

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Кафедра проблем физики и астрофизики

Направление подготовки / специальность: 03.03.01 Прикладные математика и физика
(бакалавриат)

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная и прикладная физика

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТУМАННОСТИ SH2-235

(бакалаврская работа)

Студент:

Демьяненко Мария Владимировна

(подпись студента)

Научный руководитель:

Боли Пол Эндрю ,
PhD (к.ф.-м.н.)

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2020

1. Аннотация

В данной работе исследуется область ионизированного водорода Sh2-235, вокруг неё находится множество скоплений молодых звёзд и молодых звёздных объектов. Ключевой особенностью является изучение влияния внутренней структуры туманности на величины наблюдаемые внешне.

Для получения закономерностей по данному вопросу формируется простейшая модель туманности с помощью ПО Cloudy. Проводится минимизация критерия сравнения моделей с пространственно разрешёнными данными с CAO РАН полученными при помощи фотометра MaNGaL. Определена оценка средней плотности водорода, металличности и радиального градиента плотности в Sh2-235. Сделаны выводы о влиянии градиента плотности на величины, которые можно измерить из наблюдений объекта.

Sh2-235 является типичным представителем внутригалактической области H II. Соответственно, методика её исследования, может быть применена и к другим подобным областям. Такие результаты могут понадобиться в дальнейшем для проверки динамической модели областей звездообразования и могут помочь в изучении инициированного образования звёзд.

Оглавление

1.	Аннотация	1
2.	Введение	3
2.1.	Физические процессы в областях H II	5
	Эволюция областей H II	5
2.2.	Запрещённые линии и индикаторы	6
2.3.	Туманность Sh2-235	8
2.4.	Наблюдения с помощью MaNGaL	9
2.5.	Программное обеспечение Cloudy	10
	Геометрия	10
	Физические допущения	11
3.	Проделанная работа	13
3.1.	Построение модели	13
	Геометрия	13
	Химический состав	14
	Технические подробности	15
3.2.	Критерий сравнения χ^2	15
3.3.	Маскировка изображений	16
3.4.	Минимизация χ^2	18
3.5.	Сравнение индикатора для различных моделей	20
4.	Обсуждение результатов	25
5.	Заключение	27
6.	Благодарности	28
	Список литературы	29
7.	Приложения	32

2. Введение

В данной работе изучается область ионизированного водорода Sh2-235, информация о которой приведена в разделе 2.3. В научной литературе считается принятым термин “область H II”, который будет присутствовать в дальнейшем повествовании. Яркий в оптическом и среднем-инфракрасном диапазоне, такой тип эмиссионных туманностей является отличным индикатором зон активного звёздообразования, поэтому часто используется термин “объект звёздообразования”.

Требуется построить подходящую физическую модель внутренней структуры объекта звёздообразования, которая давала бы эмиссию подобную той, что наблюдается в линиях дублета [S II], $H\alpha$, $H\beta$ и [N II]. А так же понять можно ли сделать какие-либо выводы о внутренней структуре туманности по наблюдаемым величинам.

В разделах 2.1, 2.2 представлены основные аспекты физики областей H II, к этим разделам следует обратиться, чтобы понимать каким образом строится модель объекта.

В распоряжении имелись карты интенсивности туманности, полученные с телескопа САО РАН с помощью фотометра MaNGaL в разделе 2.4 представлена теоретическая справка об этом уникальном инструменте.

Для построения одномерной модели области, в которой сферически-симметричным повторением радиального профиля получают изображения Sh2-235, использовалось программное обеспечение Cloudy [1]. В модели изучаемый объект считается шаром газа вокруг центральной звезды - источника ионизирующего излучения. Подробности о допущениях и ограничениях Cloudy представлены в разделе 2.5. Необходимо понимать, что построенные модели не учитывают многих аспектов не из-за возможностей ПО, а для того, чтобы свести к минимуму количество свободных параметров. Модель должна быть робастной к выбросовым значениям и хорошо обобщать наблюдаемые результаты в общем масштабе, а не только в частности для данного объекта.

По модифицированному критерию χ_r^2 сравнивалась эмиссия построенной

модели в пяти указанных линиях с картами интенсивности, полученными с наблюдений объекта. Минимизируя суммарное значение $\chi_{sum,r}^2$ при варьировании плотности водорода n_H , была оптимизирована модель и получены оценки средней плотности водорода $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$ в туманности Sh2-235.

А так же, Sh2-235 была рассмотрена со стороны химического состава, основываясь на актуальных публикациях в данном направлении [2], [3], [4]. В разделе 3.1 подробнее описано то, каким образом выбрана оценка металличности для данной области H II.

В настоящей работе произведена оптимизация модели с постоянной плотностью водорода $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$ по параметру металличности. Таким образом оценено наиболее оптимальное значение металличности $\frac{Z}{Z_\odot} \approx 0.5$. Ознакомиться с работой по этому направлению можно в разделе 3.4.

Представлены модели с разным радиальным градиентом плотности водорода в туманности, но с одинаковой массой газа вокруг центральной звезды. Визуализированы радиальные профили интенсивностей для различных степеней радиального закона плотности. В разделе 3.5 повествуется каким образом исходя из таких наблюдаемых величин как интенсивности в линиях [S II], $H\alpha$, $H\beta$, [N II] и отношение интенсивностей линий [S II], получить выводы о внутренней структуре области H II. Наблюдения туманности Sh2-235 наиболее хорошо соотносятся с моделью, в которой присутствует отрицательный радиальный градиент плотности водорода.

Можно сделать вывод исходя из обзора литературы, что построение физической модели внутренней структуры данного объекта предоставит больше возможностей для изучения инициированного звёздообразования вокруг Sh2-235 [5].

Обсуждением результатов, предложения о дальнейших направлениях исследования и тезисное изложение проделанных в ходе работы шагов изложено в разделах 4 и 5.

Стоит отметить, что планируются наблюдения ещё нескольких туманностей и получение данных для изучения закономерностей между наблюдаемыми величинами и внутренней структурой подобных объектов.

Возможно будет осуществлено написание библиотеки для упрощения

технической стороны научной работы над подобными задачами.

2.1. Физические процессы в областях H II

Области ионизированного водорода являются в том числе индикатором звёздообразования как в нашей, так и в других галактиках. В таких областях происходит почти полная ионизация водорода УФ-излучением центральной звезды. Потенциал ионизации H с основного уровня $\chi = 13.6$ эВ, а значит выбивание электрона происходит только фотонами с длиной волны меньше предела лаймановского континуума: $\lambda(Ly_c) < 912\text{\AA}$, что определяет спектральный класс центральной звезды (O-B) [6]. Кроме фотоионизации водорода, возможна ионизация электронным ударом, выполняющаяся в основном высокоэнергитичными электронами. Нагрев областей преимущественно происходит благодаря ионизации УФ-излучением, а охлаждение - в основном из-за излучения в запрещённых линиях тяжёлых элементов [O II], [O III], [N II]. Температура определяется балансом этих двух процессов.

Эволюция областей H II

Области ионизированного водорода возникают вокруг горячих звёзд. Глобула [7] окружена падающим на неё плотным газом и пылью. Компактная область H II возникает, когда звезда разогревается до такой степени, что может ионизовать водород. Такие области видны как очень яркие источники в ИК-диапазоне, благодаря нагреву окружающей пыли, и не видны в оптическом диапазоне длин волн.

Но пыль со временем разрушается под воздействием излучения и уносится звёздным ветром, увлекая за собой газ. Под давлением излучения, компактная область H II расширяется и может выбрасывать вещество за границы родительского молекулярного облака (обычно звёзды рождаются вблизи краёв таких облаков). За границей облака находится, очевидно, более разреженная среда, и когда вещество из области H II фонтанирует в неё, наступает стадия фаза шампанского эволюции области.

В дальнейшем звезда или сама выходит в разреженную среду или разбрасывает газ вокруг себя и так образуется диффузная область Н II. Со временем область становится стационарной. Это происходит, когда количество фотонов от центральной звезды Q , ионизирующих водород в области, стремится к количеству рекомбинаций водорода в объёме туманности. Таким условием определяется сфера Стрёмгrena [8], ограниченная радиусом r_{st} :

$$\frac{4\pi}{3}r_{st}^3\alpha_B n_e n_p = Q \quad (1)$$

где α_B - коэффициент спонтанной радиационной рекомбинации на все уровни, кроме первого.

