

ПАНОРАМНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГАЛАКТИК
С ОЧАГАМИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ.
ИССЛЕДОВАНИЕ SBS0750+603A

С.А.АКОПЯН

Поступила 14 марта 2018

Принята к печати 20 июня 2018

Приводятся результаты 3D-спектроскопии галактики SBS0750+603A, полученные по наблюдениям на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН с использованием панорамного спектрографа MPFS. Работа проводилась в рамках детальных исследований галактик с активным звездообразованием, входящих в одну из семи избранных выборок, сформированных на базе Второго Бюраканского спектрального обзора неба. Исследуются комплексно сопряженные явления, связанные с процессами звездообразования в эволюционной цепи галактик. Проведен анализ распределений по полю галактики SBS0750+603A параметров рекомбинационной линии водорода H α и запрещенных дублетов [NII] 6548, 6583 \AA и [SII] 6716, 6731 \AA серы. Выявлены три основные компоненты галактики с четырьмя областями HII, которые расположены вдоль оси с полярным углом PA \sim 140 $^\circ$. По полю радиальных скоростей подтверждается нерегулярность структуры и выявляется вращение вокруг оси как основной характеристики кинематики газовых масс. В качестве параметров, характеризующих области HII, приводятся значения эквивалентных радиусов, R_e , светимостей в линии L(H α), темпа звездообразования SFR(H α), которые изменяются в диапазоне 0.7-0.11 $M_\odot/\text{год}$, и другие.

Ключевые слова: 3D-спектроскопия; H α -излучение; области HII-объект:
SBS 0750+603A

1. *Введение.* Частью нашей программы комплексного изучения галактик семи избранных полей [1] Второго Бюраканского спектрального обзора неба, SBS (Second Byurakan Spectral Survey) [2], являются детальные исследования галактик с предварительно установленными признаками звездообразования [3]. Высокую результативность обеспечивает проведение панорамной (3D) спектроскопии, позволяя определить структурно-морфологические особенности объекта. Выявление и изучение посредством определения численных характеристик отдельных областей ионизованного водорода, областей HII, составляет основу схемы детальных исследований. Накопление однородного статистического материала по галактикам пространственно организованных выборок, исследуемых нами, открывает дальнейшую перспективу - по углубленному изучению процессов звездообразования и сопряженных эволюционных задач.

В немногочисленных публикациях исследуемая галактика фигурирует, преимущественно, в качестве объекта SBS-обзора. В его списки он был

включен по наличию на низкодисперсионных спектрах ультрафиолетового континуума и эмиссионных линий - обоих критериев отбора, использованных в SBS. По данным последующей шелевой спектроскопии галактика имеет предварительную классификацию SFGcont (Star-forming Galaxy -continal), что, согласно используемой нами классификационной схеме [4], соответствует континуальной фазе звездообразовательной активности.

Основные данные, имеющиеся в NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>) и HYPERLEDA (<http://leda.univ-lyon.fr/>), приводятся в табл. 1. Об интегральной яркости объекта можно судить по значению $B_1 = 17^m.57$, полученному в синих лучах по результатам ПЗС-фотометрии и соответствующей абсолютной величине $M_B = -18^m.27$ [5]. С галактикой ассоциируется по источнику в обзорах GALEX (<http://galex.stsci.edu/>), регистрирующем ближний и дальний ультрафиолетовый диапазон спектра, и WISE (<http://irsa.ipac.caltech.edu>), регистрирующем инфракрасное излучение. Расположена галактика вне зоны, покрытой Слоановским обзором SDSS (Sloan Digital Sky Survey), включая релиз DR14.

Таблица 1

БАЗОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО ГАЛАКТИКЕ SBS0750+603A

Экв.координаты (J2000)	07 ^h 55 ^m 08 ^s .90 +60°11'00".0
Альтернативные обозначения	PGC022182, SBS0751+603A
Видимый размер (arcmin)	0.50x0.29
Красное смещение (z)	0.0359
Позиционный угол (PA-deg)	125

2. Наблюдения и обработка данных. Наблюдения галактики SBS0750+603A выполнялись в Специальной астрофизической обсерватории (<http://www.sao.ru>), на 6-м телескопе БТА 24 декабря 2006г. С целью проведения панорамной спектроскопии использовался предназначенный для первичного фокуса телескопа мультизрчковый спектрограф MPFS [6], в комбинации с ПЗС серии EEV42 с матрицей 2048x2048 элементов. Зарегистрированы пять экспозиций, каждая длительностью 1200с, при качестве изображений $\sim 1''.3$.

