

К ВОПРОСУ О ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ СОДЕРЖАНИИ ГЕЛИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РРЛ В ОРИОНЕ А

© 2023 г. А. П. Цивилев¹, *, В. В. Краснов¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

*E-mail: tsivilev@prao.ru

Поступила в редакцию 05.05.2022 г.

После доработки 12.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Рекомбинационные радиолнии являются мощным инструментом для изучения межзвездной среды. Одной из важных задач является измерение первичного содержания гелия, образовавшегося во время первичного нуклеосинтеза Вселенной, что, в свою очередь, позволяет проверить выводы Стандартной космологической модели. Туманность Орион А является интересным объектом для изучения этой проблемы. Ранее нами было установлено, что в этой области НII зона ионизации гелия меньше зоны ионизации водорода. Следовательно, фактическое содержание гелия, $n(\text{He})/n(\text{H})$, не меньше максимального измеренного значения $y^+ = n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$. Это позволяет получить ограничения на первичное содержание гелия. В этой статье представлены новые наблюдения рекомбинационных радиолний в Орионе А на длине волны 13 мм. Установлено, что максимальное значение y^+ находится в диапазоне 10.03–11.55%. Следовательно, можно ожидать, что первичное содержание гелия (Y_p , отношение He/H по массе) может составлять не менее интервала значений $\approx 24.93\text{--}29.40\%$, что допускает отклонения от выводов Стандартной модели, например, допускает присутствие неизвестных легких частиц во время первичного нуклеосинтеза. Также были проведены наблюдения дважды ионизированного гелия в Орионе А и планетарной туманности NGC 7027. Получено, что вклад дважды ионизированного гелия, $y^{++} = n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+)$, составляет $< 7 \times 10^{-4}$ в Орионе А и $2.7(\pm 1.3)\%$ для NGC 7027. Также сделаны оценки электронной температуры. В частности, для NGC7027 получено $T_e \approx 11\,900\text{--}12\,300$ К, что выше, чем для областей НII.

Ключевые слова: космология – межзвездная среда, НII области – рекомбинационные радиолнии, Орион А и NGC7027

DOI: 10.31857/S000462992302007X, EDN: CKQUZP

1. ВВЕДЕНИЕ

Рекомбинационные радиолнии (РРЛ) водорода (H), гелия (He^4) и углерода (C) являются мощными инструментами для изучения межзвездного вещества (Сороченко и Гордон [1]). РРЛ позволяют оценивать физические параметры областей ионизированного водорода (НII областей), формирующихся вокруг молодых и горячих звезд, физические параметры фотодиссоциационных областей (ФДО), являющихся промежуточным слоем между НII областью и родительским молекулярным облаком (например, Сороченко и Цивилев [2]), а также эффективную температуру звезд, ионизирующих НII области (например, Цивилев [3], Поляков и Цивилев [4]). Существует также важная космологическая задача для РРЛ – измерение первичного содержания гелия. Как показали в свое время Хойл и Тейлор (1964 [5]), около 90% наблюдаемого количества

гелия образовалось на догалактической фазе эволюции Вселенной и, скорее всего, на стадии первичного нуклеосинтеза (BBN). (Например, они показали, что $\approx 10\%$ наблюдаемого количества гелия было достаточно для поддержания светимости нашей Галактики на протяжении всей ее жизни.)

В ходе первичного нуклеосинтеза (первые 2–3 мин после Большого Взрыва) в дополнение к He^4 (далее просто He) образуется несколько других легких ядер: дейтерий (D), гелий-3 (He^3), тритий (T) и литий (Li^7). Однако, если выход этих элементов зависит только от плотности барионов Вселенной, выход гелия в большей степени зависит от условий, когда соотношение нейтронов и протонов было закалено (Клапдор-Клайнгротхаус, Цюбер [6]) (в англоязычной литературе freeze out). Одним из таких условий является количество легких релятивистских частиц во время закаливания ($\approx 10\text{--}20$ с после Большого Взрыва). Таким

образом, если перечисленные выше элементы являются показателями барионной плотности Вселенной, то первичное содержание гелия также является показателем наличия или отсутствия неизвестных легких частиц. Вклад известных легких частиц в рамках Стандартной космологической модели (СКМ) рассчитывается с большой точностью [6]. Имеющиеся данные о флуктуациях микроволнового фона позволяют с достаточной точностью оценить первичное содержание гелия (Y_p) в рамках СКМ. Например, Кок и Ваньони [7] получили отношение He/H по массе, $Y_p = 24.84 (\pm 0.02)\%$.

На данный момент СКМ предполагает наличие трех видов нейтрино. Однако, например, Янг и др. [8] показали, что присутствие дополнительного, четвертого нейтрино, приведет к $Y_p \geq 25.3\%$. Разница в значениях Y_p довольно заметна и может быть измерена. Таким образом, наличие неизвестных дополнительных легких релятивистских частиц может указывать на отклонение от СКМ, что проявится в измеренном превышении значения Y_p от ее предсказаний. Одним из наиболее надежных способов измерения Y_p является наблюдение рекомбинационных линий H и He, большинство которых были проведены в оптике и радиодиапазоне. Некоторые исследования (например, Изотов и др. [9]; Цивилев [10]; Цивилев и др. [11]) допускали возможность превышения стандартного значения Y_p . В последнее время (2020–2021 г., [12–15]) авторы на основе оптических и инфракрасных данных считают, что имеется хорошее согласие с выводами СКМ.

Тем не менее следует отметить, что физиками ведутся разговоры о возможном присутствии четвертого типа нейтрино (например, Серебров и др. [16]). Поэтому мы считаем, что и астрономам нужно ставить задачи на поиск следов отклонения от СКМ, в частности проводить поиск и оценку нижнего предела Y_p .

Радиоизмерений не так много, как оптических данных, однако они обладают рядом полезных свойств. Определение содержания гелия с помощью РРЛ не требует модельных расчетов коэффициентов заселения квантовых уровней атомов, поскольку гелий при высоких уровнях возбуждения (главное квантовое число $n \approx 50$ или более) является водородоподобной системой. Следовательно, коэффициенты заселения одинаковых уровней гелия и водорода одинаковы и сокращаются при расчете отношения He/H. В этом смысле радиоизмерения не зависят от модели, т.е. практически (за исключением учета поправки за ионизационную структуру) не зависят от конкретных физических параметров областей НII.

В рамках такой постановки задачи (поиск и оценка нижнего предела на Y_p) интересным ис-

точником оказывается область НII Орион А. В течение ряда лет мы интенсивно изучали эту хорошо известную туманность с помощью РРЛ H, He и C на длинах волн 8 и 13 мм и обнаружили, что зона ионизации He⁺ меньше, чем H⁺. В этих условиях максимальное полученное значение $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ будет являться нижним пределом на реальное содержание гелия ($n(\text{He})/n(\text{H})$) в Орионе, что позволяет уточнить и нижний предел значения Y_p . Подчеркнем, что поиск нижнего предела не требует знания поправки за ионизационную структуру, т.е. полностью модельно независим.

Основываясь на проведенных работах (Поппи и др. [17]; Цивилев и др. [18]), можно предположить, где находится область максимальных значений $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$. В этой статье мы провели дополнительные наблюдения РРЛ H и He в направлении ожидаемого максимума, чтобы уточнить максимальное значение $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ в Орионе А и далее оценить нижний предел значения Y_p . Кроме того, мы провели наблюдения РРЛ дважды ионизированного гелия, чтобы оценить его вклад в оценку Y_p .

Работа состоит из 4 частей: введение, наблюдения, результаты и обсуждение, заключение.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения РРЛ проводились с помощью радиотелескопа РТ22 (ПРАО АКЦ ФИАН). На рис. 1 показаны позиции в туманности Орион А, в которых ранее наблюдались РРЛ H, He и C на длинах волн 8 и 13 мм, и положение (большой круг, равный размеру диаграммы направленности РТ22 на 13 мм – 2.6'), где выполнены наблюдения в этой работе. Дополнительные наблюдения также были проведены в позиции Ori N8, чтобы уточнить поведение физических параметров с удалением от центра в этом направлении. Наблюдения дважды ионизированного гелия были проведены в направлении центра туманности Орион А (звезда $\theta^1\text{C Ori}$). Для контроля также проводились наблюдения в направлении источника NGC7027, где дважды ионизированный гелий уже был зарегистрирован. Наблюдения РРЛ в переходе 65 α были проведены в 2017–2019 гг., в переходе 66 α – в 2019–2020 гг. Наблюдения дважды ионизированного гелия были сделаны в 2004–2006 гг.

