

PACS numbers: 01.65.+g, 04.20.-q, 95.35.+d, 95.55.-n, 98.80.-k  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305i.0535

## История истории Вселенной

А.М. Черепашук

### 1. Введение

В этом обзоре мы опишем историю развития наших представлений о строении и эволюции Вселенной. Рассмотрим две революции в астрономии: переход от геоцентрической системы мира к гелиоцентрической, а также переход от модели стационарной Вселенной к модели нестационарной, расширяющейся Вселенной, прошедшей инфляционную стадию развития. Сейчас мы находимся на пороге третьей революции в астрономии, связанной с открытием ускоренного расширения Вселенной и осознания того факта, что барионное вещество составляет всего лишь около 4% от полной плотности материи во Вселенной. Выдающиеся достижения современной космологии поражают воображение (см., например, монографии [1–3]).

Представляет интерес вернуться к истокам развития астрономии и проследить, как формировалась современная космологическая модель Вселенной. Это особенно важно в связи с тем, что в последние годы в нашей стране всё более утверждается порочный принцип: "вперёд к прошлому". Под лозунгом возврата к древним традициям, к историческим корням нашего народа в стране возрождаются язычество и мракобесие. Подвергается нападкам материалистическое видение мира. Идёт выхолащивание естественнонаучных предметов из школьных образовательных программ. В частности, вот уже свыше 10 лет астрономия как отдельный предмет не преподаётся в российских школах. Телевидение, радио и другие средства массовой информации захлестнула волна воинствующего мракобесия. И сейчас мы имеем вполне закономерный результат: согласно опросам Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), доля граждан России, считающих, что Солнце вращается вокруг Земли, а не наоборот, возросла с 2007 по 2011 г. от 29% до 33% ([wciom.ru/index.php?id=459&uid=111345](http://wciom.ru/index.php?id=459&uid=111345)). Так что треть населения нашей страны придерживается средневековой точки зрения на мир, и, что очень печально, число таких людей растёт. Поэтому можно считать, что написание нашего обзора вполне своевременное.

### 2. Астрономия — древнейшая наука

Первые обнаруженные следы ранней астрономической деятельности человека относятся к VII–VIII тысячелетиям до нашей эры (н.э.) [4–6]. Как правило, это подвиги наблюдательных астрономических площадок, астрономические рисунки и изображения лунных календарей на стенах пещер. Например, древние майя наносили астрономические рисунки на стены пещер более шести тысячелетий назад [7, 8]. По-видимому, имеются свидетельства астрономической деятельности человека даже в XX тысячелетии до н.э., например, найденный в Ачинском жезл из кости мамонта с числом лунок в его орнаменте, соответствующим различным астрономиче-

ски значимым периодам [9]. Все эти следы относятся к так называемой доисторической астрономии.

Астрономическая деятельность человека, отражённая в письменных источниках, относится к исторической астрономии. Первые свидетельства исторической астрономии соответствуют II–III тысячелетиям до н.э. [10, с. 26].

В I тысячелетии до н.э. появляются первые попытки осознания Вселенной в целом как упорядоченного устройства, попытки понять её состав, собственные законы развития и даже происхождение.

Наиболее ранние дошедшие до нас такие идеи пробивались в религиозных космофизических "гимнах" — ведах — жителей древней Индии [11, 12]. Например, в древнеиндийской *Rigvede* — книге гимнов (X в. до н.э.) сказано, что Земля — это "обширное плоское пространство", покрытое сверху небом — "голубым сводом", усеянным звёздами [10, с. 47–51].

Попытки описать в целом Вселенную, в центре которой расположена плоская Земля, встречаются в хрониках древних придворных астрономов-чиновников Китая, в котором занятия астрономией были ответственной государственной службой [10, с. 37–43; 13, с. 93–104]. Но особенно ярко и многообразно такие попытки проявились в научных сочинениях-поэмах *О природе* (о сущности вещей) у первых натурфилософов и астрономов древней Греции, с её не вполне тоталитарным государственным устройством и наличием сравнительно большой свободы мышления [13, с. 107; 14].

Ранняя астрономия, помимо прикладного назначения (ориентация в пространстве и во времени, предсказания времени начала сельскохозяйственных работ и т.п.), носила культовый характер, что выражалось прежде всего в поклонении небесным светилам (первоначальные астральные формы религии), а также в толковании движений небесных тел и небесных явлений как сигналов с неба (зарождение астрологии).

Умение на основе наблюдений предсказывать некоторые периодические явления (например, солнечные и лунные затмения) делало астрономию в руках причастных к ней жрецов в тоталитарных государствах (наподобие Древнего Египта и Вавилонии в Месопотамии) большой политической силой. Поэтому культовая жреческая астрономическая деятельность была строго закреплённой.

### 3. Древнейшие идеи о "привычных" и новых формах материи во Вселенной

Древние мыслители старались свести всё многообразие наблюдаемого мира к немногим первичным элементам<sup>1</sup>. Обычно в качестве первооснов мыслились четыре сущности.

Прежде всего, это "земля", которой придавалась центральная роль.

Вторая первооснова — это "вода" как вечно движущаяся среда. Родоначальник греческой науки Фалес Милетский в VII в. до н.э. считал, что на воде и держится — плавает — тяжёлая плоская цилиндрическая Земля [10, с. 60; 13, с. 109].

А.М. Черепашук. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ  
E-mail: [cherepashchuk@gmail.com](mailto:cherepashchuk@gmail.com)

<sup>1</sup> Впоследствии этот принцип чётко сформулировал английский логик и философ XIV в. У. Оккам: "Сущности не следует умножать без необходимости". Так называемая бритва Оккама стала одним из руководящих принципов при построении теории и даже служила признаком её правильности.

Третья первооснова — это "воздух" как вездесущая субстанция, проявляющаяся в ветре и вихрях. Анаксимен в VI в. до н.э. полагал, что именно на вихре воздуха, как на подушке, держится Земля [10, с. 61].

Четвёртая первооснова — это "огонь" как наиболее лёгкая субстанция, проявляющаяся в небесных светилах. Так считали Анаксимандр (VII в. до н.э.), ученик Фалеса и учитель Анаксимена, а также пифагореец Гераклит Эфесский (V в. до н.э.) — огнепоклонник-зороастриец и родоначальник диалектики в философии [10, с. 61, 62; 15, с. 358–365].

Платон (IV в. до н.э.), древнегреческий философ, математик и астроном, добавил к четырём "земным" первоосновам-сущностям (земля, вода, воздух и огонь) пятую — особую "небесную" первооснову, пятую сущность ("квинтэссенцию"), дав ей имя "эфир" [10, с. 73, 74].

Древнеиндийские натурфилософы (IV в. до н.э.) выдвинули ещё одну любопытную идею. Они предположили, что некоторая невидимая мировая среда, которую они назвали "прана", обладает свойствами самодвижения и находится в состоянии "натяжения" (не напоминает ли это образ "пустой" Вселенной де Ситтера?) [10, с. 51].

Впервые материю представили как состоящую из микрочастиц-атомов Левкипп и Демокрит (V–IV в. до н.э.), различая их только по размерам и сложности формы, без её конкретизации [10, с. 67–72].

Количественные характеристики в понятие первоматерии (геометризацию) ввёл Платон, младший современник Левкиппа и Демокрита, основатель афинской академии (интересно отметить, что над входом в неё была предупреждающая надпись: "Не знающий геометрии да не войдёт сюда"). Платон придал частицам каждого первоэлемента форму одного из пяти правильных выпуклых многогранников ("платоновы тела"): куба (частицы земли), тетраэдра (частицы воздуха), октаэдра (частицы огня), икосаэдра — 20-гранника (частицы воды), додекаэдра — 12-гранника (частицы эфира) [10, с. 74].

#### 4. Плоская Земля в центре Мира

Древним мыслителям казалось очевидным, что Земля плоская, а сам человек ощущал себя находящимся в центре сферического небосвода. Поэтому первые модели Вселенной строились как геоцентрические — с плоской Землёй в её центре. Само возникновение Вселенной нередко связывалось с идеей первоначального жара (у древних индийцев, у греков). Особенно примечательна модель Вселенной Анаксимандра (VII в. до н.э.) [10, с. 60, 61] (рис. 1). Возникновение Вселенной Анаксимандр представлял как результат перегрева центрального тела — "зародыша" — и разрыва его на несколько колец ("космосов") из некоей непрозрачной материи, заполненных небесным огнём. Небесные светила — это щели в "космосах"-кольцах, через которые огонь просвечивает. Вселенная снаружи также окружена внешней огненной средой. При этом Солнце и Луна расположены выше звёзд. В центре Вселенной находится плоская, в форме цилиндра (по Фалесу), ойкумена (т.е. обитаемая земля), а в её центре — Греция. (Аналогично в Месопотамии центром мира изображался Вавилон, а в Китае — сама "Поднебесная" — отражение ещё более древней геоцентрической системы мира.)

#### 5. Сферическая Земля в центре Мира

Ещё в VI в. до н.э. Пифагор учил, что Земля имеет форму шара. Доказательством тому могла служить, например,



Рис. 1. Модель Вселенной Анаксимандра (VII в. до н.э.) с плоской Землёй в центре.

круглая тень Земли, наблюдаемая на диске Луны во время лунных затмений [10, с. 64]. Парменид [10, с. 66], а затем Аристотель [13, с. 126–128] считали шарообразной, сферической, всю Вселенную. На эту мысль их наводил не только округлый вид небосвода, но и круговые движения небесных тел. (Недаром греки наиболее совершенной среди форм считали сферу, а среди движений наиболее совершенными — равномерные круговые движения.)

Аристотель (384–322 гг. до н.э.) (рис. 2) впервые обобщил все накопленные в Греции и за её пределами знания о явлениях как на Земле, так и в космосе [10, с. 77–84] и оформил эти знания в первую в истории естествознания стройную, наблюдательно и физически обоснованную для своего времени геоцентрическую картину Мира. В центре Мира Аристотель поместил Землю как состоящую из наиболее тяжёлого элемента. Вокруг неё вращаются Солнце, Луна и пять известных тогда (видимых невооружённым глазом) планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Каждому из этих тел соответствует своя сфера, обращённая вокруг центральной Земли. Тело прикреплено к своей сфере, поэтому оно тоже движется вокруг Земли. Самой удалённой сферой, охватывающей все остальные, являлась восьмая, на которой располагались звёзды. Эта сфера также обращалась вокруг Земли в соответствии с наблюдаемым суточным движением неба. Согласно физической теории Аристотеля, небесные сферы, как и сами небесные тела, представлялись состоящими из небесного материала — эфира, который не имеет свойств тяжести или лёгкости и существует в вечном кругообразном движении.

Вершиной развития геоцентрической картины Мира стала математическая теория Птолемея (II в.) [16, 17] (рис. 3), которая благодаря своей точности просуществовала почти два тысячелетия и, позволяя составлять достаточно точные астрономические таблицы положений небесных тел — эфемериды, обеспечила первые великие географические открытия Колумба и Америго Веспуччи и первые кругосветные плавания Магеллана (XV в.).

Предшественником и вдохновителем Птолемея был великий родоначальник точной наблюдательно-теоретической древнегреческой астрономии Гиппарх [10, с. 88–



Рис. 2. Аристотель (384–322 гг. до н.э.).

92; 13, с. 137–142] (II в. до н.э.), который первым перешёл от моделирования небесных движений с помощью вращающихся сфер (с прикреплёнными на них телами) к описанию их как сочетания равномерных движений по круговым орбитам. Применяв метод Аполлония Пергского [10, с. 89] (III в. до н.э.) описания неравномерных движений путём сложения двух круговых равномерных движений (когда по одной, несущей, окружности (деференту) движется центр вторичной (эпицикла), на которой и укреплено исследуемое тело, отчего из центра деферента движение тела представляется неравномерным), Гиппарх показал, что при некоторых условиях движение по двум таким окружностям тождественно движению по одной окружности-эксцентрику. Центр последней оказывался несколько смещённым от Земли. Таким образом Гиппарх впервые смог объяснить открытое тремя веками ранее неравномерное движение Солнца, поскольку в его модели появились апогей и перигей, а затем и движение Луны. Но для исследования планет у него не было ещё достаточно материала.

Птолемей, астроном и географ, живший в Александрии (Египет), получил возможность более полно использовать наблюдательное наследие астрономов Вавилона и создал первую полную строгую математическую (геоцентрическую) теорию движения всех подвижных светил — Солнца, Луны и планет — и на её основе мог весьма точно (с точностью, достаточной для наблюдений неба невооружённым глазом) вычислять видимые положения светил на небе. А эта задача оказалась весьма непростой, поскольку, например, планеты, в отличие от звёзд, движутся по небу неравномерно и иногда даже петлеобразно. Планета может остановиться среди звёзд и начать затем двигаться в противоположном направлении, а потом вновь остановиться и вернуться к прежнему направлению движения. Наблюдателю, считающему, что он смотрит на планеты, находясь на центральной неподвижной Земле, было очень трудно понять такое сложное движение планет. Вполне возможно, что именно поэтому планетам в те времена приписывалась



Рис. 3. Птолемей (около 90–около 168).

мистическая роль "вершителей судеб" людей, что и послужило основой для возникновения астрологии.

В теории Птолемея [13, с. 147–157] каждая планета участвует в нескольких круговых движениях: по первой окружности, основной (деференту), движется центр вторичной (эпицикла), по ней — центр нового эпицикла, для которого она служит деферентом и т.д., а планета прикреплена к последнему, верхнему, эпициклу. Причём плоскости эпициклов и деферентов могут не совпадать, а некоторые — даже колебаться. Их сложение и даёт видимые траектории небесных тел. Говоря современным языком, теория Птолемея основывалась на разложении видимых траекторий небесных тел в ряды по сферическим функциям, типа рядов Фурье. Как отмечалось выше, математическая теория Птолемея неизменно и с хорошей точностью позволяла объяснять и предвычислять положения планет на небе и с немалой пользой служила людям на протяжении 14 веков (если считать от эпохи Птолемея). Теория Птолемея была освящена католической церковью и казалась незыблемой. Недаром арабские астрономы называли собрание трудов Птолемея *Альмагест* (Величайшее). Сам автор называл его намного скромнее: *Математике Мегале Синтаксис* (*Большое математическое построение*) [10, с. 93]. Уже в V в. труды Птолемея комментировали астрономы Индии. А получившие сочинение Птолемея как военный трофей в VII в., после падения античной цивилизации, астрономы Ближнего Востока сохранили этот труд, и благодаря им он стал доступен всему миру.

С укреплением новой, монотеистической, религии — христианства — геоцентрическая картина мира Аристотеля, вполне научная для своего времени, как и система мира Птолемея, сначала яростно отрицались католической церковью, как и всё языческое наследие эллинизма. Но в XIII в. (с подачи дальновидного теолога Фомы Аквинского, увидевшего в них опору и для христианства [10, с. 122; 18, с. 107–109]), эти системы были объединены в общее учение и превращены в религиозную догму, став на века тормозом для развития естествознания.



Сама теория Птолемея, которая с открытием новых неравномерностей в движении небесных тел обростала новыми и новыми эпициклами (число которых к началу XVI в. достигло 80), становилась непомерно громоздкой, свидетельствуя о приближении кризиса в общей астрономической картине мира. Теорию Птолемея пытались совершенствовать на Востоке (ещё при полном отсутствии контактов с Западом): Насирэддин (XIII в.) [10, с. 115, 116] с этой целью отказался от самого остроумного изобретения Птолемея — введения экванта, по существу прообраза второго закона Кеплера, тем самым сделав шаг назад, а двумя веками раньше энциклопедист Бируни даже глухо высказывался о возможности движения Земли [19].

В Западной Европе в XIII–XIV вв., несмотря на церковный запрет, также стали пробиваться идеи о возможности нецентрального положения и даже движения Земли. В середине XV в. немецкий математик, философ-космолог и крупнейший теолог Николай Кузанский (1401–1464) (добившийся высокого сана римского кардинала исключительно благодаря личным заслугам) в труде *Об учёном незнании* (1440 г.) изложил свою космологическую концепцию бесконечной изотропной Вселенной [20], провозгласив: "Центр Вселенной — везде, а граница — нигде". И далее: "Ни один звёздный участок не лишён жизни". Спустя полтора века его духовным наследником, развившим эту философскую картину до уровня поразительных конкретных астрономических предвидений, станет Джордано Бруно.