Когда давление нагретого газа внутри превосходит давление более холодного газа снаружи, область Н II начинает снова расширяться. Ударная волна уплотняет нейтральный газ, туманность поглощает его и увеличивает свои размеры. В плотных сгустках вещества волна распространяется медленнее и огибает их, так образуются неионизованные плотные глобулы [7]. Они экранируют ионизирующее излучение и за ними образуются так называемые “слоновьи хоботы” [9], где газ более холодный и плотный. Давление газа туманности на глобулу может инициировать образование звезд в ней.

Горячая центральная звезда в зависимости от своей массы, или перестает светить после медленного перетекания оболочки красного гиганта в окружающую среду с появлением в дальнейшем планетарной туманности вокруг белого карлика, или происходит взрыв сверхновой с появлением в дальнейшем плериона. Остаётся реликтовая область Н II, в которой нет источника ионизации (в случае плериона происходит подпитывание ветром оставшегося пульсара), вещество рекомбинирует и такая область исчезает. От освещения новообразованных небольших звёзд иногда появляются отражательные и кометарные туманности [9].

2.2. Запрещённые линии и индикаторы

Области Н II излучают в основном в спектральных линиях водорода и в запрещённых линиях тяжёлых элементов. Условия внутри далеки от ло-

кального термодинамического равновесия, поэтому вместо формулы Саха, для описания ионизации элементов используются условия фотоионизационного равновесия, т.е. путём учёта всех элементарных атомных (ионных) процессов, увеличивающих и уменьшающих концентрацию каждого типа атомов или ионов [6].

Термин запрещенные эмиссионные линии, впрочем, не означает, что такие переходы совершенно невозможны ни при каких условиях, они лишь запрещены квантомеханическими правилами отбора, но при этом просто имеют очень малую вероятность возникновения. На Земле в лаборатории невозможно осуществить настолько разреженный вакуум, какой присутствует в областях ионизированного водорода. Это условие означает, что внутри зоны Н II мало столкновений электронов с атомами, а значит возбуждение не будет снято за счёт столкновений и спонтанный переход будет осуществлён. Также, когда разреженный газ занимает огромное пространство, больше вещества для возможности осуществления таких переходов. Так как существует зависимость коэффициента Эйнштейна (вероятности спонтанного радиативного перехода) от электронной плотности, в наблюдательной астрофизике часто используются индикаторы - отношения интенсивностей на двух запрещённых эмиссионных линиях [10], [11], [12]. В нашей работе используется отношение интенсивностей дублета ионизированной серы. На рисунке 1 показаны запрещённые переходы, которым соответствуют спектральные линии [S II] 6716, 6731 Å:

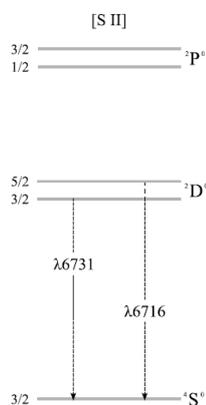


Рис. 1. Диаграмма запрещённых переходов между уровнями для дублета спектральных линий [S II]

2.3. Туманность Sh2-235

Внутригалактическая область H II Sh2-235 находится в созвездии Возничего и расположена практически в направлении галактического антицентра и в плоскости диска Млечного Пути. Данная туманность имеет следующие галактические координаты: $l = 173.7^\circ$ - галактическая долгота, $b = 2.7^\circ$ - галактическая широта. Экваториальные координаты [13]: $\alpha = 5h 41m 6s$ - прямое восхождение, $\delta = 35^\circ 50' 23''$ - склонение.

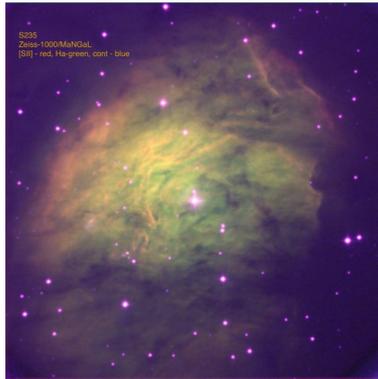


Рис. 2. Изображение Sh2-235 полученные А.В. Моисеевым с помощью фотометра MaNGaL

Этот регион H II возможно появился при столкновении двух гигантских молекулярных облаков [14]. Одно из этих молекулярных облаков, G174+2.5, содержит Sh2-231, Sh2-232, Sh2-233 и Sh2-235. Область звездообразования насчитывает более чем 435 [15] молодых звездных объектов. Молодыми звёздными объектами называют в том числе молодые массивные звёзды, которых не видно в оптическом диапазоне спектра из-за сильного поглощения в остаточном газе и пыли вокруг формирующейся звезды. Но в инфракрасном диапазоне такие источники являются чрезвычайно яркими объектами, так как пыль переизлучает в этом диапазоне длин волн. Sh2-235 ионизируется звездой BD +35°1201 со спектральным классом O9.5 V, её эффективная температура: $T_{eff} = 30200 \pm 200K$, светимость $L = 69000L_\odot$, расстояние до неё $r = 1.65$. В работе [16] оценены по запрещённым линиям [N II] 5755, 6583 Å; [S II] 6716, 6731 Å из целевого спектра туманности следующие параметры: $T_e = 7320 \pm 340K$ - электронная температура, $n_e = 85 \pm 5 \text{ cm}^{-3}$ - электронная плотность [16]. В том числе на основании представлен-

ных оценок была сформирована начальная модель туманности.

2.4. Наблюдения с помощью MaNGaL

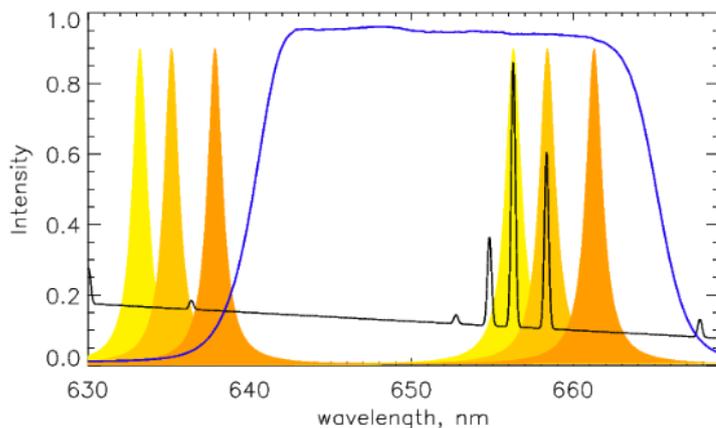


Рис. 3. Принцип работы перестраиваемого фильтра. Черным изображен спектр галактики с яркими линиями $H\alpha$ и $[N II]$. Оранжевым показаны профили пропускания интерферометра Фабри-Перо, настроенного для наблюдения в двух эмиссионных линиях и в континууме. Синим цветом показана кривая пропускания среднеполосного фильтра, выделяющая только один порядок интерференции. Рисунок из работы [17].

В настоящей работе используются данные с фотометра MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines), который был установлен в CAO РАН в сентябре 2017 года [17]. Уникальный прибор компонует в себе сканирующий интерферометр Фабри-Перо, работающий в режиме перестраиваемого фильтра (tunable filter), и среднеполосный светофильтр для наблюдений линий в диапазоне $4600\text{-}7500 \text{ \AA}$. Для изучения свойств газа в туманности, например: электронной температуры T_e , электронной плотности n_e , металличности $[\frac{Z}{H}]$, требуется добиться спектрального разрешения, позволяющего полноценно рассмотреть две соседние эмиссионные линии (например, дублет ионизированной серы $6716, 6731 \text{ \AA}$). Это реализуется благодаря малому порядку интерференции и относительно большому расстоянию между соседними порядками в требуемом диапазоне [17]. На данный момент с помощью MaNGaL получены изображения туманности в линиях дублета $[S II]$, $H\alpha$, $H\beta$ и $[N II]$, результаты наблюдений опубликованы в работе [18]. Стоит уточнить, что центральная длина волны пропускания фильтра меняется по

полю зрения, что приводит к понижению яркости объекта по краям изображения. А так же, при сравнении пары целевых спектров туманности с изображениями с MaNGaL была найдена дополнительная систематическая ошибка $\approx 10\%$ в интенсивности, которую в дальнейшем планируется учесть в виде нормировочного множителя.

2.5. Программное обеспечение Cloudy

В работе используется программа Cloudy [1] для моделирования спектров туманностей и их физических величин. На ввод в неё можно подавать параметры центральной ионизирующей звезды и различные физические условия. Чтобы упростить ввод и интерпретирование данных вывода, используется вспомогательная библиотека PyCloudy [19] для языка Python. С помощью этих технических средств формируется модель для сравнения с наблюдательными данными. Данный подход достаточно актуален, например в работе [10] наглядно показано использование Cloudy для вычисления зависимости электронной плотности и электронной температуры по индикаторам. В работе [20] изучают различия, вызванных включением взаимодействующих двойных звезд в звездную популяцию. Для различных областей H II сравнивается эмиссия в запрещённых линиях, рассчитанная с помощью Cloudy с наблюдаемой. Cloudy имеет сложную структуру и включает в себя огромное количество файлов, отвечающих за разные аспекты физики. В следующих подразделах описаны основные физические особенности и ограничения использования данного ПО [21].

