

# Золотой век космологии

А.М.Черепашук, А.Д.Чернин

Современная космология — ровесница нашего любимого научно-популярного журнала. Она начиналась с наблюдений американского астронома В.Слайфера, обнаружившего в 1912—1915 гг. знаменитый ныне феномен космического красного смещения. Тогда же была создана общая теория относительности, ставшая фундаментом всей науки о Вселенной. С тех пор грандиозные открытия астрономов и теоретиков следовали одно за другим непрерывной чередой. Мы расскажем здесь о самых важных событиях в столетней истории космологии, часть из которых была отмечена Нобелевскими премиями, в том числе и в 2011 г.

## Вселенная — мир галактик

В 1917 г. в первой работе по космологии, основанной на только что построенной им общей теории относительности, Эйнштейн говорил о Вселенной как о мире звезд; таково было тогда общепринятое мнение физиков и астрономов. Однако уже в 1918—1922 гг. эстонский астроном Э.Эпик, выпускник Московского университета, работавший тогда в Москве, и вслед за ним в 1924—1925 гг. американский астроном Э.Хаббл доказали, что «строительными блоками» Вселенной служат галактики (рис.1, 2) — гигантские звездные системы, подобные нашей Галактике, которую мы видим на небе как Млечный Путь\*.



**Анатолий Михайлович Черепашук**, академик, директор Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ, заведующий астрономическим отделением физического факультета МГУ. Вице-президент Европейского астрономического общества, член Английского Королевского астрономического общества. Область научных интересов — исследование двойных систем, обратные задачи астрофизики. Член редколлегии журнала «Природа».



**Артур Давидович Чернин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник того же института. Область научных интересов — космология, физика галактик.

Большинство галактик входит в группы и скопления (рис.3, 4), а скопления образуют самые большие по протяженности сгущения вещества в природе — сверхскопления, которые представляют собой уплотненные образования, содержащие несколько скоплений галактик. Крупнейшие из сверхскоплений называются стенами. Чаще всего сверхскопления соединяются между собой цепочками галактик и скоплений; эти цепочки носят

название филаментов. Размеры типичных сверхскоплений и филаментов измеряются примерно тремя сотнями миллионов световых лет или, что то же, сотней мегапарсек (напомним, что один парсек почти точно равен трем световым годам). Более крупных по размерам и массе сгущений вещества во Вселенной не существует: иерархия астрономических систем обрывается на сверхскоплениях и филаментах.

Последнее не означает, однако, что эти крупнейшие системы разбросаны в пространстве произвольно и беспорядочно. Как оказывается, сверхскопления и

\* Подробнее о работах Хаббла, о мире галактик и их систем можно прочитать в книгах [1, 2].



Рис.1. Гигантская галактика туманность Андромеды, соседка Млечного Пути по Местной группе галактик. Расстояние до нее 0.7 Мпк. Мелкие точки по всему фону — звезды нашей Галактики.



Рис.2. Галактика в созвездии Гончих Псов, одна из самых красивых космических спиралей.

филаменты организованы и выстроены в глобальную квазипериодическую структуру, которую сейчас называют космической паутиной (рис.5). Она похожа еще на пчелиные соты, или на кристаллическую решетку, или на гигантские трехмерные кружева, в которых имеются более или менее регулярно повторяющиеся пустоты (войды), очерчиваемые сверхскопления-

ми и филаментами. Этот вселенского масштаба космический узор впервые обнаружили и описали Я.Э.Эйнasto и его ученики в Тартуской обсерватории еще в конце 1970-х годов. Тогда же Я.Б.Зельдович вместе с А.Г.Дорошкевичем и другими сотрудниками предложил первую теоретическую модель, объясняющую происхождение, строение

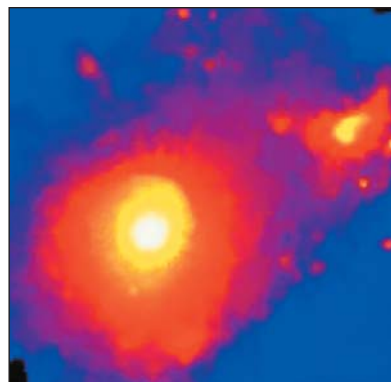


Рис.3. Скопление галактик Вирго (Дева). Изображение его центральной области (4 Мпк в поперечнике) в рентгеновских лучах. Расстояние до центра скопления 18 Мпк.

и эволюцию крупномасштабной космической паутины.

С середины 1990-х годов прогресс астрономической техники сделал доступными для наблюдений огромные объемы космического пространства с размерами в несколько гигапарсек, содержащие сотни и тысячи войдов, сверхскоплений и филаментов. Это стало возможным в первую очередь благодаря космическому телескопу «Хаббл» (рис.6), который уже два десятка лет находится на орбите вокруг Земли, а также новейшим наземным телескопам с зеркалами диаметром в 8–10 м. Вселенная впервые предстала перед нами в глобальном масштабе, так что астрономы смогли наконец увидеть ее как целое, отвлекаясь от таких «деталей» ее устройства, как сгущения и разрежения вещества любых масштабов, даже самых крупных. Оказалось, что в среднем по объемам с размером примерно 1 Гпк и больше Вселенная является однородной по распределению вещества. Объем размером в один гигапарсек часто называют ячейкой однородности в наблюдаемой Вселенной.

Согласно общей теории относительности, пространство, однородно заполненное веществом, и само должно быть однородным. Однородность — это

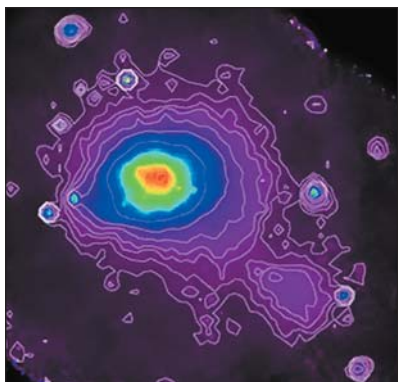


Рис.4. Скопление галактик Кома (Волосы Вероники), одно из самых крупных в наблюдаемой Вселенной. Рентгеновский снимок центральной области (6 Мпк в поперечнике).

свойство геометрической симметрии пространства. В однородном пространстве все точки равноправны, так что сдвиг в подобном пространстве от одной точки к другой оставляет результаты физических и астрономических измерений неизменными. В наблюдаемой Вселенной «точками» однородного пространства служат ячейки однородности.

Идея однородности мира как целого лежит в основе новой космологии. Она восходит к традиционным представлениям о мире, известным как коперниковский принцип, согласно которому в пространстве мира нет единого выделенного центра, а все области в нем равноправны между собой. Еще Паскаль говорил: мир — это круг, центр которого везде, а окружность нигде.

