

Планетарные туманности

Планетарные туманности - система из звезды, называемой ядром туманности, и симметрично окружающей ее светящейся газовой оболочки, были открыты англ. астрономом В. Гершелем ок. 1783 г.

Оболочка П. т. и её ядро генетически связаны. Оболочка П. т. - полностью ионизованное газовое образование с электронной темп-рой $\approx 10-12$ тыс. К, хим. состав к-рого соответствует ср. космич. обилию элементов. Небольшая примесь пылевых частиц ответственна за интенсивное излучение П. т. в далёкой ИК-области спектра. П. т. свойствен характерный эмиссионный спектр излучения, отличающийся от спектров галактич. диффузных туманностей большим возбуждением излучающих атомов и молекул. Наиболее интенсивные линии оптич. спектра - запрещённые спектральные линии ионов OIII (дублет с длинами волн 4959 и 5007 Å); наблюдаются линии CIV, OV и даже OVI (потенциал возбуждения 79 эВ). Радиоизлучение П. т. - тепловое; в нек-рых из них замечено слабое радиоизлучение молекул CO. Свечение оболочки возбуждается УФ-излучением ядра.

Ср. масса оболочки П. т. - ок. $0,1 M_{\odot}$. Осн. масса оболочки П. т. сосредоточена в плотной тороидальной структуре. Периферийная часть оболочки более разрежена, и образующий её газ менее возбуждён. Всё многообразие видимых форм П. т. возникает, вероятно, вследствие проекции тороидальной структуры на небесную сферу под разными углами.

Оболочки П. т. расширяются в окружающее пространство со скоростями 20-40 км/с под действием внутр. давления горячего газа. По мере расширения оболочка становится разреженной, её свечение ослабевает, и в конце концов она становится невидимой.

Длительность жизни П. т. в наблюдаемой фазе - ок. 20 000 лет. За это время их линейные радиусы возрастают в среднем от 0,015 до 0,15 пк и более, а ср. концентрация частиц уменьшается от $3 \cdot 10^6$ до менее чем $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Ядра П. т. представляют собой горячие звёзды раннего спектрального класса, претерпевающие значительные изменения за время жизни туманности. Непрерывные спектры ядер близки к спектру абсолютно чёрного тела. Темп-ры ядер обычно составляют 50-100 тыс. К. За время существования П. т. линейные радиусы ядра убывают от 10 до $0,03 R_{\odot}$, болометрической светимости - от $3 \cdot 10^4$ до $3 L_{\odot}$, а спектры изменяются от сложных эмиссионно-абсорбционных спектров звёзд типа Вольфа-Райе или Of до спектров субкарликов класса O. Ядра старых П. т. близки к белым карликам, но вместе с тем значительно горячее и ярче типичных объектов такого рода. Массы ядер определяются из косвенных соображений; считается, что они близки к $1 M_{\odot}$. Среди ядер встречаются двойные звёзды.

П. т. концентрируются к галактич. экватору и к направлению на галактический центр. По своим пространственно-кинематич. характеристикам они подобны объектам старой фракции молодого галактич. населения (населения I типа). Их полное число в Галактике может достигать неск. сотен тысяч.

Цель работы:

- 1) познакомиться со спектрами планетарных туманностей, определить эмиссионные линии каких элементов присутствуют в спектрах планетарных туманностей, оценить температуру родительской звезды исследуемых туманностей;
- 2) рассчитать бальмеровский декримент и построить карту распределения межзвездного вещества в галактике, считая, что все планетарные туманности расположены примерно на одном расстоянии от Земли;
- 3) по запрещенным линиям серы [SII] λ 6716Å и λ 6731Å определить электронную плотность среды, в которой образуются эмиссионные линии туманности, сравнить условия в исследуемых планетарных туманностях.

Файлы с данными:

1. Спектры планетарных туманностей
2. Атлас спектральных линий.
3. Файл для создания таблицы.
4. Страсбургский каталог планетарных туманностей.

Полезные ссылки:

<https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3>

<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2020/08/aa37998-20.pdf>

Теоретическое обоснование:

1. Оценка температуры центральной звезды планетарной туманности.

Планетарная туманность – светящийся газ (внешние оболочки атмосферы), выброшенный звездой средних масс ($0.8 - 8 M_{\odot}$). Туманность светится благодаря разогреву ультрафиолетовым и рентгеновским излучениям ядра родительской звезды. По закону Киргофа туманность будет иметь эмиссионный спектр и излучать в линиях тех элементов, которые содержатся в газовой оболочке.

