

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Факультет проблем физики и энергетики

Кафедра нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике

**ПОДГОТОВКА ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ
МИССИИ "СПЕКТР-УФ": ОТБОР КАНДИДАТОВ В ЗВЁЗДЫ
ТИПА Т ТЕЛЬЦА В СОЗВЕЗДИИ ЗМЕИ**

Выпускная квалификационная работа
(бакалаврская работа)

Направление подготовки 03.03.01 Прикладные математика и физика

Выполнила:

студентка 183 группы _____ Молярова Тамара Сергеевна

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник _____ Сачков Михаил Евгеньевич

Москва 2015

Оглавление

1	Введение	3
1.1	Т Tauri звёзды	3
1.2	Изучаемая область	3
1.3	Метод поиска	4
1.4	Актуальность	4
2	T Tauri	5
2.1	Звёзды типа Т Тельца	5
2.2	Спектральные особенности	5
2.3	Методы поиска	7
3	Данные	8
3.1	GALEX	8
3.2	Кросс-идентификация с 2MASS и UCAC4	9
3.3	Используемые инструменты	10
4	Отбор	11
4.1	Эталонная выборка	11
4.2	Цветовые диаграммы и критерии отбора	11
4.3	Результат и адекватность критериев	13
5	Улучшение списка	15
5.1	Удаление источников известного типа	15
5.2	Поиск галактик по собственным движениям	15
5.3	Оценка эффективных температур	15
6	Анализ	16
6.1	Диаграммы цвет-интенсивность	16
6.2	Оценка поглощения	16
6.3	Расположение	16
6.4	Классические и со слабыми линиями	16

7 Выводы	17
Литература	17

1. Введение

1.1 T Tauri звёзды

Целью данной работы является поиск звёзд, относящихся к определённому классу: звёзд типа T Тельца. Это предшественники звёзд, подобных Солнцу, а также планетарных систем. Поэтому их изучение очень важно для понимания процесса формирования Солнечной системы, её эволюции и образования планет.

Как молодые звёзды, звёзды типа T Тельца обнаруживаются в областях звездообразования. T Тельца, по имени которой назван этот класс звёзд, расположена в

1.2 Изучаемая область

В данной работе изучается тёмная туманность, находящаяся в созвездии Змея и Орёл (Serpens-Aquila Rift). Межзвёздная среда в ней находится в холодной фазе, то есть состоит из плотных и холодных облаков газа, в основном молекулярного водорода H_2 . Именно из такого вещества формируются звёзды. Существуют исследования, подтверждающие, что в этой туманности происходит активное звездообразование [Far-ultraviolet Observation of the Aquila Rift with FIMS SPEAR].

Расстояние до туманности оценивается по-разному. Та её часть, которая относится к созвездию Орёл, расположена на расстоянии 225 ± 55 парсек от Земли. Область, относящаяся к Змее, несколько дальше. Согласно измерениям параллакса, проведённым на радиоинтерферометре VLBA, она находится на расстоянии 415 ± 25 парсек[ссылка та же].

Несмотря на то, что исследуемая область известна наличием звездообразования, ни одна звезда в ней не идентифицирована как относящаяся к типу T Тельца. Это связано с расположением туманности близко к галактической плоскости и недостатком наблюдений в нужных спектральных диапазонах.

Мы рассматривали область неба, для которой прямое восхождение лежит в интервале от 17.96 до 18.72, а склонение от -5 до 5.5. Вторая часть туманности не рассматривалась из-за отсутствия необходимых наблюдений.

