

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

СТЕНОГРАММА
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.023.01

14 сентября 2016 года

*Защита диссертации
Павлюченкова Ярослава Николаевича
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.02 (астрофизика и звездная астрономия)
“Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах”*

Присутствовали члены диссертационного совета:

1. Кардашев Н.С., академик, 01.03.02, физ.-мат. науки, председатель
2. Ковалев Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки, ученый секретарь
3. Бочкарев Н.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
4. Бурдюжа В.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
5. Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
6. Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
7. Каленский С.В. д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки
8. Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки
9. Ларионов М.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
10. Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
11. Малофеев В.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки
12. Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки
13. Рудницкий Г.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки
14. Шишов В.И., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Председательствующим на данном заседании является доктор физико-математических наук, академик РАН, руководитель АКЦ ФИАН, председатель диссертационного совета Н.С. Кардашев.

Секретарь заседания – ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук Ю.А. Ковалев.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Коллеги, начинаем наше первое заседание. У нас сегодня две защиты. Присутствуют 14 из 21 члена диссертационного совета. Кворум (14 человек) имеется. Первая защита – диссертация на соискание ученой степени доктора кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 (астрофизика и звездная астрономия), представленная Ярославом Николаевичем Павлюченковым, “Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах”. Научный руководитель – член-корреспондент РАН Борис Михайлович Шустов. Официальные оппоненты – Дмитрий Зигфридович Вибе (ИНАСАН) и Андрей Михайлович Соболев (УрФУ). Ведущая организация – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ). Слово предоставляется секретарю диссовета.

СЕКРЕТАРЬ: Зачитывает основные выдержки из представленных соискателем документов и делает заключение о соответствии документов установленным требованиям ВАК для защиты докторской диссертации.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Слово для доклада предоставляется соискателю.

ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

СОИСКАТЕЛЬ: выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1–56, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении к стенограмме, а также прикладываются к аттестационному делу в бумажном и электронном (на диске, в соответствующем файле) видах.

Слайд 1. Здравствуйте! Тема моей диссертации: "Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах".

Слайд 2. План моего доклада повторяет структуру диссертации, которая состоит из введения, пяти глав и заключения.

Слайд 3. Начну с краткого введения. Излучение пыли и молекул — важнейший источник информации о дозвездных и протозвездных объектах, таких как дозвездные и протозвездные ядра молекулярных облаков, протопланетные диски, области НII возле молодых звезд. В качестве примера на этом слайде показано изображение протопланетного диска на краю глобулы бокка CB26. Красные контуры здесь соответствуют тепловому радиоизлучению пыли от самого диска, оттенками серого показано инфракрасное излучение, рассеянного пылью в полярных областях диска, зеленые контуры соответствуют излучению в линии молекулы CO, приходящему из биполярных истечений. Совершенно разный вид распределений говорит о том, что излучение молекул и пыли несет комплементарную информацию о структуре и физических условиях в данном объекте.

Слайд 4. Проведение таких высококачественных наблюдений стало возможным сравнительно недавно в связи с работой радиоинтерферометров с высокой чувствительностью и хорошим угловым разрешением, таких как интерферометр ALMA, а также космических телескопов, работающих в инфра-

красном диапазоне, таких как Spitzer и Herchel.

Слайд 5. Однако, извлечение информации о структуре, физических и химических свойствах протозвездных объектов из наблюдений — это обратная задача, осложненная большим количеством физических факторов, влияющих на спектры излучения. Фундаментальный путь решения этой задачи — это развитие самосогласованных моделей, включающих расчет физической структуры объектов и их наблюдательных проявлений. При этом одним из основных элементов таких моделей является задача расчета переноса излучения.

Слайд 6. В связи с этим основными задачами диссертации являются: 1) разработка и усовершенствование методов расчета переноса излучения на пыли и в линиях молекул, а также методов анализа результатов численного моделирования переноса излучения, оптимизированных для исследования дозвездных и протозвездных объектов (ядер молекулярных облаков, протопланетных дисков, а также областей III вокруг молодых звезд); 2) разработка методов диагностики тепловой, химической и кинематической структуры протозвездных объектов, т.е. систематическое исследование факторов, определяющих характеристики теплового излучения пыли и профилей линий излучения молекул в условиях, характерных для дозвездных и протозвездных объектов; 3) изучение индивидуальных дозвездных и протозвездных объектов на базе самосогласованного моделирования их химико-динамической и тепловой эволюции и расчета теоретических профилей линий излучения молекул, спектральных распределений энергии и распределений интенсивности излучения.

Слайд 7. Решению первой задачи целиком посвящена первая глава диссертации. Необходимо сказать, что теория переноса излучения является фундаментальным разделом современной астрофизики. В ее развитие большой вклад внесли и отечественные ученые. Однако, перенос излучения в линиях молекул имеет свою специфику, и в нашей стране им занимается не так уж много научных групп.

Слайд 8. Задача переноса излучения в линиях молекул состоит в определении самосогласованных распределений интенсивности излучения и населенностей энергетических уровней молекул. Говоря об энергетических уровнях, я имею ввиду прежде всего вращательные уровни примесных молекул, таких CO, CS, HCO⁺, которые возбуждаются при низких температурах в протозвездных и дозвездных объектах. Математически задача сводится к решению уравнения переноса излучения, записанного здесь. Несмотря на простой вид, его решение представляет собой сложную проблему. На следующих слайдах я проиллюстрирую несколько аспектов, которые помогают в анализе и решении этой задачи.

Слайд 9. На данном слайде показаны зависимости температуры возбуждения перехода HCO⁺(1-0) от плотности и температуры газа, рассчитанные в оптически-тонком приближении в присутствии фонового облучения. Из

этих распределений видно, что при достаточно высокой плотности температура возбуждения равна кинетической температуре газа. Однако условия в протозвездных объектах часто соответствуют меньшим плотностям, т.е. линии молекул формируются не в условиях локально-термодинамического равновесия (ЛТР). Это приводит к необходимости решения уравнений баланса населенностей уровней, что значительно усложняет задачу.

Слайд 10. Второй проблемой является нелокальность задачи переноса излучения, которая заключается в том, что каждый элемент среды в принципе может влиять на любой другой посредством излучения. Для некоторых случаев (например, для сжимающегося или расширяющегося по Хаббловскому закону облака) область непосредственного влияния является компактной. Это позволяет создать быстрый приближенный метод, известный как метод больших градиентов скорости. В других случаях, например, для кеплеровских дисков, как показано на этом рисунке, область непосредственного влияния не является компактной и имеет весьма причудливую форму. В своей работе мы проанализировали проблему нелокальности для кеплеровских дисков и предложили алгоритм, который позволяет в десятки раз ускорить точный метод расчета переноса излучения. Идея этого алгоритма в предварительном выделении радиативно-связанных областей интегрировании уравнения переноса излучения только вдоль этих областей. Для аксиально-симметричного кеплеровского диска нам также удалось построить быстрый локальный метод, являющийся модификацией метода больших градиентов скорости.

