

УДК 524.8

© Березин В. А., 2019

**КОСМОЛОГИЯ ОТ АДАМА И ЕВЫ ДО АЛЕКСЕЯ СТАРОБИНСКОГО.
ЧАСТЬ 2**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 2Berezin 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/issn2226-8812.2019.2.44-63

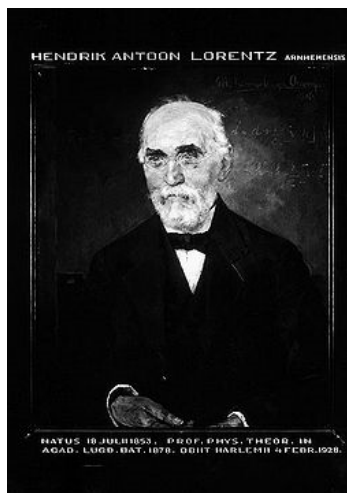
Часть Вторая. Историческая Эпоха

Помните, с чего все началось? — С яблока. На картине Кранаха Старшего у Евы их три. Если это было первое, а то, на которое воззрелся Ньютон — второе, возникает вопрос — а зачем нужно третье? История развития космологической науки показало, что третье яблоко было совершенно необходимо. Необходим был переворот в наших представлениях о пространстве и времени, чтобы, как минимум, отойти подальше от догм, утвердившихся в наших мозгах с давних времен. И этот переворот был совершен человеком по имени Альберт Эйнштейн (Albert Einstein 1879–1955).

Речь, конечно же, идет о специальной теории относительности. Традиционно, авторами этой теории считаются трое: Хендрик Лоренц, Анри Пуанкаре и Альберт Эйнштейн (хотя творили они не в пустоте — ряд результатов был получен предшественниками).

И до сих пор не утихают споры о вкладе Эйнштейна. Итак, 1905 год. Уже известны новые преобразования от одной инерциальной системы отсчета к другой (Лоренц + Пуанкаре), которые затрагивают не

¹ E-mail: berezin@ms2.inr.ac.ru



только пространственные координаты (как было у Галилея и Ньютона), но и время, уже Пуанкаре выяснил, что эти преобразования составляют группу симметрий уравнений Максвелла (замена группы Галилея). Уже ясно, что скорость света во всех инерциальных системах отсчета одна и та же, что подтверждается сенсационными результатами экспериментов Майкельсона и Морли. Но оба они, и Лоренц, и Пуанкаре, фактически, постулируют справедливость электромагнитных уравнений Максвелла. А вдруг это не совсем так? И тут появляется знаменитая статья Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел», в которой были получены те же результаты. Но как! Уравнения Максвелла ему не были нужны вовсе (хотя заголовок и может ввести в заблуждение). Только два постулата, казавшиеся несовместимыми с точки зрения здравого смысла, основанного на все предшествовавшем опыте: принцип относительности (ньютоново-галилеево равноправие инерциальных систем отсчета) и постоянство скорости света. Все остальное — следствия, включая очень тонкий анализ понятия одновременности событий. В духе «Начал» Евклида и «Начал» Ньютона.

Специальная теория относительности у Эйнштейна — это теория пространства-времени, а не просто свойства уравнений Максвелла. Именно поэтому я и назвал его автором случившегося переворота. Завершающую точку в создании специальной теории относительности поставил Герман Минковский (Hermann Minkowski 1864—1909).

Он смог предъявить миру геометрию, пространственно-временные соотношения в которой и составляли суть специальной теории относительности. Сейчас мы называем это геометрией Минковского. Чтобы объяснить, что именно было сделано, напомним, что в геометрии Евклида, являющейся основой ньютоновской картины мира, царила трехмерная теорема Пифагора: квадрат расстояния между двумя точками есть сумма квадратов проекций на декартову систему координат (...) (сумма квадратов сторон параллелепипеда равно квадрату его главной диагонали), и это расстояние остается неизменным при преобразованиях группы Галилея (от одной инерциальной системы к другой), т.е. является инвариантом. Для бесконечно близких точек мы получаем это в дифференциальной форме:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Минковский ввел понятие интервала ... между близлежащими точками:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$



где c — скорость света. Преобразования Лоренца оставляют инвариантным именно такой интервал. Для световых лучей $ds^2 = 0$, а ноль — он и в Африке ноль! Вместе со сдвигами по временной и пространственной координатам и пространственными вращениями мы получаем группу движений, именуемую группой Пуанкаре. С появлением четырехмерной геометрии пространства-времени энергия и вектор импульса естественным образом объединились в четырехмерный вектор, напряженности электрического и магнитного полей — в четырехмерный тензор второго ранга, а уравнения максвелла приобрели столь изящный и простой вид — что глаз не оторвать. Прямо по П.А.М.Дираку: «Физический закон должен быть математически прекрасен». После этого сомневаться в справедливости специальной теории относительности мало кому придет в голову.

А какое все это имеет отношение к космологии? Самое прямое. Одним из важнейших следствий специальной теории относительности является знаменитое и ныне всем известное соотношение между энергией тел E и его инертной массой m :

$$E = mc^2.$$

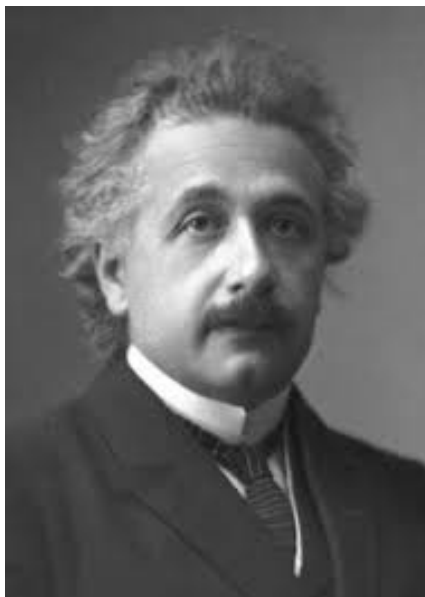
И если принять принцип эквивалентности в формулировке Галилея (и Ньютона): ускорение в поле тяжести не зависит от массы тела (разумеется, речь идет здесь о материальных точках), то, выходит, что тяготеет именно энергия. А энергия зависит от скорости, и от температуры, и от электрических зарядов, и от вращения. Для сплошной среды (что характерно именно для космологических моделей) это означает, что тяготеет не только плотность массы (= энергии), как в ньютоновой теории, но и давление. Инертная масса (= энергия) зависит от скорости. И если, как в ньютоновой теории, именно она является источником тяготения, то изменение скорости движения планеты изменит ее гравитационное воздействие на Солнце. Но ведь Солнце об этом «узнает» не сразу, поскольку, согласно специальной теории относительности, никакой сигнал не распространяется быстрее света. Так что, с третьим законом Ньютона в отношении действия на расстоянии (что было важно при выводе закона обратных квадратов) придется забыть.

Гравитационное взаимодействие также обладает энергией, поэтому оно является источником самого себя. На языке математики это означает, что уравнения гравитационного должны быть нелинейны (т.е. сумма решений уже не является решением). А ведь уравнение Пуассона, о котором мы упоминали выше — линейное.

Вот вам и третье яблоко, и не одно, а целая корзина!



И начались мучительные и драматические поиски новой теории гравитации. Яблоки яблоками — а познавать приходится все-таки самому. Эйнштейн зашел дальше всех.



Вот его требования к будущей теории.