Геометрия

При замкнутой геометрии считается, что облако газа вокруг звезды полностью покрывает её со всех сторон. Сторона облака, обращенная к источнику внешнего поля излучения (в нашем случае к центральной ионизирующей звезде), является освещенной стороной облака газа. Она обычно более горячая и сильнее ионизированна, чем дальняя сторона. На рисунке 4 представлены поля излучения, учитывающиеся в Cloudy. Диффузное по-

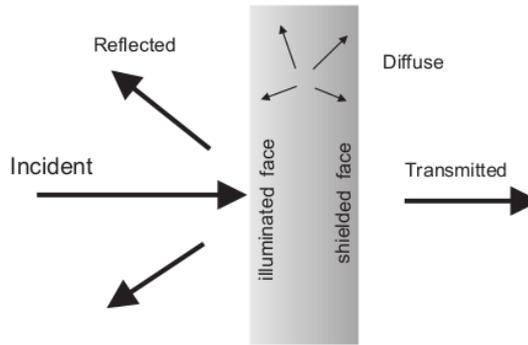


Рис. 4. Несколько полей излучения, которые входят в расчеты Cloudy

ле излучения - это поле излучения, испускаемое газом и зернами внутри туманности, например континуумы Лаймана, Бальмера или двухфотонные континуумы, испускаемые водородом. Для туманностей основным вкладом является излучение ионизирующей звезды. В результате в фотоионизированном облаке диффузные поля могут быть выражены при расчётах приближениями более низкого порядка, чем в звездной атмосфере.

Внутренним радиусом туманности r_{in} определяется расстояние от центра ионизирующей звезды до освещенной стороны облака газа, внешним радиусом r_{out} - расстояние до дальнего края облака, которое условно можно считать радиусом Стрёмгрена.

Физические допущения

Газ не находится в равновесии, но предполагается, что атомные процессы происходят намного быстрее, чем другие изменения в системе. То есть предполагается, что область достаточно стара, для того чтобы атомные процессы стали устойчивыми во времени.

Коэффициенты скорости, описывающие коллизионные эффекты охлаждения, например при столкновительной рекомбинации, должны быть надёжно теоретически рассчитаны. Для некоторых таких линий не имеющих точно рассчитанную силу столкновения, используются аппроксимации в Cloudy. В данном коде используется база данных поперечных сечений фотоионизации основанной на аналитических приближениях [22] проекта

[23] с погрешностью около 10% [21]. Значения коэффициентов диэлектронной рекомбинации (с промежуточными автоионизационными состояниями с возбуждением нескольких электронов) для многих реакций точно не рассчитаны, что тоже вносит некую ошибку в вычисления.

В Cloudy плотность водорода n_H считается следующим образом:

$$n_H = n(H^0) + n(H^+) + 2n(H_2) + \sum_{other} n(H_{other}) [cm^{-3}] \quad (2)$$

где $n(H_{other})$ представляет собой H во всех других водородсодержащих молекулах. Столбцовая плотность водорода N_H определяется как:

$$N_H = \int n_H f(r) dr [cm^{-2}] \quad (3)$$

где $f(r)$ - “filling factor”, характеризующий неоднородность среды на направлении r . Для облака газа, имеющего столбцовую плотность водорода выше обратного томсоновского сечения σ_T^{-1} , принят термин Комптоновски толстая среда:

$$N_H \geq \sigma_T^{-1} \quad (4)$$

Cloudy не обсчитывает корректно слишком оптически плотную для рассеяния электронов среду.

Электроны в подсчётах считаются нерелятивистскими.

Ионизационный параметр U задаётся как:

$$U = \frac{Q(H)}{4\pi r_{in}^2 n_H c} \quad (5)$$

где $Q(H)[s^{-1}]$ - это число ионизирующих водород фотонов, испускаемых центральным объектом. Одинаковый параметр U для моделей с различной плотностью фотонов и газов даёт гомологические соотношения между ними в пространстве параметров.

3. Прделанная работа

3.1. Построение модели

Геометрия

Задаётся сферичекая геометрия. Cloudy в таком случае учитывает ионизацию диффузными континуумами и линиями, возникающими на дальней стороне туманности из-за центрального объекта, а не ослабляет ионизирующий континуум чистыми рассеивающими помутнениями, такими как рассеяние электронов, обратное рассеяние зернами или рэлеевское рассеяние. Эта опция обычно устанавливается, когда газ почти полностью покрывает источник континуума. По умолчанию задаётся расширение туманности означает, что линейные фотоны, выходящие из освещенной грани облака, Доплеровски смещены от линий поглощающего материала на дальней стороне оболочки. Такой эффект будет иметь место, если скорость расширения превышает ширину Доплера на большие величины.

Существует возможность постановки задачи с неоднородностями в заполнении газом и выставление более или менее заполненной среды. Данная возможность реализуется так называемым “filling factor”, определяемым обычно как объемное отношение плотного к разреженному газу. В этой работе данный параметр - единичная матрица. Данный параметр также можно варьировать для построения в дальнейшем более сложных моделей объекта. Например, в статье [24] описана модель, в которой есть сгустки оптически толстого газа. Она объясняет низкую степень ионизации некоторых областей II, посредством допущения вылета значительной доли фотонов, генерирующихся ионизирующими звездами, за границы туманности.

Внутренний радиус, то есть расстояние от центра туманности на которое уносится газ звёздным ветром во всех построенных моделях далее:

$$r_{in} \approx 0.01r_{out} \quad (6)$$

где r_{out} - внешний радиус туманности. Такие оценки $[0.1r_{out}; 0.01r_{out}]$ для внутреннего радиуса физически корректны для моделирования областей

Н II и встречаются в многих статьях: [25], [26], [27], [28] Внешний радиус можно оценить как радиус Стрёмгрена:

$$r_{out} \approx r_{st} \quad (7)$$

$$r_{st}^3 = \frac{3Q}{4\pi(n_H)^2\alpha_B} \quad (8)$$

где α_B - коэффициент спонтанной радиационной рекомбинации на все уровни выше первого (рекомбинация на основной уровень вызывает испускание нового Лайман-кванта с $\lambda < 912\text{Å}$, который ионизирует другой атом водорода и таким образом число ионизованных атомов не меняется), $(n_H)^2 = n_e n_p$ (т.е. $n_p \approx n_e \approx n_H$), $Q(H)$ - число ионизирующих водород фотонов, испускаемых центральной звездой в области. В области Sh2-235 центральный источник ионизации - это звезда BD+35°1201. Она имеет спектральный класс O9.5 V [29]. В книге [11] приводится таблица 2.1, в которой коэффициент α_B посчитан для областей ионизованного водорода с различной температурой, а также в таблице 2.3 приведено значение логарифма числа ионизирующих фотонов от звезды спектрального класса O9.5 V. Радиус сферы Стрёмгрена оценён, исходя из приведённых в этом источнике параметров:

$$\log Q(H) = 48.38 \quad \alpha_B = 2.59 * 10^{-13} [cm^3 s^{-1}] \quad r_{st} \approx 6.05 * 10^{18} [cm] \quad (9)$$

Химический состав

Так как обилие тех или иных химических элементов в туманности довольно сильно влияет на результаты вычислений спектров [28], требуется подойти довольно ответственно к выбору обилия элементов в объекте Sh2-235, но при этом не увеличивать количество параметров модели (чтобы в дальнейшем при оптимизации модель могла хорошо обобщать закономерности и не было бы грубо говоря превышения точности). Поэтому можно задать для расчётов сразу металличность, т.е. отношение обилий элементов, тяжелее He к солнечному обилию этих же элементов. Солнечное обилие приведено в базе данных Cloudy, в 2010 году в ПО были добавлены результаты статьи [30]. В работе [4] встречаются интересующие нас значения, для

удобства задания в Cloudy они пересчитаны в требуемый формат:

$$\log \frac{n(S)}{n(H)} \approx -5.08 \quad \log \frac{n(N)}{n(H)} \approx \log \frac{n(N^+)}{n(H^+)} \approx -4.44 \quad \log \frac{n(O)}{n(H)} \approx -3.58 \quad (10)$$

Отсюда можно оценить среднюю металличность элементов, как ≈ 0.57 от солнечной металличности.

