

го вещества становится более однородным. На рисунке отчетливо видна крупномасштабная структура Вселенной: галактики образуют своего рода ячеистую структуру с характерным размером порядка 100 Мпк. Внутри ячеек наблюдается дефицит галактик (т. н. пустоты, или «войды»).

12.3. Предельно далекие галактики и квазары. Ионизационное состояние межгалактической среды и эффект Гана-Петерсона

Отдельные галактики и квазары с мощными эмиссионными линиями наблюдаются вплоть до очень больших красных смещений $z \approx 5-6$. Поиск далеких объектов обычно осуществляется по мощной эмиссии Ly_α (т. н. Лайман-альфа излучатели, Ly_α -emitters или LAEs). Можно также искать резкое падение интенсивности (скачок) в непрерывном спектре объектов с большим красным смещением на длинах волн короче лаймановского предела (912 \AA), характерный для галактик с мощным звездообразованием, в которых есть много газа в виде нейтрального водорода (т. н. Lyman-Break Galaxies, или LBGs). Из-за большого красного смещения этот скачок сдвигается из УФ в видимую область спектра.

Облака нейтрального водорода, попадающие на луч зрения между галактикой и наблюдателем, приводят к появлению многочисленных линий поглощения между длинами волн Ly_α (1216 \AA) и лаймановским пределом Ly_c (912 \AA) в виде частотола отдельных узких линий на разных красных смещениях (т. н. « Ly_α -лес»). Излучение, изначально более коротковолновое, чем Ly_α , на пути к нам из-за расширения Вселенной увеличивает длину волны. Поэтому оно будет эффективно поглощаться на том расстоянии (красном смещении) от нас, где оно по длине волны сравняется с Ly_α .¹ Сечение поглощения в резонансной линии водорода Ly_α очень большое, порядка $3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, и расчет показывает, что малой доли нейтрального водорода ($x_{HI} \approx 10^{-3}$) в межгалактическом газе уже достаточно для создания большой депрессии в непрерывном спектре. В отличие от

¹Разумеется, атом водорода, возбужденный на второй уровень при поглощении Ly_α -кванта быстро переизлучит его, но в произвольном направлении, так что можно говорить о резонансном рассеянии квантов. Кроме того, происходит двухфотонное излучение с возбужденного резонансного уровня, в результате которого формируется непрерывный спектр в более длинноволновой области.

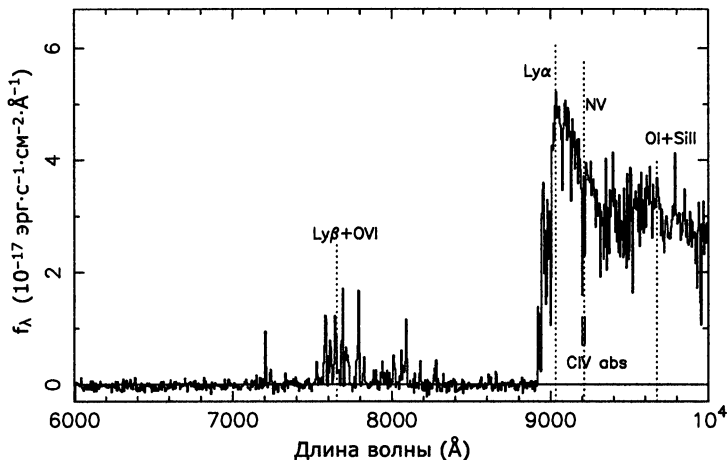


Рис. 12.4. Спектр далекого квазара с красным смещением 6.43, полученный на 10-метровом телескопе им. Кека из работы Fan et al. AJ 125, 1649 (2003). Отчетливо виден эффект Ганна–Петерсона (подавление континуума на длинах волн короче Ly_{α}), свидетельствующий о наличии нейтрального водорода в межгалактической среде вокруг квазара.

поглощения отдельными холодными облаками водорода, поглощение света атомами нейтрального водорода в диффузной межгалактической среде должно привести к поглощению не в одной линии, а в достаточно широком интервале на длинах волн короче 1216 \AA в системе отсчета, связанной с источником. Коротковолновая граница этой депрессии в спектре и величина оптической толщи зависят от красного смещения, ближе которого межгалактическая диффузная среда полностью ионизована.

Описанное явление носит название *эффекта Ганна–Петерсона* (*Gunn, Peterson*), который был теоретически рассмотрен в 1965 г. и обнаружен спустя почти 40 лет только после отождествления очень далеких галактик и квазаров. Эффект Ганна–Петерсона наблюдается в спектрах квазаров с красным смещением $z > 6$ (см. рис. 12.4) и отсутствует у объектов с $z \leq 6$ (см. рис. 12.5). Отсюда был сделан вывод, что эпоха ионизации межгалактической среды УФ излучением первых звезд и активных ядер галактик начинается на красных смещениях $z \approx 6$, а более близкие объекты окружены ионизованной межгалактической средой. Нейтральный водород при $z < 6$ встречается в виде отдельных облаков, по-видимому связанных с отдельными галактиками или группами галактик. При попадании та-

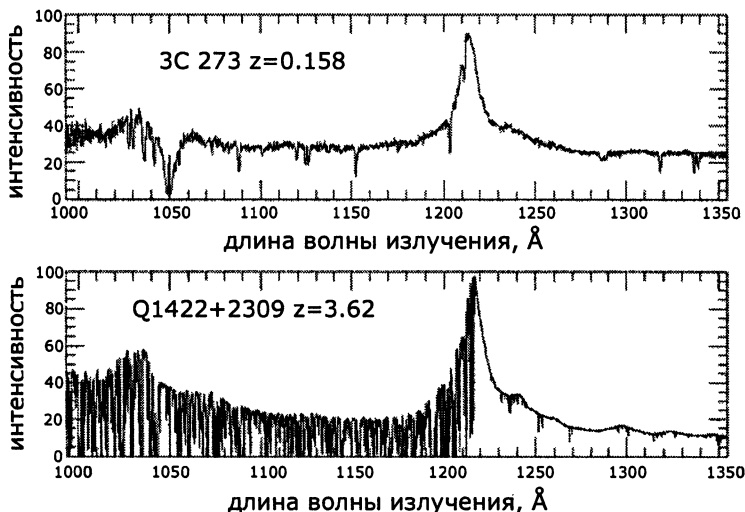


Рис. 12.5. Сравнение спектров близкого квазара 3C273 ($z = 0.158$) и далекого квазара Q1422+2309 ($z = 3.62$). По горизонтальной оси — длина волны в системе отсчета источника, по вертикальной — интенсивность излучения в условных единицах. Выделяется мощная широкая эмиссия Ly_{α} (1216\AA). В спектре более далекого квазара виден Лайман-альфа лес линий поглощения. Эффект Гана–Петерсона в обоих случаях отсутствует.

ких облаков на луч зрения и формируется Лайман-альфа лес линий поглощения, наблюдаемый в спектрах объектов с $z > 2$ (см. нижний спектр на рис. 12.5).

В настоящее время широко обсуждается возможность существования еще более ранней эпохи ионизации на красных смещениях $z \gtrsim 10$, соответствующих эпохе до образования галактик. Не исключено, что на таких красных смещениях из первичного водорода и гелия уже могли образоваться первые массивные звезды (т. н. звезды III населения).

12.4. Космологические модели

12.4.1. Космологический принцип

Подобно принципу постоянства скорости света (СТО) и принципу эквивалентности, который составляет основу ОТО, в основе современных космологических моделей лежит *космологический прин-*