## 6. Гелиоцентрическая система

### Мира Николая Коперника

Разрушителем, казалось бы, незыблемой геоцентрической системы Мира (отчасти даже вопреки своим первоначальным намерениям) стал великий польский астроном Николай Коперник (1473–1543) [21–23] (рис. 4). Пленённый ещё в студенческие годы в Краковском университете математическим гением Птолемея, Коперник уже вскоре понял главный изъян птолемеевской геоцентрической теории — в ней был нарушен главный методологический принцип бритвы Оккама. Для каждого светила строились свои, не связанные между собой, системы эпициклов, что делало теорию не только громоздкой, но и внутренне раздробленной: отсутствовала единая причина видимых закономерностей движения тел. В исторических поисках Коперник обнаружил высказывания древних философов об иной причине наблюдавшихся явлений — движении самого наблюдателя вместе с Землёй вокруг другого центра мира (мифического центрального священного очага — Гестии — у пифагорейцев (VI–V вв. до н.э. [10, с. 64]), или вокруг гораздо более реалистического тела — Солнца — в гипотезе александрийца Аристарха Самосского (III в. до н.э. [24])).

Энтузиазм Коперника в работе над новой теорией, которой он занялся уже в годы продолжения учёбы в Италии в начале XVI в., подогрело и обращение к нему как к уже известному математику и астроному отцов римской церкви после Латеранского собора 1512 г. с просьбой заняться подготовкой остро необходимой реформы юлианского календаря, непомерно разошедшегося с солнечным, что вносило сумятицу в расчёты главного церковного праздника — Пасхи. (Такая реформа требовала прежде всего нового уточнения теории движения Солнца и Луны.)

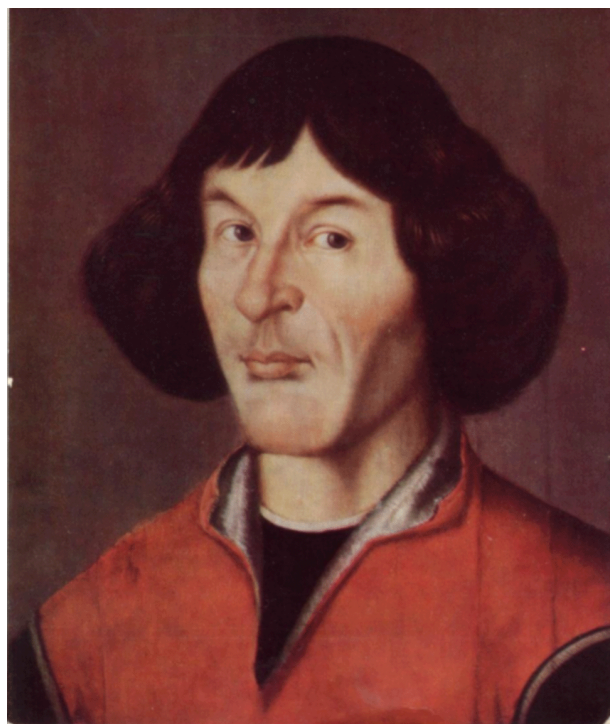


Рис. 4. Николай Коперник (1473–1543).

Таким образом, стимулами к созданию новой теории движения светил для Коперника стали прежде всего внутренняя логика развития науки, а также практические потребности тогдашней жизни, что вообще характерно для истории развития фундаментальных наук. Современные же высокопоставленные российские чиновники нередко требуют от нас, учёных, лишь исследований, напрямую задаваемых практическими нуждами. Вот, например, высказывание одного из них (заместителя председателя Комитета Государственной Думы РФ по науке и наукоёмким технологиям): "Промышленность исходя из рыночных потребностей должна ставить задачи перед прикладной наукой, а прикладная наука, опять же исходя из рыночных условий, должна ставить задачи перед фундаментальной наукой; это и должно определять финансирование фундаментальной науки". Таким образом, игнорируется общеизвестный факт, состоящий в том, что наука имеет свои законы развития, а научные знания обладают самостоятельной ценностью.

Основным положением своей теории Коперник избрал движение Земли вокруг Солнца. Чтобы достичь нужной точности описания движений планет, он был вынужден сохранить и в гелиоцентрической теории некоторое количество эпициклов (но только 34 против 80). Дело в том, что реальные орбиты планет — эллиптические, и движение по ним является неравномерным, однако Коперник по традиции оперировал лишь с равномерными движениями и круговыми орбитами. Поскольку в системе Мира Коперника наблюдатель следит за движением планет с движущейся Земли, сложные петлеобразные движения планет оказываются всего лишь отражением её годичного орбитального движения, результатом сложения векторов скоростей Земли и планет.

Это, кроме того, полностью развенчивало мистическую роль планет и лишало астрологию главного идейного базиса. Приходится лишь удивляться тому, насколько живучи средневековые предрассудки даже в

современной России, где астрология, этот грязный бизнес, основанный на словоблудии и наглom мошенничестве, царит едва ли не на всех наших каналах телевидения и радио. Астрологические "предсказания" наносят не только моральный, но и экономический вред: до трети выгодных контрактов упускаются российскими бизнесменами по той причине, что астрологи не рекомендуют в данный день заниматься бизнесом...

Таким образом, благодаря Копернику мы узнали, что не Земля, а Солнце занимает центральное положение в планетной системе.

Основные положения гелиоцентризма Коперник предварительно изложил в рукописном *Малом комментарии* (1515 г.) [25]. Полностью новую теорию он развил в главном фундаментальном труде, который закончил уже к 1530 г., но решился опубликовать лишь спустя многие годы под нажимом своих друзей — видных и достаточно образованных духовных деятелей. Перед этим её подробное популярное изложение опубликовал ученик Коперника Ретик под названием "Первый рассказ о книгах обращений" (1539 г.) [26], по которому впоследствии большинство читателей и узнавали о гелиоцентрической теории Коперника (полное сочинение, насыщенное математикой, было далеко не всем доступно). Готовый труд Коперника *О вращении небесных сфер* из шести больших разделов-"книг", напечатанный в Нюрнберге [27], был вручен умирающему учёному в день его кончины 24 мая 1543 г. После Коперника уже нельзя было рассматривать Землю как занимающую какое-то особое место в пространстве, как "подножие Бога". Наше положение в Мире ничем особым не выделено. Это общее утверждение называют принципом Коперника. По сути, Коперник заново "открыл" Землю — как рядовую шестую планету Солнечной системы (впрочем, выделенную до сих пор тем, что только на ней из всех тел системы имеется жизнь). Разделение Коперником движений небесных тел на кажущиеся (ввиду движения наблюдателя) и собственные стимулировало поиски законов этих истинных движений, которые и открыл в начале следующего века Кеплер, а затем эти законы обобщили создатели современной механики, начиная с Галилея и кончая Ньютоном, который вывел все три закона Кеплера из общего закона тяготения.

В теории Коперника оставался один принципиально важный вопрос, на который тогда не было ответа. Если далёкие звёзды находятся на разных расстояниях от Земли, то вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца должны наблюдаться регулярные параллактические смещения близких звёзд относительно более далёких. Во времена Коперника такие параллактические смещения звёзд не могли быть обнаружены. Но, как и его древнегреческий предшественник Аристарх Самосский, Коперник объяснял это практически бесконечной удалённостью звёздной сферы. Первые звёздные параллаксы удалось измерить лишь спустя три столетия [28] российскому астроному В.Я. Струве (у звезды Вега,  $\alpha$  Луг, 1837 г.), немецкому астроному Ф.В. Бесселю (у звезды  $\beta$  Суг, 1838 г.) и англичанину Т. Гендерсону (для  $\alpha$  Сен, в южном полушарии, несколько ранее 1839 г., но опубликовать свои измерения он смог лишь в 1839 г. после возвращения в Англию). Все три параллакса составляли лишь несколько малых долей секунды дуги. Это стало прямым свидетельством того, что звёзды удалены от нас на огромные расстояния: даже от ближайшей из них ( $\alpha$  Сен) свет идёт к нам 4,3 года.

Уже в первые десятилетия после опубликования сочинения Коперника его новая теория "заработала" как более эффективный математический метод описания движений небесных тел. Уже в 1551 г. немецким астрономом Э. Рейнгольдом были составлены первые гелиоцентрические планетные "Прусские таблицы" [10, с. 140, 150]. В 1582 г. была проведена, наконец, реформа календаря с переходом на новый стиль (устаревший юлианский календарь был заменён григорианским). Тогда же, в 1580-е годы, в ряде университетов некоторые астрономы начали читать лекции, опираясь на математическую теорию Коперника (первым стал швейцарский профессор математики и теологии, астроном и историк науки Х. Вурстейзен, высоко оценённый в дальнейшем Галилеем). Такому свободному на первых порах распространению теории Коперника способствовало и смягчавшее её революционную суть предисловие к книге лютеранского богослова Осиаандера, представившего теорию Коперника лишь как новую математическую модель мира.

Но уже в 1616 г. учение Коперника было запрещено католической церковью. И в дальнейшем учение Коперника, и в том числе открытые Кеплером в начале XVII в. истинные законы планетных движений, с трудом пробивало себе дорогу. Его церковный запрет официально просуществовал более 200 лет (был снят лишь в 1828 г.). Дело в том, что в те же 1580-е годы стало осознаваться подлинное мировоззренческое революционное содержание новой теории как системы мира, явно противоречившей Библии и догмам христианской религии. И первой яростную нетерпимость к новой теории проявила католическая церковь, представители которой, профессора европейских университетов, оказывались посрамлёнными в публичных диспутах с первым горячим пропагандистом новой системы мира, поражающим слушателей своими познаниями, смелостью мысли и силой убеждённости, недавним монахом, бежавшим из Неаполитанского монастыря, Джордано Бруно.

## 7. Борьба за гелиоцентризм

Первым борцом за гелиоцентризм, кроме того, расширившим и углубившим его смысл, стал гениальный итальянский мыслитель Джордано Бруно (1542–1600) (рис. 5). Последователь Николая Кузанского в космологии Бруно, признавая значение математического содержания новой теории Коперника, первым понял и её мировоззренческую ограниченность, поскольку гелиоцентризм у Коперника был утверждением центрального положения Солнца во всей Вселенной. Бруно заявил, что Солнце и Солнечная система — это одна из многих подобных систем во Вселенной, и также вслед за своим духовным учителем стал пропагандировать смелую идею о множественности обитаемых миров. В своём главном космологическом сочинении *О бесконечности, Вселенной и мирах* (1584 г.) [29] Джордано Бруно развил новые идеи о Вселенной, о самодвижении тел в ней, провидчески назвав своё учение "философией рассвета". Он описывал Вселенную, состоящую из множества солнц, вокруг которых обращаются планетные системы, на которых также может быть жизнь. Такого "богохульства" католическая церковь простить не могла. Выданный предателем в руки инквизиции, Джордано Бруно был брошен в тюрьму и после безнадежных попыток церкви добиться от него отречения от "заблуждений" сожжён на костре инквизиции в 1600 г. на площади

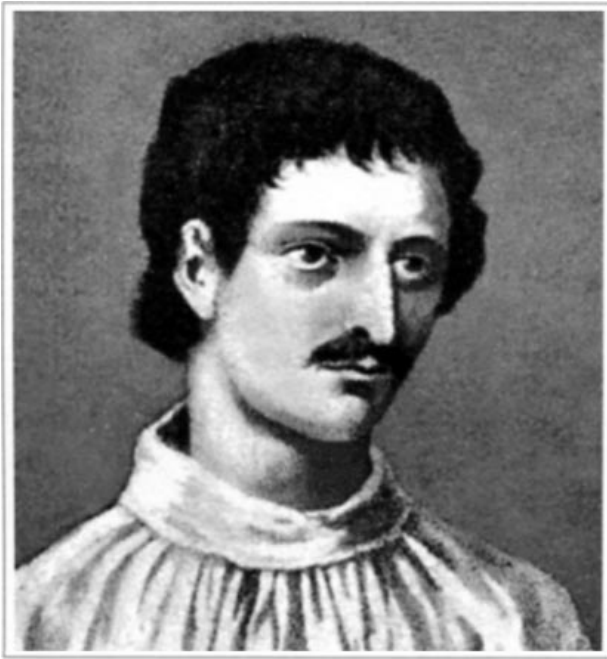


Рис. 5. Джордано Бруно (1548 – 1600).

Цветов в Риме... (В конце XIX в. на этом месте благодарное человечество установило ему памятник с надписью: "От столетия, которое он предвидел".)

И хотя в обвинительных протоколах десятков допросов Бруно в римской тюрьме, где он провёл последние семь лет жизни, защита множественности обитаемых миров выставилась главным обвинением против учёного, не менее болезненным и нетерпимым для церкви были выступления Бруно с критикой основных её догматов, а ещё более — его прямые призывы к Венецианскому правительству отобрать у церкви непомерные богатства её монастырей (о которых он знал не понаслышке, а из личного опыта). Как видим, времена идут, а нравы не меняются...

Будем надеяться, что наше нынешнее увлечение "древними традициями" не приведёт к повторению подобных акций по отношению к современным российским учёным: когда в 2007 г. 10 российских академиков подписали письмо на имя Президента России с протестом против введения предмета "Основы православной культуры" (читай — "Закон Божий") в светских школах России, в прессе появлялись гневные статьи, в которых предлагалось собрать всех этих нахальных 10 академиков на Лобном месте на Красной площади в Москве и отрубить им головы...

А недавно "православные активисты" потребовали запретить астрономию, так как она подрывает веру ([http://kremlnews.ru/posts.html?p2\\_articleid=1502](http://kremlnews.ru/posts.html?p2_articleid=1502)). Таким образом, современным российским религиозным радикалам не дают покоя лавры древних египетских жрецов, которые, как отмечалось выше, держали астрономические знания в строгом секрете и использовали их для укрепления своего политического и экономического могущества. Это удивительно, как тесно переплетаются эпохи, разнесённые во времени на многие тысячелетия!

Несколько лет назад В.И. Арнольд на приёме у Папы Римского, Иоанна Павла II в Ватикане спросил: "Галилей недавно оправдан церковью. Не пора ли оправдать и Джордано Бруно?" Понтифик ответил: "Почему бы и

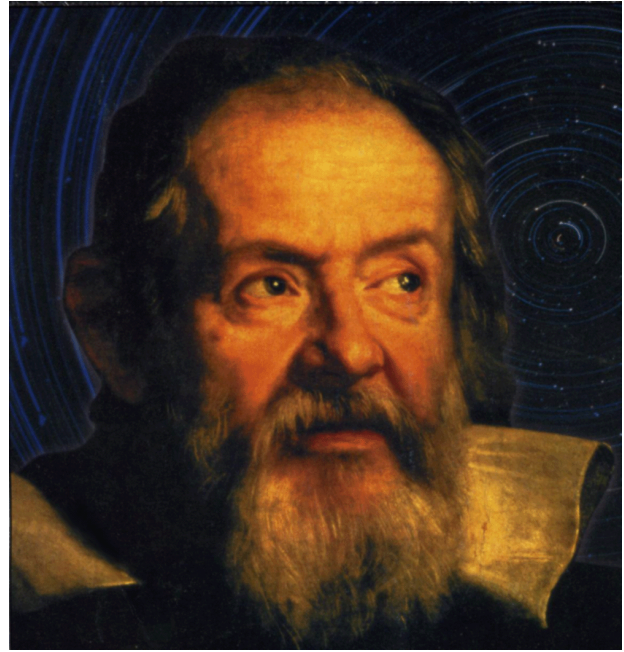


Рис. 6. Галилео Галилей (1564 – 1642).

нет, но докажете сначала существование жизни на других планетах". Сейчас открыто свыше 2000 планетных систем около других звёзд Галактики. Ставится на реальную основу поиск следов жизни на этих планетах, в частности поиск в спектрах атмосфер этих планет линий кислорода, метана, паров воды и углекислого газа, которые являются признаками наличия органических форм жизни.

Сильнейший удар по обветшавшей геоцентрической системе Мира — но уже методами наблюдательной астрономии — нанёс гениальный итальянский учёный Галилео Галилей (1564 – 1642) (рис. 6), положивший начало телескопической астрономии.

