

12.11. Реликтовое излучение и эпоха рекомбинации

Итак, на радиационно-доминированной стадии в условиях полного термодинамического равновесия спектр излучения был спектром АЧТ с температурой, падающей обратно пропорционально масштабному фактору: $T \sim 1/a(t)$. Как только время взаимодействия фотонов с веществом (в основном, за счет томсоновского рассеяния на электронах) $\tau = 1/(n_e \sigma_T c) \sim (1+z)^{-3}$ стало больше характерного времени расширения a/\dot{a} (то есть длина свободного пробега фотона начала превышать размер причинно-связанной области $ct \sim (1+z)^{-3/2}$), фотоны перестали обмениваться энергией с плазмой, однако спектр излучения при однородном расширении остался чернотельным с температурой $T(z) = T_0(1+z)$, $T_0 \simeq 2.73$ К – современное значение температуры реликтового излучения. Вселенная стала прозрачной для излучения при понижении температуры плазмы до $T_r \approx 3000$ К. При такой температуре происходит рекомбинация свободных электронов с протонами с образованием атомов водорода (гелий рекомбинирует несколько раньше). Эпоха рекомбинации таким образом наступает при $1+z_r \simeq 3000/3 \sim 1000$, т. е. формально на стадии доминантности вещества, когда роль излучения в динамике расширения уже пренебрежимо мала. Время расширения до эпохи рекомбинации составляет $t_r \simeq 3 \cdot 10^5$ лет.

Зависимость роста температуры реликтового излучения от красного смещения была экспериментально подтверждена наблюдениями линий сверхтонкой структуры нейтрального углерода в спектрах далеких квазаров с $z \approx 1.8$, для которых кванты реликтового фона с температурой $T_0(1+z) \sim 7.5\text{--}8$ К играют роль накачки, обеспечивая заселенность соответствующих уровней.

12.12. Эффект Сюняева–Зельдовича

После эпохи рекомбинации ($z \sim 1000$) реликтовые фотоны распространяются сначала свободно через нейтральную среду, с которой они не взаимодействуют. После образования первых звезд и галактик (предположительно, начиная с $z \sim 10\text{--}15$) в среде вновь появляются свободные электроны из-за ионизации атомов водорода жестким излучением, и, как мы обсуждали выше в разделе 12.3, межгалактическая среда становится вновь почти полностью ионизованной на красных смещениях $z < 6$. Наиболее важный процесс взаимодействия фотонов с электронами — комптоновское рассеяние. При