

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии  
наук

*На правах рукописи*  
УДК 524.3, 524.5, 524.6

Галазутдинов Газинур Анварович

**Спектроскопические исследования Галактической межзвездной  
среды в оптическом диапазоне**

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико–математических наук

п. Нижний Архыз - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»

**Официальные оппоненты:**

д. ф.-м.н., профессор РАН, зав. Отделом физики звезд, ИНАСАН  
**Вибе Дмитрий Зигфридович**

д. ф.-м.н., профессор мат.-мех. факультета СПбГУ  
**Ильин Владимир Борисович**

д. ф.-м.н., в.н.с. ФТИ им. Иоффе РАН  
**Левшаков Сергей Анатольевич**

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

**Защита** состоится 2 декабря 2024 года в 9:00 на открытом заседании диссертационного совета 24.1.212.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к. ф.-м. н.  
Шолухова О.Н.

## Актуальность темы исследования

Основной характеристикой Вселенной является ее разреженность. Не является исключением наша Галактика. Если принять радиус Гелиосферы в  $\sim 200$  астрономических единиц (АЕ), звезды вместе с планетными системами занимают не более  $\sim 10^{-10}$  объема Галактики. Т.е. межзвездная среда (МЗС) занимает почти весь объем видимой Вселенной.

Согласно современным исследованиям, барионная материя Вселенной состоит из следующих компонент (по массе): около 7% материи находится в форме звезд (на всех стадиях эволюции), планет и других относительно плотных объектов; около 2% приходится на диффузный газ межзвездной среды, заполняющий пространство между звездами внутри Галактики; около 5% находится в газе гало галактик, вне основного распределения звезд; около 4% находится в горячем газе скоплений галактик, связанном со скоплением в целом, а не с какой-либо отдельной галактикой; около 38% находится в диффузной межгалактической среде, состоящей, в основном, из разреженного ионизированного газа, при температурах  $T < 10000$  К; оставшиеся  $\sim 44\%$  барионного компонента Вселенной это межгалактическая среда с температурами от десятков тысяч до десятков миллионов К (Nicastro et al. 2018; Martizzi et al. 2019).

По массе МЗС состоит главным образом из водорода (70%), гелия (28%) и 2% приходится на более тяжелые элементы. Это может быть нейтральный или ионизированный атомарный газ, молекулы в газовой фазе, наконец, пылинки. Пылинки (могут состоять из силикатов, льдов, углеродистых соединений) и межзвездный газ активно взаимодействуют друг с другом. Пылинки являются основным источником свободных электронов в МЗС, а также рассеивают поле излучения и являются причиной наблюдаемого эффекта межзвездного покраснения. В частности, образование пылинок меняет химический состав окружающего газа, на поверхности пылинок происходит образование сложных молекул.

Межзвездное вещество наблюдается в виде разнообразных туманностей, облаков, остатков сверхновых и играет центральную роль в эволюции Галактики. Содержание тяжелых элементов в МЗС медленно увеличивается (как вследствие взрывов сверхновых, так и вследствие потери массы в процессе звездной эволюции) благодаря

поступлению вещества предыдущих поколений звезд, обогащенного продуктами нуклеосинтеза происходящего в звездных недрах. МЗС является местом рождения «новых» звезд. В процессе эволюции происходит постоянная переработка вещества и связанное с ней обогащение МЗС продуктами нуклеосинтеза. Астрономические наблюдения выявили наличие в МЗС сложных молекул, в т.ч. органических.

Прошло более 150 лет со времени первого предположения о том, что межзвездное пространство, поглощающее звездный свет и состоящее из пыли и газа (Struve, 1847), заполняет пространство между звездами. В начале XX века немецкий астроном Hartmann (1904) продемонстрировал первые наблюдательные свидетельства поглощения, возникающего в межзвездной среде, которые проявлялись в виде стационарных абсорбций (линии H и K Ca II), наблюдаемых в спектрах двойной звезды  $\delta$  Ориона. Heger (1919) сообщила о стационарных линиях натрия, наблюдаемых в спектрах двойных систем, и заявила об их межзвездном происхождении. Число известных межзвездных линий существенно выросло в 30-х годах XX века, когда были впервые открыты межзвездные молекулы CN и CN<sup>+</sup> (Dunham, 1937).

Дальнейшие исследования показали сложную структуру межзвездной среды, например, Beals (1936) обнаружил двойные и асимметричные компоненты линий H и K, видимые в спектрах звезд в созвездии Орион.

Согласно современным знаниям, состав межзвездного поглощающего вещества очень сложен: например, уже обнаружены молекулы, состоящие из десятков атомов. Еще одно, возможно, наиболее яркое свидетельство сложных процессов молекулярного синтеза/разрушения, происходящих в межзвездной среде - это существование диффузных межзвездных полос (ДМП, diffuse interstellar bands - DIB) – старейшей нерешенной проблемы астрономической спектроскопии. Эти межзвездные абсорбции названы «диффузными», потому что даже самая узкая из известных диффузных полос 6196 Å во много раз шире атомных или молекулярных линий межзвездного происхождения.

ДМП были открыты в первой четверти XX века (Heger, 1922), но их носители до сих пор остаются неизвестными, (возможно за одним исключением, см. Главу 5) несмотря на значительные усилия

астрономов и большой прогресс наблюдательной астрономии за последние 30 лет. Список обнаруженных ДМП продолжает расти, включая все более и более слабые линии. По состоянию на 2019 год он включает 559 линий (Fan, 2019). Обзоры свойств ДМП см., например, в Herbig (1995), Sarre (2006), Krelowski (2018).