Шумовая температура системы находилась в диапазоне 150–200 К. Использовался автокорреляционный спектрометр с 2048 спектральными каналами и общей частотной шириной 50 МГц. Наблюдения проводились методом ON-ON в режиме диаграммной модуляции (Сороченко и др. [21]) сканами продолжительностью 7–10 мин. Данные каждого скана калибровались в антенной

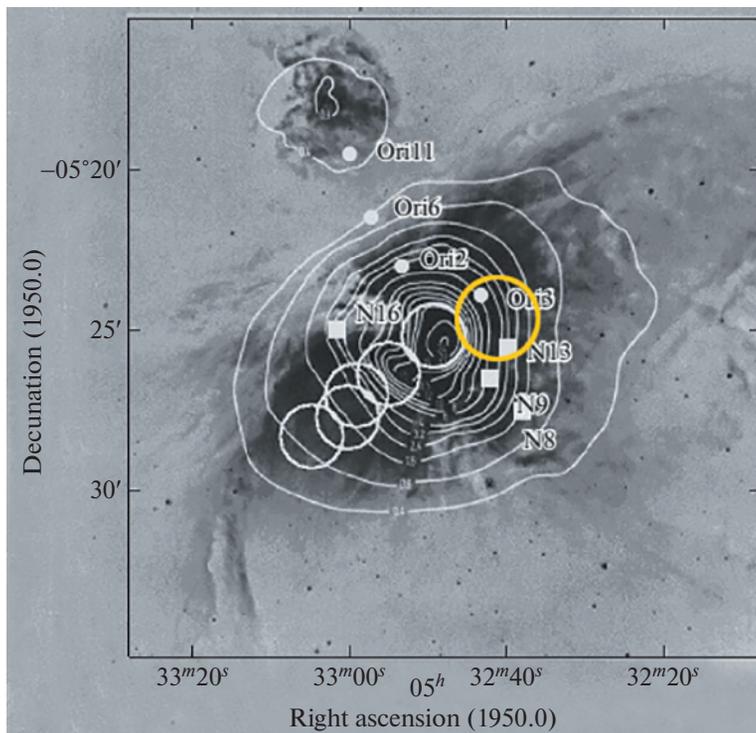


Рис. 1. Позиции, в которых проводились наблюдения РРЛ на 8 мм (большая и малая окружности) и 13 мм (квадраты), показаны на фоне оптической карты туманности Орион А (Н и N II, Хуа и Луиза [19]); контурные линии – карта в континууме на частоте 23 ГГц (Вильсон и Паулс [20]). Большой желтый круг – позиция, в которой наблюдается максимальное относительное содержание гелия при 13 мм. Размер желтого круга соответствует размеру диаграммы направленности РТ22 на 13 мм, в то время как белый круг соответствует ее размеру на 8 мм.

температуре и корректировались за атмосферное поглощение. Затем определялось среднее значение спектров за сеанс, а после этого – среднее значение между днями и сеансами, реализуя накопление сигнала за десятки часов (Цивилев [22]). Параметры спектральных линий определялись путем аппроксимации результирующих спектров (фиттинг) нелинейным методом наименьших квадратов (Смирнов и Цивилев [23]).

Важной проблемой являлось искажение нулевой линии спектрометра, возникающее из-за интерференции шумов, отражающихся между главным зеркалом и контррефлектором радиотелескопа. Искажение имеет квазисинусоидальную форму (Бахрах и др. [24]) с периодом, зависящим от расстояния между отражающими поверхностями (для РТ-22 период ≈ 15 МГц). Согласно нашему опыту, методом борьбы с этими искажениями (“паразитным” сигналом) является использование нескольких сеансов наблюдений продолжительностью около 10 дней в разные сезоны года. Из-за движения Земли по орбите вокруг Солнца частота спектральной линии изменяется, в то время как “паразитный” сигнал радиотелескопа остается неизменным. Во время наблюдений частота детектора настраивается таким образом, чтобы спектральная линия находи-

лась в одном и том же канале спектрометра. В результате “паразитный” сигнал нулевой линии смещается относительно исследуемой спектральной линии. При усреднении спектров разных дат “паразитный” сигнал суммируется с разными фазами вплоть до противофазы, что приводит к уменьшению его размаха. Остаточный “паразитный” сигнал компенсируется во время процедуры фиттинга путем введения синусоидальных членов в аппроксимирующую функцию для описания нулевой линии спектрограмм (Смирнов и Цивилев [23]; Цивилев [22]). Форма самих РРЛ описывается гауссовыми профилями (Сороченко и Гордон [1]).

В табл. 1 приведены данные наблюдений РРЛ: источник, название РРЛ, время накопления сигнала, контраст линия/континуум, параметры РРЛ: амплитуда линии в яркостных температурах (среднее по диаграмме), ширина линии при половинной интенсивности и ее лучевая скорость. Таблица 2 – сводная таблица значений $y^+ = n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ и T_e (электронная температура) для ряда позиций в Орионе А. Ошибки обеих таблиц (одно стандартное отклонение) указаны в круглых скобках.

Таблица 1. Параметры спектральных линий, полученных на РТ22

Источник	Линия	Время нак., час	T_l/T_c , %	T_l , К	ΔV , км/с	V_{LSR} , км/с
Ori N14b	H65 α	93.9	23.8	0.574 (0.002)	25.64 (0.15)	-3.81 (0.32)
	He65 α			0.0885 (.0022)	20.40 (0.80)	-2.8 (0.43)
	C65 α			0.040 (.0045)	4.30 (0.55)	+9.3 (0.35)
	H93 γ			0.069 (.0017)	27.08 (0.86)	-3.0 (0.37)
Ori N14b	H66 α	62.4		0.534 (0.003)	26.18 (0.20)	-4.27 (0.33)
	He66 α			0.070 (.004)	21.09 (1.89)	-4.3 (0.77)
	C66 α			0.035 (.0096)	4.02 (1.40)	+9.4 (0.60)
Ori N8	H65 α	80.9	20.5	0.284 (.0015)	28.9 (0.36)	-5.90 (0.37)
	He65 α			0.0316 (.0018)	20.5 (1.94)	-5.97 (0.73)
	C65 α			0.011 (.004)	3.22 (1.56)	+9.1 (0.68)
	H93 γ			0.0376 (.0018)	34.9 (1.95)	-4.3 (0.43)
Ori A	He ⁺ 103 α	137		$T_l < 0.005$		
	H109 ϵ			0.093 (.0028)	26.1 (0.99)	-2.4 (0.34)
	NH3(main)			0.566 (.009)	4.4 (0.08)	+7.3 (0.3)
	-1			0.182 (.007)	18.7 (0.7)	/-3.2 (0.5)/
	-2			0.108 (.008)	3.0 (0.5)	/-17.6 (0.4)/
	-3			0.104 (.005)	8.9 (0.6)	/-26.2 (0.4)/
	+1			0.121 (.005)	9.6 (0.95)	/+14.8 (0.6)/
NGC7027	He ⁺ 103 α	65.4	2.4	0.011 (.0037)	18.3 (6.0)	+15.0(6)
	H65 α	113	7.1	0.0326 (.0009)	56.5 (1.9)	+24.0(2)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Первоначальное изобилие гелия

3.1.1. Метод, наблюдения, исправления. На используемых радиочастотах (оптически тонкий случай и отсутствие штарковского уширения линий) относительное содержание гелия, $y = n(\text{He})/n(\text{H})$, рассчитывается как отношение интегралов РРЛ He и H с одинаковыми номерами перехода по следующей формуле:

$$y = \frac{T_l(\text{He})\Delta V(\text{He})}{T_l(\text{H})\Delta V(\text{H})}, \quad (1)$$

где T_l – амплитуда линии, ΔV – ширина линии на уровне половинной интенсивности в км/с. В действительности мы измеряем РРЛ ионизированного газа, т.е. соотношение ионизированных компонентов He и H. В областях НII измеренные ($y^+ = n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$) и фактические ($y = n(\text{He})/n(\text{H})$) содержания гелия связаны структурным фактором R :

$$y^+ = Ry, \quad (2)$$

где R определяется ионизационной структурой, т.е. соотношением размеров и мер эмиссии зон