Поле наблюдений размером 16x16 угл. с² имеет дискретизацию в 1 угл. с. С использованием дифракционной решетки 1200 штрих/мм, получены спектральные данные с дисперсией в 0.76 Å /мм в диапазоне длин волн 625-775 нм.

При выполнении наблюдений был получен стандартный набор исходных данных, необходимых для обработки полученного материала. В качестве спектрофотометрического стандарта наблюдались звезды BD+26°4655 и BD+75°325, для калибровки по длинам волн регистрировалось излучение

неон-аргоновой лампы.

При проведении первичной обработки, включающей калибровку данных по длинам волн и потокам, для визуализации и анализа данных использовались программы на языке IDL [7] и программный пакет ADHOCw (<http://www-obs.cnrs.fr/ADHOC>). При определении параметров линий использовалась гаусс-аппроксимация спектральных профилей.

3. *Излучение галактики SBS0750+603A в рекомбинационной линии водорода H α* . Полученная по наблюдениям карта H α -излучения галактики SBS0750+603A показана на рис.1а фоновыми градиациями и изолиниями, прочерченными в суперпозиции с ними. В качестве областей ионизованного водорода в распределении интенсивностей выявляются три основных компонента. Они выстроены вдоль линии с позиционным углом $\sim 140^\circ$, которую в дальнейшем будем называть большой осью галактики, и обозначены A, B, C по убыванию визуальных размеров и яркости. Отсутствие ядра, отмеченное ранее в [8], обусловленное "недостатком излучения" по центру исследуемого объекта, визуально делит галактику на две части, которые ниже упоминаются как южная, с компонентой A и северная, с компонентами B и C, соответственно. Структура распределения интенсивностей по полю компоненты A и наличие двух пиков, первичного, A1, и вторичного, A2, показывают, что компонента A, в свою очередь, сформирована из двух областей HII. На рис.1б, повторяющем фон рис.1а, без изолиний, положения четырех пиков отмечены названиями соответствующих областей HII.

На структурную общность двух частей галактики косвенно указывает распределение излучения в континууме. Его основная доля исходит от

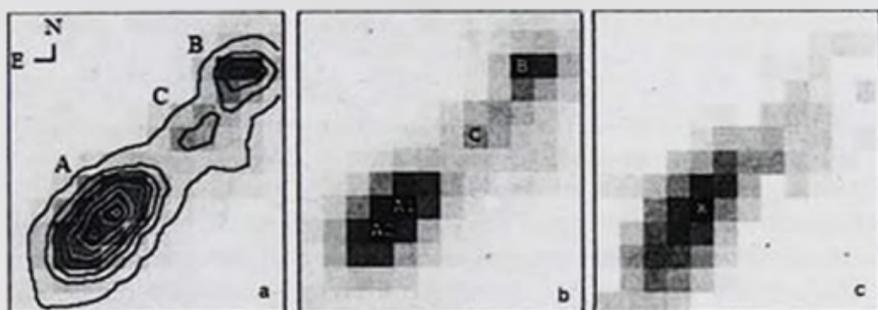


Рис.1. Распределение интенсивности излучения галактики SBS0750+603A в линии H α показано фоновыми градиациями: а) и изолиниями в линии H α ; б) в линии H α с указанием положения пиков интенсивностей в компонентах A,B,C; в) в небольшом отрезке континуума с указанием положения пика данного распределения. На рисунках повторяется тот же информативный фрагмент поля, урезанный с южной и восточной стороны, до размеров $13'' \times 12''$, соответственно.

области, связанной с компонентой А, и убывает при удалении от нее в направлении к компонентам С и В, что отображает рис.1с. Единственный пик в распределении интенсивности излучения континуума совпадает с первичным пиком $\text{H}\alpha$ -излучения, А1.