Более десяти лет назад Krelowski и Walker (1987), Josafatsson и Snow (1987) и Krelowski и Westerlund (1988) продемонстрировали, что соотношение интенсивности ДМП может варьироваться от облака к облаку, что доказывает, что количество или физическое состояние носителей ДМП в отдельных облаках может быть совершенно разным. Одним из ярких примеров этого различия являются две соседние диффузные полосы на длинах волн около 5780 и 5797 Å. Объекты, называемые  $\sigma$ -облаками (потому что направление на  $\sigma$  Скорпиона является архетипом), имеют низкое отношение интенсивностей ДМП 5797/5780. И наоборот,  $\zeta$ -облака (по имени архетипа  $\zeta$  Змееносца) имеют высокое отношение интенсивностей ДМП 5797/5780. Разделение межзвездных облаков на типы  $\zeta$  и  $\sigma$  имеет физическую основу: объекты типа  $\zeta$  демонстрируют сильные линии поглощения межзвездных молекул, таких как CH, CH<sup>+</sup>, CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> и т. д., тогда как в облаках типа  $\sigma$  молекулярные линии слабы или отсутствуют. Однако, во всех объектах, где наблюдаются ДМП, всегда видны линии атомов и ионов, как минимум, таких как Na I (D1 и D2), Ca II (H и K), K I на 7699 Å (более мощная линия на 7665 Å обычно блендирована сильными теллурическими линиями и поэтому недоступна для измерений). К сожалению, чистые спектры типа  $\sigma$  и  $\zeta$  немногочисленны — в спектрах большинства наблюдаемых звезд, особенно сильно покрасневших, наблюдаются сквозь несколько облаков, в общем, с разными оптическими свойствами, и поэтому результирующие межзвездные спектры представляют собой средние значения в случае, если не удастся разделить профили отдельных облаков. Различия в лучевых скоростях между отдельными облаками при достаточном спектральном разрешении обычно позволяют разделить межзвездные атомные/молекулярные линии (см., например, Adams 1949, Beals 1938, Galazutdinov et al. 2000), но ДМП относительно широки и редко показывают доплеровское расщепление профиля, за исключением самых узких, таких, как, например, ДМП 6196 Å, для которой было убедительно продемонстрировано доплеровское расщепление (см., например, Herbig & Soderblom, 1982). В связи с этим, наиболее

интересно исследование «однооблачных» объектов, без видимого расщепления профилей узких межзвездных линий атомов и молекул. В таких облаках возможно изучение взаимосвязей между разными компонентами МЗС, корректное определение параметров межзвездных линий, не являющихся блендой нескольких спектральных особенностей, образованных в разных облаках, с разными характеристиками.

Итак, предметом исследования в данной работе является диффузный газ межзвездной среды и пылевые частицы. Метод исследования – спектроскопия высокого разрешения, преимущественно в оптической области спектра. Важным аспектом исследования является тесное сотрудничество со специалистами в области молекулярной спектроскопии, поскольку одной из целей работы является поиск молекул-носителей диффузных межзвездных полос. Ниже более подробно о целях и задачах данного диссертационного исследования.

- **Цели и задачи диссертационной работы**

Основные цели диссертационного исследования состоят в определении физических параметров полупрозрачных диффузных облаков Галактики; анализе спектральных и кинематических свойств значимой выборки Галактических межзвездных облаков; обнаружении ранее неизвестных компонент межзвездной среды, в т.ч. молекул и новых диффузных межзвездных полос – проблема отождествления носителей ДМП является старейшей проблемой астрофизики, ждущей своего решения с 1922 года; оценке уровня корреляции (связи) ДМП с другими компонентами межзвездной среды; определении физических условий в межзвездной среде, влияющих на образование/разрушение носителей ДМП; получении астрономических спектров исключительно высокого качества для определения точных профилей ДМП и сравнения профилей ДМП с лабораторными спектрами молекул в газовой фазе. Цели, связанные с изучением ДМП, направлены на определение возможных кандидатов в носители ДМП.

- **Новизна проведенных соискателем исследований**

Научная новизна исследований, представленных соискателем определяется следующим:

- Получен уникальный спектральный материал для более 500 горячих покрасневших звезд, в т.ч. с очень высоким соотношением сигнал/шум ( $S/N > 1000$ ) в сочетании с высоким спектральным разрешением ( $R \equiv \lambda/\Delta\lambda$  от 30000 до 300000) в широком диапазоне длин волн. Создан наиболее полный, на настоящий момент, список объектов, рекомендованных для изучения межзвёздных линий в оптическом диапазоне спектра.
- Впервые предложены методы определения расстояний в Галактическом диске по линиям межзвездных линий ионизованного кальция и титана. Межзвездная шкала позволяет оценивать расстояние до пекулярных объектов с неточными параллаксами и/или неопределенным спектральным классом.
- Построена кривая вращения межзвездных облаков в Галактике по линиям ионизованного кальция и показан ее кеплеровский характер.
- Обнаружен ряд объектов с т.н. «серым» поглощением, обусловленным наличием на луче зрения пылинок большого размера (сотни микрон).
- Выявлена вытянутая структура рассеянного скопления Плеяды.
- Впервые обнаружены облака типа CaFe, свободные от межзвездной пыли и эффекта обеднения металлов (depletion).
- Впервые обнаружены запрещенные линии поглощения межзвездного гелия.
- Впервые обнаружены линии ряда межзвездных молекул в оптическом диапазоне спектра (SH, OH<sup>+</sup>, NH) и новые, неизвестные ранее линии и полосы известных молекул (C<sub>3</sub>, NH, CH, CH<sup>+</sup>), уточнены или определены силы осцилляторов ряда известных молекул и вычислена лучевая концентрация. Для ряда молекул доказано низкое содержание (ниже предела обнаружения) в межзвёздной среде, оценен верхний предел содержания.
- Впервые обнаружена переменность интенсивности и положения ряда межзвездных линий, в т.ч. ДМП.

- Впервые обнаружено более 100 новых ДМП в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.
- Впервые получены детальныe профили ряда т.н. широких ДМП, у которых FWHM (ширина на половине интенсивности) более 10 Å.
- Получены самые детальныe и точныe, на данный момент, профили ряда диффузных полос, на основе которых выполнены модельные расчеты. Предложены возможные кандидаты в носители ДМП.
- Обнаружена связь между шириной профиля ряда ДМП и вращательной температурой ряда простых межзвездных молекул.
- Измерены точныe длины волн диффузных межзвездных полос, предложен метод объективной оценки длин волн ДМП и метод измерения изменения сложных профилей ДМП.

- **Практическая значимость и ценность научных работ соискателя**

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для дальнейших исследований, связанных с феноменом диффузных межзвездных полос, а также для исследования физических процессов в Галактической межзвездной среде. Особую ценность представляет уникальная коллекция профилей диффузных межзвездных полос высокого разрешения (до 300000) и очень высокого отношения сигнал/шум (до 4000), которые необходимы для окончательного отождествления их носителей, путем сопоставления с лабораторными спектрами молекул в газовой фазе. Значимость результатов, полученных соискателем подтверждается высокой цитируемостью его публикаций: по состоянию на 2024 год имеется около 2000 цитирований на 94 рецензируемых публикаций соискателя по теме диссертации. Наиболее востребованы обзоры диффузных полос, исследования тонкой структуры и профили сверхвысокого разрешения ДМП, результаты сравнения астрономических данных с лабораторными спектрами, метод оценки расстояний в Галактическом диске по межзвездным линиям и исследования взаимосвязи различных компонент межзвездной среды.

