

К моменту t , соответствующему r_g/c , для массы порядка $10^9 M_\odot$ (порядка массы квазара), т. е. для $t \approx 10^4$ сек, получаем, $\alpha < 10^9$.

В заключение подчеркнем, что в этом параграфе речь шла о гипотетических объектах. На существование таких объектов во Вселенной пока нет никаких серьезных указаний. Детальная теория показывает, что свойства «белых дыр» сложнее, чем ранее предполагалось; квазары и взрывы ядер галактик нуждаются в другом объяснении.

Вернемся к вопросу о локальной топологии. На уровне самых малых масштабов — в масштабе планковской длины $l_{пл} = 10^{-33}$ см — можно ожидать больших флуктуаций метрики и сложной топологии. Выдвигается гипотеза Уилера (1960) о структуре пространства, напоминающей пенопласт, с неисчислимым количеством топологических ручек, связывающих разные близкие области, и т. п. Для таких масштабов что-либо утверждать и что-либо опровергать трудно. Однако мы твердо знаем, что макроскопически усредненная плотность энергии и все компоненты T_{ik} этой структуры равны нулю или ничтожно малы, если $\Lambda \neq 0$. Вводя «идею пенопласта», нужно одновременно вводить такие методы перенормировки, которые обеспечивают этот макроскопический результат. К этому нас обязывает наблюдение, опыт — высший критерий истины.

§ 14. Статистическая физика и тяготение

Статистическая физика систем, в которых тяготение играет существенную роль, имеет нетривиальные, необычные особенности. В прошлом, без должного учета этих особенностей, поверхностное применение термодинамики (т. е., по существу, статистики) в космологии приводило к совершенно неправильным выводам. Так, в частности, возникла пресловутая проблема «тепловой смерти Вселенной» и, как следствие неправильных предпосылок, — флуктуационная теория *) нарушения термодинамики в космологическом масштабе.

Для понимания особенностей задачи рассмотрим основную величину — статистический интеграл $Z = \int e^{-E/kT} dp dx$, взятый по всему фазовому объему системы**). Энергия системы представляет собой сумму кинетической энергии частиц и энергии их взаимодействия, в частности гравитационного взаимодействия.

*) Не смешивать с флуктуационной теорией возникновения неоднородностей (см. раздел III).

***) Через Z , как известно, выражается свободная энергия системы $F = -kT \ln Z$. Легко выразить с помощью Z и все другие величины: энергию $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$ и т. д.

В классической теории интеграл разбивается на произведение двух интегралов — по импульсам и по координатам. Итак, мы должны рассматривать $\int e^{-U(x)/kT} dx$, где $U(x)$ есть потенциальная энергия гравитационного взаимодействия; x есть символическое обозначение всех координат всех частиц, составляющих систему. В ньютоновской теории

$$U(x) = -G \sum \frac{m_i m_k}{r_{ik}}.$$

С таким выражением потенциальной энергии U интеграл расходится. Интеграл расходится при $r \rightarrow \infty$, когда $U \rightarrow 0$ в том случае, если бесконечен объем интегрирования, приходящийся на одну частицу *). Это свойство является общим для тяготения и для всех других потенциалов. Расходимость при больших r существенно при рассмотрении системы конечного числа частиц в бесконечном пространстве, например скопления звезд [см. Зельдович, Новиков (1967)]. Однако это свойство интеграла с гравитационной энергией не отличается от свойств других типов взаимодействия, например электромагнитного или ядерных сил.

Существенно, что статистический интеграл с гравитационным взаимодействием расходится и при малом $r \rightarrow 0$. Экспонента растет при $r \rightarrow 0$ быстрее, чем убывает объем (r^3).

Кулоновское электромагнитное взаимодействие двух разноименных зарядов обладает тем же свойством. Однако квантовые эффекты ограничивают снизу то минимальное расстояние, на которое электрон может приблизиться к ядру. В системе из большого числа заряженных частиц притяжение разноименных зарядов компенсируется отталкиванием одноименных. Поэтому кулоновские силы обуславливают образование атомов, жидкости, кристаллов, но не приводят к более сильным катастрофическим эффектам.

Между тем силы тяготения, ничтожно малые на атомном уровне, возрастают с увеличением числа частиц.

В макроскопических, астрономических масштабах силы тяготения и расходимость статистического интеграла при малых расстояниях, т. е. при больших плотностях, играют решающую роль.

При рассмотрении невзаимодействующих частиц статистическая физика приводит к выводу, что наиболее вероятным является равномерное распределение частиц в пространстве.

На несколько более ученном языке можно сказать, что энтропия максимальна для равномерного однородного распределения вещества, к тому же с постоянной температурой. Учет короткодействующих сил может привести к разделению вещества на отдельные фазы (кристаллические фазы, жидкости, одна газовая фаза) при низкой

*) Само по себе рассмотрение бесконечного объема и бесконечного числа частиц при конечной их плотности не создает трудностей.

температуре, т. е. при малой удельной энтропии. Однако в астрономических условиях эти силы играют малую роль. Не учитывая их, мы возвращаемся к тому, что без тяготения равновесное состояние было бы однородным и изотропным. В этом равновесном состоянии невозможно, по второму началу термодинамики, возникновение макроскопического движения, магнитных полей, какой бы то ни было организованной структуры.

Наблюдаемое в настоящее время состояние характеризуется резкой неоднородностью плотности и температуры (существуют планеты, звезды, галактики), макроскопическими движениями и магнитными полями.

Из противопоставления наблюдаемого и равновесного состояний возникают вопросы:

1) Применительно к будущему — должна ли Вселенная перейти в однородное изотермическое равновесное состояние («тепловая смерть»)?

2) Применительно к прошлому — если когда-то Вселенная была в однородном изотермическом равновесном состоянии, то как возникло сегодняшнее наблюдаемое явно неравновесное состояние? Не следует ли приписать его появление гигантской флуктуации, нарушению термодинамики?

Ошибка в постановке этих вопросов заключается в том, что (молчаливо) в рассмотрении не учитывалась гравитация. С учетом гравитации однородное распределение вовсе не соответствует максимуму энтропии.

Соберем вещество в отдельные сгустки звезды или галактики. При сохранении полной энергии произойдет выделение гравитационной энергии и повышение температуры. Вероятность состояния есть произведение вероятности пространственного распределения частиц на вероятность того, что частицы имеют данные скорости, данную кинетическую энергию. При собирании вещества в сгустки «пространственная» вероятность уменьшается, но зато растет «скоростная» вероятность, так что общее произведение растет. Образование звезд и галактик из равномерно распределенного вещества происходит с ростом энтропии, является естественным процессом, не требует нарушения термодинамики.

Направление эволюции звезд, галактик, всей Вселенной подробно обсуждается во многих разделах книги, и здесь неуместно было бы повторяться.

Во всяком случае, современный читатель должен ясно понимать, что энтропия растет и в то же время эволюция в будущем, с учетом тяготения, отнюдь не ведет к однородному, «серому» изотермическому состоянию *).

*) Вопросы термодинамики Вселенной затрагиваются также в §§ 17, 20 этой главы.