Слайд 11. Важным элементом численного моделирования переноса излучения является анализ и объяснение самих результатов. Зачастую бывает непросто объяснить, в частности, форму получившегося профиля линии. Для этого нами предложена диаграмма формирования профиля линии, с помощью которой легко объяснить форму спектральной линии и определить вклад каждого элемента облака в результирующий спектр. В качестве примера здесь показана такая диаграмма для одного из спектров из карты для модели протозвездного облака.

Слайд 12. В целом, разработанные для моделирования переноса излучения в линиях молекул методы реализованы нами в виде программного комплекса URANIA. Данный комплекс включает в себя также средства визуализации для построения спектральных карт, распределений интенсивности, а также инструменты анализа результатов моделирования. Значительная часть результатов, представленных в диссертации, получена с помощью данного комплекса.

Слайд 13. По первой главе на защиту выносятся методы моделирования переноса излучения, адаптированные для расчета профилей линий излучения молекул в дозвездных и протозвездных объектах, а также инструменты анализа такого моделирования.

Слайд 14. Вторая глава диссертации "Спектральная диагностика про-

тозвездных облаков" посвящена изучению факторов, влияющих на профили линий излучения молекул с учетом их сложной кинематической и химической структуры.

Слайд 15. В первом разделе данной главы исследован вопрос о том, как характеристики профилей линий излучения, такие как максимальная интенсивность, ширина линии, глубина седла самопоглощения, зависят от параметров однородного облака. Для примера здесь приведены зависимости характеристик профиля от концентрации водорода и лучевой молекулярной концентрации при остальных фиксированных параметрах облака. Несмотря на то, что однородные облака являются довольно грубым приближением к реальным протозвездным облакам, данный анализ является полезным методическим материалом, а сами диаграммы можно использовать для предварительной оценки параметров наблюдаемых облаков.

Слайд 16. В действительности, изучение ядер молекулярных облаков показывает, что они имеют неоднородную структуру плотности и скорости. Для изучения того, как эти неоднородности сказываются на спектральных проявлениях протозвездных облаков, нами предложена кинематическая модель сжатия облака, в основе которой лежит феноменологический закон сжатия из однородного в неоднородное состояние, а также закон сохранения локального углового момента. Параметрами такой модели являются время эволюции, показатель закона сжатия и начальная угловая скорость. С помощью данной модели вычисляются не только конечные распределения плотности и скорости, но и их изменение со временем.

Слайд 17. Важным следствием неоднородной структуры облаков является их сильная химическая стратификация. Поэтому совместно с описанием динамической структуры облака необходимо рассчитывать химическую эволюцию облака. Для этого мы используем модель химической эволюции межзвездной и околозвездной среды, разработанную в нашем институте. В качестве примера здесь приведены распределения относительной концентрации НСО^+ вдоль радиуса облака. Данные распределения получены для различных значений интенсивности внешнего ультрафиолетового излучения и потока космических лучей. Нами показано, что на химическую структуру облака также сильно влияют и другие параметры. В частности, – время эволюции облака и коэффициент прилипания молекул к пылинкам, значения которого известны из экспериментов с большой погрешностью. Основными процессами, определяющими такую неоднородную химическую структуру, являются фоторазрушение молекул в оболочке и их вымораживание во внутренних частях облака.

Слайд 18. По результатам моделирования химико-динамической структуры облаков были рассчитаны спектральные карты и детально проанализированы их особенности для облаков с различной кинематикой. Для примера здесь представлены карты для стационарного облака и коллапсирующего облака с вращением. Из этого примера видно, что симметрия индивидуальных

профилей и карты в целом зависят от кинематической структуры облака. Прделанный нами анализ является хорошей основой для интерпретации наблюдаемых протозвездных облаков.

Слайд 19. Разработанные в ходе этого исследования подходы мы использовали для моделирования дозвездного ядра CB17. Совместно с коллегами из Германии для этого объекта получены качественные спектральные карты в линиях различных молекул, примеры которых приведены на данном слайде. Нашей задачей стало воспроизвести эти карты в рамках разработанной химико-динамической модели и восстановить физическую структуру этого облака.

Слайд 20. Эта задача была с успехом решена и в качестве подтверждения этому здесь показано сравнение наблюдаемых и теоретических спектральных карт в линиях C18O и CS. С помощью модели нам удалось воспроизвести не только интенсивности, ширину, сдвиг линий, но и форму оптически толстых линий, а также характер асимметрии карт.

Слайд 21. В результате моделирования были определены скорость сжатия и вращения облака, угловой момент, интенсивность внешнего излучения, а также возраст ядра. Все эти величины имеют важное значение для оценки характера эволюции этого облака.

Слайд 22. По результатам этой главы на защиту выносятся следующие положения: 1) системный анализ факторов, определяющих наблюдательные проявления протозвездных облаков в линиях молекул, ключевыми из которых являются неоднородное распределение плотности, особенности тепловой и химической структуры и кинематика облака; 2) методика восстановления параметров дозвездных ядер молекулярных облаков, основанная на синтезе феноменологической модели сжатия с расчетом химической эволюции и карт профилей линий излучения молекул; 3) результаты изучения дозвездного ядра CB17. Это пример одного из самых полных и детальных исследований подобных объектов на базе химико-динамической модели и количественного сравнения с высококачественными наблюдаемыми картами линий излучения молекул.

Слайд 23. Третья глава посвящена линиям излучения молекул в протопланетных дисках и состоит из двух разделов. В первом из них исследуется влияние температурного градиента и химической стратификации на изображения протопланетных дисков. Второй посвящен изучению биполярных истечений в протопланетном диске CB26.

Слайд 24. Теоретические и наблюдательные работы показывают, что газопылевые диски вокруг молодых звезд или, как их еще называют, протопланетные диски характеризуются неоднородным распределением плотности и температуры. Одним из широко используемых подходов для описания структуры таких дисков является модель стационарного кеплеровского диска, находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии в вертикальном направлении. Считается, что такое приближение оправдано для не слишком

ранних, но и не слишком поздних фаз эволюции диска. В наших исследованиях мы также использовали эту модель, существенно оптимизировав ее по скорости расчета путем расщепления системы уравнений на независимые подсистемы и используя двухдиапазонное приближение для излучения.

Слайд 25. Как и в случае протозвездных облаков, протопланетные диски обладают сложной химической структурой, а линии молекул в общем случае формируются в не-ЛТР условиях. На этих рисунках показаны распределения плотности, температуры, концентрации НСО^+ и температуры возбуждения линии $\text{НСО}^+(4-3)$ для репрезентативной модели протопланетного диска. Данные распределения получены с помощью комбинации трех моделей включающих расчет тепловой структуры, химической эволюции и переноса излучения в линиях молекул. На распределении относительной концентрации НСО^+ видна сильная стратификация вследствие процессов фоторазрушения в верхних слоях диска и вымораживания молекул вблизи экваториальной плоскости. В свою очередь температура возбуждения сильно отличается от кинетической температуры.