- **Достоверность и апробация результатов**

Результаты, представленные в диссертации, полностью изложены в 94 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах, которые индексируются в базах данных “Web of Science”, “Scopus”: 30 работ в Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 21 работа в “Astronomy and Astrophysics”, 12 работ в “Astrophysical Journal”, 5 работ в “Astrophysical Journal Letters”, 10 работ в “Acta Astronomica”, 6 работ в “Publications of the Astronomical Society of the Pacific”, 3 работы в “Astronomische Nachrichten”, 3 работы в журнале «Астрофизический бюллетень», 2 работы в “Astronomical Journal”, 1 работа в журнале “Письма в Астрономический Журнал”, 1 работа в “Journal of Korean Astronomical Society”. В 39 публикациях соискатель является первым автором.

Результаты представлялись соискателем в виде докладов и постеров на семинарах ГАО РАН, САО РАН, КрАО РАН, Центра астрономии университета Николая Коперника (CfA UNC, г. Торунь, Польша), Центра астрономии Николая Коперника (САМК, г. Торунь, Польша), Института астрономии и космических исследований (KASI, г. Тэджон, Южная Корея), Сеульского национального университета (SNU, г. Сеул, Южная Корея), Института астрономии Католического университета Севера (UCN, г. Антофагаста, Чили), Южной Европейской Обсерватории (ESO, г. Сантьяго, Чили), конференциях чилийского астрономического общества SOCHIAS а также на следующих всероссийских и международных конференциях:

- Ultraviolet Astrophysics Beyond the IUE Final Archive, 11-14.11.1997, Sevilla, Spain.
- Solid state astrochemistry. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Solid State Astrochemistry, 5-15.06.2000, Erice, Italy
- Astrochemistry: Recent Successes and Current Challenges, 231st Symposium of the IAU, 29.08-02.09.2005, Pacific Grove, USA
- American Astronomical Society, AAS Meeting #212, 31.05-4.06.2008, St.Louis, USA
- American Astronomical Society, AAS Meeting #218, 22-26.05.2011, Boston, USA
- American Astronomical Society, AAS Meeting #220, 10-14.06.2012, Anchorage, USA

- American Astronomical Society, AAS Meeting #222, 2-6.06.2013, Indianapolis, USA
- IAU Symposium 297 "The Diffuse Interstellar Bands", 20-24.5.2013, Noordwijkerhout, The Netherlands
- 68th International Symposium on Molecular Spectroscopy, 17-21.06. 2013, Ohio State University, USA
- IAU Regional Meetings APRIM 2014, 19-22.08.2014, Daejeon, Korea
- 254th American Chemical Society Meeting & Exposition, 18 – 28. 08. 2017, Washington, USA
- ВАК-2017, 17 - 22.09.2017, Ялта, Россия
- “Cosmic Fullerenes”, 19-21.09.2018, Orsay, France
- «Физика звёзд: теория и наблюдения», ГАИШ МГУ, 26-30.06.2023, Москва, Россия
- 

#### • Личный вклад автора

Более 70% наблюдательного материала было получено с участием соискателя в течение 1996-2018 годов. Более 90% спектральных изображений были обработаны лично соискателем с помощью программных средств собственной разработки. Все результаты, приведенные в пяти главах диссертации, опубликованы в 94 статьях в рецензируемых журналах, в том числе 39 с первым авторством. Вклад соискателя во всех публикациях был не меньшим, чем других соавторов.

#### Публикации в рецензируемых журналах

1. **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Bikmaev I. F., Krelowski J.; “On the relation between the carriers of diffuse interstellar bands and simple molecular species”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 292, p. 414–418. (1997), doi:10.1093/mnras/292.2.414
2. Krelowski J., **Galazutdinov, G. A.**, Musaev F. A.; ”Diffuse Interstellar Bands: Physical Conditions That Facilitate the Formation or Preservation of Their Carriers”; The Astrophysical Journal, Volume 493, p. 217–221. (1998), doi:10.1086/305115

3. Krelowski J, **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A.; Addendum: Diffuse Interstellar Bands: Physical Conditions that Facilitate the Formation or Preservation of Their Carriers”; The Astrophysical Journal, Volume 506, p. 926–926. (1998), doi:10.1086/306290
4. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Moutou C., Musaev F. A.; “Diffuse interstellar bands in low E(B-V) objects”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 295, p. 437–442. (1998), doi:10.1046/j.1365-8711.1998.2952437.x
5. Krelowski J., Ehrenfreund P., Foing B. H., Snow T. P., Weselak, T., Tuairisg S. Ó., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A.; “On the relation between diffuse interstellar bands and simple molecular species”; Astronomy and Astrophysics Volume 347, p. 235–242. (1999).
6. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Musaev F. A., Galeev A. I.; “Variability of diffuse interstellar bands in the spectrum of HD 188209”; Astronomy Letters, Volume 25, p. 656–661. (1999).
7. Salama F., **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Allamandola L. J., Musaev F. A.; “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and the Diffuse Interstellar Bands: A Survey”; The Astrophysical Journal, Volume 526, p. 265–273. (1999), doi:10.1086/307978
8. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Musaev F. A.; “On bare carbon chain anions as possible carriers of the diffuse interstellar features”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 310, p. 1017–1022, (1999), doi:10.1046/j.1365-8711.1999.03000.x
9. Motylewski T., Linnartz H., Vaizert O., Maier J. P., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Krelowski J., Walker G. A. H., Bohlender D. A.; “Gas-Phase Electronic Spectra of Carbon-Chain Radicals Compared with Diffuse Interstellar Band Observations”; The Astrophysical Journal, Volume 531, p. 312–320. (2000), doi:10.1086/308465
10. **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Krelowski J., Walker G. A. H.; “Narrow Diffuse Interstellar Bands: A Survey with Precise Wavelengths”; Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 112, p. 648–690. (2000), doi:10.1086/316570
11. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Musaev F. A., “Interstellar velocity components towards reddened stars”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 315, p. 703–706, (2000) doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03479.x

12. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Musaev F. A., Ehrenfreund P., Foing B. H.; “On the identification of the  $C_{60}^+$  interstellar features”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 317, p. 750–758. (2000), doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03566.x
13. **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Schmidt M. R., Krelowski J.; “Profiles of blue and infrared diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 323, p. 293–300. (2001), doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04164.x
14. **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Krelowski J.; “On the detection of the linear  $C_5$  molecule in the interstellar medium”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 325, p. 1332–1334. (2001), doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04388.x
15. **Galazutdinov G.**, Musaev F., Nirski J., Krelowski J.; “The problem of  $C_7^-$  as source of diffuse interstellar bands revisited”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 377, p. 1063–1067. (2001), doi:10.1051/0004-6361:20011126
16. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Nirski J.; “Identification of the naphthalene cation in space?”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 328, p. 810–814. (2001), doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04906.x
17. **Galazutdinov G.**, Moutou C., Musaev F., Krelowski J.; “Very high resolution profiles of 6196 Å and 6614 Å diffuse interstellar bands”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 384, p. 215–224. (2002), doi:10.1051/0004-6361:20020003
18. **Galazutdinov G.**, Petlewski A., Musaev F., Moutou C., Lo Curto G., Krelowski J.; “An upper limit to the interstellar  $C_5$  abundance in translucent clouds”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 395, p. 223–226. (2002), doi:10.1051/0004-6361:20021237
19. **Galazutdinov G.**, Petlewski A., Musaev F., Moutou C., Lo Curto G., Krelowski J.; “The interstellar  $C_3$  chain molecule in different interstellar environments”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 395, p. 969–974. (2002), doi:10.1051/0004-6361:20021324
20. **Galazutdinov G.**, Stachowska W., Musaev F., Moutou C., Lo Curto G., Krelowski J.; “Fine structure of profiles of weak diffuse interstellar bands”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 396, p. 987–991. (2002), doi:10.1051/0004-6361:20021299
21. **Galazutdinov G. A.**, Galazutdinova O. A., Grinin V. P.; “Diffuse interstellar bands in the spectra of Herbig Ae/Be stars and related

- objects”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 407, p. 705–712. (2003), doi:10.1051/0004-6361:20030873
22. Skorzynski W., Strobel A., **Galazutdinov G. A.**; “Grey extinction in the solar neighbourhood?”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 408, p. 297–304. (2003), doi:10.1051/0004-6361:20030998
  23. **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Bondar A.V., Krelowski J.; “Very high resolution profiles of four diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 345, p. 365–368. (2003), doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06966.x
  24. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Krelowski J.; “On the relation between diffuse bands and column densities of H<sub>2</sub>, CH and CO molecules”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 414, p. 949–954. (2004), doi:10.1051/0004-6361:20031663
  25. Cami J., Salama F., Jimenez-Vicente J., **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J.; “The Rotational Excitation Temperature of the  $\lambda$ 6614 Diffuse Interstellar Band Carrier”; *The Astrophysical Journal*, Volume 611, p. L113–L116. (2004), doi:10.1086/423991
  26. **Galazutdinov G. A.**, Manico G., Pirronello V., Krelowski J.; “Correlations between diffuse interstellar bands and atomic lines”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 355, p. 169–177. (2004), doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08314.x
  27. **Galazutdinov G.**, 2005; “A Survey of Interstellar Lines: Radial Velocity Profiles and Equivalent Widths”; *Journal of Korean Astronomical Society*, Volume 38, p. 215–218. (2005), doi:10.5303/JKAS.2005.38.2.215
  28. **Galazutdinov G. A.**, Han I., Krelowski J.; “Profiles of Very Weak Diffuse Interstellar Bands around 6440 Å”; *The Astrophysical Journal*, Volume 629, p. 299–304. (2005), doi:10.1086/431663
  29. Megier A., Strobel A., Bondar A., Musaev F. A., Han Inwoo, Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**; “Interstellar Ca II Line Intensities and the Distances of the OB stars”; *The Astrophysical Journal*, Volume 634, p. 451–458. (2005), doi:10.1086/496916
  30. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J.; “Circumstellar Disk around HD 143275 and Interstellar Absorption”; *The Astrophysical Journal*, Volume 637, p. 342–345. (2006), doi:10.1086/498256
  31. **Galazutdinov G. A.**, Gnacinski P., Han I., Lee B.-C., Kim K.-M., Krelowski J.; “On the diffuse bands related to the C<sub>2</sub> interstellar

- molecule”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 447, p. 589–595. (2006), doi:10.1051/0004-6361:20053410
32. Slyk K., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Bondar A. V., Schmidt M. R., Krelowski J.; “A search for fine structure inside high resolution profiles of weak diffuse interstellar bands”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 448, p. 221–229. (2006), doi:10.1051/0004-6361:20052653
  33. **Galazutdinov G. A.**, Manico G., Krelowski J.; “Blueshifted diffuse interstellar bands in the spectrum of HD 34078”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 366, p. 1075–1080. (2006), doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09886.x
  34. Gnacinski P., Sikorski J. K., **Galazutdinov G. A.**; “Electron density and carriers of the diffuse interstellar bands”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 469, p. 201–206. (2007), doi:10.1051/0004-6361:20077077
  35. Bondar A., Kozak M., Gnacinski P., **Galazutdinov G. A.**, Beletsky Y., Krelowski J.; “CaFe interstellar clouds”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 378, p. 893–900. (2007), doi:10.1111/j.1365-2966.2007.11788.x
  36. Weselak T., **Galazutdinov G.**, Musaev F., Krelowski J.; “Relation between CH cation and neutral/molecular hydrogen”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 479, p. 149–154. (2008), doi:10.1051/0004-6361:20078540
  37. **Galazutdinov G. A.**, LoCurto G., Han I., Krelowski J.; “Blueshifted Diffuse Interstellar Bands in the Sco OB1 Association”; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 120, p. 178. (2008), doi:10.1086/528938
  38. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Krelowski J.; “The relation between CH and CN molecules and carriers of 5780 and 5797 diffuse interstellar bands”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 484, p. 381–388. (2008). doi:10.1051/0004-6361:20078304
  39. **Galazutdinov G. A.**, Lo Curto G., Krelowski J.; “Fine structure in the profiles of strong diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 386, p. 2003–2008. (2008), doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13015.x