He⁺ и H⁺. Относительное содержание гелия по массе (Y) выражается формулой

$$Y = \frac{4y(1-Z)}{1+4y}, \quad (3)$$

где Z – относительное массовое содержание элементов тяжелее гелия, часто называемое металличностью. Далее нужно учитывать вклад звезд в производство гелия. В случае с Орионом А (Цивилев [10]) первичное содержание гелия (Y_p) может быть определено по следующей формуле, использующей зависимость Y от Z как следствие вклада звездной эволюции в производство гелия:

$$Y_p = Y - \frac{dY}{dZ} Z. \quad (4)$$

В наших предыдущих работах (Поппи и др. [17]; Цивилев и др. [18]) было показано, что ионизационная структура в Орионе А имеет структуру типа ядро-гало, где зона He⁺ меньше, чем зона H⁺, т.е. $R < 1$ в целом по туманности с разным значением для ядра и гало. Значение R меньше для ядра (область НII строго ограничена ионизацией) и больше для гало, где область НII частично ограничена ионизацией и частично по плотности. Поэтому полученное значение R может меняться

Таблица 2. Некоторые результаты для ряда позиций НП области Орион А

Позиция	α_{1950} δ_{1950}	$n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$, %	T_e , К	Примечания
Ori A	5 ^h 32 ^m 49 ^s −5°25′16″	8.3 (±.36)	8170 (±104)	[18], 56α
Ori Bar	5 ^h 32 ^m 55 ^s −5°26′30″	8.2 (±.55)	8380 (±200)	[18], 56α
Ori Bar-2	5 ^h 32 ^m 59 ^s −5°27′09″	7.3 (±.7)	7330 (±270)	[18], 56α
Ori Bar-3	5 ^h 33 ^m 00 ^s −5°27′50″	5.7 (±.66)	7000 (±260)	[18], 56α
Ori Bar-4	5 ^h 33 ^m 4.7 ^s −5°28′4.7″	4.8 (±.8)	6600 (±160)	[18], 56α
Ori 2	5 ^h 32 ^m 53.5 ^s −5°23′07″	9.1 (±.55) 9.5 (±1.3)	7340 (±130)	[18], 56α [17], 66α
Ori 3	5 ^h 32 ^m 43.5 ^s −5°23′28″	9.5 (±1.3) 9.1 (±1.4)	7420 (±110)	[18], 56α [17], 66α
Ori 6	5 ^h 32 ^m 56.7 ^s −5°21′30″	4.0 (±.8)	7420 (±500)	[18], 56α
Ori 4	5 ^h 32 ^m 44 ^s −5°26′05″	8.75 (±.88)		[17] av 56α, 66α
Ori 7	5 ^h 32 ^m 36.5 ^s −5°22′58″	7.3 (±1.5)		[17] av 56α, 66α
Ori N14b	5 ^h 32 ^m 41 ^s −5°24′11″	11.55 (±.52)	7630 (±160)	this paper av 65α, 66α
Ori N13	5 ^h 32 ^m 40 ^s −5°25′37″	9.5 (±.6)	7900 (±200)	Corrected [18], 65α
Ori N9	5 ^h 32 ^m 42 ^s −5°26′36″	8.4 (±.83)	7600 (±300)	[18], 65α
Ori N8	5 ^h 32 ^m 39 ^s −5°27′00″	7.66 (±.88)		this paper 65α
Ori N16	5 ^h 33 ^m 0.3 ^s −5°25′06″	6.1 (±.95)	8200 (±360)	[18], 65α

Примечание: av – среднее значение.

от места к месту и в разных направлениях (см. рис. 9 в [17]). Более того, R может быть ≤ 1 для положения максимума y^+ . При этом максимальное измеренное значение y^+ будет означать нижний предел фактического содержания гелия, $y = n(\text{He})/n(\text{H}) \geq y_{\text{max}}^+$. Это открывает способ оценить нижнюю границу первичного содержания гелия (Y_p). Итак, задача состоит в том, чтобы найти y_{max}^+ в Орионе А.

В нашей работе [17] было показано, что y^+ увеличивается с расстоянием от центра с максимальным значением на угловом расстоянии 2′–3′, а затем уменьшается к краю туманности. Вероятная область максимума с $y^+ \approx 10\%$ находилась в северо-западной области в позициях Ori2 и Ori3 [17]. В последующих работах (Цивилев и др. [18, 25])

было обнаружено также высокое содержание гелия немного южнее, в позиции Ori N13 (рис. 1). Следовательно, наибольшее значение y^+ можно ожидать между позициями Ori3 и Ori N13. В этой работе мы выполнили наблюдения РРЛ (переход 65α) в этом направлении (большой желтый круг на рис. 1), обозначенном как Ori N14b.

Действительно, мы получили значение $y^+ \approx 12\%$, что выше ранее измеренных значений. Результат стабилен к небольшим вариациям нулевой линии спектрометра. Поскольку результат оказался необычно высоким, то в этом направлении были проведены дополнительные наблюдения РРЛ другого перехода – 66α. К сожалению, во время этих наблюдений оборудование работало хуже. В результате полученное значение y^+

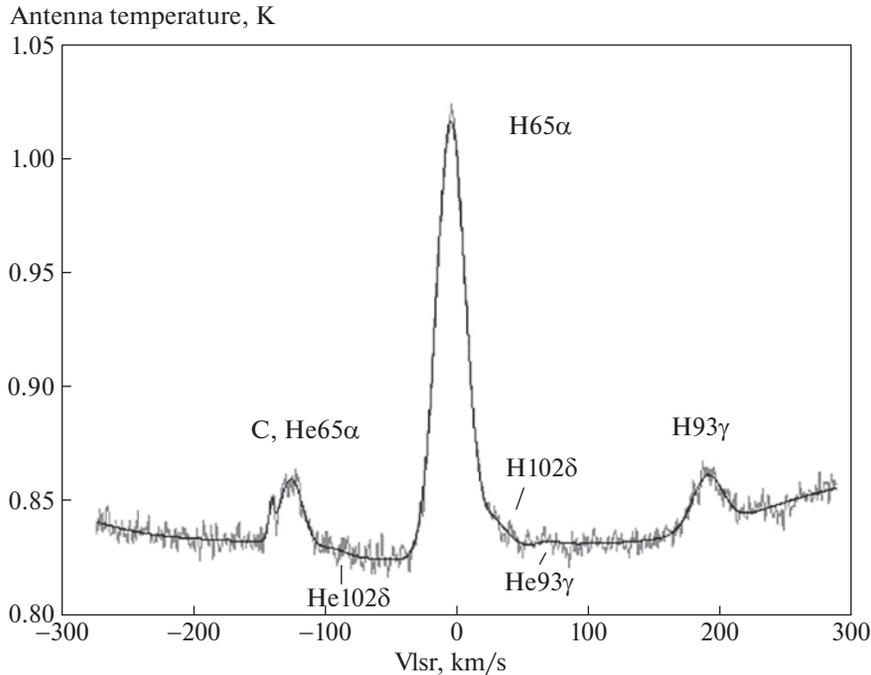


Рис. 2. Полученный на 13 мм спектр (переход 65α) в направлении максимума y^+ в Орионе А (позиция Ori N14b). Вертикальная ось представляет антенную температуру в кельвинах, горизонтальная — лучевые скорости в км/с. Ноль соответствует нулевой скорости РРЛ Н. Серая линия — полученный спектр, а черная гладкая линия — вписанный спектр.

оказалось менее устойчиво к вариациям нулевой линии спектрометра, оно “плавало” в диапазоне 10–12% с наиболее вероятным значением $y^+ = 10.6 (\pm 1.13)\%$. В любом случае это не противоречит наличию повышенного содержания гелия в этом направлении. Полученные спектры показаны на рис. 2 и 3.

Однако было ясно, что для некоторых позиций необходимо внести коррекцию полученного значения y^+ . На 13 мм угловое расстояние между двумя диаграммами направленности RT22 составляет $\approx 10'$. Когда одна диаграмма направленности находится в положении ON, другая может “задеть” край туманности. Предположим, что РРЛ водорода существует на краю туманности, в то время как РРЛ гелия — нет. Поскольку происходит вычитание сигнала между диаграммами, то амплитуда РРЛ Н будет уменьшена, а амплитуда РРЛ He — нет. Далее, используя формулу (1), получим завышенное значение y^+ . Это важно, когда одна из диаграмм находится в положении ON (на источнике), а другая находится в положении OFF (вне источника) с востока. Во второй части цикла, когда положение OFF находится с запада, коррекция не требуется (см. рис. 1). Исправления сделаны на основе карты в континууме на частоте 23 ГГц (Вильсон и Паулс [20]). В любом случае это максимальная коррекция, поскольку предположение об отсутствии линии He на краю туманности довольно сильное.