Очки с выпуклыми стеклами были изобретены в Италии ещё в конце XIII в. В 1450 г. также в Италии были изобретены очки с вогнутыми стеклами. К началу XVII в. в разных странах появились мастера, достигшие значительных успехов в развитии техники шлифовки и полирования стеклянных линз. Первая подозрительная труба с окуляром — отрицательной линзой, — дающая неперевернутое изображение, была изобретена в начале XVII в. в Голландии. Это изобретение связано с именами оптиков Якоба Метиуса, Захария Янсена и Липперсгея, которые даже попытались запатентовать его у правительства как важный военный прибор. Подзорные трубы появились также в продаже [30].

Узнав об этом, Галилей, будучи талантливым инженером, в 1609 г. по описанию сконструировал аналогичную трубу собственными силами (доведя увеличение от 8-кратного до 32-кратного) и одним из первых, навел её на небесные объекты. Однако именно Галилей, в отличие от других наблюдателей, первым увидел и понял, что эти наблюдения не только раскрывают подлинную природу небесных тел, но и подтверждают теорию Коперника. Приступив к наблюдениям в начале 1610 г., Галилей опубликовал первые результаты уже в марте того же года в своём знаменитом *Звёздном вестнике* [31]. Он увидел горы на Луне, обнаружил звёздный состав некоторых "облаков" Млечного Пути, а впоследствии открыл фазы



у Венеры (невозможные с точки зрения геоцентрической системы) и в числе первых — пятна на Солнце. Но главной сенсацией стало сообщение в *Звёздном вестнике* об открытии новых тел, обращающихся вокруг другой планеты, — четырёх "лун" у Юпитера. Это было первым наглядным опровержением геоцентризма (ведь единственным центром обращений тогда считалась Земля) и несомненным свидетельством в пользу гелиоцентрической системы Мира. Сделав это открытие, Галилей стал горячим защитником гелиоцентрической системы Мира Коперника.

Именно после того как стало широко известным письмо Галилея своему ученику Каstellи о солнечных пятнах (1613 г.), в котором Галилей явно склонялся к правоте Коперника, последовал в 1616 г. запрет католической церковью распространения гелиоцентрического учения Коперника (если оно не представлялось лишь удобным математическим методом). Сочинение Коперника было внесено в знаменитый *Индекс запрещённых книг* (*Index Librorum Prohibitorum*). Добившись после многих хлопот разрешения Рима на публикацию более осторожных рассуждений о теории Коперника, Галилей в фундаментальном труде *Диалог о двух главнейших системах Мира* (1632 г.), написанном в традиционной форме спокойной беседы трёх учёных, кроме того, на доступном его соотечественникам итальянском языке [32], убедительно показал преимущества гелиоцентризма. Это предрешило дальнейшую судьбу учёного. Сочинение почти сразу было запрещено, а его автор подвергся суровому осуждению со стороны инквизиции. В 1633 г. Галилей был вызван в Рим, арестован и предан публичному суду, на котором в унижительной форме (под угрозой пыток) 69-летнего учёного вынудили произнести отречение от своих "заблуждений". Все последние годы Галилей провёл под домашним арестом и присмотром представителей инквизиции в небольшом имении Арчетри под Флоренцией. Одно из преступлений, в котором инквизиция обвиняла Галилея, касалось формы и стиля его сочинений. Возмущало, что учёный пишет так, что это понятно обыкновенным людям. И всё же не сломленный духом Галилей успел переиздать свой труд в более терпимой тогда Голландии [33] (что, возможно, и породило легенду о якобы произнесённых им после своего осуждения слова: "А всё-таки она вертится!"). 2009 год, год 400-летия появления телескопа и первых телескопических наблюдений Галилея, человечество отметило как Всемирный год астрономии [34].

В 1609–1619 гг. другой убеждённый последователь Коперника, выдающийся немецкий астроном, современник и друг Галилея Иоганн Кеплер (1571–1630) (рис. 7) открыл три закона истинных движений планет. Основой для его открытий послужил богатый наблюдательный материал, главным образом по изучению движения Марса, накопленный и завещанный ему великим датским астрономом-наблюдателем Тихо Браге (1546–1601), в обсерватории которого Кеплер в последние годы жизни Тихо Браге служил вычислителем. Эти три закона планетных движений ныне хорошо известны. Первый гласит, что каждая планета обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого расположено Солнце; второй описывает характер изменения скорости тела на такой орбите; в третьем утверждается красивая математическая связь периодов обращений планет вокруг Солнца и их средних расстояний от Солнца. Эти открытия Кеплера навсегда покончили и с древней традицией "округленно-



Рис. 7. Иоганн Кеплер (1571–1630).

сти" орбит, и с многотысячелетним господством геоцентрической системы мира.

После открытий Галилея и Кеплера первая революция в естествознании (начатая в астрономии переходом от геоцентрической к гелиоцентрической системе Мира) продолжила своё победное развитие.

Знание законов планетных движений позволило Исааку Ньютону (1643–1727) (рис. 8) открыть закон всемирного тяготения. Ньютон был величайшим английским физиком, математиком, астрономом, конструктором-изобретателем, а также химиком и металлургом. Он решил очень трудную обратную задачу: по следствиям некоторого процесса (движению планет) восстановил причину, определяющую этот процесс. Причиной оказался знаменитый закон всемирного тяготения. Ньютон впервые доказал действие этого закона (по крайней мере на расстояниях, меньших расстояния до Луны) в 1666 г. На основе закона всемирного тяготения Ньютон построил новую космофизическую картину бесконечной Вселенной, которую он изложил в третьей части знаменитого труда *Математические начала натуральной философии* [35], изданного в 1687 г. Вопрос об уточнении закона тяготения Ньютона возникал неоднократно. Так, в середине XVIII в. при попытке описать очень сложное движение Луны (которая подвержена действию соизмеримых сил притяжения со стороны двух тел, Солнца и Земли, — и долгое время астрономов особенно настораживало вековое ускорение Луны) французский учёный Алексис Клод Клеро ввёл в закон Ньютона дополнительное слагаемое  $\varepsilon/r^3$ . В дальнейшем Клеро от этой идеи вынужден был отказаться. А вековое ускорение Луны объяснил П.С. Лаплас (1787 г.), доказав, что оно, как и все загадочные прежде неравенства в Солнечной системе, вызывавшие опасения относительно её устойчивости, носит периодический характер. Хотя следует отметить, что даже в наше время в солидных научных



Рис. 8. Исаак Ньютон (1643–1727).

журналах нередко появляются статьи, авторы которых предлагают различные варианты модифицированной ньютоновской динамики (Modified Newtonian Dynamics — MOND). Это делается, например, с целью объяснить очень быстрые движения галактик в скоплениях без привлечения гипотезы о наличии тёмной материи. Однако следует подчеркнуть, что все варианты MOND страдают общим недостатком: для каждой галактики и для каждого скопления галактик приходится вводить свою модификацию закона тяготения Ньютона, что делает MOND непривлекательной.

С открытием закона всемирного тяготения в физике надолго воцарилась идея дальнего действия центральных сил, в том числе главной вселенской силы — тяготения, действующей якобы мгновенно и через пустоту. При этом было быстро забыто, что сам Ньютон полагал, что осуществление тяготения требует некоторого посредника. Правда, он допускал не только материальную, но и нематериальную природу этого посредника.

Новую физику Ньютона высоко ценил и пропагандировал в своих трудах великий русский учёный-энциклопедист, поэт, государственный деятель и основатель науки в России Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765), хотя он одновременно был и одним из последних картезианцев, приняв, например, объяснение Декартом теплоты как результата движения частиц-атомов. Как прогрессивный мыслитель, Ломоносов был последователем и даже выступал защитником (что было ещё актуальным в России его времени) самой теории Коперника и идеи множественности обитаемых миров. В ярких стихотворных строках Ломоносов нарисовал впечатляющую картину Вселенной, единой по своим законам и наполненной очагами жизни и разума: "Открылась бездна звезд полна, звездам числа нет, бездне дна". Важным для установления единства законов природы было открытие М.В. Ломоносовым атмосферы у планеты Венеры на основе наблюдений прохождения её по диску Солнца (1761 г.) [36].

Ярким пропагандистом аналогичных идей, эволюции планет, борцом против "кометных" суеверий был извест-

ный физик и автор первой теории лунного вулканизма, петербургский академик Ф.У.Т. Эпинус, который, впервые проанализировав распределение теплоты по земному шару, предсказал (1761 г.) ещё и открытие южного полярного материка — Антарктиды. В 2009 г. по инициативе Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) именем Эпинуса был назван кратер в северной полярной области Луны.

## 8. Вселенная — мир звёзд. Наша Галактика

Согласно гипотезе Джордано Бруно, Солнце — это одна из звёзд Вселенной. В XVIII–XIX вв. учёные считали, что наша Галактика — это и есть вся Вселенная. Поэтому все усилия астрономов в то время были направлены на изучение состава и кинематики Галактики.

Одним из активнейших исследователей структуры Галактики был замечательный английский астроном Вильям Гершель (1738–1822) [37], превосходный наблюдатель, который сам строил телескопы-рефлекторы с зеркалами из бронзы (наибольший из построенных им телескопов имел зеркало диаметром 1,26 м и фокусное расстояние 12 м). В. Гершель с помощью телескопа открыл новую планету в Солнечной системе — Уран, а также наличие визуально-двойных звёзд в Галактике. В такой двойной системе звёзды-компоненты движутся вокруг общего центра масс по эллиптическим орбитам под действием взаимного притяжения, в соответствии с законом Ньютона.

Одним из главных научных достижений В. Гершеля является построение модели нашей Галактики на основе звёздных подсчётов ("черпков" звёзд). Гершель нарисовал модель Галактики в форме чечевицы с Солнцем в центре. Позднее Х. Шепли отнёс Солнце на расстояние в 8 кпк от центра Галактики и тем самым ещё раз подтвердил принцип Коперника: наше Солнце — рядовая звезда из сотен миллиардов звёзд Галактики, занимающая отнюдь не привилегированное (не центральное) место в Галактике. Начав одновременно с 1784 г. глобальные обзоры всего неба с целью выяснить общую структуру Вселенной, Гершель сразу открыл более 400 новых туманностей и предложил модель островной Вселенной.

К концу XIX–началу XX вв. наша Галактика была подробно исследована: определены её размеры (100 тыс. световых лет), изучены типы звёздного населения (звёзды плоской, промежуточной и сферической составляющей Галактики), исследованы звёздные скопления (шаровые и рассеянные), а также туманности. Была осуществлена спектральная классификация звёзд, что привело к построению знаменитой диаграммы Герцшпрунга–Рассела для звёзд, имеющей глубокий эволюционный смысл.

Были исследованы различные типы переменных звёзд, в том числе пульсирующих звёзд — цефеид. Построение зависимости период–светимость для цефеид дало мощный метод определения расстояний до звёзд. Изучение визуально-двойных, спектрально-двойных и затменно-двойных звёзд позволило дать надёжные определения масс, радиусов и светимостей звёзд разных типов. На этой основе была построена зависимость масса–светимость для звёзд, которая легла в основу проверки наших представлений о внутреннем строении и эволюции звёзд.



### 9. Эдвин Хаббл. Начало второй революции в астрономии: Вселенная — мир галактик

Вопрос об истинных размерах нашей Вселенной особенно остро встал в начале XX в., когда учёные задумались о природе многочисленных туманностей, которые они наблюдали в свои телескопы. В 1920 г. произошла знаменитая дискуссия между двумя авторитетнейшими американскими астрономами: Х. Шепли и Г. Кертисом [38]. Дискуссия касалась природы туманностей. Шепли утверждал, что все туманности — это газовые образования, расположенные в нашей Галактике. Кертис, напротив, считал, что многие туманности — это отдельные галактики, состоящие из миллиардов звёзд, и расположены они далеко за пределами нашей Галактики. По Кертису выходило, что наша Вселенная — это мир галактик, и её размеры во много раз превышают размеры Галактики. Каждый из этих выдающихся учёных приводил наблюдательные и теоретические аргументы в пользу своей концепции, однако они так и не смогли вместе прийти к однозначному выводу.

В 1917 г. в обсерватории Маунт-Вилсон в Калифорнии (США) был установлен крупнейший для того времени телескоп с главным зеркалом диаметром 2,5 м. На этом телескопе начал наблюдения выдающийся астроном XX столетия Эдвин Хаббл (США) (рис. 9). Используя фотографическую методику и выбирая ночи с наилучшим качеством изображения, Хаббл в 1923–1924 гг. впервые разрешил на отдельные звёзды три спиральных туманности, в том числе Туманность Андромеды (М31), и обнаружил среди них особые переменные цефеиды (для таких физических переменных пульсирующих звёзд к тому времени уже был разработан метод весьма точного определения расстояния до них по периоду изменения их блеска). Расстояние даже до М31, ближайшей из трёх, оказалось, по оценке Хаббла, равным 900 000 световых лет (по современным данным, это расстояние составляет около 2,4 млн световых лет). Таким образом, Хаббл доказал, что знаменитая туманность Андромеды, видимая невооружённым глазом на безлунном осеннем небе, находится вне Галактики и представляет собой гигантскую систему звёзд, сравнимую по размерам с нашей Галактикой [39]. Так широко были раздвинуты, благодаря введению в строй нового крупного телескопа, горизонты Вселенной, которая оказалась миром галактик. Галактики во Вселенной чаще всего входят в состав скоплений (содержащих от нескольких сотен до нескольких тысяч отдельных галактик), а скопления галактик образуют сверхскопления — самые крупные структурные единицы Вселенной. Наша Галактика вместе с галактикой Андромеды, а также примерно с четырьмя десятками других, менее крупных, галактик образуют Местную группу. Местная группа входит в скопление галактик в созвездии Дева, а это скопление составляет вместе с несколькими другими скоплениями систему, называемую Местным сверхскоплением, характерные размеры которого достигают многих десятков миллионов световых лет. Приблизительно так же устроены и другие скопления и сверхскопления галактик. Сверхскопления — это самые крупные образования, наблюдаемые во Вселенной. Важно то, что скопления и сверхскопления распределены в пространстве в среднем равномерно. Пространственная область диаметром 300 млн световых лет, начиная с которого распределение галактик в пространстве представляется в среднем однородным, называется ячейкой однородности. Если



Рис. 9. Эдвин Хаббл (1889–1953).

мысленно "размазать" светящееся (барионное) вещество равномерно по объёму ячейки однородности, то мы получим очень малую плотность, приблизительно  $10^{-31}$  г см<sup>-3</sup>, что соответствует примерно двум атомам водорода на область объёмом 10 м<sup>3</sup>.

Таким образом, открытие Хаббла в очередной раз подтвердило принцип Коперника: не только наше Солнце ничем не выделено в Галактике, но и сама Галактика ничем не выделена и является всего лишь одной из многих миллиардов галактик Вселенной. Осознание Вселенной как однородного (в среднем) мира миллиардов галактик — это настоящий прорыв в науке, по значению сопоставимый с коперниковской революцией.

### 10. Зарождение релятивистской космологии: Эйнштейн и Фридман

В 1916 г. Альберт Эйнштейн (1879–1955) (рис. 10) опубликовал общую теорию относительности (ОТО) [40], а в 1917 г. вышла в свет его первая космологическая работа [41], в которой развивалась модель стационарной Вселенной с  $\Lambda$ -членом. В то время Эйнштейн, как и другие исследователи, считал, что наша Вселенная — это содержащая сотни миллиардов звёзд Галактика, которая находится в стационарном состоянии. Но, к удивлению Эйнштейна, развитая им ОТО не позволяла получить стационарное решение. Поэтому Эйнштейн был вынужден ввести в уравнения ОТО новый член, который он обозначил как космологическую константу  $\Lambda$ . Вселенная Эйнштейна, описанная в его первой космологической работе 1917 года, — это вечная Вселенная в покое и без развития. Её трёхмерное пространство неевклидово и подобно сфере (точнее, гиперсфере). Эйнштейн считал, что это пространство должно иметь конечный объём и быть замкнутым в себе. Судя по всему, Эйнштейн был не вполне удовлетворён развитой им теорией. В конце статьи [41] он ещё раз подчёркивал, что космологическая постоянная "нам необходима для того, чтобы обеспечить возможность квазистатистического распределения материи, соответствующего фактически малым скоростям звёзд".