### Разбегание галактик

Эйнштейн полагал, что идея однородности распространяется и на время. Если время однородно, то все моменты времени равноправны между собой. Но это означает, что в мире ничего не происходит, он всегда один и тот же в прошлом, настоящем и будущем. Это представление — тоже философского характера — не вытекало из фактов астроно-

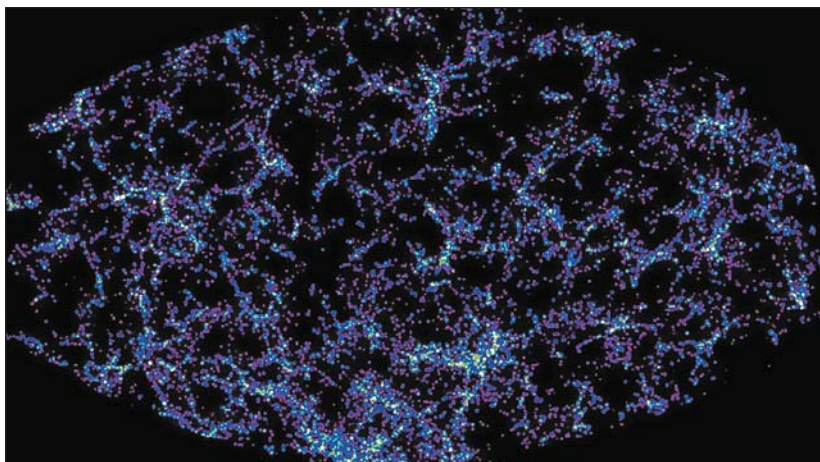


Рис.5. Карта крупномасштабной космической структуры. Каждая точка — галактика или квазар из каталога SDSS (The Sloan Digital Sky Survey) в слое толщиной 14 Мпк до расстояний 330 Мпк. Четыре главные элементы структуры — плотные скопления галактик, протяженные филаменты, уплощенные сверхскопления, или стены, и почти пустые области — войды. Все вместе они образуют квазипериодическую космическую паутину. (Из работы И. Сухоненко, Я. Эйнасто, Л. Ливамяги и др., 2011).



Рис.6. Космический телескоп «Хаббл» на орбите вокруг Земли.

мии; оно не следовало с необходимостью и из общей теории относительности. Теория допускала в действительности и другую возможность, на которую указал в 1922—1924 гг. петербургский математик А.А.Фридман\*.

В космологии Фридмана пространство, как и у Эйнштейна,

\* Его научная биография изложена в книге [3].

считалось однородным; но в его Вселенной не было покоя, она расширялась.

Одно из фундаментальных следствий теории расширяющегося мира — вывод, что Вселенная существует не вечно, что она возникла конечное время назад. Проявив необычайную научную смелость и редкую физическую интуицию, Фридман нашел численную оценку возра-

ста мира. Он исходил из скудных астрономических сведений, которыми тогда располагали, и сказал, что мир существует примерно десять миллиардов лет, по порядку величины. Как мы знаем, возраст мира, измеренный в наши дни с точностью до трех значащих цифр, составляет 13.7 млрд лет, — но это и есть 10 млрд лет с точностью до порядка величины.

Из модели Фридмана вытекал и ряд других следствий. Особенно важны те из них, которые допускают непосредственную проверку в астрономических наблюдениях. Самое известное — закон космологического расширения. В простейшем случае (когда скорости и расстояния не слишком велики) закон гласит: скорость удаления галактики от нас прямо пропорциональна расстоянию до нее.

Движения галактик изучают в астрономии с 1912 г., когда Слайфер приступил к выполнению обширной наблюдательной программы, целью которой было измерение скоростей близких туманностей, как тогда называли галактики. Он обнаружил, что галактики не стоят на месте, а движутся в пространстве, причем большинство из них удаляются от нас. Этот вывод

прямо вытекал из наблюдаемых спектров галактик: их движение обнаруживало себя в сдвиге спектральных линий света (известных оптикам уже тогда достаточно точно по «земным» измерениям) к красному концу спектра. Сдвиг спектральных линий в красную сторону возникает всегда, когда расстояние между источником и приемником света возрастает со временем, — таков эффект Доплера, хорошо изученный к тому времени в физике. Количественной мерой красного смещения служит относительная величина увеличения длины волны, т.е. разность зарегистрированной и исходной («лабораторной») длин волн, деленная на исходную длину волны. Ее называют просто красным смещением — как и само явление; это одна из основных наблюдаемых физических величин в космологии. Если значение красного смещения мало по сравнению с единицей, то справедлив упомянутый выше закон прямой пропорциональности скорости и расстояния.

Космическое красное смещение имеет, как впоследствии оказалось, всеобщий характер: оно наблюдается у всех галактик во Вселенной. Исключение составляют только самые близ-

кие к нам звездные системы; таковы знаменитая туманность Андромеды и несколько других (менее крупных) галактик, находящихся от нас на расстояниях, не превышающих примерно 1 Мпк. Но если расстояния больше, чем 1 Мпк, все находящиеся за этой границей галактики «разбегаются в пространстве», как говорил об этом Слайфер.

В 1927 г. Ж.Лемэтр, бельгийский математик, повторив вычисления Фридмана, вывел из них в явном виде закон космологического расширения. Что гораздо важнее, он привлек данные Слайфера о скоростях примерно трех десятков галактик и собрал опубликованные к тому времени в астрономической литературе сведения о расстояниях до них. Лемэтр показал, что скорости удаления галактик действительно пропорциональны расстояниям. Он вычислил также и величину отношения скорости к расстоянию: она составила у Лемэтра примерно 600 километров в секунду на мегапарсек (км/с/Мпк) в принятых в астрономии единицах.

Через два года к тому же результату пришел и Хаббл. Он опирался по большей части на те же наблюдательные данные, что и Лемэтр. На рис.7 воспроизводится диаграмма скорость—расстояние из работы Хаббла 1929 года. На ней каждая галактика представлена точкой в соответствии с расстоянием до нее (горизонтальная ось) и скоростью удаления от нас (вертикальная ось). Самые большие скорости достигают здесь 10 тыс. км/с (по вертикали должно быть км/с — у Хаббла опечатка). Самые малые расстояния на диаграмме составляют 0.1—0.2 Мпк, а самые большие — 2 Мпк. Скорости очевидным образом растут с расстоянием и притом почти строго по закону прямой пропорциональности. Отношение скорости к расстоянию, установленное Хабблом из этой диаграммы, практически совпадает с величиной, найденной ранее Лемэтром.

