

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ЛИНИИ ВОДОРОДА КОСМОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В. К. ДУБРОВИЧ

Рассмотрена возможность образования рекомбинационных линий водорода при переходах между высоковозбужденными уровнями (с номерами $i = 10 \div 15$) на стадии рекомбинации космологической плазмы. Оценены их интенсивности и ширины.

HYDROGEN RECOMBINATION LINES OF COSMOLOGICAL ORIGIN, by V. K. Dubrovich. A possibility of formation of hydrogen recombination lines in transitions between high excitation levels (with numbers $i = 10 \div 15$) at the stage of recombination of cosmological plasma is considered. Their intensities and widths are estimated.

Возможность образования космологических рекомбинационных линий при переходах между высоковозбужденными уровнями связана с относительно высокой скоростью рекомбинации ($\Delta t \approx 0.1 t_{\text{косм}}$), малой оптической толщиной по поглощению в линиях, а также с большой относительной вероятностью захвата электрона на высокие уровни (при температуре $T \approx 4000$ К). Из-за большого красного смещения z , соответствующего моменту рекомбинации ($z_{\text{рек}} \approx 1500$), эти линии сейчас попадают в сантиметровый и дециметровый диапазоны радиоволн. Их интенсивность, положение по частоте, контур определяются плотностью вещества и темпом рекомбинации. Обнаружение их доказало бы наличие в прошлом стадии рекомбинации и позволило бы определить ряд фундаментальных параметров Вселенной.

Для определения интенсивности необходимо знать скорость рекомбинации и относительную вероятность w_{ii} захвата электрона на уровень i всеми возможными путями и перехода его на уровень i' с испусканием кванта длины волны $\lambda_{ii'}$. Это есть вероятность образования данного кванта на один акт рекомбинации. Точное вычисление $w_{ii'}$ при наличии мощного внешнего излучения (планковское излучение с температурой $T \approx 4000$ К) требует учета индуцированных процессов излучения и захвата квантов рекомбинирующим электроном, которые увеличивают вероятность рекомбинации на высокие уровни и вероятность попадать на ближайший уровень при каскадных переходах. С другой стороны, частый захват квантов приводит к своеобразной «диффузии» электрона по уровням и к увели-

чению доли переходов сразу через несколько уровней. Если пренебречь индуцированной рекомбинацией и «диффузией», то для $w_{i i-1}$ (при $i \approx 10 \div 15$) можно получить

$$w_{i i-1} \approx 0.15. \quad (1)$$

Для относительной величины искажения температуры $\delta T/T$ на фоне реликтового излучения имеем

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{w_{i i-1} c^3}{8\pi v^2 N_0 \Delta v} \cdot \frac{dn_0}{dz} \Delta z, \quad (2)$$

где n_0 — концентрация нейтральных атомов, $N_0 = [\exp(hv/kT) - 1]^{-1}$. Выделяющиеся в период Δz кванты распределяются в полосе частот $\Delta v/v = \Delta z/z$.

Для численной оценки имеем ($i' = i - 1$)

$$\frac{\delta T}{T} \approx 10^{-4} \Omega \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2, \quad (3)$$

где $\Omega = \rho/\rho_{cr}$, H , λ — современные значения постоянной Хаббла и длины рассматриваемой линии, $\lambda_0 \approx 20$ см, $H_0 = 50$ км/сек·Мпс. Учет «диффузии» может уменьшить этот результат, но по оценкам не более чем в 10—20 раз. Контур линии определяется точным законом изменения степени ионизации (или n_0) как функции z (Зельдович и др., 1968; Пиблс, 1968). В частности, ширина линии (на уровне половины интенсивности) порядка 7—8% от центральной частоты.

Важным является вопрос «о выживании» линий. Оказывается, что ни тормозные, ни комптоновские процессы существенной роли не играют. Уширение при электронном рассеянии также мало. Оптическая толща $\tau_{i i+1}$ по поглощению в линии $i \rightarrow i + 1$ (с учетом возможного выхода кванта из доплеровского контура из-за красного смещения) равна

$$\tau_{i i+1} \approx 8.3 \cdot 10^{-4} \lambda^2 (n_e/n)^2 (t/t_0) \exp(\chi_i/kT), \quad (4)$$

где λ — современное значение длины волны в см, n_e — концентрация электронов, $n = 10^4$ см⁻³, t — космологическое время, соответствующее моменту рекомбинации, $t_0 = 10^{13}$ сек, χ_i — потенциал ионизации с i -го уровня. Следовательно, почти без искажений будут все линии с $\lambda \leq 30$ см.

Аналогичное рассмотрение можно провести и для гелия. Обнаружение гелиевых линий позволит определить химический состав вещества на момент рекомбинации.

Автор выражает признательность Л. Э. Гуревичу, Ю. Н. Парийскому, Р. А. Сюняеву, В. Ф. Шварцману за полезную дискуссию.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

Поступила в редакцию
20 июня 1975 г.

ЛИТЕРАТУРА

Зельдович Я. Б., Курт В. Г. и Сюняев Р. А., 1968. ЖЭТФ, 55, 287.
Пиблс (Peebles P. J. E.), 1968. Astrophys. J., 153, 1.