40. **Galazutdinov G. A.**, LoCurto G., Krelowski J.; “High-Resolution Profiles of Diffuse Interstellar Bands”; *The Astrophysical Journal*, Volume 682, p. 1076–1086. 2008, doi:10.1086/589758
41. Slyk K., Bondar A. V., **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J.; “CN column densities and excitation temperatures”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 390, p. 1733–1750. (2008), doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13871.x
42. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Beletsky Y., Krelowski J.; “Observational test of the CH cation oscillator strengths”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 495, p. 189–194. doi:10.1051/0004-6361/200810348
43. Kazmierczak M., Gnacinski P., Schmidt M. R., **Galazutdinov G.**, Bondar A., Krelowski J.; “Excitation temperature of C<sub>2</sub> and broadening of the 6196 Å diffuse interstellar band”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 498, p. 785–791. (2009), doi:10.1051/0004-6361/200811558
44. Weselak T., **Galazutdinov G.**, Beletsky Y., Krelowski J.; “The relation between interstellar OH and other simple molecules”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 499, p. 783–787. (2009), doi:10.1051/0004-6361/200911616
45. Megier A., Strobel A., **Galazutdinov G.A.**, Krelowski J.; “The interstellar Ca II distance scale”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 507, p. 833–840. (2009), doi:10.1051/0004-6361/20079144
46. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Beletsky Y., Krelowski J.; “Interstellar NH molecule in translucent sightlines”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 400, p. 392–397. (2009), doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15466.x
47. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Han I., Krelowski J.; “Doppler splitting in diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 401, p. 1308–1314. (2010), doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15729.x
48. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Beletsky Y., Krelowski J.; “The relation between column densities of interstellar OH and CH molecules”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 402, p. 1991–1994. (2010), doi:10.1111/j.1365-2966.2009.16028.x

49. Krelowski J., Beletsky Y., **Galazutdinov G. A.**, Kolos R., Gronowski M., LoCurto G.; “Evidence for Diacetylene Cation as the Carrier of a Diffuse Interstellar Band”; *The Astrophysical Journal*, Volume 714, p. L64–L67. (2010), doi:10.1088/2041-8205/714/1/L64
50. Krelowski J., Beletsky Y., **Galazutdinov G. A.**; “Hydroxyl Cation in Translucent Interstellar Clouds”; *The Astrophysical Journal*, Volume 719, p. L20–L22. (2010), doi:10.1088/2041-8205/719/1/L20
51. Kazmierczak M., Schmidt M. R., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F. A., Beletsky Y., Krelowski J.; “Centrosymmetric molecules as possible carriers of diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 408, p. 1590–1597. (2010), doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17226.x
52. Weselak T., **Galazutdinov G.**, Beletsky Y., Krelowski J.; “On the CH B-X (1, 0) band in translucent clouds”, *Astronomische Nachrichten*, Volume 332, p. 167. (2011), doi:10.1002/asna.201011472
53. Salama F., **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J., Biennier L., Beletsky Y., Song I.-O.; “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and the Diffuse Interstellar Bands: A Survey”; *The Astrophysical Journal*, Volume 728, p.154-161, (2011), doi:10.1088/0004-637X/728/2/154
54. **Galazutdinov G.**, Lee B.-C., Song I.-O., Kazmierczak M., Krelowski J.; “A search for interstellar naphthalene and anthracene cations”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 412, p. 1259–1264. (2011). doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17985.x
55. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Beletsky Y.; “Unusually high rotational temperature of the CN radical”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 531, A68, (2011), doi:10.1051/0004-6361/201016290
56. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Kolos R.; “Can H<sub>2</sub>CCC be the Carrier of Broad Diffuse Bands?”; *The Astrophysical Journal*, Volume 735, p. 124-129, (2011), doi:10.1088/0004-637X/735/2/124
57. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J.; “Metastable helium in absorption towards ζ Ophiuchi”; *Monthly Notices of the Royal*

- Astronomical Society, Volume 422, p. 3457–3459. (2012), doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20856.x
58. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Gnacinski P.; “CN rotational excitation”; *Astronomische Nachrichten*, Volume 333, p. 627, (2012), doi:10.1002/asna.201111708
  59. Schmidt M. R., Krelowski J., Weselak T., **Galazutdinov G. A.**; “CN (3,0) red system features in interstellar translucent clouds”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 431, p. 1795–1799, (2013), doi:10.1093/mnras/stt294
  60. **Galazutdinov G.**, Krelowski J., Beletsky Y., Valyavin G.; “Variable interstellar lines in spectra of HD 73882”; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 125, p. 1329, (2013), doi:10.1086/673754
  61. Schmidt M. R., Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Zhao D., Haddad M. A., Ubachs W., Linnartz H.; “Detection of vibronic bands of C<sub>3</sub> in a translucent cloud towards HD 169454”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 441, p. 1134–1146, (2014), doi:10.1093/mnras/stu641
  62. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Gnacinski P., Krelowski J.; “Consistent System of Oscillator Strengths of A<sup>2</sup>Δ -- X<sup>2</sup>Π (0,0) and B<sup>2</sup>Σ -- X<sup>2</sup>Π (0,0) Bands of CH Molecule”; *Acta Astronomica*, Volume 64, p. 277–292, (2014), doi:10.48550/arXiv.1410.3024
  63. Weselak T., **Galazutdinov G. A.**, Sergeev O., Godunova V., Kolos R., Krelowski J.; “Carriers of 4964 and 6196 Diffuse Interstellar Bands and Environments Dominated by either CH or CH<sup>+</sup> Molecules”; *Acta Astronomica*, Volume 64, p. 371–382, (2014), doi:10.48550/arXiv.1411.5013
  64. **Galazutdinov G.**, Strobel A., Musaev F. A., Bondar A., Krelowski J.; “The Structure and Kinematics of the Galaxy Thin Gaseous Disk Outside the Solar Orbit”; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 127, p. 126-142, (2015), doi:10.1086/680211
  65. Bernstein L. S., Clark F. O., Lynch D. K., **Galazutdinov G. A.**; “Analysis of Narrow and Broad Profiles Observed for the λ6614 Diffuse Interstellar Band”; *The Astrophysical Journal*, Volume 801, p. 6-17, (2015), doi:10.1088/0004-637X/801/1/6
  66. **Galazutdinov G.**, Krelowski J., Beletsky Y., Valyavin G.; “Position Displacement of Diffuse Interstellar Bands”; *Publications*