Слайд 26. В своих работах мы впервые показали, что особенности тепловой и химической структуры дисков должны сильно влиять на их изображения в линиях молекул. На данном слайде показаны изображения дисков в пяти частотных каналах внутри профиля линии $\text{НСО}^+(4-3)$. Изображения построены для однородной модели диска, для модели с тепловой стратификацией и для модели с тепловой и химической стратификацией. Видно, что эти изображения существенно отличаются.

Слайд 27. Наши выводы о том, что тепловая и химическая структура должны отпечатываться на изображении дисков оправдались несколько лет спустя начала работы интерферометра ALMA. На данном слайде показано изображение диска HD163296, полученного с помощью ALMA, а ниже — результаты численного моделирования с учетом тепловой и химической стратификации. Видно, что модель неплохо воспроизводит основные особенности наблюдаемой спектральной карты.

Слайд 28. Второй раздел данной главы посвящен моделированию биполярного истечения в протопланетном диске CB26, для которого нашими коллегами получены уникальные интерферометрические карты в линиях молекулы CO. Основным результатом данной работы является вывод о вращении истечения. На данном слайде показано сравнение наблюдаемой и теоретической карт средней скорости.

Слайд 29. Несмотря на то, что использованная нами кинематическая модель истечения имела феноменологический характер, с ее помощью удалось неплохо описать не только карту средней скорости, но наблюдаемые диаграммы позиция-скорость, одну из которых вы видите на этом слайде, а также восстановить параметры истечения. Отмечу, что данная работа была одной из первых надежных отождествлений вращения широких молекулярных истечений из протопланетных дисков, а сам вывод о вращении истечений

является важным для решения проблемы отвода углового момента из диска.

Слайд 30. Результатами, выносимыми на защиту по данной главе, являются: 1) физически согласованная и одновременно быстрая модель для расчета структуры протопланетного диска, находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии; 2) результаты исследования условий возбуждения молекулярных линий в протопланетных дисках и особенностей спектральных карт дисков, связанных с их сложной тепловой и химической структурой; 3) открытие вращающегося истечения из протопланетного диска CB26 с помощью анализа спектральных карт в линиях излучения молекул.

Слайд 31. Четвертая глава диссертации посвящена моделированию инфракрасного излучения в дозвездных и протозвездных объектах, генерируемого пылью. Объектами изучения в данной главе являются массивные протозвездные облака и области ионизованного водорода вокруг молодых звезд.

Слайд 32. На данном слайде приведено инфракрасное изображение одного из массивных протозвездных облаков. Это облако является представителем так называемых инфракрасных темных облаков, поскольку видно в поглощении на фоне окружающей среды. Эти объекты считаются прекурсорами массивных звезд и потому представляют большой интерес для теории образования массивных звезд. Целью нашего исследования было восстановление распределений плотности и температуры в этих объектах, используя наблюдаемые распределения интенсивности излучения одновременно в миллиметровом и инфракрасном диапазонах.

Слайд 33. Для этого мы разработали сферически-симметричную модель облака, в которой распределение температуры и профиль интенсивности определяется в результате расчета переноса излучения для заданного распределения плотности и параметров возможной звезды. На данном слайде показаны распределения плотности и температуры для репрезентативной модели облака.

Слайд 34. Свободные параметры модели определялись при помощи генетического алгоритма минимизации критерия соответствия между теоретическими и наблюдаемыми распределениями. Данная методика была применена для восстановления структуры двух инфракрасных темных облаков IRDC320 и IRDC321, теоретические и наблюдаемые распределения интенсивности которых показаны на данном слайде. Одним из главных результатов данного моделирования стал вывод о наличии звезд внутри обоих облаков, несмотря на отсутствие сильного излучения на длине волны 24 микрона, что часто ассоциируется с отсутствием внутренних источников.

Слайд 35. Вторым объектом изучения в данной главе стали области ионизованного водорода вокруг молодых звезд. Большой импульс в исследовании этих облаков появился благодаря работе космических телескопов Спитцер и Гершель. На инфракрасных изображениях области III проявляются как кольцевые туманности. Часто их также называют инфракрасными пузырями. Нашей целью было объяснить морфологию распределений интенсивно-

сти в инфракрасном диапазоне и в частности обратный порядок колец на 8 и 24 микронах в этих объектах.

Слайд 36. Для решения этой задачи была создана комплексная модель, включающая несколько элементов. Первым элементом является модель химико-динамической эволюции зоны НП на базе программного комплекса Зевс. В этой модели рассчитывается распределение плотности, скорости и температуры газа с учетом процессов ионизации и диссоциации. Именно на основе этой самосогласованной модели проводится моделирование теоретических распределений интенсивности.

Слайд 37. В ходе исследований мы пришли к выводу, что для объяснения наблюдаемых распределений интенсивности необходимо учитывать тип аспекта, связанных с пылью. Первый заключается в том, что спектр инфракрасного излучения невозможно объяснить в рамках однокомпонентной модели. Нужно учитывать, что пылинки разных размеров имеют различные температуры и излучают в различных режимах. Минимальный набор типов пылинок, позволяющий воспроизвести наблюдения, состоит из больших силикатных пылинок, мелких графитовых пылинок и полициклических ароматических углеводородов. Именно этот набор мы и использовали в наших расчетах.

Слайд 38. Второй аспект связан с тем, что температура мелких пылинок флуктуирует со временем и для расчета их спектров необходим специальный подход. Этот подход был нами реализован в виде численного кода NATALY, позволяющего вычислять тепловую структуру облака с учетом стохастического нагрева мелких пылинок и многокомпонентности пыли.

Слайд 39. Наконец, третий аспект связан с необходимостью учитывать эволюцию пыли. Одним из наших результатов является вывод о необходимости разрушения полициклических ароматических углеводородов внутри зоны ионизации ультрафиолетовым излучением звезды.

Слайд 40. На данном слайде показаны теоретические и наблюдаемые распределения интенсивностей инфракрасного излучения для туманности RCW120, как конечный результат моделирования. Видно, что модельные профили воспроизводят основные особенности наблюдаемых распределений. Этот результат является одной из первых успешных попыток объяснения наблюдаемой морфологии инфракрасного излучения от областей НП на базе самосогласованной модели.

Слайд 41. По четвертой главе на защиту выносятся следующие результаты: 1) физически-согласованный метод восстановления распределений плотности и температуры в наблюдаемых протозвездных облаках на основе моделирования распределений интенсивности и использовании эвристического алгоритма оптимизации параметров; 2) объяснение и количественное воспроизведение наблюдательных распределений интенсивности инфракрасного излучения в областях НП вокруг молодых звезд на примере объекта RCW120 в рамках самосогласованного химико-динамического моделирования областей

III с детальным расчетом переноса излучения.

Слайд 42. Последняя глава диссертации посвящена разработке модели для расчета тепловой структуры эволюционирующего протозвездного облака. Такая модель необходима для расчета эволюции облака в рамках самосогласованного гидродинамического моделирования.

