Милованов В. Н.
Юнусов Н.Б.

Становление современной Космологической картины мира

Аннотация.

Лекционные курсы по физике и по дисциплинам, связанным с концепциями современного естествознания (КСЕ), включают тему “Современная физическая картина мира”, составной частью которой является “Космологическая картина мира”. Именно, в области космологии в конце 20-ого и начале 21-ого веков были сделаны эпохальные открытия: Вселенная расширяется не с замедлением, как считали ранее, а с ускорением; кроме того, оказалось, что видимая часть Вселенной составляет всего лишь около 4% реальной Вселенной. Из наблюдательных данных можно выделить также: открытие реликтового излучения и его анизотропию; обнаружение крупномасштабной структуры Вселенной. Изучение анизотропии реликтового излучения позволило космологам получить информацию о физических процессах в ранней Вселенной. В отличие от традиционных устоявшихся курсов, преподавателям физики и КСЕ, да и студентам, полезно иметь представление о современной космологии. В данном сообщении представлены этапы становления современной Космологической картины мира, некоторые наблюдательные данные в космологии, её проблемы и достижения. Данная обзорно-информационная лекция читалась многие годы студентам различных специальностей и преподавателям. Материалы обсуждались на научных семинарах и конференциях. Цель публикации – обмен опытом при освещении одного из самых сложных разделов астрономии – современной космологии.

Космологическое расширение.

В 1915 – 1917 гг. американский астроном В. Слайфер обнаружил, что галактики не стоят на месте, а движутся в пространстве, причём большинство из них удаляется от нас. Этот вывод вытекал из наблюдаемых спектров галактик, и их движение проявляло себя в сдвиге спектральных линий света к красному концу спектра. Такого рода ***“красное смещение”*** $\mathbf{z = (\lambda_{пр.} - \lambda_{исп.}) / \lambda_{исп.}}$ имеет, как впоследствии оказалось, всеобщий характер: оно наблюдается у всех галактик во Вселенной. “Красное смещение” **z** (фото 1) связано с лучевой скоростью галактик $\boldsymbol{\upsilon}$ соотношением $\mathbf{z \approx \upsilon / c}$, где **c** – скорость света в вакууме, при условии, что лучевая скорость много меньше скорости света. В данном случае “красное смещение” можно интерпретировать как эффект Доплера.

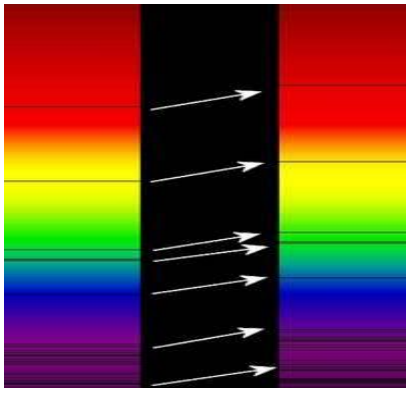


Фото 1

В 1929 г. Э. Хаббл установил, что движение разбегающихся галактик следует простому закону: скорость $\boldsymbol{\upsilon}$ удаления от нас данной галактики пропорциональна расстоянию **R** до нее: $\boldsymbol{\upsilon = HR}$. Это выражение известно сейчас как ***закон Хаббла***, а ***коэффициент H*** – как ***постоянная Хаббла***. По современным наблюдательным данным значение постоянной Хаббла равно H=72,5км/(с·Мпк). Удаление галактик по закону Хаббла наблюдают сейчас до расстояний в несколько сотен и тысяч мегапарсек. (рис.1). О всеобщем разбегании галактик говорят, как о ***расширении Вселенной*** или ***космологическом расширении***.

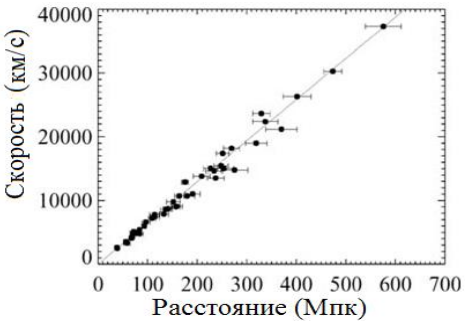


Рис. 1

Для оценки расстояний до не слишком далеких галактик, скорость удаления которых меньше сотой доли скорости света, можно пользоваться приведённым

выше соотношением **z ≈ υ /c.** В этом случае, при известной постоянной Хаббла ***H*** и измеренном красном смещении **z**, расстояние **R** до данной галактики определяется как **R = c z / H.**

Но при красных смещениях, сравнимых с единицей и превышающих её, это приближение уже не применимо и нужно пользоваться точной теорией распространения света в расширяющейся Вселенной на основе общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна.

Тёмная материя.