В заданных параметрах модели так же указывается опция отсутствия молекул, что естественно влияет на подсчёт общей плотности водорода.

Технические подробности

Из одномерной модели, которую считает ПО Cloudy, с помощью библиотеки PyCloudy построен куб данных со стороной размерностью 64. Таким образом получается сферическая туманность при одномерной модели. Интенсивность в линиях считается интегральной по лучу зрения. Для построения радиального профиля наблюдаемой интенсивности, используется пересчёт экваториальных координат каждого пикселя в расстояние до звезды в угловых секундах:

$$r = \sqrt{((\alpha - \alpha_0)\cos(\delta - \delta_0))^2 + (\delta - \delta_0)^2} \quad (11)$$

а радиальный профиль интенсивности модели интерполируется на все значения наблюдаемого радиуса. Таким образом происходит визуальное сравнение радиальных профилей интенсивности, построенных в настоящей работе.

3.2. Критерий сравнения χ^2

В астрофизике часто в роли критерия сравнения модели и наблюдений выступает χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N \left(\frac{y_n - f(\mathbf{x}_n; \Theta)}{\sigma_n} \right)^2 \quad (12)$$

где $f(\mathbf{x}_n; \Theta)$ - модель с параметрами Θ сопоставляется N значениям данных y_n , промеренных с Гауссовыми ошибками σ_n в точках \mathbf{x}_n . [31] Минимизация данной оценки в случае Гауссова распределения ошибок на каждом

пикселе ПЗС матрицы, максимизирует функцию правдоподобия. Результирующая неопределенность в знании величины тока фотодетектора - это так называемый дробовой шум, подчиняющийся распределению Пуассона. В данной работе можно сказать, что шум в каждом пикселе - это такой шум. При большом числе детектируемых фотонов по закону больших чисел распределение шума становится нормальным. [32] В данной работе вводится статистический вес пикселей $\frac{1}{r_n}$. Чем дальше от центра туманности - тем с меньшим весом учитываются пиксели. Такой выбор модификации χ^2 вызван увеличением количества сравниваемых пикселей пропорционально r_n , где n - номер рассматриваемой окружности пикселей от центра к краю туманности. Таким образом далее рассматривается оценка правдоподобия:

$$\chi_{r,sum}^2 = \sum_{n=1}^N \frac{(y_n - f(\mathbf{x}_n; \Theta))^2}{(\sigma_n)^2(r_n)} \quad (13)$$

3.3. Маскировка изображений

Первым делом было замечено, что фон туманности имеет в среднем больше отрицательных значений в обработанных спектрах, что является аномальной ситуацией, поэтому в дальнейшем было проверено состояние данных в среднем в умеренно яркой части Sh2-235. В среднем значение потока в этих частях больше 0, значит следует по возможности учитывать в оценке χ^2 как можно меньше пикселей фона. Далее целесообразно было вырезать круг радиусом $20''$ вокруг центральной звезды из изображений, так как это самый яркий объект в области и из-за этого могут появляться артефакты в данных.

Следующим шагом стало сравнение по критерию χ_r^2 эмиссии построенной модели в пяти указанных линиях с картами интенсивности, полученными с наблюдений объекта. На них были заметны отдельные “битые пиксели”. Идентифицировать все из них со звёздами не удалось, но при детальном изучении данных, оказалось, что в этих пикселях отношение сигнал-шум (SNR) является также аномальным. Существует изменение полуширины функции пропускания фильтра: по полю зрения имеются раз-

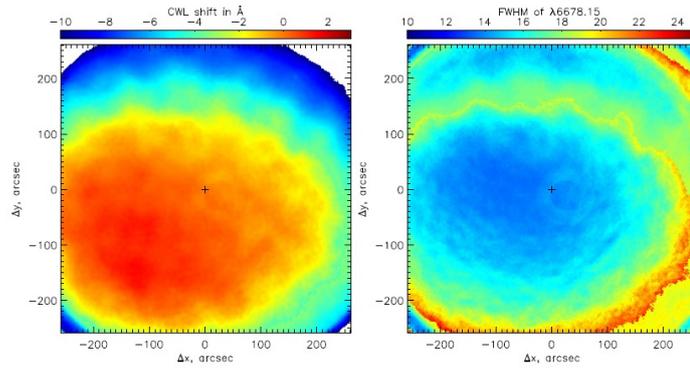


Рис. 5. CWL, FWHM для линии лампы, по которой калибровались данные Sh2-235 в линии [S II]. Крестиком обозначен центр поля зрения. Из-за особенностей фитинга спектров низкого разрешения есть некоторые резкие разрывы на карте FWHM

рывы FWHM внизу изображения и в правом верхнем углу 5. В этих местах во всех пяти линиях были зафиксированы дефекты изображения, можно сделать вывод, что их требовалось устранить перед непосредственной минимизацией χ_r^2 , используя общий критерий для всех пяти линий. Поэтому прописана маскировка по критерию качества данных $4 < \text{SNR} < 50$, $8\text{e-}16 [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{arcsec}^{-2}] < S < 1\text{e-}12 [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{arcsec}^{-2}]$, $8\text{e-}16 [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{arcsec}^{-2}] < N < 1\text{e-}12 [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{arcsec}^{-2}]$. Ограничения непосредственно на сигнал и на шум подбирались исходя из гистограммы пикселей в умеренно яркой части туманности, ближе к центру поля зрения. В этих областях на значения сигнала и шума: $S = 8\text{e-}16; 1\text{e-}12$, $N = 8\text{e-}16; 1\text{e-}12 [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{arcsec}^{-2}]$, приходились лишь края гистограммы интенсивности пикселей. С данной гистограммой можно ознакомиться в приложении к настоящей работе. Таким образом, данная маска не обрезает большую часть данных, поэтому не должна помешать сравнению наблюдательных данных и модели. На рисунке 7 показана карта χ_r^2 суммарно для всех имеющихся эмиссионных линий для одной из моделей с постоянной плотностью. Видно, что суммарная карта покрывает большую часть поверхности туманности, но при этом исключает аномальные значения данных.