Слайд 43. При построении такой модели необходимо учитывать следующие моменты. Во-первых, моделирование тепловой эволюции протозвездных облаков в общем случае требует построения нестационарной тепловой модели. Во-вторых, нестационарная тепловая модель должна быть согласована с гидродинамической моделью, что накладывает серьезные ограничения на скорость метода. И наконец, нестационарная тепловая модель должна быть достаточно точной для возможности непосредственного сопоставления результатов моделирования с наблюдательными картами. Нам удалось создать модель, удовлетворяющую все этим требованиям.

Слайд 44. Ключевые особенности нашей модели перечислены на данном слайде. В ней температуры газа и пыли считаются отдельно, при этом учитываются основные процессы нагрева и охлаждения, такие как космические лучи, фотоэффект, охлаждение линиями молекул, обмен энергией между газом и пылью, перенос ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Исходная система уравнений преобразуется в неявную устойчивую разностную схему, решение которой осуществляется с помощью быстрого итерационного метода.

Слайд 45. С помощью разработанной модели решено несколько задач. В частности, определена структура протозвездного облака, находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии. На данном слайде показаны распределения плотности и температуры в облаке с центральной концентрацией 10^6 частиц в кубическом сантиметре. Ключевой особенностью данного решения является градиент температуры, а также отличие температуры пыли и газа по всему объему облака.

Слайд 46. Эти отличия обусловлены различными процессами, нагревающими газ и пыль в условиях, когда обмен энергией между газом и пылью недостаточно эффективен.

Слайд 47. Другим приложением разработанной модели стала задача расчета эволюции облака из состояния, близкого к равновесию до момента формирования гидростатического ядра. На данном слайде показаны распределения плотности, скорости и температуры для трех моментов времени. Здесь следует отметить, что параметры первого гидростатического ядра, такие как масса и радиус оказались в хорошем соответствии с результатами других авторов. С другой стороны принципиально новой особенностью нашей модели является то, что она предсказывает разные температуры газа и пыли вплоть до формирования первого гидростатического ядра, что должно учитываться при интерпретации наблюдений данных облаков.

Слайд 48. Таким образом, результатом, выносимым на защиту по пятой

главе, является сбалансированный по точности и скорости метод расчета тепловой структуры протозвездного облака для химико-динамической модели. Будучи нестационарной, модель одновременно обладает достаточной точностью для непосредственного сравнения результатов расчетов с наблюдаемыми данными.

Слайды 49-56. В заключении отмечу, что описанные в диссертации результаты опубликованы в 29 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК. Список этих работ представлен на данных слайдах. Основные результаты были представлены на многочисленных астрофизических семинарах, а также на российских и международных конференциях. В конце своего доклада я оставляю слайды с результатами, выносимыми на защиту. Спасибо за внимание.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Вопросы пожалуйста.

ВОПРОСЫ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ВОПРОС 1 (В.Н. Лукаш): Ни одной цифры я не вижу. Рисунки вижу. Можете ли Вы в Ваших результатах привести конкретные численные значения, – например, температуру или другие значения, которые раньше не были получены.

СОИСКАТЕЛЬ: В диссертации конечно же приведены численные значения. Например, в модели эволюционирующего облака (слайд 47) на начальной фазе эволюции виден градиент температуры: в центре облака температура близка к 10 кельвинам, а на краю составляет 50-60 градусов кельвина, хотя при гидродинамических расчетах обычно считают температуру постоянной и равной 10 градусам. На конечной фазе температура в гидростатическом ядре достигает 1000 градусов кельвина и на его границе формируется ударная волна. На расстоянии порядка 100 астрономических единиц температура минимальна и составляет 7 кельвинов. А на границе облака температура опять поднимается до 50 градусов, т.е. оболочка облака практически не чувствует влияния центральных областей.

ВОПРОС 2 (П.Б. Иванов): Во всех главах Вашей диссертации, насколько я понял из доклада, Вы исследовали небольшое количество объектов, около одного объекта на каждую главу. Коль скоро это прикладная задача, вопрос: насколько ваша методика общепринята и используется для изучения большего количества объектов? Использовали ли Вы сами ее для изучения других объектов?

СОИСКАТЕЛЬ: По каждой главе конечно же нужно отдельно говорить. Например, для дозвездных ядер данная методика была применена не только для восстановления структуры объекта СВ17, но также и для восстановления структуры другого облака L1544, которое мы провели ранее. Однако этот объект в диссертации не описан, хотя методика та же самая. Что каса-

ются исследований инфракрасных темных облаков, там было два источника. Эти источники, как мы показали, существенно отличаются. На распределении интенсивности в одном из них есть сильное излучение на 70 микронах, а в другом — нет. И мы старались выбирать разные источники. Если говорить о протопланетных дисках, то наши исследования здесь скорее на самом переднем фронте, т.е. не так много наблюдений еще анализируются на таких продвинутых моделях. Большинство наблюдений анализируются на основе феноменологических моделей, для которых просто задаются распределения плотности и скорости.

ВОПРОС 3 (В.М. Малофеев): Скажите, пожалуйста, вот Вы привели расчеты эволюции облака. А какие вообще есть наблюдательные подтверждения сжатия облака? Можете назвать, — в частности, в ваших расчетах?

СОИСКАТЕЛЬ: Классическим критерием, который позволяет сказать, что облако коллапсирует, является своеобразный профиль линии излучения. Как раз правая карта (на слайде 18) построена для сжимающегося и вращающегося облака. Центральный профиль на этой карте имеет двугорбую структуру. Это профиль оптически-толстой линии, при этом левый пик преобладает над правым. Этот критерий уже давно известен и он используется для подтверждения того, что облако находится в состоянии сжатия. Но, одной из наших задач было более детально исследовать насколько этот критерий является надежным. Мы показали, что такой же профиль может иметь место и для чисто вращающегося облака. Поэтому необходимо исследовать карту протозвездного объекта целиком, и анализировать не только асимметрию индивидуальной линии, но и асимметрию самой карты, и по-возможности исследовать одновременно оптически-толстые и оптически-тонкие линии.

ВОПРОС 4 (В.В. Бурдюжа): У меня два количественных вопроса. У Вас была рассмотрена молекула C18O. Какое отношение C18O к C16O? Вы разделили облака на дозвездные и протозвездные. Какое время эволюции этих облаков?

СОИСКАТЕЛЬ: Отношение C16O к C18O равно 490. Использование этих линий оправдано тем, что зачастую облака являются оптически-толстыми в CO, но оптически-тонкими в C18O. Одной из наших задач было, в том числе, восстановления возраста этих облаков. Есть две концепции эволюции данных облаков. Первая — динамическая, которая говорит, что коллапс облака происходит довольно быстро за характерное динамическое время, которое составляет порядка 10^5 лет. Другая концепция — квазистационарная, которая говорит, что сжатие облака квазиравновесное и эта стадия может длиться несколько миллионов лет. Нашей задачей, в том числе, было найти критерии оценки возраста данных облаков, например, химические.

ВОПРОС 5 (В.В. Бурдюжа): А магнитное поле Вам не мешало?