Во-первых, в достаточно малых объемах должен выполняться принцип эквивалентности, сформулированный еще Галилеем, а теперь понимаемый как неотличимость гравитации от ускорения без гравитации. В окончательной формулировке это привело к замене интервала между близлежащими точками, изобретенного Минковским, на более общий

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x)dx^\mu dx^\nu,$$

$g_{\mu\nu}$ — симметричный тензор второго ранга, он называется метрическим тензором. Чтобы формула стала более понятной, необходимо сказать, что это — краткая запись, на самом деле по повторяющимся, вверху и внизу, индексам подразумевается суммирование (правило Эйнштейна, очень удобное). Эйнштейн особенно настаивал на том, что теория должна быть ковариантной, т.е. выглядеть одинаково в произвольной системе координат. Во-вторых, опять же в малых объемах, все должно сводиться к специальной теории относительности — это означает, что, приведенный в любой заданной точке к главным осям, метрический тензор имеет вид $g_{\mu\nu} = \text{diag}(+1, -1, -1, -1)$.

В-третьих, при скоростях, малых по сравнению со скоростью света, должно воспроизводиться уравнение Пуассона. Но, как мы видели, уравнение Пуассона линейно (т.е. сумма решений есть решение), так что искомое обобщение очень нетривиально, поскольку должно быть обязательно нелинейным, т.к. гравитационное поле, обладающее энергией (= массой) — источник самого себя.

В-четвертых, материальны (негравитационным) источником должен служить тензор энергии-импульса как требуемое специальной теорией относительности обобщение плотности массы в нерелятивистском уравнении Пуассона. Тензор энергии-импульса — симметричный тензор второго ранга, поэтому и левая часть уравнений гравитационного поля должна быть таковой.

В 1912 году Эйнштейн вместе со своим давним другом Марселем Гроссманом (Marcel Grossmann 1878—1936) написали статью, в которой было показано, что в пределе слабой гравитации и малых скоростей ньютоновский гравитационный потенциал φ (тот, который в уравнении Пуассона) естественным образом входит в g_{00} -компоненту метрического тензора.



Это окончательно убедило Эйнштейна в том, что в релятивистской теории гравитационные потенциалы описываются метрическим тензором. По легенде, Эйнштейн бродил по коридорам Берлинской академии наук, хватал математиков за пуговицы и говорил: дайте мне симметричный тензор второго ранга, линейный по вторым производным метрики. Но, имея «под рукой» Марселя Гроссмана, это кажется излишним. Именно Марсель Гроссман преподавал ему уроки римановой геометрии.

Сейчас нам предстоит краткая экскурсия в мир (псевдо)-римановой геометрии. Приставка «псевдо» означает, что, после приведения метрического тензора к диагональному виду (в заданной точке) мы получаем интервал Минковского, а не четырехмерную теорему Пифагора (интервал Евклида). Я уже не раз употребил термин «тензор», не объяснив толком, что это такое. Не буду вдаваться в подробности и сейчас. Думаю, достаточно знать, что некий объект с индексами, преобразующийся по определенному закону при переходе от одной системы координат к другой (вектор — частный случай тензора). Главным для свойством тензора является то, что, будучи равным нулю в одной системе координат, он остается равным нулю и в любой другой, «нет» — так «нет». Все познается в сравнении. Мы будем сравнивать с пространством-временем Минковского, в котором свободное (инерциальное) движение частиц и света происходит по прямым линиям. Большую роль играет и параллельный перенос векторов, когда начало вектора переносится в другую (соседнюю) точку, не меняя при этом длины его проекций, т.е. не меняется ни длины вектора, ни его ориентация, дифференциал вектора равен нулю. Кривая линия, вдоль которой касательный к ней вектор переносится параллельно, и есть прямая. Вот здесь появляется первое отличие. В более общей геометрии меняется процедура параллельного переноса. Обыкновенный, привычный дифференциал (разность векторов в соседних точках) уже не является вектором (в разных точках закон изменения вектора при преобразованиях координат разный), и потому не годится, так как равенство его нулю в одной системе координат не гарантирует того же в другой. Поэтому вводится другой — ковариантный дифференциал (вектор!), который для произвольного вектора ξ^μ ($d\xi^\mu$ — обычный дифференциал) имеет вид:

$$D\xi^\mu = d\xi^\mu + \Gamma_{\nu\lambda}^\mu \xi^\nu dx^\lambda = \xi_{;\lambda}^\mu dx^\lambda,$$

где dx^λ — вектор смещения начальной точки, объект с тремя индексами $\Gamma_{\nu\lambda}^\mu$ называется связностью, а $\xi_{;\lambda}^\mu$ называется ковариантной производной. Очевидно, что ковариантная производная — линейная операция, при этом постулируется, что производная скаляра (величины без индексов) совпадает с обычной частной производной, а производная произведения находится по правилу Лейбница, производная же тензора строится по аналогии с произведением векторов. По определению, при параллельном переносе ковариантная производная равна нулю. Кривая линия, вдоль которой касательный к ней вектор переносится параллельно, называется геодезической — это обобщение прямой в пространстве Минковского. Далее, если в пространстве Минковского (или Евклида) перенести вектор параллельно самому себе по (любому) замкнутому контуру, то в конце он совпадет с первоначальным. В общем случае это не так — изменится и его длина, и проекция. В пределе бесконечно малого контура это изменение определяется значением в данной точке тензора четвертого ранга $R_{\nu\lambda\sigma}^\mu$, имя которому — тензор кривизны. Т.к. в процессе параллельного переноса участвует лишь связность, то неудивительно, что тензор кривизны зависит только от нее:

$$R_{\nu\lambda\sigma}^\mu = \frac{\partial \Gamma_{\nu\sigma}^\mu}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial \Gamma_{\nu\lambda}^\mu}{\partial x^\sigma} + \Gamma_{\kappa\lambda}^\mu \Gamma_{\nu\sigma}^\kappa - \Gamma_{\kappa\sigma}^\mu \Gamma_{\nu\lambda}^\kappa.$$

Пространство-время с нулевым тензором кривизны называется плоским. В принципе, можно задавать метрический тензор и связность независимо друг от друга. А вот в римановой геометрии постулируется, во-первых, симметрии коэффициентов связности по нижним индексам, $\Gamma_{\nu\lambda}^\mu = \Gamma_{\lambda\nu}^\mu$ (антисимметричная часть является тензором и называется кручением), а во-вторых, накладывается условие равенства нулю ковариантной производной метрического тензора:

$$g_{\mu\nu;\lambda} = 0.$$

Такая связность называется метрической или римановой, и это означает, что длина вектора не изменяется при параллельном переносе. Оказывается, что риманова связность равна

$$\Gamma_{\nu\lambda}^{\mu} = \frac{1}{2}g^{\mu\sigma}(g_{\sigma\nu,\lambda} + g_{\sigma\lambda,\nu} - g_{\mu\nu,\sigma}),$$

где запятая означает обычную частную производную, а $g^{\mu\sigma}$ — тензор, обратный метрическому. Мы видим уже, что в римановой геометрии все определяется метрическим тензором. Ровно это нужно было Эйнштейну: гравитация есть искривленное риманово пространство-время! А свободное движение пробных частиц, собственным гравитационным полем которых можно пренебречь, происходит вдоль геодезических. Но это не все.