В 1932 г. немецкий астроном Ф. Цвикки заметил, что кроме светящегося вещества галактик во Вселенной должны иметься ещё и невидимые, "***скрытые массы***", которые проявляют себя только своим тяготением. Он изучал скопление тысяч галактик в созвездии Волосы Вероники. Галактики движутся в этом скоплении со скоростями, достигающими тысячи километров в секунду. Чтобы удержать их в объёме скопления, требуется тяготение, которое не способны создать одни только видимые, светящиеся массы самих галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и согласно подсчётам Цвикки тут нужны дополнительные массы, которые примерно раз в 10 больше суммарной видимой массы галактик скопления.

Позднее в 1970-е гг., усилиями астрономов СССР и США было обнаружено, что скрытые массы должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в изолированных крупных галактиках. Они образуют невидимые ***гало*** крупных галактик. Эти ***гало*** – почти сферические образования, радиусы которых раз в 5 – 10 превышают размеры самих звёздных систем. Такая крупная галактика, как, скажем, Туманность Андромеды или наша Галактика, состоит из звёздной системы, погружённой в распределение невидимой массы, которое простирается на расстояния до сотни килопарсек (кпк) от центра галактики. ***Эти тёмные гало проявляют себя только своим тяготением.*** Невидимое вещество, наполняющее ***гало*** галактик и скоплений, принято сейчас называть ***тёмной материей***. Её изучение продолжается, и к настоящему времени надёжные сведения о ней вытекают из следующих данных:

- гравитационные силы в галактиках и скоплениях галактик;
- рентгеновский газ в скоплениях;
- гравитационное линзирование;
- вращение звезд на периферии спиральных галактик.

Кинематика галактик в больших скоплениях.

Продолжающиеся и сейчас измерения скоростей движения галактик ведутся в большом числе скоплений галактик, и эти измерения неизменно указывают на то, что скорости галактик столь же велики (около тысячи километров в секунду), как и в том скоплении, которое изучал Цвикки.

Наша Галактика окружена роем галактик-карликов, являющихся её спутниками. Наблюдаемая кинематика этих спутников позволяет оценить полную массу, которая удерживает галактики-карлики на их орбитах. Эта масса значительно, примерно в 5 – 10 раз, больше суммарной массы звёзд Галактики и её спутников. Дополнительная невидимая масса – тёмная материя Галактики – образует протяжённое невидимое ***гало***, внутри которого и движутся галактики-спутники. Радиус ***гало*** в 5 – 10 раз больше радиуса звёздного диска Галактики. Такой же эффект наблюдается и в кинематике карликовых галактик-спутников Туманности Андромеды. Это обстоятельство доказывает, что ***тёмная материя – это среда, которая способна скучиваться под действием тяготения.***

Рентгеновский газ в скоплениях.

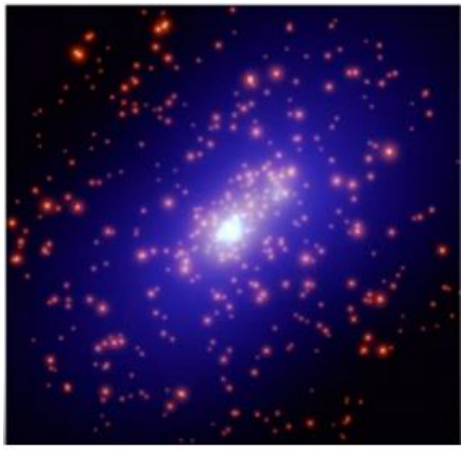


Фото 2

Большие скопления галактик наблюдают в рентгеновских лучах с помощью орбитальных астрономических обсерваторий. Эти наблюдения позволили открыть ***горячий ионизованный газ в объёме скоплений, служащий источником рентгеновского излучения***. Температура газа близка к ста миллионам градусов, и этой температуре отвечают средние скорости протонов (частиц плазмы) порядка тысяч километров в секунду. Этот газ, также, как и галактики, не разлетается, несмотря на нехватку видимой массы для его удержания. На фото 2 приведена рентгенограмма излучения (фиолетовое пятно) раскаленного газа в одном из скоплений галактик. Тем самым рентгеновские наблюдения дают независимый довод в пользу тёмной материи в скоплениях**:** горячий газ скоплений не разлетается в окружающее пространство, потому что он ***удерживается мощным тяготением тёмной материи*.**

Эффект гравитационной линзы.

