

ход от сжатия к расширению в изотропной (Фридмановской) модели.

Положительное ω , когда сингулярность сохраняется (но зависит от φ -поля, а не от материи), рассмотрел Гринштейн (1968), см. также Моргенстерн (1973), а для анизотропных решений — Белинский и Халатников (1972), Рубан и Финкельштейн (1973), Матцнер, Райан и Бтон (1973). Принципиально новый случай отрицательного ω рассмотрели Гуревич, Финкельштейн и Рубан (1973). На первый взгляд отсутствие сингулярности в этом случае реализует давнишнюю мечту теоретиков (и философов). Сингулярность означает необходимость привлечения новых теоретических идей, только несингулярное решение является полным и логически замкнутым. Однако, избавившись от сингулярности, мы сталкиваемся с новыми вопросами: как происходил нуклеосинтез? каким образом получилось равновесное планковское реликтовое излучение? Бесконечная плотность, может быть, и не является необходимой, но плотность порядка 10^6 — 10^8 г/см³ и температура выше 10^{10} °К нужны для понимания наблюдаемой картины Вселенной.

Наконец, наиболее важна принципиальная трудность: избавление от сингулярности возможно лишь в рамках теории с полем, которое может дать отрицательную плотность энергии. Без отрицательной плотности энергии сингулярность неизбежна — в этом состоят теоремы Пенроуза и Хоукинга (см. § 2 гл. 22). Но поле, дающее отрицательную плотность энергии, способно также вызвать «взрыв вакуума». В квантовой теории такого поля в вакууме (плоском, стационарном!) могут рождаться кванты этого поля вместе с обычными частицами. Как было показано Зельдовичем (1974), такое спонтанное рождение частиц противоречит наблюдениям.

Подведем итог обсуждению ТБД. Разнообразие решений оказалось значительно большим, чем предполагали авторы теории. Появились новые, не связанные с идеями Маха, варианты, рассматриваются свободные поля. Появляется значительное число публикаций по ТБД. Несмотря на это, наблюдения и общие соображения, выдвинутые в последние годы, неблагоприятны для ТБД, и представляется вероятным, что в ближайшие годы интерес к ТБД исчезнет.

§ 16. Новые гипотезы в теории поля и космология

В 70-х годах получило дальнейшее развитие и стало популярным особое направление теории квантовых полей и теории элементарных частиц — идея спонтанного нарушения симметрии, или, кратко, «сломанной симметрии».

Вкратце идея сводится к следующему: в природе усматриваются определенные симметрии, которые, однако, оказываются неточными. Такова например CP -инвариантность, т. е. симметрия по отношению к зеркальному отражению, сопровождающемуся заменой частиц

на античастицы *). Таково сходство (симметрия) свойств электронов и мюонов и более скрытое сходство нейтрино с заряженными лептонами — электронами и мюонами.

Естественно в качестве первого приближения построить теорию, в которой та или иная указанная симметрия является точной. Известно, как нужно строить лагранжиан (выражение, варьированием которого получаются уравнения полей и частиц) для того, чтобы получить уравнения с данными свойствами симметрии. Лагранжиан может быть CP -инвариантным или соответствовать теории, в которой равны нулю все массы — электрона, мюона и нейтрино. Но в действительности известно, что симметрия не является точной: нарушается CP -инвариантность в некоторых процессах, масса мюона не равна массе электрона и не равна нулю. Должны ли мы отказываться от идеализированного лагранжиана? Идея нарушенной симметрии заключается в том, что сохраняется симметрия лагранжиана, симметрия идеализированной теории, но подбирается такая функциональная зависимость, при которой несимметричное решение является устойчивым.

Поясним эту мысль примером. Пусть потенциальная энергия является четной функцией координаты, $U = ax^2 + bx^4 + \dots$. Потенциальная кривая симметрична относительно замены $x \rightarrow -x$. Состояние равновесия частицы получается из условия минимума $U(x)$, т. е. $F = -\frac{\partial U}{\partial x} \equiv 0$. Пусть $a > 0$, $b > 0$, остальных членов нет. Кривая потенциальной энергии имеет один минимум, $x = 0$, как и следовало ожидать: симметричная теория [$U(x) = U(-x)$] имеет симметричное равновесное состояние.

Возьмем, однако, случай $a < 0$, $b > 0$.

Потенциальная энергия имеет два минимума: $x_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{|a|}{2b}}$, $U_{1,2} = -\frac{|a|^2}{4b}$. Начало координат $x_3 = 0$, $U_3 = 0$ представляет собой максимум кривой.

