

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего
образования
«Волгоградский государственный
университет»
А.Э. Калинина

« ____ » _____ 2016 г.

Отзыв

ведущей организации

на диссертацию **Павлюченкова Ярослава Николаевича** на тему **«Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах»**, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Наиболее прорывными проектами в астрономии в десятые годы двадцать первого столетия стали новые инструменты, работающие в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазоне (Herschel, ALMA), что позволило впервые начать напрямую наблюдать структуру протопланетных и остаточных дисков и в наибольших деталях на настоящий момент процесс формирования звезд. С введением в строй новых телескопов поток данных о дозвездных и протозвездных облаках и протопланетных дисках стремительно возрастает. Важно уже сейчас иметь в наличии теоретический инструмент адекватного уровня для интерпретации данных наблюдений. Диссертационная работа Я.Н. Павлюченкова посвящена разработке теоретических аналитических и численных инструментов анализа процессов формирования, переноса и трансформации излучения в оптически плотной, неоднородной и движущейся с большими градиентами скоростей газопылевой среде, а также исследованию физической, химической и тепловой структуры дозвездных и протозвездных облаков и протопланетных дисков. Этим определяется своевременность и актуальность работы. Диссертация Я.Н. Павлюченкова принадлежит к востребованному классу теоретических астрофизических работ, ориентированных на прямое сравнение с наблюдениями.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка авторских публикаций по теме диссертации и списка литературы, содержит 88 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы включает 204 источника.

Во **введении** диссертант обосновывает актуальность работы, перечисляет основные цели диссертации, основные положения, выносимые на защиту, обосновывает научную новизну и научную и практическую значимость диссертационной работы, личный вклад автора, апробацию работы и приводит краткое содержание работы.

В **первой главе** приведены уравнения переноса излучения в линиях молекул и представлены разработанные автором диссертационной работы численные коды расчета переноса излучения в линиях. Основным является метод ускоренных лямбда-итераций. Этот метод дополняется более быстрым алгоритмом, позволяющим исключить в толще кеплеровских дисков те элементы среды, которые из-за больших относительных скоростей эффективно не участвуют в процессе переноса в линиях, что позволяет существенно ускорить расчет при сохранении точности. Приведено сравнение точности данных методов с другими приближенными методами на примере карты распределения температуры возбуждения молекулы HCO^+ и профиля ее линий излучения. Разработана диаграмма формирования профиля линии, с помощью которой можно объяснять формы спектральных линий, получаемые в ходе численного моделирования.

Во **второй главе** проанализировано влияние на профиль линии температуры, плотности и лучевой концентрации молекулярного газа в облаке, также влияние пространственных вариаций распределения температуры и плотности. Последние рассчитываются в рамках построенной автором химико-динамической модели облака, учитывающей возможность сжатия облака, его вращения и наличия в нем микротурбулентных движений. Расчетная модель используется для анализа физико-химических характеристик дозвездного ядра CB 17 и объяснения его кинематики.

Развитые и описанные в предыдущих главах методы моделирования линий излучения молекул в **Третьей главе** применяются для объяснения особенностей тепловой и химической структуры протопланетных дисков. На базе стационарной модели диска с установившимся тепловым и вертикальным гидростатическим равновесием в двухканальном приближении при вычислении поля излучения в диске рассчитываются спектральные карты излучения молекул. Методика апробирована на примере протозвездного диска CB 26. Физически значимым является вывод о том, что биполярное молекулярное истечение из диска должно иметь вращение.

В **четвертой главе** описана процедура расчета переноса инфракрасного излучения в газопылевых протозвездных и молодых звездных облаках. В модели учитываются такие эффекты как многотемпературность пыли вследствие полидисперсности и дискретный процесс нагрева и охлаждения мелких пылинок и полиароматических углеводородов (ПАУ). По рассчитываемому в рамках модели пространственному распределению интенсивности ИК-излучения восстанавливаются распределения

температуры и плотности газа в протозвездных облаках и зонах III. Методика расчета применяется для анализа структуры темных инфракрасных облаков, а также областей ИК-излучения в зоне ионизованного водорода RCW 120. В последнем случае на основе сопоставления расчетных распределений ИК-излучения с наблюдаемыми на разных длинах волн сделан вывод о том, что ПАУ-частицы разрушаются излучением центральной звезды.

Пятая глава посвящена развитию идей и методов четвертой главы на предмет расчета тепловой эволюции протозвездных облаков в рамках динамических моделей облаков. Одним из ключевых учитываемых эффектов в данной модели является теплообмен между обладающими в общем случае разными температурами пылью и газом. Приведены конечно-разностные схемы для тепловых и гидродинамических или магнитогидродинамических расчетов. Апробация модели проведена на примере сжимающегося протозвездного облака.

В заключении кратко перечислены перспективы дальнейших исследований на основе результатов, приведенных в настоящей диссертационной работе.

Детальный расчет процесса переноса излучения в многомерной неоднородной и тем более нестационарной среде – это ресурсоемкая процедура, требующая значительных временных затрат на самых производительных компьютерах. Если еще учесть необходимость одновременного расчета физических свойств и химической структуры многокомпонентных газопылевых систем со сложным физико-химическим атомарно-молекулярным составом газовой компоненты, полидисперсностью пыли, то становится ясно, что подобные многофакторные модели – это всегда компромисс между требуемой точностью и самой возможностью доведения расчетов до конечного числа. Использование обоснованных приближений в таких случаях может дать существенный выигрыш в быстроте действия и позволит получить результат в разумные сроки.