На рис.2 приводится наиболее информативный отрезок волнового диапазона наблюдений со спектрами, полученными в пиках $\text{H}\alpha$ -излучения четырех областей НII. Масштаб рисунка по ординате, с абсолютными значениями интенсивностей, позволяет видеть соотношение амплитуд в линии $\text{H}\alpha$, в частности, лишь небольшое различие между значениями в пиках А1 и А2. Полученные в пиках компонент значения интенсивностей излучения в линии $\text{H}\alpha$, $I(\text{H}\alpha)_{\text{пик}}$, приводятся в табл.2.

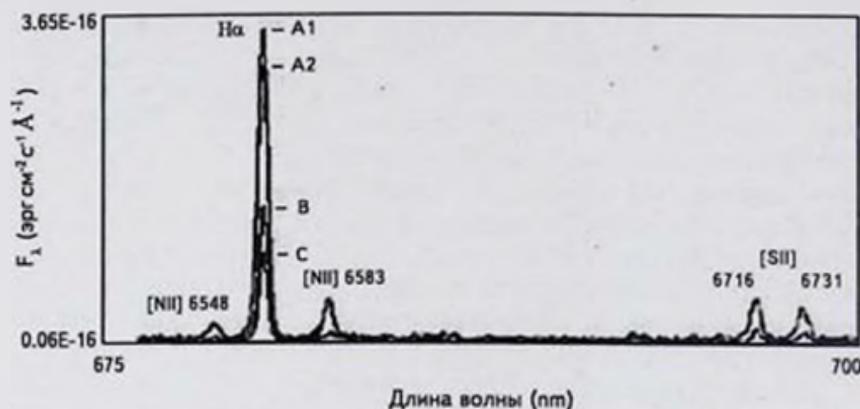


Рис 2. Показаны спектрограммы, соответствующие пикам четырех областей НII галактики SBS0750+603A в наиболее информативной части зарегистрированного при наблюдениях диапазона длин волн.

В табл.2 собраны некоторые численные характеристики областей ионизованного водорода А1, А2, В и С галактики SBS0750+603A. Очередность столбцов таблицы, в которых даются параметры областей НII, соответствует расположению этих областей вдоль большой оси галактики. Параметры, полученные в элементах матрицы, соответствующих пикам $\text{H}\alpha$ -излучения областей НII, отмечены индексом "пик". Это интенсивность излучения в линии $\text{H}\alpha$ и в запрещенных линиях азота $[\text{NII}] 6583$ и серы $[\text{SII}] 6716$, $[\text{SII}] 6731$, и значения радиальных скоростей, которые использовались, в частности, для определения расстояния до каждой компоненты. В соответствии с принятой нами, в качестве системной, скорости в 11000 км/с, расстояние до SBS0750+603A составляет 146.7 Мпк, при значении постоянной Хаббла $H = 75 \text{ км/с/Мпк}$. Эквивалентные радиусы областей НII вычислялись по формуле

$R_{\text{eq}} = (S/\pi)^{0.5}$, в которой площадь излучающей поверхности S каждой из компонент определяется числом элементов, превышающих по интенсивности излучения в линии $\text{H}\alpha$, порог в 10%-ов от значений $I(\text{H}\alpha)_{\text{max}}$.

Те же площади S использовались при вычислении интегральных величин - потоков f , и светимостей L в линиях и, также при усреднении отношения интенсивностей в запрещенных линиях серы $[\text{SII}]6716/[\text{SII}]6731$, характеризующей электронную концентрацию n_e . Оценка темпов протекающего в областях HII звездообразования, SFR, дана в соответствии со стандартной формулой $\text{SFR}(\text{H}\alpha) (M_{\odot}) = 7.9 \times 10^{-42} L(\text{H}\alpha)$ [9]. В качестве часто используемых параметров, характеризующих области HII, в таблице приводятся отношения интенсивностей запрещенных и разрешенных линий, $R_1^1 = [\text{NII}]6583/\text{H}\alpha$ и

