

ОТЗЫВ

официального оппонента

*на диссертационную работу **ПАВЛЮЧЕНКОВА Ярослава Николаевича** на соискание ученой степени «доктор физико-математических наук» по специальности «01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия» (отрасль наук: «физико-математические») на тему **«Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах»***

В диссертации Я.Н.Павлюченкова рассмотрен круг проблем, связанных с определением физических условий в протозвездных объектах – дозвездных и протозвездных ядрах, а также в протопланетных дисках. Основным источником информации об этих объектах – излучение молекул и пыли в длинноволновой области спектра. Чтобы извлечь эту информацию из наблюдений необходимо уметь рассчитывать тепловую и механическую структуру объектов, обилие и спектр излучения представляющих интерес молекул и пылинок разного размера, формы и химического состава. При этом следует учитывать, что пыль и газ связаны не только термически: образование сложных молекул происходит на поверхности пылинок, что, в свою очередь, влияет на распределение по размерам и излучательную способность пылевых частиц. Ситуация осложняется тем, что изучаемые в диссертации объекты имеют сложную пространственную структуру и кинематику, в результате чего необходимо учитывать радиационное взаимодействие удаленных друг от друга областей. Кроме того, пока имеется значительная неопределенность в величине сечений элементарных процессов с участием интересующих астрономов молекул, включая их взаимодействие с пылью. Наконец, важными, но априорно неизвестными величинами при моделировании условий в протозвездных объектах являются интенсивность и спектр фонового излучения, а также скорость ионизации космическими лучами.

В результате задача построения физической модели протозвездных объектов оказывается весьма сложной и многопараметрической, требующей ресурсоемких численных расчетов. По этой причине решать ее приходится в рамках различного рода феноменологических моделей, используя те или иные упрощения и выясняя затем, насколько они адекватны. С другой стороны, новое поколение весьма чувствительных по потоку многоканальных интерферометров с высоким угловым разрешением в последние годы поставляет астрономам огромное количество детальной наблюдательной информации. Для интерпретации этих наблюдений необходимо рассчитывать большое количество моделей, варьируя многочисленные свободные параметры. Все это предъявляет повышенные требования к быстродействию и надежности алгоритмов, используемых для построения моделей и релевантности самих моделей. На сегодняшний день моделированием протозвездных объектов занимается почти два десятка научных групп, разработано свыше десятка соответствующих пакетов программ. Ежегодно по результатам моделирования публикуется несколько сотен статей, что связано с очевидной необходимостью продвинуться в понимании того, как рождаются звезды и планеты, поэтому актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Несмотря на сильную конкуренцию Я.Н.Павлюченкову удалось добиться существенных успехов и получить ряд новых важных научных результатов.

Прежде всего, следует сказать о разработанном автором программном комплексе URAN(IA), который позволяет по заданному распределению плотности, температуры, поле скоростей и других физических параметрах рассчитывать перенос излучения и профили молекулярных линий. Его применение позволяет выполнять соответствующие расчеты на порядок быстрее, чем с помощью других программ. Особое впечатление на меня произвело то, что этого удалось достичь путем применения алгоритма, использующего сравнительно простые физические соображения. Несомненная заслуга Павлюченкова – разработка графической схемы представления результатов моделирования, в особенности, использование предложенной им спектральной функции вклада CF. Применение этой схемы не только позволило наглядно отобразить результаты моделирования, но и доступно объяснить, почему они получаются именно такими.

Возможность использования комплекса URAN(IA) для интерпретации наблюдений протозвездных объектов убедительно продемонстрирована автором на примере протозвездного ядра CB 17. Не менее впечатляющим выглядит приведенное на Рис. 3.9 сравнение результатов наблюдений протопланетного диска звезды HD 163296 на интерферометре ALMA с расчетами Павлюченкова, опубликованными за несколько лет до этого.

Безусловно, большим достижением диссертанта следует считать обнаружение осевого вращения струи молекулярного газа, истекающего из протопланетного диска звезды CB 26. Интересно, что результат получен с помощью комплекса URAN(IA) в рамках очень простой кинематической модели.