Рис. 10. Альберт Эйнштейн (1879–1955).

О возможности космологического расширения Вселенной первым сказал Александр Александрович Фридман (1888–1925) (рис. 11). В 1922 г., за семь лет до наблюдательного открытия Хабблом закона расширения Вселенной, Фридман рассмотрел модифицированные уравнения ОТО (с  $\Lambda$ -членом) и показал, что они допускают не только статический мир, но и мир, способный расширяться как целое или сжиматься. Свои космологические работы Фридман изложил в двух статьях: "О кривизне пространства" [42] в 1922 г. и "О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной" [43] в 1924 г. (см. также его научно-популярную книгу *Мир как пространство и время* [44] (1923 г.)). Описывая поведение мира во времени, Фридман отмечает: "Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев. Для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира... постоянно возрастает с течением времени. Возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто), затем снова из точки доводит радиус свой до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т.д." [44].

В 1922 г. работа Фридмана [42] по теории нестационарной Вселенной была подвергнута критике со стороны Эйнштейна [45]. Однако годом позднее Эйнштейн пересмотрел свою точку зрения и в заметке [46], опубликованной в том же научном журнале, заявил: "Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет". И действительно, благодаря работам Фридмана в космологии впервые появились динамика и развитие. Как Коперник "заставил" Землю двигаться, вращаться вокруг Солнца, так и Фридман "заставил" Вселенную двигаться, расширяться.

Независимо от А.А. Фридмана бельгийский астроном-теоретик Ж. Леметр (1894–1966), тогда недавний студент А. Эддингтона, а в дальнейшем член и президент Папской академии наук в Ватикане (он имел сан аббата), ознакомившись в США с наблюдаемыми Слайфером и



Рис. 11. А.А. Фридман (1888–1925).

Хабблом значительными красными смещениями в спектрах далёких галактик, в 1927 г. дал своё объяснение этому факту как общему расширению Вселенной [47]. Полнее свою теорию расширения Вселенной Леметр развил в 1933 г. [48]. Он построил свою модель изменения радиуса кривизны пространства со временем и рассмотрел развитие возмущений в космологических моделях, предшествовавших образованию скоплений галактик.

### 11. Закон Хаббла

В 1927–1929 гг. Эдвин Хаббл обнаружил, что галактики не стоят на месте, а удаляются от нас и друг от друга (за исключением самых близких галактик, таких как Туманность Андромеды). О разбегании "космических туманностей" ещё в 1917 г. писал американский астроном Весто Слайфер [49, 50] (как раз в год выхода статьи Эйнштейна [41] по теории стационарной Вселенной!). Слайфер обнаружил следующий замечательный факт: у 11 из 15 исследованных им спектроскопически туманностей линии в спектре смещены в красную часть спектра, при этом чем слабее туманность, тем сильнее линии в её спектре сдвинуты в сторону его красной области. Такое красное смещение, если его интерпретировать в рамках эффекта Доплера, указывает на разбегание галактик. Однако в то время ни расстояния до туманностей, ни их истинная природа ещё не были известны, поэтому в работе Слайфера ни слова не говорилось о космологии. Тем не менее семью годами позднее, в 1924 г., за два года до открытия Хаббла, Фридман обсуждал открытие Слайфера на одном из своих семинаров в Петроградском университете и рассматривал это открытие в космологическом контексте, указывая на него как на первое прямое наблюдательное свидетельство в пользу теории расширяющейся Вселенной (по словам участника семинара Д.Д. Иваненко [51]). Об открытии Слайфера было сообщено в издававшемся в те годы в СССР научно-популярном журнале *Мироведение* (апрельский номер 1923 г.).

К 1927 г. Хаббл благодаря своим исследованиям уже знал, что многие туманности, наблюдаемые в телескоп, — это далёкие галактики. Кроме того, наблюдая переменные звёзды-цефеиды и ярчайшие звёзды в близких галактиках, он смог определить расстояния до многих из них. Воспользовавшись опубликованными данными Слайфера, а также Хьюмаса [52] о лучевых скоростях этих галактик, Хаббл построил зависимость скоростей удаления  $V$  галактик от расстояний  $R$  до них. Таким образом он вывел знаменитый закон [53]

$$V = HR,$$

который по праву носит имя закона Хаббла. Современное значение постоянной Хаббла  $H$  составляет  $\sim 70 \text{ км с}^{-1}$  на 1 Мпк. Таким образом, Хаббл эмпирически доказал, что наша Вселенная расширяется, и дал количественную характеристику этого расширения: скорость расширения прямо пропорциональна расстоянию до галактики. Именно такой закон расширения Вселенной предсказывается фридмановской космологической теорией. Замечательное открытие Хаббла привело к тому, что Эйнштейн вынужден был отказаться от введения  $\Lambda$ -члена в свои уравнения ОТО. В 1934 г. Эйнштейн осторожно писал [54]: "...при рассмотрении космологической проблемы представляется естественным отказаться пока от введения космологической постоянной — до тех пор, пока для её введения не возникнут опытные основания". Приходится лишь восхищаться гениальной прозорливостью Эйнштейна: в 1998 г. было открыто ускоренное расширение Вселенной, что вновь потребовало введения в уравнения ОТО аналога  $\Lambda$ -члена. Интересно отметить, что и Хаббл не избежал сомнений в правильности интерпретации своих наблюдений эффекта красного смещения в спектрах галактик. Однажды, спустя много лет после своего космологического открытия, он неожиданно для всех на собрании Американского астрономического общества заявил, что никакого космологического расширения на самом деле нет, а наблюдаемое красное смещение в спектрах галактик — это результат "старения" квантов света на их пути к нам. Идея старения фотонов не выдерживает критики с точки зрения современной теоретической физики. Кроме того, в последние годы получены независимые доказательства того, что объём Вселенной увеличивается со временем, т.е. Вселенная действительно расширяется (см. раздел 17).

## 12. Горячая Вселенная Георгия Гамова

Исходя из наблюдаемого темпа расширения Вселенной, задаваемого постоянной Хаббла  $H \simeq 70 \text{ км с}^{-1}$  на 1 Мпк, возраст Вселенной составляет около 14 млрд лет. Какой же была Вселенная в самом начале своей эволюции? Если отступить от начального, по-видимому, сингулярного, состояния Вселенной на несколько минут, то дальнейший ход её эволюции можно детально исследовать на основе твёрдо установленных физических законов. Это сделал один из самых выдающихся астрофизиков XX в. Георгий Антонович Гамов (1904–1968) — русский учёный, эмигрировавший в США в 1933 г. (рис. 12).

Фридман открыл динамику и геометрию мира. Гамов привнёс в космологию термодинамику и ядерную физику. В 1948 г. Гамов выдвинул теорию горячей Вселенной и в её рамках смог предсказать (вместе со своими учениками Ральфом Альфером и Робертом Херманом)



Рис. 12. Г.А. Гамов (1904–1968).

[55] реликтовое излучение (термин, введённый в 1970-х годах И.С. Шкловским). Согласно Гамову, реликтовое излучение с температурой в нашу эпоху от 1 до 10 К представляет собой остаточное излучение, сохранившееся в мире с самых ранних стадий его расширения. Исходным мотивом этих исследований было стремление Гамова объяснить происхождение химических элементов и их относительную распространённость. По Гамову, вначале был вселенский взрыв (Большой взрыв — термин, введённый Фредом Хойлом), который произошёл одновременно и повсюду в мире, заполнив пространство горячим излучением и веществом [56]. При возрасте мира в 200 с температура вещества и излучения составляла около 1 млрд градусов. При таких температурах интенсивно шли ядерные реакции синтеза атомов гелия из атомов водорода. Гамов надеялся объяснить таким способом распространённость не только атомов водорода и гелия, но и более тяжёлых элементов (кислорода, углерода, кремния и т.п.). Однако, как выяснилось позднее, синтез тяжёлых элементов происходит не в первые минуты формирования Вселенной, а на более поздних стадиях, когда формируются звёзды. Термоядерный синтез химических элементов тяжелее гелия осуществляется в недрах звёзд.

Гамов утверждал, что остаточное фоновое излучение, по его расчётам, остывшее до температур 1–10 К, можно обнаружить как доказательство реальности сингулярного начала расширения нашей Вселенной. Предсказание Гамова, казавшееся фантастическим и недоступным проверке, подтвердилось в совершенно случайных, проводимых с иной целью наблюдениях двух американских радиофизиков, А. Пензиаса и Р. Вильсона [57], в 1965 г. Температура реликтового излучения оказалась равной  $\sim 2,7 \text{ К}$ , что находилось в полном количественном согласии с предсказанием Гамова. За семь лет до

открытия Пензиаса и Вильсона трёхградусное космическое радиоизлучение реально регистрировалось в Пулковской обсерватории с помощью рупорной антенны, построенной Хайкиным, Кайдановским и Шмаоновым [58]. Но тогда никто, увы, не придал этому значения...

С открытием трёхградусного реликтового излучения модель нестационарной, эволюционирующей, расширяющейся Вселенной, прошедшей горячую стадию Большого взрыва, утвердилась как стандартная. Так завершилась вторая научная революция в астрономии.

Но, как оказалось, согласно словам известной песни советских времён: "Есть у революции начало, нет у революции конца", — человечество уже в 1970-х годах стояло на пороге новой, третьей, революции в астрономии. И связано это было с тем, что наступила эра космических исследований, что придало астрономии, по меткому выражению И.С. Шкловского [59] и В.Л. Гинзбурга [60], всеволновой характер.

### 13. Эра всеволновой астрономии

4 октября 1957 г. в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник Земли. У астрономов появилась возможность выносить телескопы за пределы земной атмосферы (которая непрозрачна для большинства электромагнитных излучений, идущих из космоса). Если ранее астрономы наблюдали небо в основном в оптическом диапазоне спектра (где длина волны регистрируемого излучения изменяется примерно в два раза), то космические исследования позволили наблюдать небо в очень широком диапазоне длин волн: в гамма-диапазоне, рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом, инфракрасном и длинноволновом радиодиапазонах. При этом диапазон длин волн принимаемого электромагнитного излучения изменяется не в два раза, а от примерно  $10^{-8}$  см (гамма-диапазон) до  $10^8$  см (длинноволновое радиоизлучение), т.е. в  $10^{16}$  раз. Это привело к тому, что надёжность результатов астрономических наблюдений сравнялась с надёжностью результатов лабораторных физических экспериментов — несмотря на то что астрономические объекты удалены от нас на огромные расстояния в несколько тысяч, миллионов или миллиардов световых лет.

В 1609–1610 гг. Галилей наблюдал небо в телескоп с диаметром объектива около 3 см и 32-кратным увеличением, что привело к прорыву в понимании окружающего нас мира и наблюдательному обоснованию гелиоцентрической системы Коперника. Сейчас в распоряжении астрономов имеются неизмеримо более мощные средства наблюдений. Вот уже два десятилетия на орбите вокруг Земли летает космический телескоп имени Хаббла с зеркалом диаметром 2,4 м. В космосе работают специализированные гамма-обсерватории и рентгеновские обсерватории, такие как "Чандра", XMM-Newton (XMM — от англ. X-ray Multi-Mirror Mission — рентгеновская многозеркальная миссия), "Интеграл" и т.п. В июле 2011 г. был произведён успешный запуск российского космического радиоинтерферометра "Радиоастрон". В космосе летает радиообсерватория "Планк" (Planck), изучающая свойства реликтового излучения. В мире уже работает более 12 наземных оптических телескопов с диаметром зеркал 8–10 м. Планируется создание наземных оптических телескопов с составными зеркалами эффективным диаметром 25–39 м. Осуществляются глубокие фотометрические и спектральные обзоры неба с помощью автоматизированных широко-

польных телескопов (космический телескоп Хаббла, обзор SDSS (Sloan Digital Sky Survey) и т.п.). Создаются новые крупные автоматизированные телескопы с широким полем зрения (например, LSST (Large Synoptic Survey Telescope)). Завершается создание уникального наземного радиоинтерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), работающего на коротких радиоволнах. Все эти мощные наблюдательные средства нацелены на решение фундаментальных проблем современной космологии.

### 14. Открытие анизотропии реликтового излучения

Максимум трёхградусного реликтового радиоизлучения приходится на длину волны около 1,3 мм. Поскольку земная атмосфера имеет плохую прозрачность в этом диапазоне, для детального изучения спектра и анизотропии реликтового излучения наиболее перспективными являются космические исследования.

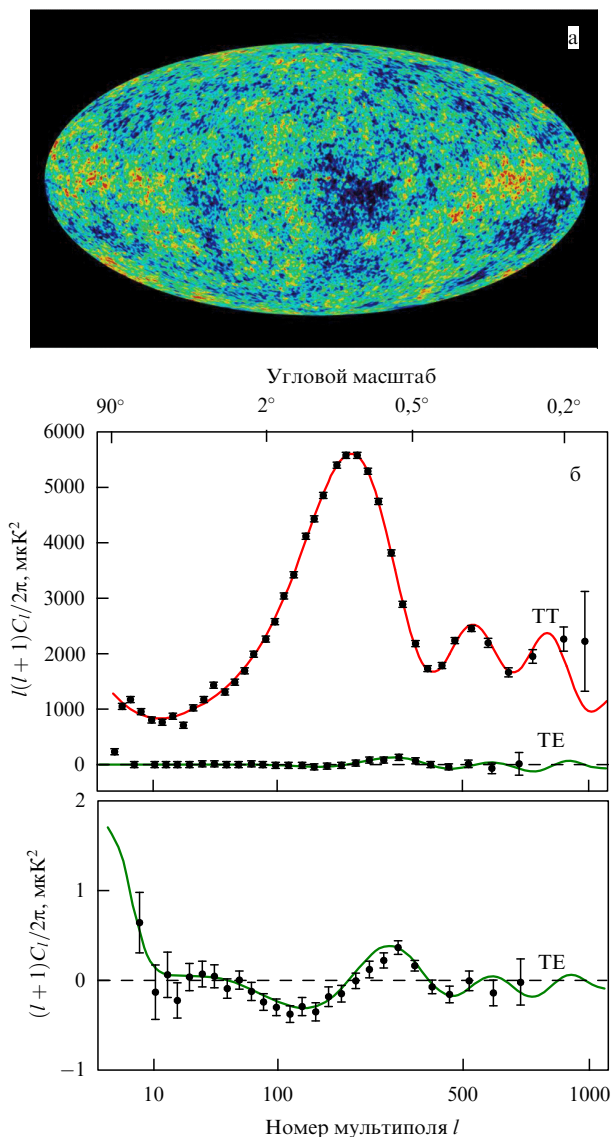
Первые указания на возможную анизотропию реликтового излучения были получены в 1980-х годах с борта российского специализированного спутника "Реликт" [61–63]. Доказательство чернотельного спектра реликтового излучения и надёжное выявление его анизотропии на уровне  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$  были получены с помощью спутников COBE (Cosmic Background Explorer) [64] и WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [65]. К настоящему времени завершается обработка данных, полученных со спутника "Планк". Очень важными также оказались наземные радионаблюдения в субмиллиметровом диапазоне на Южном полюсе, а также наблюдения с баллонов.

Карта распределения угловых неоднородностей реликтового излучения (рис. 13) соответствует возрасту Вселенной около 350 тыс. лет, при котором излучение отделилось от вещества после его рекомбинации при температуре  $\sim 3000$  К. Количественное исследование распределения неоднородностей интенсивности реликтового излучения позволило с хорошей точностью (порядка нескольких процентов) определить фундаментальные параметры расширяющейся Вселенной. В частности, было получено решающее доказательство того, что наше трёхмерное пространство евклидово, а средняя плотность всех видов материи во Вселенной равна критической плотности  $\rho_c = 3H^2/(8\pi G) \sim 10^{-29}$  г см $^{-3}$ .