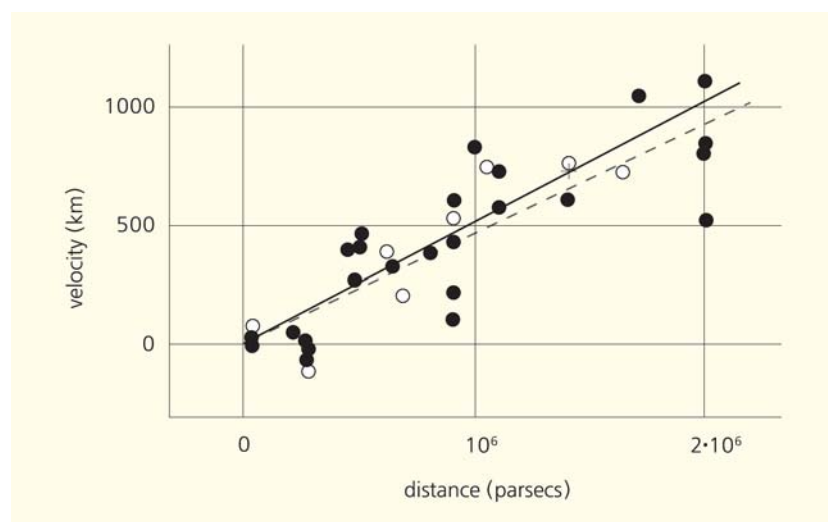


Рис.7. Диаграмма скорость—расстояние, построенная Э.Хабблом в 1929 г. Расстояния в действительности почти в 10 раз больше, чем считал тогда Хаббл. По вертикальной оси — скорость в единицах км/с.

Результаты Лемэтра и Хаббла получили подтверждение и развитие в наблюдательных работах 1930-х годов. С тех пор закон разбегания галактик носит имя Хаббла, а отношение скорости разбегающихся галактик к расстоянию до них (это отношение характеризует темп разбегания) называют постоянной Хаббла. Как позднее, через 30 лет после Хаббла, выяснил А.Сэндидж, его ученик и некогда сотрудник, все расстояния на оригинальной хаббловской диаграмме (рис.7) должны быть в действительности раз в восемьдесят больше, чем думали Лемэтр и Хаббл. Но это была систематическая ошибка, т.е. она почти одинакова для всех галактик; в результате с ее исправлением закон Хаббла не был отменен, а остался полностью в силе. После поправки Сэндиджа предельные расстояния на диаграмме возросли до 16—20 Мпк. Изменилась соответственно и постоянная Хаббла: ее значение составило у Сэндиджа 60—75 км/с/Мпк, что очень близко к значениям, которые приняты в настоящее время. Подводя в 2006 г. итог 15-летней программы наблюдений с помощью космического телескопа «Хаббл», Сэндидж и его соавторы дали для постоянной Хаббла величину 62 км/с/Мпк (с ошибкой около 10%) для огромного интервала расстояний от 2—3 до 200 Мпк. На всех этих расстояниях надежно прослеживается закон разбегания Хаббла.

Удивительное согласие прямых астрономических наблюдений с весьма абстрактной (как почти всем поначалу казалось) теорией расширяющейся Вселенной произвело сильное впечатление в 1930-е годы. Действительно, не только сам факт расширения, предсказанный теорией Фридмана, но и важнейшая закономерность этого явления — пропорциональность скорости расстоянию — были, как все считали тогда, надежно доказаны в наблюдениях. Эту точку зрения разделял Эйн-

штейн. При таких обстоятельствах он считал, что его собственная модель статической неизменной Вселенной «теперь не нужна».

### Темная материя

Всего через несколько лет после работ Лемэтра и Хаббла в космологии произошло новое крупнейшее событие. В 1932 г. швейцарско-американский астроном Ф.Цвикки заметил, что кроме светящегося вещества галактик во Вселенной должны иметься еще и невидимые, «скрытые» массы, которые проявляют себя только своим тяготением. Он изучал скопление галактик в созвездии Волосы Вероники — крупном образовании, содержащем тысячи звездных систем, подобных туманности Андромеды или нашей Галактике. Галактики движутся в этом скоплении со скоростями, достигающими тысячи километров в секунду. Чтобы удержать их в объеме скопления, требуется тяготение, которое не способно создать одни только видимые, светящиеся массы самих галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и, согласно подсчетам Цвикки, тут нужны дополнительные массы, которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы галактик скопления.

Позднее, в 1970-х годах, усилиями астрономов СССР и США было обнаружено, что скрытые массы должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в изолированных крупных галактиках. Сначала Я.Э. Эйнасто с сотрудниками, а затем В.Рубин, Дж.Острайкер, Дж.Пиблс и их коллеги выяснили, что скрытые массы образуют невидимые гало крупных галактик. Эти гало — почти сферические образования, радиусы которых в 5—10 раз превышают размеры самих звездных систем. Такая крупная галактика, как, скажем, туманность Андро-

меды или наш Млечный Путь, состоит из звездной системы, погруженной в распределение невидимой массы, которое простирается на расстояния до сотни килопарсек от центра галактики. Эти темные гало, как и дополняющие массы у Цвикки, проявляют себя только своим тяготением.

Невидимое вещество, наполняющее гало галактик и скоплений, принято сейчас называть темной материей. Скорее всего, темная материя представляет собой нерелятивистский газ стабильных (или долгоживущих) электрически нейтральных элементарных частиц, которые могут испытывать только слабое ядерное взаимодействие и, конечно, взаимодействие гравитационное. В списке элементарных частиц, которым располагает на сегодняшний день фундаментальная физика, подходящих на эту роль частиц, увы, нет. Прямой поиск «темных» частиц ведется в настоящее время в ряде крупных лабораторий мира. Не исключено также, что они могли бы проявить себя и в экспериментах на Большом адронном коллайдере (ЛНС) в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария). На нем частицы будут разгоняться до энергий, заметно превышающих предполагаемую энергию покоя темных частиц. И если природа склонна отдавать этим частицам заметно больше (в четыре—пять раз) энергии, чем барионам, то почему бы таким частицам не рождаться в массовом порядке на ЛНС? Впрочем, последнее не так уж и очевидно. Физическая природа темной материи и темной энергии — одна из самых острых проблем современной фундаментальной физики.

### Реликтовое излучение

В 1965 г. американские радиоинженеры А.Пензиас и Р.Вилсон обнаружили, что вся Вселенная пронизана излучением,

приходящим к нам изотропно, т.е. равномерно из всех направлений. Максимум в спектре этого излучения приходится на миллиметровые волны, причем сам спектр (распределение излучения по длинам волн или частотам) совпадает по форме со спектром абсолютно черного тела. Положение максимума в спектре излучения отвечает, как выяснилось, очень низкой температуре — всего около трех градусов выше абсолютно нулю. В современных наблюдениях эта температура измеряется исключительно точно:  $T = 2.725$  К, с ошибкой меньше десятой доли процента. Это излучение называют микроволновым фоном Вселенной, или реликтовым излучением. Если говорить о нем на языке квантов, можно сказать, что в мире имеется равновесный газ фотонов, равномерно заполняющих все пространство. В каждом кубическом сантиметре Вселенной содержится примерно 500 реликтовых фотонов.