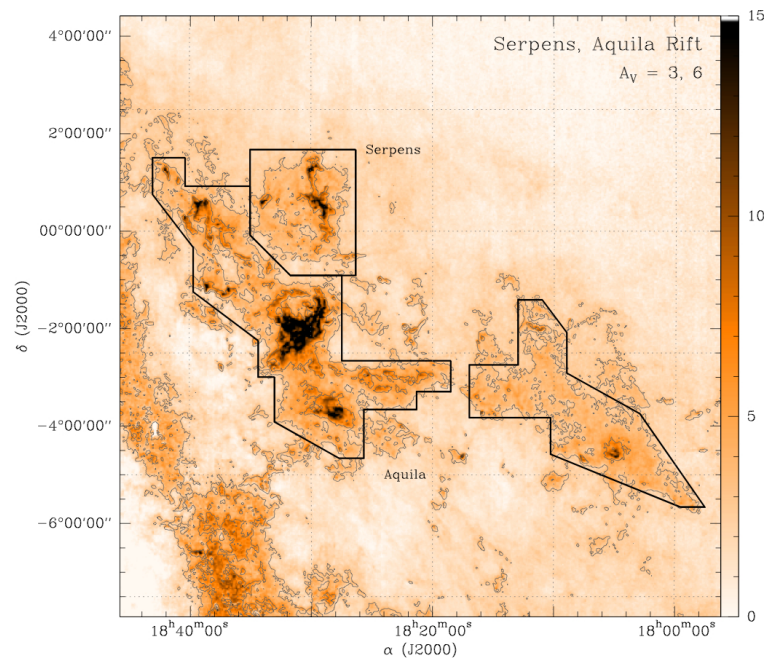


Рис. 1.1: Туманность в созвездии Змея, изображение от космического телескопа Гершель (Herschel)

1.3 Метод поиска

По фотометриям galex, цветовым диаграммам + отсев по собственным движениям, эффективным температурам и simbad.

1.4 Актуальность

О космическом телескопе Спектр-УФ. Неисследованная область

2. T Tauri

2.1 Звёзды типа Т Тельца

Звёзды типа Т Тельца - это маломассивные молодые звёзды, находящиеся на пути к главной последовательности. Обычно они находятся недалеко от отражательных или тёмных туманностей, оставшихся от газопылевого облака, из которого эти звёзды сформировались. Эти звёзды находятся в той части диаграммы Герцшпрунга - Рассела, которая соответствует звёздам с массами около 2-3 солнечных. С точки зрения звёздной эволюции они находятся в стадии гравитационного сжатия и, как молодые объекты, имеют близкую к солнечной металличность. (цитировать Додина) Характерными чертами также является избыточная эмиссия в ИК и УФ диапазонах.

Выделяют два подтипа этих звёзд: классические звёзды типа Т Тельца (classical T Tauri stars, CTTS) и звёзды типа Т Тельца со слабыми линиями (weak-lined T Tauri stars). Звёзды обоих подтипов находятся на одной стадии эволюции, имеют малую массу, и их металличность близка к солнечной. Различие состоит в том, что в спектрах классических звёзд типа Т Тельца присутствуют сильные эмиссионные линии, указывающие на то, что эти звёзды проявляют определённого рода активность. У звёзд типа Т Тельца со слабыми линиями эмиссионные линии гораздо слабее. Граница между подтипами проводится по эквивалентной ширине линии $H\alpha$.

2.2 Спектральные особенности

Звёзды типа Т Тельца относятся к классу переменных звёзд. Первоначально они были выделены в отдельный класс на основе чисто спектроскопических характеристик: наличия эмиссии в линиях $H\alpha$ и Fe I, а также класс светимости IV-V.

Сейчас выделяются следующие критерии принадлежности к типу:

- Наличие поблизости тёмной или отражательной туманности;
- Спектральный класс F5-M, класс светимости IV-V;
- Эмиссия в линиях H и He I, а также нейтральных и однократно ионизированных металлов;

- Сильная линия поглощения Li I 6707 Å;

Присутствие линии Li указывает на молодость звёзд, так как согласно теоретическим расчётам литий быстро выгорает.

Эмиссионный спектр CTTS напоминает спектр солнечной хромосферы. Поэтому изначально считалось, что для них характерна высокая хромосферная активность. Но ожидаемое в этой модели сильное рентгеновское излучение не нашло экспериментального подтверждения.