- of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 127, 356-365, (2015), doi:10.1086/681018
67. Zhao D., **Galazutdinov G. A.**, Linnartz H., Krelowski J.; “Detection of OH<sup>+</sup> in Translucent Interstellar Clouds: New Electronic Transitions and Probing the Primary Cosmic Ray Ionization Rate”; *The Astrophysical Journal*, Volume 805, p. L12-16, (2015), doi:10.1088/2041-8205/805/2/L12
  68. Zhao D., **Galazutdinov G. A.**, Linnartz H., Krelowski J., “Mercapto radical (SH) in translucent interstellar clouds”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 579, p. L1-3, (2015), doi:10.1051/0004-6361/201526488.
  69. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Mulas G., Maszewska M., Cecchi-Pestellini C.; “Redshifted diffuse interstellar bands in the Orion OB1 association”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 451, p. 3210–3218, (2015), doi:10.1093/mnras/stv1117
  70. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Bondar A., Beletsky Y.; “Observational analysis of the well-correlated diffuse bands: 6196 and 6614 Å”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 460, p. 2706–2710, (2016), doi:10.1093/mnras/stw1167
  71. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Mulas G., Bondar A., Musaev F. A., Shapovalova A., Cecchi-Pestellini C., Beletsky Y., Lee B. - C.; “Variable Intensities of Molecular Features in the Spectrum of AE Aur”; *Acta Astronomica*, Volume 66, p. 391–403, (2016).
  72. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Strobel A., Mulas G., “Gray Extinction in the Orion Trapezium”; *Acta Astronomica*, Volume 66, p. 469–480, (2016).
  73. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Bondar A., Byeong-Cheol L.; “Constant Intensities of Diffuse Interstellar Bands in the Spectrum of AE Aur”; *Acta Astronomica*, Volume 67, p. 71-80, (2017), doi:10.32023/0001-5237/67.1.5
  74. **Galazutdinov G. A.**, Shimansky V. V., Bondar A., Valyavin G., Krelowski J.; “C<sub>60</sub><sup>+</sup> - looking for the bucky-ball in interstellar space”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 465, p. 3956–3964, (2017), doi:10.1093/mnras/stw2948
  75. **Galazutdinov G. A.**, Lee J.-J., Han I., Lee B.-C., Valyavin G., Krelowski J.; “Infrared diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices*

- of the Royal Astronomical Society, Volume 467, p. 3099–3104, (2017), doi:10.1093/mnras/stx330
76. **Galazutdinov G. A.**, Krelowski J.; “Looking for the Weak Members of the  $C_{60}^+$  Family in the Interstellar Medium”; *Acta Astronomica*, Volume 67, p. 159–169, (2017), doi:10.32023/0001-5237/67.2.4
  77. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Strobel A., Bondar A.; “Spectrophotometric Distances - Problem of Interstellar Extinction”; *Acta Astronomica*, Volume 67, p. 281–296, (2017), doi:10.32023/0001-5237/67.3.6
  78. Bernstein L. S., Shroll R. M., **Galazutdinov G. A.**, Beletsky Y.; “Spectral Deconvolution of the 6196 and 6614 Å Diffuse Interstellar Bands Supports a Common-carrier Origin”, *The Astrophysical Journal*, Volume 859, 174-193, (2018), doi:10.3847/1538-4357/aabd85
  79. Krelowski J., Strobel A., **Galazutdinov G. A.**, Musaev F., Bondar A.; “On the Distance Measurements in the Thin Milky Way Disk”; *Acta Astronomica*, Volume 68, p. 285–300, (2018), doi:10.32023/0001-5237/68.3.7
  80. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Strobel A.; “The Milky Way Rotation Curve Revisited”; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 130, p. 114302-114307, (2018), doi:10.1088/1538-3873/aae070
  81. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Godunova V., Bondar A.; “On the Relation between Interstellar Spectral Features and Reddening”; *Acta Astronomica*, Volume 69, p. 159–175, (2019), doi:10.32023/0001-5237/69.2.4
  82. Krelowski J., Strobel A., **Galazutdinov G. A.**, Bondar A., Valyavin G.; “On the structure of the Pleiades cluster”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 486, p. 112–122, (2019), doi:10.1093/mnras/stz848
  83. Krelowski J., **Galazutdinov G.**, Bondar A.; “On the  $\sigma$  and  $\zeta$  type translucent interstellar clouds”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 486, p. 3537–3540, (2019), doi:10.1093/mnras/stz1082
  84. Krelowski J., Maric T., Karipis A., Strobel A., **Galazutdinov G. A.**; “Central Wavelengths and Profile Shapes of Diffuse Interstellar Bands versus Physical Parameters of Intervening Clouds”; *Acta*

Astronomica, Volume 69, p. 369–380, (2019), doi:10.32023/0001-5237/69.4.5

85. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Bondar, A.; “Rise of the intensity of interstellar CH<sup>+</sup> in the spectrum of AE Aur”; *Astronomische Nachrichten*, Volume 341, p. 56–63, (2020), doi:10.1002/asna.202013650
86. **Galazutdinov G.**, Bondar A., Lee B.-C., Hakalla R., Szajna W., Krelowski J.; “Survey of Very Broad Diffuse Interstellar Bands”; *The Astronomical Journal*, Volume 159, p. 113–123, (2020), doi:10.3847/1538-3881/ab6d01
87. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Siebenmorgen R.; “On the Relation between Diffuse Bands and Other Interstellar Features”; *The Astrophysical Journal*, Volume 899, p. L2–6 (2020), doi:10.3847/2041-8213/aba74d
88. Siebenmorgen R., Krelowski J., Smoker J., **Galazutdinov G.**, Bagnulo S.; “Dark dust and single-cloud sightlines in the ISM”; *Astronomy and Astrophysics*, Volume 641, A35 (37 pp) (2020), doi:10.1051/0004-6361/202037511
89. **Galazutdinov, G. A.**, Valyavin, G., Ikhsanov, N. R., & Krelowski, J., "Diffuse Bands 9577 and 9633: Relations to Other Interstellar Features" // 2021. — *The Astronomical Journal*. — V.161, №3. — p.127. — arXiv:2102.10674
90. Krelowski J., **Galazutdinov G. A.**, Gnacinski P., Hakalla R., Szajna W., Siebenmorgen, R.; “Broadened profiles of diffuse interstellar bands”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 508, p. 4241–4248, (2021), doi:10.1093/mnras/stab2774
91. **Galazutdinov G. A.**; “DECH: A Software Package for Astronomical Spectral Data Processing and Analysis”; *Astrophysical Bulletin*, Volume 77, p. 519–529, (2022), doi:10.1134/S1990341322040034
92. **Galazutdinov, G.A.**, Krelowski, J.; “Profile split of DIB 6196 in Sco OB2 association objects”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 523, p. 4158–4163, (2023), doi:10.1093/mnras/stad1701
93. **Galazutdinov, G.A.**, Santander, T.A., Babina, E., et al.; “The Interstellar Ti II Distance Scale”; *Astrophysical Bulletin*, Volume 78, p. 550–556, (2023), doi:10.1134/S1990341323700219

