

так как не установлен механизм возникновения барионного заряда, известно лишь, что такой процесс не противоречит законам физики.

Инфляционная Вселенная

Современная теория расширяющейся Вселенной содержит как неотъемлемую часть представление о периоде экспоненциального расширения. В этот период все масштабы (в том числе и радиус Вселенной, если она замкнута) растут как $\exp(Ht)$ — по тому закону (рис. 37), по которому растут цены, когда экономика страны поражена инфляцией. Только здесь H — постоянная Хаббла в период инфляции. При этом время такого роста может быть очень малым, например, 10^{-33} секунды. Но если постоянная Хаббла в этом периоде равна 10^{36} с^{-1} , то произведение Ht равно 1000. Это значит, что радиус успевает вырасти в $\exp(1000) = 10^{434}$ раза. При начальном планковском радиусе 10^{-33} см получим радиус 10^{400} см, в гигантское число раз превышающий современную наблюдаемую Вселенную. В настоящее время под влиянием идеи инфляционного расширения считается весьма вероятным, что наблюдаемая часть Вселенной (радиус которой порядка $c/H = 6000$ мегапарсек = 20 000 миллиардов световых лет) составляет ничтожную долю всей Вселенной, даже если Вселенная замкнута и, следовательно, имеет конечный полный объем.

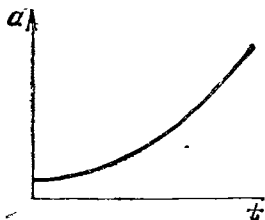


Рис. 37. Вызываемая скалярным полем инфляция — экспоненциальный рост радиуса Вселенной со временем — обеспечивает раздувание Вселенной до размеров, охватывающих наблюдаемую в настоящее время часть Вселенной

Но каковы условия, необходимые для экспоненциального роста радиуса?

Оказывается, что такой режим расширения возникает при наличии *скалярного поля*. При этом необходимо, чтобы плотность энергии скалярного поля содержала наряду с обязательными градиентными членами $\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)^2, \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2$ еще и «потенциал» $V(\phi)$.

При расширении главную роль начинает играть потенциал $V(\varphi)$ *). Но если φ есть скаляр, то числовое значение φ одинаково в любой системе координат, не изменяется при преобразовании Лоренца.

Плотность энергии $V(\varphi)$ есть T_0^0 -компонента тензора энергии-импульса-натяжений. Если φ инвариантно относительно лоренц-преобразования, то инвариантен и весь зависящий от φ тензор. Именно с целью добиться такой инвариантности нужно было пренебречь производными $d\varphi/dt$, $d\varphi/dx$ — они образуют 4-вектор, *неинвариантный*.

Вернемся к ситуации, когда доминирует $V(\varphi)$. Условие инвариантности тензора приводит к выводу**): плотность энергии $\epsilon = V(\varphi)$, давление $p = -\epsilon = -V(\varphi)$, все другие величины — потоки энергии и космонапряжения — равны нулю.

Именно отрицательное давление и есть главная причина, побуждающая рассматривать скалярное поле. В земной физике встречается отрицательное давление — до $-2 \cdot 10^8$ г/(см·с²) в потоках воды, до $-2 \cdot 10^{10}$ г/(см·с²) во всесторонне растянутой стали. Однако эти величины ничтожны по сравнению с плотностью энергии воды $\epsilon = \rho \cdot c^2 = 9 \cdot 10^{20}$ г/(см·с²), стали $\epsilon = 7 \cdot 10^{21}$ г/(см·с²). Скалярное поле способно создать отрицательное давление, по абсолютной величине гигантское ($\sim 10^{105}$ г/(см·с²)) и равное его плотности энергии, $p = -\epsilon$.

Почему отрицательная плотность энергии играет такую фундаментальную роль в космологии? Можно выделить два главных момента.

а) В общей теории относительности относительное ускорение двух соседних частиц зависит не от *плотности* вещества между ними, а от суммы

$$\rho + \frac{3p}{c^2} = \frac{1}{c^2} (\epsilon + 3p).$$

Если $p = -\epsilon$, то $\epsilon + 3p = -2\epsilon$, эта величина становится отрицательной. Значит, гравитационная сила расталкивает частицы. В расширяющемся мире расстояние между каждой парой частиц увеличивается все быстрее, по экспоненциальному, инфляционному

*) Пусть менее подготовленный читатель пропустит ниже следующее доказательство и поверит на слово выводам, начинающимся после следующей сноски.