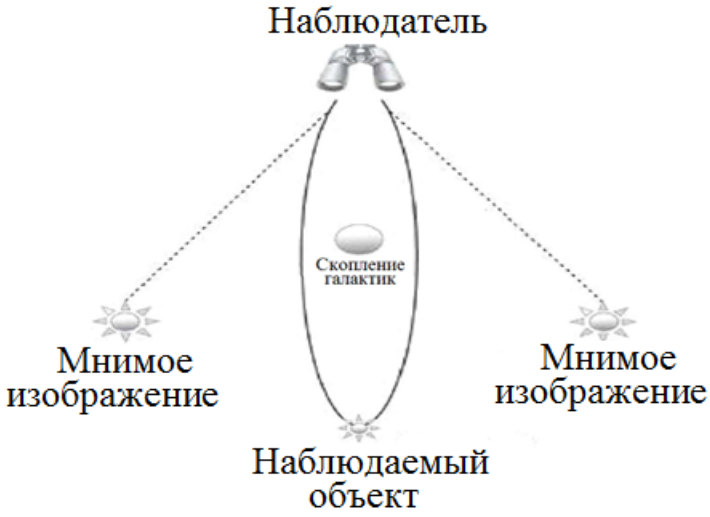


Схема линзирования

Рис. 2



Фото 3

Скопления галактик создают эффект отклонения луча света полем тяготения (искривлением пространства). Источником света служат в этом случае далекие галактики и квазары. Изображения галактик искажаются при прохождении их света в ***гравитационном поле скопления***, служащего некой ***гравитационной линзой***. При сильном линзировании искажение столь значительно, что появляется несколько изображений источника (Рис. 2, схема линзирования). На фото 3 справа мнимые изображения объекта, находящегося за скоплением, имеют вид голубоватых полосок.

Этот эффект даёт указание на массу скопления, служащего ***гравитационной линзой***. При изучении таких искажений для многих далёких галактик были получены сведения о величине и распределении массы в скоплениях-линзах. Наблюдения такого рода неизменно показывают, что ***скопления содержат большие массы тёмной материи***, которые в несколько раз превышают массу содержащегося в них обычного вещества.

Вращение спиральных галактик.

Зависимость скорости вращения спиральных галактик от расстояния до центра галактики (кривая вращения, Рис. 3) известна к настоящему времени для многих десятков изолированных галактик. Она прослеживается как внутри самой звёздной системы, так и вне её (по движению облаков нейтрального водорода) вплоть до расстояний, превышающих в 3 – 10 раз радиус звёздной системы. В области вне видимого диска галактики – там, где доминирует тёмная материя галактического ***гало***, – кривая вращения становится, как правило, плоской, а не спадает вследствие уменьшения плотности вещества, так что скорость вращения практически не зависит от расстояния.

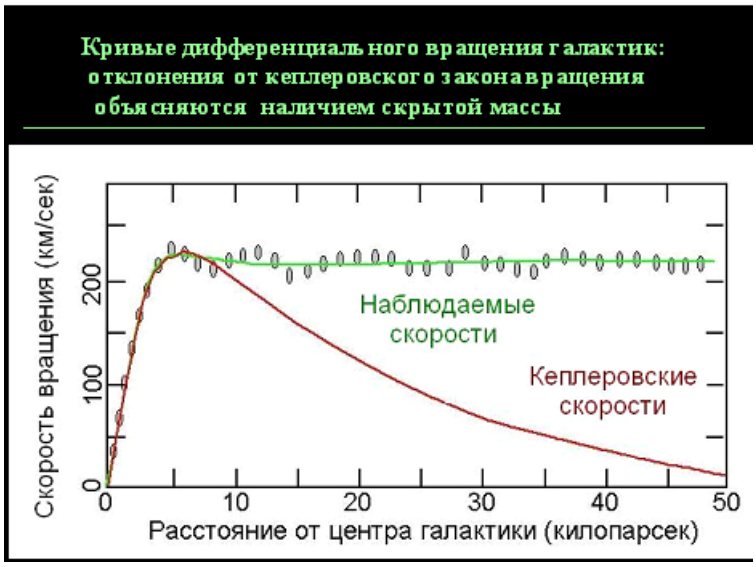


Рис. 3

Во всех случаях ход этой “плоской” зависимости определённо указывает на ***присутствие тёмной материи и внутри звёздной системы, и вне её***, причём масса тёмной материи в ***гало*** галактики в 3 – 10 раз превышает массу звёздной системы.

Космогонический процесс.

Тёмная материя сыграла ключевую роль в процессе формирования галактик и их систем. На это указывают теоретические исследования и компьютерное моделирование возникновения и эволюции крупномасштабной космической структуры. Без тёмной материи мир оказался бы совсем иным, совершенно не похожим на реальный. В нём не было бы, например, скоплений галактик с горячим рентгеновским газом. На рис. 4 ***пики соответствуют барионному веществу, т.е. галактикам***. Непрерывно распределенная по всему скоплению галактик масса – это темная материя, плотность которой в 4-5 раз превышает плотность вещества. Тем самым на новом обширном наблюдательном материале подтверждается первоначальный принципиальный вывод о ***наличии в мире тёмной материи.***

