

Глава 2

КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

2.1. Введение

Обсуждая наблюдательный статус современной космологии, мы в предыдущей главе подчёркивали тот факт, что спектр реликтового излучения с высокой точностью соответствует равновесному планковскому распределению квантов с температурой $T_0 = 2,735$ К [Fixsen et al., 1996]. Возможные отклонения от равновесной функции распределения квантов должны быть чрезвычайно малы ($\leq 10^{-4}$), однако и они могут нести в себе информацию о процессах энерговыделения как в ранней Вселенной, так и на этапах, близких к современной фазе космологического расширения. Напомним, что чёрнотельный спектр реликтового излучения свидетельствует о существовании в прошлом локального термодинамического равновесия между плазмой и фотонами, по крайней мере при температурах, больших, чем 10^{10} К [Zeldovich, Novikov, 1983; Kolb, Turner, 1990]. Косвенным подтверждением этого факта является предсказание теории космологического нуклеосинтеза. Однако этот тест является чувствительным лишь к существенным отклонениям спектра от планковской кривой $\left(\frac{\delta f(\nu)}{f(\nu)} \sim 0,1 \div 1 \right)$, тогда как современный эксперимент предсказывает уровень отклонений почти на три порядка меньший указанного предела.

Фактором, оказывающим решающее влияние на спектральные характеристики реликтового излучения, является взаимодействие квантов с электрон-позитронной плазмой (при температурах плазмы, превышающих порог рождения электронов и позитронов $T_{cr} \gg \frac{2m_e c^2}{k}$ и с фоном остаточных электронов (при сравнительно низких температурах $T < \frac{m_e c^2}{K}$).

В диапазоне $T_{cr} \leq \frac{m_e c^2}{K} \simeq 5 \cdot 10^9$ К возможные нарушения равновесного распределения квантов по энергии демпфируются благодаря комптоновскому рассеянию ($\gamma + e \leftrightarrow \gamma + e$) и двойному комптоновскому рассеянию ($\gamma + e \rightarrow \gamma + e + \gamma$). Кроме того, важную роль играют процессы рассеяния электронов на ядрах ($e + A \leftrightarrow e + A + \gamma$), способствующие сохранению равновесного характера спектра реликтового излучения [Zeldovich, Sunyaev, 1969; 1970a; Zeldovich, Novikov, 1983; Rephaeli, 1995]. Естественно, что эта схема “замораживания” планковской функции распределения квантов по частоте справедлива лишь в том случае, когда тепловой баланс между электронами, позитронами и излучением имеет термодинамический равновесный характер, при котором в плазме при больших красных смещениях отсутствуют сколько-нибудь эффективные источники “подкачки” энергии. В роли данных гипотетических источников при больших $z \sim 10^6 \div 10^7$ могут выступать распады долгоживущих массивных частиц (период полураспада $> 10^2$ с), диссипация адиабатических возмущений плотности и скорости плазмы, испарение первичных чёрных дыр с массами $10^9 < M < 10^{13}$ и др.

При сравнительно малых красных смещениях $z \ll 10^3$ источниками спектральных искажений реликтового излучения могут являться молодые галактики и квазары, догалактические массивные чёрные дыры и т.п. Наконец, при $z \leq 5 \div 10$ и до настоящего времени искажения спектра реликтового излучения в направлении на скопления галактик формируются в результате его взаимодействия с горячим газом при релятивистских температурах $\sim 10^{7 \div 8}$ К. Эти искажения наблюдаются экспериментально и составляют основу одного из новых методов определения постоянной Хаббла (см. ссылки в [Fukugita, Hogan, Peebles, 1998]). Таким образом, настоящая глава посвящена анализу комптоновских искажений спектра реликтового излучения на различных этапах космологической эволюции и сравнению теоретически ожидаемых вариаций функции распределения квантов по частоте с наблюдательными данными.

2.2. Уравнение переноса излучения в расширяющейся Вселенной

В рамках кинетического описания спектральных свойств реликтового излучения в расширяющейся Вселенной мы будем использовать уравнение переноса квантов в наиболее общей