В настоящее время считается, что спектральные особенности CTTS обусловлены наличием аккреционного диска. Если также предположить наличие магнитного поля, направление которого не совпадает с осью вращения звезды, то удаётся объяснить асимметричность эмиссионных линий. Предполагается, что они образуются на границе магнитосферы. Также аккреция вещества на звезду вызывает возникновение джетов. Это биполярные узконаправленные струи газа, истекающие со звезды. Они наблюдаются обычно в запрещённых линиях [SiI], [OI].

Наличие протопланетных дисков и магнитного поля у многих звёзд типа Т Тельца подтверждается наблюдениями.

Чтобы отличить звёзды типа Т Тельца от других, нам нужно знать характеристики их спектров, в особенности те из них, которые можно наблюдать в фотометриях. Как следствие существования аккреционного диска и истечения вещества на звезду, у TTS наблюдается избыток излучения в различных спектральных диапазонах, а именно:

- Избыток в инфракрасном диапазоне вплоть до миллиметровых длин волн, обусловленный как собственным излучением нагретого диска, так и переизлучением поглощённого им излучения звезды и джетов.
- Избыток в оптическом диапазоне – свечение плазмы, нагретой до температуры 7000-10000 К. Это так называемое вуалирование – континуальное излучение нефотосферной природы.
- Избыток в ультрафиолетовом диапазоне – свечение плазмы с температурой электронов от 10000 К до 50000 К, причём присутствует как излучение в континууме, так и различные эмиссионные линии: нейтральные атомы (H I, O I, C I), однократно (C II, Si II, Fe II, Mg II, O I) и многократно (C IV, N V, O VI) ионизованные атомы, молекулярный водород.
- Избыток в рентгеновском диапазоне, вызванный высокой активностью магнитосферы звезды, свечением короны и ударными волнами в аккреционном диске.

2.3 Методы поиска

Изначально главными критериями поиска были лишь самые основные характеристики звёзд типа Т Тельца, как-то: близость к молекулярным облакам, избыток в инфракрасном диапазоне, присутствие магнитного поля. Позже, с появлением широкомасштабных обзоров неба, стали учитываться эквивалентная ширина линии $H\alpha$, собственные движения звёзд и избыток излучения в рентгеновском диапазоне. Также могут быть использованы оптические и инфракрасные данные и распределение спектральной энергии (SED) в этих диапазонах, в которых можно выделить черты, характерные для аккреционных дисков. Однако этими методами труднее обнаружить WTTS. Единственным действительно надёжным критерием является присутствие линии Li, как показатель молодости звезды.

Несмотря на то, что у звёзд типа Т Тельца присутствует существенный ультрафиолетовый избыток, большинство исследований, направленных на их поиск, проводилось в инфракрасном и рентгеновском диапазонах. С появлением ультрафиолетового обзора неба от миссии GALEX есть возможность использования и

3. Данные

Для поиска кандидатов применялись данные, взятые из трёх каталогов точечных источников. За основу брался список всех источников, относящихся к рассматриваемой области, которые пронаблюдад телескоп GALEX. Для этого списка проводилась кросс-идентификация с каталогами 2MASS и UCAC4 с целью получения данных о звёздных величинах в фильтрах инфракрасного и видимого диапазонов.

3.1 GALEX

GALEX (Galaxy Evolution Explorer) – это ультрафиолетовый обзорный космический телескоп с полуметровым зеркалом, запущенный в 2003 году. Его целью является исследование эволюции звездообразования в галактиках от ранней вселенной до наших дней. Так как наблюдения в ультрафиолете недоступны с Земли, его каталог точечных источников является единственным источником данных в этом спектральном диапазоне.

Обзор неба от GALEX состоит из круглых изображений радиусом 0.7 градусов и покрывает две трети небесной сферы. Наблюдения проводились в двух фильтрах: FUV(Far Ultraviolet), охватывающий диапазон 125-180 нм, и NUV(Near Ultraviolet) в диапазоне 170-300 нм с пространственным разрешением 4.3 и 5.3 угловых секунд соответственно.