94. Galazutdinov, G.A., Babina, E. “On the Intrinsic Rest Wavelengths of Diffuse Interstellar Bands”; *Astrophysical Bulletin*, Volume 79, p. 359, (2024), doi:10.1134/S1990341323700219

• **Основные результаты, выносимые на защиту**

- Результаты спектральных наблюдений более 500 горячих покрасневших звезд, с высоким спектральным разрешением ( $R$  до  $\sim 3 \times 10^5$ ) и соотношением сигнал/шум (до  $\sim 4000$ ). Каталог объектов, рекомендованных для изучения межзвездной среды.
- Результаты исследования распределения межзвездного ионизованного кальция и титана и определение связи между интенсивностью линий этих элементов и расстоянием до фоновой звезды в Галактическом диске. Межзвездная «линейка» является простым дополнительным инструментом для определения расстояний в Галактическом диске.
- Результаты измерений лучевой скорости межзвездных облаков для более 250 объектов: показан кеплеровский характер кривой вращения Галактики, определяемой по межзвездным облакам ионизованного кальция.
- Обнаружение объектов с т.н. «серым» поглощением, обусловленным наличием на луче зрения пылинок большого размера (сотни микрон). Видимый блеск таких объектов не соответствует их спектральному классу, что приводит к ошибочной оценке спектрального параллакса.
- Выявление вытянутой структуры рассеянного скопления Плеяды. Скопление состоит из двух частей с разным содержанием и кинематикой межзвездного вещества. Вероятно, Плеяды являются результатом слияния двух разных скоплений.
- Обнаружение необычных, очень редких межзвездных облаков типа CaFe, с солнечным содержанием кальция и железа, без молекул и межзвездной пыли.
- Обнаружение запрещенных линии поглощения межзвездного гелия, наблюдаемых только в спектрах очень горячих звезд с мощным УФ излучением. Показано, что эти линии образуются вне

диффузных, полупрозрачных облаков, вероятно на фронте ударной волны, расширяющейся H II оболочки.

- Обнаружение линий межзвездных молекул SH, OH<sup>+</sup>, NH и «новых», неизвестные ранее линий и полос известных молекул C<sub>3</sub>, NH, OH, CH, CH<sup>+</sup> и т.д., уточнение или определение силы осцилляторов для многих линий. Оценка содержания ряда молекул в межзвездной среде и соотношения их обилия. В частности,  $N(\text{OH}/\text{H}_2) = 1.05 \pm 0.14 \times 10^{-7}$ .
- Обнаружение более 100 новых ДМП в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Оценка их длин волн и интенсивности в различных объектах.
- Результаты наблюдений детальных профилей широких ДМП 4430, 4882, 5450, 5779 и 6175 Å с высоким и очень высоким спектральным разрешением. Показано, что эти ДМП показывают хорошую корреляцию как с молекулой CH, так и с межзвездным калием.
- Результаты наблюдений детальных профилей узких и средних диффузных полос, например, 6614, 6196 и др. Определение возможных параметров носителей некоторых ДМП. Предложены возможные кандидаты в носители ДМП, например, ароматический углеводород кораннулен C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>.
- Результаты сравнения профилей ДМП с лабораторными спектрами молекул в газовой фазе и оценка верхнего предела содержания ряда молекул типа линейных углеводородов и ароматических углеводородов, например, нафталина, пирена, диацетилена и др.
- Обнаружение связи между шириной профиля ряда ДМП и вращательной температурой ряда простых межзвездных молекул, таких как C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>.
- Результаты изучения взаимной корреляции различных компонент межзвездной среды. Некоторые примеры: обнаружено, что содержания молекул H<sub>2</sub> и CH тесно связаны, что позволяет использовать молекулу CH в качестве индикатора H<sub>2</sub> – это важный вывод, поскольку линия CH 4300 Å легко доступна для измерений; показано, что молекулярная фракция водорода  $f(\text{H}_2)$  коррелирует с соотношением интенсивностей ДМП 5797 и 5780 Å, т.е. образование носителей узких ДМП происходит в более плотных

областях межзвездных облаков, защищенных от УФ-излучения, где преобладает молекулярная фракция водорода.

- Результаты исследования переменности положения и интенсивности некоторых межзвездных линий. Указано на инструментальное происхождение некоторых случаев смещения длин волн межзвездных линий. Измерены точные длины волн диффузных межзвездных полос, предложен метод объективной оценки длин волн ДМП и метод численной оценки изменений сложных профилей ДМП.

### • Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения, в которое вынесены таблицы. Общий объём диссертации 355 страниц. Диссертация содержит 185 рисунков и 75 таблиц. Список цитируемой литературы включает 565 ссылок. В конце каждой главы кратко резюмируются основные результаты.

Краткое содержание диссертации:

Во **введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования; научная новизна; практическая и научная значимость полученных результатов; степень достоверности и апробация результатов; сообщается о личном вкладе автора, приводится список работ, в которых опубликованы результаты данного исследования: формулируются положения, выносимые на защиту. Сообщается о структуре диссертации и кратко представлено ее содержание.

**Первая глава** посвящена описанию нюансов методики наблюдений, обработки и анализа спектральных данных. Дано описание алгоритмов получения данных и их обработки. Сообщается о методических приемах и специфике анализа межзвездных спектров вообще и диффузных межзвёздных полос в частности.