Приведем пример для позиции Ori N14b. Значение континуума, усредненного по диаграмме, составляет $T = 4.43$ К. В позиции OFF с востока можно ожидать значение континуума $T \approx 0.2$ К. Примем во внимание, что электронная температура (T_e) уменьшается к периферии туманности (Цивилев и др. [18]). В центральной части T_e составляет ≈ 8000 К, на периферии она может снижаться до 6600 К [18]. Используя измеренное T_e в позиции Ori N14b и предполагая отношение числа ионов гелия к числу ионов водорода, равное 0.11, можно ожидать, что отношение линия/континуум будет увеличено как $(7630/6600)^{1.15} \times (1 + 0.11)$ (Чайссон и Допита [26]), т.е. в 1.31 раза.

Таким образом, можно ожидать уменьшения амплитуды РРЛ Н как $(4.43 - 0.2 \times 1.31)/4.43$ по сравнению с амплитудой РРЛ He, т.е. как 0.94086. Поскольку это уменьшение будет действовать только в половине цикла, то общее уменьшение РРЛ Н за цикл будет составлять $1/2 (1 + 0.94086) = 0.97043$. На этот коэффициент и необходимо скорректировать полученное значение $y^+ = 12.26 (\pm 0.59)\%$ в позиции Ori N14b. В результате получим $y^+ = 11.90 (\pm 0.59)\%$ для перехода 65α и $10.29 (\pm 1.13)\%$ для перехода 66α . Соответствующие исправления внесены для позиций OriN13 и OriN8. Скорректированные значения представлены в табл. 2. Средневзвешенное максимальное

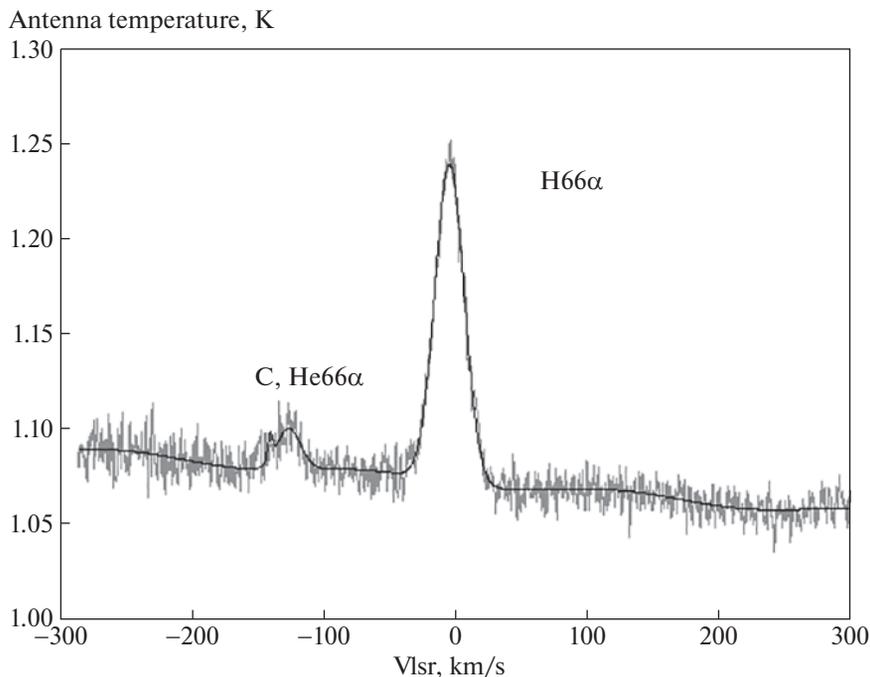


Рис. 3. Полученный спектр (переход 66α) в направлении максимума y^+ в Орионе А (позиция Ori N14b). Обозначения те же, что и на рис. 2.

значение (позиция Ori N14b) для двух переходов (66α и 65α) составит $y^+ = 11.55 (\pm 0.52)\%$.

Как уже упоминалось, максимальное значение y^+ ожидается на угловом расстоянии $2'-3'$ от центра Ori A. Для анализа мы построили на рис. 4 зависимость измеренного значения y^+ от угла по окружности с радиусом $2'$ от центра. Сплошная линия соответствует фиттингу функцией Гаусса плюс многочлен 2-й степени. Для сравнения, мы сделали оценки ожидаемого максимума. Для этого был вписан многочлен 3-й степени без учета полученного максимального значения y^+ (позиция Ori N14b), предполагая форму ожидаемого максимума типа “выпуклости”. Ожидаемый максимум оказался $y^+ \approx 9.7\%$, т.е. ниже полученного. На рис. 5 показано распределение измеренного значения y^+ по скану с востока на запад, проходящему через максимум. Была вписана функция Гаусс плюс многочлен 2-й степени. Анализ этих рисунков указывает, что область максимальных значений y^+ расположена примерно в $80^\circ-110^\circ$ к западу от линии направления M42-M43, и на угловом расстоянии $1.8'-2.3'$ от центра Ориона А (звезда θ^1 C Ori).

3.1.2. Расчеты Y_p и N_{eff} Следующим шагом является вычисление первичного содержания гелия с использованием формул (3) и (4). Принимая $Z = 0.0112 (\pm 0.0022)$ (Болдуин и др. [27]) и $dY/dZ = 1.62 (\pm 0.29)$ (Изотов, Туан [28]) и предполагая,

что $R = 1$ в положении максимального значения y^+ , мы получаем

$$Y_p = 29.40 (\pm 1.09\%).$$

На сегодня это “необычно” высокое значение. Вычтя 3σ , можно указать формально сильное ограничение нижнего предела:

$$Y_p > 26.16\%.$$

Далее мы можем оценить ограничение на существование неизвестных легких частиц во время первичного нуклеосинтеза (Цивилев [10]). Например, Пейджел [29] представил расчетный выход гелия при первичном нуклеосинтезе аналитической формулой. Предполагая время жизни свободных нейтронов близким к 887 с, затем объединяя первый член (постоянное значение) и последний член (зависимость от плотности барионов) этой формулы как измеренное значение $Y_{p,o}$ в рамках СКМ, мы получим зависимость только от эффективного числа легких частиц типа нейтрино (N_{eff}):

$$Y_p = Y_{p,o} + 0.013(N_{\text{eff}} - 3). \quad (5)$$

Принимая значение $Y_{p,o}$, указанное во Введении $Y_{p,o} = 24.84\%$ [7], получаем:

$$N_{\text{eff}} = (Y_p - 24.84)\%/1.3 + 3. \quad (6)$$

Далее, можно получить $N_{\text{eff}} = 6.5$ для основного значения Y_p и $N_{\text{eff}} > 4.0$ для нижней границы, что

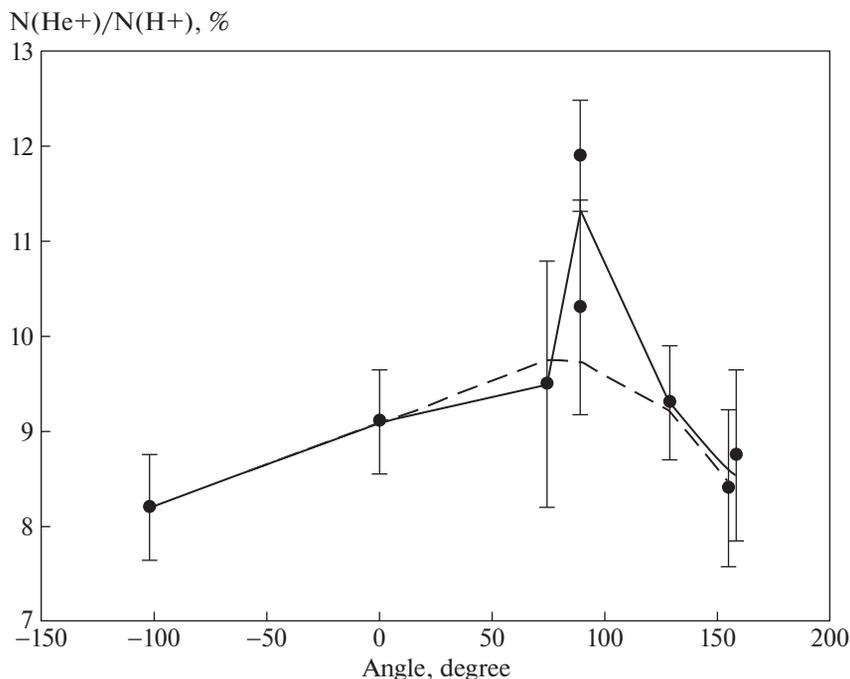


Рис. 4. Относительное содержание гелия, $y^+ = n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$, в зависимости от угла по окружности на угловом расстоянии $2' - 3'$ от центра Ориона А. Нулевое направление – линия M24-M43, отрицательные значения – на восток, положительные значения – на запад. Сплошная линия – фиттинг функцией Гаусса плюс полином 2-й степени. Штриховая линия показывает фиттинг полиномом 3-й степени без учета максимального значения (позиция Ori N14b). Значения y^+ взяты в следующих позициях: Ori Bar, Ori 2, Ori 3, Ori N14b (переходы 65α и 66α), Ori N13, Ori N9 и Ori 4 (см. табл. 2).