Диссертационная работа Я.Н. Павлюченкова может служить примером такого рода полезной работы, в которой демонстрируется искусство достижения компромисса. Изложенные в диссертации разработанные автором совместно с коллегами оригинальные быстрые и сверхбыстрые алгоритмы расчета переноса излучения в оптически плотных, неоднородных нестационарных средах позволили диссертанту провести расчеты кинематической, химической и тепловой структуры молекулярных дозвездных и протозвездных облаков и протопланетных дисков и их оптических характеристик с высокой степенью детализации этих объектов и провести сравнение с наблюдениями. Все построенные модели отвечают переднему краю развития теоретической астрофизики, а разработанные численные алгоритмы используются различными научными группами в России и за рубежом. Все это определяет научную новизну и научную значимость диссертационной работы.

Стоит отметить, что в каждой рассматриваемой модели или вычислительном алгоритме автор проводит тщательное обоснование применяемых приближений, демонстрирует ясность и строгость изложения при выводе формул. Это свидетельствует о высоком уровне физико-математической культуры диссертанта.

Вместе с тем к работе имеется ряд замечаний.

Замечания по используемым моделям.

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 $\Sigma(R) = \Sigma_0(R/R_{in})^{-3/2}$ (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 $\Sigma_0 = 100 \text{ г/см}^3$, $R_{in} = 1 \text{ а.е.}$ и темпа аккреции $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot \text{ год}^{-1}$ (там же на стр.105) на радиусе $R = 100 \text{ а.е.}$ имеем $u_r \sim 4 \text{ км/с}$, тогда как тепловая скорость, судя по рис. 3.1, в этой области диска соответствует величине $\sim 0.3 \text{ км/с}$, причем разница в скоростях только увеличивается к внешнему краю диска вплоть до $R = 1000 \text{ а.е.}$ 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 – кинематической коэффициент вязкости. Характерная скорость турбулентных пульсаций v_{turb} может быть оценена снизу как $v_{\text{turb}} \approx \nu / H$, где H – толщина диска. Для принятой в работе геометрии диска $H \approx R$ имеем в результате $v_{\text{turb}} \approx u_r$, т.е. уже на радиусе $R = 100 \text{ а.е.}$ 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 неведомыми источниками, это должно приводить к росту вязкой диссипации к периферии, что не согласуется с принятым в работе ее распределением как убывающей функции радиуса $S_{\text{hd}} \sim R^{-3}$ (стр.102).
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?

Имеются вопросы по используемым приближениям.

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?
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:

$$A_{i,j} = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \nu_{i,j}^3 \cdot B_{i,j}.$$

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?

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

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

Встречаются неточности в ключевых формулировках.

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.

Опечатки.

Без опечаток не обходится ни один, даже тщательно выверенный текст, но в данной работе опечатки встречаются крайне редко. Тем не менее, удалось найти такую страницу, на которой содержится более одной опечатки (стр.103).

10. В формуле (3.17) в слагаемом с силой самогравитации пропущена гравитационная постоянная G .
11. Двумя строчками ниже формулы (3.17) дана неверная ссылка на формулу (5.4).

Несмотря на отмеченные замечания, научная значимость диссертационного работы не вызывает сомнений. Свидетельством реальной научной значимости служит востребованность результатов работ автора, о чем говорит большое число ссылок на публикации с его участием, а также использование разработанных автором совместно с коллегами кодов для расчета переноса излучения различными научными группами. О квалификации диссертанта говорит его участие в публикациях в составе авторских коллективов с представителями ведущих научных институтов мира.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, написана строгим научным языком, богато иллюстрирована, текст хорошо структурирован и удобен для чтения, список литературы обширен и содержит множество ссылок на публикации последних лет. Выверенность текста диссертационной работы и упомянутое выше минимальное количество опечаток характеризуют Я.Н. Павлюченкова как ученого, со всей серьезностью

относящегося к текстам своих трудов и стремящегося довести их до совершенства, что только усиливает доверие к его научным результатам.

Выносимые на защиту положения являются обоснованными.

Результаты диссертационного исследования докладывались на международных конференциях, а также на научных семинарах в ведущих научных институтах мира и опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК (Астрономический журнал, *Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Astrophysics and Space Science*, *Baltic Astronomy*), а также в сборниках по итогам конференций. Рейтинг публикаций существенно выше среднего — из 29 источников в списке публикаций автора по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК, в 16 статьях импакт-фактор журнала превышает 3.

Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, № 842, и является научной квалификационной работой, в которой разработаны сбалансированные по точности и быстродействию алгоритмы расчета переноса излучения в линиях молекул и с помощью данных алгоритмов построены оптико-химико-динамические модели дозвездных и протозвездных облаков и протопланетных дисков, проанализирована физико-химическая структура данных объектов, что имеет существенное значение для развития физики звезд и планетных систем. Автор диссертации Павлюченков Ярослав Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Диссертация Я. Н. Павлюченкова рассмотрена на семинаре «Теоретическая физика, астрофизика и интеллектуальные системы» (рук. семинара И.Г.Коваленко) кафедры теоретической физики и волновых процессов 16.08.2016 г. Докладчик на все вопросы отвечал уверенно и детально и продемонстрировал отменное владение материалом.

Профессор кафедры теоретической
физики и волновых процессов
Волгоградского госуниверситета,
профессор, д.ф.-м.н.

И.Г. Коваленко