Итак, теория по-прежнему симметрична [$U(x) = U(-x)$], но в состоянии равновесия осуществится либо одно $(x_1 = +\sqrt{\frac{|a|}{2b}})$, либо другое $(x_2 = -\sqrt{\frac{|a|}{2b}})$ несимметричное решение.

*) В связи с нарушением C была выдвинута Ландау идея комбинированной инверсии, т. е. CP -инвариантности. Нарушения CP -инвариантности наблюдаются в настоящее время только в распаде нейтральных K -мезонов и весьма малы [Кристенсен и др. (1964)]. В обыденной жизни с хорошей точностью выполняется зеркальная симметрия и без зарядового сопряжения. Однако в явлениях бета-распада и других явлениях слабого взаимодействия нарушение C -зеркальной симметрии достигает 100%: нейтрино только левополяризованные, антинейтрино только правополяризованные.

Один из авторов (З.) живо помнит, как Л. Д. Ландау, исследуя течение вязкой жидкости в расширяющейся трубе (задачу с симметричными уравнениями и граничными условиями), обнаружил неустойчивость симметричного решения и существование устойчивых несимметричных решений в определенном интервале чисел Рейнольдса, какое большое принципиальное значение Ландау придал этой ситуации, как он радовался возможности проследить аналитически за возникновением неожиданного решения.

Н. Н. Боголюбов подчеркивает, что в статистической механике при образовании ферромагнетика или кристалла происходит нарушение изотропии, равноценности всех направлений в ситуации, когда исходные уравнения изотропны.

С точки зрения математической физики в современных теориях, «сломанной симметрии» рассматривается явление такого же типа, но с простейшим объектом — вакуумом.

Вводится скалярное поле φ , и предполагается, что энергия поля, наряду с обычными членами, содержит $U(\varphi)$ как раз такого вида, как описано выше, $U = a\varphi^2 + b\varphi^4 + c$, причем $a < 0$.

Теория такова, что $\varphi = 0$ соответствует полной симметрии — нет нарушения CP -инвариантности, или массы мюонов и электронов равны нулю. Однако в действительности осуществляется состояние

вакуума, при котором U минимально, например $\varphi = \sqrt{\frac{|a|}{2b}}$. В этом

несимметричном состоянии из-за связи φ с другими полями (эту связь мы не выписываем) нарушается и симметрия других полей: нарушается CP -инвариантность, или $m_\mu \neq m_e \neq m_\nu = 0$. Константа c выбрана

таким образом, $c = \frac{|a|^2}{4b}$, что плотность энергии несимметричного

вакуума равна нулю, в соответствии с тем, что, по астрономическим данным, равна нулю (или очень мала) космологическая постоянная. Следовательно, энергия неустойчивого симметричного состоя-

ния положительна, $U(\varphi = 0) = c = \frac{|a|^2}{4b}$.

Конечно, вышеизложенное дает лишь самое общее представление об идее «сломанной симметрии». Киржниц (1973) сделал важное замечание о следствиях этой гипотезы применительно к теории горячей Вселенной.

Вблизи сингулярности при высокой температуре следует ожидать, что поле φ (как и другие поля!) окажется высоковозбужденным и при этом среднее значение φ окажется равным нулю, несмотря на то что плотность энергии не минимальна. При повышении температуры исчезает упорядоченность, подобно тому как плавится кристалл и исчезает ферромагнетизм. Восстанавливаются и другие предсказания симметричной теории (например, $m_e = m_\mu = m_\nu = 0$ и т. п.).

Линде (1974) предлагает считать, что в высокотемпературном симметричном состоянии плотность энергии вакуума, а значит, и космологическая постоянная становятся положительными и большими.

Сущность перестройки поля при высокой температуре представляется физически обоснованной; однако выражение «космологическая постоянная, зависящая от температуры» таит определенные опасности.

Принято определять космологическую постоянную как энергию вакуума или, точнее, как предел плотности энергии при плотности частиц (возбуждений), стремящейся к нулю. Но при заданной высокой температуре плотность частиц, в частности квантов поля, нельзя считать равной нулю, плотность частиц задана температурой, частицы в среднем покоятся лишь в одной системе координат, горячий газ не лоренц-инвариантен.

Плотность энергии при конечной температуре имеет определенное значение, но разбиение этой плотности на две части (материя и «вакуум») содержит произвол.