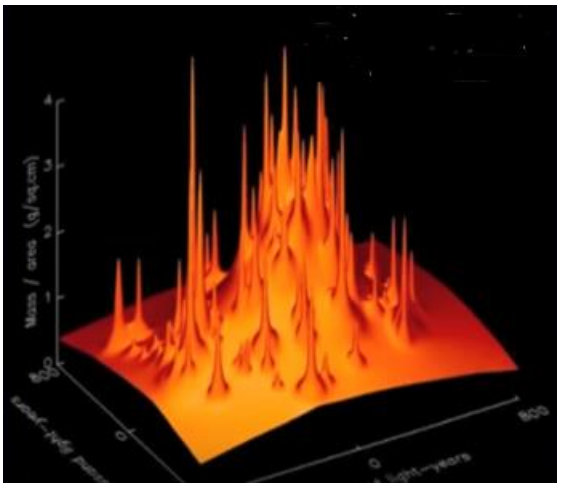


Рис. 4

Природа темной материи (предположения).

– неизвестные тяжелые частицы, электрически нейтральные;
– концентрация этих частиц ~10^3-10^4 м$^{-3}$;
– стабильные, слабо взаимодействующие с веществом (WIMP’ы);
– частицы нового фундаментального взаимодействия.

Пути поиска частиц темной материи и трудности.

– подземные лаборатории;
– космические станции;
– получение их с помощью коллайдера (БАК ЦЕРН'а в Женеве).
К трудностям можно отнести: малое число столкновений с обычными атомами; слабый сигнал в случае столкновения; помехи в виде естественной радиоактивности и космических лучей.

Реликтовое излучение.

В 1965 г. американские радиоинженеры А. Пензиас и Р. Вилсон обнаружили, что вся Вселенная пронизана излучением, приходящим к нам отовсюду. Максимум в спектре этого излучения приходится на миллиметровые волны и отвечает температуре около трёх градусов абсолютной шкалы. В современных наблюдениях эта температура измеряется исключительно точно: $T = 2{,}725 \pm 0{,}003$ *K*. Это излучение называют ***космическим микроволновым фоном*** (CMB) ***Вселенной***, или ***реликтовым излучением***. Оно было предсказано Г. Гамовым (1948г) в рамках "горячей" модели Вселенной. Можно сказать, что это равновесный газ фотонов, равномерно заполняющих всё пространство. В $см^3$ Вселенной содержится примерно 500 реликтовых фотонов.

Результат наблюдений состоит в том, что реликтовые фотоны приходят к нам равномерно из всех направлений в пространстве. Поэтому даваемая ими картина проста и однообразна: это сплошной фон, на котором почти ничего не нарисовано. Однако из самого этого факта немедленно вытекает вывод большой важности: ***вещество ранней Вселенной действительно было распределено почти однородно в эпоху последнего рассеяния фотонов***. ***Согласно ОТО, пространство, однородно заполненное веществом, и само должно быть однородным***. ***С помощью реликтового излучения строго фиксируется физическое состояние мира и его геометрические симметрии в раннюю эпоху, когда в нём ещё не успели образоваться галактики.*** Наблюдения реликтового фона позволили в самые последние годы приблизиться к решению одного из фундаментальных вопросов космологии – ***вопроса о геометрии трёхмерного изотропного пространства, в котором происходит разбегание галактик***. Со времён Эйнштейна и Фридмана известно, что изотропное пространство может быть, в принципе, как ***евклидовым (плоским), так и искривлённым, подобным поверхности сферы или гиперболоида.*** Какой из этих трёх типов геометрии реализуется в природе?

Детальное изучение ***тонкой структуры реликтового излучения в ИК-диапазоне***, начатое космическими аппаратами «Реликт» и COBE, а затем успешно продолженное в последние годы аппаратами WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) и Planck, позволило установить, что ***на равномерном реликтовом фоне имеется в действительности определённый "пятнистый" рисунок***: это слабые – на уровне тысячных долей процента – отклонения от идеальной однородности фона (на рис. 5 центральная красная полоса – "вклад" нашей галактики).

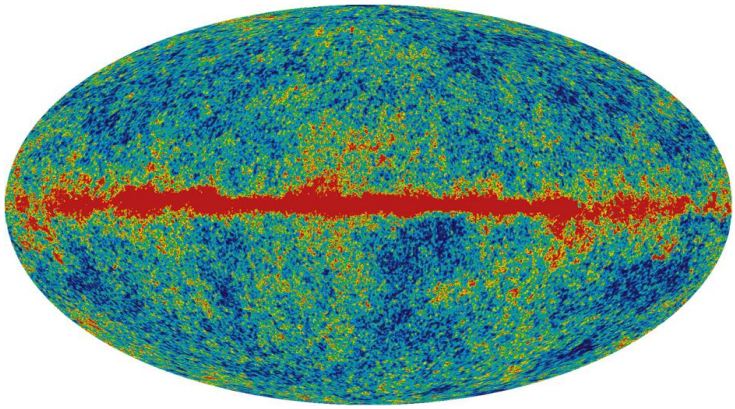
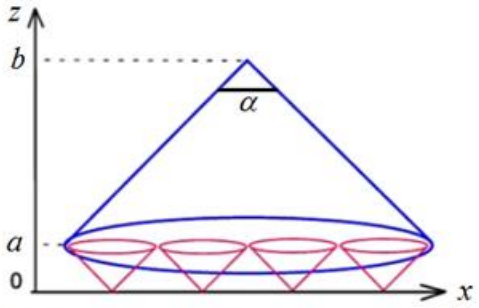


