

Я попробую уложиться минут в 40 и больше времени оставить на дискуссию. Как развивалась современная космология за 100 лет? Огромное количество событий спрессовано в два последних года и в т.ч. – в два последних месяца. Начнем издалека, с предыстории.



Современная космология началась в 1915 году. Дореволюционная космология – что это такое? Наша революция началась в 17-м году, а космологическая – в 15-м, когда Альберт Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности. Это и было началом. Что было до того? До того была стройная и приятная картина мира – приятная для человеческих чувств: Вселенная вечна, бесконечна, всегда существовала и будет существовать всегда. В такой Вселенной жизнь может путешествовать со звезды на звезду, с планеты на планету, - так утверждала теория панспермии... В общем, всё очень красиво.

На самом деле, тогда уже начались проблемы, они были замечены в XIX веке. Первое: почему небо ночью темное? Это т.н. парадокс Ольберса. Потому что, если бы Вселенная была бесконечна, то берем луч в любом направлении – и когда-нибудь он упрется в поверхность звезды. Это произойдет очень далеко, но, если Вселенная бесконечна и вечна, когда-нибудь это произойдет. Тогда небо сияло бы как поверхность Солнца, и любой объект в такой Вселенной сгорел бы мгновенно.

Есть еще одна проблема: тепловая смерть Вселенной. Второе начало термодинамики гласит, что любая замкнутая система приходит в состоянии тепловой бани. Все температуры выравниваются, это закон роста энтропии. Вечная Вселенная обязательно пришла бы в состоянии тепловой бани, это и есть тепловая смерть. Избежать этого невозможно, второе начало термодинамики – очень мощный закон.

И третья проблема – берем бесконечную среду, и в ней обязательно развивается гравитационная неустойчивость. Чем больше объем, тем она дольше развивается, но тем страшнее результат. Скажем, гравитационная неустойчивость в размерах несколько парсек – это рождение звезды. Родившаяся звезда загорается и высокая температура дает давление, останавливающее дальнейшее сжатие. Тяготение в планетной системе уравнивается движением планет. Возьмем систему побольше, Галактику – она уравнивается движением звезд, а скопление Галактик – движением Галактик. И чем большую систему мы берем, тем большая скорость нужна, чтобы ее уравновесить.

И когда-нибудь они достигнут скорости света, чтобы уравновесить эту гравитационную неустойчивость. Это на языке классической физики. На языке современной теории это обозначало бы образование черной дыры. И вся Вселенная разбилась бы на черные дыры, чего не происходит.

Долгое время ученые понимали, что есть такие проблемы, но думали, что наука развивается и найдет выход из тупика. Первое событие, которое случилась в 15-м году – Эйнштейн пишет общую теорию относительности. Там всё выглядит совсем иначе. В этой общей теории относительности вообще нет, как таковой бесконечной стационарной Вселенной – нет такой сущности. Эйнштейну это не понравилось, он решил, что что-то неправильно в теории и «подправил руками» – «подпорку» такую поставил, добавил космологический член, который по традиции называется лямбда-член, как некий искусственный объект, который вносит дополнительное расталкивание.

А в 1922-м году Фридман показал, что и этот космологический член ничего не спасает. Что всё равно система неустойчива, и он написал уравнение для однородной Вселенной. Получилось, что там нет никакой стационарной Вселенной. Там есть либо Вселенная, которая начала с какого-то хлопка расширяться, потом либо сжиматься назад, либо будет расширяться бесконечно, либо, в промежуточном случае, асимптотически так остановится на бесконечно больших временах.

Потом, независимо от Фридмана, за это взялся Леметр, все вывел заново, и сказал важную вещь, что, в теории нестационарной Вселенной, Галактики должны разбегаться. Он предсказал закон красного смещения. Хаббл тем временем начал проводить измерения спектров галактик, и заметил нечто подобное. Он опубликовал первые данные по «красному смещению», и Леметр сразу сказал: «О, вот он, этот закон!». Он успел это опубликовать, но автором закона так и остался Хаббл, потому что он поднакопил данных и опубликовал статью, где закон красного смещения выглядел убедительней.

Но он ошибся в 7 раз! Он завысил «постоянную Хаббла», скорость разбегания галактик, в 7 раз. Накопились ошибки, которые «сыграли» в одну сторону – недооценка расстояния, переоценка яркости звезд, и это дало ошибку в 7 раз, из которой следовало, что всего 2 млрд лет назад все галактики были в одной точке. И это долго, лет 20, наверное, противодействовало всеобщему признанию Теории Большого взрыва.

А теперь смотрите – Вселенная оказалась «разжалованной» из вместилища всего сущего в физический объект, описываемый уравнениями. Есть очень хорошая демонстрация, весьма известная: берем маленький шарик и начинаем надувать. Шарик – это Вселенная. Но здесь мешает дополнительное измерение. Оно помогает нам это увидеть, но мешает понять, потому что на самом деле это двумерная Вселенная – мы можем двигаться только вдоль поверхности этого шарика. Все существа, которые живут на шарике, ограничены этим измерением, они не могут двигаться поперек поверхности. Вот это будет двумерная модель нашей трехмерной Вселенной.

И Большой Взрыв – это просто начало раздувания. Потому, что когда говорят «Большой Взрыв», у людей в мозгах сразу картина: где-то что-то взорвалось и куда-то расширяется. Мы начали раздувать шарик с микроскопических размеров, там нет никакого центра разлета, поверхность шарика и есть Вселенная. Т.е., она сначала была очень маленькой, но сразу была замкнутой. И стала расширяться, расширяться – это и есть расширение. Оно ниоткуда не пришло, это расширяется вся Вселенная, как шарик.

Идем дальше. Если Вселенная - физический объект, у него быть разные физические характеристики. У нее должно быть кривизна и ее можно измерить. Ее измерили, об этом я скажу позже. У нее есть горизонт – это точка расстояния, дальше которого объекты удаляются от нас быстрее скорости света. И мы их в принципе не можем наблюдать.

У Вселенной может быть температура. Как ее измерить? Надо взять градусник и поместить его куда-нибудь очень далеко от всех галактик. Если у Вселенной нет своей температуры, то что покажет градусник? Он покажет баланс по излучению между светом звезд и собственным излучением, т.е. он покажет некий усредненный баланс лучевой энергии Вселенной, эта температура будет около 1 градуса Кельвина. Но на самом деле, градусник покажет почти 3 градуса Кельвина! Разница очень большая, потому что плотность энергии надо возвести в четвертую степень. Т.е., энергия излучения будет где-то в 70 раз больше, чем при 1 градусе.

Откуда взялась эта температура и что это такое? Это знаменитое реликтовое излучение. Откуда оно? Дело в том, что Вселенная изначально была горячей, когда-то это излучение имело температуру 1000 градусов, когда-то – миллиарды градусов. Сейчас оно стало три градуса, остывая по мере расширения Вселенной. То, что Вселенная горячая, предсказал Георгий Гамов. Более того, он правильно вычислил ее температуру.

Исходя из чего он ее вычислял? У Вселенной 20% гелия. Гелия не было с самого начала, значит, он должен был образоваться в результате реакции протонов. Чтобы образовалось нужное количество гелия, требуется, чтобы температура была именно 3 градуса. Оказывается, Гамов ошибся. Он не мог определить таким образом температуру, но случайным образом он получил правильный результат. Он ошибся, потому что на самом деле, зависимость количества гелия от температуры очень слабая. Надо знать содержание дейтерия. Тогда его еще не знали. Потом узнали, и оказалось, что Гамов попал в точку. Но это случайная удача, гораздо больше было случайных неудач.

В начале 50-х измерили, наконец, более-менее правильное значение постоянной Хаббла, и она уже указывала на правильный возраст Вселенной. 15-20 млрд лет. Потом снова, правда, появилась напряженность в связи с этим, я об этом позже расскажу. И, наконец, первый этап космологической революции завершило открытие реликтового излучения – 1965 год. И после этого – всё. С вопросом о Большом взрыве покончено – он был!

Это совершенно ясно, мы видим его следствие – реликтовое излучение, за которое позже была присуждена Нобелевская премия. И реликтовое излучение фактически дает нам фотографический снимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет.

На все перечисленные дореволюционные вопросы теперь ответы стали ясны: почему небо темное? Потому что Вселенная расширяется, и все звезды, куда должен упереться луч из парадокса Ольберса – они там далеко за горизонтом и в принципе не видны и не достижимы. Неизбежность смерти Вселенной – да, она неизбежна, но ответ в том, что она еще только впереди, еще не наступила. Все на свете конечно, Вселенная – тоже. Нас может утешать, что Вселенных – бесконечное число. По поводу гравитационной неустойчивости – здесь уже нужно немного математики чтобы объяснить. Если Вселенная расширяется, возмущения растут медленно и потом просто «замораживаются», перестают расти на больших масштабах.

Теперь – на одни вопросы ответили, но появились другие, еще более «тяжелые» вопросы. Сейчас Вселенная динамически сбалансирована. Если взять постоянную Хаббла и измерить среднюю плотность Вселенной, то они очень хорошо подходят друг другу в уравнении Фридмана, как будто специально подобраны. Если чуть-чуть изменить плотность Вселенной, примерно 14 млрд лет назад, когда Вселенной было 300 000 лет, изменить, например в полтора раза, то сейчас плотность отличалась бы от критической где-то в 1000 раз. А если чуть-чуть изменить эту плотность в самые первые мгновения от начала Взрыва, то сейчас бы плотность отличалась от критической на 60 порядков. Это значит, что либо она давно бы «схлопнулась», в первые ничтожные доли секунды, либо все разлетелось бы так, что один атом от другого был на космических расстояниях. Каким-то образом начальные параметры Вселенной – скорость расширения и ее плотность оказались подобным с точностью 10-60. Единица минус 10-60. Вот в таких рамках. Как это так получилось?

Дальше. Мы видим Вселенную в разных местах и видим, что она примерно одинакова с точностью до структуры, появившейся, как результат гравитационной неустойчивости. Когда Вселенная начинала расширяться, те области, которые мы видим, друг о друге ничего не знали, они никогда не были причинно связанными. Как они узнали, что надо расширяться одновременно с точностью до, скажем, 10-37 сек? Если бы они начали расширяться с задержкой, то вся Вселенная была бы перекошена и перекожена. Это называется «проблема горизонта».