Таблица 2

ЧИСЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАСТЕЙ HII ГАЛАКТИКИ SBS0750+603A

	A2	A1	C	B
V_r max (км/с)	10998	11004	11009	11019
R_e (пк)	1330	1447	1269	1392
$L(\text{H}\alpha)$ (10^{44} эрг/с)	1.467	1.830	0.490	0.844
$\text{SFR}(\text{H}\alpha)$ ($M_{\odot}/\text{год}$)	0.11	0.14	0.04	0.07
$I(\text{H}\alpha)_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	11.94	14.03	3.17	7.15
$I([\text{NII}]6583)_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	1.81	1.95	-	0.73
$I([\text{SII}]6716)_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	1.91	2.02	0.56	0.69
$I([\text{SII}]6731)_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	1.55	1.59	0.58	0.65
$f(\text{H}\alpha)$ (10^{-16} эрг/см ² с)	56.69	71.03	18.98	32.66
$f([\text{NII}]6583)_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	10.10	12.10	1.03	2.17
$f([\text{SII}](6716+6731))_{\text{max}}$ (10^{-16} эрг/см ² с)	20.2	24.7	5.71	8.06
$(n_e)_{\text{cp}}$	1.09	1.14	0.70	0.46
R_1^1	0.18	0.17	0.05	0.07
R_1^2	0.36	0.35	0.30	0.24
R_1^1/R_1^2	2.0	2.06	6.0	3.4

$R_2^2 = [\text{SII}](6716 + 6731)/\text{H}\alpha$. Ранее, при аналогичном данному, исследовании другого объекта [10], нами была установлена зависимость отношения интенсивности в линии азота $[\text{NII}]6583$ к суммарной, по линиям дублета серы $[\text{SII}]6716, 6731$, интенсивности, от значений темпов звездообразования, SFR. Соответствующие этому отношению значения, обозначены как отношение R_1^1/R_1^2 (табл.2).

4. *Поле радиальных скоростей.* Поле радиальных скоростей галактики подвержено общей тенденции. Она заключается в поступательном изменении значений $V_r(\text{H}\alpha)$, если проследивать их вдоль любой нормали, пересекающей

большую ось галактики. Траектория кривой на рис.3б, полученная аппроксимацией всех значений, отображает интегральный эффект той тенденции. Распределение значений $V_r(\text{H}\alpha)$ по полю галактики показано фоновыми градиентами серого на рис.3а. Более светлым оттенкам, наблюдаемым вдоль северной границы, соответствуют максимальные в поле значения, -11050 км/с, наиболее темным, вдоль южной границы - минимальные, -10950 км/с. Для диапазона $10965-11000$ км/с в суперпозиции с фоном показаны и изолинии $V_r(\text{H}\alpha)$. Их чередующиеся, вытянутые вдоль галактики контуры более наглядно передают общую картину, интерпретацией которой является вращение газовых масс вокруг большой оси галактики. Изменение скоростей в поперечном к оси

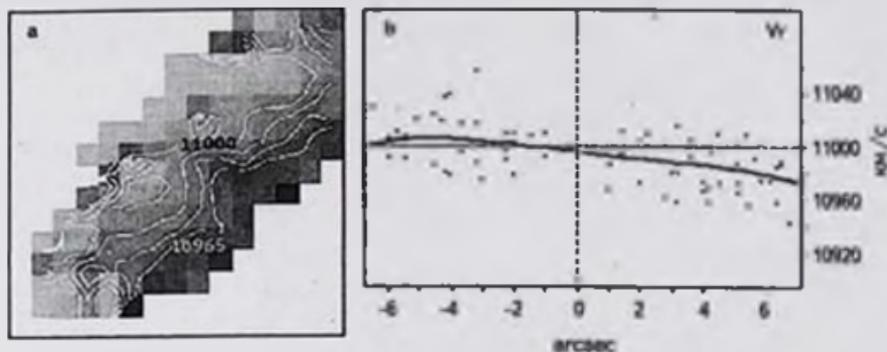


Рис.3 а) Распределение радиальных скоростей $V_r(\text{H}\alpha)$ показано фоновыми градиентами серого, во всем диапазоне значений, и изолиниями, в узком диапазоне $10965-11000$ км/с; б) аппроксимированная по $V_r(\text{H}\alpha)$ кривая иллюстрирует (слева направо) постепенное уменьшение значений в направлении NE-SW по нормали к большой оси галактики с превышением ошибки измерения в -17 км/с.