СОИСКАТЕЛЬ: Магнитное поле, по-видимому, играет важную роль в эволюции данных объектов. Я не рассказал об этом в докладе, но в пятой главе диссертации описана двумерная модель с учетом магнитного поля. В

этой модели магнитное поле играет важную роль, в частности, оно приводит к тому, что облако начинает сжиматься преимущественно вдоль одного направления. На более поздних стадиях магнитное поле может играть еще более важное значение.

ВОПРОС 6 (Н.С. Кардашев): Последние годы много внимания уделяется добавлению нового механизма излучения за счет вращения пылинок. Об этом Вы, по-моему, не говорили? Это, наверное, тоже будет влиять на формирование спектра: на перекачку кинетической энергии во вращательную и в энергию излучения.

СОИСКАТЕЛЬ: Да, действительно. Такой механизм сейчас активно обсуждается.

ВОПРОС 7 (И.Е. Вальтц, АКЦ ФИАН): Вы знаете, у Вас в автореферате литература нигде не описана в тексте. Вот идет текст, а литература совершенно отдельно и я не могу сориентироваться. По четвертой главе давайте вернемся к облакам IRDC, 34 слайд. В какой статье это опубликовано? Как мне ее найти? А то мне придется все Ваши статьи читать.

СОИСКАТЕЛЬ: Можно я покажу? Статья называется "Определение параметров массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения опубликована в *Астрономическом Журнале*, в 2011 году, в списке публикаций под номером [A22].

ВОПРОС 8 (И.Е. Вальтц, АКЦ ФИАН): А в *Monthly Notices* у Вас есть публикация по этой теме? Как я буду читать ее в *Астрономическом Журнале*? У меня нет доступа к *Астрономическому журналу*. Она выложена на *astro-ph*?

СОИСКАТЕЛЬ: *Астрономический Журнал* — это наш российский журнал, рекомендованный ВАК. Насчет того, выложена ли эта статья на *astro-ph*, я точно не помню. Если Вам нужно, я могу ее Вам прислать.

ВОПРОС 9 (И.Е. Вальтц, АКЦ ФИАН): Мне хотелось бы узнать, почему у Вас только объекты IRDC 320 и 321. А чем 322-ой объект вас не устроил? На каких телескопах проведены их наблюдения?

СОИСКАТЕЛЬ: Дело в том, что наша группа непосредственно не связана с наблюдениями. Мы используем наблюдения наших коллег из института астрономии им. Макса Планка. Данные два объекта были выбраны из их выборки объектов, поскольку эти два объекта были наиболее детально ими исследованы. Насколько я помню, миллиметровые карты получены на АРЕХ, а инфракрасные карты — это доступные всем карты с космического телескопа Спитцер.

ВОПРОС 10 (М.Г. Ларионов): Скажите, пожалуйста, вот Вы говорили про градиент температуры наружу. А в протозвездных облаках наступает момент, когда источник нагрева внутри возникает?

СОИСКАТЕЛЬ: Да, сейчас я постараюсь Вам объяснить. При сжатии облака плотность в центре повышается. Если на начальных фазах сжатия облако было оптически-тонким к собственному тепловому излучению, преж-

де всего излучению пыли, то на продвинутых фазах с высокой плотностью облако перестает быть прозрачным к собственному тепловому излучению и тепловое излучение не успевает выходить из центральных областей. И возникает момент, когда облако начинает нагреваться за счет адиабатического сжатия. Именно этот момент и соответствует началу формирования первого гидростатического ядра. Это газопылевое ядро, из которого излучение не успевает выходить в гидродинамической шкале сжатия облака.

ВОПРОС 11 (М.Г. Ларионов): Конвекция должна возникать в этот момент?

СОИСКАТЕЛЬ: Этот вопрос мы не исследовали из-за ограничений одномерного приближения.

СЕКРЕТАРЬ: Чтобы исключить недоразумения, в том числе в дальнейшем в ВАКе, я хочу сделать комментарий в виде вопроса. Ярослав Николаевич, я правильно понимаю, что в вопросе Ирины Евгеньевны Вальтц на тему показанных Вами результатов не содержится предположений, что Ваши результаты не опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК, а речь шла только о трудностях ее доступа к этому журналу?

СОИСКАТЕЛЬ: Да.

ВОПРОС 12 (М.Г. Ларионов): У Вас был один из слайдов, на котором Вы приводили Хаббловский закон расширения облака и значение скорости 0.1 км/с. Чему соответствует эта скорость? Этим значением Вы фиксировали какой-то уровень на каком-то расстоянии? Ведь Хаббловский закон предполагает увеличение скорости с расстоянием.

СОИСКАТЕЛЬ: Так, здесь (на слайде 15) облако однородное и стационарное, оно не сжимается. И значение 0.1 км/с — это один из параметров уравнения переноса излучения, турбулентная ширина линии. К Хаббловскому закону это значение не имеет отношения.

ВОПРОС 13 (С.В. Каленский): Вы исследовали вращающийся джет. Скорость вращения у него какая?

СОИСКАТЕЛЬ: На слайде 28 на карте средней скорости, к сожалению, не очень хорошо видно, разница между красным и синим цветами составляет 6 км/с. Таким образом, разница перпендикулярно оси истечения меньше 1 км/с, т.е. несколько сот метров в секунду. Один из выводов этой работы в том, что вращение истечения удалось "зацепить" благодаря тому, что истечение лежит практически в картинной плоскости. Если бы оно было наклонено под значительным углом, то такой градиент вращательной скорости было бы гораздо сложнее "вытащить" из-за того, что больший вклад давала бы радиальная скорость истечения.

ВОПРОС 14 (П.Б. Иванов): Маленький вопрос в продолжение. За счет чего такой джет возникает?

СОИСКАТЕЛЬ: Этот вопрос мы не исследовали в своей работе, но есть несколько физических моделей для объяснения этих джетов. Одна из них — это магнитная модель. Если в диске есть магнитное поле и вращение проис-

ходит достаточно быстро, то центробежная сила приводит к истечению.

ВОПРОС 15 (П.Б. Иванов) : Это механизм Блэндфорда и Пейна. А еще какие механизмы?

СОИСКАТЕЛЬ: Много есть процессов, которые могут приводить к формированию таких истечений, например, испарение дисков. С другой стороны, есть указания на то, что в данном диске может присутствовать двойная система внутри с расстоянием между компонентами того же порядка, что и радиус запуска истечения у нас в модели. То есть вопрос о механизме запуска этого истечения открыт.

ВОПРОС 16 (П.Б. Иванов): Казалось, что Ваши результаты были бы особо интересны, если бы они позволили выбрать между разными моделями запуска истечения?

СОИСКАТЕЛЬ: Согласен. Было бы здорово, если бы эти результаты были подтверждены в рамках некоторой самосогласованной модели. Но, к сожалению, на первом этапе изучения этого объекта мы использовали феноменологическую модель исключительно для того, чтобы доказать наличие вращения.