Оказывается, простым преобразованием координат можно не только привести метрический тензор к диагональному виду, но, вдобавок, еще и сделать равными нулю все коэффициенты римановой связности. Наглядная демонстрация принципа эквивалентности! И еще одна радость. Из тензора кривизны суммированием (свертке) по верхнему и среднему из нижних индексов получается тензор второго ранга

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu}$$

— тензор Риччи, который в римановой геометрии автоматически симметричен и линеен по вторым производным метрического тензора. Ровно то, что искал Эйнштейн! И он, «ничтоже сумняшеся», пишет новые гравитационные уравнения в виде

$$R_{\mu\nu} = 0.$$

Посмотрите, какое у него счастливое лицо.

Радость была недолгой. Очень скоро выяснилось, что тензор Риччи не может быть пропорционален тензору энергии-импульса материи — не выполняется закон сохранения. Выход был найден легко — нужно добавить в правую часть скаляр кривизны $R = g^{\lambda\sigma} R_{\lambda\sigma}$, который, естественно, также линеен по вторым производным метрики. И вот, 25 ноября 1915 года на заседании Прусской академии наук были представлены новые релятивистские уравнения гравитации, знаменитые уравнения Эйнштейна

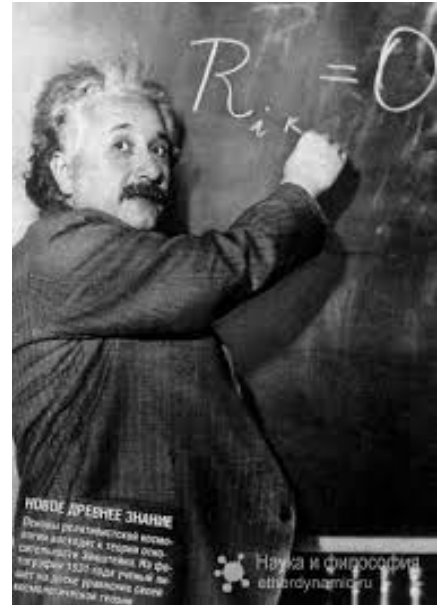
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu},$$

где $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса вещества, обобщающий плотность массы в ньютоновской теории тяготения. Коэффициент в правой части получается из сравнения с уравнением Пуассона.

Революция, о которой так много говорили физики, свершилась!

Выше мы уже упомянули о драматизме поисков новой теории всемирного тяготения. Драматизм внес великий математик Давид Гильберт (David Hilbert 1862–1943).

Эйнштейн был физиком до мозга костей. Но, руководствуясь чисто физическими идеями, он не смог бы добиться столь впечатляющих успехов, не овладев (с превеликой помощью Марселя Гроссмана) современнейшими (тогда) математическими знаниями и навыками. Гильберт же был, напротив, математиком до мозга костей. И он вознамерился вывести все известные тогда уравнения теоретической физики из единого принципа — принципа наименьшего действия. Знакомство с Эйнштейном побудило его заняться гравитацией. Для этого нужно было найти некий функционал, численное значение которого зависит от функций — динамических переменных данной теории.





Идеи Эйнштейна натолкнули Гильберта на мысль — таким функционалом должен быть интеграл по четырехмерному объему от скаляра кривизны R (определение см. выше), а динамическими переменными — компоненты метрического тензора $g_{\mu\nu}(x)$. Тем самым неявно предполагалось, что геометрия пространства-времени — риманова.

$$S_{\text{grav}} = -\frac{c^4}{16\pi G} \int R \sqrt{-g} dx$$

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{grav}} + S_{\text{matter}}$$

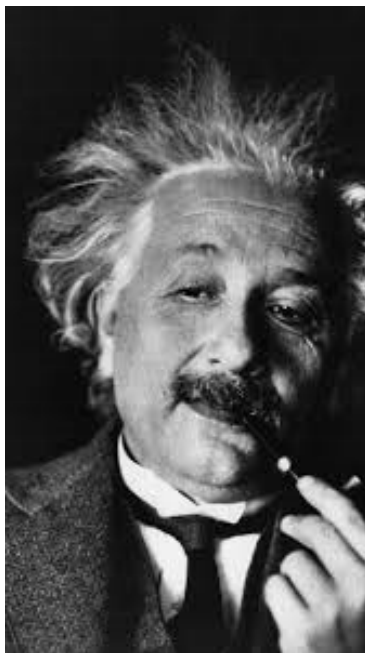
$$\delta S_{\text{matter}} = \frac{1}{2} \int T_{\mu\nu} \delta g^{\mu\nu} \sqrt{-g} dx$$

И ему таки удалось получить уравнения общей теории относительности! Новая теория всемирного тяготения получила солидную математическую базу, а не осталась «некой эвристической точкой зрения» (как любил говаривать сам Альберт Эйнштейн).

Долгое время среди историков физики (и не только) шли споры, кто же все-таки является первооткрывателем этих уравнений? Многие склонялись к мысли, что окончательный вариант был «подсказан» Эйнштейну Гильбертом, ссылаясь на то, что в официальной публикации выступления Гильберта на заседании Прусской академии наук, состоявшейся за 2 недели до выступления Эйнштейна 25 ноября 1915 года, они уже были выписаны. И только сравнительно недавно было доказано, что Гильберт добавил уравнения лишь при корректуре. Лично я предпочитал верить самому Гильберту, заявившему, что без гениальных физических прозрений Эйнштейна он никогда не смог бы завершить свою работу!

И снова Альберт Эйнштейн.

8 февраля 1917 года появилась статья Эйнштейна «Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie» Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, (1917) 142-152 (в вольном переводе «Размышления о космологии в общей теории относительности»). В ней он представил первую действительно космологическую модель. Это именно космологическая, поскольку математически строго описывает вселенную как целое в виде решения уравнений для гравитационного поля.



Основные постулаты, принятые Эйнштейном, те же, что и у Ньютона:

1. Вселенная однородна и изотропна
2. Вселенная статична
3. Вселенная заполнена пылевой материей (т.е. частицами, взаимодействующими только гравитационно)

Как вы помните, в ньютоновской теории решения, удовлетворяющего всем этим требованиям, нет вообще.

А как у Эйнштейна?

Прежде, чем ответить на этот вопрос, давайте разберем подробно, как математически записываются вышеприведенные постулаты. У Ньютона все было очень просто и наглядно: плотность материи должна быть постоянна, $\rho = const$, и в пространстве, и во времени. И это все! Сейчас же все посложнее, поскольку само пространство-время появляется как решение гравитационных уравнений. Итак, первый постулат: однородность и изотропия пространства. Нам нужно найти наиболее общий вид интервала между двумя близлежащими (во времени и пространстве) событиями, удовлетворяющего этим условиям. Однородность означает, что все точки пространства равноправны. Выберем одну из них и поместим туда начало координат. Это центр — «пуп вселенной». Изотропность означает, что все направления, если глядеть из центра, одинаковы — следовательно, можно ввести сферическую систему координат, где все должно зависеть только от радиуса. Если бы мы имели дело с привычным плоским (евклидовым) пространством, то дальнейшее было бы очевидным: квадрат длины dl^2 между близкими точками равнялся бы — $dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$, где θ и φ — сферические углы, а r — радиус сферы, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. В искривленном же пространстве (сферически симметричном) вторая часть (в скобках) остается неизменной, r по-прежнему называется радиусом сферы, а вот первое слагаемое умножается на произвольную функцию только от радиуса (условие изотропности), т.е.