направлении заведомо превышает ошибку измерений, составляющую -17 км/с, - достаточно сравнить подписи к изолиниям. Градиент указанных изменений, наименьший в пределах компоненты А, увеличивается к центральной части галактики.

Флуктуации значений $V_r(\text{H}\alpha)$, регистрируемые вдоль изолиний, небольшие - лишь по краям оси разница превышает ошибку измерений. В частности, разница значений $V_r(\text{H}\alpha)_{\text{max}}$ для компонент В и А2 составляет $\Delta V_r(\text{H}\alpha) = 11019(\text{В}) - 10998(\text{А}2)$. Тем не менее, от А2 в направлении к компонентам А1 и далее, к С и В, вдоль осевых составляющих, наблюдается увеличение значений скоростей, что фиксируется и по значениям в пиках областей Н1 (см. табл.2), что естественно интерпретировать как наличие наклона большой оси галактики под небольшим углом к лучу зрения. Формируемая радиальными скоростями картина, в приязке к визуальной, позволяет охарактеризовать

морфологический тип галактики как иррегулярный, исключив вариант спиральной галактики, наблюдаемой с ребра.

5. *Излучение галактики в запрещенных линиях.* В полученном нами диапазоне спектра наблюдается излучение исследуемой галактики в линиях запрещенных дублетов ионизованного азота [NII] 6548, 6583 и серы [SII] 6716, 6731, что иллюстрирует рис.2, с представленными на нем спектрами пиков четырех областей НII. Некоторые данные по этим линиям приводятся в табл.2.

Основная доля излучения ионизованного азота в линиях запрещенного дублета исходит от ассоциируемой с компонентой А южной части галактики. Излучение северной части галактики формирует, преимущественно, линия [NII] 6583. По карте излучения в этой линии, показанной фоном рис.4а, можно судить о более интенсивном, по сравнению с С, излучении компоненты В, примерно в том же соотношении, что и в $H\alpha$. В качестве связки, для сравнения с распределениями других параметров, в суперпозиции с фоном приводятся изолинии $H\alpha$ -излучения, определяющие положения областей НII.

Телешидии, наблюдаемые в поле $H\alpha$ -скоростей, проявляются и в кинематике газов ионизованного азота, что показывает распределение радиальных скоростей, определенных по красной линии дублета, $Vr(6583)$. В пределах компоненты А скорости $Vr(6583)$ имеют почти ту же конфигурацию и диапазон, изменяясь по нормали к большой оси между средними по краям значениями 10960 км/с и 11001 км/с, и значения в пиках -10998.5 км/с. Среднее значение $Vr(6583) - 11005$ км/с в элементах компоненты С, в которых регистрируется излучение в линии $\lambda 6583\text{Å}$, чуть больше, чем $Vr(H\alpha)$. Иными выглядят

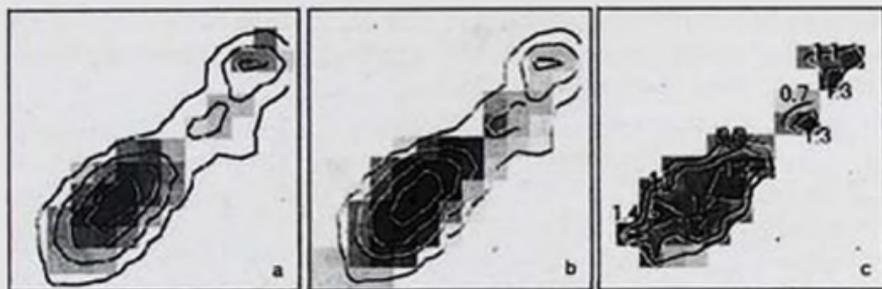


Рис.4. Фонowymi градициями серого показано распределение по полю галактики интенсивности излучения: а) в запрещенной линии азота [NII] 6583 с изолиниями $H\alpha$ в суперпозиции; б) по сумме линий излучения в линиях серы [SII] 6716 и [SII] 6731 с изолиниями $H\alpha$ в суперпозиции; в) Отношение интенсивностей в запрещенных линиях серы [SII]6716/[SII]6731 приводится фонowymi градициями и изолиниями, с приписанными к ним численными показателями. На рисунках повторяется тот же конфигурационный фрагмент поля, урезанный с южной и восточной стороны до размеров $13'' \times 13''$, соответственно.