Теперь – откуда взялось это богатейшее содержимое Вселенной? Ведь в начале в ней было очень мало частиц. Наконец, что послужило самим этим начальным толчком, который дал Большой Взрыв? Откуда он? Последний вопрос – откуда взялись эти неоднородности, из которых выросли

Галактики? Это важнейший вопрос. И все эти вопросы без ответов, как «под ковер», «заметалось» в начальные условия. Люди говорили: «Да, вот такой космологический постулат. Были такие начальные условия. Мы не знаем, откуда они взялись». И, естественно, были ученые, которые говорили, что это уже пошла теология, а не наука. И пытались разработать альтернативные модели. Один из таких людей – Фред Хойл.

Дальше – у нас есть Большой взрыв имевший место 13,8 млрд лет назад. Идем к нему назад во времени. Температура Вселенной все выше и выше, плотность все больше и больше. Далеко ли мы можем вот так уйти назад во времени? Или где-то есть предел, в который мы упремся? Оказывается, такой предел есть. Его можно назвать «Планковский масштаб». Существует максимальная возможная масса частицы – 10⁻⁵грамма. Точечная частица большей массы окажется под своим горизонтом Швацшильда – это будет черная дыра, а не частица. Дальше – существует минимальное время, на котором вообще что-то может произойти – 10⁻⁴³ секунды – планковское время. И, соответственно, планковская длина – расстояние, которое свет проходит за планковское время – 10⁻³³ см. И плотность, при которой пространство теряет смысл, время теряет смысл классический, и все становится квантовым. Есть такая метафора «планковская пена». Где нет классического пространства и времени, все квантовое, где пытаются родиться и тут же схлопываются вселенные, где пространство-время кипит.

В эту же «планковскую пену» упирается гравитационный коллапс звезд уже в нашей Вселенной. В центре образовавшихся черных дыр – это самое планковское состояние. У нас нет науки, которая может его описывать – квантовая гравитация сталкивается с катастрофическими математическими проблемами. И даже не столько математическими, а вообще – проблемами понимания, даже философскими. Большой взрыв мы не можем протянуть назад, ближе, чем 10⁻⁴³ сек от какого-то начала – меньших времен не существует. Но есть ли что-то такое, что не даст нам дойти до этих 10⁻⁴³ сек, что радикально меняет ситуацию при больших временах? Оказывается, есть. И это нечто оно ответило на все вопросы.

Напомню: Эйнштейн придумал «лямбда-член», а потом отрекся от него. Но, тем не менее, он остался висеть, как в хорошей пьесе – если на стене висит ружье, то оно когда-нибудь выстрелит. Вот и «лямбда-член» «выстрелил». И произвел, можно сказать, вторую космологическую революцию.

Как это произошло? Здесь важный вопрос: что такое пустота, вакуум? Мы не ощущаем энергии вакуума, она, действительно, равна нулю. Это очень странно, что она равна нулю. В классической физике вакуум – это просто пустота. В квантовой физике вакуум – это совершенно ужасная вещь. Любые поля не могут сидеть на месте. У них есть т.н. нулевые колебания. Электромагнитное поле – оно все время колеблется, на всех частотах. Вакуум заполнен колебаниями электромагнитного поля, от которых никак нельзя избавиться. Но мы его не видим, потому что они дают отрицательную интерференцию друг с другом. Среднее значение электромагнитного поля в вакууме равно нулю. А средний квадрат не равен нулю! И у этого среднего квадрата – он дает чудовищную энергию, и эта энергия «обрезается» только этим планковским масштабом. В принципе это значит, что плотность энергии электромагнитного поля в вакууме должна быть чудовищной, типа 10⁹⁴ гр/см³. Но есть и другие вещи, которые дают отрицательный вклад.

И вот как-то так получается, что отрицательный вклад который дают частицы, например, электроны, чудесным образом компенсируют положительный вклад нулевых колебаний полей. Но нет никаких известных причин, почему они должны друг друга скомпенсировать – положительный и отрицательный вклады. Никто не понимает, почему они компенсируют друг друга, и это – одна из самых «больных» точек в современной физике. А мог бы вакуум быть с ненулевой энергией? Конечно, мог бы, мы не знаем, почему энергия равна нулю, она могла быть любой.

Вакуум может быть и не пустым, он может быть заполнен неким полем, но это поле не может быть типа электромагнитного - электромагнитное всегда выдаст себя. Это должно быть скалярное поле только с одной компонентой. До недавнего времени таких полей не было известно, сейчас – есть. Это – поле Хиггса. И мы знаем, что оно заполняет весь вакуум. Мы знаем, что его энергия равна нулю, а значение его нулю не равно. Это вещь парадоксальная, но в теоретической физике такие вещи происходят сплошь и рядом. И, благодаря тому, что это поле есть, а его квант недавно открыли на БАКе – это бозон Хиггса, это поле делает наш мир разнообразным и интересным. Если бы его не было, не было бы и сложных структур в мире, и частицы были бы безмассовыми, и т.д. И жить бы было невозможно. Но поле Хиггса есть, точнее появилось и вошло в состав вакуума, не помешав ему иметь почти нулевую плотность энергии.

А если – все-таки! – у вакуума когда-то была положительная плотность энергии? Почему бы и нет?! И здесь начинается совершенно потрясающая вещь. Оказывается, что пространство с положительной плотностью энергии вакуума экспоненциально расширяется. Т.е., у поля, заполняющее пространство, при положительной плотности энергии, давление оказывается отрицательным. И вот, «тупо» подставляете такой вакуум в уравнение Эйнштейн, даже в простейшее уравнение Фридмана – и убеждаетесь, что Вселенной некуда деваться, кроме, как расширяться экспоненциально. Это видно на уровне простейших дифференциальных уравнений, которые я не побоялся там выписать, в этой книжке.

Т.е., за каждый равный промежуток времени Вселенная удваивается. И этот промежуток времени, может быть, скажем, 10-37 сек. Например. Он может быть и другим, но есть указание, что это было именно 10-37 сек.

Кто первый до этого дошел? До понедельника, 16 июня 2014 года, я думал, что это был наш физик Эраст Глинер, который в 1969 году начал пропагандировать эту идею. Но в понедельник Слава Муханов, который тоже в этой книге участвует, сказал, что, на самом деле, он откопал работу Энглера и Браута (их работа по механизму Хиггса получила Нобелевскую премию вместе с Хиггсом) где-то начала 60-х годов, где они тоже что-то такое в более абстрактной форме предложили - ту же идею. Но они на ней не настаивали, а Глинер настаивал. Но Глинера очень сильно осадил Зельдович, он сказал, что это чепуха и этого быть не может. Потом-то он с этим согласился, но, дело в том, что Глинер не туда этот механизм «вставил», он предложил неправильный сценарий.

Первая серьезная работа по этому поводу, которая показала реально физический процесс со всеми выкладками, как это может произойти – была сделана Алексеем Старобинским в 1980-м году. Но он опять вставил это в неправильный сценарий, и опять его «пинали ногами», но потом догадались, что надо убрать неправильную часть этого сценария, и дальше все работает просто великолепно. И сейчас Алексей «на коне». Вторая премия, которую он только-только получил, это премия Кавли, по размеру она сравнима с Нобелевской.

Космологическая инфляция

-1969 г. – Эраст Глинер выступает с идеей что расталкивающий Λ член можно получить из физики вакуума



-1975 г. Дымникова и Глинер заявляют, что при положительной энергии вакуума можно из ничего сделать огромную Вселенную с огромным содержимым

- 1980 г. Алексей Старобинский публикует первую проработанную модель инфляции



Алексей еще не произвел революции в сознании людей, это потом уже признали, что он сделал великую вещь, а революцию произвел Алан Гут (Alan Guth). Он построил модель, которая оказалась неправильной, но которая была обоснована и очень хорошо мотивирована, и очень интересна для физиков. И, кроме того, он ее очень хорошо пропагандировал.

И вот тут произошел сдвиг. Быстро поняли, что хоть он и неправ, но что-то такое должно работать. Гут не прав, но надо просто что-то подправить. И первым теорию подправил Андрей Линде и после него, не независимо, а через три месяца после него, имея его текст, - Албрехт и Стейнхардт. Была придумана концепция т.н. «новой инфляции», где все это работало уже гораздо лучше, но все равно оставались проблемы. Они были решены тем же Андреем Линде в 1983 году, он придумал новый сценарий.

Я говорю два слова «модель» и «сценарий»: «модель» – это конкретные физические уравнения, которые дают процесс. А «сценарий» – в него можно вставлять разные модели, он объясняет в целом, как это явление сработало. Линде предложил сценарий хаотической инфляции: что не надо придумывать никаких хитрых начальных состояний. Берем произвольное начальное состояние. Допустим, у нас вот эта планковская пена кипела, кипела, и вдруг в ней выпало какое-то значение поля в каком-то объеме. Если этот объем достаточно большой и поле в нем достаточно однородно, неважно, какой потенциал у этого поля, какая форма. Начинается инфляция, которую уже никак не остановишь.

Хаотической она называется потому, что она предполагает случайные начальные условия. Андрей показал, что в очень широком классе этих начальных условий начинается инфляция, которую ничем не остановишь. 1986 год – Андрей Линде как раз очень хорошо рассказывает про этот момент в книге, как до него дошло, что, инфляция, раз начавшись, не заканчивается вообще. Она заканчивается в какой-то своей части образованием какой-то Вселенной. Какой-то крохотный участок этой инфляции взял и превратился во Вселенную, возможно, нашу. Возможно, какую-то другую. Возможно, во Вселенную, совсем не похожую на нашу по физическим законам. Но это только кусочек.

Каждый кусочек, раздувающий пространство, неизбежно быстро превратится в горячую Вселенную. И всегда останется какой-то другой, который продолжит раздуваться. И есть еще такая «теория струн» (которую я здесь постараюсь не обсуждать, я ее сам не понимаю, потому что там надо очень хорошо разбираться в весьма специфической математике), которая вместе с бесконечной

инфляцией диктует, что Вселенных бесконечно много, все они бесконечно разные. Очень мало, в каких из этих Вселенных можно жить, но из-за бесконечности множества и разнообразия какие-то оказываются так хорошо «подогнаны» к существованию жизни, что жизнь в них появляется. Вот наша – одна из них. Это т.н. «антропный принцип», который объясняет удивительно благоприятные для нас значения многих физических констант.

И следующая важная временная метка – 1998 год. Обнаружено, что наша инфляция идет прямо сейчас. Идет в нашем пространстве, только очень медленно. Это – знаменитая «темная энергия». И это как раз не нулевое значение плотности энергии вакуума. Оно чуть-чуть отличается от нуля прямо здесь. И вызывает очень медленное, но уже значимое экспоненциальное расширение Вселенной. Это уже видно вочию. Раз инфляция идет прямо сейчас, то вот еще аргумент в пользу теории инфляции: мы видим демонстрацию того механизма, который был заложен в самом начале нашей Вселенной.