Телескоп избегал наблюдений вблизи галактической плоскости и Магеллановых облаков, а также ярких звёзд, так как это могло привести к перегоранию чувствительных детекторов. Минимальная допустимая звёздная величина равна 9.5 и 8.9 для FUV и NUV соответственно. Максимальная звёздная величина составляет 22.3. Из-за высокой чувствительности телескопа в каталоге присутствует много ложных объектов, случайных шумов, которые были приняты за реальные источники. В дальнейшем эти паразитные источники отсеются при кросс-идентификации, не найдя соответствий в других спектральных диапазонах.

Так как интересующий нас участок неба находится близко к галактической плоскости, он не полностью покрыт наблюдениями. Для левой части туманности данных нет, а правая покрыта наблюдениями на 70%.

Filter Plots

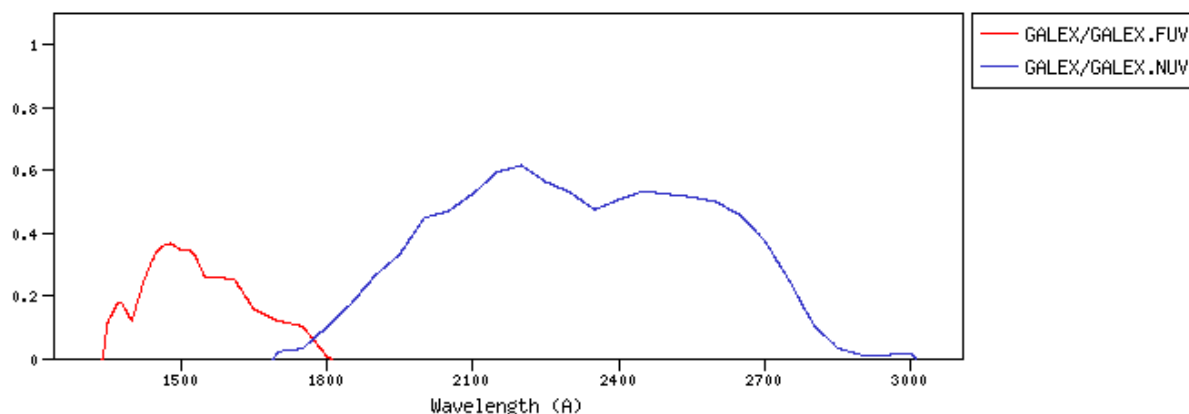


Рис. 3.1: Функции пропускания фильтров FUV и NUV космического телескопа GALEX

Для выбранной области нашлось 2968 источников, причём для некоторых из них отсутствовала звёздная величина в фильтре FUV. Их пришлось отбросить, так как эта информация существенна для нашего исследования.

3.2 Кросс-идентификация с 2MASS и UCAC4

После получения исходного списка источников он был кросс-идентифицирован с каталогами 2MASS и UCAC4. То есть для каждого источника из списка мы искали соответствие в другом каталоге, основываясь на равенстве или близости их координат. Параметр кросс-корреляции взят равным 3 угловым секундам. Это максимальное расстояние между источниками из разных каталогов, при котором они будут считаться одним источником.

2MASS(Two Micron All-Sky Survey) – это полный обзор всего неба на длинах волн около 2 микрон. Он содержит информацию о звёздных величинах в фильтрах J, H и Ks с длинами волн 1.25, 1.65 и 2.17 мкм соответственно.

Так как этот обзор создавался с помощью больших наземных телескопов, пространственное разрешение здесь гораздо выше, чем у GALEX, и источники можно считать действительно точечными. Из-за низкой точности GALEX объекты в нём размазаны и эффективно имеют радиус около 2.2-2.7 угловых секунд. Поэтому при кросс-идентификации объект из GALEX считается совпавшим с объектом из 2MASS, если он попадает внутрь окружности с радиусом 3 угловых секунды.

Все источники из первоначального списка, не идентифицированные в каталоге 2MASS, должны быть сочтены ложными и откинuty.