данные по компоненте В. При той же схеме, что по $H\alpha$ -скоростям, разброс значений $V_T(6583)$ здесь почти в три раза больше, а разница в пике составляет 62 км/с. В элементах с наибольшими значениями скоростей наблюдаются и наибольшие значения эквивалентной ширины в поле галактики, что позволяет предположить наличие расширяющейся, возможно асимметрично стратифицированной относительно излучающего в $H\alpha$ водорода, газовой компоненты ионизованного азота.

Обратное, в сравнении с азотом, соотношение между компонентами В и С наблюдается по излучению в запрещенных линиях дублета серы [SII]6716, 6731 - интенсивность излучения компоненты В в этих линиях заметно уступает интенсивности, регистрируемой от компоненты С. При этом излучение соседней с С компоненты А в запрещенных линиях ионизованной серы превалирует над излучением ионизованного азота как по интенсивности, так и по поверхностному охвату. Распределения на рис.4b и 4c соответствуют сумме и отношению интенсивностей в двух линиях дублета серы, соответственно.

Значениями отношения $I(\lambda 6716)/I(\lambda 6731)$ характеризуется электронная концентрация, n_e . Некоторая закономерность изменения этой величины прослеживается в южной части галактики, охватывающей компоненту А, о чем можно судить по численным значениям, усредненным внутри контуров изолиний n_e . Радиальные скорости, определенные по линиям [SII]6716, 6731, в северной части, в среднем, имеют большие значения, чем в южной части галактики. Об этом можно судить, в частности, по превышающей ошибку измерений разнице усредненных по двум линиям дублета значений V_T в пиках компонент - $V_T(A) \approx 10994$ км/с, $V_T(A2) \approx 10999$ км/с и $V_T(C) \approx 11019$ км/с, $V_T(B) \approx 11018$ км/с. Тем не менее, в поле скоростей, формируемом линиями дублета серы, в качестве основной, более выраженной, сохраняется тенденция поступательного изменения V_T по нормали к большой оси, при наибольшей разнице в ~ 40 км/с с двух приграничных сторон компоненты А.

6. Заключение. Приводятся результаты анализа распределений параметров по полю галактики SBS0750+603A, полученные по излучению объекта в рекомбинационной линии $H\alpha$ и запрещенных дублетах азота [NII]6548, 6583 и серы [SII]6716, 6731. Наблюдения выполнены с использованием мультизрачкового спектрографа MPFS на 6-м телескопе CAO РАН.

По результатам анализа данных установлена, в частности, иррегулярность морфологии галактики, выявлены три компоненты с четырьмя областями ионизованного водорода. Их эквивалентные радиусы меняются в диапазоне 1.2-1.5 кпк, темп звездообразования $SFR(H\alpha)$ - в диапазоне 0.4-0.11 M_\odot /год. Определены и другие количественные характеристики областей HII, которые с использованием иных данных, имеющих в литературе и базах данных,

будут проанализированы в нашей следующей статье. Выявленные в SBS0750+603A четыре области HII расположены вдоль большой оси галактики с позиционным углом -140° , которая ориентирована в пространстве под углом $-15-20^\circ$. Вокруг оси галактики происходит вращение газовых масс. Скорость вращения в -25 км/с, которая наблюдается в южной части галактики, включающей две более яркие области HII, поступательно растет вдоль оси, что схематически можно представить как ее закручивание в северной части, где расположены две менее яркие области HII.