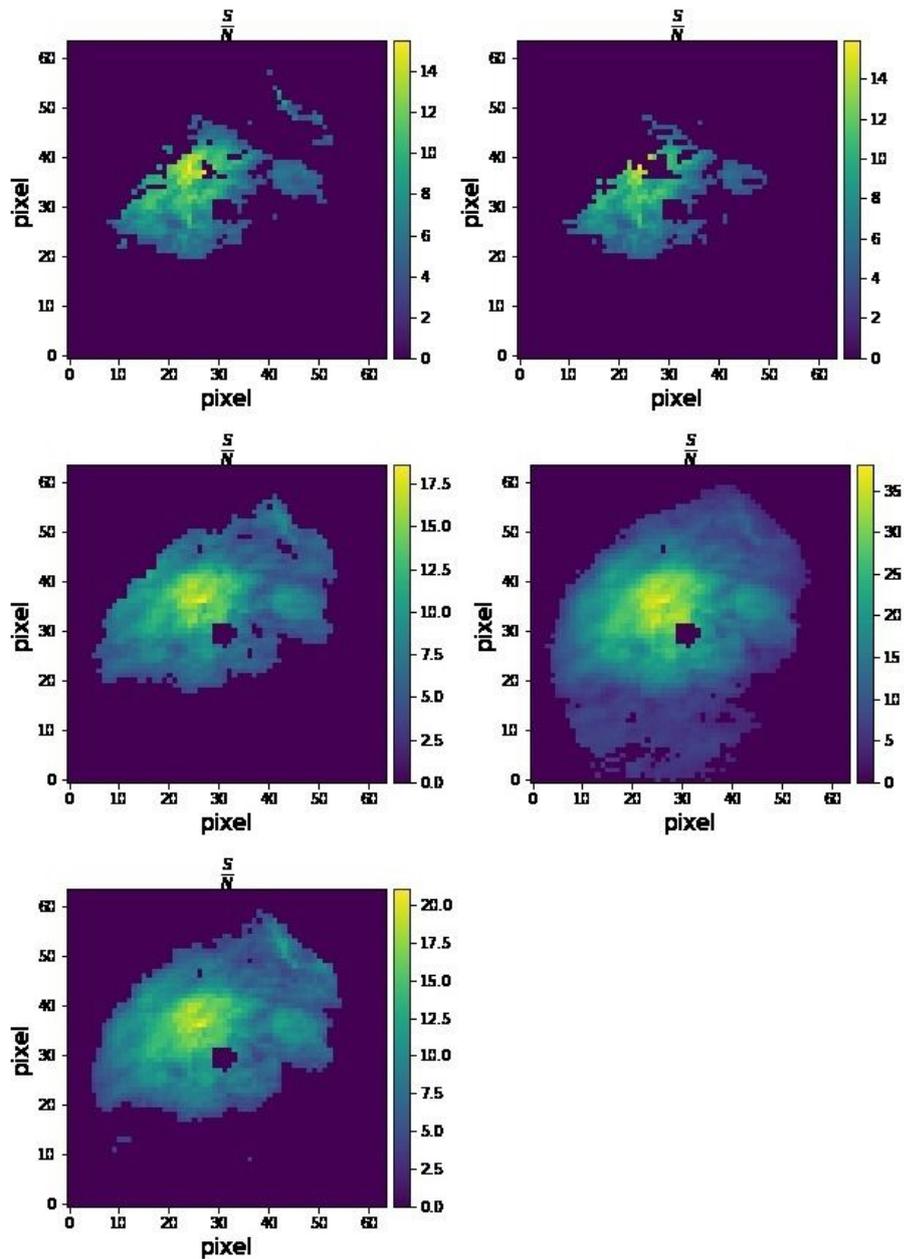


Рис. 6. SNR с маской для эмиссионных линий слева направо: $[S II](6717)$, $[S II](6731)$, $H\beta(4861)$, $H\alpha(6563)$, $[N II](6583)$. Тёмными пикселями указаны области, которые в дальнейшем не учитываются в сравнении модели и наблюдений

3.4. Минимизация χ^2

Следующей ступенью работы после построения суммарной для пяти линий карты $\chi_{r,sum}^2$ стала минимизация этого критерия, в допущении, что у нас только один свободный параметр - постоянная по объему плотность водорода. Таким образом получилось значение $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$. Порядок величины такой же как во многих работах, исследующих данный объект [18],

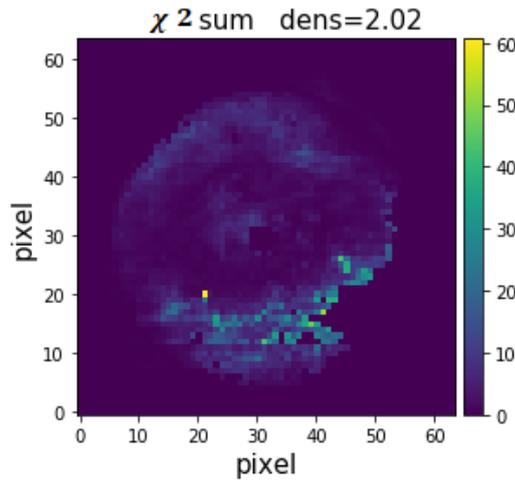


Рис. 7. Суммарный $\chi_{r,sum}^2$ для эмиссионных линий [S II](6717), [S II](6731), $H\beta$ (4861), $H\alpha$ (6563), [N II](6583). Нулевыми значениями $\chi_{r,sum}^2$ указаны области, которые в дальнейшем не учитываются в сравнении модели и наблюдений

[16], что для очень приближённой модели - это является хорошей оценкой. А также получены карты 9 параметров металличности $\frac{Z}{Z_{\odot}}$ при оптимизи-

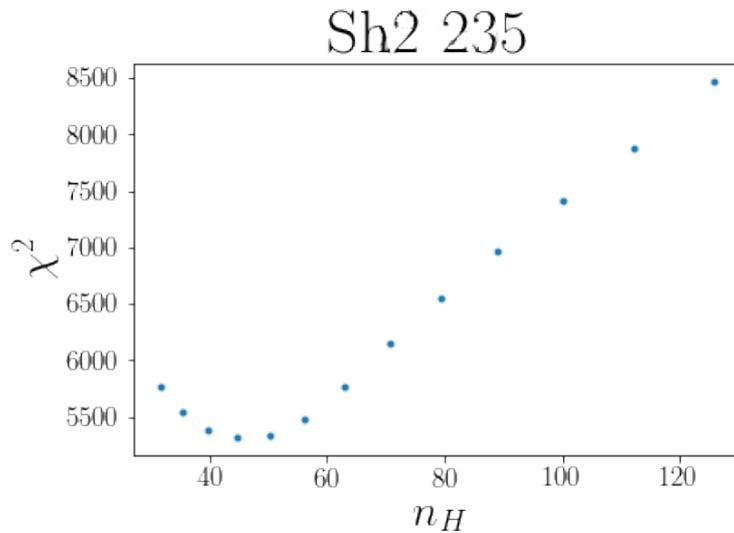


Рис. 8. Зависимость $\chi_{r,sum}^2$ от n_H . Здесь каждая точка - отдельная модель, посчитанная Cloudy.

рованной постоянной плотности водорода, где в каждой точке цветом указано значение $\chi_{r,sum}^2$. На первой карте можно заметить, что в большом диапазоне значений металличности (от $0.3 Z_{\odot}$ до $1.2 Z_{\odot}$) для значения рассчитанного на основе свежих публикаций и используемого ранее для всех моделей, наблюдается минимум $\chi_{r,sum}^2$. На второй карте визуализирован де-

тальнее промежутков значений (от $0.4 Z_{\odot}$ до $0.6 Z_{\odot}$), видно, что на самом деле значение металличности, которое было подобрано при формировании моделей усреднением по обилию трёх элементов (S, N, O), не является оптимальным для полученной с помощью минимизации $\chi_{sum,r}^2$ оптимальной плотности $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$. Поскольку расчёт $\chi_{sum,r}^2$ происходит по достаточно большому шагу значений металличности, можно только сделать вывод, что металличность $\frac{Z}{Z_{\odot}} \approx 0.5$ была бы оптимальнее других представленных значений для данной плотности. Таким образом, требуется увеличить раз-

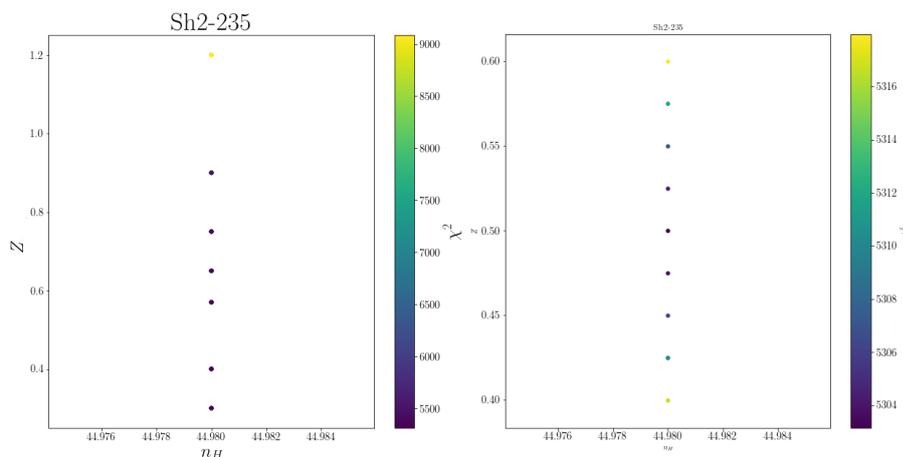


Рис. 9. Карты значений $\chi_{sum,r}^2$ для варьирования значений металличности $\frac{Z}{Z_{\odot}}$. Цветом указано значение $\chi_{sum,r}^2$ в каждой паре параметров.

мерность пространства параметров, в котором происходит минимизация $\chi_{sum,r}^2$, чтобы получить более согласованную модель. Это можно сделать в дальнейшем варьируя два параметра.

3.5. Сравнение индикатора для различных моделей

Поскольку данное исследование нацелено на получение выводов о внутренней структуре туманности с помощью наблюдаемых величин, интересным вопросом оказалось оценить плотность по индикатору отношения интенсивностей линий ионизованной серы, аналогично тому, что делается при помощи спектральных наблюдений областей H II в различных работах: [16], [18], [10]. В частности, важно будет ли каким-либо образом визуально заметен радиальный градиент плотности на карте индикатора $\frac{I_{[S II](6717)}}{I_{[S II](6731)}}$.

Для ответа на данный вопрос требовалось визуализировать индикатор $\frac{I_{[S II](6717)}}{I_{[S II](6731)}}$, а также интенсивности в представленных эмиссионных линиях в моделях с разным радиальным градиентом плотности. Было осуществлено сравнение их радиальных профилей с наблюдаемыми радиальными профилями. Чтобы построить различные модели, физическим является условие одинакового количества газа вокруг центральной звезды у всех моделей туманности. Ниже представлена таблица со значениями получившихся входных параметров моделей, учитывая данное условие.

Таблица 1. Параметры для моделей построенных с помощью Cloudy.