Температура центральной звезды может быть от 30 000K до 100 000K, некоторые могут превосходить 200 000K. По закону Планка в зависимости от температуры звезды излучение в разной степени ионизирует атомы туманности: более тяжелые атомы требуют меньшей энергии для ионизации (имеют меньший потенциал ионизации) с внешних уровней, чем более легкие. Для ионизации с последующих уровней требуется больше энергии. В зависимости от температуры центральной звезды будет наблюдаться разная степень ионизации элементов. Для двух звезд с одинаковыми радиусами более горячая звезда будет ионизировать атомы с более низких уровней.

Следовательно, исследуя спектр планетарной туманности можно узнать степень ионизации атомов и сделать заключение о температуре родительской звезды.

2. Определение межзвездного поглощения.

Межзвездное поглощение, вызванное пылинками с размером порядка микрона,

больше влияет на голубую часть спектра, так как пылинки поглощают в голубой части спектра сильнее, чем в красной. В результате этого появляется отличие теоретического бальмеровского скачка от наблюдаемого. (Теоретические отношения $H_{\alpha}/H_{\beta} = 2.86$ и $H_{\gamma}/H_{\beta} = 0.47$.) У планетарной туманности, расположенной за облаком межзвездной пыли, будет наблюдаться отношение интенсивностей линий H_{α}/H_{β} больше теоретического 2.86 , а для H_{γ}/H_{β} -- меньше чем 0.47 . Чем больше пыли, тем больше будет отличие от теоретических расчетов. Таким образом, появляется возможность оценить количественно степень межзвездного покраснения и, следовательно, количество пыли между наблюдателем и туманностью.

3. Определение электронной плотности:

Все запрещенные линии формируются при переходах с метастабильных уровней. Вероятности таких переходов крайне малы ($10^{-7} - 10^1 \text{с}^{-1}$), и атомы на метастабильных уровнях могут находиться продолжительное время ($10^{-1} - 10^3 \text{с}$), если отсутствуют другие механизмы их перераспределения по энергетическим состояниям.

Необходимые физические условия имеют место в газовых туманностях, где роль ударных переходов незначительна вследствие низкой плотности среды.

Интенсивность запрещенных линий зависит от населённости метастабильных уровней и времени жизни электронов на этих уровнях. Дублет серы [SII] 6716 А, 6731А оказывается хорошим индикатором электронной концентрации среды. Эти линии образуются в определенных условиях.



Атом серы, у которого три валентных электрона на внешнем уровне, можно представить следующей схемой:

Внешние уровни - метастабильные и переходы между ними -- запрещенные. Исследуемый в работе дублет однократно ионизованного атома серы [SII] 6731, 6716 образуется при переходе с метастабильного уровня с близкими энергиями. Ионы и электроны в планетарной туманности движутся и испытывают столкновения. Энергии столкновений мала, чтобы выбить электрон, но достаточна, чтобы перевести его на более высокий уровень (на рис. перейти с нижнего уровня на метастабильные 3/2 и 5/2.). Эти уровни заселяется посредством ударов и имеют очень важные отличия, которые позволяют определять электронную плотность в туманности по отношению интенсивностей

соответствующих линий.

Первое отличие -- количество электронов, которое может содержаться на этом уровне. На уровне 5/2 может находиться 6 электронов, на 3/2 -- 4.

Второе отличие -- сколько времени электрон может находиться на этом уровне до спонтанного перехода вниз: на 5/2 уровне - 3846 с, на 3/2 - 1136 с.

Когда плотность газа очень мала ($< 100 \text{см}^{-3}$), тогда отношение интенсивности линий определяется заселенностью уровней. ($6/4 = 1.5$)

В плотной среде ($> 10000 \text{см}^{-3}$) столкновения часты и становится важным время жизни на уровне. Поэтому в этих условиях $I(6716)/I(6731) = 0.44$.

Таким, образом по отношению линий можно определить более точно электронную плотность области, откуда приходит излучение (рис.).

Работу можно выполнять в среде MIDAS, IRAF, Python.

Литература.

<http://www.astronet.ru/db/msg/1189219>

«Звезды» – серия Астрономия и Астрофизика

Лабораторная работа выполняется по работам и данным:

<https://web.williams.edu/Astronomy/research/PN/nebulae/>

Выполнение работы в среде MIDAS.

Запустить MIDAS.

1. Знакомство со спектрами планетарных туманностей. Отождествление спектральных линий планетарных туманностей, измерение интенсивностей линий H_{α} и H_{β} , линии [SII], оценка температуры центральной звезды..

а) Создание таблицы с данными планетарной туманности.