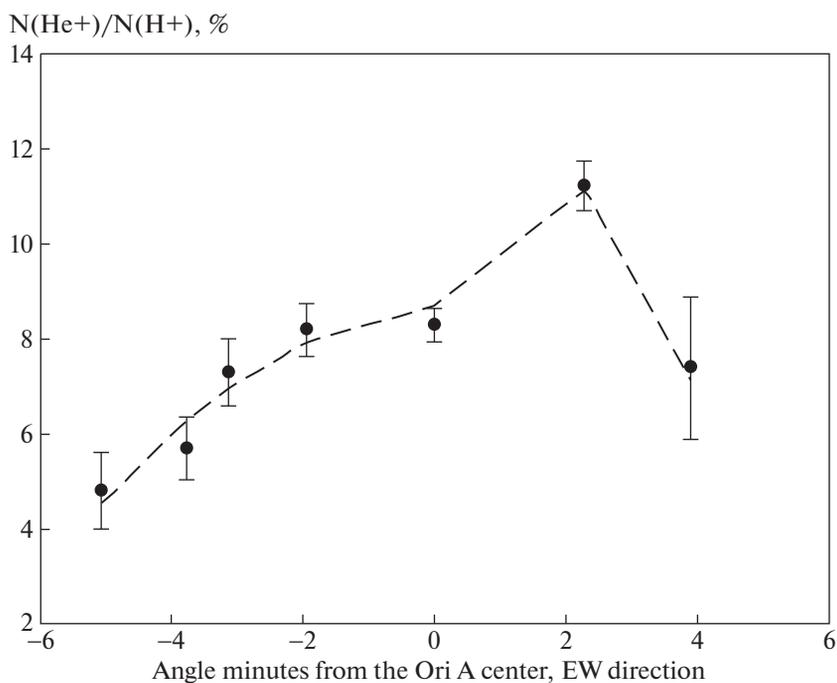


Рис. 5. Относительное содержание гелия y^+ в зависимости от углового расстояния (в минутах) от центра Ориона А вдоль линии восток-запад, проходящей через максимальное значение y^+ . Ломаная линия – фиттинг функцией Гаусса плюс полином 2-й степени. Приведены значения y^+ , полученные в позициях Ori Bar-4, Ori Bar-3, Ori Bar-2, Ori Bar, Ori A, Ori N14b и Ori7 (см. табл. 2).

превышает стандартное значение $N_{\text{eff}} = 3.0$ в соответствии с СКМ (Клапдор-Клайнротхаус, Цюбер [6]). Видно, что оценки зависят от принятого значения dY/dZ . Имеются работы, в которых считается, что значение dY/dZ может быть больше. Например, Кошмак, Мелех [30] получили $dY/dZ = 3.43 (\pm 0.77)$. Существуют оценки и в меньшую сторону, например $dY/dZ = 1.216 (\pm 0.849)$ (Верма и др. [31]). По нашему мнению [11], используемое здесь значение $dY/dZ = 1.62$ (Изотов и др. [28]) получено из большого объема данных, обладает наилучшей точностью и лучше соответствует теоретическим ожиданиям. Мы будем рассматривать это как основной параметр. Однако в качестве примера оценим Y_p для большего значения $dY/dZ = 3.43$:

$$Y_p = 27.4 (\pm 1.5\%).$$

Поскольку ошибка оказалась больше, для нахождения нижней границы возьмем менее сильное ограничение – минус одна сигма:

$$Y_p \geq 25.9\% \quad \text{и} \quad N_{\text{eff}} \geq 3.8.$$

Предположим, что мы все еще чего-то не учли. Тогда мы можем сделать “консервативную” оценку – рассчитать средневзвешенное значение для 4 точек, где наблюдается повышенное значение y^+ (Ori2, Ori3, Ori N13 и Ori N14b), что составляет 6 измерений (табл. 2). Получаем максимальное “консервативное” значение $y^+ = 10.028 (\pm 0.30)\%$. Откуда следует фактическое содержание гелия $y = n(\text{He})/n(\text{H}) \geq 10.028 (\pm 0.30)\%$, что приводит к “консервативному” пределу первичного содержания гелия:

$$Y_p \geq 26.49 (\pm 0.78\%).$$

Вычтя 2σ для оценки нижнего предела, получаем:

$$Y_p \geq 24.93\% \quad \text{и} \quad N_{\text{eff}} \geq 3.07.$$

Приведенные оценки указывают на возможность отклонения от стандартного значения Y_p и, как следствие, на возможность существования неизвестных легких частиц во время первичного нуклеосинтеза.

Если сравнивать с оптическими данными, то полученный интервал ($Y_p \geq 24.93 - 29.40\%$) свидетельствует в пользу результата Изотова и др. [9] с $Y_p = 25.5 (\pm 2.2)\%$. Заметим, что при крайних, пороговых значениях ($y = 10.03\%$ и $dY/dZ = 3.43$) получается значение $Y_p = 24.47\%$, что уже согласуется с самими последними данными [12–15].

3.1.3. Обсуждение реальности, возможные проблемы. Существуют ли какие-либо указания на возможность существования такого высокого значения Y_p ? Некоторые аргументы возможны, например, наличие “зеркального мира” (Окунь [32]). Согласно Блинникову и Хлопову [33], об-

щее число легких частиц, влияющих на скорость расширения Вселенной, в этом случае удвоится и первичное содержание гелия будет больше. Как уже говорилось, в настоящее время физиками ведутся разговоры о возможном присутствии четвертого типа нейтрино (например, Серебров и др. [16]).

Интересно отметить недавние измерения величины Y_p по линиям поглощения в межгалактическом газе в направлении далеких квазаров, в которых получено $Y_p = 25.0(+3.7; -2.5)\%$ (Кук и Фумагалли [34]). В свое время было показано, что в межгалактическом газе содержится много ионизированного гелия (например, Якобсен и др. [35]). Хотя считается, что большая часть гелия в межгалактическом газе находится в однократно ионизированном состоянии, некоторое количество гелия может находиться в дважды ионизированном состоянии (например, Черман [36]). Поскольку авторы не учли вклад дважды ионизированного гелия, то полученное значение можно рассматривать как некоторый нижний предел, что также допускает возможность превышения Y_p над его стандартным значением.

Интересные результаты расчетов Y_p доступны в интернет-публикации <http://www.kaf07.mephi.ru/eduroom/DM/DM-L9.pdf>.

Рассмотрим возможные проблемы, которые могли повлиять на результат измерений. Во-первых, наши наблюдения проводились на достаточно оптимальных частотах (длина волны ≈ 1 см). В этом диапазоне оптическая толща линий и континуума $\ll 1$ и, следовательно, связанные с ней эффекты незначительны. Штарковское уширение линий также невелико и начинает проявляться только при $n > 100$ (Сороченко, Гордон [1]). Во-вторых, для РРЛ при переходах с высокими квантовыми уровнями ($n > 30$) гелий можно считать водородоподобным атомом [1], т.е. коэффициенты, учитывающие отклонения населенности уровней от LTE (локальное термодинамическое равновесие), будут идентичны для идентичных переходов H и He. В недавней работе (Гонг и др. [37]) это утверждение было подтверждено экспериментально для трех десятков РРЛ в диапазоне главного квантового числа n от 64 до 100. Из этих же наблюдений следует, что возможный эффект отклонения от случая В из-за присутствия пыли в областях НII, который может по-разному влиять на заселенность уровней атомов H и He (Хаммер, Стори [38]), также ничтожно мал.