α	$\log(n_0[cm^{-3}])$	$r_{in}[cm]$	$r_{out}[cm]$
-1	3.5	8.55e16	7.15e18
0	1.653	6.05e16	9.02e18
1	0	1.504e17	8.88e18
2	3	3.294e16	8.78e18

Приведённые в таблице оценки параметров выполнены с помощью следующих ниже уравнений:

$$N_2(n) = N_1(n_{const}) \quad n = n_0 \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^\alpha \quad (14)$$

$$\frac{4n_0}{(\alpha + 3)r_{in,2}^\alpha} (r_{out,2}^{\alpha+3} - r_{in,2}^{\alpha+3}) = \frac{4}{3}n_{const} (r_{out,1}^3 - r_{in,1}^3) \quad (15)$$

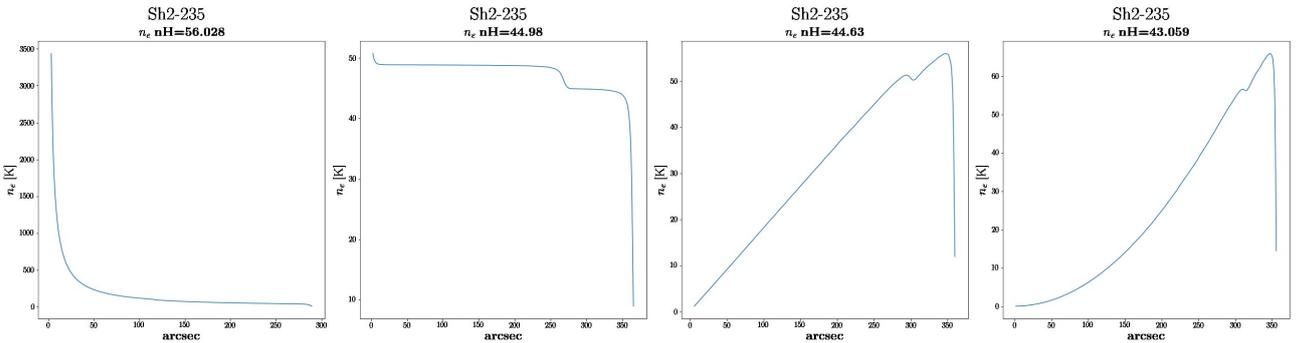


Рис. 10. Радиальные профили электронной плотности для моделей с градиентом плотности $\alpha = -1, 0, 1, 2$

Внешние радиусы (радиусы ионизованной зоны) у моделей на рисунке 12 практически совпадают, равенство масс газа выполняется. Рассмотрев

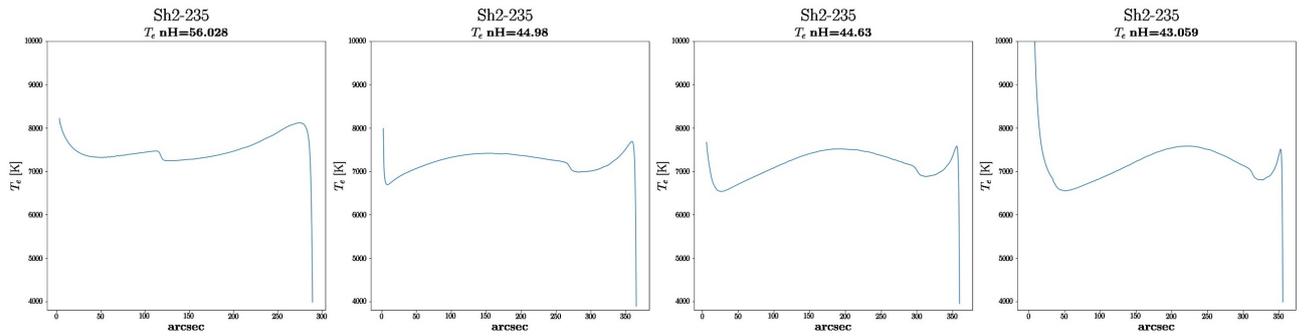


Рис. 11. Радиальные профили электронной температуры для моделей с градиентом плотности $\alpha = -1, 0, 1, 2$

карты, можно сформировать умозаключение, что по индикатору отношения интенсивностей в дублете ионизованной серы, нельзя сделать выводов о градиенте плотности в данном объекте, и возможно в других подобных объектах.

А так же, визуально заметно на рисунке 13, что наблюдения туманности Sh2-235 лучше всего описываются моделью с отрицательным радиальным градиентом плотности.

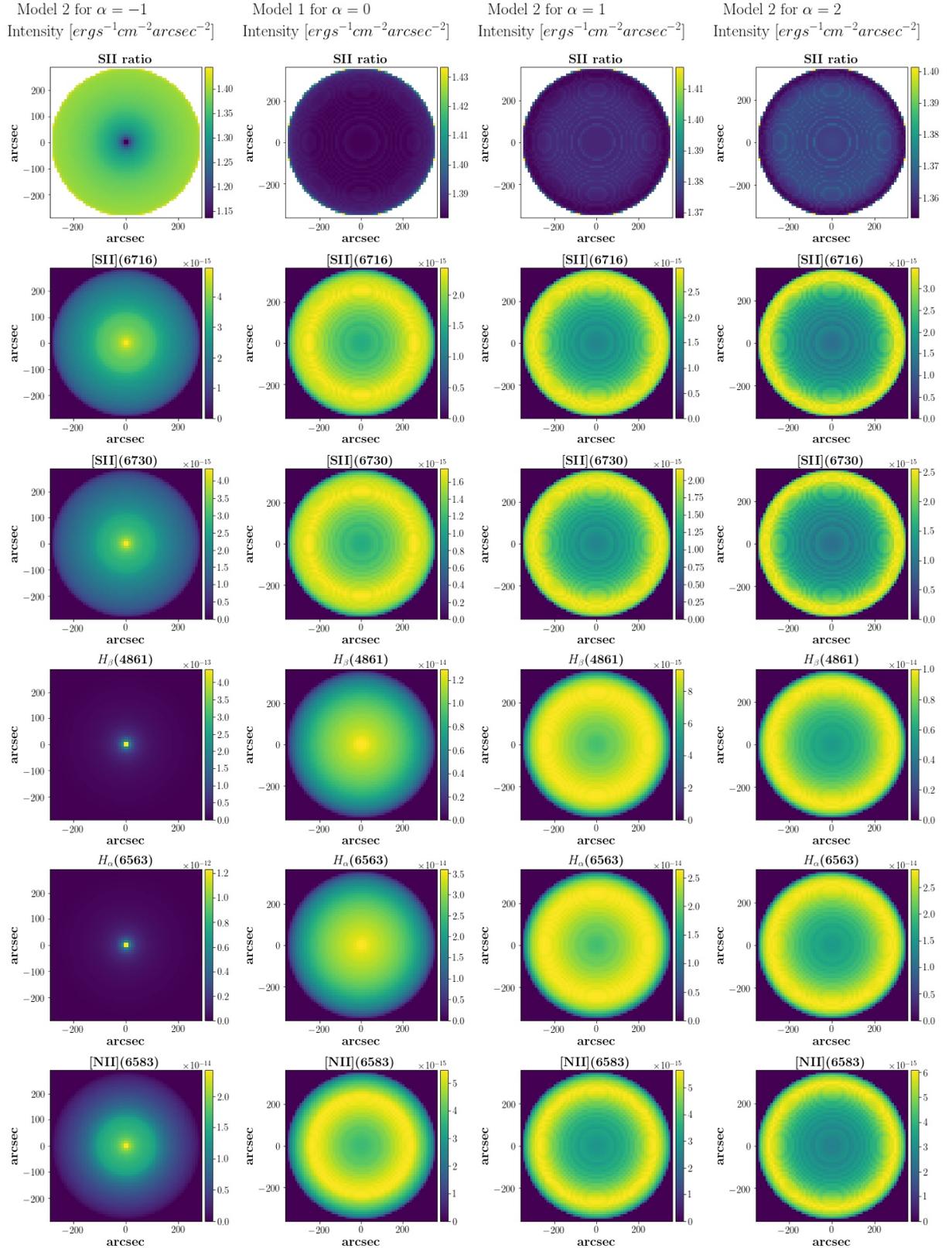


Рис. 12. Карты интенсивности в эмиссионных линиях: [S II](6717), [S II](6731), $H_{\beta}(4861)$, $H_{\alpha}(6563)$, [N II](6583) для моделей с разным показателем степенного закона плотности, а также карта отношения интенсивностей для дублета ионизованной серы. $\frac{I_{[\text{S II}](6717)}}{I_{[\text{S II}](6731)}}$