Для определения спектральных линий планетарной туманности надо перевести данные спектра из текстового формата в табличный вид. Сначала открыть файл со спектром туманности в любом текстовом редакторе и закомментировать первую строку символом #, заменить символы кавычек на пробел. Далее в MIDASе воспользуемся командой: **CREA/TAB**

CREA/TAB spectr1.tbl ncolumns nrow dataFile.cvs format.fmt

ncolumns – количество столбцов в таблице,

nrow – количество строк в таблице,

dataFile.dat – текстовый файл, содержащий спектр планетарной туманности (в наше случае NamePN.cvs),

format.fmt – файл, содержащий описание формата данных NamePN.cvs.

б) Отображение таблицы в графическом окне:

CRE/GRA – создание графического окна.

SET/GRA LTYPE=1 STYPE=0

PLOT/TAB – вывод данных таблицы в графическом окне.

PLOT/TAB spectr1 :wave :flux

spectr1 – название таблицы, содержащей спектр планетарной туманности,

:wave – колонка таблицы с длинами волн,

:flux – колонка, содержащая потоки эмиссионных линий.

в) Измерение длины волны эмиссионной линии планетарной туманности.

Команда **GET/GCURLSOR** позволяет интерактивно (нажатием левой клавиши мыши в графическом окне) выделить точку на спектре: значения длины волны и потока в этой точке будут выведено в консоли.

GET/GCURLSOR

Для большего удобства изучения спектра планетарной туманности со спектром сравнения, нужно вывести спектр планетарной туманности в том диапазоне длин волн, что и спектр сравнения. (Открыть спектр сравнения, например template1.bdf и посмотреть значения (3600 – 4800 Å)). Указать в каких диапазонах по длине волны и интенсивности вывести таблицу, чтобы были видны интересующие линии. Например:

SET/GRA xaxis=3600,4800 yaxis=0,1e-12

Так как планетарные туманности имеют разные скорости относительно Земли, то длины волн спектра сравнения могут незначительно отличаться от измеренных. Выберите две сильные эмиссионные линии, которые однозначно отождествлены, измерьте их длины волн и по закону Доплера рассчитайте смещение: $z = \Delta\lambda/\lambda$. Зная z можете определить как сдвинуты исследуемые линии относительно спектра сравнения.

г) Определить присутствуют ли линии сильно ионизованных атомов в спектре туманности, какие линии самые насыщенные, заполнить таблицу:

Длина волны (А)	Ион	Потенциал	Присутствует/отсутствует		
			PN1	PN2	PN3
6087	[Ca V]	67.1 eV			
7005	[Ar V]	59.8 eV			
6434	[Ar V]	59.8 eV			
6101	[K IV]	45.7 eV			
7531	[Cl IV]	39.6 eV			
8046	[Cl IV]	39.6 eV			
4686	HeII				
Самые насыщенные линии					

По данным таблицы сделать заключение о температуре центральной звезды.

Если в спектре планетарной туманности приведенные выше линии отсутствуют, оценку температуры можно сделать следующим образом.

Помимо запрещенных линий спектры большинства туманностей содержат мощные эмиссионные линии водорода, нейтрального и ионизованного гелия. Их интенсивность сильно зависит от эффективной температуры облучающей звезды и химического состава туманности.

При температурах менее $T_{\text{eff}} = 50000$ К интенсивность бальмеровских линий сравнима или превышает интенсивность запрещенных линий, а линии **HeII** отсутствуют.

С ростом температуры до $T_{\text{eff}} = 90000$ К линии **водорода** и **HeI** неуклонно ослабевают, и в спектрах появляется линия **HeII $\lambda 4686\text{\AA}$** .

В спектрах планетарных туманностей, облучаемых экстремально горячими ядрами ($T_{\text{eff}} = 120000$ К), как правило, доминируют линии ионизованного гелия.

2. Анализ Бальмеровского декримента, определение межзвёздного поглощения в направлении на планетарную туманность.

а) Создать из таблицы со спектром туманности изображение:

COPY/ТИ spectrN namePN :flux :wave

Перевод пиксельных единиц изображения в длины волн, для этого из таблицы взять начальную длину волны λ_{start} (например $\lambda_{\text{start}} = 3641.2338867187$) и рассчитать шаг $\Delta\lambda$ (например $\Delta\lambda = 1.489014$). округлить до сотых эти величины и записать в дескрипторы файла изображения:

WRITE/DESC namePN STEP 1.49

WRITE/DESC namePN START 3641.23

Далее работа с изображением. Вывести изображение в графическом окне:

PLOT namePN.bdf

б) Измерение интенсивностей исследуемых эмиссионных линий.