Наконец, возможно предположить, что в положении OFF для OriN14b (координаты $\alpha(1950) = 5^{\text{h}}33^{\text{m}}20^{\text{s}} (\pm 6^{\text{s}})$ или $5^{\text{h}}32^{\text{m}}00^{\text{s}} (\pm 6^{\text{s}})$ и $\delta(1950) = -5^{\circ}27' - 24'$) на луче зрения присутствует компактная область НII с плотностью потока ≈ 10 Ян, возбуждаемая слабой звездой ($R \ll 1$). Однако это

маловероятно, поскольку она была бы обнаружена в наблюдениях.

Наша цель состояла в том, чтобы найти положение максимума u^+ в Орионе А и уточнить его значение. Мы ожидали этого значения в диапазоне 9–10%, что согласовывалось бы с нашими предыдущими работами. Полученное значение $\approx 12\%$ является довольно неожиданным. Понятно, что для такого результата желательно дальнейшее уточнение, и мы продолжим работать над этой задачей.

Что касается других наблюдений, имеющих в литературе, можно отметить работу Пеймберт и др. [39], где авторы в РРЛ 53 α картировали семь позиций области в северо-западном направлении размером примерно $1' \times 1'$ и на среднем расстоянии около $1'$ от центра. (Наши позиции находятся примерно в $2'$ от центра). Во-первых, из-за недостаточного частотного разрешения реально они измеряли отношение $(\text{He} + \text{C})/\text{H}$. Во-вторых, можно бы было ожидать близких значений от рядом расположенных позиций, однако они получили разброс величины $(\text{He} + \text{C})/\text{H}$ от 6 до 12%. Это говорит о том, что измерения РРЛ He довольно трудная задача. После учета вклада РРЛ С они получили средние значения $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ по трем точкам (табл. 5 [39]) от 7 до 9%. После учета ионизационной структуры авторы получили для Ориона А $u = 9.9 (\pm 0.8)\%$.

В статье Чайссон и Допита [26] были проведены наблюдения в ряде позиций в оптике и РРЛ Н, Не6 α . Их позиция 3 наиболее близка к нашей, где по РРЛ получено $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) = 8 (\pm 3)\%$. По позициям имеется разброс от 8 до 12%. Получено среднее значение по 7 позициям $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) = 10 (\pm 0.3)\%$.

В статье Пеймберт и Торрес-Пеймберт [40] проведены наблюдения в оптике в 12 позициях туманности Орион А. Позиция 1b наиболее близка к нашей, где получено $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) = 8.4\%$. К сожалению, не указаны ошибки отдельных измерений. Ориентируясь, что среднее значение по 12 позициям (правда, с учетом правки за ионизационную структуру) $n(\text{He})/n(\text{H}) = 10.0 (\pm 0.5)\%$, то ошибку отдельных измерений можно ожидать $\approx 1.7\%$.

Гордон [41] пронаблюдал 5 позиций в РРЛ Н, Не 40 α : центральная и 4 сдвинутых на $1'$ по сторонам света. Однако он не привел величины $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ по отдельным позициям, а привел среднее значение $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) = 10 (\pm 2)\%$. Локман и Браун [42] в РРЛ Н, Не 76 α наблюдали 3 позиции: одна в центре и две в направлении на северо-восток вне центра. Для центра они получили величину $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) = 8.2\%$, а вне центра $\approx 11\%$. К сожалению, авторы в статье никак не обсуждали и не комментировали полученный ре-

зультат. Одна из внешних позиций близка нашей Ori2 [18], другая близка к позиции 19 из работы Панконин и др. [43], где было сделано картирование туманности Орион А в РРЛ на частоте ≈ 5 ГГц. В позиции 19 авторы получили значение $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+) \approx 7.0\%$, что значительно меньше, чем у Локмана и Брауна [42]. Более того, Панконин и др. [43] нашли, что имеется уверенный спад величины u^+ от центра к периферии на восток и северо-восток, что хорошо согласуется и с нашими данными [18].

Итак, обзор литературы показывает, что максимальное значение величины $n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$ вполне может быть $\approx 10\%$. Наши новые наблюдения предполагают большее значение данной величины.

3.2. Дважды ионизированный гелий

Известно, что для получения полного количества гелия необходимо знать вклад дважды ионизированного гелия, $u^{++} = n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+)$. Орион А возбуждается звездами, которые относительно не так горячи ($T_{\text{eff}} < 100000$ К), чтобы можно ожидать большого количества u^{++} . Ранее для Ориона А был установлен верхний предел $u^{++} \approx < 10^{-4}$ по оптическим наблюдениям (Паймберт и Голдсмит [44]) и $< 3 \times 10^{-3}$ по РРЛ на частоте ≈ 5 ГГц (Палмер и др. [45]). В планетарных туманностях, которые возбуждаются более горячими звездами, чем области НII, дважды ионизированный гелий наблюдался. Например, в планетарной туманности NGC7027 содержание $u^{++} = 0.03 (\pm 0.01)$ было измерено по РРЛ (Волмсли и др. [46]). Поскольку эти наблюдения были сделаны давно, мы решили провести наблюдения РРЛ He $^+103\alpha$ (23735.85 МГц) в Орионе А и *тестовые* в NGC7027. На рис. 6 и 7 показаны полученные спектры в этих источниках. Чтобы уменьшить дисперсию, спектр NGC7027 был сглажен по 16 спектральным каналам.

В Орионе А хорошо видны молекулярная линия NH $_3$ (2,2) (23722.61 МГц) и РРЛ Н109 ϵ (23743.83 МГц), в то время как РРЛ He $^+103\alpha$ не видна в излучении. Поскольку в том же спектре присутствует РРЛ водорода (Н109 ϵ), можно оценить верхний предел u^{++} , взяв 3 сигмы вблизи РРЛ He $^+103\alpha$. Чтобы оценить соотношение двух РРЛ (1 и 2) разных переходов (n_1, n_2), преобразуем формулу 2.102 из книги Сороченко и Гордона [1] и получим следующее выражение:

$$\frac{(T_i \Delta V)_1}{(T_i \Delta V)_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \times \frac{M_{\Delta,1} (1 + 1.5 \Delta n_1 / n_1) n(X_1)}{M_{\Delta,2} (1 + 1.5 \Delta n_2 / n_2) n(X_2)}, \quad (7)$$

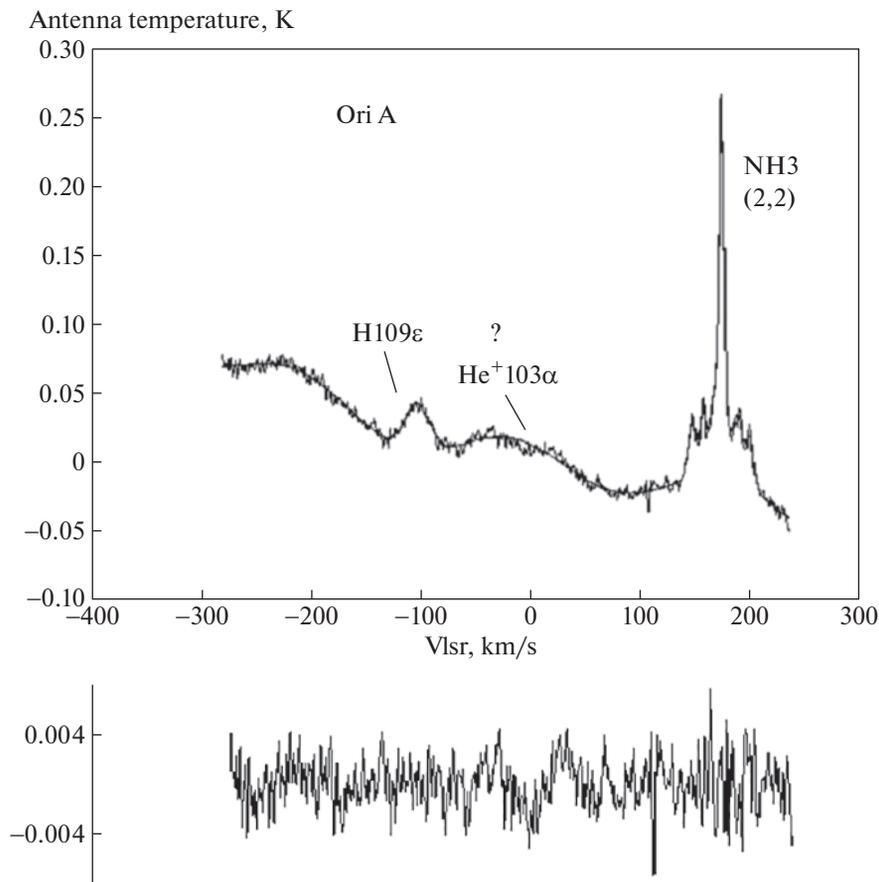


Рис. 6. Полученный спектр в направлении центра Ориона А в поисках дважды ионизованного гелия. Вертикальная ось – антенная температура в кельвинах, горизонтальная – лучевые скорости в км/с. Ноль соответствует нулевой скорости для гелия. Серая линия – полученный спектр, черная гладкая линия – вписанный спектр. Нижняя панель показывает разницу между полученным и вписанным спектром.