$$dl^2 = f(r)dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2).$$

Теперь нам нужно найти такую функцию $f(r)$, чтобы выполнялось условие однородности. Для определения ее нам достаточно всего-навсего одного уравнения. Чтобы его получить, вспомним «уроки» римановой геометрии, преподанные выше. В римановой геометрии и связность, задающая параллельный перенос (это не тензор!), и кривизна (это тензор четвертого ранга) задаются полностью метрическим тензором — в нашем случае единственной функцией одной переменной $f(r)$. Из тензора кривизны, как тоже было показано выше, легко сконструировать скаляр кривизны R . В трехмерном однородном пространстве он и должен быть константой: $R = K_0 = const$. Не буду излишне утомлять читателя и сразу выпишу готовое уравнение (штрих означает производную по аргументу r):

$$\frac{2f'}{rf^2} + \frac{2}{r^2} \left(1 - \frac{1}{f}\right) = K_0 = const.$$

Уравнение легко решается. Его общее решение имеет вид:

$$\frac{1}{f} = 1 - \frac{K_0}{6}r^2 + \frac{K_1}{r},$$

где K_1 — произвольная постоянная интегрирования. Но, в однородном пространстве центральная точка $r = 0$ — лишь одна из всех, там не может быть никакой особенности, поэтому $K_1 = 0$. Итак, общий вид элемента длины для однородного и изотропного пространства найден. Заметим, что мы всегда можем изменить масштаб («перемасштабировать») переменную $r = a\tilde{r}$ ($a = const$) и выбрать ее такой, чтобы $f = 1 - k\tilde{r}^2$, $k = 0, \pm 1$, тогда

$$dl^2 = a^2 \left(\frac{dr^2}{1 - k\tilde{r}^2} + \tilde{r}^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right).$$

Для наглядности, заметим, что $k = 0$ соответствует плоскому евклидовому пространству, при $k = 1$ заменой $\tilde{r} = \sin \chi$, $d\tilde{r} = \cos \chi d\chi$ получаем элемент единичной трехмерной сферы с третьим

сферическим углом χ , $dl^2 = d\chi^2 + \sin^2 \chi (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$ а при $k = -1$ заменой $\tilde{r} = \sinh \chi$, $d\tilde{r} = \cosh \chi$ — элемент трехмерного гиперboloида вращения, пространства постоянной отрицательной кривизны. Но нам нужен четырехмерный интервал для пространства-времени. Опять же, в силу однородности, всегда можно сделать время «одинаково текущим» во всех точках пространства, поэтому

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - k\tilde{r}^2} + \tilde{r}^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right)$$

(а кто сказал, что a не может зависеть от времени?). Здесь и далее везде мы положили скорость света $c = 1$ — удобства ради. Вот это и есть искомый интервал для любой однородной и изотропной космологической модели. Функция $a(t)$ называется масштабным фактором. Итак, с первым постулатом мы справились. Дальше все гораздо проще.

Второй постулат гласит: Вселенная статична, т.е. $a(t) = a_0 = \text{const}$.

Третий постулат — Вселенная заполнена пылью — расшифровывается так: тензор энергии-импульса материи имеет вид $T_{\mu\nu} = \rho u_\mu u_\nu$ где ρ — плотность вещества, а u^μ — четырехвектор скорости. Введенная нами выше система координат, по определению, является сопутствующей пылинками, поэтому $T_{\mu\nu}$ имеет диагональный вид

$$T_{\mu\nu} = \text{diag}(\rho, 0, 0, 0),$$

причем, ввиду статичности, $\rho = \rho_0 = \text{const}$.

Выпишем теперь самые общие уравнения Эйнштейна для полученной нами метрики (точка над буквой означает первую производную по времени, т.е. скорость, а 2 точки — вторую производную, т.е. ускорение):

$$\begin{cases} \frac{3}{a^2}(\dot{a}^2 + k) = \frac{8\pi G}{c^2} \rho \\ \frac{1}{a^2}(2a\ddot{a} + \dot{a}^2 + k) = -8\pi G p. \end{cases}$$

Здесь p — изотропное (по необходимости) давление, а тензор энергии-импульса имеет вид $T_{\mu\nu} = \text{diag}(\rho, -p, -p, -p)$. Нагляднее будет переписать второе уравнение в виде

$$\frac{2}{a}\ddot{a} = -\frac{8\pi G p}{3}(\rho + 3p).$$

Вернемся к Эйнштейну. Статика требует, чтобы $\dot{a} = \ddot{a} = 0$, $\rho = \rho_0$. Кроме того, $p = 0$. Тогда из первого уравнения следует $k = 1$, а из второго — $k = 0$. Вывод: уравнения Эйнштейна не допускают такого решения. Назовем это ньютоновским фиаско.

Но, видно, самому Эйнштейну ужасно хотелось смастерить статическую вселенную (забыл сказать, что «вселенная» с маленькой буквы означает некую космологическую модель, тогда как Вселенная — это именно наша, та, в которой мы живем). И он решился изменить свои уравнения — ввел в них дополнительный член (не нарушая условия консервативности) и обозначил его заглавной греческой буквой Λ («лямбда»). Теперь мы так его и называем. Итак, новые уравнения Эйнштейна имеют вид

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (c = 1).$$

Соответственным образом модифицируется действие Гильберта:

$$S_{\text{grav}} = -\frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} dx.$$

Подстановка нашего космологического метрического тензора приводит к системе уравнений

$$\begin{cases} \Lambda = 4\pi G \rho_0 \\ \frac{k}{a_0^2} = \Lambda, \end{cases}$$

т.е. с необходимостью, $\Lambda > 0$, $k = 1$ и мир Эйнштейна (так часто называют эту модель) имеет геометрию трехмерной сферы постоянного (во времени) радиуса a_0 . Но тут Эйнштейна подстерегал страшный удар (это стало очевидным гораздо позднее). Его решение (потребовавшего отказа от возможности предельного перехода к ньютоновской теории) оказалось неустойчивым. Действительно, если перенести Λ -член в правую часть, то он будет играть роль эффективного давления (с противоположным знаком), а вышеприведенное уравнение для ускорения ($\ddot{a}$) — не зря я его написал! — превратится в

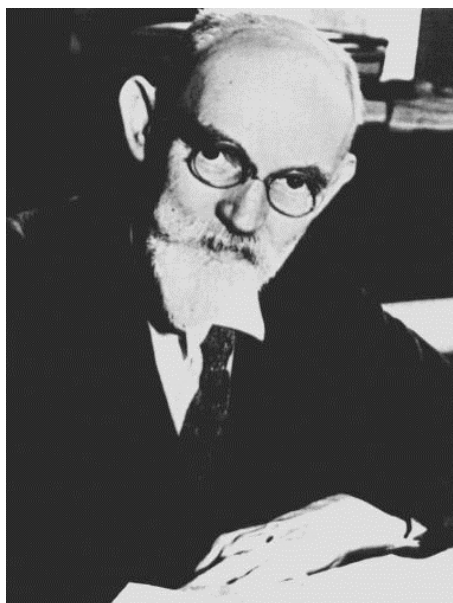
$$\frac{2}{a}\ddot{a} = -\frac{2}{3}(4\pi G\rho_0 - \Lambda).$$

При малейшем отклонении ρ_0 (флуктуация!) от равновесного значения вселенная начнет или безудержно сжиматься ($\rho > \rho_0$) или же безудержно расширяться ($\rho < \rho_0$), поскольку для пыли уравнение консервативности (будучи к тому же следствием уравнений Эйнштейна) говорит, что $\rho a^3 = \text{const.}$

Столько усилий и жертв — и на тебе! Космологическая модель оказалась, с точки зрения физики, несостоятельной. Сам Эйнштейн с горечью говорил потом об этом как о самом большом заблуждении в своей жизни!