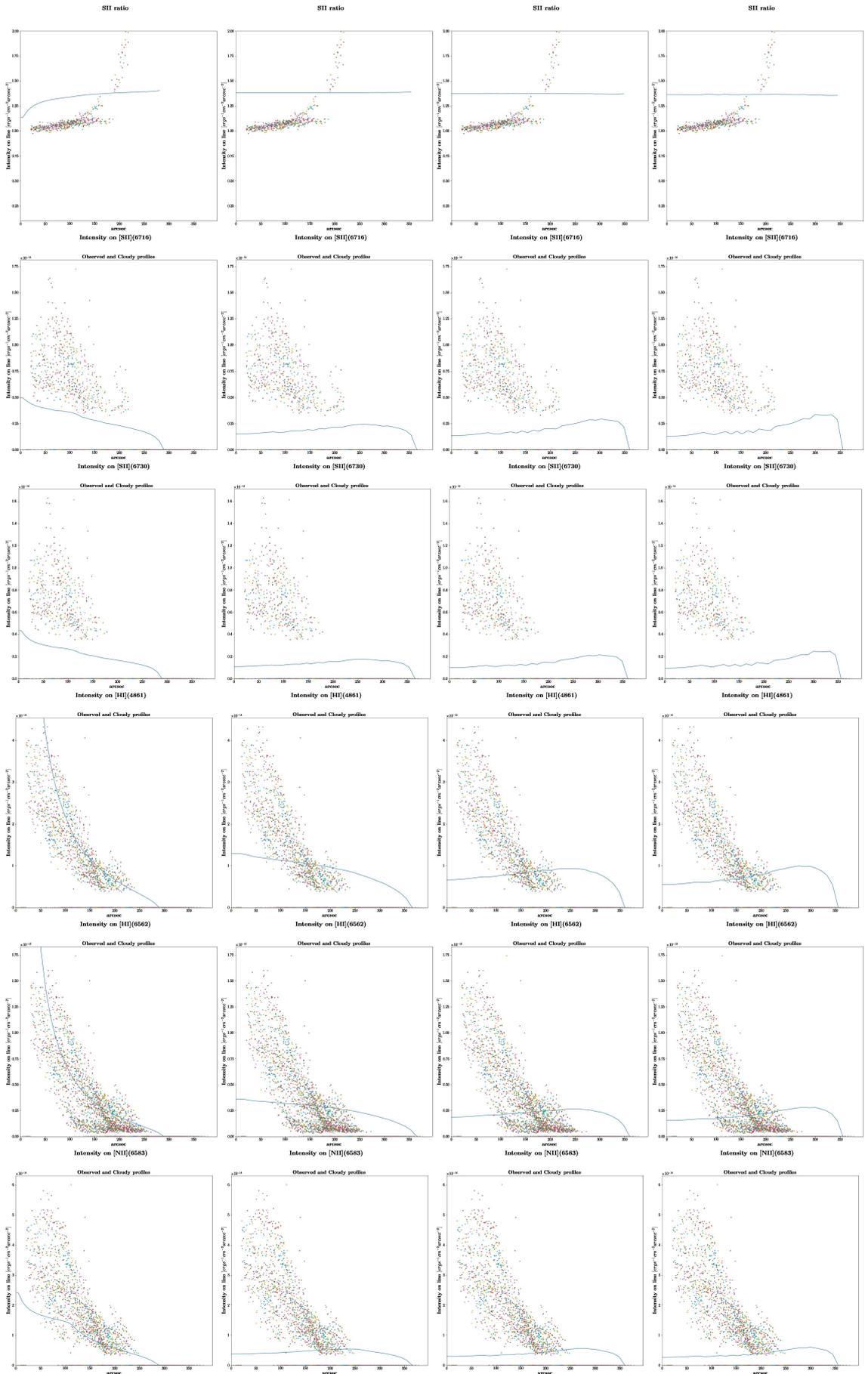


Рис. 13. Радиальные профили интенсивности в эмиссионных линиях: $[S II](6717)$, $[S II](6731)$, $H_\beta(4861)$, $H_\alpha(6563)$, $[N II](6583)$ для моделей с разным показателем степенного закона плотности, а также карта отношения интенсивностей для дублета ионизованной серы $\frac{I_{[S II](6717)}}{I_{[S II](6731)}}$. Точками указаны значения из наблюдений

4. Обсуждение результатов

В настоящей работе была представлена оценка средней плотности водорода, полученная на основании минимизации критерия сравнения модели с наблюдательными данными. Поскольку минимизация происходила для игрушечной модели туманности, хотя и учитывающей при этом её химический состав, получившаяся оценка несколько ниже, чем средняя плотность в других работах (например: [16], [4]), но по порядку величины совпадает. Так же стоит взять во внимание тот факт, что не учтена нормировочная константа для интенсивностей, получающаяся из сравнения наблюдений MaNGaL с целевыми спектрами туманности, которую в дальнейшем следует включить в расчёт. Можно также включить в расчёт наличие пыли в данной области H II, так как по представленным наблюдениям были сделаны оценки излучения пыли G0 в работе [18].

А так же, была проделана оптимизация модели с постоянной плотностью водорода $n_H \approx 45 [cm^{-3}]$ по параметру металличности. Получено оптимальное значение металличности для данной модели $\frac{Z}{Z_\odot} \approx 0.5$. Немного более низкое значение, чем ранее полученное с помощью усреднения обилия элементов (O, N, S) из работы [4], может быть объяснено в том числе неточностью электронной температуры в работе [4], измеряемой по запрещённым линиям [O III], [N II].

В работе [2] указано, что в методе измерения обилия кислорода по электронной температуре существует систематическая недооценка обилия, когда существенны большие флуктуации электронной температуры. Таким образом одним из направлений дальнейшего исследования, возможно, следует сделать сравнение радиальных профилей электронной температуры для моделей с различной металличностью и удостовериться существует ли такая зависимость.

Стоит понимать, что оптимизированная модель не учитывала радиальный градиент плотности в данной области. Однако, проделана визуализация радиальных профилей интенсивности для моделей с разным радиальным градиентом плотности, в которых масса туманности совпадает

с массой в оптимизированной модели. Лучше всего наблюдения Sh2-235 описываются отрицательным радиальным градиентом плотности водорода в туманности. Из этого следует вывод о том, что в дальнейшем требуется произвести работу по оптимизации моделей с различным отрицательным показателем степени α степенного закона плотности, варьируя плотность водорода n_0 на внутреннем радиусе и внутренний радиус r_{in} при различных массах туманности.

Основная цель настоящей работы была в изучении влияния внутренней структуры туманности в модели на наблюдаемые величины. Было установлено, что визуально можно оценить существует ли радиальный градиент плотности водорода по запрещённым линиям, но легче всего это сделать по линиям водорода $H\alpha$, $H\beta$ соответственно. Так как в этих линиях интенсивность резко падала от центра области H II к краю, закономерно падению плотности водорода к краю объекта в модели с отрицательным градиентом плотности. А в моделях с положительным градиентом плотности падение было менее резким. По индикатору электронной плотности из наблюдений сделать существенных выводов скорее всего не удастся, так как обычно измерение этой величины делается с достаточно большой погрешностью вблизи центральной звезды, а для модели с отрицательным градиентом плотности существует значительное уменьшение значения индикатора именно вблизи центрального объекта туманности. В моделях же с положительным градиентом плотности, такой картины не наблюдается, индикатор имеет практически постоянное значение от центра к краю туманности. В представленных выводах можно убедиться, обращаясь к рисунку 13.

5. Заключение

В заключении настоящей работы хотелось бы сформировать общую картину основных проделанных шагов в ходе её осуществления:

1. Построена одномерная модель для туманности Sh2-235, продолженная в виде сферы. Металличность, задаваемая в модель, оценена основываясь на актуальных публикациях по данному объекту.
2. Произведена оптимизация модели по параметру плотности водорода n_H в области с помощью модифицированного критерия сравнения с наблюдениями $\chi_{sum,r}^2$. Таким образом получена оценка $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$, не противоречащая опубликованным различными авторами значениям.
3. На основе этой оценки построены модели с таким же количеством вещества в туманности для различных значений радиального градиента плотности водорода в туманности. Выполнены сравнение индикатора электронной плотности для моделей с различным радиальным градиентом плотности с его наблюдаемым значением, а также сравнение интенсивностей моделей в линиях [S II](6717), [S II](6731), $H_\beta(4861)$, $H_\alpha(6563)$, [N II](6583) с наблюдаемыми.
4. Сделан вывод о влиянии радиального градиента плотности водорода на наблюдения (см. раздел Обсуждение результатов). Установлено, что для описания наблюдений туманности Sh2-235 наиболее подходит модель со спадающей плотностью водорода от центра объекта к его краю.
5. Для модели с $n_H \approx 45 \text{ cm}^{-3}$ проведена оптимизация металличности и получено значение $\frac{Z}{Z_\odot} \approx 0.5$.