Это открытие было отмечено двумя Нобелевскими премиями. Первая присуждена в 1978 г. Пензиасу и Вилсону, а вторая — в 2006 г. Дж.Смуту и Дж.Маттеру, которые дали точное доказательство (в 1992 г.) того, что спектр излучения действительно является «чернотельным». Это было сделано с помощью американского спутника COBE (Cosmic Background Explorer). Кроме того, COBE измерил слабую — на уровне тысячных долей процента — анизотропию фонового излучения. Последняя представляет собой «отпечаток» первоначально слабых неоднородностей вещества ранней Вселенной, которые позднее дали начало наблюдаемым крупномасштабным космическим структурам — галактикам и скоплениям галактик.

Заметим, что космическое фоновое излучение регистрировалось еще в 1957 г. в Пулковской обсерватории с помощью антенны, построенной Т.А.Шмаоновым, С.Э.Хайкиным

и Н.Л.Кайдановским. Но увы, никто тогда не придал этому значения. Слабую анизотропию реликтового излучения первыми заметили в 1992 г. И.А.Струков и его сотрудники (Институт космических исследований РАН) с помощью российского космического аппарата «Реликт». От ГАИШ МГУ в этом эксперименте принимал участие космолог-теоретик М.В.Сажин. В обоих случаях это были достижения «нобелевского» ранга. Без Нобелевской премии остался и русско-американский теоретик Г.А.Гамов, некогда ученик профессора Фридмана по Петербургскому университету. Он предсказал существование во Вселенной реликтового излучения с температурой в несколько градусов абсолютной шкалы еще за 15 лет до его открытия.

Развивая эволюционную космологию Фридмана, Гамов предположил, что в первые мгновения существования Вселенной космическое вещество было не только очень плотным, как следовало из теории Фридмана, но еще и очень горячим. В гамовской теории горячей Вселенной\* температура космической среды могла достигать столь высоких значений (многие миллиарды градусов), что тепловая энергия частиц была больше энергии связи нуклонов в атомных ядрах. При таких условиях космическая плазма представляла собой смесь протонов, нейтронов и электронов. По мере охлаждения плазмы из-за космологического расширения ее температура снижалась, и при значении около нескольких миллиардов градусов в космической среде начались термоядерные реакции (как в водородной бомбе), в ходе которых происходило образование ядер гелия-4, содержащих каждое по

\* О современном развитии этой теории и, в частности, о процессах «закалки» нейтронов, нейтрино, частиц темной материи в ранней Вселенной, см. в монографии [4], а также в научно-популярной книге [5].

два протона и два нейтрона. Точный расчет, проделанный после Гамова Я.Б.Зельдовичем, Р.Вагонером и другими физиками, показал, что за первые три минуты в таком космическом термоядерном реакторе образуется примерно 25% гелия (по массе). Эта доля гелия должна сохраниться и до нынешней эпохи. На временах, превышающих три минуты, ядерный синтез прекращается: из-за быстрого космологического расширения температура вещества падает до таких значений, при которых термоядерные реакции синтеза уже не идут.

Этот теоретический расчет допускает прямую проверку: нужно сравнить результат с наблюдаемым содержанием реликтового гелия в современной космической среде. Данные наблюдений говорят, что гелия примерно 25% из всей массы вещества. Налицо полное согласие теории первичного термоядерного синтеза и реальной распространенности гелия во Вселенной. Теория хорошо объясняет также и космическую распространенность реликтовых ядер гелия-3, дейтерия и лития-7.

Эпоха первичных ядерных реакций, когда возраст мира измерялся секундами и минутами, — самый ранний момент истории Вселенной, о котором имеются надежные наблюдательные сведения [6].

Начиная с этой эпохи космологическая эволюция надежно прослеживается и строго документируется наблюдательными данными.

Сначала горячая космическая плазма находилась в состоянии термодинамического равновесия; в этом состоянии вместе с ней обязательно должно было существовать и равновесное электромагнитное излучение, т.е. газ фотонов с той же температурой, что и у горячего вещества. В ходе космологического расширения плазма охлаждалась, и при возрасте мира в 330 тыс. лет температура упала до значения примерно 3000 К,

при которой произошла рекомбинация плазмы: электроны соединились с ионами, и плазма превратилась в газ нейтральных атомов. Тогда фотоны космического излучения перестали взаимодействовать с веществом и распространялись с тех пор свободно. Они сохранили и донесли до нас картину «стенки последнего рассеяния», как об этом говорят радиоастрономы. Эти фотоны и эту «стенку» увидели открыватели реликтового излучения и исследователи его структуры.

Результат наблюдений состоит прежде всего в том, что Вселенная в первые минуты своего существования действительно была горячей. Далее, существовавшие тогда и выжившие до нашей эпохи реликтовые фотоны приходят к нам изотропно, равномерно из всех направлений в пространстве. Поэтому наблюдаемая картина — это сплошной фон, на котором почти ничего не изображено. Казалось бы, картина бедновата информацией. Однако из самого факта ее бесструктурности немедленно вытекает вывод большой важности: вещество ранней Вселенной было распределено однородно (или почти строго однородно — с точностью до тысячных долей процента) в эпоху последнего рассеяния фотонов. Но это значит, что и само пространство мира было тогда однородно, и притом практически во всех масштабах — от отдельных частиц до масштаба всей Вселенной. Изотропия реликтового фона усиливает это заключение: пространство должно быть не только однородным, но и изотропным — все направления в нем равноправны. Такое пространство обладает максимальной геометрической симметрией: оно не меняется и выглядит одним и тем же при любых сдвигах и поворотах в нем. Таким образом, с помощью реликтового излучения напрямую наблюдается и строго фиксируется физическое состояние мира и его геометрические симмет-

рии в раннюю эпоху, когда в нем еще не успели образоваться галактики. И это далеко не все из того, что способно сообщить нам реликтовое излучение.

Детальное изучение тонкой структуры реликтового излучения, начатое с помощью космических аппаратов «Реликт» и COBE, а затем успешно продолженное в последние годы по программе WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), позволило установить, что на равномерном реликтовом фоне имеется в действительности определенный «пятнистый» рисунок: это слабые (на уровне тысячных долей процента) отклонения от идеальной однородности фона. Эти отклонения представляют собой отпечаток слабых неоднородностей — сжатий и разрежений космической среды, которые (как уже упоминалось) позднее дали начало галактикам и их системам. В сжатиях температура излучения слегка выше средней — это дает яркие (относительно среднего фона) пятна, а в разрежениях — слегка ниже, и здесь возникают относительно темные пятна. Степень отклонения от фона различна от пятна к пятну и среди ярких, и среди темных пятен. В этой сложной картине запечатлены (закодированы, можно сказать) важнейшие физические характеристики как самих протогалактических неоднородностей, так и всей Вселенной.