ВОПРОС 17 (М.Г. Ларионов): Вы использовали набор размеров пылинок, в основном, микронных и субмикронных размеров. Дело в том, что при очень низких температурах могут возникать и более крупные пылинки. Это задавалось или как-то определялись в Ваших наборах размеров пылинок?

СОИСКАТЕЛЬ: В той работе, которая описана в диссертации, три пылевые компоненты, о которых я рассказал, были выбраны из распределения Вайнгратнера и Дрейна по размерам пылинок. Есть несколько стандартных моделей межзвездной пыли и для упрощения описания мы выяснили, что вместо рассмотрения огромного числа размеров пылинок достаточно рассмотреть три репрезентативных набора из этого распределения, которые также хорошо описывают наблюдаемые данные. Однако, в более поздних работах, которые не включены в диссертацию, мы пытаемся сами определять параметры пылинок.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Еще вопросы есть? Нет. Спасибо большое. Юрий Андреевич, следует ли нам заслушать выступление научного консультанта сейчас или после перерыва?

СЕКРЕТАРЬ: По новому положению мы можем сделать перерыв в любое время. Может быть имеет смысл сделать перерыв сейчас, а не после выступления научного консультанта?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Давайте все же дадим возможность выступить консультанту, как логическое продолжение доклада. Слово предоставляется научному консультанту Шустову Борису Михайловичу.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: Выступает (отзыв прилагается).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Объявляется перерыв на 15 мин.

ПЕРЕРЫВ (15 мин)

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ (после перерыва): Продолжаем. Слово предоставляется секретарю.

СЕКРЕТАРЬ: зачитывает отзыв организации, где выполнена работа и отзыв ведущей организации (отзывы положительные, документы прилагаются).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Ярослав Николаевич, будете отвечать на отзывы сразу?

ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

СОИСКАТЕЛЬ: Да, отвечу на замечания и вопросы ведущей организации в порядке их нумерации в отзыве (показывает слайды 58-65 презентации с вопросами ведущей организации и ответами на них).

Зачитывает замечание 1: Диссертант основное внимание уделяет подробному решению задач оптики, но, привлекая кинематику или гидростатику, в гораздо меньшей степени следит за самосогласованностью используемых динамических моделей. Например, в модели протопланетного диска, предполагаемого находящимся в гидростатическом равновесии в вертикальном направлении и физические свойства которого описаны в п.3.1.1, задается распределение с радиусом поверхностной плотности $\Sigma(R) = \Sigma_0(R/R_0)^{-3/2}$ (стр.105), откуда из закона сохранения потока массы в условиях стационарного диска должно вытекать $u_r = \dot{M}(R/R_{in})^{1/2}/(\Sigma_0 R_{in})$, где u_r — радиальная скорость аккрецирующего вещества, т.е. u_r растет с удалением от центра как $u_r \sim R^{1/2}$. Для принятых в работе значений параметров диска $\Sigma_0 = 100$ г/см³, $R_{in} = 1$ а.е. и темпа аккреции $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot$ год⁻¹ (там же на стр.105) на радиусе $R = 100$ а.е. имеем $u_r \sim 4$ км/с, тогда как тепловая скорость, судя по рис. 3.1, в этой области диска соответствует величине ~ 0.3 км/с, причем разница в скоростях только увеличивается к внешнему краю диска вплоть до $R = 1000$ а.е. Если принять на веру утверждение диссертанта, что аккреция в его модели обусловлена аккреционной вязкостью (стр.99), то тогда радиальная скорость u_r должна определяться турбулентной вязкостью, $u_r \approx \nu/R$, где ν — кинематический коэффициент вязкости. Характерная скорость турбулентных пульсаций v_{turb} может быть оценена снизу как $v_{turb} \approx \nu/H$, где H — толщина диска. Для принятой в работе геометрии диска $H \approx R$ имеем в результате $v_{turb} \approx u_r$, т.е. уже на радиусе $R = 100$ а.е. турбулентность должна быть существенно сверхзвуковой с характерными числами Маха $\sim 4/0.3 > 10$ и должна расти к периферии диска. Даже если предположить, что сверхзвуковая турбулентность генерируется и поддерживается в большей части диска некими неизвестными источниками, это должно приводить к росту вязкой диссипации к периферии, что не согласуется с принятым в работе ее

распределением как убывающей функции радиуса $S_{hd} \sim R^{-3}$ (стр.102).

Ответ: к сожалению, добиться полной согласованности зачастую бывает трудно, с учетом сложности и многообразия рассматриваемых физических процессов. Использование упрощенных кинематических моделей в этом случае является компромиссом, позволяющим решить поставленную задачу. Что касается приведенного примера, корректная подстановка параметров приводит к значению скорости $u_r \approx 10$ м/с на 100 а.е, а не указанное в вопросе 4 км/с, т.е. радиальное течение в данной модели существенно дозвуковое. Функция нагрева: $S_{hd} = 3GM\dot{M}/(4\pi R^3)$ для модели стационарного вязкого диска не зависит от закона распределения вязкости в диске, см. например, J. E. Pringle, "Accretion disks in astrophysics Ann.Rev.Astron.Astrophys. 1981, V.19 P. 137.

Зачитывает замечание 2: Большие сверхзвуковые скорости (более 10 чисел Маха), которые появляются в расчетах коллапса облака (рис. 5.6, 5.7), обусловлены выбором сильно неравновесных начальных условий. Почему нельзя было в расчетах "включать" эволюцию облака адиабатически медленно?

Ответ: в расчете изотермического и адиабатического коллапса неравновесные начальные условия задавались исключительно для тестирования гидродинамического метода. Такие условия хороши тем, что позволяют сравнить результаты численного моделирования с аналитическими (в частности, автомодельными) решениями. При расчете коллапса с использованием тепловой модели начальные условия были близки к равновесным.

Зачитывает замечание 3: При записи уравнений переноса для молекул (1.1) учитываются излучение и поглощение только в этих молекулах. Однако в процессе распространения электромагнитной волны, имеющей сформированную линию излучения, она проходит через различные среды (неоднородные) и в результате профиль линии может существенно измениться. Насколько это может повлиять на результат?

Ответ: на профили линий излучения может влиять излучение и поглощение пылью, однако для рассмотренных примеров и переходов молекул вклад пыли в формирование линий пренебрежимо мал. Пылевой континуум необходимо учитывать для более высоких переходов, например, для CO(7-6), возбуждаемых в плотных и горячих областях протозвездных объектов. Учет такого влияния предусмотрен в разработанном программном комплексе.

Зачитывает замечание 4: Стр.26. В уравнениях (1.4–1.5) автор рассматривает интенсивность излучения с учетом спонтанных и вынужденных переходов, описываемых с помощью коэффициентов Эйнштейна. Эти коэффициенты связаны между собой с помощью частотно-зависящего множителя, пропорционального кубу частоты: $A_{i,j} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{i,j}$. В радиодиапазоне роль спонтанных переходов в силу малости частоты сравнительно мала, однако, автор сохраняет коэффициент спонтанных переходов при расчете поглощения. Тогда почему не учтена описанная выше частотная зависимость между

коэффициентами Эйнштейна?