В дальнейшем будет продолжена работа для поиска наблюдаемых индикаторов открывающих нам больше возможностей для изучения внутренней структуры областей ионизированного водорода.

6. Благодарности

Выражаю признательность Моисееву Алексею Валерьевичу за проведение наблюдений на телескопе САО РАН, используя уникальный фотометр MaNGaL и получение изображений туманности Sh2-235.

Всем преподавателям кафедры проблем физики и астрофизики, в особенности Бескину Василию Семёновичу, за полученные знания и обозначение необходимого направления вектора развития.

Отдельную благодарность хотелось бы выразить моему научному руководителю Боли Полу Эндрю за образчик профессионализма, ответственности и невозмутимости.

Также я очень благодарна своим родителям и коллегам, которые оказывали моральную поддержку в процессе написания дипломной работы.

Список литературы

1. Ferland G. J., et al. The 2013 release of Cloudy // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*. Vol. 49. P. 137.
2. Wang L.-L., Luo A.-L., Hou W. et al. Spectroscopic Identification and Chemical Distribution of H II Regions in the Galactic Anti-center Area from LAMOST // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2018. Vol. 130.
3. Balser D. S., et al. H II region metallicity distribution in the Milky Way disk // *The Astrophysical Journal*. 2011.
4. Arellano-Cordova K. Z., Esteban C., Garcia-Rojas J., Mendez-Delgado J. The Galactic radial abundance gradients of C, N, O, Ne, S, Cl and Ar from deep spectra of H II regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020.
5. Kirsanova M., Sobolev A. M., Thomasson M. et al. Star formation around the H II region Sh2-235 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2008. Vol. 388. P. 729–736.
6. Постнов К.А., Засов А.В. Курс общей астрофизики // Фрязино. 2015. P. 128–130, 398–400.
7. Bok B. J., Reilly E. F. Small Dark Nebulae // *Astrophysical Journal*. 1947. Vol. 105. P. 255.
8. Strömberg B. The Physical State of Interstellar Hydrogen // *Astrophysical Journal*. 1939. Vol. 89. P. 526.
9. Бочкарев Н.Г. Физика Космоса // Москва. 1986.
10. Proxauf B., et al. Upgrading electron temperature and electron density diagnostic diagrams of forbidden line emission // *Astronomy & Astrophysics*. 2014. Vol. 561.
11. Osterbrock D. E., Ferland G. J. *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* // University Science Books. 2006. Vol. Second Edition.
12. Пилюгин Л.С. Ионизованный газ в галактиках: физическое состояние и химический состав // *Наукова думка*. 2012.
13. Fich M., Blitz L. Optical H II regions in the outer Galaxy // *Astrophysical*

- Journal. 1984. Vol. 279. P. 125–135.
14. <http://wise.ssl.berkeley.edu>.
 15. Dewangan K., et al. A multi-wavelength study of star formation activity in the S235 complex // *The Astrophysical Journal*. 2016. Vol. 819. P. 66.
 16. Boley P. A., et al. Massive stars in the Sh2-235 star-forming region. 2020.
 17. Перепелицын А.Е., Моисеев А.В. Редуктор светосилы с перестраиваемым интерференционным фильтром для малых и средних телескопов // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулково*. 2018. Vol. 218. P. 65–75.
 18. Kirsanova M., Boley P., Moiseev A. et al. 3D structure of the H II region Sh2-235 from tunable filter optical observations // <https://arxiv.org/abs/1911.04551>. 2020.
 19. Morisset C., et al. Cloudy 3D, a new pseudo-3D photoionization code // *Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond, Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium 234*. 2006. P. 467–468.
 20. Xiao L., Stanway E. R., Eldridge J. J. Emission-line diagnostics of nearby H II regions including interacting binary populations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 477, no. 1. P. 904–934.
 21. Hazy: a brief introduction to CLOUDY C17 // www.nublado.org. 2017.
 22. Verner D. A., Ferland G. J., Korista K. T., Yakovlev D. G. Atomic Data for Astrophysics. II. New Analytic FITS for Photoionization Cross Sections of Atoms and Ions // *Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 465. P. 487.
 23. Seaton M. Atomic data for opacity calculations: I. General description // *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*. 1987. no. 20. P. 6363–6378.
 24. Giammanco C., Beckman J. E., Zurita A., Relaño M. Propagation of ionizing radiation in H II regions: The effects of optically thick density fluctuations // *Astronomy & Astrophysics*. 2004. no. 424. P. 877–885.
 25. Dinerstein H. L., Shields G. A. Reassessing the primordial helium abundance: new observations of NGC 4861 and CG 1116 + 51 // *The Astrophysical Journal*. 1986. Vol. 311. P. 45–57.
 26. Copetti M. V. F. Electron temperature fluctuations in H II regions. The feasibility of t^2 estimates from point-to-point observations // *Astronomy*

- & Astrophysics. 2006. Vol. 453. P. 943–947.
27. Viegas S. M., Gruenwald R., Steigman G. Ionization corrections for low-metallicity H II regions and the primordial helium abundance. 2000. Vol. 531. P. 813–819.
 28. Morisset C., Schaerer D., Mart´ın-Hern´andez N. L. et al. A photoionization model of the compact H II region G29.96-0.02 // *Astronomy & Astrophysics*. 2002. no. 386. P. 558–570.
 29. Georgelin Y. M., Georgelin Y. P., Roux S. Observations de nouvelles regions H II galactiques et d’etoiles excitatrices // *Astronomy & Astrophysics*. 1973. Vol. 25. P. 337–350.
 30. Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., Scott P. The chemical composition of the Sun // *Astrophysics and Space Science*. 2010. Vol. 328. P. 179–183.
 31. Andrae R., Schulze-Hartung T., Melchior P. Dos and don’ts of reduced chi-squared // <https://arxiv.org/pdf/1012.3754>. 2010.
 32. ПрэттУ. Цифровая обработка изображений // Мир. 1982. Vol. 2. P. 13.6.1.

7. Приложения

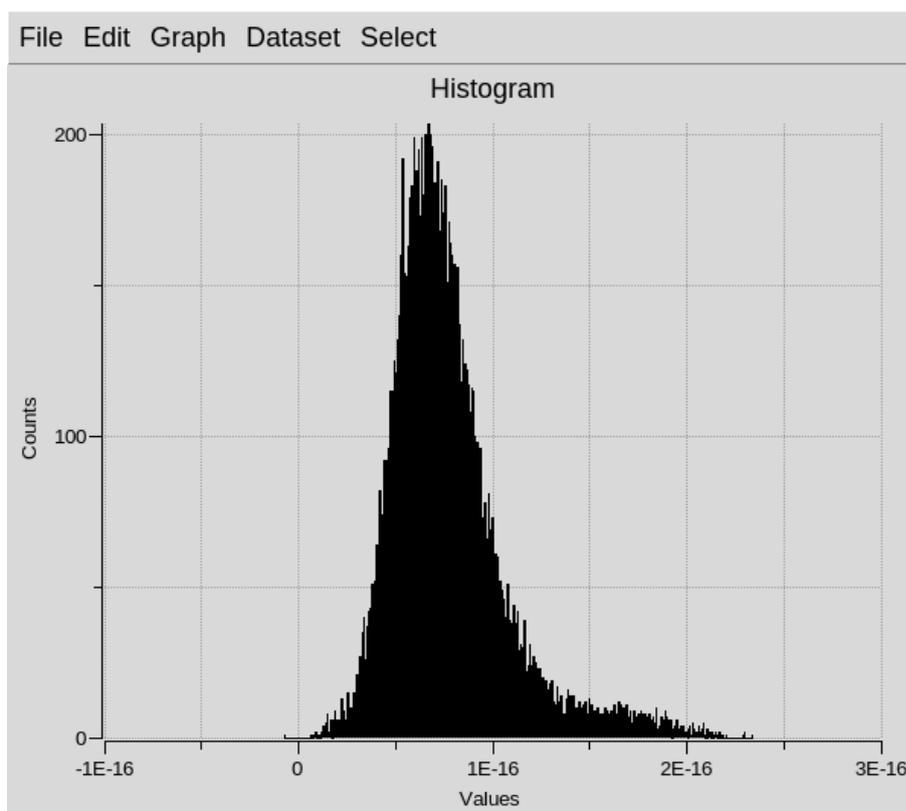


Рис. 14. Гистограмма пикселей в умеренно яркой части туманности, ближе к центру поля зрения для линии [S II]