Рис. 5

Эти отклонения представляют собой “отпечаток” слабых неоднородностей – сжатий и разрежений космической среды, которые позднее дали начало галактикам и их системам. В сжатиях температура излучения слегка выше средней – это даёт яркие (относительно среднего фона) пятна, а в разрежениях – слегка ниже, и здесь возникают относительно тёмные пятна. Особенно интересны самые яркие пятна на картине реликтового фона. Двум таким соседним пятнам соответствуют два протогалактических сгущения, которые в эпоху рекомбинации космической плазмы располагались на вполне определенном характерном расстоянии один от другого. Теория образования галактик говорит о том, что это характерное расстояние задаётся возрастом мира в эпоху рекомбинации; этот возраст хорошо известен – 380 тыс. лет. Линейному расстоянию между двумя сгущениями соответствует определённый угол между направлениями в пространстве на два соответствующих ярких пятна. При этом соотношение между угловым и линейным расстояниями зависит от того, какова геометрия пространства: ***в сферическом пространстве интересующий нас угол составляет полтора градуса, в гиперболическом – половину градуса, в плоском – один градус.*** Оказалось, что характерное угловое расстояние между соседними яркими пятнами равно ***одному градусу*** (с точностью до 2 %). ***Это означает, что пространство, в котором происходит космологическое расширение, является плоским***. Выходит, что природа предпочла самый простой вариант пространственной геометрии мира. Так стала известна геометрия пространства, о чём космологи мечтали почти сто лет. С помощью других измерений было установлено, что сумма углов в треугольнике, простирающемся на 13 млрд. св. лет, с большой точностью равна 180^0, что однозначно указывает на ***плоское евклидово пространство. Геометрия пространства, вследствие тесной связи с плотностью материи, определяет и будущую эволюцию Вселенной***.



Вдоль оси *ox* расположены конусы световых лучей от соседних неоднородностей реликтового излучения
По оси *oz* расстояние *ab* от эпохи рекомбинации до нашего времени
Угловой размер горизонта эпохи рекомбинации $\alpha/3 = 1^0$
соответствует плоской Вселенной.

Тёмная энергия.

В 1998 – 1999 гг. две международные группы наблюдателей, одной из которых руководили Б. Шмидт и А. Райсс, а другой – С. Перлматтер, установили, что ***наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением:*** скорости удаления галактик возрастают со временем. Открытие сделано с помощью изучения далёких вспышек сверхновых звёзд определенного типа (Ia), которые замечательны тем, что они могут служить “стандартными свечами”, то есть служить превосходными индикаторами больших расстояний. Из-за их исключительной яркости сверхновые можно наблюдать на очень больших, истинно космологических расстояниях, составляющих тысячи мегапарсек от нас. Они позволили измерить не только скорость расширения Вселенной, но и её производную – ускорение расширения. По меркам космологии ускоренное расширение началось примерно 5 млрд. лет назад.