При обычном определении (v — вакуум, m — материя) $\epsilon = \epsilon_v + \epsilon_m$, $P = P_v + P_m$; принимаем $\epsilon_v = -P_v = \text{const}$ и $dE = -P dV$. При этом закон сохранения энергии справедлив для каждой части в отдельности: $d(\epsilon V) = -P dV$, $d(\epsilon_v V) = \epsilon_v dV = -P_v dV$, $d(\epsilon_m V) = P_m dV$. При определении Линде, т. е. при $\epsilon_v \neq \text{const}$, этих равенств нет, нужно учитывать отдельно взаимодействие вакуума с материей, а поскольку материя не лоренц-инвариантна, то не очевидна и лоренц-инвариантность взаимодействующего с ней вакуума.

При такой сложной ситуации, естественно, возникает вопрос, нужно ли делить ϵ на две части; во все уравнения входит лишь полное ϵ , полное P .

В работе Зельдовича, Кобзарева и Окуня (1974) проводится анализ эволюции горячей космологической модели, в которой уравнения поля допускают симметричное решение при высокой температуре и «сломанную симметрию» при низкой температуре.

В простейшем варианте теории в ходе расширения и охлаждения достигаются условия «сломанной симметрии» и получается мозаичная (доменная) структура. Пространство распадается на множество областей, в одних $\varphi = + \sqrt{\frac{|a|}{2b}}$, в других $\varphi = - \sqrt{\frac{|a|}{2b}}$. Соответственно в этих областях различен знак нарушения CP -инвариантности, в частности различен знак разности вероятности двух каналов распада: $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu_\mu$ и $K_L^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu_\mu$ (однако в этом варианте теории масса мюона везде положительна!). Между (+)- и (-)-областями образуется переходный слой с определенной, и притом большой, поверхностной энергией, поверхностным натяжением, поверхностной плотностью массы. Большая плотность и натяжение стенок позволяют рассматривать всю совокупность как газ с $P = -^2/8^8$

(при хаотическом распределении и медленном движении стенок). Существенно меняется общий закон расширения Вселенной, оказывается, что в этом случае $a \sim t^2$.

Разбиение пространства на мозаику (+)-, (-)-областей должно вызвать заметную неоднородность плотности и всех других величин даже в том случае, если начальное высокотемпературное состояние было строго однородным. Большая плотность стенок (порядка 10^{28} эрг/см² = 10^6 г/см² по грубой оценке) приводит к выводу, что стенки, уцелевшие к настоящему времени, вызвали бы недопустимое искажение изотропии реликтового излучения. Реликтовое излучение еще раз играет роль «большой дубины», ограничивающей полет фантазии.

Означает ли это, что необходимо нацело отказаться от теорий с нарушенной симметрией? Оказывается, что это не так, можно указать варианты, в которых противоречие устранено.

1. В варианте комплексного φ при высокой температуре $|\bar{\varphi}|=0$, при низкой температуре $|\bar{\varphi}|=\text{const}=\varphi_0$, различные области пространства отличаются фазой φ , но не величиной: $\varphi=\varphi_0 e^{i\alpha(x)}$.

Такая теория не объясняет нарушения CP -инвариантности, но годится для объяснения масс мюона и электрона. В этом случае фаза $\alpha(x)$ может меняться плавно и вместо стенок появляются вихревые нити.

2. В варианте с вещественным $\varphi=\pm\varphi_0$ и резкой границей возможно, что зарядовая асимметрия вещества (избыток барионов) вызывает асимметрию (+)- и (-)-областей, например, преимущественно образуются (+)-области, и к настоящему времени все пространство представляет собой одну (+)-область, тяжелых стенок нет.

Изложенная выше гипотеза (так же как и только что указанные варианты) еще очень далека от экспериментального подтверждения методами физики элементарных частиц, ускорителей и т. п. Приводя ее здесь, мы хотим показать, насколько еще неопределенны наши представления о физике процессов вблизи сингулярности, какие большие неожиданности возможны в этой области.

§ 17. Осциллирующая Вселенная?

Представление о статической, неизменной Вселенной, несомненно, не согласуется с действительностью и оставлено. Не соответствует действительности и стационарная Вселенная (см. § 10), в которой хаббловское расширение компенсируется рождением вещества.

Однако поражает длительное существование и популярность этих теорий! Напомним, что Эйнштейн сознательно видоизменял ОТО так, чтобы уравнения оказались совместными со статическим космологическим решением (см. гл. 4).