Во **второй главе** описаны результаты, полученные путем анализа линий атомарного газа в Галактическом диске. Сообщается об относительно равномерном заполнении диска Галактики ионизованным кальцием и титаном и, о методе измерения расстояний в Галактике, основанном на измерениях эквивалентных ширин линий этих ионов. Обоснованы преимущества использования межзвёздных облаков для определения кривой вращения Галактики и показано, что

кривая вращения Галактики, определенная по линиям межзвездного кальция имеет кеплеровский характер. Докладывается об обнаружении абсорбционных линий метастабильного гелия в спектре звезды  $\zeta$  Orh а также экзотических облаках, состоящих только из нейтрального кальция и железа. Сообщается о результатах исследования пространственной структуры рассеянного скопления Плеяды.

В **третьей главе**, посвященной исследованиям линий межзвездных молекул рассказывается о следующем: об обнаружении колебательных полос  $C_3$  в полупрозрачном облаке в направлении на HD 169454, исследовании молекулы  $OH^+$  и обнаружении не наблюдавшихся ранее электронных переходов; исследовании связи межзвездной молекулы  $OH$  с некоторыми другими простыми молекулами; исследовании молекул  $CH$ ,  $CH^+$ ,  $CN$ , для которых были уточнены силы осцилляторов, длины волн и исследована их связь с другими компонентами межзвездной среды; о первых обнаружениях линий молекул  $NH$ ,  $SH$ ; о поиске линейной межзвездной молекулы  $C_5$ .

В **четвертой**, самой короткой **главе**, рассказывается об исследовании феномена серой экстинкции и поиске объектов, подверженных ее влиянию.

**Пятая**, самая большая **глава** диссертации посвящена результатам исследования диффузных межзвездных полос, старейшей проблемы астрономической спектроскопии. Здесь сообщается о специфике поиска и анализа диффузных межзвездных полос, о результатах наблюдений и анализа профилей диффузных полос, в том числе с очень высоким спектральным разрешением (до 300000). Также сообщается о результатах исследования связи диффузных полос с другими компонентами межзвездной среды, включающими пыль, атомы, различные молекулы, а также свободные электроны. Докладывается об обнаружении и исследований различной переменности межзвездных линий, в том числе диффузных межзвездных полос. Обсуждаются возможные причины такой переменности, в ряде случаев, как выяснилось, имеющей методическое происхождение. Наконец, здесь обсуждаются результаты поиска носителей диффузных межзвездных полос среди линейных молекул, полициклических ароматических углеводородов и фуллеренов. Обсуждается взаимосвязь между диффузными полосами. Особое внимание уделено возможной связи диффузных полос 6196 и 6614  $\text{\AA}$ ,

показывающих максимальный (близкий к единице) коэффициент корреляции среди любой пары известных диффузных полос.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации.

## Список литературы

- Adams, W. S.** "Observations of Interstellar H and K, Molecular Lines, and Radial Velocities in the Spectra of 300 O and B Stars." // **1949**. — ApJ. — V.109. — p.354.
- Beals, C. S.** "On the interpretation of interstellar lines" // **1936**. — MNRAS. — V.96. — p.661.
- Beals, C. S. & Blanchet, G. H.** "An absorption line at  $\lambda$  4430.6 of possibly interstellar origin" // **1938**. — MNRAS. — V.98. — p.398.
- Dunham, T.** "Interstellar Neutral Potassium and Neutral Calcium" // **1937**. — PASP. — V.49, №287. — p.26.
- Fan, H., Hobbs, L. M., Dahlstrom, J. A., Welty, D. E., York, D. G., Rachford, B. et al.** "The Apache Point Observatory Catalog of Optical Diffuse Interstellar Bands" // **2019**. — ApJ. — V.878, №2. — p.151. — arXiv:1905.05962
- Galazutdinov, G. A., Musaev, F. A., Krelowski, J., & Walker, G. A. H.,** "Narrow Diffuse Interstellar Bands: A Survey with Precise Wavelengths" // **2000**. — PASP. — V.112, №771. — p.648.
- Hartmann, J.** "Investigations on the spectrum and orbit of delta Orionis." // **1904**. — ApJ. — V.19. — p.268.
- Heger, M. L.** "Stationary Sodium Lines in Spectroscopic Binaries" // **1919**. — PASP. — V. 31, №184. — p.304.
- Heger, M. L.** "The spectra of certain class B stars in the regions 5630A-6680A and 3280A-3380A" // **1922**. — Lick Observatory Bulletin. — V.10, №337. — p.146.
- Herbig, G. H. & Soderblom, D. R.** "The diffuse interstellar bands. V. High-resolution observations." // **1982**. — The Astrophysical Journal. — V.252. — p.610.
- Herbig, G. H.** "The Diffuse Interstellar Bands" // **1995**. — Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — V.33. — p.19.
- Josafatsson, K. & Snow, T. P.** "CCD Observations of Diffuse Interstellar Bands in Reflection Nebulae" // **1987**. — ApJ. — V.319. — p.436.
- Krelowski, J. & Walker, G. A. H.** "Three Families of Diffuse Interstellar Bands?" // **1987**. — ApJ. — V.312. — p.860.
- Krelowski, J. & Westerlund, B. E.** "High-resolution profiles of diffuse interstellar bands as functions of the structure of the interstellar medium." // **1988**. — A&A. — V.190. — p.339.

**Krelowski, J.** "Diffuse Interstellar Bands. A Survey of Observational Facts" // **2018**. — PASP. — V.130, №989. — p.071001.

**Martizzi, D.**, Vogelsberger, M., Artale, M. C., Haider, M., Torrey, P., Marinacci, F. et al. "Baryons in the Cosmic Web of IllustrisTNG - I: gas in knots, filaments, sheets, and voids" // **2019**. — MNRAS. — V.486, №3. — p.3766. — arXiv:1810.01883

**Nicastro, F.**, Kaastra, J., Krongold, Y., Borgani, S., Branchini, E., Cen, R. et al. "Observations of the missing baryons in the warm-hot intergalactic medium" // **2018**. — Nature. — V.558, №7710. — p.406. — arXiv:1806.08395

**Sarre, P. J.** "The diffuse interstellar bands: A major problem in astronomical spectroscopy" // **2006**. — Journal of Molecular Spectroscopy. — V.238, №1. — p.1. — arXiv:astro-ph/0608113

**Struve, O.** "Further work on interstellar calcium." // **1928**. — ApJ. — V.67. — p.353.

Бесплатно

Галазутдинов Газинур Анварович

Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды  
в оптическом диапазоне

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_