А что же парадокс Ольберса? Казалось бы, хоть здесь все должно быть в порядке — ведь мир Эйнштейна имеет конечный объем. Значит, и число звезд не бесконечно. Но и тут, увы, полный провал. Статичность требует вечности как в будущем, так и в прошлом. Поэтому, даже после смерти конкретной звезды ее свет будет вечно странствовать в конечно замкнутой трехмерной сфере, создавая бесконечное количество изображений, достигающих глаз наблюдателя.

В том же, 1917 году, появилась статья голландского астронома и математика Вилема де Ситтера (Willem de Sitter 1872-1934) «On the curvature of space», Proc. Roy. Acad. Sci., (1917) 229-243.



В этой работе он предъявил научному сообществу статическое сферически симметричное решение уже модифицированных уравнений Эйнштейна с ...-членом в пустом пространстве (т.е. вовсе без материи). Решение было записано в виде

$$ds^2 = \cos^2 \frac{\rho}{R} dt^2 - d\rho^2 - R^2 \sin^2 \frac{\rho}{R} (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2),$$

$$\frac{1}{R^2} = \frac{\Lambda}{3}.$$

Очевидно, космологическая постоянная здесь должна быть положительной. Эйнштейн (1918 г.) раскритиковал решение де Ситтера на том основании, что оно имеет сингулярность при $\rho/R =$

$\pi/2$, но впоследствии оказалось, что сингулярность эта связана с тем, что выбранная координаты не покрывают полностью пространство-время, доступное световым лучам — такая особенность искривленного многообразия еще доставит физикам-гравитационистам немало хлопот. На самом же деле, Эйнштейну очень не понравилось, что пустое пространство-время имеет кривизну.

Мы можем сделать замену переменной $R \sin(\rho/R) = r$ и переписать решение де Ситтера в виде:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\Lambda}{3} r^2\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{\Lambda}{3} r^2} - r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2).$$

Эта запись, во-первых, более наглядна, т.к. r по определению, есть радиус сферы, а во-вторых, она допускает и отрицательные значения Λ . Исторически так сложилось, что при $\Lambda < 0$ решение называется анти-деситтеровским (сокращенно AdS).

Мы так надолго застряли на описании решении де Ситтера, потому что, как будет показано позже, полное многообразие окажется космологическим, и оно в современной космологии играет огромную роль, причем Λ -член выступает в совершенно новой ипостаси.

Развенчание космологической модели Эйнштейна, пока еще неясное, началось в 1922 году с появлением статьи никому (в мировом научном сообществе) в то время неизвестного ученого из далекого и непонятного Петрограда в далекой и непонятной Советской России. Имя этого человека — Александр Александрович Фридман (1888—1925).

Его короткая жизнь совсем непохожа на размеренное бытие ученого в башне из слоновой кости. Талантливый математик, ученик академика Владимира Андреевича Стеклова, он выбрал не «чистую», а прикладную математику, занялся метеорологией. Успел повоевать и в Первую мировую, и в Гражданскую — летчиком-наблюдателем.

Петроград в 1920 году. Где и познакомился с Всеволодом Фредериксом, который рассказал ему об общей теории относительности. Фредерикс во время Первой мировой войны был в Германии в качестве «гражданского пленного», учился у Пауля Эренфеста, работал в Геттингене с Давидом Гильбертом, так что знал об этом, что называется, из первых

рук. А уже в 1922 году у Фридмана была готова знаменитая работа «О кривизне пространства» — “Über die Krümmung des Raumes” Zeitschrift für Physik, **10** (1922) 377–386.

С этой статьей связана не менее знаменитая история. Фридман послал русскоязычный вариант статьи своему другу, известному физику-теоретику Паулю Эренфесту, который в то время был профессором Лейденского университета в Голландии. Эренфест хорошо знал русский язык, его жена была русской — Татьяна Афанасьева-Эренфест — тоже физик-теоретик, так что с переводом на хороший немецкий проблем не возникло. Эренфест и направил статью в престижный журнал. Видимо, он же обратил внимание своего друга Альберта Эйнштейна на эту статью (Эйнштейн также работал в Лейденском университете короткое время). Реакция Эйнштейна была очень резкой. Он напечатал в том же журнале заметку в духе «этого не может быть, потому что не может быть никогда», хотя честно признался, что сам математические выкладки не проверял, но уверен, что господин Фридман ошибся. Уязвленный Фридман написал Эйнштейну письмо, но тот находился в длительном путешествии — ответа не последовало. Тогда Фридман еще одно очень пространное письмо и вручил его питерскому физику-теоретику Юрию Круткову, который как раз отправлялся в заграничную



командировку. В мае 1923 года Крутков встретился с Эйнштейном в Лейдене на квартире Пауля Эренфеста, где долго и подробно объяснял весь ход математических выкладок Фридмана, И убедил. Эйнштейн тут же послал в редакцию все того же журнала опровержение на самого себя. Смысл его: Фридман прав, а я ошибался. Вот она, научная порядочность! Крутков же записал в дневнике: «Победил Эйнштейна в споре. Честь Петрограда спасена».

В своей статье 1922 года Фридман рассмотрел только два случая: пространство положительной кривизны (трехмерная сфера, $k = +1$) и нулевой кривизны (пространственно плоская модель, $k = 0$). По воспоминаниям знаменитого питерского физика теоретика академика Владимира Александровича Фока, он, будучи аспирантом Фридмана, переводил на немецкий язык письмо к Эйнштейну (то ли первое, то ли второе, а, возможно, и оба). И именно Фок указал Фридману, что существует еще одно однородное и изотропное трехмерное пространство — гиперboloид вращения, имеющий постоянную отрицательную кривизну ($k = -1$). И в 1924 году появляется вторая космологическая статья Фридмана (*“Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes” Zeitschrift für Physik, 21 (1924) 326–332*).



В 1988 году мы отметили столетие Александра Александровича большой международной конференцией в Питере (тогда — Ленинграде). Эта конференция собрала весь цвет мирового сообщества космологов. Одним из «культурных мероприятий» было посещение могилы А.А.Фридмана на Смоленском кладбище. А на банкете член Оргкомитета конференции профессор Андрей Анатольевич Гриб рассказал нам о перипетиях ее поиска. Ясно, что после прошедшей разрушительной войны и блокады Ленинграда шансы найти могилу в целостности и сохранности были близки к нулю. Когда, отчаявшись, Гриб и его коллеги обратились к кладбищенскому сторожу с просьбой поискать возможные записи в уцелевших гробницах, тот неожиданно спросил: «Это какого Фридмана вы ищете? Того, кто решил уравнения Эйнштейна без Λ -члена? Так я ее уже нашел и привел в порядок». Изумлению не было предела. Оказалось, что молодой человек в недавнем прошлом был студентом физического факультета Ленинградского государственного университета. Чудеса, да и только!