Вынесенные на защиту результаты Главы 4, связанные с моделированием переноса теплового излучения пыли, отражают исследования диссертанта по изучению структуры массивных протозвездных облаков и интерпретации распределения ИК излучения областей H II вокруг молодых звезд. Соответствующие расчеты были выполнены с помощью созданного автором программного комплекса NATA(LY), основное достоинство которого – быстродействие и возможность моделировать спектр излучения пыли в диапазоне от мкм до радиодиапазона. Последнее обстоятельство позволило показать, что в центральных областях облаков IRDC 320, IRDC 321 уже сформировались протозвезды, а в случае объекта RCW 120 ПАУ-частицы сосредоточены за границей области H II, вероятно, в результате выметания давлением излучения и/или звездного ветра.

В последней главе диссертации описан созданный при участии автора программный комплекс для расчета тепловой эволюции протозвездных облаков и приведены примеры его использования для решения задач о сферически и аксиально симметричном коллапсе. Показано, что сравнение наблюдаемого и расчетного распределения интенсивности и профилей линий молекулярного излучения по облаку позволяет получить нетривиальную информацию о начальных этапах процесса звездообразования.

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.

Если уж речь зашла о возможности дальнейшего развития используемых автором моделей, то хотелось бы включить в них рассмотрение пористых и несферических пылевых частиц, а в качестве дополнительной информации использовать поляризационные наблюдения. Впрочем, я понимаю, что нельзя объять необъятного...

К оформлению диссертации у меня нет претензий: текст написан хорошим языком, автор всегда «на пальцах» поясняет физический смысл результатов численного моделирования, рисунки и таблицы в достаточной степени иллюстрируют текст. Мне понравилось, что в конце каждой главы приводится итоговая сводка полученных в главе результатов, а в Заключение автор говорит о том, как он видит перспективу дальнейших исследований по теме диссертации. При очень большом объеме диссертации (270 страниц!), количество опечаток и стилистических погрешностей в тексте очень мало. Вот почти исчерпывающий список того, что я заметил:

- 1) Для количественной оценки соответствия теоретических спектральных карт наблюдаемым Павлюченков вводит величину SP (стр.79), которую называет «критерием», однако, на самом деле, SP – это некоторая мера, а критерием соответствия теории наблюдениям является ее значение.
- 2) Ни в тексте, ни в подписи к рисунку не сказано, чем отличаются сплошные и пунктирные кривые на Рис. 2.15.
- 3) Кеплеровскому закону вращению соответствует показатель степени $-1/2$, а не $1/2$, как написано на стр.129.
- 4) В подписи к рисунку 4.25 говорится о штриховых линиях, которых на рисунке нет.
- 5) При описании кода NATA(LY) на стр.140 сказано, что пылинки в нем считаются «аморфными силикатными шариками», однако, на самом деле, в коде используются и другие виды пылевых частиц – см., например, Табл.4.4 на стр. 183.
- 6) Последнее предложение раздела 5.1.3 на стр. 212 стилистически некорректно.

Отмеченные шероховатости никоим образом не влияют на мою общую положительную оценку диссертации Я.Н.Павлюченкова. Все вынесенные автором на защиту положения являются новыми, достаточно обоснованными и нетривиальными. Они хорошо известны специалистам: неоднократно докладывались на семинарах и международных конференциях, а также

опубликованы в 29 журнальных статьях, на которые, согласно базе данных ADS, имеется около 400 ссылок. Общий индекс Хирша автора – 12.

Высокая оценка специалистами результатов, полученных автором, а также намеченные им в Заключение направления дальнейшей работы по теме диссертации убеждают меня в том, что разработанные Я.Н.Павлюченковым теоретические положения и методика анализа соответствующих наблюдений открывают новое направление исследований процесса звездообразования. Результаты диссертации могут быть использованы в российских (ГАИШ МГУ, ИНАСАН, САО РАН, ГАО РАН, УФУ, ЮФУ и др.) и зарубежных институтах, университетах и обсерваториях для соответствующих научных исследований, а также в учебных курсах, посвященных теории звездообразования.

На основании вышесказанного считаю, что диссертация Я.Н.Павлюченкова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присвоения искомой степени.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ
(119991, Москва, Университетский проспект, 13)
доктор физ.-мат. наук

С.А.Ламзин

Подпись вед.н.с. ГАИШ МГУ С.А.Ламзина заверяю

Директор ГАИШ МГУ
академик РАН, профессор

А.М.Черепашук