Особенно интересны самые яркие пятна на картине реликтового фона. Двум таким соседним пятнам соответствуют два сгущения, которые в эпоху рекомбинации космической плазмы располагались на вполне определенном характерном расстоянии друг от друга. Теория образования галактик, основанная на классической работе Е.М.Лифшица (опубликованной еще в 1946 г.), говорит о том, что это характерное расстояние есть возраст мира в эпоху рекомбинации, умноженный на скорость света; этот возраст известен — 330 тыс. лет (см. вы-

ше). Линейному расстоянию между двумя сгущениями соответствует определенный угол между направлениями в пространстве на два соответствующих ярких пятна. При этом отношение между видимым углом и собственным линейным размером зависит от того, какова геометрия пространства: в сферическом пространстве интересующий нас угол составляет полтора градуса, в гиперболическом — половину градуса, в плоском — один градус.

В наблюдениях было обнаружено, что характерное угловое расстояние между соседними яркими пятнами равно  $1^\circ$  (с точностью до 2%). Это означает, что трехмерное пространство, в котором происходит космологическое расширение, является плоским. Или во всяком случае практически плоским, очень близким к плоскому. Выходит, что природа предпочла самый простой вариант пространственной геометрии мира. Так стала известна геометрия трехмерного пространства, в котором движутся разбегаящиеся галактики (это пространство называют сопутствующим).

## Космическое ускорение

В 1998—1999 гг. две международные группы астрономов-наблюдателей, одной из которых руководили Б.Шмидт и А.Райсс, а другой — С.Перлматтер, сообщили, что им удалось измерить не только скорости удаляющихся галактик и расстояния до них, но также — впервые в космологии — и ускорение, которое испытывают галактики в своем движении. Эта задача была принципиально невыполнима, пока дальность действия телескопов оставалась в границах ячейки однородности. Но во второй половине 1990-х годов космический телескоп «Хаббл» и другие крупнейшие астрономические инструменты позволили преодолеть этот барьер, и наблюдения вышли наконец

на истинно космологические, глобальные расстояния в расширяющемся мире.

Наблюдения на больших космологических расстояниях интересны прежде всего тем, что именно они способны напрямую подтвердить или опровергнуть космологическую теорию однородной расширяющейся Вселенной. И теория Фридмана действительно была проверена и подтверждена в новейших наблюдениях на рекордно больших расстояниях. Это было весьма значительное достижение астрономической науки. Оно, правда, не привлекло к себе большого внимания: в теории Фридмана уже давно, с середины 1930-х годов, никто не сомневается. Кроме того, сильным независимым свидетельством в пользу однородности и изотропии мира послужило открытие и исследование реликтового излучения (см. выше).

В наблюдениях на глобальных расстояниях есть и еще одна примечательная особенность. Дело в том, что закон Хаббла, как уже говорилось, применим лишь на сравнительно малых расстояниях, когда скорости разбегания галактик гораздо меньше скорости света. При таких условиях он служит простым и хорошим первым приближением, вытекающим из строгого общего соотношения между скоростью (вернее, красным смещением) и расстоянием, даваемого точной теорией космологического расширения. В следующем после закона Хаббла приближении это соотношение дает более сложную зависимость, в которую входят не только скорость и расстояние, но также и ускорение, которое испытывают разбегающиеся галактики.

Ускорение может быть, вообще говоря, как положительным, так и отрицательным. При положительном ускорении скорость удаления галактик возрастает со временем, а при отрицательном убывает. При положительном ускорении измеряемое расстоя-

ние больше, чем при отрицательном. Большее расстояние означает, что видимая яркость источника света будет в таком случае меньше. На малых расстояниях этот эффект исчезающе мал. Но на космологических расстояниях такого рода потемнение или уярчение источника света можно заметить в наблюдениях и довольно точно измерить, если воспользоваться методом, предложенным много лет назад профессором ГАИШ МГУ Ю.П.Псковским. Что и поспешилось сделать, и притом независимым друг от друга образом, двум упомянутым выше группам наблюдателей. Руководителям этих групп присуждена Нобелевская премия 2011 г. «за открытие ускоряющегося расширения Вселенной по наблюдениям сверхновых звезд» (подробнее об этом см. статью в конце номера).

Ранее считалось, что разбегание галактик может только замедляться со временем под действием их собственного взаимного тяготения, так что космическое ускорение должно быть отрицательным. Но ускоряющееся разбегание означает, что в природе имеется не только всемирное тяготение, но и «всемирное антитяготение», всеобщее отталкивание, которое стремится не сблизить галактики, а удалить их друг от друга. Более того, антитяготением преобладает над тяготением в глобальном космологическом масштабе.

О всемирном антитяготении первым сказал Эйнштейн (хотя и в других словах). В его космологической модели 1917 года притяжение всех тел природы друг к другу... отсутствовало. Ньютоновское всемирное тяготение при этом, однако, не отменялось; но помимо него в эйнштейновской модели действовал еще один силовой фактор — всемирное антитяготение, которое полностью и точно компенсировало взаимное тяготение космических тел в масштабе всей Вселенной. Ни-

чего подобного прежняя, доэйнштейновская физика не знала. Но антитяготение не вытекало в действительности и из общей теории относительности как таковой. Это была совершенно новая идея. Тем не менее она органично и в исклчительно экономной форме была введена в структуру общей теории относительности, в ее математические уравнения. Антитяготение было представлено в этих уравнениях всего одной и притом постоянной физической величиной, которая получила позднее название космологической константы. Она обеспечивала в модели Эйнштейна компенсацию всемирного тяготения — без нее теория не допускала бы статичности мира.

Эйнштейновское антитяготение присутствует и в космологической теории Фридмана. Но в ней нет точной компенсации тяготения антитяготением. Во Вселенной Фридмана антитяготение может быть и слабее тяготения, и — при определенных условиях — сильнее его. Вариант теории, при котором в современном наблюдаемом состоянии Вселенной преобладает антитяготение, стал в наши дни стандартной космологической моделью. Она очень хорошо согласуется с наблюдаемым феноменом ускоряющегося космологического расширения, да и со всем вообще комплексом современных наблюдательных данных о Вселенной как целом. В этой модели космологическая постоянная Эйнштейна выступает как главная и единственная физическая характеристика всемирного антитяготения.

В стандартной модели физическим агентом, создающим антитяготение, служит некая невидимая космическая среда, получившая название темной энергии. Считается, что она равномерно заполняет все пространство мира, а ее плотность всюду одинакова и неизменна во времени (в любой системе отсчета). По измеренной величине космического ускорения астрономы



смогли установить, что в наблюдаемой Вселенной на темную энергию приходится около 70% всей массы/энергии мира; темной материи принадлежит примерно 25% полной массы/энергии; на «обычное» вещество из протонов, нейтронов и электронов (это вещество называют барионным) остается меньше 5%, а на космическое реликтовое излучение выпадают сотые доли процента. Доля темной энергии примерно в три раза больше доли всех остальных видов космической среды. При таких обстоятельствах во Вселенной как целом всемирное антигравитационное, создаваемое темной энергией, сильнее тяготения, создаваемого веществом.