-1981г. Гут публикует свою неправильную но наглядную теорию космологической инфляции и путем интенсивной пропаганды ломает общественное мнение.



1982 г. Линде, Албрехт и Стейнхардт – новая инфляция

1983 г. Линде – хаотическая инфляция

1986г. Линде – вечная инфляция

1998г. Открыто ускоренное расширение современной Вселенной

Инфляция прямо сейчас!



Эта демонстрация происходит при совсем других физических условиях, но она есть. И мы снова получили ответы на вопросы. Почему Вселенная так велика? Это инфляция и делает, она создает точнейший баланс между скоростью расширения и плотностью энергии. Баланс выражается через кривизну: когда пространство быстро расширяется, вот этот наш шарик становится гигантским, его поверхность становится плоской, с хорошей точностью.

Сейчас мы знаем, что Вселенная плоская, ее радиус кривизны по крайней мере в 100 раз больше, чем расстояние до горизонта, примерно так. Почему Вселенная всюду одинакова? А потому, что у всех частей Вселенной общая история. Это во время инфляции разные части Вселенной потеряли причинную связь. А в начале инфляции они все были связаны. У них общая история, общая биография. Первые 10-37 сек они, фактически, были в одной точке пространства, были причинно связаны. У них был один и тот же вакуум, и, пока инфляция шла, этот вакуум всегда воспроизводил самого себя - с большой плотностью энергии, с большим полем. Так что все было одинаковым, просто потеряло причинную связь, а потом, после инфляции, оно ее вновь приобрело – то, что мы видим, и мы точно знаем: там, за горизонтом (горизонт это 1029см) через 1032 см точно то же самое, что у нас.

Гигантское число частиц – поле расширялось, оно воспроизводило само себя, было все больше и больше, а потом раз! – и сгорело. Сгорело оно, родив частицы, потому у нас их так много в пределах горизонта.

Откуда взялся «начальный толчок», образовавший Вселенную? - Инфляция и есть этот начальный толчок. Кстати, здесь – терминологическая путаница. Многие говорят: «Что такое «Большой взрыв?» - Это то, с чего началась инфляция. На самом деле, у нас нет выделенного момента, когда началась инфляция. Она могла быть вечной.

Сама концепция «вечной инфляции» лишает нас начала отсчета. Поэтому естественно «переопределить» Большой взрыв, сказать, что это – конец инфляции и начало расширения Вселенной по закону Фридмана, начало горячей Вселенной, момент, когда поле «выгорело». До этого Вселенная не имела никакой температуры, была просто сделана из плотного вакуума, по выражению Андрея Линде – это «тяжелое ничто». Когда это «тяжелое ничто» выгорело, оно превратилось в нечто. А именно – в материю. Со своей температурой, и именно этот момент можно назвать Большим взрывом. С момента Большого взрыва любой интервал этой вселенной расширился на 29 порядков! В момент Большого взрыва видимая часть Вселенной была размером 1 см. Или 5 мм, где-то так.

Откуда это все взялось? Нас учат классики, что ничто из ничего не берется. Здесь как раз берется, потому что суммарная энергия Вселенной – любой замкнутой – равна нулю. В ней есть положительная энергия материи – поля или чего-то, и ровно такая же отрицательная энергия гравитационной связи. В сумме – ноль. Т.е., Вселенных можно плодить сколько угодно, на закон сохранения энергии это никак не влияет. Так что Вселенная нам досталась «даром» и все они рождаются тоже «даром».

Здесь я пока пропустил еще один вопрос: откуда взялась структура у Вселенной? Т.е., она однородная на больших масштабах, но на малых-то она не однородна, благодаря чему мы и существуем. Но без Галактик мы бы не существовали! Галактики к счастью откуда-то взялись. А как выглядит структура Вселенной на масштабах гораздо больших размеров галактик? Она похожа на ячеистую сеть, трехмерную, с перепонками. Откуда она взялась? Были какие-то начальные возмущения, но, неужели эти начальные возмущения были такими хитрыми, имели вид таких перепонок? Нет, конечно. Эти перепонки – довольно интересный эффект, широко распространенный. Это каустики – математическое явление такое, наиболее часто наблюдаемое в жизни при отражении солнца от воды. Или как солнечные блики на дне при ряби на поверхности.

На поверхности рябь плавная, а на дно смотрим – и видим такую «сетку» ярких движущихся полос. Для разрядки процитирую Гумилева. Что он писал про жирафа: «И шкуру его украшает волшебный узор, с которым равняться осмелится только луна, дробясь и качаясь на влаге широких озер». Это как раз про сеть каустик – луна отражается от ряби, и на стене возникает такой движущийся узор, похожий на узор жирафа. Это каустики.

То же самое произошло и здесь. При отражении игра происходит с углом отражения, так что в каком-то месте лучи сгущаются в один пучок. А здесь то же самое происходит со скоростями. Движение частиц к ближайшей плоскости сгущения. Это математический эффект, он происходит только в расширяющейся Вселенной. В стационарной Вселенной его бы не было.

Первым это предположил Зельдович. Они с Сергеем Шандариным это численно «намоделировали», назвав «блинами». Вверху – это реальная карта, а внизу – смоделированная, только уже не Шандариным. Моделируют на супер-компьютерах расширяющуюся Вселенную и рост этих самых неустойчивостей. Видно, что правдоподобие есть.

Откуда это всё взялось? Оказывается, инфляция и это может нам дать – эти затравочные возмущения плотности Вселенной. Откуда они берутся? Из эффекта, который как мы привыкли, является чисто микроскопическим. Это квантовый эффект. Мы знаем про всякие квантовые шумы и т.д. и т.д. Это – тоже квантовый шум. Я говорил про «нулевые» колебания, но в теории

относительности должны быть нулевые колебания метрики пространства. Они так бы и остались нулевыми колебаниями, если бы на них никак не воздействовать.

А воздействие в те времена происходило. Каким образом? Вселенная с огромной скоростью расширялась, и, пока это колебание там живет – какую-то ничтожную долю секунды – Вселенная успевала расширяться, так что нулевое колебание стало реальным возмущением метрики. Реальным возмущением плотности энергии вакуума. И дальше что стало происходить? Возмущение родилось с размером 10-27 см (типичный размер). Оно стало расширяться вместе с пространством. Амплитуда его при этом «замерзла», она была, скажем, 10-6 относительно средней плотности, она так и осталась 10-6, но она быстро приобрела огромные размеры из-за всеобщего быстрого расширения. Те возмущения, которые родились позже, растянулись меньше до того момента, как инфляция кончилась, и все выгорело.

К тому моменту, как инфляция закончилась, мы имеем широченный спектр по размерам этих самых первичных возмущений. Широченный потому, что они растягивались разное время. Те возмущения, из которых родилась наша Галактика, были растянуты до одного микрона, т.е. наша Галактика, то вещество, из которого растянулась наша Галактика, занимало область 1 микрон. А в начале – 10-27 см. Т.е., за время инфляции оно растянулось от 10-27 см до одного микрона и еще потом на 29 порядков. Какие-то возмущения выросли намного больше размеров всего горизонта, и т.д. Те, что родились в самом конце инфляции, выросли всего лишь до метра. И этот спектр называется «плоским», потому что амплитуда любых возмущений одинакова, они просто растянулись до разного размера. Это – первое приближение.

Дальше. Я сказал про амплитуду 10-6, но они потом относительная амплитуда выросла! Эти неоднородности при переходе от инфляции к горячей Вселенной выросли в контрасте с 10-6 до 5×10^{-5} . Пятерка с четырьмя нулями перед ней. Это уже приличный контраст. Потом они как-то эволюционировали, хоть и медленно, но росли, пока Вселенная расширялась. К моменту рекомбинации их контраст должен был достичь уровня 10-3.

У нас есть «фотография» этого момента. Это «фотография» реликтового излучения. Значит, мы должны видеть неоднородности этого реликтового излучения. Если мы их не видим, значит, все летит к чертям, вся наша теория, потому что не из чего образоваться галактикам. Потому что, чтобы образовались галактики, неоднородности в момент 380 тыс. лет, контраст должен быть одна тысячная. Такого контраста не видели. Не видели его даже на уровне 10-4, и тут стали изобретать лазейки – как же это могло получиться?

И вот здесь вспомнили про «темную материю», которую уже обнаружили в галактиках другими методами. Наша Галактика вращается гораздо быстрее, чем она могла бы вращаться, если бы состояла из одних звезд. Намного быстрее. В скоплении галактик тоже видно, что в них массы в несколько раз больше, чем может содержаться в звездах и в газе. И видно, что это какой-то совершенно другой вид материи, который не взаимодействует с нашим обычным веществом. Она влияет только на гравитационный потенциал. Она не тормозит никакие звезды, и газ с ней никак не взаимодействует. Т.е., если она и взаимодействует с нашим веществом, то очень-очень слабо.

Теперь смотрите: цифра 10-3 – это тот контраст, который нужен, чтобы появились галактики. А его не видно! А может быть он все-таки есть, но только в темной материи? А обычная материя просто не успела вслед за ней за ней скомковаться, потому что у нее есть давление, которое противостоит этому комкованию и гравитационной неустойчивости.

Значит, на отметке 380 тыс. лет реальный контраст плотности был 10-3, а видимый контраст плотности – а видим мы только обычное вещество – был чуть больше, чем 10-5. Но какой-то момент и 10-5 не видели, это был момент очень напряженный, я его помню. Андрей Линде говорил, что «вот, еще чуть-чуть и мы хватаемся за голову, вся наша теория летит к черту, и мы ничего не понимаем». Но в начале 90-х были запущены первые спутники за пределы атмосферы, которые измеряли реликтовые излучения. И вот эти спутники «увидели» этот самый контраст 10-5 и даже больше. Все облегченно вздохнули.

