

СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ И БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ЧИСЛА

F.1. Физические константы

Важнейшими безразмерными соотношениями в современной физике являются *константы связи* различных взаимодействий, которые определяют степень «силы» взаимодействия. К ним относится, например, константа электромагнитного взаимодействия $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$. Аналогично, безразмерная константа гравитационного взаимодействия может быть определена как $\alpha_G = Gm_p^2/\hbar c \approx 10^{-38}$. Малость последней отражает тот факт, что гравитационное взаимодействие — самое слабое из известных в природе. Гравитационные эффекты сильны для объектов большой массы (планеты, звезды, галактики) и определяют строение и эволюцию Вселенной в целом.

Планковские единицы

Планковскими называют единицы измерений длины, массы, времени, заряда и их производных, составленные из мировых постоянных G (ньютоновская постоянная тяготения, «отвечающая» за гравитацию), \hbar (постоянная Планка, «отвечает» за квантовые явления) и c скорость света. Последняя «отвечает» за электромагнетизм (вместе с постоянной тонкой структуры, или электрическим зарядом) и за релятивизм (специальная, а вместе с G — общая теория относительности).

Планковская длина: $l_{Pl} = \sqrt{G\hbar/c^3} \simeq 10^{-33}$ см (например, характерный размер «начального» масштабного фактора Вселенной,

меньше которого понятие расстояния или размера теряют физический смысл).

Планковская масса: $m_{Pl} = \sqrt{c\hbar/G} \simeq 10^{-5} \text{ г} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$ (например, максимально возможная масса элементарной частицы)

Планковское время: $t_{Pl} = \sqrt{G\hbar/c^5} \simeq 10^{-44} \text{ с}$ (например, начальный «возраст» классической Вселенной, менее которого понятие времени теряет физический смысл).

Из соображений размерности нетрудно получить другие «планковские единицы». Например, «планковский заряд» $e = \sqrt{\alpha\hbar c}$, «планковская энергия» $E_{Pl} = m_{Pl}c^2 \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$, «планковская светимость» $E_{Pl}/t_{Pl} = c^5/G \simeq 10^{59} \text{ эрг/с}$, «планковская плотность» $m_{Pl}/l_{Pl}^3 \approx 10^{93} \text{ г/см}^3$ и т. д. Эти величины часто используются при рассмотрении физических процессов в экстремальных условиях (например, на самых ранних этапах расширения Вселенной). На расстояниях или временах меньше планковских современная физика «не работает»¹, и требуется использование пока неизвестных законов еще не созданной теории квантовой гравитации.

Г.2. Безразмерные числа

В астрофизике существует несколько безразмерных чисел, которые были получены нами в основном курсе. К важнейшим из них относятся:

- 1) Число барионов в типичной звезде $N_* = (m_{Pl}/m_p)^3 \sim 10^{57}$;
- 2) Число барионов внутри причинно-связанной области современной Вселенной (т. е. внутри современного хаббловского радиуса c/H_0) $M_U/m_p \sim \rho/m_p(c/H_0)^3$. С учетом соотношения для средней плотности материи во Вселенной $\rho \sim H_0^2/G$ находим

$$M_U/m_p = \left(\frac{m_{Pl}}{m_p}\right) \left(\frac{m_{Pl}c^2}{\hbar H_0}\right) \sim 10^{80}.$$

В этом выражении в знаменателе стоит постоянная Планка, но это не значит, что квантовые свойства Вселенной важны на макроскопических масштабах — действительно, $m_{Pl}^2 = (\hbar c)/G$, и на самом деле постоянная Планка сокращается, а в знаменателе оказывается постоянная тяготения Ньютона. Однако запись полной мас-

¹Напомним, что современная физика элементарных частиц проверена на ускорителях до энергий порядка ТэВ; такая энергия соответствует масштабу порядка 10^{-17} см .

сы Вселенной в таком виде часто удобна при рассмотрении ранних стадий ее эволюции. Это «невинное» на первый взгляд преобразование имеет глубокий физический смысл, так как приводит к одному из парадоксов классической (фридмановской) космологии: $M_U/m_{Pl} \sim 1$ на планковских временах, т. е. когда $H \sim 1/t_{Pl}$, и никакие степенные зависимости (от времени) изменения хаббловского радиуса, использующиеся в классической космологии, не способны привести даже приблизительно к наблюдаемому значению параметра H_0 . Подобные парадоксы фридмановских космологических моделей успешно решаются в современных моделях ранней Вселенной, основанных на гипотезе экспоненциального расширения Вселенной на очень ранних стадиях. Масса барионного вещества внутри современного хаббловского радиуса $M_U \approx 10^{23} M_\odot$, при этом большая часть барионов находится не в звездах, а в разреженном межгалактическом газе.

3) Отношение плотности числа фотонов реликтового излучения к плотности числа барионов $n_\gamma/n_b \approx 10^9$. Это число играет фундаментальную роль в теории горячей Вселенной, а огромный избыток числа реликтовых фотонов над числом барионов интерпретируется как свидетельство барионной асимметрии Вселенной (отсутствие равного числа частиц и античастиц). Этот параметр не меняется в ходе расширения Вселенной.

Приведенные выше простые оценки и соотношения по порядку величины показывают глубокую физическую связь микро- и макромира. Мир не устроен случайным образом, но из бесконечного числа потенциальных возможностей реализуется именно та, которая согласуется с фундаментальными физическими взаимодействиями.