Ответ: в условиях межзвездной среды роль спонтанных переходов молекул сравнима с вынужденными переходами. В конечном счете именно благодаря спонтанным переходам формируется наблюдаемое излучение. Малость множителя, связывающего коэффициенты Эйнштейна, не означает малой роли спонтанных переходов. Этот множитель определяет интенсивность излучения при термодинамическом равновесии: $J_\nu \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$. Отмеченная в вопросе частотная зависимость между коэффициентами Эйнштейна является неотъемлемой частью модели.

Зачитывает замечание 5: С какой точностью известны параметры, входящие в уравнения переноса излучения в среде? В этой связи, какова точность результатов, получаемых в результате численных расчетов?

Ответ: некоторые из этих параметров, такие как уровни энергии и коэффициенты Эйнштейна для рассмотренных молекулярных линий известны с очень хорошей точностью. Другие параметры известны с меньшей точностью, в частности, погрешности коэффициентов столкновительного возбуждения молекул с водородом, гелием и электронами могут составлять десятки процентов. Еще более неопределенная ситуация имеет место с коэффициентами поглощения и рассеяния пылинок, что связано с недостатком данных о структуре, форме и химическом составе межзвездных пылинок. Изучение влияния неопределенностей, связанных с этими данными — сложная задача, не затронутая в диссертации и требующая отдельного рассмотрения. Основной целью диссертации было исследование различных физических процессов и выделения их ключевых, играющих важную роль при формировании спектров излучения.

Зачитывает замечание 6: Автор отмечает существенную роль нелокальности в процессе переноса излучения через неоднородную среду. Как известно (Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967), нелокальность фактически означает необходимость учета пространственной дисперсии при рассмотрении распространения волны (Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005). Такой учет существенно влияет на прошедшую через среду волну. Насколько оправдано принятое автором описание процесса переноса, не учитывающее эффекты пространственной дисперсии?

Ответ: об эффектах пространственной дисперсии принято говорить при распространении электромагнитного излучения в плазме. Данные эффекты в работе не исследовались. Однако можно предположить, что эффекты пространственной дисперсии в рассмотренном спектральном диапазоне будут пренебрежимо малы, поскольку частота излучения в линиях рассматриваемых молекул (сотни ГГц) существенно больше плазменной (Ленгмюровской) частоты для условий в протозвездных объектах и межзвездной среде (не более десятков МГц).

Зачитывает замечание 7: В Гл. 3 при рассмотрении линий излучения в

протопланетных дисках используется закон Стефана-Больцмана с учетом усредненных по Планку и Росселанду коэффициентов непрозрачности среды. Однако сама непрозрачность может зависеть от температуры, кроме того усреднение по Планку предусматривает абсолютно черное тело, которое поглощает все частоты одинаково. В рассматриваемом же случае поглощение существенно зависит от частоты. Насколько справедливо такое рассмотрение?

Ответ: представленная в Гл.3. модель для расчета тепловой структуры протопланетного диска основана на двухдиапазонном приближении, т.е. в модели фигурируют непрозрачности для УФ- и ИК-диапазона. Внутри каждого диапазона усредненные непрозрачности вычисляются в соответствии со стандартным алгоритмом сведения моментных уравнений переноса излучения к усредненным по частоте уравнениям (см. D.Mihalas and B.Mihalas, *Foundation of Radiation Hydrodynamics: New York 1984*). Усредненные по Росселанду и по Планку непрозрачности действительно зависят от температуры (см. Рис. 5.2 в диссертации) и это учитывается в численном методе. Надежность разработанного метода тщательно проверена при сравнении с результатами точных методов, учитывающих полную зависимость от частоты.

Зачитывает замечание 8: Какова точность используемого повсюду в диссертации приближения вмерзновенности пыли в газ? Каковы характерные длины динамической релаксации пылинок за счет трения по сравнению с минимально разрешимыми в рассмотренных моделях масштабами 1 а.е.?

Ответ: условие вмерзновенности пыли в газ в дозвездных и протозвездных объектах может не выполняться. В частности, наши расчеты по моделированию динамики пыли в областях НII (Akimkin et al., *MNRAS* 2015) показывают существенную роль дрейфа пыли относительно газа под действием давления излучения. Важное значение имеет также осаждение и дрейф пыли в протопланетных дисках, особенно на поздних фазах эволюции дисков (Akimkin et al. *ApJ* 2013) Эти процессы подробно не описаны в диссертации, будучи следующим шагом в развитии моделей, и являются предметом нашего текущего изучения.

Зачитывает замечание 9: В Положении 5, выносимом на защиту, утверждается, что представлена модель протопланетного диска, "находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии". Диск потому и имеет сплюснутую форму, что основными силами, определяющими его баланс, являются центробежная и гравитационная, т.е. диск в первую очередь находится в динамическом равновесии или близком к нему.

Ответ: Согласен. Следовало бы использовать формулировку "находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии в вертикальном направлении".

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо, переходим к оппонентам. Зинченко Игорь Иванович, пожалуйста.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ И. И. ЗИНЧЕНКО: Выступает (отзыв положительный, прилагается).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Слово соискателю.

СОИСКАТЕЛЬ: Если можно, то я отвечу сразу на все отзывы оппонентов.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Хорошо. Следующий оппонент Ламзин Сергей Анатольевич.

СЕКРЕТАРЬ: Ламзин Сергей Анатольевич отсутствует по уважительной причине. Зачитывает отзыв официального оппонента С.А. Ламзина (отзыв положительный, прилагается).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Третий оппонент, Гринин Владимир Павлович, пожалуйста.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ В.П. ГРИНИН: Выступает (отзыв положительный, прилагается).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Слово соискателю для ответа на все замечания.

СОИСКАТЕЛЬ: Отвечаю на вопросы оппонентов (показывает слайды 66-69 презентации с вопросами оппонентов и ответами на них).

ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА С.А. ЛАМЗИНА

Зачитывает замечание: Единственное мое критическое замечание по научной сути диссертации связано с моделью термической структуры протопланетных дисков. Во-первых, из раздела 3.1.1 следует, что температура газа и пыли в модели принимается одинаковой, что является слишком грубым приближением. Кстати, при расчете тепловой эволюции протозвездных облаков такое упрощение не делается. Во-вторых, считается, что угол падения излучения звезды на диск не зависит от расстояния до звезды — стр.101. В-третьих, предполагается, что газ и пыль хорошо перемешаны и распределение пылинок по размерам не зависит от высоты над плоскостью диска, т.е. в модели совсем не учитывается возможность оседания пыли к центральной плоскости. Все три фактора влияют на распределение температуры в диске, а, последний еще и на распределение молекул по высоте что должно сказаться на интенсивности излучения молекулярного газа. Впрочем, в диссертации эта модель использовалась только для изучения возможности диагностики протопланетных дисков на основе излучения молекул с помощью интерферометра ALMA. Однако коль скоро автор предполагает использовать свою модель для интерпретации реальных наблюдений, вышеперечисленные факторы следует принять во внимание. Так что мое замечание следует рассматривать, скорее, как пожелание на будущее.