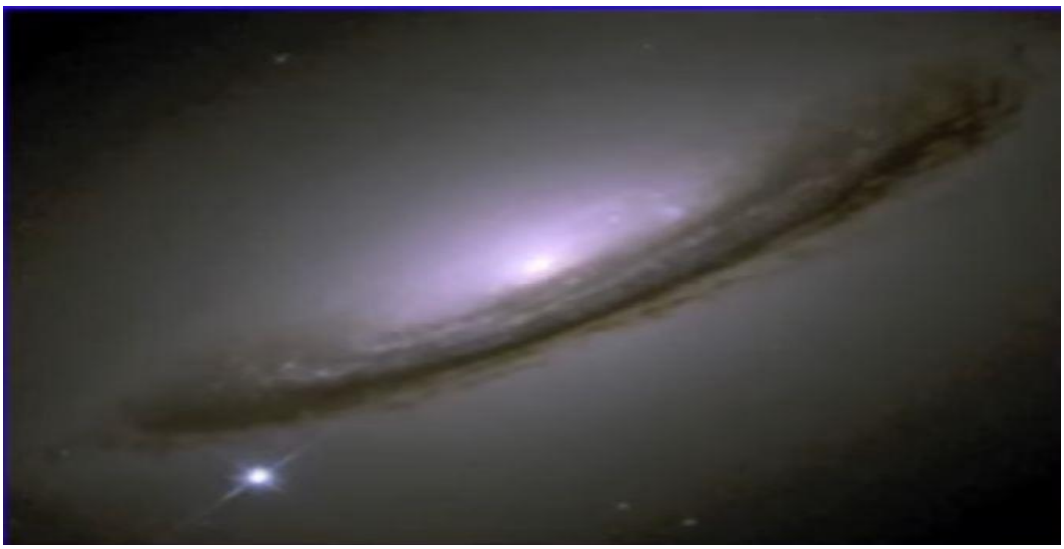


Фото 4. На фотографии в левом нижнем углу изображена сверхновая типа Ia, вспыхнувшая на краю спиральной галактики.

“Обычное” вещество не способно ускорять галактики, а лишь тормозит их разлёт: взаимное тяготение галактик стремится сблизить одну с другой. Поэтому открытый астрономами факт ускоренного расширения указывает на то, что наряду с обычным веществом, создающим тяготение, во Вселенной присутствует и неизвестная ранее ни по астрономическим наблюдениям, ни по физическим экспериментам особая космическая энергия, которая создаёт ***не тяготение, а антитяготение – всеобщее отталкивание тел природы.*** При этом в космологическом масштабе антитяготение сильнее тяготения. Новая энергия получила название ***“тёмной энергии”.*** Тёмная энергия невидима, не излучает, не рассеивает и не поглощает свет. Она не является материей – это свойство самого пространства. ***Главное – она проявляет себя только своим антитяготением.*** Именно гравитационное отталкивание вместо притяжения и вызывает ускорение расширения Вселенной.

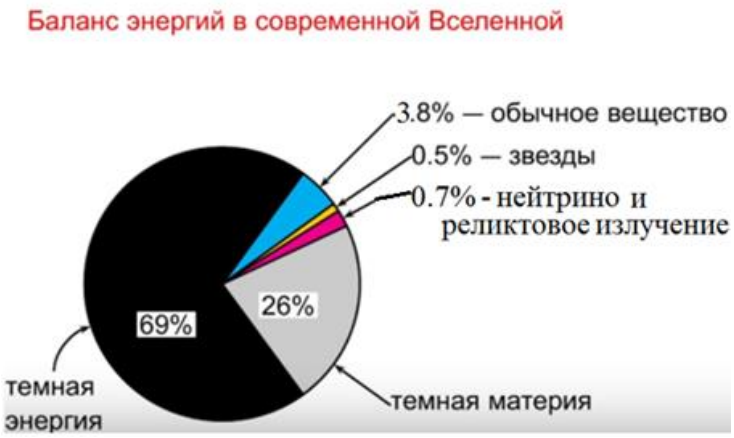


Рис. 6

По совокупности наблюдений к настоящему времени установлена доля каждого космического компонента в общем энергетическом балансе современной Вселенной. Эти компоненты сейчас называют видами космической энергии.

На долю ***тёмной энергии*** приходится примерно ***69%*** всей энергии мира; на долю ***тёмной материи – 26 %,*** на долю ***обычного вещества*** (его принято называть барионным) ***и звезд – около 4,3 %;*** на долю ***излучения, включая нейтрино – меньше процента*** (рис. 6). Таков рецепт ***“энергетической смеси”***, заполняющей современную Вселенную согласно последним данным космической станции Planck. Что касается космического антитяготения, то чёткое представление о нём содержалось в работе Эйнштейна (1917 г.), положившей начало современной космологической теории.

Ускорение космологического расширения.

Ускоренное расширение было открыто по данным о нескольких десятках самых далёких сверхновых звёзд. В настоящее время новые данные полностью подтверждают первоначальный результат. ***По этим наблюдениям удаётся количественно оценить плотность тёмной энергии, создающей космическое антитяготение и вызывающей ускоренное расширение***.

Таким образом находят, что ***плотность тёмной энергии в наблюдаемой Вселенной примерно в 3 раза больше средней плотности тёмной материи.***

Критическая плотность.

Точные измерения слабой анизотропии реликтового фона, детальное изучение его пятнистой структуры позволили установить, что ***трёхмерное пространство Большого Взрыва является практически плоским.*** Из этого обстоятельства вытекает один важный вывод. Согласно фридмановской теории, геометрия пространства однозначно связана с соотношением между ***полной плотностью мира*** и так называемой ***критической плотностью***, которая определяется темпом расширения мира, и выражается – через постоянную Хаббла. При этом в ***случае плоского пространства плотность мира равна критической плотности*** (рис. 7).