WMAP 2001 – 2010

Полоса 0.32 – 1.3 см

Тепловое равновесие в тени ~40К

Зеркало 1.4 X 1.6 м

Данные открыты в 2002

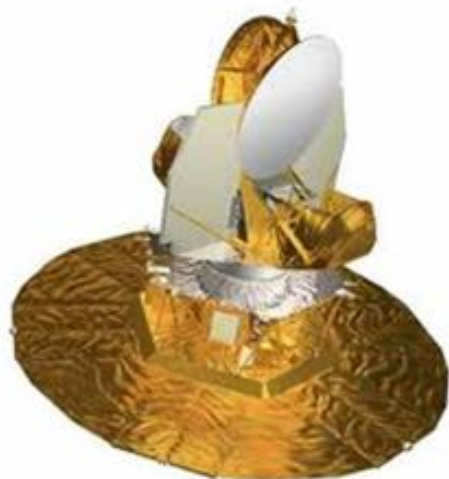
«Планк» 2009 – 2013

Полоса 0.035 – 1см

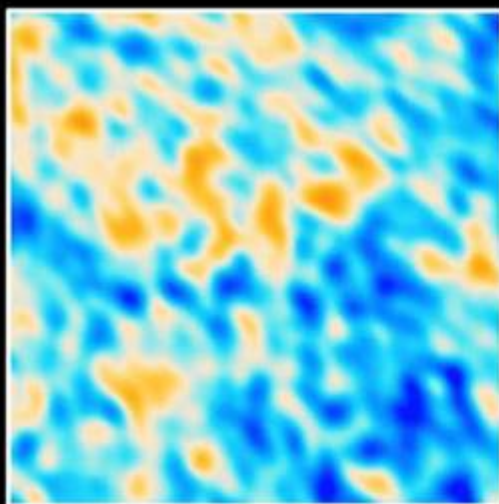
Охлаждение гелием

Зеркало 1.5 X 1.9 м

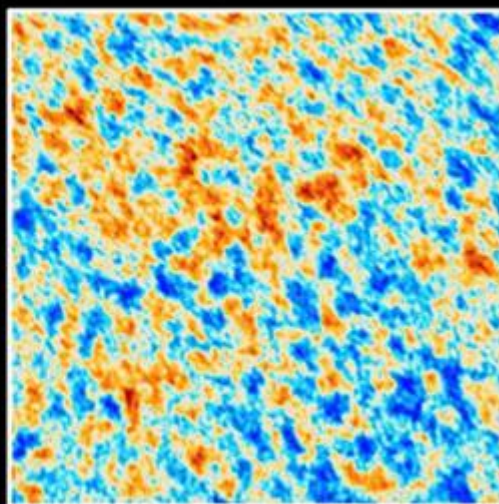
Данные открыты в 2013?



Я сказал, что последние события сжаты в последние два года и особенно – в последние два месяца. В последние два, а скорее три года – 2012-й, 2013-й и 2014-й – опубликованы важнейшие результаты великолепных космических станции – микроволновых телескопов WMAP и «Планка». Американский WMAP был запущен в начале двухтысячных – само устройство обошлось в 180 млн долларов. Это как один километр дороги от Адлера до Красной Поляны. Там еще «набежало» - эксплуатация, запуск и т.д., но сам аппарат стоил именно столько. Его данные, его результаты начали публиковаться с 2007 года, и заключительная публикация была как раз, когда я уже писал эту книгу, это начало 2012, меня это стимулировало писать быстрее. А потом мне пришлось писать постскрипtum, потому что в 2013 году опубликовал свои результаты «Планк» (Planck) – это уже европейская обсерватория, тоже космическая. Она стоила немного подороже, у нее лучше разрешение. И они вместе сделали революцию. В основном - WMAP, «Планк» опубликовал лучшие данные, в них мало, что было нового, но все-таки было. Разрешение у «Планка» лучше, но «сливки снял» WMAP.

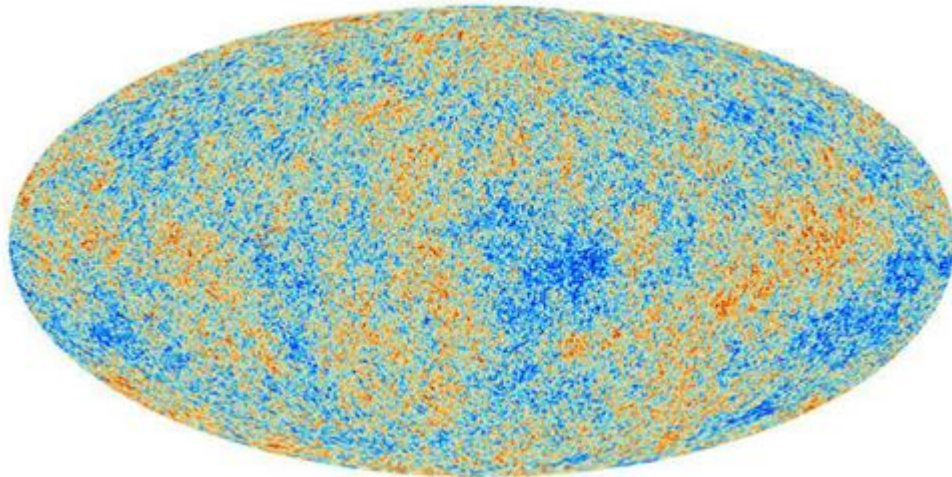


WMAP



Planck

Что в этих результатах самое важное? Мы видим такую «пятнистую» картинку: ну вот, например. Это – карта реликтового излучения. Из нее «вычтена» постоянная составляющая яркости и оставлен контраст на уровне 10-5, чуть больше. Отсюда также вычтена дипольная составляющая, потому что диполь получается просто от того, что мы вместе Солнечной системой движемся относительно реликтового излучения, у него есть своя система отсчета. И вот то, что осталось после вычитаний – всякие пятна здесь видите: теплые пятна – это оранжевые, холодные – это синие. Тут народ начал много чего искать. Здесь нашли инициалы Хокинга – вот здесь, по-моему, буква «S» и где-то рядом буква «H», есть снимок, где видно лучше. Люди здесь нашли «аномальное холодное пятно», нашли т.н. «ось зла». Энтузиасты нашли здесь некие концентрические кольца, которые предсказал Пенроуз. У последнего есть очень нетривиальная космологическая модель.



На самом деле, здесь ничего нет. Здесь есть только то, что мы видим, когда смотрим на облака и видим каких-то барашков, крокодилов или человеческое лицо. Причем того, что здесь ничего нет, точнее, ничего нельзя прямо так увидеть, это фундаментальное свойство, называемое «свойством гауссовости». Т.е., эта карта принципиально есть наложение друг на друга совершенно случайных пятен разного размера, никак друг с другом не связанных. Но информации здесь много, просто ее надо извлекать по-другому, а не просто глядя на эту карту.

Я уже упоминал Сахарова, так это он и придумал в 1963 году, что при Большом взрыве рождаются стоячие звуковые волны. То, что они стоячие – это нетривиальный эффект, связанный с быстрым расширением Вселенной, но это очень важно, что они стоячие, потому что они начинают синхронно колебаться. У волн данного размера в каждый определенный момент – общая фаза. Т.е., у волн одного размера в какой-то момент фаза «пи», это значит, что у них максимальная амплитуда.

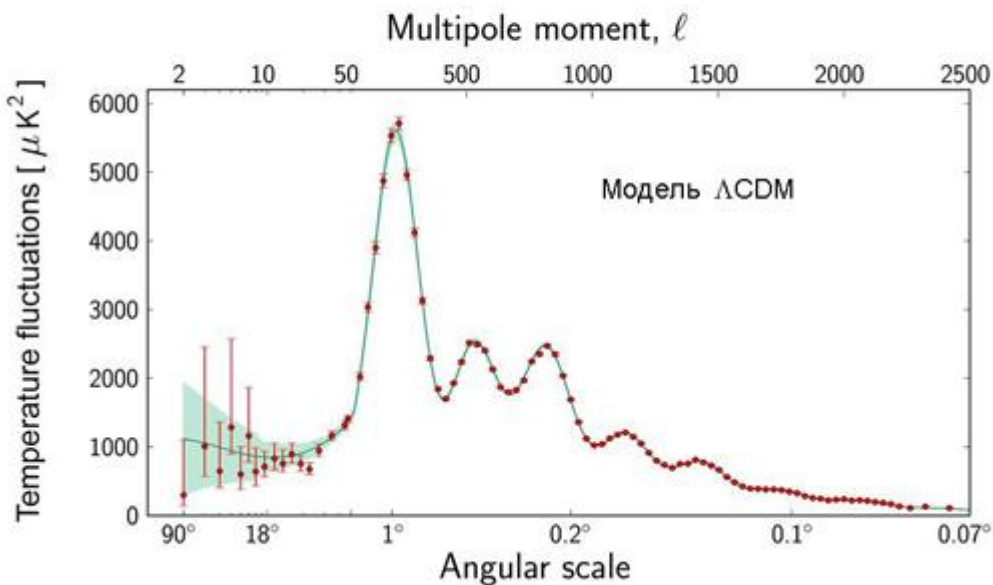
Допустим, у них фаза « π пополам» – это значит, что они все ушли в ноль. Все волны такого размера ушли в ноль. А потом они все достигли максимума. И так продолжается до тех пор, пока этот звук – звуковые волны – либо не «замерзли» (скорость звука не упала), либо излучение не отклеилось от вещества, это произошло примерно в одно и то же время. «Отклейка» произошла 380 тыс. лет назад. И то, что 380 тыс. лет назад имело фазу « π », то есть, данный размер волны успел совершить одно колебание – у тех неоднородностей максимальная амплитуда. Т.е., размеры неоднородностей определенного размера должны быть выражены сильнее других. Те, что имеют дробную фазу « π пополам» – ушли в ноль. Значит, если мы возьмем и сделаем гармоническое разложение карты, в данном случае – двумерное преобразование Фурье (или разложение по мультиполям). И построим спектр разложения: квадрат амплитуды мультиполя в зависимости от его номера, т.н. «спектр мощностей». Ну, это простая математика; то, что я говорил, требует некоторой привычки. Ну, обычный спектр Фурье – все, наверное, это понимают, что это такое. Берем призму, солнечный свет разлагаем – яркость эта и есть разложение Фурье. Здесь то же самое, только немного посложнее. И мы должны видеть некую осциллирующую кривую.

В случае Сахарова – это осциллирующая функция Бесселя, она не совсем синусоида, но как-то ее напоминающая, синусоида, помноженная на некоторую экспоненту. Причем, Сахаров взял совершенно неправильную модель Вселенной. Он ее взял холодную, и у него получилось, что все осцилляции – слишком мелкого масштаба и толку от них немного. Это ему Зельдович сказал, что Вселенная холодная. Потом выяснилось, что Зельдович ошибся, и экспериментально было обнаружено, что Вселенная – горячая. Зарегистрировали реликтовое излучение. Потом пересчитали на горячую Вселенную, в частности – Рашид Сюняев с Зельдовичем были первыми в этом деле. И после работ Сюняева, Зельдовича и других стало ясно, что эти осцилляции в принципе можно наблюдать.