Интерпретация темной энергии как макроскопической среды с постоянной плотностью (а последняя прямо выражается через космологическую постоянную Эйнштейна) восходит к Лемэтру, к его работам 1930—1940-х годов; в 1965 г. ее детально разработал Э.Б.Глинер. Темная энергия — весьма необычная среда. Начать с того, что ее плотность положительна, а давление отрицательно. Плотность у всех обычных сред положительна, но и отрицательное давление нечасто, но все же встречается в физике. При «нормальных условиях» давление в «нормальной» жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды у винта парохода), и в твердых телах (скажем, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление возникать тоже может. Это требует некоторых специальных условий, но само по себе не является чем-то исключительным. Однако в случае темной энергии ситуация совсем особая. Ее давление не только отрицательно, но к тому же равно — по абсолютной величине — плотности энергии (эти две физические величины имеют одинаковую размерность). Такого нет ни в каких жидкостях, газах или твердых телах.

Отношение плотности энергии к давлению может быть непосредственно измерено в астрономических наблюдениях. По данным на сегодняшний день, это отношение есть минус единица с точностью до 5%. С такой (очень высокой для космологии) точностью наблюдения подтверждают интерпретацию темной энергии в духе эйнштейновской космологической постоянной.

### Всемирное антигравитационное

Почему же темная энергия создает не тяготение, а антигравитационное? Дело в том, что, согласно общей теории относительности, тяготение (точнее, искривление пространства-времени) создается не только плотностью среды, но и ее давлением. Так что «эффективная» плотность, создающая тяготение, складывается из двух слагаемых: одно из них — плотность энергии, а другое — утроенная величина давления. При той связи между давлением и плотностью, о которой мы только что сказали, эффективная гравитирующая плотность оказывается отрицательной — это две величины давления. Отсюда и антигравитационное темной энергии: отрицательная эффективная плотность создает «отрицательное» тяготение. Если поместить в темную энергию две частицы, она заставит их двигаться прочь друг от друга. В отличие от всемирного тяготения, всемирное антигравитационное стремится не сблизить галактики или любые другие тела природы, а, напротив, удалить их друг от друга.

Один иллюстративный количественный пример. Представим себе, что в мире нет ничего, кроме космической темной энергии и еще двух электрически нейтральных атомов водорода, которые в нее погружены. Атомы притягиваются друг к другу по закону всемирного тяготения Ньютона и отталкиваются по закону всемирного

антигравитационного Эйнштейна. Оказывается, что антигравитационное сильнее тяготения, если расстояние между атомами больше чем полметра.

Как заметил Глинер, темная энергия с ее необычной связью между давлением и плотностью представляет собой — по своим механическим свойствам — вакуум. Как и тривиальная абсолютная пустота, такая среда не может служить системой отсчета в механике: относительно нее движение и покой неразличимы.

О вакууме в физике говорят давно, с 1920-х годов, когда возникла квантовая механика. Из этой науки вытекает, в частности, что у всех полей и частиц природы имеется состояние минимальной энергии, которое и называется вакуумом. Как и в механике, простейший и тривиальный пример вакуума — это абсолютная пустота, т.е. состояние, когда в пространстве нет ни частиц, ни полей. Но соответствующая этому состоянию минимальная энергия полей и частиц, вообще говоря, не равна нулю. Вакуум в квантовой физике может обладать определенной собственной энергией, а также и давлением, если описывать такую среду на языке макроскопической физики. Не является ли темная энергия вакуумом всех квантовых полей и частиц Вселенной? Такой вопрос поставил Зельдович в 1968 г. [7].

Если да, то как вычислить плотность космического квантового вакуума в рамках стандартной фундаментальной физики? Эти вопросы до сих пор остаются без ответа, несмотря на многолетние усилия теоретиков. Мы не знаем, действительно ли темная энергия «стоит» из вакуумных (нулевых) колебаний квантовых полей. Никто не знает, какой физический эксперимент или астрономическое наблюдение нужно поставить и произвести, чтобы это выяснить.

Для фундаментальной физики должно быть, по-видимому,

очень важным, однако, уже и то обстоятельство, что измеренная астрономами плотность темной энергии служит абсолютным верхним пределом суммарной плотности вакуума всех видов полей и частиц природы (и притом в любой системе отсчета). Но что в действительности вытекает из этого обстоятельства? И почему этот верхний предел плотности имеет именно то значение, которое найдено в наблюдениях в 1998—1999 гг.? На эти вопросы тоже нет ответа\*.

### Темная энергия вблизи нас

Если темная энергия действительно описывается эйнштейновской космологической постоянной, то она присутствует всюду в пространстве и ее плотность везде одинакова. Можно ли это проверить в физических экспериментах или астрономических наблюдениях? Лабораторные эксперименты вряд ли возможны — эффект антитяготения слишком слаб в земных условиях. В 2000 г. астрономы ГАИШ МГУ выдвинули предположение о том, что динамический эффект темной энергии может быть весьма сильным в масштабе групп и скоплений галактик. Предположение подкреплялось теоретической моделью, ориентированной на Местную группу галактик (рис.8). Эта группа включает в себя нашу Галактику и другую гигантскую галактику — уже упоминавшуюся выше туманность Андромеды (рис.9). Вместе с ними в состав группы входит еще примерно 50 менее крупных или вовсе карликовых соседей. Группа считается гравитационно связанной и квазистационарной. Ее полная масса оценивается астрономами в несколько триллионов масс Солнца. Галактики группы заполняют более или менее сферический объем радиусом примерно в

один мегапарсек. Вне этого объема и вокруг него наблюдается более двух десятков карликовых галактик на расстояниях до 3 Мпк от центра масс группы. Все эти внешние галактики удаляются от Местной группы, образуя поток разбегания, в котором скорость галактик (в системе центра масс группы) тем больше в среднем, чем дальше они от центра группы.

В модели, разработанной в ГАИШ МГУ совместно с астрономами Санкт-Петербургского государственного университета, Университета Турку (Финляндия) и Университета штата Алабама (США), принимается, что группа и поток погружены в однородный фон темной энергии. На каждую галактику группы и потока действуют две силы: ньютоновская сила притяжения и эйнштейновская сила отталкивания. Первая преобладает в группе, а вторая — в потоке. Границей между группой и потоком служит в модели «сфера нулевого тяготения», на которой тяготение и антитяготение точно компенсируют друг друга. Из данных о полной массе вещества в группе и плотности темной энергии вытекает, что радиус сферы нулевого тяготения составляет примерно 1 Мпк. Вне этой сферы, в области потока, где доминирует антитяготение, движения галактик-карликов происходят с положительным ускорением. Ускоряясь, поток разбегания приобретает регулярный характер: он стремится выйти на закон прямой пропорциональности скорости и расстояния. Отношение скорости к расстоянию (характеризующее темп расширения) стремится к постоянной величине в 62 км/с/Мпк. Модель позволяет предсказать также, что в потоке существует минимальная скорость, которая служит — на каждом данном расстоянии — нижним пределом скорости разбегающихся галактик.

