

нирует от одного состояния к другому. Иными словами, для всей Вселенной нельзя ввести статистический ансамбль Гиббса (см. в ст. *Гиббса распределения*), т. к. нельзя пренебречь гравитац. взаимодействием членов такого ансамбля.

Однако во Вселенной можно выделить подсистемы, к-рым применимо термодинамич. и статистич. описание, и вычислить их энтропию. Такими подсистемами являются, напр., все компактные объекты (звёзды, планеты и др.). Но полная энтропия всех наблюдаемых компактных объектов ничтожна по сравнению с энтропией, содержащейся в тепловом реликтовом *микроволновом фоновом излучении* с темп-рой $T=2,73$ К (см. *Космология*). Плотность его энтропии равна $s_{\gamma} = \frac{16\sigma}{3c} T^3 = 1,49 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \times k$,

где σ — *Стефана — Больцмана постоянная*, c — скорость света (в этой ф-ле не учитывается гравитац. взаимодействие фотонов реликт. излучения друг с другом и с остальной материей во Вселенной). Плотность числа фотонов связана с плотностью энтропии ф-лой $n_{\gamma} = s_{\gamma} k^{-1} / 3,602$. Каждый из сортов безмассовых (или имеющих массу покоя $m \ll 1$ МэВ) нейтрино вносит в плотность Э. В. дополнительный вклад $s_{\nu} = \frac{7}{22} s_{\gamma}$, т. к. в стандартном космологич. сценарии темп-ра безмассовых нейтрино $T_{\nu} = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T$ [Альфер

(R. Alpher) и Херман (R. Herman), 1953]. Плотность энтропии можно определить и для *гравитонов*; ожидаемый вклад в Э. В. от реликтовых гравитонов, возникших вблизи *сингулярности космологической*, также не превосходит s_{γ} . Полная энтропия в единице сопутствующего веществу объёма Вселенной [к-рый растёт $\propto R^3(t)$ с расширением Вселенной, $R(t)$ — масштабный фактор *Фридмана — Робертсона — Уокера метрики*], связанная с безмассовыми частицами, мало изменяется, начиная с очень ранних стадий эволюции Вселенной — по крайней мере при $t > 1$ с после космологич. сингулярности. Иначе говоря, расширение Вселенной идёт практически адиабатически.

Как указано выше, осн. причиной, мешающей строго ввести понятие Э. В., является неограниченность по пространству и нестационарность крупномасштабного гравитац. поля Вселенной. Однако эта часть гравитац. поля весьма упорядочена — Вселенная почти однородна и изотропна в достаточно больших масштабах. Поэтому естественно предположить, что с крупномасштабным гравитац. полем не связано никакой существ. энтропии, как бы мы её ни определяли. Тогда полная плотность энтропии безмассовых частиц во Вселенной $s (\sim s_{\gamma})$ будет близка к плотности Э. В. Соответствующая оценка полной энтропии той части Вселенной, к-рая доступна наблюдению в настоящий момент, есть $S = \frac{4\pi}{3} L_h^3 s \sim 10^{90} k$, где

$$L_h = 12\,000 \left(\frac{H_0}{50}\right)^{-1} \text{ Мпк} \text{ — совр. космологич. горизонт,}$$

H_0 — *Хаббла постоянная* в км/(с · Мпк) [здесь подразумевается, что $R(t) \propto t^{2/3}$, ср. плотность вещества во Вселенной равна критич. плотности $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$, а пространственная кривизна равна нулю]. Сравнение этой величины с энтропией чёрной дыры, обладающей такой же массой $M = \frac{4\pi}{3} L_h^3 \rho_c = 10^{57} \left(\frac{H_0}{50}\right)^{-1} \text{ г}$, к-рая равна

$S_{\text{ч.д.}} = \pi r_g^2 / l_{\text{Pl}}^2 \sim 10^{124} k$ [$r_g = 2GM/c^2$ — гравитац. радиус возвращающейся чёрной дыры, $l_{\text{Pl}} = (G\hbar c^{-3})^{1/2} \approx 10^{-33}$ см — планковская длина; см. *Квантовая теория гравитации, Чёрные дыры*], показывает, насколько окружающая нас часть Вселенной далека от максимально неупорядоченного состояния. Вероятно, хотя и не доказано, что именно эта неравновесность наблюдаемой Вселенной является причиной справедливости 2-го начала термодинамики для всех замкнутых подсистем в ней.