### 15. Открытие тёмной материи

В 1932 г. американский астроном швейцарского происхождения Фриц Цвикки (1898–1974), работавший с 1925 г. в США, заметил, что, кроме светящегося барионного вещества галактик, во Вселенной должны иметься невидимые "скрытые" массы, которые проявляют себя только своим тяготением [66]. Цвикки изучал скопление галактик в созвездии Волосы Вероники и обнаружил, что галактики в этом скоплении движутся с очень большими скоростями, достигающими несколько тысяч километров в секунду. Для того чтобы удержать так быстро движущиеся галактики в объёме скопления, требуется тяготение, которое не способно создать только одни видимые, светящиеся, массы галактик. Для этого необходимы дополнительные массы, которые должны быть, по оценкам Цвикки, примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы скопления. Позднее, в 1970-е годы, усилиями астрономов из СССР и США было обнаружено, что скрытые массы (тёмная материя) должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в





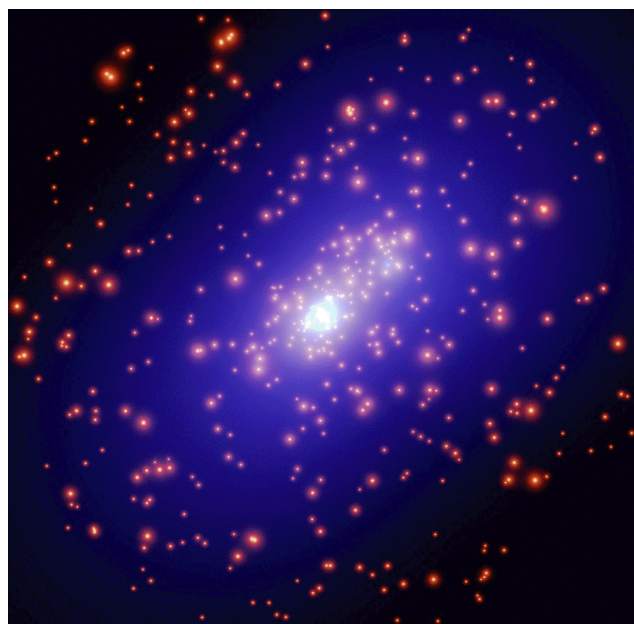
**Рис. 13.** (а) Карта распределения неоднородностей реликтового излучения, полученная спутником WMAP. (б) Положение первого максимума в распределении флуктуаций реликтового излучения свидетельствует о том, что наше трёхмерное пространство евклидово.

изолированных крупных галактиках. Я. Эйнасто [67], В. Рубин [68], Дж. Острайкер и Дж. Пиблс [69] и их коллеги выяснили, что тёмная материя образует невидимые тёмные гало крупных галактик. Эти гало являются почти сферическими образованиями с радиусами, в 5–10 раз превышающими размеры самих звёздных систем.

К настоящему времени имеются по крайней мере 10 независимых свидетельств существования тёмной материи во Вселенной. Отметим некоторые из них.

1. Движение галактик в скоплениях ( $v \geq 1000 \text{ км с}^{-1}$ ).
2. Вращение галактик (плоские кривые вращения).
3. Горячий ( $T \approx 10^8 \text{ К}$ ) газ в скоплениях галактик (скорости протонов  $v_p \geq 1000 \text{ км с}^{-1}$ ) (рис. 14).
4. Гравитационное линзирование света далёких галактик в гравитационном поле более близких скоплений галактик.
5. Движение тройных и кратных галактик и т.д.

Замечательно то, что для каждого из 10 независимых свидетельств существования тёмной материи следует вывод о том, что масса тёмной материи в 5–10 раз



**Рис. 14.** Горячий газ ( $T \approx 10^8 \text{ К}$ ) концентрируется в центре скопления галактик, что свидетельствует о наличии тёмной материи, которая по массе в 5–10 раз превышает вклад светящейся барийной материи.

больше массы видимого барийного вещества. Это подобно тому, как если бы 10 независимых линий пересекались в одной точке. Такова прочность наших выводов о существовании тёмной материи во Вселенной. Хотя, как упоминалось в разделе 7, до сих пор появляются попытки обойтись без тёмной материи с помощью развития теории MOND. Как отмечалось, такие попытки являются безуспешными, поскольку для каждого скопления галактик и для каждой галактики в этом случае приходится вводить свою модификацию закона тяготения Ньютона.

### 16. Открытие тёмной энергии

В 1998–1999 гг. две группы астрономов открыли всемирное антитяготение. В работе участвовало большое число исследователей (в общей сложности около 100). Одной группой руководили Брайн Шмидт (Австралия) и Адам Рисс (Riess) (США), другую возглавил Сол Перлмуттер (США). Открытие сделано на основании наблюдений вспышек далёких сверхновых типа Ia (термоядерный взрыв углеродно-кислородного белого карлика с массой, близкой к чандрасекаровскому пределу) [70–72]. На возможность использования сверхновых типа Ia в качестве "стандартных свечей" с известной абсолютной светимостью в максимуме вспышки указал ещё в 1977 г. сотрудник ГАИШ МГУ Юрий Павлович Псковский [73]. Сверхновые типа Ia благодаря своей огромной светимости в максимуме видны на очень больших расстояниях (в несколько миллиардов световых лет), соответствующих красным смещениям  $z$  порядка или даже более единицы. На таких огромных расстояниях движение (удаление) галактик определяется не только их скоростями, но и ускорениями. Сравнивая наблюдаемый блеск сверхновых типа Ia с их известной абсолютной светимостью в максимуме, можно определить расстояния до соответствующих галактик. При малых  $z$  (случай относительно близких галактик) связь между расстоянием  $R$  и красным смещением  $z$  линейна, а блеск объекта убывает с увели-

чением красного смещения как  $z^{-2}$ . Однако при не малом  $z$  (далёкие галактики) связь между расстоянием и красным смещением становится сложнее: в эту связь оказывается вовлечённой не только скорость разбегания галактик  $V$ , но и их ускорение. Поэтому, сравнивая наблюдаемый блеск сверхновых типа Ia в максимуме с соответствующей величиной красного смещения галактики, можно определить ускорение, с которым разбегаются галактики. Оказалось, что это ускорение положительно, т.е. Вселенная не просто расширяется, но расширяется с ускорением. Обычное вещество, ввиду действия взаимного притяжения между галактиками, должно замедлять разбегание галактик. То, что галактики разбегаются с ускорением, свидетельствует о существовании во Вселенной некоторой материи нового типа (называемой теперь тёмной энергией). Эта материя обладает не тяготением, а антитяготением, гравитационным отталкиванием, что и приводит к ускоренному расширению Вселенной. К настоящему времени ускоренное расширение Вселенной установлено по наблюдениям многих сотен сверхновых типа Ia. В 2011 г. первооткрывателям ускоренного расширения Вселенной С. Перлмуттеру, А. Риссу и Б. Шмидту (рис. 15) была присуждена Нобелевская премия.

Оценки показывают, что вклад тёмной энергии, обуславливающей ускоренное расширение Вселенной, в полную плотность материи во Вселенной составляет около 70 %, т.е. загадочная тёмная энергия доминирует во Вселенной.

Помимо ускоренного расширения Вселенной, наблюдаемого по вспышкам сверхновых типа Ia, имеется ещё по крайней мере три независимых свидетельства существования тёмной энергии.

1. Эволюция скоплений галактик, изучаемая с помощью наблюдений скоплений на разных  $z$  в рентгеновском диапазоне (наблюдения со спутников ROSAT (от нем. Röntgensatellit), "Чандра", XMM-Newton и др.) и в радиодиапазоне (по наблюдениям эффекта Сюняева–Зельдовича). Рост скоплений галактик со временем обусловлен действием двух конкурирующих факторов: притяжением обычной материи (барионы и тёмная материя) и отталкиванием тёмной энергии. Для того чтобы получить наблюдаемую зависимость массы скопления от красного смещения  $z$ , необходимо предположить, что тёмная энергия вносит  $\approx 70\%$  от полной плотности материи Вселенной. При других значениях вклада тёмной энергии модельные параметры скоплений галактик получаются не согласующимися с наблюдаемыми характеристиками скоплений.

2. Возраст самых старых шаровых звёздных скоплений  $\sim 12-13$  млрд лет. В старых вариантах космологии,

в которых не учитывался эйнштейновский  $\Lambda$ -член, возраст Вселенной ( $\sim 11$  млрд лет) получался меньше возраста самых старых шаровых скоплений.

Это беспокоило учёных, поэтому ещё в 1970-х годах Я.Б. Зельдович [74], И.С. Шкловский [75] и Н.С. Кардашёв [76] высказывали идею о том, что если взять решение уравнений ОТО с  $\Lambda$ -членом, полученное Ж. Леметром (признанным классиком космологии), то возраст Вселенной увеличивается и становится больше возраста самых старых шаровых скоплений. Так что наблюдаемый возраст самых старых шаровых скоплений сам по себе является свидетельством наличия тёмной энергии во Вселенной.

3. Точные измерения анизотропии реликтового фона, как упоминалось в разделе 14, позволили установить, что наше трёхмерное пространство является евклидовым, а средняя плотность всех видов материи во Вселенной (включая тёмную энергию) равняется критической и составляет  $\sim 10^{-29}$  г см $^{-3}$ . Так как плотность тёмной материи, барионов и излучения известна из независимых данных, отсюда следует возможность независимо оценить плотность тёмной энергии, которая составляет 70 % от плотности всех видов материи во Вселенной. Эта оценка совпадает с оценкой вклада тёмной энергии, выведенной из наблюдений сверхновых типа Ia.

Дополнительным аргументом в пользу наличия тёмной энергии могут служить результаты исследований А.Д. Черниным с соавторами [77] кинематики групп и скоплений галактик с целью объяснения так называемого парадокса Сэндиджа [78], сформулированного в 1972–1999 гг. Согласно Алану Сэндиджу, регулярное космологическое расширение Вселенной со "стандартным" значением постоянной Хаббла (современное значение  $H = 70$  км с $^{-1}$  на 1 Мпк) прослеживается до относительно весьма малых размеров, вплоть до 1,5–2,0 Мпк (5–7 млн световых лет) — несмотря на то что размер ячейки однородности во Вселенной, как отмечалось в разделе 9, составляет около 300 млн световых лет, а на меньших масштабах имеются большие неоднородности в распределении плотности вещества. Несмотря на такие неоднородности вещества, космологическое расширение регулярно на малых масштабах и неотлично от космологического расширения на масштабах в несколько тысяч мегапарсек. Как это понять? Оценки плотности тёмной энергии в шести группах и скоплениях галактик, выполненные группой А.Д. Чернина и И.Д. Караченцева, показали [77, 79], что локальная плотность тёмной энергии практически совпадает с плотностью тёмной энергии, оценённой по глобальному расширению Вселенной. Отсюда можно заключить, что космологическое расширение на малых масштабах управляется антигравитацией тёмной энергии.

На рисунке 16 отражена процедура определения плотности тёмной энергии тремя способами, основанными на использовании разных электромагнитных диапазонов: рентгеновского диапазона, радиодиапазона и оптического диапазона. Изучение сверхновых типа Ia (оптический диапазон) даёт первую линию, исследование флуктуаций реликтового фона (радиодиапазон) — вторую, а анализ эволюции скоплений галактик (рентгеновский диапазон) позволяет построить третью линию. Как видно, все три линии (полосы) пересекаются в одной области, которая соответствует вкладу тёмной энергии  $\Lambda \sim 70\%$  и доли остальной материи  $\Omega$  (тёмной материи и барионов)  $\sim 30\%$ .

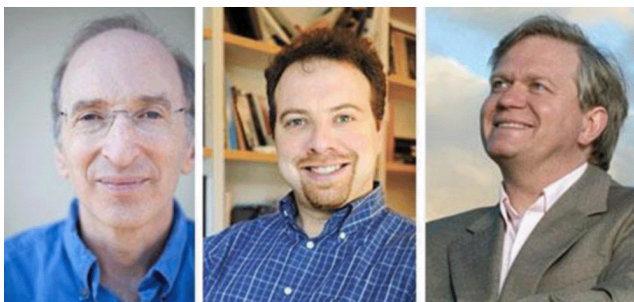


Рис. 15. Первооткрыватели ускоренного расширения Вселенной (слева направо): С. Перлмуттер, А. Рисс и Б. Шмидт.



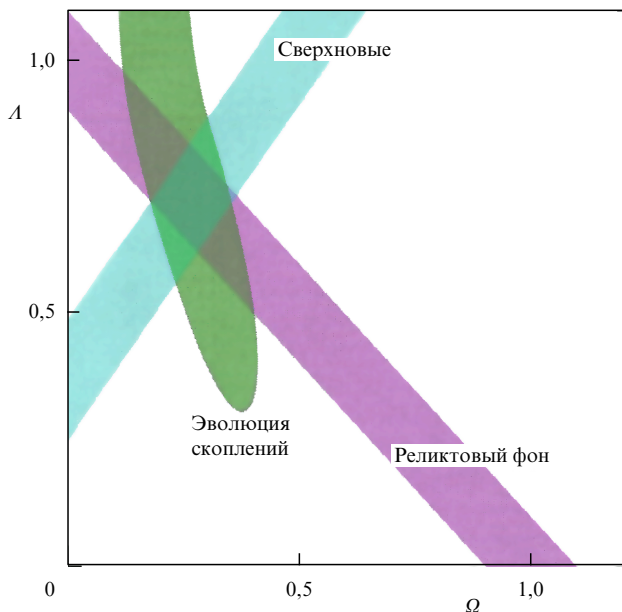


Рис. 16. Процедура определения плотности тёмной энергии по наблюдениям в трёх электромагнитных диапазонах: радиодиапазоне (реликтовое излучение), оптическом (сверхновые типа Ia) и рентгеновском (эволюция скоплений галактик).

**17. Новые доказательства реального расширения Вселенной**

В ходе космологического расширения уменьшается плотность реликтовых фотонов. Это означает, что в прошлом число реликтовых фотонов (и их температура) в единице объёма было больше, чем сейчас. С введением в строй крупных 8–10-метровых телескопов учёным удалось установить, что населённости возбуждённых уровней некоторых молекул внегалактического газа на больших расстояниях заметно выше, чем у тех же молекул на близких расстояниях. Поскольку такие низкоэнергетические уровни возбуждаются фотонами реликтового излучения, это прямо свидетельствует о том, что в прошлом плотность реликтовых фотонов во Вселенной была выше. Данный факт, независимо от красного смещения в спектрах галактик, свидетельствует о том, что объём Вселенной увеличивается со временем, т.е. Вселенная действительно расширяется.

**18. Наблюдаемая крупномасштабная структура Вселенной и результаты компьютерного моделирования**

С помощью глубоких фотометрических и спектральных обзоров неба измерены красные смещения нескольких десятков тысяч галактик и построена трёхмерная карта распределения барионного вещества во Вселенной (рис. 17). Оказалось, что это распределение имеет сложную структуру: скопления галактик стремятся сосредоточиться в вытянутые структуры (филаменты), которые подобны крупномасштабным структурам Вселенной, предсказанным Я.Б. Зельдовичем [80] (так называемые блины Зельдовича) (рис. 18). Между филаментами наблюдаются области с резко пониженным числом галактик (так называемые войды). С помощью современных суперкомпьютеров удалось провести моделирование процесса срабатывания гравитационной неустойчивости в расширяющейся Вселенной и формирования крупномасштабных структур. Оказалось, что

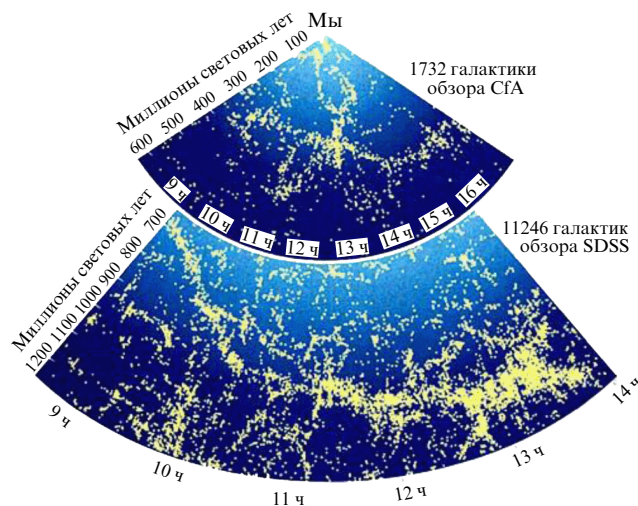


Рис. 17. Трёхмерная карта распределения барионного вещества (галактик и скоплений галактик) во Вселенной, построенная на основе глубоких фотометрических и спектральных обзоров неба.