На самом деле, расхожее мнение, что Фридман отбросил космологический член, неверно. Оказывается, он получил общее решение космо-

логических уравнений Эйнштейна именно с Λ -членом, которое оказалось нестационарным, показав тем самым (неявно), что мир Эйнштейна неустойчив. Он подробно исследовал все возможные ситуации: когда вселенная пульсирует, начиная расширяться из состояния с нулевым объемом, достигая максимума, а затем сжимаясь, когда вселенная бесконечно расширяется, начиная с малого, но конечного объема и т.д. В.А.Фок вспоминал слова Фридмана: «Мое дело — указать возможные решения уравнений Эйнштейна, а там пусть физики делают с этими решениями, что хотят». Тем не менее, сам Фридман явно предпочитал пульсирующий вариант, напоминающий ему сказание индусской мифологии и переходах жизни. В своей книге «Мир как пространство и время» он писал: «Является возможным также говорить о сотворении мира «из ничего», но все это пока должно

рассматривать как курьезные факты, не могущие быть солидно подтвержденными недостаточным астрономическим экспериментальным материалом». О рождении вселенной «из ничего» у нас еще будет повод поговорить. А пока — вот портрет Александра Александровича Фридмана, выполненный художником М.М.Девятаевым, выставленный в Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова в Санкт-Петербурге.

Девизом А.А.Фридмана была строка из Данте: «Воды, в которые я вступаю, не пересекал еще никто».

Великое открытие Фридмана осталось практически не замеченным мировым научным сообществом (исключая, разумеется, Пауля Эренфеста и Альберта Эйнштейна). Возможно, сказался языковой барьер — статьи были опубликованы на немецком. Разумеется, о нем знали физики в Советском Союзе. Но активная воинствующая атеистическая пропаганда делала опасным даже просто обсуждение космологической теории, в которой наша Вселенная имеет начало. И ее называли не иначе как «реакционная теория Леметра».

А почему «Леметра», и кто такой Леметр?

Его полное имя Жорж Анри Жозеф Эдуард Леметр (George Henri Joseph Edward Lemaitre 1894—1966), бельгиец, блестящий математик и космолог. К тому же еще и священник в сане аббата (а позднее — прелата), и эта его ипостась сильно раздражала многих ученых, не говоря уже о советских философах-«всезнаек». В 1927 году он «переоткрыл» модели Фридмана, но пошел дальше. Он понял, что однородность и изотропия диктуют совершенно неожиданную и потрясающе простую связь расстояния до космологического объекта (тогда — галактики) и скорости его удаления от нас. Действительно, пусть r — сопутствующая координата объекта. Тогда расстояние D до него равно



$$D = a(t) \int_0^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}} = a(t)l(r_0). \quad (1)$$

Скорость $v = \dot{D}$ есть

$$v = \dot{D} = \dot{a}l(r_0) = \frac{\dot{a}}{a}D = HD.$$

т.е. в данный (космологический) момент времени скорости разбегания галактик пропорциональны расстоянию до них. И что парадоксально для нас, жителей Земли, что то же будет видно отовсюду. Такова кинематика Вселенной! И это было опубликовано в бельгийском журнале на французском языке. Вот ссылка: “Un Univers homogene de masse constante et de rayon croissant reudante compt de la vitesse radiale des nebulauses extragalactic”. *Annales de la Societe scientifique de Bruxelles, serie A: sciences mathematique*, 1927, XLVII, 49-59. Но позднее, при переводе статьи на английский, Леметр попросил убрать ту ее часть, где было доказательство именно этого, посчитав, что наблюдательный данных еще недостаточно для подобного необычного утверждения.

Леметр утверждал, что это явление — вовсе не разбегание галактик (как было бы гораздо привычней представлять), а расширение самого пространства, что было совершенно революционно для его времени. Но с чего же началось такое расширение — с очень и очень маленького объема и очень и очень простого. А что может быть проще, по Леметру, («неделимого») атома? И он предлагает (1946 г.) идею первичного атома, который, как-то и когда-то возникнув, тотчас же взрывается. Идеи Леметра получили широкое распространение и вызвали бурю критики. Знаменитый английский физик-теоретик Фред Хойл в своих популярных лекциях по радио даже придумал ироническое название «Big Bang». На русский язык мы его привычно переводим как «Большой

Взрыв», не чувствуя при этом никакой иронии. Но англичане заразительно смеются. Разгадку этому я нашел совсем недавно во время просмотра английского фильма, где была показана клоунада в цирке шапито. Клоун дует в трубу, пытаясь извлечь из нее звуки, но вместо ожидаемого грома распускается вымпел с надписью «Bang!». Оказывается, это слово означает просто звук взрыва «бах!», т.е. правильнее было бы «Big Bang» переводить как «Большой Бабах!», а это уже смешно.

Идея расширения Вселенной возникла у Леметра не на пустом месте. После окончания университета он стажировался в английском Кембридже у Артура Эддингтона, а затем в Америке, где познакомился с Эдвином Хабблом и другими американскими астрономами, измерявшими скорости галактик по красному смещению (эффект Доплера).



В 1929 году (т.е. через 2 года после публикации статьи Леметра) Хаббл (Edwin Hubble 1898-1953) подытожил результаты многолетней кропотливой работы и эмпирически вывел закон пропорциональности скоростей и расстояний до близких к нам галактик (до которых мог дотянуться его телескоп). И этот закон носит имя Хаббла, а величина $H = \dot{a}/a$ называется постоянной Хаббла (постоянная она лишь в пространстве, но не во времени, но космологически значимые промежутки времени — это вечность по сравнению с продолжительностью человеческой жизни). В наше время количество наблюдаемых галактик исчисляется уже не десятками, а десятками (если не сотнями) миллиардов, а мы с наслаждением рассматриваем фотографии многих из них, сделанные космическим телескопом «Хаббл».

В 1934 году закончилась длинная эпопея создания ньютоновской космологической модели. И это было напрямую связано с перипетиями вокруг релятивистской модели Эйнштейна. Перечислим еще раз требования, которым должна была удовлетворять космологическая теория Эйнштейна, призванная описывать реальную наблюдаемую Вселенную:

1. Вселенная однородна и изотропна (космологический принцип)
2. Вселенная заполнена пылью, т.е. частицами, взаимодействующими только гравитационно
3. Статичность

Мы убедились, что требование статичности оказалось несовместимым с первыми двумя и с уравнениями общей теории относительности. Не спасло даже «изобретение» Эйнштейном Λ -члена — решение нашлось, но оно оказалось неустойчивым, т.е. физически неприемлемым.

Требования Ньютона к космологической модели были в точности те же. И решения тоже не нашлось. Может быть, и тогда все дело было в условии статичности? Оказалось, да!

Появились, одна за другой, две статьи английских физиков-теоретиков Е.Милна и У. Мак-

Кри Е.А. Milne. “A Newtonian Expanding Universe”. Quart. J. Math. Oxford, 5 (1934) 64-72 W.H. McCrea, E.A. Milne. “Newtonian Universe and the Curvature of Space”. Quart. J. Math. Oxford, 5 (1934) 73-80, в которых были получены нестационарные решения для ньютоновской космологии, удовлетворяющие первым двум требованиям. Космологическая задача была, наконец-то, решена.