В чем ярче всего проявляется мощь науки? Сахаров сидел и решал абстрактные задачи и вряд ли предполагал, что это может иметь какое-то отношение к реальности. Там совершенно дикие масштабы про которые вообще неизвестно, работает ли на них наша наука. И наши представления о мире. Он стартовал с «околопланковских» масштабов. «По дороге» получается множество странных эффектов, которые приходилось описывать впервые, достаточно нетривиальная математика, и вот получается такая осциллирующая функция.

Через 30 лет запускают космические аппараты, которые измеряют реликтовое излучение, в котором сидит вот эта кривая. Если в чем-то демонстрируется мощь науки, то как раз в таких вещах: когда, казалось бы, сделаны абстрактные вещи, сделанные заранее, за много лет, потом вдруг начинают реализовываться.

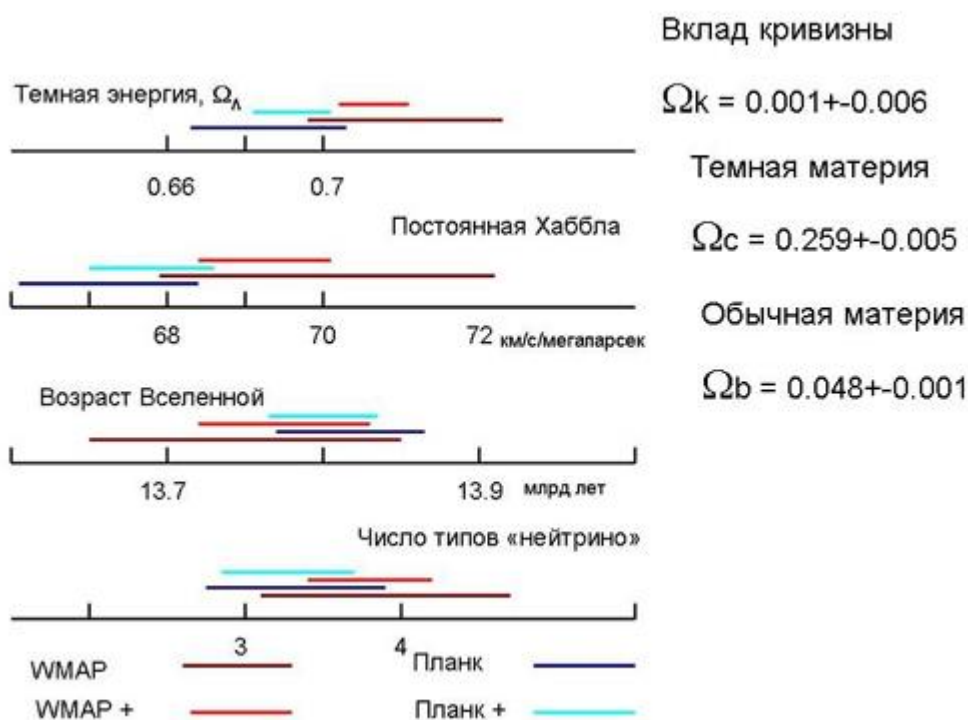
Если бы Сахаров увидел это!



Теперь. Вот эта кривая – эти точки, это экспериментальные значения. Синяя – теоретическая кривая. Она подгоняется под эту кривую всего шестью свободными параметрами. Те, кто возился с подгонкой данных, если здесь есть физики, то они со мной согласятся: чтобы подогнать вот этот кусочек данной кривой не имея хорошей теории, вот этот пик, уже нужно шесть параметров. А тут еще вот что происходит дальше – какие шесть параметров, тут и тридцати мало!

И в этих шести параметрах сидит важнейшая информация. Второй, третий вместе с четвертым дают нам кривизну Вселенной, которая оказалась очень маленькой. Ну, пятый – тоже, в данном случае это отдельный параметр, из них вместе «вытягивается» всё остальное – постоянная Хаббла и т.д. Вот эти параметры. Видно, что у «Планка» ошибки поменьше, но в целом результаты WMAP и «Планка» друг с другом согласуются. Планк дал немного больше возраст Вселенной, и

«Планк» дал немного меньшее число типов нейтрино. И он их дал ближе к тройке, что нам говорит, что мы три типа знаем – мы знаем все, четвертый нам уже не нужен.



Теперь – это важная вещь: я сказал, что начальный спектр возмущений, растянутых инфляцией, должен быть плоским, не должен зависеть от размеров. Амплитуда не должна зависеть от размеров. Так вот, оказалось, что он не совсем плоский. Он плоский, если $n = 1$, степенной индекс наклона, а он равен 0.96. На самом деле, здесь уже меньше, тут уже не 0.07, здесь уже 6 стандартных отклонений, абсолютно четко. Почему он отклоняется от 1? Он точно плоский, если инфляция идет с постоянным темпом. Но мы точно знаем, что эти флуктуации, которые нам дали галактики и которые мы измеряем, родились за 50-60 времен удвоения (точнее, увеличений в e -раз) размера Вселенной до конца инфляции.

И мы видим, что спектр отличается от плоского чуть-чуть, это значит, что инфляция к тому времени уже замедлялась, уже чувствовалось, что через какое-то время наступит ее конец. И теория предсказывает именно это, так и должно быть.

Теперь вот что. Это – результат Вячеслава Муханова. Начальный спектр возмущений он с Геннадием Чибисовым, считал аж в 1981 году - тогда они опубликовали эту работу. Что Слава говорит в той книжке, которую вы держите в руках? Он перечисляет предсказания теории инфляции и то, что с ними стало.

Если теория инфляции справедлива, то Вселенная должна быть с хорошей точностью плоской. Она и есть плоская с точностью 1%, т.е. радиус кривизны в 100 раз больше, чем размер видимой части Вселенной. Спектр первичных возмущений должен быть близок к плоскому, но не точно. Он должен быть не больше, чем 0.97.

Слава говорит, что, когда обрабатывали эти самые данные WMAP, он сказал одному из членов команды: «У вас пока получается плоский спектр, но вообще говоря, он должен быть 0.96». И он передает последующие впечатления человека, который обрабатывал данные: «У меня волосы дыбом встали – я увидел, что единица не проходит, а 0.96 дает максимум функции правдоподобия». Т.е., сейчас результат 0.96 ± 0.005 .

Свойства гауссовости. То, что на этой карте ничего нельзя прочесть, что эти неоднородности никак не связаны друг с другом – это тоже предсказывается теорией инфляции. Если это не так, то простая теория инфляции не работает. Требуется некое искусственное

нагромождение лишних сущностей. Ну, свойство адиабатичности я пропущу, чтобы не тратить время. Это более простое свойство и, если бы оно не выполнялось, то теорию можно было бы откинуть.

Многие, наверное, знают, что такое критерии Поппера для научности какой-нибудь теории. Это свойство фальсифицируемости, т.е. только та теория может рассматриваться в рамках науки, если можно придумать способ, каким ее можно опровергнуть. Вот вам четыре способа, какими теорию инфляции можно было бы опровергнуть, я пока пятый не трогаю. И все они сработали, инфляция их выдержала, все 4 критерия. Причем, критерии достаточно нетривиальные, особенно наклон спектра первичных возмущений.

Есть и пятый критерий – должны существовать реликтовые гравитационные волны. Но здесь проблема в том, что, скажем, скалярные возмущения плотности мы знаем точно их амплитуду, а на амплитуду гравитационных волн нет предсказаний. Они могут быть ниже порога детектируемости? В этом проблема. Но, с другой стороны, это был бы ключевой тест, потому что сейчас есть альтернативные теории рождения Вселенной, они менее популярны и красивы, но они есть. В принципе, альтернативы с натяжкой объясняют эти 4 следствия. А вот гравитационных волн ни одна из этих теорий ни в каком варианте предсказать не может. Поэтому их обнаружение было бы очень важным.

И я говорил про последние два или три месяца. В марте было заявлено, что гравитационные волны открыты. Каким числом измеряется их величина? Это отношение r – отношение мощности гравитационных волн к мощности скалярных возмущений. Мощность вычисляется из гармонического спектра: надо возвести в квадрат эти амплитуды, и они нам дадут мощность. WMAP и «Планк» совместными усилиями положили ограничение на это r – меньше 0.11. Т.е., гравитационные волны слабее, но так и должно быть.

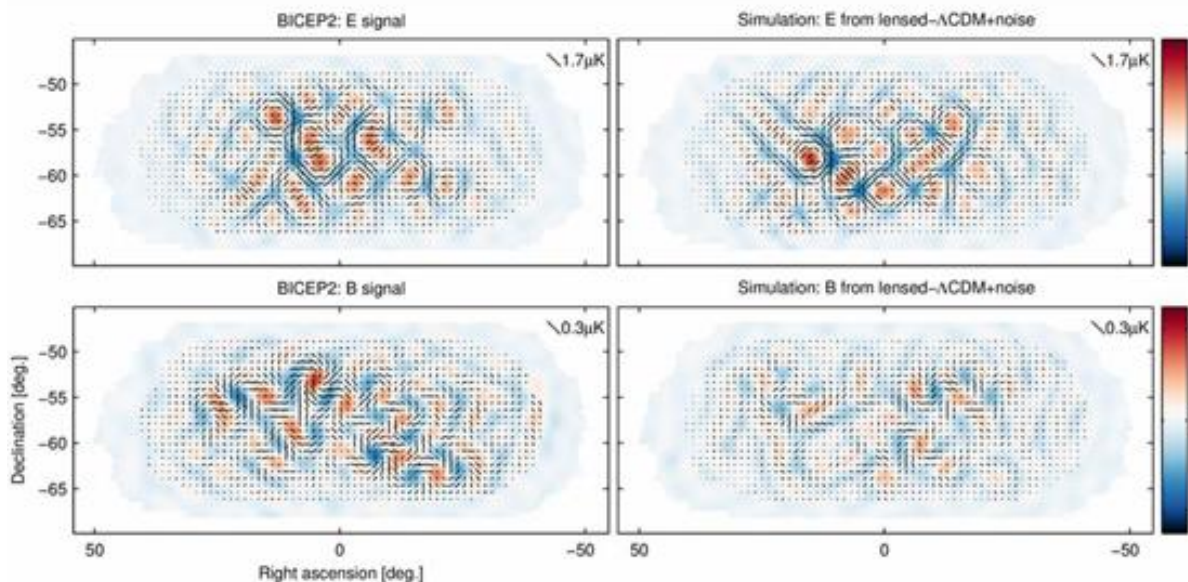
А простейшие модели, самые популярные, которые были давно-давно популярны, дают $r = 0.2$. Т.е, они оказались опровергнутыми, но ниже есть еще один интересный уровень – модель Старобинского, которая с моей точки зрения и с точки зрения многих людей более перспективна, дает всего лишь $r = 0.5\%$, до такого уровня еще далеко.