Каталог UCAC4 содержит данные в фильтрах видимого диапазона: V и B фотометрической системы Джонсона, а также i и g фотометрической системы SDSS. Кроме того, из него мы берём информацию о собственных движениях звёзд. В него включены только звёзды. Их величины лежат в интервале от 8 до 16, ярче, чем в GALEX. Поэтому те объекты из списка, которые не нашли соответствия в UCAC4, не должны отбрасываться.

Инфракрасные звёздные величины необходимы нам для построения диаграмм цвет-цвет и формулирования критериев поиска звёзд типа Т Тельца. Величины в видимом диапазоне используются для иллюстрации на цветовых диаграммах и для дополнительного критерия. Также они нужны для оценки эффективных температур.

После кросс-идентификации список сократился до 726 объектов.

3.3 Используемые инструменты

casjobs для получения данных с галекса. visier для кросс-матчинга. aladin для картинок

4. Отбор

Основной этап поиска кандидатов – это отбор звёзд, соответствующих нижеизложенным критериям. Для этого необходимо наличие информации лишь о звёздной величине кандидатов в ультрафиолетовом и инфракрасном спектральных диапазонах, а спектральные данные не требуются.

При создании критериев мы будем придерживаться следующей модели. Взяв за образец выборку известных звёзд типа Т Тельца, находящихся на небольшом расстоянии, мы определим положение этих звёзд на цветовых диаграммах. Все источники, попавшие в ту же область диаграммы цвет-цвет, мы сочтём первичными кандидатами, определив условные границы этой области.

В основе данной модели составления критериев лежит работа Гомез де Кастро 2014 [ссылка], в которой аналогичное исследование проводится для молекулярного облака Тельца.

4.1 Эталонная выборка

Чтобы определить, какого поведения мы ожидаем от кандидатов в Т Tauri звёзды, нам понадобится образцовая выборка, состоящая из известных и подтверждённых Т Tauri звёзд.

Мы возьмём звёзды, наблюдавшиеся телескопом IUE (International Ultraviolet Explorer). Выборка из 21 звезды получена в работе [Gomez de Castro & Franqueira 1997]. Далее их IUE спектры были умножены на функцию пропускания фильтров GALEX [Ana Ines].

...формулы эти может...

В эталонной выборке содержится мало WTTS и звёзд М типа, что обусловлено низкой чувствительностью телескопа IUE. Можно заметить, что в FUV звёздная величина мала, это делает более трудным поиск звёзд типа Т Тельца со слабыми линиями.

4.2 Цветовые диаграммы и критерии отбора

Перейдём к построению диаграмм цвет-цвет. Мы используем четыре типа этих диаграмм: FUV-NUV vs J-K, FUV-NUV vs H-K, NUV-H vs J-K и NUV-R vs J-K. Первые

Таблица 4.1: Эталонная выборка звёзд, используемых как образец для формулирования критериев.