Местная группа и поток разбегания вокруг нее стали недавно предметом специальных вы-

сокоточных наблюдений, проводимых И.Д.Караченцевым в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН в сотрудничестве с астрономами Украины, Германии и США. Результаты, полученные, в частности, с использованием 6-метрового телескопа САО РАН и космического телескопа «Хаббл», представлены в виде диаграммы скорость—расстояние на рис.10. На диаграмме показаны и галактики группы, и галактики потока. Первые находятся на расстояниях до 1 Мпк и имеют как положительные (движение прочь от центра группы), так и отрицательные (к центру) радиальные скорости, причем сколько их движется в сторону центра, столько же (практически) и удаляется от него. Галактики потока имеют только положительные скорости. В этом очень малом по космологическим меркам масштабе наблюдаемый поток раз-

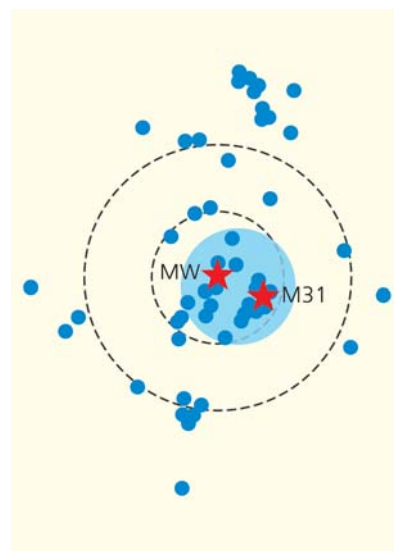


Рис.8. Карта Местной группы галактик и ее окрестностей (И.Д.Караченцев и др., 2004). Показаны Млечный Путь (MW), туманность Андромеды (M31) и несколько других крупных галактик группы; они располагаются внутри круга радиусом примерно в 1 Мпк. Вне этого круга — галактики-карлики, удаляющиеся от центра группы; это местный поток разбегания галактик — миниатюрная копия глобального космологического разбегания галактик.

\* Подробнее о ключевых нерешенных проблемах современной астрофизики и космологии см. в работах [8—11].

бегания довольно близко следует, как можно видеть, закону Хаббла. Отношение скорость—расстояние (постоянная Хаббла) находится в пределах 60—75 км/с/Мпк, которое не так уж далеко от асимптотического значения, найденного в модели (62 в тех же единицах). Эта локальная постоянная Хаббла близка также и к глобальной постоянной Хаббла (70—72 км/с/Мпк), известной по наблюдениям в космологических масштабах.

Группа Караченцева провела (также с помощью космического телескопа «Хаббл») наблюдения двух близких групп галактик — группы Cen A и M81 с их окрестностями. Эти системы похожи на Местную группу. Данные о всех трех системах полностью согласуются с описанной выше моделью. В частности, измеренные скорости разбегания в потоке удовлетворяют условию минимальной скорости.

Более того, наблюдения вместе с моделью позволили дать первую эмпирическую оценку локальной плотности темной энергии. Действительно, если известна масса группы, а значение радиуса нулевого тяготения можно найти по диаграмме скорость—расстояние, то комбинация этих наблюдаемых величин способна дать значение плотности темной энергии в области локального потока. Оказалось, что оно приближенно (если не строго) совпадает с глобальным значением, найденным в глобальных космологических наблюдениях. Те же результаты найдены недавно для двух систем масштаба скопления галактик — для скопления Вирго с потоком разбегания вокруг него (рис.11) и скопления Форнакс с его потоком разбегания. Поток простирается в этих случаях до расстояний в 25—30 Мпк от центра соответствующего скопления, как видно из диаграмм скорость—расстояние, впервые построенных для данных систем группой Караченцева.

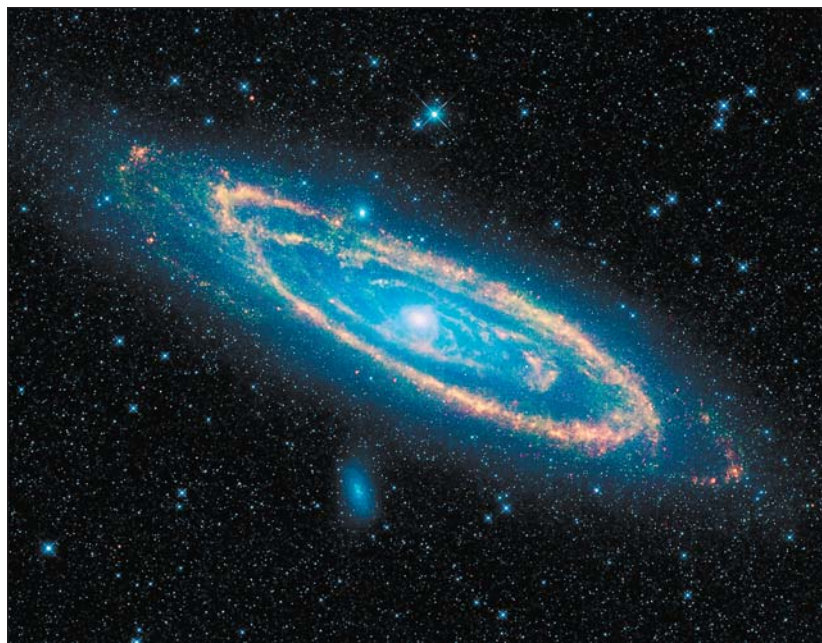


Рис.9. Еще один взгляд на туманность Андромеды.