Такой была обстановка совсем недавно, и вдруг – сенсация: в марте 2014го команда эксперимента BICEP-2 заявляет о своем открытии. Реликтовые гравитационные волны с $r = 0.2$! Как в простейших моделях.



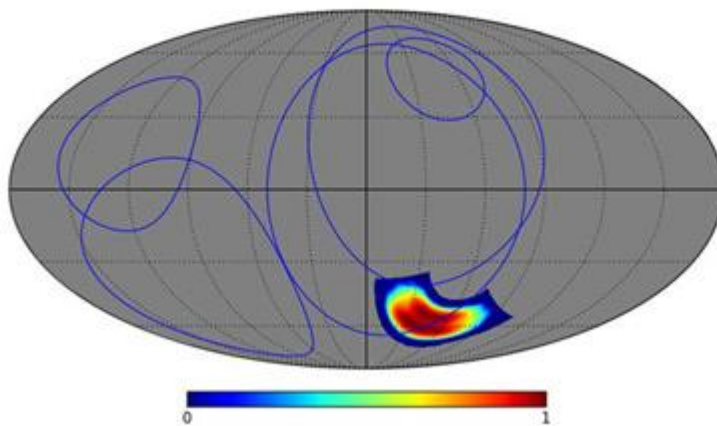
Что такое BICEP-2? Это микроволновый телескоп на Южном полюсе. Он изображен на обратной стороне книжки, там же, где команда Амундсена на Южном полюсе. Т.е, это было в одном месте, но в разные времена. На снимке – лабораторное здание сразу двух экспериментов. Справа в таком «раструбе» и есть BICEP-2 – маленький телескоп, который очень хорошо меряет

поляризацию реликтового излучения. Южный полюс выбран потому, что там наилучшие условия для наблюдения: наименьшая температура и охладить его легче. Т.е., телескоп небольшой, но очень чувствительный. И вот они намерили карту поляризации реликтового излучения. А поляризация реликтового излучения, которая изображена внизу слева, может быть дана только гравитационными волнами. Здесь она явно видна. Реликтовое излучение может дать такую картину только в результате гравитационных волн. Но проблема в том, что он видит не только реликтовое излучение.



Они оценили все фоны, сказали, что все фоны маленькие. Знаменитые космологи уже начали пить шампанское, что, по-моему, было несколько рано. Я пытался отслеживать эту ситуацию, позвонил своему знакомому из команды «Планка», и он сказал, что это, скорее всего, ерунда, потому что есть очень мощный источник фона, который может дать именно такую картинку. Этот источник фона – это пыль в нашей Галактике, недалеко от нас. Буквально через две недели вышла статья в архиве электронные препринтов, где утверждалось то же самое.

7 апреля 2014 Статья в архиве е-принтов: там, куда смотрел BICEP2 полно поляризованной пыли:



Что изображено на этой картинке? На ней изображена карта неба, и эта яркая загогулина внизу – это поле зрения BICEP-2. По центру – наша Галактика. Т.е., они далеко от плоскости нашей Галактики, поэтому они думают, что с фонами все хорошо. А на самом деле, обратите внимание вот на эти синие кружки.

Что это такое? Это – остатки близких взорвавшихся сверхновых. Сверхновая взорвалась – от нее идет сферическая ударная волна. И вот это и есть контуры этих ударных волн. Все эти ударные волны напичканы пылью, в т.ч. – ферромагнитной пылью, которая ориентируется вдоль силовых линий магнитного поля, которое генерируется здесь же в этих ударных волнах. Поле там оно турбулентное, может дать любую картинку. И эта пыль излучает поляризованное излучение. И по оценкам авторов этого e-принта, это может им всю картинку, требуемую от гравитационных волн, симитировать.

Что происходило в понедельник 16 июня 2014 года на конференции Зельдовича? Выступал член команды ВИСЕР-2 и, не дрогнув ни одним мускулом (a biser - это «мускул» в переводе, выдал: «У нас все в порядке, мы посмотрим, конечно, на результаты «Планка», но мы все промоделировали, и оценки фона у нас низкие». Член команды Планка выступал очень дипломатично, он показал карту поляризации, которая у них получилась. На этой карте, увы, отсутствовало то место, где поле зрения ВИСЕР-2.

Я не знаю, может, это результат какой-то политики. Он сказал, что «опровергнуть мы не можем, но и подтвердить не можем». Вообще, разброс яркости излучения очень велик... Слава Муханов выступил в своем духе, он – человек категоричный, и, как правило, оказывается прав. Он сказал, что либо результат WMAP не верен, который дал ограничения 0.11, либо не верна теория инфляции, потому что она не может совместить результат 0.2 для ВИСЕР-2 и ограничения верхнего предела 0.11 для WMAP.

Для этого пришлось бы делать такое насилие над теорией, после которого она потеряла бы всякую привлекательность. Либо – не верен результат ВИСЕР-2. Точнее, результат верен – они правильно измеряют поляризацию, но неверна интерпретация – это не гравитационные волны, а пыль. Что, я думаю, как раз и имеет место. Ну, это мое мнение по совокупности разговоров с разными людьми. Сам я судить не могу, потому что я ни тех данных, ни других данных в руках не держал.

И, наконец, закругляемся. Редкий случай, когда популярную книгу цитируют на конференции. Вот Слава меня процитировал. Эта глава называется «Интервью с адвокатом дьявола», она ближе к концу книги. Я задаю вопрос: «Допустим, результаты ВИСЕР-2 неверны, что, скорее всего, так и есть. И допустим, что и «Планк» после публикации всех данных тоже не дает гравитационных волн. Уровень $g=0.1$ оказывается пройден. И следующий интересный уровень – это 0.004, полпроцента. И тогда придется ждать, наверное, лет 15.

Эксперимент, который дотянет до этого уровня, называется PRISM, это европейский эксперимент, надеемся, что он состоится. Он дотянет до уровня модели Стробинского где-то через 15 лет. Если так и будет, а скорее всего, так и будет, то означает ли это, что теория инфляции остается на эти годы «подвешенной» в воздухе?». Адвокат дьявола отвечает дипломатично: «Да, будет подвешенной, конечно, в том смысле, что те, кто занимается альтернативными моделями, не потеряют свой бизнес».

Однако в теории инфляции есть элемент, за который совершенно четко можно давать Нобелевскую премию – это механизм генерации возмущений, который рассчитали Муханов с Чибисовым. Во всех альтернативных моделях используется тоже он. И мои возражения на замечания «Адвоката дьявола»: я спорить не могу, он гораздо квалифицированнее меня, на две головы просто, но у меня есть в этом споре в данном случае сильная сторона – это позвать на помощь старика Уильяма Оккама.

Тот говорил: «Та теория правильна, которая требует наименьшего количества новых сущностей». Инфляция требует наименьшего количества сущностей. Модель Старобинского вообще не требует новых сущностей, там все происходит с известными имеющимися полями. Поэтому я «со своей колокольни», поговорив со многими людьми, сказал бы, что, в отличие от «Адвоката дьявола», который на самом деле – Валерий Рубаков, сказал бы, что, будь моя воля, эту теорию можно было бы считать общепринятой, победившей. Вот, собственно, и всё, я рассказал

основную канву этой книжки. Там есть еще и другие «канвы», другие сюжетные линии. И сейчас давайте, перейдем к дискуссии.

Обсуждение лекции

Слушатель: Скажите, может ли некий межгалактический «доктор Зло» или сверхразвитая цивилизация провести физический эксперимент или целенаправленно устроить вселенский «судный день» и изменить энергетическое состояние физического вакуума, чем полностью разрушить нашу структуру Вселенной? Либо, например, если верна «теория струн», и существуют скрытые измерения, взять и раскрутить эти скрытые измерения?

Борис Штерн: Раскрутить скрытые измерения очень тяжело, потому что для этого нужны «околопланковские энергии». А с первым вариантом проще. Проще – если существует т.н. «фантомная материя» или «фантомная энергия». Если ее создать в лабораториях в достаточном объеме, она начнет расти. И тут надо уже решать уравнение: либо она начнет пожирать окружающее пространство, либо она начнет формировать «кротовую нору» - выход в другую вселенную, и дальше в этой Вселенной будет происходить инфляция.

В обоих случаях как-то неприятно и страшно. Но это если есть фантомная энергия. Что это такое? Давление в ней отрицательное и по абсолютной величине больше, чем плотность энергии. Тут нарушаются некие логичные принципы, но теоретики такие «конструкции», в принципе, рассматривают. Это – то, что я знаю, а вообще фантазий теоретических на эту тему много, но все они требуют лишней сущностей. Так вот если их не привлекать, то для изменения вакуума, скажем, для перескока в новое состояние требуются околопланковские энергии, которые совершенно невозможны. Ответ примерно такой.

Слушатель: Спасибо за такую чудесную лекцию. Вопрос такой: на больших расстояниях если у Эйнштейна лямбда-член был бы как антигравитация на расстояниях больше 10 мега-парсек, при том, что на меньших расстояниях действует обычная гравитация, то сегодняшняя стандартная модель как определяет лямбда-член?

Борис Штерн: Лямбда-член – это и есть «темная энергия». Это именно лямбда-член, только он взят уже не с потолка, а взят из ненулевой энергии вакуума, которая измерена. Да, «темная энергия» - это, фактически, и есть лямбда-член. Только она по-другому входит в уравнение Эйнштейна, входит из правой части. Можно просто переставить в левую и назвать лямбда-членом. Дополню: это один из вариантов, что это есть лямбда-член.

«Темная энергия» – это может быть с хорошей точностью вакуум, а может быть не точно вакуум, может быть просто однородное скалярное поле, заполняющее всю Вселенную, которое находится на склоне своего потенциала и медленно меняется. Это довольно большая разница для судьбы Вселенной. В первом случае это экспоненциальное раздувание, бесконечное, которое, правда, может когда-то прекратиться, если будет новый фазовый переход. А если это поле «сползает», то темп расширения будет уменьшаться, и когда-нибудь оно «выгорит», какие-то совершенно новые виды материи, которые для нас очень слабые... Если поле выгорит и превратится в частицы, тогда изменится уравнение состояния Вселенной, все снова пойдет по Фридману, без лямбда-члена.