определяющим фактором в формировании крупномасштабной структуры является не барионное вещество, а рост неоднородностей в бесстолкновительной среде — тёмной материи. В потенциальные ямы, сформированные тёмной материей, затем "сваливается" барионное вещество (как малая добавка) и образуется наблюдаемый узор крупномасштабной структуры Вселенной.

**19. Энергетический состав Вселенной**

На рисунке 19 изображён вклад различных форм материи во Вселенной. Барионное вещество (атомы и молекулы) составляет лишь ~ 4 % от полной плотности материи во Вселенной.

Во Вселенной доминирует так называемый тёмный сектор.

1. *Тёмная материя* (~ 23 %) ничего не излучает и не поглощает и проявляет себя лишь гравитационным притяжением. Она гравитационно скучивается и обнаруживает тенденцию к концентрации вблизи больших масс барионного вещества. Скорее всего, это особые элементарные частицы, которые пока ещё не открыты в земных лабораториях (есть надежда открыть эти частицы на Большом адронном коллайдере в Швейцарии).

2. *Тёмная энергия* (73 %) также ничего не излучает и не поглощает, проявляет себя лишь своим гравитационным взаимодействием (отталкиванием). Тёмная энергия гравитационно не скучивается (скорее всего, представляет собой поле или совокупность полей). Плотность тёмной энергии почти не зависит от времени, от красного смещения. Поэтому со временем, по мере возрастания объёма Вселенной, вклад тёмной энергии в общий баланс сил во Вселенной увеличивается. Когда возраст Вселенной был менее 7 млрд лет, во Вселенной преобладало гравитационное притяжение тёмной материи, барионов и фотонов. В момент, когда возраст Вселенной достиг 7 млрд лет, вклад тёмной энергии сравнялся с вкладом обычного вещества; для более поздних эпох во Вселенной (и большего её объёма) стало преобладать гравитационное отталкивание тёмной энергии. Поэтому в нашу эпоху Вселенная расширяется с ускорением.



Рис. 18. Я.Б. Зельдович (1914–1987).

Давление тёмной энергии отрицательно:  $p = -we$ , где  $\varepsilon = \rho c^2$  — плотность энергии,  $w$  — коэффициент, по современным астрофизическим определениям близкий к единице,  $w = 1,02 \pm 0,05$ . Поскольку в ОТО источником гравитации является величина  $\rho + 3p/c^2$ , при отрицательном давлении источник гравитации оказывается отрицательным ( $-2\rho$ ). Это приводит к тому, что тёмная энергия обуславливает не гравитационное притяжение, а гравитационное отталкивание. Точное определение коэффициента  $w$  в уравнении состояния тёмной энергии — важнейшая задача современной наблюдательной космологии, для решения которой планируются специальные космические эксперименты. Значение коэффициента  $w = 1,02$  может свидетельствовать о том, что тёмная энергия — это вакуум (для которого  $w$  точно равно единице). Вакуум — это лоренц-инвариантная среда, с которой невозможно связать никакую систему отсчёта: плотность вакуума строго постоянна и одинакова во всех системах отсчёта. Следует отметить, что в пределах ошибок определения  $w$  может быть как меньше единицы (тогда это квинтэссенция), так и больше единицы (соответствует случаю фантомной энергии). Свойства квинтэссенции и особенно фантомной энергии удивительны. Здесь предоставляется большой простор для фантазий теоретиков.

Следует отметить, что имеются работы, авторы которых объясняют ускоренное расширение Вселенной не с помощью нового вида материи — тёмной энергии, а посредством введения так называемой  $F(R)$ -гравитации. В последнем случае гравитация отождествляется не с кривизной пространства-времени (как в ОТО), а с некоторой функцией этой кривизны.

## 20. Основные этапы эволюции нашей Вселенной

Согласно очень точному высказыванию И.С. Шкловского [81], современная астрономия является всеволновой и насквозь эволюционной. Поэтому современная космологическая модель Вселенной радикально отличается от систем Мира, предложенных нашими гениальными древ-

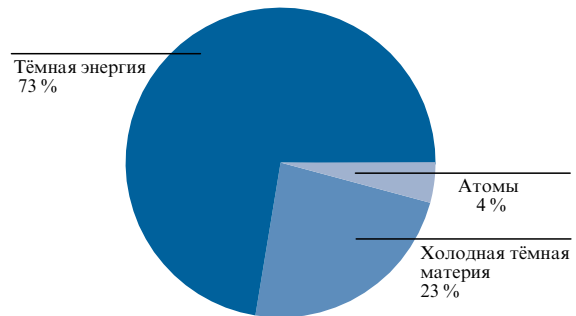


Рис. 19. Энергетический состав Вселенной.

ними предшественниками. Прежде всего, современная космология учитывает весь комплекс наблюдательных данных, накопленных благодаря применению мощных средств наблюдений. Важнейшие из этих данных описаны выше. В частности, принимается во внимание тот удивительный факт, что барионное вещество, из которого состоят звёзды, галактики, а также человек, составляет всего лишь 4% от полного количества материи во Вселенной; главная же доля материи во Вселенной — это тёмный сектор (тёмная материя и тёмная энергия), природа которого пока непонятна. При построении космологических моделей используются новейшие достижения теоретической и экспериментальной физики. Но особенно важно то, что современная модель Вселенной является эволюционной: мы не только имеем представление о структуре Вселенной, но и делаем заключения о путях её развития и даже обсуждаем проблемы происхождения нашей Вселенной, а также возможность возникновения других вселенных, причинно не связанных с нашей. Настало время, когда человечество пытается распространить принцип Коперника не только на Землю, Солнце, нашу Галактику, но и на всю Вселенную: по-видимому, наша Вселенная, как и Галактика, ничем не выделена и является всего лишь одной из многих, причинно не связанных вселенных Мультимира. Как отмечалось выше, наша эволюционирующая Вселенная может быть описана с помощью надёжно установленных физических законов начиная по крайней мере с эпохи термоядерного синтеза химических элементов (в основном водорода и гелия), т.е. с первых секунд и минут после момента её образования.

Естественен вопрос: что происходило во Вселенной до эпохи термоядерных реакций, когда её возраст был менее одной секунды? С определённой степенью уверенности можно полагать, что космологическое расширение происходило и в более ранние эпохи, когда возраст Вселенной был много меньше одной секунды. Но суждения о самых ранних стадиях космологического расширения становятся тем менее надёжными, чем глубже мы уходим в прошлое. Когда мы приближаемся к самому началу образования Вселенной, мы вынуждены оперировать немислимо высокими температурами и плотностями, при которых известные нам физические законы уже неприменимы. Поэтому описание самых ранних стадий формирования Вселенной вынуждает исследователей прибегать к далёкой экстраполяции известных физических законов в область, где для их применения, вообще говоря, не существует объективных оснований. Тем не менее в последние 25–30 лет получили развитие теории очень ранней Вселенной, которые оперируют колоссальными плотностями (например, планковской плотностью



$\sim 10^{93}$  г см $^{-3}$ ), экстремально малыми промежутками времени ( $\sim 10^{-43}$  с) и ничтожными пространственными расстояниями ( $\sim 10^{-33}$  см).

Такова, например, теория инфляции, которую развивают многие исследователи. В основе этой теории лежит смелая гипотеза о причине космологического расширения, выдвинутая свыше 40 лет назад петербургским учёным Э.Б. Глинером (рис. 20). Согласно идее Э.Б. Глинера [82, 83], исходный разгон материи Вселенной создало антитяготение первичного космического вакуума. Развитие этой идеи привело к созданию инфляционных теорий, в основе которых рассматриваются различные скалярные поля и фазовые переходы в них. В этой области удалось показать, что неоднородности в космическом веществе, которые оставили отпечатки в реликтовом фоне и положили начало формированию галактик и их скоплений, могли возникнуть благодаря квантовым флуктуациям первичного скалярного поля и невообразимо быстрому, экспоненциальному, увеличению масштабного фактора в молодой формирующейся Вселенной. Предсказанный спектр неоднородностей (зависимость относительной амплитуды от масштаба возмущений) согласуется с наблюдениями реликтового фона. Пионерские работы в этой области сделали В.А. Муханов и Г.В. Чибисов [84] из Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), а также А.А. Старобинский [85] (Институт теоретической физики имени Л.Д. Ландау РАН).

Современная космология решает также проблему барионной асимметрии Вселенной. Долгое время казался загадочным тот факт, что, хотя в ядерных реакциях в физических лабораториях частицы и античастицы рождаются равновероятно, наша Вселенная состоит из вещества, а антивещество в ней практически отсутствует. Основополагающая идея в этой области была высказана в 1960–1970-х годах А.Д. Сахаровым [86] и В.А. Кузьминым [87]. Идея состоит в том, что симметрия между частицами и античастицами является, как выяснилось, не строгой, а слегка нарушенной (нарушение *CP*-симметрии). Если имеет место несохранение барионного заряда (протон нестабилен), то вследствие быстрого расширения Вселенной (в конце инфляционной стадии) этой очень слабой асимметрии между частицами и античастицами достаточно, чтобы в тех экстремальных физических условиях, которые существовали в очень ранней Вселенной, возникла наблюдаемая барионная асимметрия. Эксперименты показывают, что время жизни протона более  $10^{32}$  лет, что на много порядков превосходит возраст Вселенной ( $1,4 \times 10^{10}$  лет). Таким образом, хотя пути решения проблемы барионной асимметрии Вселенной уже намечены, эта проблема ждёт своего окончательного решения. Тем не менее следует признать, что огромное время жизни протона — большая удача для нас...

В план нашего обзора не входит детальное описание проблем современной космологии. Отсылая читателей к специальным монографиям [1–3, 88], ограничимся лишь кратким перечислением основных этапов эволюции нашей Вселенной.

1. *Квантовое рождение классического пространства-времени и эра инфляции.* Время от момента образования Вселенной  $t = 10^{-43} - 10^{-36}$  с. За это время геометрический масштабный фактор  $a(t)$  экспоненциально расширяющейся Вселенной возрос в  $10^{10^9}$  раз. Большой вклад в решение этих проблем внесли Сахаров [89], Лифшиц [90,



Рис. 20. Эраст Борисович Глинер. (Сан-Франциско, 18 февраля 2013 г.)

91], Халатников [90–92], Белинский [92], Старобинский [85, 93], Гут [94], Линде [95], Зельдович [96–99], Рубаков [100, 101], Глинер [82, 83, 102, 103], Дымникова [102, 103], Фомин [104], Гришук [105], Стейнхард [106], Муханов [84, 107], Чибисов [84], Сажин [99, 100], Зельманов [108], Лукаш [109] и др.

2. *Распад скалярного поля, рождение частиц, возрастание энтропии Вселенной, переход к стадии горячей Вселенной, расширяющейся по закону Фридмана,  $t = 10^{-36}$  с* — Рубаков [110], Старобинский [111], Линде [111], Горбунов [110] и др.

3. *Генерация барионной асимметрии,  $t = 10^{-35}$  с* — Сахаров [112], Афлек [113], Дайн [113], Кузьмин [87, 114], Рубаков и Шапошников [114] и др.

4. *Электрослабый переход и фазовый переход квантовой хромодинамики, конфайнмент кварков,  $t = 10^{-10} - 10^{-4}$  с* (Рубаков и Шапошников [115]).

5. *Отщепление нейтрино,  $t = 10^{-1}$  с.*

6. *Закалка нейтронов ( $n_n/n_p = 1/5$ ),  $t \approx 1$  с.*

7. *Первичный нуклеосинтез: H,  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ , D, T, Li,  $t = 1 - 200$  с* — Гамов [116], Шрамм и Оливе [117], Зельдович [118], Варшалович [119] и др.

8. *Доминирование тёмной материи,  $t = 60000$  лет* — Эйнасто [120], Зельдович, Сюняев [121] и др.

9. *Рекомбинация и отделение излучения от вещества,  $t = 350000$  лет* — Гамов [116], Пибблс [122], Курт [123], Сюняев [123], Зельдович [123], Дорошкевич [124], Новиков [124] и др.

10. *Тёмная эра: H,  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ , D, T, Li,  $t = 100 - 200$  млн лет.*

11. *Первые звёзды III типа населения ( $M = (100 - 1000) M_\odot$ ),  $t = 200$  млн лет* — М. Рис [125] и др.

12. *Формирование крупномасштабной структуры Вселенной,  $t \approx 1$  млрд лет* — Лифшиц и Халатников [90, 91], Сахаров [89], Зельдович [126–129], Сюняев [127],

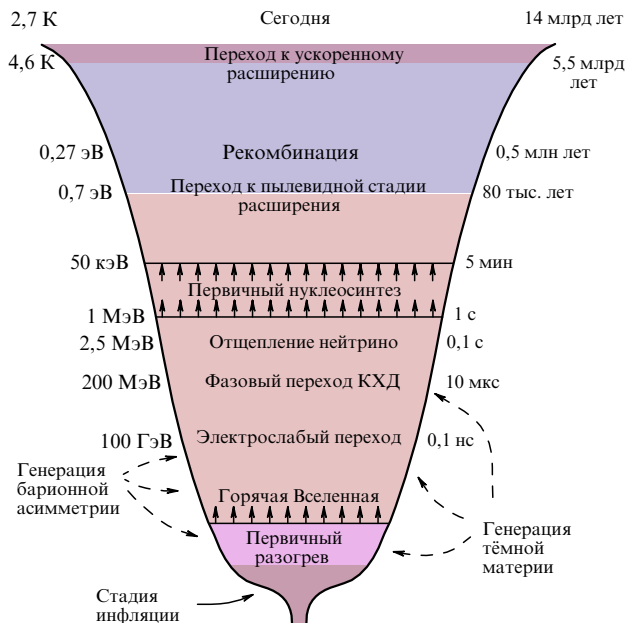


Рис. 21. Основные этапы эволюции нашей Вселенной.

Шандарин [128, 129], Дорошкевич [130, 131], Эйнасто [120], Гуревич и Зыбин [132, 133], Лукаш [134, 135] и др.

13. *Переход к ускоренному расширению Вселенной*,  $t = 7$  млрд лет — Перлмуттер [72], Шмидт [71, 136] и Рисс [70], Старобинский [137, 138] и др.

14. *Современная эпоха*,  $t = 13,7$  млрд лет.

На рисунке 21, заимствованном из книги [1], отмечены основные этапы эволюции нашей Вселенной, включая момент её перехода от замедленного расширения к ускоренному (при возрасте  $t = 7$  млрд лет).

## 21. Мультимир (Multiverse).

### Теория вечной инфляции Андрея Линде

Итак, на самых ранних стадиях формирования нашей Вселенной, по-видимому, существовал инфляционный период, который начался через  $10^{-43}$  с после рождения классического пространства-времени. В интервале времён от  $10^{-43}$  до  $10^{-36}$  с происходило экспоненциальное раздувание Вселенной, после чего начался распад скалярного поля, что привело к возрастанию энтропии Вселенной и рождению частиц. Наблюдательными свидетельствами в пользу инфляционного сценария являются два важных факта: евклидовость (или почти евклидовость) нашего трёхмерного пространства, выводимая из анализа флуктуаций реликтового излучения, а также плоский спектр небольших неоднородностей, существовавших во Вселенной сразу после её рождения (так называемый спектр Гаррисона–Зельдовича), который выводится из современных наблюдательных данных. Важным наблюдательным подтверждением существования инфляционной стадии было бы обнаружение флуктуаций поляризации реликтового излучения, обусловленной фоном реликтового гравитационно-волнового излучения во Вселенной. Такая задача стоит в программе космической обсерватории "Планк" по исследованию флуктуаций реликтового излучения.

Возникает естественный вопрос: а что было раньше, до формирования классического пространства-времени и инфляционной стадии? По современным представлениям, инфляционной стадии развития нашей Вселенной предшествовал период её квантового существования.