где $M_{\Delta n} = 0.1908, 0.0263, 0.0081, 0.0035, 0.0018$ для переходов $\Delta n = 1(\alpha), \Delta n = 2(\beta), \Delta n = 3(\gamma), \Delta n = 4(\delta), \Delta n = 5(\epsilon)$ соответственно; $n(X_1)/n(X_2)$ – отношение их концентраций; ΔV выражена в км/с. Затем, используя верхний предел РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ и параметры $\text{H}109\epsilon$ (табл. 1), получаем для Ориона А $n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+) < 6.9 \times 10^{-4}$. Это почти на порядок лучше, чем ранее было определено по РРЛ [45], к тому же получено на более высокой частоте. В любом случае это подтверждает ранее полученный результат, что в Орионе А вклад дважды ионизованного гелия ничтожен.

Однако можно заметить, что на рис. 6 РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ скорее видна в поглощении. Это особенно заметно на нижней панели рисунка (разность между полученным и вписанным спектром). Интересно отметить, что это согласуется с оптическими данными, где линия He^{++} видна в поглощении [44]. Если предположить, что линия находится в поглощении, то ее параметры могут быть такими: $T_1 = -0.024 (\pm 0.003)$ К, $\Delta V = 26.9 (\pm 3.9)$ км/с и $V_{\text{LSR}} = -0.7 (\pm 1.3)$ км/с.

Что касается NGC7027, мы также провели наблюдения РРЛ $\text{H}65\alpha$ (табл. 1). Используя формулу (7) и полученные параметры линий $\text{H}65\alpha$ и $\text{He}^+103\alpha$ (табл. 1), получим $y^{++} \approx 2.8 (\pm 1.3)\%$, что вполне согласуется с имеющимися оценками (Чейссон и Малкан [47]; Волмсли и др. [46]).

3.3. Некоторые другие результаты

Ранее для позиции Ori N8 было неясно, имелось ли уменьшение значения y^+ в этом направлении от центра или увеличение (Цивилев и др. [18]). То есть возникает вопрос, а не существует ли другой локальный максимум значения y^+ ? В этой статье оценка величины y^+ была улучшена, которая ясно показала, что y^+ уменьшается от центра в этом направлении. (Получено $y^+ = 7.9 (\pm 0.88)\%$, после коррекции – $y^+ = 7.66 (\pm 0.88)\%$). Итак, локального максимума тут нет.

В табл. 2 для ряда позиций приведены электронные температуры, полученные с учетом отклонения от локального термодинамического

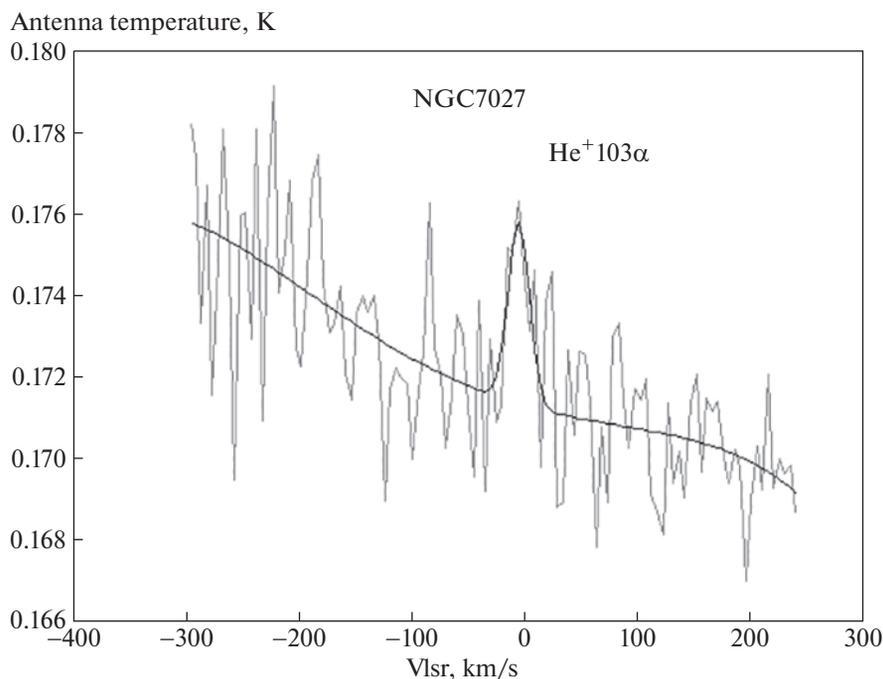


Рис. 7. Полученный спектр дважды ионизированного гелия в направлении планетарной туманности NGC7027. По вертикальной оси – антенная температура в кельвинах, по горизонтальной – лучевые скорости в км/с. Ноль соответствует $V_{\text{LSR}} = 20$ км/с. Серая линия – полученный спектр, а черная гладкая линия – вписанный спектр.

равновесия. Большинство значений было получено в работе [18]. В этой статье T_e определена для новой позиции (Ori N14b) в соответствии со схемой, описанной в работе [18]. Полученное значение явно ниже, чем T_e в центре туманности (Ori A). Для позиции Ori N13 произведена коррекция раннее полученных значений y^+ и T_e , которые стали немного меньше предыдущих [18]. Таким образом, новые данные дополнительно подтверждают вывод об уменьшении T_e от центра туманности к периферии [18].

Для NGC7027, используя полученные параметры РПЛ H65α и контраст (отношение линия/континуум, табл. 1), можно оценить электронную температуру [18]. Получим $T_e(\text{LTE}) = 12490 (\pm 2290)$ К в случае локального термодинамического равновесия. Если мы возьмем электронную плотность $\approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, характерную для центральной части Ориона А (Смирнов и др. [48]), то реальная электронная температура составит $T_e \approx 11900$ К. Имеется работа (Ершов и Берулис [49]), где считается, что электронная плотность может быть выше до $\approx 6.7 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, тогда T_e будет ≈ 12300 К. В пределах погрешности полученные значения T_e согласуются с другими оценками [46, 47, 49]. В этой планетарной туманности T_e заметно выше, чем в областях НII. Возможно, это имеет место и для других планетарных туманностей [46].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В области НII Орион А были проведены наблюдения РПЛ H, He и C (65α и 66α) в направлении ожидаемого максимального значения $y^+ = n(\text{He}^+)/n(\text{H}^+)$. Получены следующие значения: $y^+ = 11.90 (\pm 0.59)\%$ для перехода 65α и $10.29 (\pm 1.13)\%$ для перехода 66α со средневзвешенным значением $y^+ = 11.55 (\pm 0.52)\%$. Анализ данных показывает, что область вероятного максимума y^+ находится в направлении примерно $80\text{--}110^\circ$ к западу от линии M42-M43 и на угловом расстоянии $1.8'\text{--}2.3'$ от центра туманности (звезда θ¹C Ori). Возможное первичное содержание гелия оценивается в диапазоне от $Y_p = 29.40 (\pm 1.09)\%$ до $27.4 (\pm 1.5)\%$ с нижней границей $Y_p > 26.16\%$ и $Y_p \geq 25.9\%$ соответственно. Отсюда следует возможное ограничение на присутствие легких частиц типа нейтрино при первичном нуклеосинтезе: $N_{\text{eff}} > 4.0$ и $N_{\text{eff}} \geq 3.8$.

Была сделана “консервативная оценка” максимального содержания гелия в Орионе А как средневзвешенное значение по 4 позициям с повышенным значением y^+ . Получено $y^+ = 10.03 (\pm 0.30)\%$, из чего следует и “консервативный” результат для $Y_p \geq 26.49 (\pm 0.78)\%$, и далее – $Y_p \geq 24.93\%$ и $N_{\text{eff}} \geq 3.07$.