Но раз так, то по измеренному значению постоянной Хаббла можно оценить ***современную полную плотность мира***, т. е. суммарную космическую плотность всех видов энергии во Вселенной. В среднем по большим объёмам Вселенной она составляет приблизительно $\rho=10^{-29}$г/см^3. Так как плотности тёмной материи, барионов и излучения известны из других независимых данных, отсюда ***следует возможность оценить плотность тёмной энергии как разности между полной плотностью и суммарной плотностью других видов космической энергии.*** Конечно, это косвенный метод оценки. Но результат важен как ***способ проверки прямой оценки, сделанной по наблюдениям сверхновых звёзд***. Оказывается, что обе оценки плотности тёмной энергии практически совпадают.

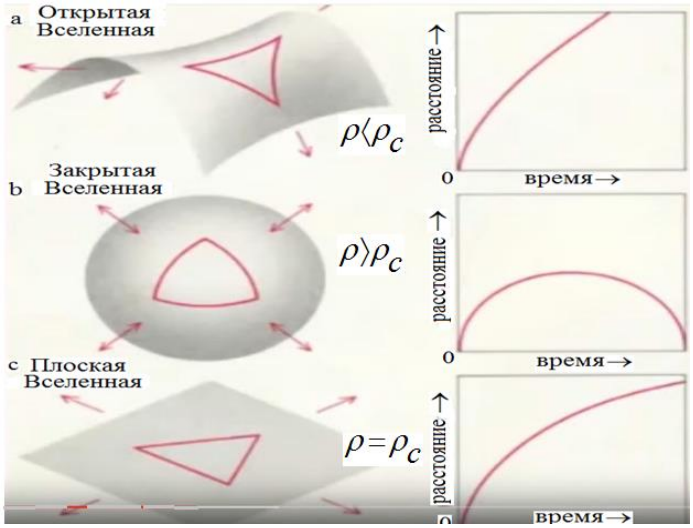


Рис. 7

Космологическая постоянная.

В настоящее время обсуждается несколько различных вариантов теоретической интерпретации тёмной энергии. Самая простая из них исходит из предположения, что тёмная энергия задается всего одной и притом постоянной во времени физической характеристикой, называемой ***космологической постоянной Λ, введенной в ОТО А. Эйнштейном, и имеющей смысл антитяготения.***

Космологическая модель с положительной величиной Λ очень хорошо описывает наблюдаемый феномен космологического ускорения и безупречно согласуется со всем комплексом современных наблюдательных данных. Это стандартная Λ – CDM (лямбда-cosmic dark matter) ***космологическая модель сегодняшнего дня.***

Тёмная энергия как вакуум.

Согласно, предложению Э. Глинера, высказанному ещё в 1965 г., ***космологическую постоянную можно рассматривать как физическую характеристику особого рода сплошной среды, идеально равномерно заполняющей всё пространство Вселенной***. ***Плотность этой среды не только однородна, но и не зависит от времени, будучи просто равной величине Λ***. Из этого представления вытекают особые свойства тёмной энергии. А именно, что у тёмной энергии имеется давление p, причём оно отрицательно по знаку, а по абсолютной величине равно плотности энергии ε_V : $\varepsilon_V = -p$.

До сих пор физики не встречались с такой средой. Таким свойством обладает абсолютная пустота – пространство, полностью свободное от любых форм энергии. Раз им обладает тёмная энергия, описываемая космологической постоянной, то, значит, эта среда тоже является вакуумом. Принято называть этот ***особый вакуум вакуумом Эйнштейна-Глинера*** (ЭГ – вакуум), чтобы отличать его от вакуумов другой природы, рассматриваемых, например, в квантовой механике.

Все больше наблюдений свидетельствуют в пользу ***вакуума как самой вероятной формы тёмной энергии.***

Прошлое и будущее Вселенной (рис. 8).

Стандартная космологическая модель, в которой ***тёмная энергия представлена космологической постоянной***, даёт представление об энергетическом составе Вселенной в различные эпохи в прошлом и будущем. В этой модели ***плотность тёмной энергии остаётся всегда одной и той же.*** Что же касается ***тёмной материи, барионов и излучения, то их плотности убывают из-за общего расширения мира***. В эпоху первичных термоядерных реакций доля тёмной энергии в общем энергетическом балансе мира была пренебрежимо мала, а доля излучения приближалась тогда к 100 %. Соответственно в ту эпоху роль антитяготения в динамике Вселенной была пренебрежимо малой и её расширение управлялось почти исключительно энергией излучения. Излучение преобладало по энергии приблизительно до эпохи рекомбинации (до возраста мира около 380 тыс. лет), а после этого главный вклад в энергию мира вносили тёмная материя и барионы. Их тяготение сравнялось по силе с антитяготением примерно 7 млрд. лет назад, и с тех пор космологическое расширение происходит с ускорением. В будущем Вселенной ускоряющееся расширение уже никогда не будет замедляться, так что Вселенную ожидает неограниченно долгое расширение, в ходе которого тёмная энергия станет безраздельно господствовать в мире.