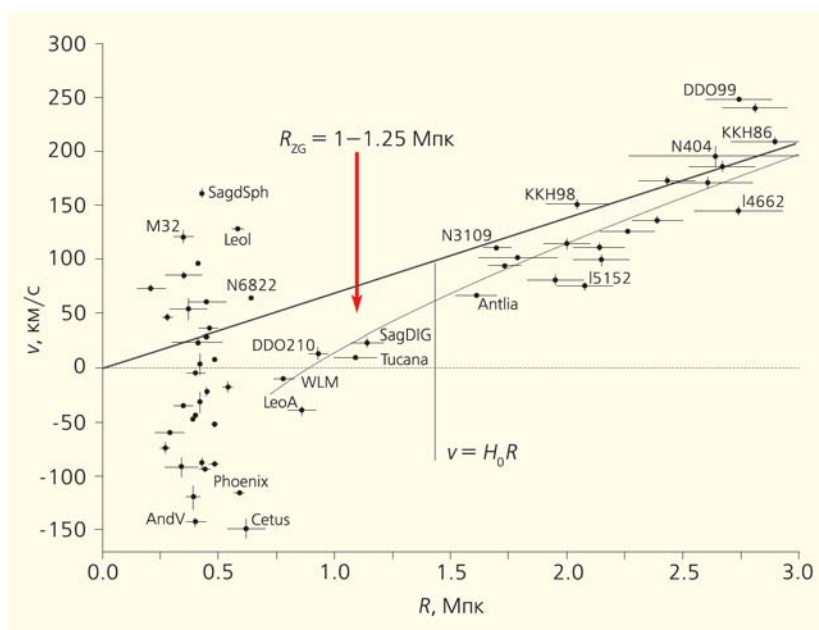


Рис.10. Диаграмма скорость—расстояние для Местной группы галактик и потока разбегания галактик-карликов вокруг нее (И.Д.Караченцев и др., 2009). Здесь  $R_{zg} = 1-1.25$  Мпк — радиус нулевого тяготения, т.е. расстояние от центра группы, на котором тяготение вещества группы точно компенсируется антитяготением фона темной энергии. Гравитационно-связанная группа находится внутри сферы радиуса  $R_{zg}$ , где преобладает тяготение. Вне этой сферы располагаются удаляющиеся от группы галактики-карлики; для них антитяготение (т.е. отталкивание от центра группы) сильнее, чем притяжение к ней. Тонкая линия — средняя линия потока; толстая — закон Хаббла с «универсальной» постоянной  $H_0 = 62$  км/с/Мпк, которая определяется только плотностью темной энергии. С увеличением расстояния от центра средняя линия приближается к хаббловской прямой.

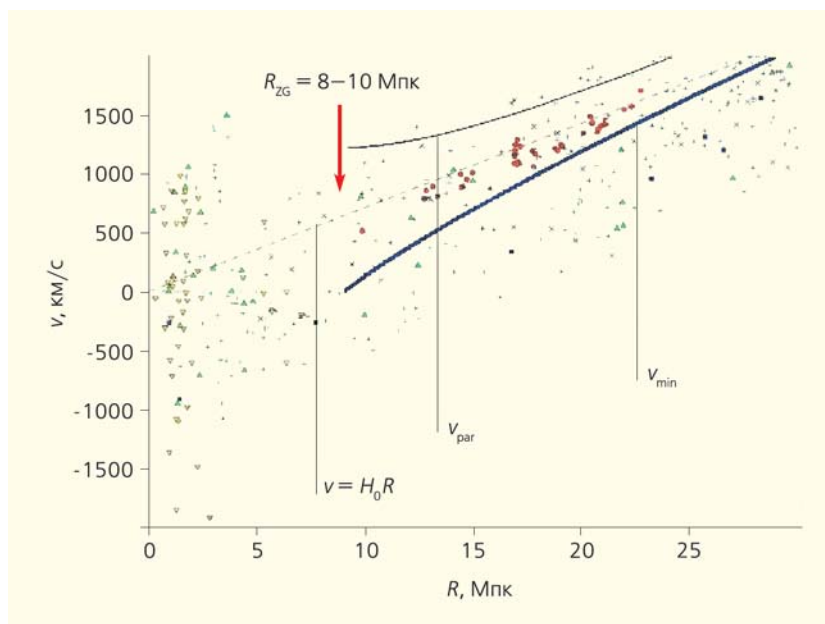


Рис.11. Диаграмма скорость—расстояние для скопления галактик Вирго и потока разбегания галактик вокруг него (И.Д.Караченцев и др., 2010). Скорости и расстояния большинства галактик определены со значительными ошибками. Точные определения с помощью космического телескопа «Хаббл» обозначены жирными красными точками. Гравитационно-связанное квазистационарное скопление расположено внутри сферы радиуса  $R_{ZG}$ , а вне ее — поток разбегания галактик. В объеме группы преобладает тяготение, а вне его — антитяготение. Показаны хаббловская прямая для потока с универсальным значением постоянной  $H_0$ , а также даваемые теоретической моделью кривая минимальной скорости потока  $V_{min}$  и кривая параболического (с нулевой полной механической энергией)  $V_{par}$  движения. Видно, что красные точки находятся вблизи хаббловской прямой и не выходят за пределы области, ограниченной кривыми для  $V_{min}$  и  $V_{par}$ .

Таким образом, новейшие высокоточные наблюдения пяти близких галактических систем свидетельствуют: идея Эйнштейна о всемирном антитяготении выдерживает прямую проверку

в локальных астрономических наблюдениях.

Локальные потоки разбегания — и потоки вокруг близких систем, и движения галактик, открытые и изученные на заре космо-

мологии Слайфером, Лемэтром и Хабблом, — оказываются феноменом космологической природы, так как их динамикой управляет в основном та же сила всемирного антитяготения, что ускоряет глобальное космологическое расширение. Закон Хаббла, найденный Лемэтром и Хабблом, был в этом смысле первым эмпирическим указанием на присутствие в мире темной энергии. По сути они открыли не глобальное расширение Вселенной, как все еще принято считать, а всемирное антитяготение и темную энергию.

\* \* \*

За первые 100 лет своего существования космология превратилась из области абстрактных и почти фантастических, как многим казалось, занятий на далекой периферии тогдашней науки в одно из центральных направлений естествознания XXI в. Она обладает надежным наблюдательным фундаментом, на котором строится и развивается теория, прочно связанная со всей современной физикой, включая общую теорию относительности, ядерную физику и физику элементарных частиц. Современная космология дает широкую, богатую и согласованную картину мира, которая становится сейчас неотъемлемой частью общей культуры человечества. Золотой век космологии продолжается. ■

## Литература

1. Новиков И.Д., Шаров А.С. Человек, открывший взрыв Вселенной. М., 1989.
2. Ефремов Ю.Н. Звездные острова, Фрязино, 2005.
3. Тротт Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д. Александр Александрович Фридман. Труды и жизнь. М., 1988; 2006.
4. Горбунов В.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М., 2007.
5. Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. М., 2002.
6. Вейнберг С. Первые три минуты. М., 1982.
7. Зельдович Я.Б. Космологическая постоянная и теория элементарных частиц // Успехи физ. наук. 1968. Т.95. №2. С.209—217.
8. Черпацук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003.
9. Черпацук А.М., Чернин А.Д. Горизонты Вселенной. Новосибирск, 2005.
10. Чернин А.Д. Космический вакуум // Успехи физ. наук. 2001. Т.171. №10. С.1153—1175.
11. Чернин А.Д. Темная энергия и всемирное антитяготение // Успехи физ. наук. 2008. Т.178. №3. С.267—300.