Таким образом, полученные оценки указывают на возможность превышения над стан-

дартным значением Y_p и, как следствие, на возможность существования неизвестных легких релятивистских частиц во время первичного нуклеосинтеза. Поскольку результат в позиции OriN14b оказался необычно высоким и желательнее его дальнейшее уточнение, то, по нашему мнению, на данном этапе нужно учитывать и консервативную оценку. Поэтому, пока основной вывод заключается в том, что максимальное значение Y_p находится в диапазоне 10.03–11.55%, означая, что Y_p может быть не меньше интервала 24.93–29.40%.

Работа по уточнению полученного результата (оценка максимального содержания гелия в Орионе А и уменьшение интервала его значений) будет продолжена.

2. Чтобы оценить вклад дважды ионизированного гелия, были проведены наблюдения РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ в направлении центра Ориона А и планетарной туманности NGC7027. В Орионе А РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ не видна в излучении с верхним пределом $n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+) < 6.9 \times 10^{-4}$. Это согласуется с оптическими данными и почти на порядок лучше предыдущего предела по РРЛ, к тому же получено на более высокой радиочастоте. Отметим, что, возможно, РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ в Орионе А видна в поглощении.

В планетарной туманности NGC7027 РРЛ $\text{He}^+103\alpha$ была зарегистрирована, откуда следует $n(\text{He}^{++})/n(\text{H}^+) \approx 2.7 (\pm 1.3)\%$, что вполне согласуется с оценками, имеющимися в литературе.

3. В Орионе А получена электронная температура в позиции OriN14b и скорректирована для позиции Ori N13. Эти новые данные подтверждают прежний вывод [18], что T_e уменьшается от центра туманности к периферии.

Для NGC 7027 получены значения $T_e(\text{LTE}) = 12490 (\pm 2290)$ К и $T_e \approx 11\,900$ – $12\,300$ К (последние с учетом отклонения от LTE), которые хорошо согласуются с предыдущими оценками [46, 47, 49]. В этой планетарной туманности T_e заметно выше, чем в областях НП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Г.Т. Смирнову, который читал статью и сделал полезные замечания. Особенно благодарны ему за проверку и подтверждение правильности формулы 7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Р. Л. Сороченко, М. А. Гордон, Рекомбинационные радиолинии. Физика и астрономия* (М.: Физ-матлит, 2003).
2. *R. L. Sorochenko and A. P. Tsvilev, Kinemat. Phys. Celestial Bodies* **26**, 162 (2010).
3. *А. П. Цивилев, Астрон. журн.* **70**, 72 (1993).
4. *А. М. Поляков, А. П. Цивилев, Письма в Астрон. журн.* **33**, 39 (2007).
5. *F. R. S. Hoyle and R. J. Teyler, Nature* **203**, 1108 (1964).
6. *Г. В. Кландор-Клайнротхаус, К. Цюбер, Астрофизика элементарных частиц* (М.: УФН, 2000).
7. *A. Coc and E. Vangioni, Int. J. Mod. Phys. E*, **26**, 08 (2017).
8. *J. Yang, M. S. Turner, G. Steigman, D. N. Schramm, and K. A. Olive, Astrophys. J.* **281**, 493 (1984).
9. *Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and N. G. Guseva, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 778 (2014).
10. *А. П. Цивилев, Письма в Астрон. журн.* **35**, 745 (2009).
11. *А. П. Цивилев, С. Ю. Парфенов, А. М. Соболев, В. В. Краснов, Письма в Астрон. журн.* **39**, 912 (2013).
12. *T. Hsyu, R. J. Cooke, J. X. Prochaska, and M. Bolte, Astrophys. J.* **896**, 77 (2020).
13. *E. Aver, D. A. Berg, K. A. Olive, R. W. Pogge, J. J. Salzer, and E. D. Skillman, JCAP* **03**, 027 (2021).
14. *M. Valerdi, A. Peimbert, and M. Peimbert, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **505**, 3624 (2021).
15. *O. A. Kurichin, P. A. Kislitsyn, V. V. Klimenko, S. A. Balashev, and A. V. Ivanchik, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **502**, 3045 (2021).
16. *A. P. Serebrov, V. G. Ivochkin, R. M. Samoilov, et al., JETP Letters* **109**, 213 (2019).
17. *S. Poppi, A. P. Tsvilev, S. Cortiglioni, G. G. C. Palumbo, and R. L. Sorochenko, Astron. and Astrophys.* **464**, 995 (2007).
18. *А. П. Цивилев, В. В. Краснов, С. В. Логвиненко, Письма в Астрон. журн.* **45**, 24 (2019).
19. *C. T. Hua and R. Louise, Astron. Astrophys. Supp. Ser.* **88**, 477 (1982).
20. *T. L. Wilson and T. Pauls, Astron. and Astrophys.* **138**, 225 (1984).
21. *Р. Л. Сороченко, И. И. Берулис, А. В. Гусев, Е. Е. Лехт, Л. М. Нагорных, Г. Т. Смирнов, Тр. Физ. ин-та им. П.Н. Лебедева* **159**, 53 (1985).
22. *А. П. Цивилев, Диссерт. на соискание звания к.ф.-м.н.* (М.: ФИАН, 1998).
23. *Г. Т. Смирнов, А. П. Цивилев, Астрон. журн.* **59**, 1020 (1982).
24. *Л. Д. Бахрах, М. И. Григорьева, Р. Л. Сороченко, Изв. вузов. Радиофизика* **19**, 1614 (1976).
25. *A. P. Tsvilev, S. Yu. Parfenov, and V. V. Krasnov, Odessa Astron. Publ.* **29**, 163 (2016).
26. *E. J. Chaisson and M. A. Dopita, Astron. Astrophys.* **56**, 385 (1977).
27. *J. A. Baldwin, G. J. Ferland, P. G. Martin, M. R. Corbin, S. A. Cota, B. M. Peterson, and A. Slettebak, Astrophys. J.* **374**, 580 (1991).
28. *Y. I. Izotov and T. X. Thuan, Astrophys. J.* **710**, L67 (2010).
29. *B. E. J. Pagel, Phys. Rep.* **333–334**, 433 (2000).
30. *I. O. Koshmak and B. Ya. Melekh, Advances in Astronomy and Space Physics* **8**, 16 (2018).

31. *K. Verma, K. Raodeo, S. Basu, A. V. Silva, A. Mazumdar, J. R. Mosumgaard, M. N. Lund, and P. Ranadive*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **483**, 4678 (2019).
32. *Л. Б. Окунь*, УФН **50**, 380 (2007).
33. *С. И. Блинников, М. Ю. Хлопов*, Астрон. журн. **27**, 371 (1983).
34. *R. J. Cooke, M. Fumagalli*, Nature Astronomy **2**, 957 (2018).
35. *P. Jakobsen, A. Boksenberg, J. M. Deharveng, P. Greef-ield, R. Jedrzejewski, and F. Paresce*, Nature **370**, 35 (1994).
36. *R. D. Cherman*, Astrophys. J. **256**, 379 (1982).
37. *Y. Gong, C. Henkel, S. Thorwirth, S. Spezzano, K. M. Menten, C. M. Walmsley, F. Wyrowski, R. Q. Mao, and B. Klein*, Astron. and Astrophys. **581**, A48 (2015).
38. *D. G. Hummer, P. J. Storey*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **254**, 277 (1992).
39. *M. Peimbert, N. Ukita, and T. Hasegawa*, Publ. Astron. Soc. Japan **40**, 581 (1988).
40. *M. Peimbert, S. Torres-Peimbert*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **179**, 217 (1977).
41. *M. A. Gordon*, Astrophys. J. **337**, 782 (1989).
42. *F. J. Lockman, R. L. Brown*, Astrophys. J. **259**, 595 (1982).
43. *V. Pankonin, C. M. Walmsley, C. Thum*, Astron. and Astrophys. **89**, 173 (1980).
44. *P. Peimbert, D. W. Goldsmith*, Astron. and Astrophys. **19**, 398 (1972).
45. *P. Palmer, B. Zuckerman, H. Penfield, A. E. Lilley*, Astrophys. J. **156**, 887 (1969).
46. *C. M. Walmsley, E. Churchwell, Y. Terzian*, Astron. and Astrophys. **96**, 278 (1981).
47. *E. J. Chaisson, M. A. Malkan*, Astrophys. J. **210**, 108 (1976).
48. *G. T. Smirnov, R. L. Sorochenko, V. Pankonin*, Astron. and Astrophys. **135**, 116 (1984).
49. *А. А. Ерусов, И. И. Берулис*, Письма в Астрон. журн. **15**, 413 (1989).