Отождествить линии $H\alpha$ и $H\beta$, и дуплет [SII] с длинами волн **6716 и 6731** в спектре планетарной туманности.

Найти положение максимума интенсивности и саму интенсивность линий. Этот шаг можно выполнить с помощью команды center/gauss.

Команда CENTER/GAUSS -- вписывает гауссиану в профиль исследуемой линии и на экране выводятся координаты начала и конца исследуемого диапазона, положение максимума интенсивности, максимальная интенсивность линии и т.д. При запуске команды становится активным графическое окно, на котором курсором указывается начальная и конечная координата для вписывания гауссианы. Результаты можно не выводить на экран, а записывать в таблицу. Если низкое спектральное разрешение и в спектре туманности

линии серы недостаточно разделяются чтобы вписать гауссиану, то просто измерить интенсивность с помощью команды **GET/GCURLSOR**.

CENTER/GAUSS GCURLSOR,red

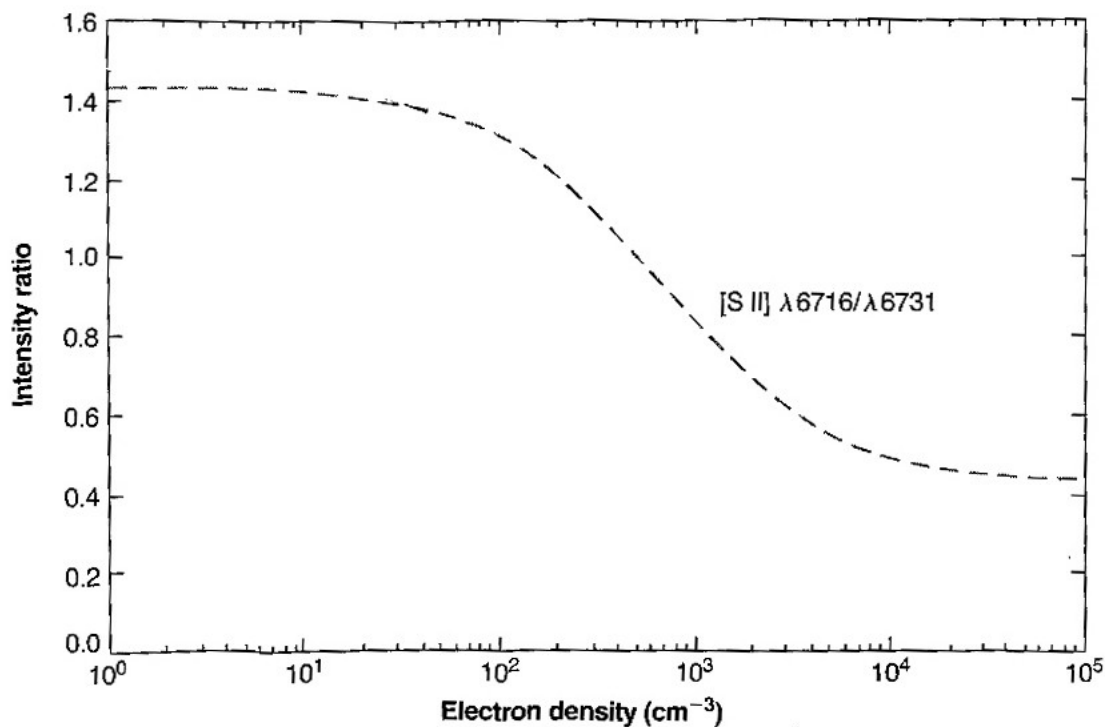
в) Вычисление Бальмеровского декримента и отношения интенсивностей линий серы (длины волн 6716 и 6731).

Полученные значения занести в таблицу.

Планетарная туманность	$H\alpha/H\beta$	$I(\lambda 6716)$ ----- $I(\lambda 6731)$	Плотность (cm^{-3})	Галактическая широта (без знака)

Экваториальные координаты можно взять в Страсбургском каталоге.

По измерениям отношения интенсивностей дублета серы и приведенному графику определить электронную плотность туманности. Оценить время существования туманности.



Результаты.

В отчёт вставить изображения исследуемых планетарных туманностей, и по ним выполнить классификацию.

Привести спектры планетарных туманностей с указанными яркими отождествлёнными эмиссионными линиями (не более 5-ти)

Данные отождествлений и измерений занести в таблицу. Проанализировать и сделать выводы о температуре центральных звёзд, электронной плотности планетарной туманности, в каком окружении расположена планетарная туманность (какое поглощение на луче зрения.) Где в Галактике располагается туманность (в диске или гало).