Слушатель: Инфляция остановится.

Борис Штерн: Да, да. Кстати, если напрячься, то можно отличить эти два сценария. Можно померить уравнение состояния Вселенной и отличить вакуум от скалярного поля, которое меняется.

Слушатель: У меня два вопроса. Во-первых, я слышала, что расширение Вселенной ускоряется, и во-вторых, что такое «кротовые норы»?

Борис Штерн: Про ускоренное расширение я уже сказал, просто повторяю. Размер нашей Вселенной удваивается каждые 10 млрд лет. Вернее, скажем не так: она выходит на такой режим,

где будет удваиваться каждые 10 млрд лет. Сейчас она еще идет по немного другому закону – это экспоненциальное расширение. Оно есть ускоренное, если мы измерим скорость расширения, то она будет расти. Это – результат того, что во Вселенной есть «темная энергия». Что такое «кротовые норы»...

Слушатель: И заодно – кто придумал эту метафору?

Борис Штерн: Вообще, по-английски это «wormhole». Кто это придумал? Уиллер, наверное, он большинство этих всех метафор придумал. Планковская пена, например.

Что это такое? Пожертвуем одним измерением, чтобы мы могли представлять нашу Вселенную проще. Как плоскую пленку. Т.е., у нас только два измерения, мы живем в этой пленке. Теперь представьте себе, что какой-нибудь участок этой пленки начал расширяться. А куда он может расширяться? Пленка тоже растягивается, но он начал быстро растягиваться, такой физический эффект.

Допустим, там пошла какая-то новая версия инфляции. И на пленке начал образовываться пузырь. Его горловина расширяется медленнее и в конце концов «схлопывается» и становится маленькой. Эта горловина и есть «кротовая нора». В принципе, через эту «кротовую нору» можно перепрыгнуть из нашей Вселенной в эту, раздувающуюся. С нашей стороны она выглядит в точности как «черная дыра». Мы ее не можем отличить.

Теперь – можем ли мы перепрыгнуть? Как правило, нет, потому что, если ничего не придумывать, то все равно прыгающий туда упрется в какое-то состояние плотности, совершенно бешеное, где все будет раздавлено. Но теоретики изучают варианты разных уравнений состояний, где там оказывается конечная плотность и можно путешествовать из Вселенной в другие вселенные, но это не рекомендуется делать, потому что заранее не убедишься, что теоретики правы. Наизобретать они могут много, чего... «Кротовую нору» найти практически невозможно, все эти «перемычки» между Вселенными разносятся на гигантские расстояния. Вероятность того, что это именно «кротовая нора», а не черная дыра, ничтожна.

Борис Долгин: Коллеги, еще вопросы.

Слушатель: Дополнение к одному вопросу, который уже был задан. Модификация вакуума. Как говорится, в квантовой механике есть чудеса. Туннелированием вы можете преодолеть барьер любой высоты... Так вот я к чему: есть ли связь между разными вакуумами? Понятно, что теория не запрещает нам в следующую секунду преодолеть этот барьер в одной точке, а если вакуум изменился локально, то он может перейти в другое состояние и в окружающем пространстве. Какие-то такие сценарии теоретически рассматриваются?

Борис Штерн: Конечно. Тот же самый Андрей Линде грозит апокалипсисом, что метастабильное состояние нашего вакуума возьмет и перепрыгнет когда-нибудь в другое, более низкое. А как это произойдет – в том числе да, и с помощью туннелирования. Вероятность, конечно, ничтожна... Туннелирование легко получить в микроскопических масштабах. Оно очень хорошо описывает рождение Вселенной. Вот есть это планковское состояние, и есть то, что нужно, чтобы стартовать инфляции.

Переход из одного в другое как раз можно какой-то квазиклассикой описывать, как туннелирование. Это люди делают. Александр Виленкин что-то подобное сделал в 1981-м году. А когда мы работаем с большим, макроскопическим пространством, что можем мы с сделать туннелированием? Взять и туннельным образом из нашего пространства «родить» какую-нибудь новую Вселенную, которая у нас не будет наблюдаться просто никак... Это, наверное, можно, да.

Слушатель: У нас не будет наблюдаться?

Борис Штерн: Да.

Слушатель: Ну, и нас там нет.

Борис Штерн: И нас там нет.

Слушатель: Тогда в каком смысле она есть?

Борис Штерн: А в каком смысле есть бесконечное множество других Вселенных? Теоретически мы уверены, что они есть. Наблюдать их мы не можем.

Слушатель: Т.е., есть косвенные методы, которые позволяют нам в теории обосновать...

Борис Штерн: Да. Мы знаем, почти уверены, что на Земле через сто лет будут жить люди – новые, разные. Но мы никак не можем их наблюдать.

Слушатель: Спасибо, очень интересно. Как говорили Стругацкие в одной книжке, что, если профессор мог объяснить даже своей секретарше теорию, значит теория хорошая...

Борис Штерн: Значит и секретарша тоже хорошая

Слушатель: Вы говорите, что наша Вселенная расширяется, и получается, что она расширяется в каком-то пространстве? Или, так сказать, подвешена?

Борис Штерн: Нет. Вспомните, что я говорил про шарик. Представьте, что мы живем в двумерной Вселенной, на поверхности шарика. Третьего измерения нет. Мы просто представили себя стоящими вне этой Вселенной, в каком-то доступном измерении. Шарик был микроскопический, и этот шарик начал расширяться.

Шарик – это Вселенная. Она замкнута. Допустим, вначале расширения Вселенной в ней был наблюдатель – если замкнутая Вселенная размером с тыкву, наблюдатель видит себя в затылок, на расстоянии 1 метра. Через какие-то секунды я вижу себя в затылок на расстоянии километра. Это описывает замкнутую расширяющуюся Вселенную, но неточно описывает, потому что в реальности такого быть не может из-за конечной скорости света. Если бы свет распространялся с бесконечной скоростью, то в первые мгновения наблюдатель видел бы свой затылок на небольшом расстоянии, а потом – все дальше и дальше. Т.е., он видел бы свой образ, удаляющийся от себя с колоссальной скоростью. Вот так можно представить себе конечную замкнутую Вселенную.

Борис Долгин: На самом деле, мне кажется, что отчасти вопрос был задан из логики некоторого абсолютного пространства, в котором существует эта Вселенная, и вот она расширяется. Т.е., важно уйти от той логики.

Борис Штерн: Да, да, нет никакого абсолютного пространства, всё на этом шарике.

Слушатель: У меня такой вопрос о моменте начала инфляции. Вы говорили: вот, хаос первичный, и вдруг в какой-то точке возникает инфляция. Инфляция – это как бы некий развертывающийся программный процесс, потому что мы можем проследить последовательность, что было, что будет – т.е., пройти. Откуда берется эта программа? Т.е., переход от хаоса к некоей программности.

Борис Штерн: Всё это – случайность. Все построено на случайности.

Слушатель: А что является ее носителем?

Борис Штерн: Квантовая механика. Случайность принципиально «защита» в квантовой механике. Я говорил про эти случайные неоднородности квантовые – они случайны. И процесс инфляции программируется ими случайным образом. Потому что это – сценарий вечной инфляции. Там, где квантовые флуктуации, которые чисто случайно подбрасывают поле вверх, там плотность оказывается больше. Там пространство расширяется быстрее. Еще раз: поле все время хочет идти вниз, а квантовые флуктуации иногда подбрасывают это поле вверх. И там, где оно подброшено вверх, пространства становится больше. Т.о, «подбросы вверх» перспективны - все время живут, все время дают новые и новые расширяющиеся пространства. Они могут идти до планковских значений, там вакуум может перестроиться и дальше начать расширяться уже в «перестроенном» виде. Это и есть концепция «вечной инфляции», которая дает бесконечное разнообразие Вселенных. И все это «дерево» описывается случайным процессом, и случайность эта – квантомеханическая.

Слушатель: А можно ли вернуться обратно? Обратное время?

Борис Штерн: Можно. Насколько – не известно. Здесь речь идет о временах порядка 10-35 сек. Может быть, 10-32. Но любая траектория, протянутая назад по времени, упрется когда-

нибудь в планковское состояние. Но когда – неизвестно. И всегда можно найти любую траекторию, которая протянется назад по времени еще дальше. А это есть определение бесконечности. В принципе, прошлое бесконечно. Не для любой конкретной траектории конечно, но всегда найдется траектория, уходящая дальше назад. А это есть бесконечность. А любая траектория, история любой точки, упрется в планковское состояние довольно быстро.

Слушатель: Правильно ли я поняла, что носителем этой «программности» является флуктуация?

Борис Штерн: Да, да. Она является «диспетчером» этой программы».

Слушатель: Спасибо.

Борис Штерн: Носителем программы в каком-то смысле является физика, законы физики. А диспетчером – эти квантовые флуктуации.

Борис Долгин: Видимо, формулировкой программы являются законы физики. Не носителем, а формулировкой программы.

Борис Штерн: Да.

Слушатель: Получается, флуктуационная теория подтвердила теорию Эверетта о множественности миров, да?

Борис Штерн: Нет, это разные множественности. Теория Эверетта это то, что Вселенная существует во множественности коррелированных копий. В бесконечном числе коррелированных образов. И мы постоянно перескакиваем из одного в другой. А это совсем другое... Существует бесконечное количество множества разных, не связанных друг с другом, Вселенных, с разной историей. Это разные бесконечности.

Слушатель: Эти Вселенные – они пронизывают друг друга?

Борис Штерн: Нет, они не связаны друг с другом. Они в разных местах и, более того, они не достигаемы.

Слушатель: Спасибо большое. Вы сейчас рассказываете о теории инфляции – достаточно актуальной теории, можно даже предсказывать, что результаты WMAP2 должны быть неверны. Возникает вопрос: что дальше? Чем заниматься дальше космологам, нашим детям, какие параметры должны уточняться? Какие исследования, какие новые эксперименты, что с космологией?

Борис Долгин: - Какие вопросы остались не отвеченными или какие появились новые?

Борис Штерн: Гравитационные волны остались не отвеченными – это первый и, пожалуй, важнейший вопрос. Дальше есть много разных конкурирующих моделей инфляций. Модель – это не сценарий. Сценарий инфляции – это то, что признано работающим, в варианте хаотической инфляции в ее вечном варианте. А доказать вечную инфляцию наблюдениями - это лежит за пределами наших возможностей. А в пределах наших возможностей – найти конкретную модель, которая работала в нашей конкретной Вселенной на стадии инфляции. Это зависит от многих тонких вещей, например: многие классы моделей уже отвергнуты этим самым ограничением на амплитуду гравитационных волн. Какие-то классы теорий отвергнуты результатами Планка и WMAP по измерению гауссовости.