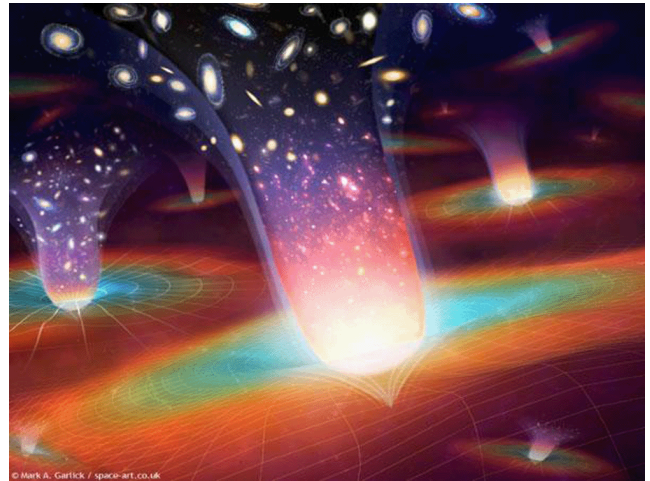


Рис. 22. "Кипящий вакуум" и квантовое рождение вселенных в мультимире.

Промежутки времени более короткие, чем  $10^{-43}$  с, и расстояния, меньшие, чем  $10^{-33}$  см, уже нельзя рассматривать как непрерывные время и пространство. При чудовищно большой плотности ( $10^{93}$  г см $^{-3}$ ) энергии скалярного поля (вакуумоподобной материи) пространство-время распадалось на отдельные кванты и всё это находилось, как образно говорят теоретики, в состоянии "кипения вакуума". Характеристики пространства-времени изменялись причудливейшим образом, в том числе, менялись размерность пространства, а также его топология. Изучать такие процессы очень трудно, ввиду того что пока не создана строгая теория квантовой гравитации. Объединение ОТО с квантовой физикой осуществляется в рамках теории струн и М-теории. Компьютерное моделирование показало, что вследствие квантовых флуктуаций случайным образом происходит превращение "кипения вакуума" в отдельные "пузыри" (раздувающиеся вселенные). Каждая из таких рождённых вселенных подобна нашей, но разные вселенные могут иметь разные физические свойства и в них могут действовать разные физические законы при других физических константах (по сравнению с таковыми в нашей Вселенной). Некоторые "пузыри", рождённые из кипящего вакуума, будут развиваться неограниченно долго, а некоторые будут испытывать коллапс и новый переход в квантовое состояние (рис. 22).

До последних десятилетий XX в. господствовало представление о том, что релятивистская расширяющаяся Вселенная исчерпывающе представляет собой весь материальный мир. Мы называли всю мыслимую Вселенную единым термином — Universe. С конца XX в. картина Единственного существующего мира уступает место картине Множественности многоликих миров-вселенных. В этом состоит начавшаяся третья революция в астрономии и космологии.

Таким образом, описанный сценарий вечной инфляции предсказывает бесконечное рождение разных причинно не связанных вселенных. Этот процесс не имеет ни границ, ни пределов. В соответствии с принципом Коперника, как упоминалось в разделе 6, наша Вселенная — лишь одна из многих вселенных Мультимира.

Один из создателей современной теории расширяющейся Вселенной Андрей Дмитриевич Линде (сотрудник ФИАНа, профессор Стэнфордского университета) писал, что конца эволюции Вселенной (Multiverse) нет [139].

Пути наблюдательного подтверждения описанной модели Мультимира пока не ясны, хотя следует отметить, что поиски таких наблюдательных подтверждений кажутся не совсем безнадежными. Дело в том, что разные вселенные могут быть связаны между собой топологическими туннелями ("кротовыми норами"), которые могли остаться после стадии "кипения вакуума". Благодаря инфляционному раздуванию такие туннели из микроскопических структур пространства-времени могли превратиться в макроскопические объекты. Сквозь такие туннели может протекать материя и передаваться информация, в том числе из других вселенных. Поиск кротовых нор в нашей Вселенной (входов в другие вселенные) — важная задача современной наблюдательной астрофизики. В России теорией кротовых нор активно занимаются И.Д. Новиков, А.А. Шацкий и Н.С. Кардашев [140, 141]. Задача поиска кротовых нор включена в программу наблюдений российского космического интерферометра "Радиоастрон" [142].

## 22. Антропный принцип

Одну из первых формулировок антропного принципа ещё в середине 1950-х годов дали выдающийся московский космолог из ГАИШ МГУ Абрам Леонидович Зельманов (1913–1987) [143], а также известный астроном-теоретик Григорий Моисеевич Идлис (1928–2010) [144]. Зельманов утверждал, что наблюдаемая Вселенная такая, какая она есть, поскольку другие вселенные развиваются без свидетелей. Это было сказано задолго до разработки модели Мультимира. Не все учёные принимают всерьёз антропный принцип. Сторонники антропного принципа обращают внимание на то, что наша Вселенная неплохо приспособлена для жизни, в том числе для существования человека. Серьёзные физические и астрономические аргументы в пользу антропного принципа были предложены Б. Картером, И.Л. Розенталем, Р. Дикке, Дж. Барроу и др. Главный из этих аргументов состоит в том, что набор физических констант в нашем мире, а также управляющие им законы природы весьма благоприятны для возникновения жизни. Особое внимание обращается на то, что относительно небольшие изменения физических констант могли бы приводить к таким условиям в нашей Вселенной, при которых формирование жизни было бы невозможным. То есть наша Вселенная очень тонко настроена на процесс формирования в ней жизни.

Специалисты различают сильный и слабый антропные принципы. Сильный антропный принцип звучит сурово: наша Вселенная специально создана такой, чтобы в ней имелась возможность нашего естественного существования. Сильный антропный принцип выводит нашу Вселенную из-под действия принципа Коперника и придаёт ей уникальный характер. Слабый антропный принцип более "демократичен" по своему звучанию; он утверждает: если в мире есть много разнообразных вселенных, то мы находимся в той из них, где наша жизнь возможна. Другие вселенные, по А.Л. Зельманову, "могут развиваться без свидетелей", поскольку в них физические константы и законы неблагоприятны для формирования жизни.

Слабый антропный принцип хорошо согласуется с новейшей моделью Мультимира, описанной в разделе 21.

Подробный анализ тонкой настройки нашей Вселенной на возможность формирования жизни выполнен,

например, в работах И.Л. Розентала. Вот один из рассмотренных им аргументов [88]:

"На наш взгляд, наиболее впечатляющим примером является неустойчивость структуры Метагалактики относительно значения массы электрона  $m_e$ . Действительно, атом водорода в Метагалактике — абсолютно стабильный элемент. Его стабильность при достаточно низких температурах ( $T < m_e$ ) гарантируется законом сохранения энергии, запрещающим реакцию



Чтобы не осуществлялся коллапс атома водорода, необходимо выполнение условия:

$$m_e < \Delta m_N = m_n - m_p \simeq 1,3 \text{ МэВ}, \quad (6.32)$$

где  $m_{n,p}$  — масса нейтрона, протона. Однако, используя значения превосходно измеренных масс частиц, участвующих в реакции (6.31), легко убедиться, что при увеличении массы  $m_e$  более чем в 2,5 раза реакция (6.31) осуществлялась бы при сколь угодно малых температурах. А это означало бы, что при увеличении массы  $m_e$  атом водорода коллапсировал бы в нейтрон и нейтрино".

Далее И.Л. Розенталь подчёркивает, что на стадии первичного нуклеосинтеза в Метагалактике с утяжелённым электроном почти всё вещество, в соответствии с реакцией (6.31), превратилось бы в нейтроны и в нейтрино. В такой Вселенной существовали бы исключительно нейтронные звёзды, в недрах которых не протекают термоядерные реакции синтеза углерода, кислорода, кремния и других тяжёлых элементов, которые необходимы для формирования жизни.

Согласно И.Л. Розенталу, пределы возможного изменения фундаментальных констант, в интервале которых структура нашей Вселенной не меняется, весьма узки. Так, например, соответствующий интервал относительных изменений разности масс нейтрона и протона  $m_n - m_p$  составляет (0,4, 1,6). Для постоянной тонкой структуры  $\alpha_{em} = e^2/\hbar c = 1/137$  этот интервал равен (0,8, 1,6). Такая сильная чувствительность параметров нашей Вселенной к сравнительно небольшим изменениям физических констант даёт основания предполагать, что в разных вселенных Мультимира могут реализовываться различные физические константы и даже разные физические законы. Слабый антропный принцип, как отмечалось выше, позволяет распространить принцип Коперника на всю нашу Вселенную: она ничем не выделяется среди других вселенных Мультимира, за исключением того, что в ней в момент квантового рождения случайным образом сформировался такой набор физических констант и законов, который благоприятствует развитию условий для формирования жизни. В Мультимире, возможно, есть другие вселенные, причинно не связанные с нашей, в которых набор физических констант неблагоприятен для формирования жизни, а в некоторых вселенных, напротив, набор физических констант и законов, как и в нашей Вселенной, благоприятствует формированию жизни.

## 23. Заключение

В данном обзоре мы проследили историю развития наших представлений о Вселенной, её структуре и эволюции. Начиная от первых наивных представлений об устройстве Вселенной (X в. до н.э.) человечество в





Рис. 23. Глубокий снимок неба, сделанный космическим телескопом Хаббла с суммарной экспозицией  $\approx 2$  млн секунд.

стремлении понять природу окружающего нас мира прошло через две научные революции: коперниковскую (переход от геоцентризма к гелиоцентризму) и Эйнштейна–Фридмана–Хаббла (переход от модели статической Вселенной к модели расширяющейся, эволюционирующей, Вселенной). Сейчас мы стоим на пороге третьей революции в астрономии (открытие ускоренного расширения Вселенной и осознание того факта, что барионная материя — это лишь малая добавка к общей плотности всех видов материи во Вселенной).

Современная космология берёт своё начало с первых десятилетий XX в. За почти 100 лет своего существования, считая от первых наблюдений Слайфера и космологической работы Эйнштейна, космология превратилась из области абстрактных и иногда близких к фантастическим рассуждений в одно из центральных направлений естествознания XXI в. Сегодня космология обладает прочным наблюдательным фундаментом, на основе которого развивается теория, основанная на достижениях современной физики, включая общую теорию относительности, ядерную физику и физику элементарных частиц. Особо следует отметить недавнее открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, что может дать новый импульс развитию теоретических исследований в области космологии.

Космология ставит новые проблемы, выдвигает новые идеи и гипотезы, делает смелые предсказания, которые находятся на переднем крае науки, и даёт широкую и богатую картину окружающего нас мира, ставшую уже неотъемлемой частью общей культуры человечества. Как и в любой живой и сложной науке, в космологии есть нерешённые проблемы. Но так и должно быть, потому что это является источником дальнейшего развития такой замечательной науки, как космология.

В заключение продемонстрируем глубокий снимок неба (рис. 23), сделанный космическим телескопом Хаббла в направлении на галактический полюс (область созвездия Печь). Изображение области неба размером 2,5 угловых минуты получено с рекордно большой суммарной экспозицией, около 2 млн секунд ( $\approx 0,8$  месяца). На снимке почти нет звёзд нашей Галак-

тики, все объекты на нём — это галактики нашей Вселенной. Наиболее слабые из них соответствуют 30-й звёздной величине. Соответствующее красное смещение для них  $\sim 10$ , а их собственный возраст менее 500 млн лет (при современном возрасте Вселенной 13,7 млрд лет). Полное число галактик на снимке — около 6000. Снимок наглядно демонстрирует, что наша Вселенная — это мир галактик. Каждая галактика включает в себя от одного до нескольких сотен миллиардов звёзд. В центре практически любой из галактик располагается сверхмассивная чёрная дыра массой от  $10^6$  до  $10^{10}$  солнечных масс. Кроме того, в каждой галактике имеются чёрные дыры со звёздными массами ( $M = (5-20) M_{\odot}$ ), общая доля которых составляет около 0,1% от массы барионного вещества галактики (звёзд, газа и пыли).

Задача для будущих гигантских оптических и инфракрасных телескопов с зеркалами диаметром 25–39 м и будущего космического телескопа им. Джеймса Вебба с зеркалом диаметром 6,5 м — идти по проницающей силе до так называемой тёмной эры Вселенной (собственный возраст  $\sim 100-200$  млн лет), в которую Вселенная была заполнена только нейтральным водородом и гелием, а звёзды и галактики ещё не успели сформироваться. Наблюдательное обнаружение такой границы существования светящегося барионного вещества будет ещё одним подтверждением правильности наших представлений о структуре и эволюции Вселенной.

**Примечание при корректуре.** После того как наша статья была сдана в печать, были опубликованы результаты обработки наблюдений флуктуаций реликтового излучения с борта космической обсерватории "Планк" (arXiv:1303.507.6; 1303.508.2; 1303.508.3). Новые результаты в основном подтвердили выводы, сделанные на основе анализа наблюдений со спутника WMAP. Новое значение постоянной Хаббла в нашу эпоху  $H_0 = 67,0 \pm 1,2$  км с<sup>-1</sup> на 1 Мпк, соответствующий возраст Вселенной составляет  $T = 13,8 \times 10^9$  лет (соответствующие величины для WMAP  $H_0 = 70,2 \pm 2,2$  км с<sup>-1</sup> на 1 Мпк,  $T = 13,7 \times 10^9$  лет). Обнаружены небольшие, но значимые отклонения от плоского спектра Гаррисона–Зельдовича для начальных флуктуаций, которые позволяют наложить дополнительные ограничения на класс инфляционных моделей.

**Благодарности.** Автор благодарит А.И. Еремееву, М.В. Сажина, А.Д. Чернина, Ю.Л. Менцина и Т.П. Романову за ценные обсуждения.

## Список литературы

1. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва* (М.: ЛКИ, 2008) [Gorbu-nov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)]
2. Лукаш В Н, Михеева Е В *Физическая космология* (М.: Физматлит, 2010)
3. Бисноватый-Коган Г С *Релятивистская астрофизика и физическая космология* (М.: Красанд, 2011)
4. Van der Waerden B L *Science Awakening Vol. 2 The Birth of Astronomy* (Groningen: P. Noordhoff, 1974) [Ван-дер-Варден Б *Пробуждающаяся наука 2. Рождение астрономии* (М.: Наука, 1991)]
5. Потемкина Т М, Обридко В Н (Отв. ред.) *Астрономия древних обществ* (М.: Наука, 2002)
6. Brown P L *Megaliths, Myths, and Men. An Introduction to Astro-Archaeology* (Mineola, N.Y.: Dover Publ., 2000) [Браун П *Стоунхендж. Загадки мегалитов* (М.: Центрполиграф, 2010)]