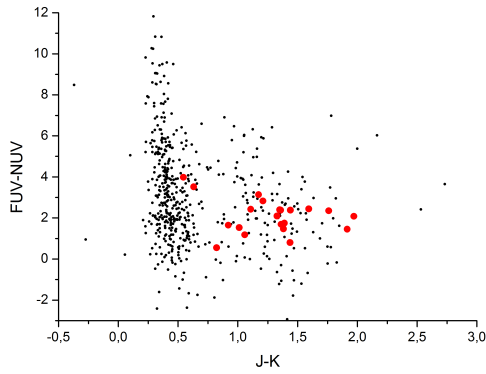
Star	Spectral type	d pc	FUV AB mag	NUV AB mag	R mag	J mag	H mag	K mag
WY Ari	K5 Bin	275	17.36	15.26	12.40	10.229	9.418	8.901
BP Tau	K7	140	17.66	15.97	11.62	9.10	8.22	7.736
DE Tau	M2	140	17.96	16.49	11.93	9.18	8.273	7.799
RY Tau	K1	140	17.73	15.38	9.67	7.16	6.13	5.395
T Tau	K0	140	16.42	14.97	9.80	7.24	6.237	5.325
DF Tau	M0-1	140	17.58	16.78	11.50	8.17	7.256	6.734
DR Tau	K4	140	16.95	14.87	12.19	8.85	7.8	6.874
GM Aur	K3	140	17.57	16.39	11.22	9.34	8.603	8.283
SU Aur	G2	140	18.04	15.21	9.17	7.20	6.558	5.99
RW Aur	K1	140	16.51	14.13	9.95	8.38	7.621	7.02
GW Ori	G5	450	17.44	15.02	9.52	7.70	7.103	6.59
CV Cha	G8	175	17.32	14.94	10.51	8.29	7.46	6.845
RU Lup	K7	140	15.85	13.41	9.99	8.73	7.824	7.138
AK Sco	F5 SB	145	17.15	14.01	9.20	7.68	7.06	6.503
DI Cep	G8	244	17.51	15.11	10.49	9.30	8.572	7.952
HD 283572	G5	140	18.75	14.77	9.14	7.41	7.008	6.869
AB Dor	K0	15	16.32	12.8	6.50	5.32	4.845	4.686
TW Hya	K7	56	15.65	14	10.19	8.22	7.558	7.297
V2398 Oph	G8	125	16.23	14.48	10.10	8.62	7.81	7.23
V4046 Sgr	K5.6 SB	83	16.6	16.05	9.67	8.07	7.435	7.249
FK Ser	K7 Bin	350	17.72	16.19	9.41	7.64	6.92	6.624

три существенны для отделения кандидатов, четвёртый же выполняет иллюстративную функцию, так как на диаграмму этого типа, требующую наличия блеска в фильтре R, попадает гораздо меньше звёзд.

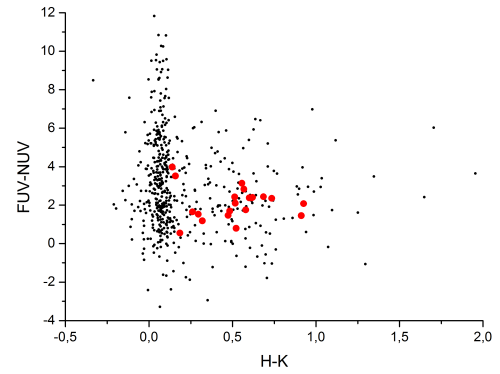
Звёзды эталонной выборки выделены красным. Заметно, что они группируются в стороне от основной массы звёзд, относящихся к главной последовательности. Также можно видеть, что довольно много звёзд находятся в той же области диаграммы, что и эталоны.

На диаграмме NUV-H vs J-K эталонные T Tauri особенно сильно отделены от остальных звёзд, поэтому критерий, относящийся к этой диаграмме, должен оказаться самым сильным.

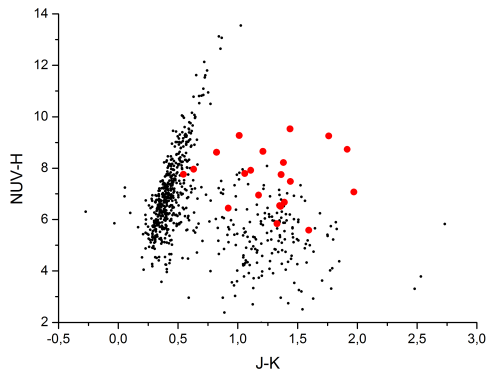
Теперь мы можем сформулировать критерии первичного отбора кандидатов:



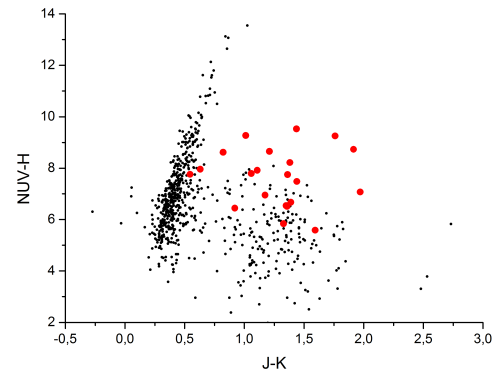
FUV-NUV vs J-K



FUV-NUV vs H-K



NUV-H vs J-K



NUV-R vs J-K

Рис. 4.1: Диаграммы цвет-цвет

- FUV-NUV vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.5 < J - K < 2.4$ и $0.4 < FUV - NUV < 4.6$;
- FUV-NUV vs H-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.2 < H - K < 1.2$ и $0.4 < FUV - NUV < 4.6$;
- NUV-R vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.5 < J - K < 2.4$ и $1.5 < NUV - R < 8.2$;
- NUV-H vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.5 < J - K < 2.4$ и $4.2 < NUV - H < 11.0$;

Наша цель – не только найти кандидаты в Т Тауги звёзды, мы хотим, чтобы ни одна из них не была потеряна в ходе отбора, если это возможно. Поэтому на этом этапе мы оставляем те источники, которые удовлетворяют хотя бы одному из четырёх критериев.

4.3 Результат и адекватность критериев

Получили столько-то источников. Самый сильный критерий оказался третий (вроде)

Не упускают ли критерии известные звёзды типа Т Тельца? В нашей области проверить не на чем, но вот люди (Ана Инес) проверили на ТМС и работает.

5. Улучшение списка

Теперь мы очистим список от источников, который могли попасть туда случайно. Это могут быть галактики, например, или горячие звёзды, потому что у них тоже присутствует избыток ультрафиолета.

5.1 Удаление источников известного типа

С помощью Simbad удалось идентифицировать четверть источников. Многие из них галактики. Нет ни одной T Tauri и даже ни одного кандидата. Выбрасываем галактики и звёзды с определённым типом.

5.2 Поиск галактик по собственным движениям

В UCAC4 указаны собственные движения, так что мы можем сравнить их друг с другом и выяснить, какие из источников находятся ближе. Если движение сравнимо со значением погрешности его измерения, то мы считаем, что эти источники находятся слишком далеко, скорее всего они являются галактиками.

5.3 Оценка эффективных температур

Некоторые попавшие в список источники могут иметь ультрафиолетовый избыток просто потому что у них очень большая температура. Оцениваем её в VOSA, отбрасываем все источники горячее 7000 K.

6. Анализ

Анализ этого всего

6.1 Диаграммы цвет-интенсивность

Надо их показать, но не знаю, зачем.

6.2 Оценка поглощения

Не очень далеко область, но вроде поглощается там. Надо доделать. в (Far-ultraviolet Observation of the Aquila Rift with FIMS SPEAR) упоминается, что $E(B-V) < 0.3$.

Межзвёздное поглощение в исследуемой области определяется в основном наличием молекулярных облаков. Однако, наблюдения миссии GALEX относятся только к периферии этих облаков, где поглощение значительно ниже. По некоторым оценкам, его величина $A_v < 0.5$ [Ana Ines], и таким поглощением можно пренебречь.

6.3 Расположение

Картинки с координатами и собственными движениями.

6.4 Классические и со слабыми линиями

Что они распределены по гауссу и вдоль прямой соответственно, если смотреть на диаграмму FUV-NUV vs J-K. Вообще распределить кандидаты в группы по WTTS, CTTS и просто TTS.

7. Выводы

Итак, мы получили финальный список кандидатов в звёзды типа Т Тельца, всего их целых N штук.

Мы сделали всё, что мы сделали, мы молодцы.

Теперь можно понаблюдать все кандидаты со Спектра-УФ, чтобы выяснить, действительно ли они типа Т Таугі. Но можно и улучшить список ещё, если очень хочется, а именно – пронаблюдать эти источники на БТА и уточнить их звёздные величины в видимом диапазоне.

Спасибо мама, папе, Ленке, Вове, Лохматому и Булке за моральную поддержку и веру в меня, спасибо спасибо.