее наблюдатели, все быстрее и быстрее удаляющиеся друг от друга. Поэтому распадающееся начальное вакуумное состояние в модели Старобинского приводит к реальному раздуванию вселенной, и это решает упоминавшиеся выше «космологические проблемы». Утвердившийся ныне термин «инфляция» был введен Аланом Гусом только через год, в 1981 году. Так что, Алексей Старобинский по праву считается автором первой инфляционной космологической модели.

А что же дальше? А дальше, те же флуктуации разрушают «первородные» однородность и изотропию, начинается рождение частиц. А что за поле, производящее столь необходимое для нашего существования вещество? Вся прелесть в том, что в модели Старобинского в нем нет нужды. Оказывается, можно такую модифицированную гравитацию с помощью специально подобранного конформного преобразования (не буду вдаваться в подробности) привести к виду «гравитация Эйнштейна + скалярное поле с «хитрым» потенциалом». Прямо как работа «бритвы Оккама»!

Вместо Заключения

В середине 60-х годов прошлого столетия, особенно после обнаружения реликтового фонового излучения, во всем мире вдруг проснулся интерес к теоретической космологии. До того, ее презрительно считали уделом стариков-теоретиков, уже неспособных делать «настоящую физику». Вы уже видели, какой большой вклад в выдвижение и развитие новых идей внесли выдающиеся советские физики-теоретики. Но я не хочу, чтобы у читателя возникло ощущение, что это были одиночки. В то время в Советском Союзе кипел большой теоретический котел, в котором «варились» мы все, включая и Алексея Старобинского. Я взял на себя смелость перечислить «лично известных», поэтому прошу не обижаться тех, кого не упомянул либо по забывчивости, либо просто по незнанию. Итак, вот этот список.

Я.Б. Зельдович, А.А. Старобинский, А.Г. Дорошкевич, И.Д. Новиков, Г.С. Бисноватый-Коган, Р.А. Сюняев, Л.П. Грищук, Я.Е. Эйнасто, Е.Б. Глинер, И.Г. Дымникова, А.Д. Сахаров, В.А. Белинский, А.Д. Линде, Е.М. Лифшиц, И.М. Халатников, В.Л. Гинзбург, Л.М. Озерной, А.А. Гриб, А.В. Виленкин, И.Ю. Кобзарев, Л.Б. Окунь, А.Д. Долгов, А.Д. Чернин, В.С. Березинский, К.П. Станюкович, В.Н. Мельников, С.Г. Мамаев, Д.А. Киржниц, В.М. Мостепаненко, С.Ф. Шандарин, В.Н. Лукаш, А.Г. Полнарев, М.Ю. Хлопов, Н.А. Черников, Е.А. Тагиров, М.В. Сажин, К.А. Бронников, В.Н. Первушин, Г.М. Верешков, В.А. Рубаков, В.Г. Лапчинский, И.И. Ткачев, М.А. Марков, В.П. Фролов, Л.А. Кофман, Г.А. Вилковский, М.Ф. Муханов, Г.В. Чибисов, А.О. Барвинский, А.Ю. Каменщик, В.А. Березин, В.А. Кузьмин, М.Е. Шапошников, М.Ц. Гурович, В. Гурзядян, В.И. Докучаев, С.В. Червон, С.В. Сушков, И.Л. Бухбиндер, С.Д. Одинцов, И.Л. Шапиро, . . .

Благодарности

Я бесконечно благодарен моей жене, Куприяновой Анастасии Викторовне, и моему коллеге, Докучаеву Вячеславу Ивановичу. Без их неоценимой помощи работа никогда не была бы завершена.

Авторы

Березин Виктор Александрович, д.ф.-м.н, старший научный сотрудник, Институт ядерных исследований РАН, проспект 60-летия Октября, 7а, В-312, г. Москва, 117312, Россия.
E-mail: berezin@ms2.inr.ac.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Березин В. А. Космология от Адама и Евы до Алексея Старобинского. Часть 3 // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2019. № 3. С. 4–10.

Authors

Berezin V. A., Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Theory Physics Department, Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, prospect 60-letiya Oktyabrya, 7a, Moscow, 117312, Russia.
E-mail: berezin@ms2.inr.ac.ru

Please cite this article in English as:

Berezin V. A. Cosmology from Adam and Eve to Alexis Starobinsky. Part 3. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 3, pp. 4–10.