***) Включаем школьников и неспециалистов в чтение.

закону. Напомним, что Вселенная, заполненная галактиками, совокупность которых можно рассматривать как газ с давлением, пренебрежимым по сравнению с плотностью энергии, т. е. с $p = 0$, расширяется в среднем по закону $a \propto t^{2/3}$, $da/dt \propto t^{-1/3}$. Заполненная плазмой с $p = \epsilon/3$ она расширяется по закону $a \propto \sqrt{t}$, так что $da/dt \propto 1/\sqrt{t}$. В обоих случаях, $p = 0$ и $p = +\epsilon/3$, расширение замедленное.

Нужно именно большое отрицательное давление, в данном случае $p = -\epsilon$, чтобы расширение было ускоренным.

б) Вторая причина состоит в энергетических соображениях. Рассмотрим кусок обычного вещества с положительным или нулевым давлением. По мере расширения его плотность уменьшается. Если давление равно нулю, то плотность уменьшается по той простой причине, что данное количество вещества с течением времени занимает все больший объем. Плотность равна массе, деленной на объем, увеличение знаменателя дроби при постоянном числителе уменьшает дробь.

Если давление положительное, то уменьшение плотности происходит еще быстрее.

При расширении вещество совершает работу, равную произведению давления на увеличение объема. Так, при расширении продуктов сгорания в цилиндре двигателя газы охлаждаются. Но мы знаем об эквивалентности массы и энергии. Уменьшение энергии означает и уменьшение массы. Дробь $\rho = M/V$ в данном случае уменьшается как вследствие увеличения знаменателя, так и за счет числителя.

Теперь становится понятной роль отрицательного давления. В ходе расширения приходится растягивать объем, совершать над ним работу, увеличивать энергию того вещества (в данном случае скалярного поля), которым заполнен рассматриваемый объем. Здесь выявляется особая роль того, что давление как раз равно отрицательной плотности энергии, $p = -\epsilon$. Именно при таком соотношении изменение числителя в точности компенсирует изменение знаменателя и плотность энергии длительно остается постоянной. Расширение длительно остается экспоненциальным, инфляционным.

Остается добавить, что до настоящего времени скалярное поле не наблюдалось. Не наблюдались и кванты этого поля — скалярные частицы. Скалярны

частицы, например, пионы, наблюдаемые на опыте, несомненно, составные, состоят из кварков и антикварков. Если создать большую плотность нейтральных пионов, получится «кварковый суп» с положительным давлением.

То скалярное поле, которое нужно космологии, в разных вариантах получается в теории, но существование его (или их — если много полей) не подтверждено опытом, детальные свойства полей не известны.

Итак, второе замечание состоит в том, что инфляционное состояние с положительной плотностью энергии и отрицательным давлением, конечно же, неустойчиво. Это очевидно и с точки зрения механики, это очевидно и с точки зрения термодинамики. При равной плотности энергии вместо упорядоченного скалярного поля можно взять горячую плазму и энтропия гигантски увеличится!

«Слава богу!» — одинаково скажет и верующий, и атеист. Благодаря неустойчивости инфляционного состояния оно с течением времени превращается в горячую плазму, а затем в окружающую нас Вселенную. Температура падает до 3 К, остатком процессов при высокой температуре является вещество — и вот рождается Солнце, Земля, человечество, цивилизация. Детали этого процесса описывать в данной книге было бы неуместно.

Плотность энергии вакуума и космологическая постоянная

Остановимся на последнем из упомянутых выше вопросов, связывающем теорию полей и частиц с астрономией. Это самый трудный и самый коварный вопрос. Само существование этого вопроса остро осознано лишь в последние 10—20 лет. Речь идет о плотности энергии вакуума.

В классической физике вопрос был тривиален: вакуум — это пустота, нет частиц, равны нулю поля — значит, нет и энергии. Однако стоит нам начать последовательно развивать квантовую теорию, как банальные истины летят вверх тормашками.

Начнем с электромагнитного поля. Электрическое и магнитное поля играют роль импульса и координаты, по принципу неопределенности они не могут одновременно обращаться в нуль! Конечно, средние \vec{E} и \vec{B}