7. Hawkins G S *Beyond Stonehenge* (Albuquerque, N.M.: Hubert Allen and Associates, 2001) [Хокинс Дж *От Стоунхенджа до инков* (М.: Вече, 2004)]
8. Юревич В А *Астрономия доколумбовой Америки* (М.: УРСС, 2004)
9. Владимирский Б М, Кисловский Л Д *Археoaстрономия и история культуры* (Новое в жизни, науке, технике. Космонавтика, астрономия, Вып. 3/1989) (М.: Знание, 1989)
10. Еремеева А И, Цицин Ф А *История астрономии* (М.: Изд-во МГУ, 1989)
11. Бонгард-Левин Г М (Отв. ред.) *Ригведа. Избранные гимны* (М.: Наука, 1972); Macdonell A A (Selected and translated) *Hymns from the Rigveda* (New Delhi: Y.M.C.A. Publ. House, 1966)
12. Бонгард-Левин Г М, Ильин Г Ф *Индия в древности* (М.: Наука, 1985)
13. Pannekoek A A *History of Astronomy* (New York: Interscience Publ., 1961) [Паннекук А *История астрономии* (М.: Наука, 1966)]
14. Рожанский И Д *Античная наука* (М.: Наука, 1980)
15. Ахутин А В *Античные начала философии* (СПб.: Наука, 2007) с. 358–365
16. Куртик Г Е, Матвиевская Г П "Птолемей и его астрономический труд", в кн. Птолемей К *Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати книгах* (Пер. с древнегреч. И.Н. Веселовского) (М.: Физматлит, 1998) с. 429–451
17. Птолемей К *Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати книгах* (Пер. с древнегреч. И.Н. Веселовского) (М.: Физматлит, 1998)
18. Кимелев Ю А, Полякова Н Л *Наука и религия: историко-культурный очерк* (М.: Наука, 1988) с. 107–109
19. Булгаков П Г *Жизнь и труды Беруни* (Ташкент: Фан, 1972)
20. Николай Кузанский "Об ученом незнании", в кн. *Сочинения в 2-х томах*. Т. 1 (М.: Мысль, 1979) с. 130–133
21. Адамчевский Я *Николай Коперник и его эпоха* (Варшава: Интерпресс, 1972)
22. Веселовский И Н, Белый Ю А *Коперник, 1473–1543* (М.: Наука, 1974)
23. Гребенников Е А *Николай Коперник* (М.: Наука, 1982)
24. Коперник Н О *вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 22–23, 39
25. Коперник Н "Малый комментарий", в кн. Коперник Н О *вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 419–430
26. Ретик Г И "О книгах вращений Николая Коперника", в кн. Коперник Н О *вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 488–547
27. Михайлов А А "Николай Коперник. Биографический очерк", в кн. Коперник Н О *вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 485
28. Струве В Я *Этоды звездной астрономии* (Л.: Изд-во АН СССР, 1953)
29. Бруно Дж "О бесконечности, вселенной и мирах", в кн. Бруно Дж *Диалоги* (М.: Госполитиздат, 1949) с. 295–448
30. Данилов Ю.А. "Комментарии", в кн. Галилей Г *Пробирных дел мастер* (М.: Наука, 1987) с. 262
31. Галилей Г "Звездный вестник", в кн. Галилей Г *Избранные труды в 2-х томах* Т. 1 (М.: Наука, 1964) с. 11–54
32. Галилей Г *Диалог о двух главнейших системах мира птолемеевой и коперниковой* (М.–Л.: Гостехиздат, 1948)
33. Кузнецов Б Г *Галилей* (М.: Наука, 1964) с. 223, 224
34. Боярчук А А, Вибе Д З (Ред.) *Наследие Галилея. Сборник лекций, прочитанных на Конф. "Астрономия и общество", Москва 25–27 марта 2009 года* (М.: Скиф, 2009)
35. Ньютон И *Математические начала натуральной философии* (Пер. с латин. и коммент. А Н Крылова, Под ред. и с предисл. Л С Полака) (М.: Наука, 1989)
36. Ломоносов М В "Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санкт-Петербургской Императорской Академии наук майя 26 дня 1761 года", в кн. *Полное собрание сочинений* Т. 4 (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1955) с. 361–376
37. Еремеева А И *Вселенная Гершеля. Космологические и космогонические идеи и открытия* (М.: Наука, 1966)
38. Shapley H, Curtis H D "The scale of the Universe" *Bull. Natl. Res. Council* 2 (Pt. 3, 11) 171–217 (1921)
39. Hubble E P "Extragalactic nebulae" *Astrophys. J.* 64 321 (1926)
40. Einstein A "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" *Annalen der Physik* 354 769 (1916) [Эйнштейн А, в сб. *Альберт Эйнштейн и теория гравитации* (Под ред. Е. Куранского) (М.: Мир, 1979) с. 146]
41. Einstein A "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie" *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* 1 142 (1917) ["Cosmological considerations in the general theory of relativity" *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 6 (Translator A Engel) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1996) doc. 43; Эйнштейн А "Вопросы космологии и общая теория относительности", в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 1 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1965) с. 601
42. Friedmann A "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* 10 (1) 377 (1922) [Фридман А "О кривизне пространства" *Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва* 56 59 (1924)]
43. Friedmann A "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* 21 (1) 326 (1924) [Фридман А "О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства" *УФН* 80 447 (1963)]
44. Фридман А А *Мир, как пространство и время* (Петроград: Akademia, 1923); *Мир как пространство и время* 2-е изд. (М.: Наука, 1965)
45. Einstein A "Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* 11 326 (1922) [Эйнштейн А "Замечание к работе А. Фридмана "О кривизне пространства"", в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 2 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1966) с. 118; *УФН* 80 453 (1963)]
46. Einstein A "Notiz zu der Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* 16 228 (1922) [Эйнштейн А "К работе А. Фридмана "О кривизне пространства"", в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 2 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1966) с. 119; *УФН* 80 453 (1963)]
47. Lemaître G "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques" *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* 47 49 (1927)
48. Lemaître G "L'Univers en expansion" *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* 53 51 (1933)
49. Slipher V M "Nebulae" *Proc. Am. Phil. Soc.* 56 403 (1917)
50. Slipher V M "Radial velocity observations of spiral nebulae" *Observatory* 40 304 (1917)
51. Сарданавили Г А *Дмитрий Иванович — суперзвезда советской физики. Непубликуемые мемуары* (М.: URSS, 2010) с. 155
52. Humason M L "The large radial velocity of N. G. C. 7619" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 15 (3) 167 (1929)
53. Hubble E "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 15 168 (1929)
54. Einstein A "Relativity, thermodynamics and cosmology" *Science* 80 358 (1934), Review of R. Tolman book [Эйнштейн А, в кн. Эйнштейн А *Физика и реальность* (М.: Наука, 1965) с. 36]
55. Alpher R A, Bethe H, Gamow G "The origin of chemical elements" *Phys. Rev.* 73 803 (1948)
56. Gamow G *The Creation of the Universe* (New York: Viking Press, 1952)
57. Penzias A A, Wilson R W "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s" *Astrophys. J.* 142 419 (1965)
58. Шамонов Т А "Методика абсолютных измерений эффективной температуры радиоизлучения с низкой эквивалентной температурой" *Приборы и техника эксперимента* (1) 83 (1957)
59. Шкловский И С *Звезды: их рождение, жизнь и смерть* 3-е изд. (М.: Наука, 1984) с. 10 [Shklovskii I S *Stars, Their Birth, Life, and Death* (San Francisco : W.H. Freeman, 1978)]
60. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* 3-е изд. (М.: Бюро Квантум, 1995) с. 142 [Ginzburg V L *The Physics of a Lifetime: Reflections on the Problems and Personalities of 20th Century Physics* (Berlin: Springer, 2001)]
61. Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* 18 387 (1992) [Strukov I A et al. *Sov. Astron. Lett.* 18 153 (1992)]
62. Strukov I A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 258 37P (1992)
63. Скулачев Д П *УФН* 180 389 (2010) [Skulachev D P *Phys. Usp.* 53 373 (2010)]
64. Mather J C et al. *Astrophys. J.* 420 439 (1994)
65. Hinshaw G et al. "Three-years Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis" *Astrophys. J. Suppl.* 170 288 (2007); astro-ph/0603451
66. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* 6 110 (1933)
67. Einasto J "Galactic models and stellar orbits", in *Stars and the Milky Way System. Proc. of the First European Astronomical Meeting, Athens, September 4–9, 1972* (Ed. L N Mavridis) (Berlin: Springer-Verlag, 1974) p. 291

68. Rubin V C et al. "Motion of the Galaxy and the local group determined from the velocity anisotropy of distant SC I galaxies. I — The data" *Astron. J.* **81** 687 (1976)
69. Ostriker J P, Peebles P J E "A numerical study of the stability of flattened Galaxies: or, can cold Galaxies survive?" *Astrophys. J.* **186** 467 (1973)
70. Riess A G et al. "Observational evidence from Supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant" *Astron. J.* **116** 1009 (1998)
71. Schmidt B P et al. "The High-Z Supernova Search: Measuring cosmic deceleration and global curvature of the Universe using Type IA Supernovae" *Astrophys. J.* **507** 46 (1998)
72. Perlmutter S et al. "Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift Supernovae" *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
73. Псковский Ю П *Астрон. журн.* **54** 1188 (1977) [Pskovskii Yu P *Sov. Astron.* **21** 675 (1977)]
74. Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **6** 883 (1967) [Zel'dovich Ya B *JETP Lett.* **6** 316 (1967)]
75. Шкловский И С *Астрон. циркуляр* (429) (1967)
76. Kardashev N *Astrophys. J.* **150** L135 (1967)
77. Чернин А Д и др. *Астрофизика* **89** 723 (2012) [Chernin A D et al. *Astron. Rep.* **56** 653 (2012)]
78. Sandage A *Astrophys. J.* **527** 479 (1999)
79. Chernin A D et al. *Astron. Astrophys.* **520** A104 (2010)
80. Зельдович Я Б *Астрофизика* **6** 319 (1970) [Zel'dovich Ya B *Astrophys.* **6** 164 (1970)]
81. Шкловский И С *Вселенная, жизнь, разум* (Под ред. Н С Кардашева, В И Мороза) 6-е изд., доп. (М.: Наука, 1987)
82. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1966) [Gliner E B *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1966)]
83. Глинер Э Б *ДАН СССР* **192** 771 (1970) [Gliner É B *Sov. Phys. Dokl.* **15** 559 (1970)]
84. Муханов В Ф, Чибисов Г В *Письма в ЖЭТФ* **33** 549 (1981) [Mukhanov V F, Chibisov G V *JETP Lett.* **33** 532 (1981)]
85. Старобинский А А *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979) [Starobinskii A A *JETP Lett.* **30** 682 (1979)]
86. Сахаров А Д *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967) [Sakharov A D *JETP Lett.* **5** 24 (1967)]
87. Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **12** 335 (1970) [Kuz'min V A *JETP Lett.* **12** 228 (1970)]
88. Розенталь И Л, Архангельская И В *Геометрия, динамика, Вселенная* (М.: УРСС, 2003)
89. Сахаров А Д *ДАН СССР* **177** 70 (1967) [Sakharov A D *Sov. Phys. Dokl.* **12** 1040 (1968)]
90. Lifshitz E M, Khalatnikov I M *Adv. Phys.* **12** 185 (1963)
91. Лифшиц Е М, Халатников И М *УФН* **80** 391 (1963) [Lifshitz E M, Khalatnikov I M *Sov. Phys. Usp.* **6** 495 (1964)]
92. Belinskii V A, Khalatnikov I M, Lifshitz E M *Phys. Lett. A* **77** 214 (1980)
93. Starobinsky A A *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980)
94. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
95. Linde A D *Phys. Lett. B* **108** 389 (1982)
96. Зельдович Я Б, Старобинский А А *Письма в Астрон. журн.* **10** 323 (1984) [Zeldovich Y B, Starobinskii A A *Sov. Astron. Lett.* **10** 135 (1984)]
97. Zeldovich Ya B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160** IP (1972)
98. Starobinsky A A, Zeldovich Ya B "Spontaneous creation of the Universe", in Zeldovich Ya B *My Universe*. Selected Reviews (Eds B Ya Zeldovich, M V Sazhin) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1992)
99. Sazhin M V, Zeldovich Ya B "Gravitational Waves in Cosmology: Sources and Detection", in Zeldovich Ya B *My Universe*. Selected Reviews (Eds B Ya Zeldovich, M V Sazhin) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1992)
100. Rubakov V A, Sazhin M V, Veryaskin A V *Phys. Lett. B* **115** 189 (1982)
101. Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Lett. B* **125** 139 (1983)
102. Глинер Э Б, Дымникова И Г *Письма в Астрон. журн.* **1** 7 (1975) [Gliner É B, Dymnikova I G *Sov. Astron. Lett.* **1** 93 (1975)]
103. Глинер Э Б *УФН* **172** 221 (2002) [Gliner É B *Phys. Usp.* **45** 213 (2002)]
104. Фомин П И *Докл. Украинской АН. Сер. А. Физ.-мат. тех. науки* (9) 831 (1975)
105. Zeldovich Ya B, Grishchuk L P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **207** 23P (1984)
106. Albrecht A, Steinhardt P J *Phys. Rev. Lett.* **48** 1220 (1982)
107. Муханов В Ф *Письма в ЖЭТФ* **41** 402 (1985) [Mukhanov V F *JETP Lett.* **41** 493 (1985)]
108. Зельманов А Л *Астрон. журн.* **54** 1168 (1977) [Zelmanov A L *Sov. Astron.* **21** 664 (1977)]
109. Лукаш В Н *ЖЭТФ* **79** 1601 (1980) [Lukash V N *Sov. Phys. JETP* **52** 807 (1980)]
110. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория* (М.: КРАСАНД, 2010); Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)
111. Kofman L, Linde A, Starobinsky A A *Phys. Rev. Lett.* **73** 3195 (1994)
112. Сахаров А Д *ЖЭТФ* **76** 1172 (1979) [Sakharov A D *Sov. Phys. JETP* **49** 594 (1979)]
113. Affleck I, Dine M *Nucl. Phys. B* **249** 361 (1985)
114. Kuzmin V A, Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Lett. B* **155** 36 (1985)
115. Рубаков В А, Шапошников М Е *УФН* **166** 493 (1996) [Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Usp.* **39** 461 (1996)]
116. Gamow G *Phys. Rev.* **70** 572 (1946)
117. Yang J, Turner M S, Schramm D N, Steigman G, Olive K A *Astrophys. J.* **281** 493 (1984)
118. Зельдович Я Б *УФН* **89** 647 (1966) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **9** 602 (1967)]
119. Варшалович Д А и др. *УФН* **180** 415 (2010) [Varshalovich D A et al. *Phys. Usp.* **53** 397 (2010)]
120. Zeldovich Ya B, Einasto J, Shandarin S F *Nature* **300** 407 (1982)
121. Doroshkevich A G, Khlopov M Iu, Sunyaev R A, Szalay A S, Zeldovich Ia B *Ann. New York Acad. Sci.* **375** 32 (1981)
122. Peebles P J E, Yu J T *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
123. Зельдович Я Б, Курт В Г, Сюняев Р А *ЖЭТФ* **55** 278 (1968) [Zel'dovich Ya B, Kurt V G, Syunyaev R A *Sov. Phys. JETP* **28** 146 (1969)]
124. Дорошкевич А Г, Новиков И Д *ДАН СССР* **154** 809 (1964) [Doroshkevich A G, Novikov I D *Sov. Phys. Dokl.* **9** 111 (1964)]
125. Kashlinsky A, Rees M J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **205** 955 (1983)
126. Zel'dovich Ya B *Astron. Astrophys.* **5** 84 (1970)
127. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astron. Astrophys.* **20** 189 (1972)
128. Shandarin S F, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **61** 185 (1989)
129. Arnold V I, Shandarin S F, Zeldovich Ia B *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics* **20** 111 (1982)
130. Дорошкевич А Г *Астрофизика* **6** 581 (1970) [Doroshkevich A G *Astrophysics* **6** 320 (1970)]
131. Doroshkevich A G, Kotok E V, Poliudov A N, Shandarin S F, Sigov Iu S, Novikov I D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **192** 321 (1980)
132. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **165** 723 (1995) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **38** 687 (1995)]
133. Gurevich A V, Sirota V A, Zybin K P *Phys. Lett. A* **207** 333 (1995)
134. Komberg B V, Lukash V N *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **269** 277 (1994)
135. Лукаш В Н, Михеева Е В, Малиновский А М *УФН* **181** 1017 (2011) [Lukash V N, Mikheeva E V, Malinovsky A M *Phys. Usp.* **54** 983 (2011)]
136. Tonry J L et al. *Astrophys. J.* **594** 1 (2003)
137. Sahni V, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 373 (2000)
138. Boisseau B, Esposito-Farèse G, Polarski D, Starobinsky A A *Phys. Rev. Lett.* **85** 2236 (2000)
139. Линде А Д *Физика элементарных частиц и инфляционная космология* (М.: Наука, 1990) [Linde A *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Chur: Harwood Acad. Publ., 1990)]
140. Новиков И Д, Кардашев Н С, Шацкий А А *УФН* **177** 1017 (2007) [Novikov I D, Kardashev N S, Shatskii A A *Phys. Usp.* **50** 965 (2007)]
141. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008) [Shatskii A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)]
142. Кардашев Н С *УФН* **179** 1191 (2009) [Kardashev N S *Phys. Usp.* **52** 1127 (2009)]
143. Зельманов А Л "К постановке космологической проблемы", в сб. *Труды 2 съезда Всесоюз. астрономо-геодезического общества 25–31 января 1955 г.* (Отв. ред. А А Михайлов) (М.: Изд-во АН СССР, 1960) с. 77, докл. на 2 съезде ВАГО 27 янв. 1955 г.
144. Идлис Г М "Основные черты наблюдаемой астрономической Вселенной, как характерные свойства обитаемой космической системы" *Изв. Астрофиз. ин-та АН КазССР* **7** 39 (1958)