Работа выполнена на наблюдательном материале, полученном на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской Академии Наук, САО РАН, полученном при содействии сотрудников лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов: А.А.Смирновой, А.В.Моисеева и С.Н.Додонова, за что автор выражает им свою благодарность.

В работе использованы данные внегалактической базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), которая управляется организациями Jet Propulsion Laboratory и California Institute of Technology по контракту с National Aeronautics and Space Administration и базы данных HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr/>, [11]).

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: susannahakopian@yahoo.com

PANORAMIC SPECTROSCOPY OF GALAXIES WITH STAR FORMATION REGIONS. STUDY OF SBS0750+603A

S.A.HAKOPIAN

On the base of 3D-spectroscopy, obtained from the observations with the 6-m telescope of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences (SAO RAS), new data on the galaxy SBS0750+603A are presented. The work was done in the course of detailed studies of star-forming galaxies, incoming in the seven selected samples, formed on the base of the Second Byurakan spectroscopical survey. Under investigations are complex conjugated tasks, connected to processes of starformation in a chain of evolution of galaxies. Parametric distributions over the fields of galaxies, extracted from the data cubes, give an opportunity to reveal HII-regions, determine their main numerical characteristics, providing thus more detalization itself and higher efficiency in using the numerous databases, as well.

The given data were obtained from surface distributions constructed for SBS 0750+603A in Balmer H α recombination line of hydrogen and forbidden lines of doublets of [NII] 6548, 6583 of nitrogen and [SII] 6716, 6731 of sulfur. Three main components with four HII-regions are revealed in the galaxy. From the obtained data it follows that the galaxy has irregular morphology with the components lain along the axc PA - 140°, and rotation around it is the main characteristic of gaseous mass's kinematics. Among the given, estimated for each HII-region parameters, there are values of equivalent radii, Req, luminosities L(H α), starformation rate SFR(H α), which vary in the range 0.7.-0.11 M $_{\odot}$ /year and others.

Key words: 3D-spectroscopy: H α -radiation: HII regions - individual: SBS 0750+603A

ЛИТЕРАТУРА

1. S.A.Hakopian, S.K.Balayan, Proceedings of IAU Syposium 194: Active Galactic Nuclei and Related Phenomena, held in Yerevan, Armenia, August 17-21, 1998, eds. Y.Terzian et al., 1999.
2. Б.Е.Маркарян, Дж.А.Степанян, *Астрофизика*, 19, 29, 1983, (*Astrophysics*, 19, 14, 1983).
3. S.A.Hakopian, S.N.Dodanov, A.V.Moiseev et al., Proceedings of IAU Symposium 321: Formation and Evolution of Galaxy Outskirts, held in Toledo, Spain, March 14-18, 2016, eds. Armando Gil de Paz et al., 2017.
4. С.А.Акопян, С.К.Балаян, *Астрофизика*, 47, 443, 2004, (*Astrophysics*, 47, 378, 2004).
5. S.A.Pustil'nik, J.-M.Martin, W.K.Huchtmeier et al., *Astron. Astrophys.*, 389, 405, 2002.
6. V.L.Afanasyev, S.N.Dodanov, A.V.Moiseev, in "Stellar Dynamics: From Classic to Modern", (Eds L.P.Ossipkov and I.I.Nikiforov), St. Petersburg: Sobolev Astronomical Institute, 103, 2001.
7. А.А.Смирнова, А.В.Моисеев, В.Л.Афанасьев, *Письма в Астрон. ж.*, 32, 577, 2006, (*Astron. Lett.*, 32, 520, 2006).
8. Б.Е.Маркарян, В.А.Липовецкий, Дж.А.Степанян, *Астрофизика*, 21, 35, 1984. (*Astrophysics*, 21, 371, 1984).
9. R.C.J.Kennicutt, P.Tamblyn, C.E.Congdon, *Astrophys. J.*, 435, 22, 1994.
10. С.А.Акопян, С.К.Балаян, С.Н.Доданов и др., *Астрофизика*, 55, 5, 2012, (*Astrophysics*, 55, 1, 2012).
11. D.Makarov, P.Prugniel et al., *Astron. Astrophys.*, 570, A13, 2014.