Удивительным оказался не сам этот факт, а то, что уравнения — значит, и решения — в точности совпали с уравнениями, полученными Фридманом (а затем и Леметром). Различие в том, что в моделях Фридмана-Леметра временная координата есть время, измеряемое наблюдателями, «сидящим» на частицах пыли (сопутствующими наблюдателями), а у Милна и МакКри — это ньютоновское абсолютное время. Формально, есть и еще одно различие. Совпадают лишь уравнения для ускорения, $\ddot{a}$. Но и там, и там есть, к тому же, условие консервативности, т.е. гидродинамическое уравнение неразрывности, которое требует, чтобы $\rho \propto 1/a^3$. Но в эйнштейновской теории оно следует из гравитационных уравнения и структуры тензора энергии-импульса, а в ньютоновской теории его нужно добавить отдельно. А дальше — что в лоб, что по лбу. Более того, авторы сумели получить космологические уравнения с Λ -членом, добавив к ньютоновскому закону обратных квадратов для гравитационного притяжения еще и гравитационное отталкивание, пропорциональное расстоянию. Оказывается, это чудо вовсе не случайное. Все дело в том, что в моделях Фридмана-Леметра была выбрана самая простая из возможных система отсчета — сопутствующая. Скорость вещества (пыли) в ней равна нулю. А в общей теории относительности в малых масштабах и малых скоростях справедлива механика и гравитация Ньютона. В ньютоновской теории тяготения источником гравитации является плотность массы. И здесь — пыль с нулевым давлением, поэтому в тензор энергии-импульса — источник гравитационного поля — входит только плотность энергии (= плотность массы). Отсюда — «чудесное» совпадение. Если же добавить давление, то «чудо» испарится. Но в наблюдаемой в настоящее время Вселенной давлению неоткуда взяться.

Выше мы воочию убедились, как требования однородности и изотропности существенно облегчают жизнь космологов и позволяют получать и подробно исследовать решения космологических уравнений не только в общей теории относительности (в том числе модифицированной Λ -членом), но и в плоском абсолютном ньютоновом пространстве. Но ведь этими же свойствами обладает и «пустое» плоское четырехмерное пространство-время Минковского. Следовательно, интервал Минковского также может быть записан в «космологических» координатах. Чтобы найти конкретный вид масштабного фактора $a(t)$ в этом случае, необходимо вычислить в такой метрике компоненты тензора кривизны Римана и приравнять их нулю. Но можно сделать и иначе. Ясно, что в плоском пространстве-времени будут равны и свертки тензора кривизны, тензор Риччи и скаляр кривизны. Значит, будут выполнены и космологические уравнения Эйнштейна в пустоте — частном случае уравнений Фридмана:

$$\begin{cases} \frac{3}{a^2}(\dot{a}^2 + k) = 0 \\ \frac{1}{a^2}(2a\ddot{a} + \dot{a}^2 + k) = 0. \end{cases}$$

Очевидно, что решение существует только при $k = -1$, и оно гласит

$$a = t_0 \pm t.$$

При знаке «минус» мы получаем сжатие до нулевого объема за конечное космологическое время, а при знаке «плюс» бесконечное расширение. Интересно, что «космологическое» представление пространства-времени Минковского существует только при постоянной отрицательной кривизне пространство. Первым это заметил Милн, который в 1948 году даже предложил кинематическую (т.е. без динамики) специально-релятивистскую космологическую модель.

Оказывается, в таком же космологическом виде можно представить и решение де Ситтера,

подставив в правую часть предыдущей системы уравнений вместо нулей — Λ -член, т.е.

$$\begin{cases} \frac{3}{a^2}(\dot{a}^2 + k) = \Lambda \\ \frac{1}{a^2}(2a\ddot{a} + \dot{a}^2 + k) = \Lambda. \end{cases}$$

При $\Lambda > 0$ решение имеется при всех возможных значениях $k = \pm 1, 0$, именно, $a = a_0 \cosh(t/a_0)$ при $k = +1$, $a = a_0 \exp(\pm t/a_0)$ при $k = 0$ и $a = \sinh(t/a_0)$ при $k = -1$, и везде $1/a_0^2 = \Lambda/3$. Но только при $k = 1$ «космологические» координаты покрывают геодезически полное пространство-время де Ситтера. Если же $\Lambda < 0$, то, очевидно, решение существует только при $k = -1$, $a = a_0 \sin(t/a_0)$, $1/a_0^2 = -\Lambda/3$. Кстати, сама возможность такой записи решений де Ситтера и анти-де Ситтера означают, что они однородны и изотропны. Именно в этой — космологической — форме решение де Ситтера окажется задействованным в современной космологии, и его роль трудно переоценить. Правда, интерпретация Λ -члена изменится — с волюнтаристски математической на чисто физическую, он будет описывать энергию физического вакуума квантовых полей. Рассказ об этом — впереди.

Интересно получается. До Ньютона космология (если так это можно назвать) была умозрительной и чисто геометрической. Ньютон внес в нее физику — универсальное гравитационное взаимодействие населяющий Вселенную тел. Но не преуспел в построении космологической модели (из-за настойчивого требования статичности для Вселенной) и «отложил» это аж до 1934 года, когда два других англичанина, Милн и МакКри, выполнили работу за него. Заметим, кстати, что найденные решения, хотя и идентичные фридмановским, ни в коем случае не могут их заменить в качестве модели реальной Вселенной, т.к. скорости частиц в них не ограничены скоростью света, что противоречит прекрасно подтвержденной экспериментально специальной теории относительности. Но мы немного отвлеклись. После создания Эйнштейном общей теории относительности гравитационная физика Ньютона превратилась в геометрию, которая, правда, определяется динамикой, и не только гравитационной, материи, т.е. физикой тоже.

Но космология все-таки возвратилась в геометрию. А вот вернуть физику в космологию выпало Георгию Антоновичу Гамову (1904-1968).



Родился в России в Одессе (сейчас — Украина), поступил в Новороссийский (Одесский) университет, продолжил учебу в Петрограде, где был учеником А.А.Фридмана. Талантливейший физик-теоретик, он еще в молодые годы получил мировую известность, сумев объяснить . . . — распад ядер квантовым подбарьерным туннелированием ядер гелия. Работа, достойная Нобелевской премии, которую Гамов так и не получил. Тонкий знаток и квантовой механики, и ядерной физики, с прекрасным физическим чутьем. В 1933 году Гамов решил не возвращаться в СССР из очередной заграничной командировки. Обосновался, в конце концов, в Америке. Там он выполнил ряд блестящих работ (часть из них — вместе со своим другом Эдвардом Теллером, будущим «отцом» американской водородной бомбы) по нуклеосинтезу в звездах как источника их светимости. Во время Второй мировой войны сблизился с Альбертом Эйнштейном (обоих не допустили к участию в Манхэттенском проекте), обсуждая с ним, в том числе, и космологические проблемы. Видимо, тогда он и вспомнил о своей студенческой молодости и о своем учителе Фридмане. Результат — Гамов всерьез занялся космологией.

Судя по всему, он рассуждал, примерно, следующим образом. Сейчас Вселенная расширяется, и она очень хорошо описывается однородной и изотропной моделью Фридмана, в которой материя пылевидна, т.е. ее частицы-галактики взаимодействуют друг с другом только гравитационно. Но повернем время вспять. Раньше плотность вещества была выше, еще раньше — еще выше. Значит, в прошлом было время, когда уже нельзя считать вещество пылью, нужно учитывать и негравитационные взаимодействия, которые можно описать введением в тензор энергии-импульса давления. А дальше — законы термодинамике. Должна повышаться температура. Тем меньше Вселенная — тем горячее. Должны начаться ядерные реакции. И так до самого конца, до Большого Взрыва, который и есть начало — состояние с бесконечно высокой температурой и бесконечной плотностью.