А если будет найдена не гауссовость карты реликтового излучения, т.е. пятна чуть-чуть коррелируют друг с другом? В принципе, на каком-то уровне это обязательно должно проявиться, потому что везде есть пусть малейшие корреляции за счет нелинейности. Т.е., «гауссовость» - это первое приближение, а негауссовость - это будет уже второе приближение, и по нему тоже можно будет судить о физике явлений, которые тогда происходили. Т.е., выбирать между разными теориями, которые сейчас дают одно и то же. Разные теории инфляции дают одинаковый результат, который мы не можем сейчас отличить. А если измерять точнее, то мы уже сможем выявлять различия между ними. Ну, и конечно, реликтовые гравитационные волны, которые могут нам дать какой-то приговор: инфляция была, и оставьте сомнения.

Борис Долгин: А еще какие-то вопросы появились?

Борис Штерн: Остались «больные» вопросы. Самый больной вопрос, который остался – почему энергия вакуума близка к нулю? Потому что по идее, нет никаких указаний, почему она не должна быть порядка планковской? А она примерно на 120-123 порядка меньше планковской. Почему так, откуда такая точная подгонка – мы не понимаем, и здесь происходит «драка». Приверженцы теории вечной инфляции с вариацией суперструн говорят, что это так случайно «выпало». Антропный принцип.

- Правильно говорят...

Борис Штерн: Вероятность этого – 10-122. Ну, а почему бы и нет, когда есть почти бесконечность вариантов, почему бы не выпасть. Более того, есть одно обстоятельство, которое вроде бы работает в пользу этих людей. То, что она близка к нулю, но не точно ноль. Она отлична от нуля, но отлична достаточно мало, чтобы не препятствовать нашему существованию. Потому, что если бы это был какой-то глубокий принцип, то, скорее всего, мы бы ждали, что он даст нам точно ноль. С другой стороны, может быть, плотность энергии вакуума и есть точно ноль, а темная энергия - не вакуум, а физическое скалярное поле, которое меняется со временем. А плотность энергии чистого вакуума может быть точно ноль. Моя точка зрения, она больше эстетическая: когда речь идет о том, что какая-то величина очень близка к единице (что-то равно чему-то), или какая-то величина в точности равна нулю, антропный принцип надо привлекать в последнюю очередь, уже в полной беспомощности.

Прежде всего, надо искать принцип, который делает именно так. И именно это произошло с кривизной Вселенной. Ее тоже пытались объяснить с помощью антропного принципа. Потому, что если кривизна изначально была больше, Вселенная бы «схлопнулась», если бы она была отрицательной, и тоже большой – Вселенная разлетелась бы, нас бы не было. Было 1060 попыток сотворения, и на 1060 раз получилась такая кривизна, которая нам позволяет жить.

А потом увидели – нет, ребята, есть такой принцип, который детерминированным образом делает нулевую кривизну. Может быть, и здесь будет найден такой принцип? Во всяком случае, останавливаться на антропном принципе пока рано. Это – своеобразная капитуляция, скажем так. Есть люди, по-разному думающие. Андрей Линде считает, что антропный принцип всё объясняет, но это уже вопрос философский.

Слушатель: Как-то повлияет обнаружение гравитационных волн на сценарий?

Борис Штерн: Повлияет, конечно. Во-первых, обнаружение гравитационных волн точно покажет, что это – инфляция, а не что иное. Во-вторых, уровень величины этих гравитационных волн – поможет сильно выбрать между разными физическими моделями инфляций. Скажем, модель Старобинского дает полпроцента. Если будет найдено на уровне полпроцента, то это будет сильный аргумент в пользу модели Старобинского и еще нескольких, которые более-менее искусственны. Но я думаю, что Старобинский выигрывает.

Слушатель: Пользуясь случаем, хочу поблагодарить Бориса Евгеньевича за титаническую работу по выпуску знаменитой газеты «Троицкий вариант-Наука», которая сейчас, можно сказать, является светочем в среди мутных волн наших СМИ, которые ведут по всем каналам псевдо-научные всякие передачи. Которые путают молодежь и сбивают их с нормального пути. Это, во-первых. Во-вторых, спасибо за книжку, которую я успел здесь пролистать. И надеюсь на сотрудничество с журналом «Земля и Вселенная», который я здесь представляю.

Борис Долгин: Прекрасно.

Слушатель: В частности, по поводу конференции Зельдовича – мы подготовили номер с хорошими данными, он вот-вот должен выйти. А я хочу задать вопрос из разряда глупых. Как в книжке у Бориса Евгеньевич написано, там было много «глупых вопросов», которые оказались, в конце концов, достаточно интересными.

Вопрос такой: одна из самых интересных разделов физики – термодинамика, и я вижу, что там сплошь используются знакомые еще со школьного курса понятия температуры (термометр

показывал один градус в межгалактическом пространстве), энтропии, что-то еще. Вопрос такой: с этой точки зрения можно ли считать, что Вселенная, в которой мы живем, которая родилась в результате Большого взрыва, является открытой системой?

Борис Штерн: Нет.

Слушатель: Я могу сказать, что придумал тест, который задаю достаточно квалифицированным людям. В т.ч., облаченными премиями, о которых мы говорили.

Борис Штерн: Сбрасывать энтропию Вселенной некуда.

Слушатель: Тогда переформулирую вопрос. Поле до Вселенной является открытой системой, или оно не подчиняется никаким определениям, с точки зрения термодинамики?

Борис Штерн: Это – вакуум, пустота. Хотя это «тяжелая пустота».

Слушатель: Но там энергия, как Вы сказали, есть?

Борис Штерн: Плотность энергии есть, частиц нет. Температуры – нет, частиц нет, вакуум, плотность энергии – колоссальная. Энтропия – ноль.

Слушатель: Физики изучают физику, и они ищут – в космологии те же законы должны быть и там, как в лабораторной физике. Правильно? Я вам могу очень просто показать, что вся эта история с множественностью мультиверсов с одной стороны, должна быть, с другой стороны – показать, что не должна быть.

Есть множественность вселенных. Почему-то в нашей Вселенной нам так повезло, что у нас есть Старобинский, Гут, Линде и т.д. Эйнштейн есть. И у нас есть квантовая механика, которой мы ужасно верим. Вопрос: существует ли из этого бесконечного числа Вселенных хоть одна, в которой ничего не знают про Эйнштейна, ничего не знают про квантовую механику? Рубаков на этот вопрос мне ответил: «Ну и вопросы вы мне задаете!» А потом сказал: «Эти законы должны выполняться везде. И теория относительности справедлива, и квантовая механика». Я скромно молчал...

Борис Долгин: Вы сейчас смешали две совершенно разные вещи. Одна – физические законы, другая – наличие тех или иных персон.

Слушатель: Подождите. Я понимаю, что от персон ничего не зависит, но все же это показывает, что никакой другой физики там нет. И то, что показывают, что есть много Вселенных – ерунда.

Борис Долгин: Все, спасибо.

Слушатель: Подождите, это и есть вопрос!

Борис Долгин: Тогда переходите к следующей части, но оперативно.

Слушатель: Перехожу к следующей части. Сколько времени было у природы на утверждение физических законов? Их нужно было принимать очень быстро, «в третьем чтении», потому что времени нет, 10-43 сек., все, приняли...

Борис Долгин: Еще раз: в чем ваш вопрос?

Слушатель: Сколько времени нужно?

Борис Долгин: Вопрос не понятен. Вас интересует, как быстро установились законы?

Борис Штерн: Отвечаю. Число измерений установилось примерно за 10-42 сек. Это еще не все законы.

Слушатель: Измерений всегда было три?

Борис Штерн: Нет, их было 11 или 10, если верить теории струн. Дальше. Физика частиц устанавливалась поэтапно, начиная примерно от 10-33 сек. Следующее решение было, может быть, где-то посередине: будет ли число протонов равно числу антипротонов и т.д. Это какие-то микросекунды. Вот примерно такой ответ.

Слушатель: Ну, а законы термодинамики?

Борис Штерн: Законы термодинамики никогда не устанавливались, это и есть изначальные законы, которые существовали с самого начала, они определяются простой логикой и математикой.

Слушатель: А в других Вселенных они другие?

Борис Штерн: Да, они могут быть другие. Физические законы могут быть другими.

Слушатель: Что значит «другие»?

Борис Штерн: Число измерений другое, массы частиц другие, константы взаимодействий другие.

Слушатель: Так может, там и скалярного поля нет?

Борис Штерн: Может.

Максим Борисов: У меня не вопрос. Я просто хотел сказать, что сегодня было оглашение длинного списка премии «Просветитель», на котором было объявлено, что книжка Бориса Штерна вошла в этот список...

Борис Долгин: Да, мы уже об этом сказали.

Максим Борисов: И процитировать пресс-релиз со словами Д.Б. Зимина: «Книга Бориса Штерна также обещает быть настоящим событием. В ней раскрываются новые горизонты, которые меняют философские представления о жизни, я даже подумал о том, чтобы ввести отдельный конкурс, который проводился бы каждые 10 лет в рамках премии «Книга десятилетия». Так что мои поздравления.

Слушатель: Можно еще раз «для секретарши» про шарик? Т.е., мы в любом направлении, если бы могли нестись со скоростью света, видели нашу Землю?

Борис Штерн: Да. Если снять ограничения на скорость света – да. Но размеры могут быть такими, что это миллиард расстояний до горизонта нынешней Вселенной, или миллиард миллиардов, какие-то немыслимые расстояния, на которых мы себя могли увидеть.

Слушатель: А мы не можем ее увидеть с помощью, скажем, чудесных линз искривление пространства этих пузырей, которые приблизят изображение или мы могли бы...

Борис Штерн: Есть гравитационные линзы, которые усиливают другие Галактики, но не снимают ограничения по скорости света. Гравитационные линзы – очень интересная вещь. Они очень красивые, там тоже есть какие-то снимки, но они не столь эффективны. Для того, чтобы «прыгать» на какие-то немыслимые расстояния, нужны «кротовые норы». В которые прыгать не рекомендуется.

Слушатель: Никаких вариантов?

Борис Штерн: Реально нет, не имеем.

Борис Долгин: Спасибо за лекцию!