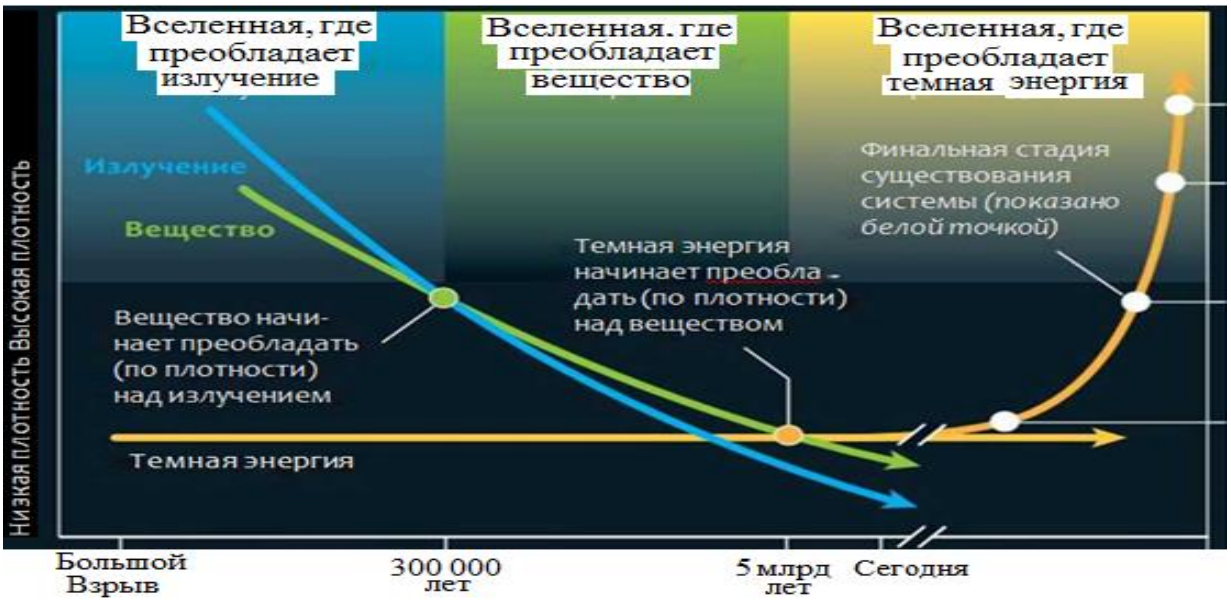


Рис. 8

Заключение.

Как мы видим, в космологии много эпохальных достижений, но и проблем не меньше. Космологические данные о темной материи, темной энергии, асимметрии между веществом и антивеществом, неоднородностях во Вселенной, ранних этапах Вселенной, теории инфляции, суперструн, физического вакуума, идеи о возникновении Вселенной из “ничего”, всевозможные парадоксы в квантовой механике, теории Мультиверса – все это свидетельство неполноты наших представлений об элементарных частицах и полях, устройстве Вселенной и законах, управляющих ее эволюцией.

Наибольший интерес представляет ***инфляционная модель Вселенной*** – космологическая теория о физическом состоянии и законе расширения Вселенной на ранней стадии ***БВ (Большого Взрыва).*** Она была предложена Э. Глинером в 1960г., а получила детальное развитие в 1980г. в работах А. Гута и других физиков. В рамках этой модели, Вселенная находилась в инфляционной стадии своего развития в период с 10^{-42} сек до 10^{-36} сек. К её положительным результатам можно отнести – плоскую геометрию пространства-времени; происхождение крупномасштабной структуры Вселенной; ускоренный период расширения; релятивисткое отрицательное давление. Кроме того, если учесть существование "***истинного***" и "***ложного***" вакуума (модель Тернера – Вилчека) и тот факт, что процесс инфляции происходит в области ложного вакуума, то мы приходим к ***вечной инфляции***, к гипотезе Мультиверса (Мультиверсий Вселенной).

Будем надеяться, что современный этап развития естествознания – это начало коренного изменения взгляда на природу, как на уровне мегамира, так и на уровне микромира.

Литература

С учётом того, что статья не научная, а обзорно-информационная, мы не стали делать ссылки на авторов в тексте, а делаем одну общую ссылку [1-5].

1. Чернин А. Д. Тёмная энергия и всемирное антитяготение // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 3.

2. Сажин М. В. Современная космология в популярном изложении. М.: УРСС, 2002.

3. Архангельская И.В., РозентальИ.Л., Чернин А.Д. Космология и физический вакуум. – М.: КомКнига, 2006. – 216 с.

4. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. — М.: КРАСАНД, 2010. — 568 с.

5. Глинер Э.Б. ЖЭТФ. 1965. Т.49. С.542.