Э. В. характеризуют также с помощью безразмерной уд. энтропии — энтропии, приходящейся на 1 бариион; в част-

ности, $S_{\gamma, \text{уд}} = \frac{s_{\gamma}}{kn_b} = 0,88 \cdot 10^{10} \left(\frac{H_0}{50}\right)^{-2} \left(\frac{\Omega_b}{0,06}\right)^{-1}$, где n_b — ср.

плотность числа барионов во Вселенной, Ω_b — ср. плотность барионного вещества во Вселенной в долях критич.

плотности ρ_c . Величина $\Omega_b = 0,06 \left(\frac{H_0}{50}\right)^{-2}$, согласно теории

космологического нуклеосинтеза, наиб. хорошо соответствует совр. распространённости лёгких хим. элементов H, D, He³, He⁴, Li⁷. Тот факт, что полная удельная Э. В. $S_{\gamma, \text{уд}} \gg 1$, свидетельствует о том, что в прошлом Вселенная была горячей, радиационно-доминированной. Плотность барионов $n_b \sim R^{-3}(t)$ вследствие сохранения барионного заряда (разности между числом барионов и антибарионов). Однако в настоящее время общеприняты гипотезы, что при очень больших энергиях и плотностях материи барионный заряд не сохраняется и что Вселенная содержала равные кол-ва вещества и антивещества на достаточно ранней стадии своей эволюции, вблизи космологич. сингулярности. Тогда избыток вещества над антивеществом может естественно возникнуть в ходе термодинамически неравновесного расширения Вселенной из-за нарушения *СР-инвариантности* (см. *Барионная асимметрия Вселенной*). Если эти гипотезы верны, то полная удельная Э. В. зависит не столько от числителя (s), сколько от знаменателя (n_b), и приближённо выражается через микрофиз. константы взаимодействий, ответственных за генерацию барионной асимметрии.

Существует предположение, что Э. В. как целого можно оценить, используя понятие энтропии Колмогорова — Сина (К-энтропии; см. *Энтропия, Эргодическая теория*). К-энтропия явл. мерой хаотичности и неустойчивости. Она связана со ср. скоростью разбегания близких в нач. момент траекторий. Причём К-энтропия тем больше, чем быстрее разбегаются траектории, т. е. чем сильнее неустойчивость траекторий и хаотичнее система. Однородное распределение вещества гравитационно неустойчиво; развитие неустойчивости приводит к образованию отд. сгустков. При гравитац. сжатии сгустка гравитац. энергия вещества переходит в тепловую энергию движения частиц. Поэтому образование звёзд и галактик из равномерно распределённого вещества сопровождается ростом К-энтропии. Т. о., в рамках этого предположения для Вселенной справедлив закон роста энтропии, хотя она и не является термодинамич. системой и в ходе эволюции становится структурно более сложной.

Энтропия Вселенной и стрела времени во Вселенной. Вопрос об Э. В. тесно связан с проблемой объяснения стрелы времени во Вселенной: необратимой временной эволюции от прошлого к будущему, направленной в одну сторону для всех наблюдаемых подсистем Вселенной. Известно, что законы механики, электродинамики, квантовой механики обратимы во времени. Ур-ния, описывающие эти законы, не изменяются при замене t на $-t$. В квантовой теории поля имеет место более общая *СРТ-инвариантность* (см. *Теорема СРТ*). Это означает, что любой физ. процесс с элементарными частицами может быть осуществлён как в прямом, так и в обратном направлении времени (с заменой частиц на античастицы и с пространственной инверсией). Поэтому с его помощью нельзя определить стрелу времени. Пока известен единств. физ. закон — 2-е начало термодинамики — к-рый содержит утверждение о необратимой направленности процессов во времени. Он задаёт т. н. термодинамич. стрелу времени: энтропия растёт в будущее. Др. стрелы времени связаны с выбором специальных начальных или граничных условий для ур-ний, описывающих фундам. физ. взаимодействия. Напр., электродинамич. стрела времени определ. выбором излучающего граничного условия на пространственной бесконечности для уединённого источника (иначе говоря, считаются имеющими физ. смысл только запаздывающие потенциалы эл.-магн. поля), а космологич. стрела времени задана расширением Вселенной. Не все эти стрелы времени эквивалентны: если термодинамич. и электродинамич.