Ответ: Согласен. В будущих работах мы постараемся учесть эти факторы.

ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА В.П. ГРИНИНА

Зачитывает замечание 1: В главе, где рассматриваются процессы взаимодействия молекул с частицами пыли, ничего не сказано о том, какая это пыль и как она распределена. Можно только догадываться, что пыль, по видимому близка по своим характеристикам к межзвездной пыли и хорошо перемешана с газом в пропорции 1:100 (по массе).

Ответ: Да. К сожалению этот момент не описан в тексте.

Зачитывает замечание 2: Во введении к этой главе следовало бы упомянуть пионерскую работу Дугучи и Фукуи (S. Deguchi and Y. Fukui, Publ. Astron. Soc, Japan., 29, 683, 1977), в которой задача о расчете молекулярного спектра коллапсирующего протозвездного облака была впервые решена с учетом эффектов нелокальности радиационного взаимодействия в частотах молекулярных линий.

Ответ: Согласен.

ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА И.И. ЗИНЧЕНКО

Зачитывает замечание 1: Как часто бывает для обратных задач, возникает вопрос об однозначности решения. Оно ведь ищется в рамках некоторой модели, путем оптимизации ее параметров. Автор как отмечено выше, учитывает много разных факторов и в большинстве случаев использует хорошо обоснованные модели. Тем не менее не факт, что нельзя получить столь же хорошее или, может быть, лучшее решение в рамках несколько отличающихся моделей. Например, автор совсем не учитывает мелкомасштабную фрагментарность в облаках, которая может существенно повлиять на перенос излучения (да и на химию тоже). В некоторых случаях, как например, для биполярного истечения в СВ 26, модель выглядит довольно упрощенной. Существует ведь немало хорошо разработанных физических моделей таких истечений. Конечно, для вывода о вращении истечения это не очень существенно, но для понимания физических процессов может быть весьма важно.

Ответ: Совершенно согласен. Могу только добавить, что в будущих исследованиях мы будем отдавать приоритет использованию конкретных физических моделей, и стараться избегать феноменологического описания каких-либо процессов (хотя такое описание зачастую и позволяет быстрее ответить на интересующие вопросы).

Зачитывает замечание 2: К сожалению, автор ограничивается рассмотрением излучения только линейных молекул, хотя существует немало более сложных соединений, очень важных для диагностики межзвездных облаков (например, аммиак, метанол, молекулы воды и пр.) Понятно, что основная

проблема здесь в большинстве случаев — расчет их возбуждения и переноса излучения с гораздо большего количества энергетических уровней.

Ответ: При рассмотрении излучения более сложных молекул необходимо учитывать специфику строения их энергетических уровней, их расщепление, дополнительные механизмы возбуждения, перекрытие линий и т.д. Интерпретация наблюдений излучения таких молекул безусловно очень важна и требует развития соответствующих моделей. Однако, в своих исследованиях мы приняли решение сосредоточиться на решении других проблем и использовать наиболее простые, и вместе с тем также важные для наблюдений линейные молекулы.

Зачитывает замечание 3: Структура диссертации в целом логична и последовательна за исключением того, что глава 5 находится в конце. В принципе ее результаты могли бы быть использованы в ряде предыдущих разделов. Очевидно, что такое расположение обусловлено хронологией работ автора. Еще небольшое замечание по структуре заключается в том, что некоторые громоздкие вычисления (например, разделы 5.1.3, 5.2.2) можно было бы вынести в приложение.

Ответ: Согласен. Следует также сказать, что со всеми замеченными опечатками и неточностями я согласен.

ДИСКУССИЯ

Н.С. КАРДАШЕВ: Спасибо. Есть возможность высказаться всем присутствующим. Пожалуйста, кто хочет сказать несколько слов? Сам же я хочу сказать, что работа исключительно важная, она важна в том плане, что вмещает целый ряд исследований на наземных телескопах и на космических телескопах. Безусловно и на нашем ультрафиолетовом телескопе планируется исследование областей звездообразования, планет. Мы надеемся такие исследования проводить на проекте "Миллиметр". Сейчас широко развернулись исследования, как говорил автор этой работы, на системе ALMA, которая существует. Планируются похожие исследования на строящихся крупнейших радиотелескопах, в частности, на "Квадратном километре" и на других. Мне кажется, что работа исключительно важная и я думаю, что всячески нужно поддержать положительное заключение нашего совета.

Р.Д. ДАГКЕСАМАНСКИЙ: Я бы подчеркнул сложность задач, поставленных в работе. Задачи были исключительно сложные. Я думаю, что это большое достижение автора и его коллег. Полученные результаты имеют выход на наблюдения и можно получать какие-то выводы на их основе. Мне кажется это очень важно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Есть желающие еще выступить? Похоже, что нет. Ярослав Николаевич, Вам заключительное слово.

СОИСКАТЕЛЬ: Конечно же, мне хочется поблагодарить, прежде всего своих родителей. Маму, которая сейчас волнуется. Папу, который специаль-

но приехал ко мне на защиту, за вашу поддержку и любовь. Своих соавторов, за интересную работу, с которыми понимаешь, что не так важна тема, над которой работаешь, сколько команда, с которой ты вместе. Своего научного руководителя и консультанта, за его мудрое, позитивное и ироничное отношение к миру. Большое спасибо своим друзьям, коллегам и близким людям, которые помогали мне. И конечно же оппонентам и членам диссертационного совета за вашу работу и оценки. Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста, предложения и составе счетной комиссии.

СЕКРЕТАРЬ: Есть такое предложение по счетной комиссии: В.М. Малюфеев, В.В. Бурдюжа, Ю.Ю. Ковалев.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Возражений нет? Нет. Начинаем голосование. Перерыв для проведения голосования.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ (после перерыва). Перерыв закончен. Слово Председателю счетной комиссии.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СЧЕТНОЙ КОМИССИИ: Зачитывает протокол счетной комиссии по вопросу о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Павлюченкову Ярославу Николаевичу.

Результаты голосования:

Состав совета 21 чел..

Присутствовало 14 чел.

Роздано бюллетеней 14.

Осталось нерозданных бюллетеней 7.

Оказалось в урне бюллетеней 14.

За 14.

Против 0.

Недействительных бюллетеней 0.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Кто за то, чтобы утвердить результаты голосования? Кто против? Против нет. Кто воздержался? Тоже нет. Результаты голосования утверждаются единогласно. Поздравляем! (Аплодисменты). Теперь надо принять заключение. Есть ли замечания, дополнения по Заключению? (Текст обсуждается и редактируется). Кто за то, чтобы принять отредактированный текст Заключения? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Заключение утверждается единогласно. Еще раз и более бурно поздравляем соискателя (аплодисменты). Заседание объявляется закрытым.

Председатель диссертационного совета
академик РАН

Н.С. Кардашев

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.
28 сентября 2016 г.

Ю.А. Ковалев