И вот в 1947 году Гамов предлагает модель горячей Вселенной. Немного погодя после Большого взрыва Вселенная представляла собой бульон из протонов, нейтронов, электронов и, конечно же, фотонов (ведь протоны и электроны несут электрический заряд, между ними есть электромагнитное взаимодействие). Это очень и очень горячая плазма. Откуда взялись эти частицы — непонятно, о кварках, калибровочных полях и прочей премудрости тогда и не догадывались. Об этом хорошо рассказано в книге Нобелевского лауреата Стивена Вайнберга «Первые три минуты». Но через три минуты после Большого взрыва весь этот набор частиц уже существовал. Вселенная продолжает остывать. Наконец, она остыла настолько (через 380 000 лет), что могли образовываться атомы водорода. И тут сработала гениальная физическая интуиция Гамова. Поскольку атомы электрически нейтральны, Вселенная становится прозрачной для фотонов. «И отделил Бог свет от тьмы». Теперь свет остывает отдельно, а атомы — отдельно. Все дело в том, что уравнение консервативности (закон сохранения энергии) требует для пыли с уравнением состояния $p = 0$, чтобы $\varepsilon \propto 1/a^3$, а для фотонного газа с уравнением состояния $p = \varepsilon/3$, — чтобы $\varepsilon \propto 1/a^4$. Здесь ε — плотность энергии, p — давление, a — масштабный фактор. Поэтому, должен существовать в настоящее время остаточный (реликтовый) фон излучения, однородный и изотропный, с определенной температурой, которую, в принципе, можно вычислить. Это и есть великое предсказание Гамова.

Несколько слов о парадоксе Ольберса. В модели горячей Вселенной он решается просто и изящно: было время, когда звезд не было! Плюс к этому — красное смещение вследствие расширения.

Нужно сказать, что модель Гамова не была принята сразу и бесповоротно. Ей долгое время противостояла модель холодной Вселенной, развиваемая в Москве академиком Яковом Борисовичем Зельдовичем с сотрудниками. Целом, все то же самое, но без высоких температур и, конечно же, без реликтового излучения. Победил Гамов, когда этот самый однородный и изотропный микроволновый реликтовый фон был обнаружен Арно Пензиасом и Робертом Вудро Вильсоном в 1965 году. Пензиас и Вильсон заслуженно получили Нобелевскую премию в 1978 году.

Неизбежность Большого Взрыва, которая так явно демонстрировалась моделями однородной

и изотропной вселенной, так пугала многих физиков-теоретиков, что в 1948 году английские физики Фред Хойл, Герман Бонди и Томас Голд (Хойл — тот самый, что придумал термин «Big Bang») предприняли попытку возврата к стационарности. Заметьте, к стационарности, а не к кондовой статичности. Разница в том, что они захотели сделать так, чтобы «и волки были сыты, и овцы целы», т.е. чтобы вселенная расширялась (красное смещение спектров галактик никто не отменил), но плотность вещества в ней оставалась постоянной (так удавалось избежать гадкого и непонятного Большого взрыва). Но разве так можно? Можно! — заявили они, если добавлять частицы по мере расширения вселенной, т.е. рождасть их неким полем. Позднее Фред Хойл и его ученик Джаянт Нарликар представили развернутый вариант этой теории. К гравитационному полю и тензору энергии-импульса пыли они добавили еще и новое, скалярное поле, обозвав его ...-полем (от английского «creation» — создание). Энергия для рождающихся частиц черпалась из энергии этого поля. Для того, чтобы процесс шел вечно (стационарность!), пришлось сделать кинетическую энергию ...-поля отрицательной. Это была попытка чисто классического описания квантового процесса рождения частиц. Попытка провалилась, когда обнаружилось неустойчивость модели при локальном сжатии.

Постепенно к теории Большого Взрыва накапливались вопросы, и очень серьезные. Почему наша Вселенная так однородна и изотропна? Если такое было всегда, то должно быть гигантское число причинно несвязанных областей (свет из одного куска просто не успел добежать до другого и сообщить о своем статусе однородности).

Почему наша Вселенная такая большая? О современных оценкам, плотность видимого вещества близка к критической, но, похоже, мы имеем дело с замкнутой, а не открытой моделью. Это формулируется как проблема плоскостности.

Есть и другие вопросы, задаваемые современной физикой элементарных частиц. Для нас здесь важно, что требуются очень специальные начальные условия для получения именно такой Вселенной, которую мы наблюдаем. Возникло подозрение, сама космологическая сингулярность — Большой Взрыв — с ее нулевым объемом и бесконечной плотностью вещества (и бесконечно горячей) есть артефакт чрезвычайно высокой симметрии (возможно, даже излишней) решения Фридмана.

Нет! — сказали английские теоретики Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг, доказавшие в 1965 году очень важные и ставшие знаменитыми теоремы о сингулярностях.



Сингулярности неизбежны, если для тензора энергии-импульса материи (правая часть уравнений Эйнштейна) выполняются так называемые условия энергодоминантности. Для однородной и изотропной вселенной это означает, что $\varepsilon > 0$, $\varepsilon + 3p > 0$. Напомним, что ε — плотность энергии (любой), а p — давление (это эффективное давление, не обязательно гидродинамическое), сюда же нужно включать и Λ -член, «перенесенный вправо».

Отметим, что в теории «стационарной вселенной» Хойла-Нарликара эти условия нарушаются из-за «неправильного» знака кинетического члена у C -поля. То же самое имеет место и для мира де Ситтера с положительным Λ -членом.

Поиском более общего космологического решения уравнений Эйнштейна озаботились советские физики-теоретики Евгений Михайлович Лифшиц, Исаак Маркович Халатников и Владимир Алексеевич Белинский — все из легендарной научной школы Льва Давыдовича Ландау.



Многолетняя работа дала свои плоды: было построено общее однородное решение. Но не изотропное! Характер анизотропии оказался осциллирующим (колебательным) по мере приближения к сингулярности: «одна ось сменить другую спешит...». Сразу же возник вопрос: а как же в таком случае получить сегодняшнюю явно однородную и изотропную Вселенную?

Решение предложил Яков Борисович Зельдович.

Зельдович — явление уникальное. Фактически самоучка, он стал академиком, трижды Героем Социалистического Труда. Один из зачинателей исследований физики горения, теории цепных ядерных реакций, активный (и незаменимый) участник создания советского атомного и ядерного оружия. Уже после возвращения в «мирную» теоретическую физику основал совершенно новую науку — релятивистскую астрофизику. Создал знаменитую на весь мир научную школу и воспитал многочисленную плеяду советских физиков-теоретиков. Один из его знаменитых учеников — Алексей Старобинский, которому посвящена третья, заключительная часть нашего повествования. Невиданная многогранность Якова Борисовича привела к тому, что за рубежом его воспринимали не иначе как «русский Бурбаки» (Бурбаки — большая группа французских математиков, поставивших себе целью сделать «правильной» всю математическую науку).



Так вот, Зельдович предложил рассматривать в качестве универсального инструмента «изотропизации» Вселенной квантовые процессы рождения частиц в сильных полях. Его соображения были опубликованы в статьях Я.Б. Зельдович, Письма в ЖЭТФ **9** (1970) 307; Ya. B. Zel'dovich and L.P. Pitaevsky, Comm. Math. Phys **23** (1971) 185.

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 2 // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2019. № 2. С. 44—63.

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 2. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 2, pp. 44–63.