ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Султанова Ильяса Марсовича
на соискание ученой степени «кандидат физико-математических наук»
по специальности «1.3.3. Теоретическая физика» на тему
«Численное МГД-моделирование фрагментации молекулярных волокон и образования протозвездных облаков»

Изучение процесса формирования звезд и планет является одним из ключевых направлений астрофизики. Более того, сценарий формирования звезд и планет является частью нашей мировоззренческой картины мира. С введением в строй орбитальных телескопов, таких как СПИТЦЕР, ГЕРШЕЛЬ, ХАББЛ, ДЖЕЙМС УЭББ, работающих в инфракрасном и видимом диапазонах, а также радио-интерферометрической обсерватории ALMA стало возможным более детально исследовать структуру межзвездной среды, из которой формируются звезды. Оказалось, что молекулярные облака — плотные сгущения межзвездного газа и пыли, эволюция которых в конечном итоге приводит к формированию звезд — состоят как, как правило, из набора плотных волокон, т. е. из протяженных цилиндрических образований. Да и в целом, вся межзвездная среда — от наиболее разреженных областей HII до ядер молекулярных облаков — представляет собой сложную иерархическую структуру в виде волокон, пузырей, пересекающихся сферических слоев, кометообразных оболочек, истечений, джетов и т. д. Новые наблюдательные данные привели к значительному прогрессу в понимании процессов, определяющих структуру межзвездной среды и управляющих процессами звездообразования. В частности, современные теоретические и численные модели указывают на то, что межзвездная среда — в высокой степени динамическая субстанция. Ее эволюция управляется большим числом факторов: гравитацией, воздействием вспышек сверхновых, турбулентностью, магнитным полем, особенностями процессов нагрева-охлаждения и т. д.

Несмотря на значительные успехи, в теории звездообразования еще остаются открытые вопросы. Это во многом обусловлено большим числом процессов, вовлеченных в эволюцию межзвездной среды и их взаимодействием. В частности, остаются неясными детали того, как именно формируются гравитационно-связанные протозвездные ядра из молекулярного облака. Именно этому актуальному вопросу и посвящена представленная диссертация. Для его исследования соискатель использует идеализированную модель цилиндрического волокна, что является естественным упрощением при попытке выделить наиболее существенные управляющие факторы.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Во Введении раскрыта актуальность темы исследования, практическая и теоретическая значимость, основные положения, выносимые на защиту и остальные необходимые элементы общей характеристики диссертации. В Главе 1 представлен достаточно емкий обзор по теме исследования, помещая читателя в контекст проблемы: описаны наблюдательные особенности молекулярных облаков, перечислены теоретические модели формирования волокон, обсуждаются современные исследования коллапса и фрагментации волокон. Глава 2 посвящена описанию модели, в рамках которой получены последующие результаты. В начальный момент времени молекулярное облако в модели представляется в виде однородного цилиндра с продольным магнитным полем. Дополнительно к этому на облако могут накладываться возмущения. Последующая эволюция облака рассчитывается с помощью общедоступного численного программного комплекса FLESH, модифицированного соискателем для данной задачи. Следует отметить, что соискатель приводит результаты тестирования кода, свидетельствующих о корректности кода для рассматриваемых задач. В данной главе также описаны параметры исследованных моделей и алгоритм выделения гравитационно-связанных областей. Глава 3 посвящена изучению эволюции первоначально-однородных волокон без и с магнитным полем под действием самогравитации и в

комбинации с воздействием внешней ударной волной. В рамках этой главы описаны результаты формирования сгустков на краях волокон, их параметры в зависимости от степени неравновесности облака и наличия магнитного поля, а также выводы о влиянии ударной волны на формирование сгустков. Глава 4 посвящена изучению процесса фрагментации облака при двух сценариях наложения возмущений, описаны параметры гравитационно-связанных сгустков в этих сценариях и исследована эволюция магнитного поля в них. В Заключении суммированы основные результаты диссертации.

Научная ценность результатов, изложенных в третьей и четвертой главах диссертации не вызывает у меня сомнений. Положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы. Мне представляются важными выводы о большой роли гравитационной фокусировки на концах волокон, о существенной разнице масс сгустков в моделях с учетом и без учета магнитного поля, о двойственной роли ударных волн на эволюцию волокон.

Вместе с тем у меня есть замечания по научной части:
1. Во Введении утверждается:

«*Характеристики образующихся ядер молекулярных облаков, в частности, спектр их масс, до сих пор детально не изучены*».

Это утверждение, как минимум, спорно, поскольку изучению спектра масс молодых звезд и дозвездных ядер посвящено значительное число как наблюдательных, так и теоретических работ, см. например, обзор Offner et al. «The Origin and Universality of the Stellar Initial Mass Function», Protostars and Planets VI, (2014). Да и сам соискатель в Главе 1 отмечает ряд работ, посвященных изучению спектра масс дозвездных ядер, и приводит соответствующие распределения.

2. Во Введении утверждается:

«*Из данного отношения следует, что коллапс останавливается градиентом внутреннего давления при любых gamma > 1, то есть возможным является только изотермическое сжатие волокна при gamma -> 1.*»

Вариант «gamma -> 1» не является единственно возможным условием сжатия, сжатие возможно также при любом gamma < 1 -- это соответствует уменьшению температуры облака при его сжатии. Такой режим может реализовываться благодаря особенностям функций нагрева и охлаждения в дозвездных ядрах. Уменьшение температуры с увеличением плотности дозвездных ядер фиксируется как в наблюдениях (напр. N. Lippok et al. A&A 560A, 41L (2013)), так и в теоретических моделях (напр. Pavlyuchenkov & Zhilkin, ARep 57, 641P (2013)).

3. В конце раздела 1.1 утверждается:

«*Это говорит о том, что в процессе образования и гравитационного коллапса протозвездных облаков магнитное поле значительно усиливается, и его роль в процессе звездообразования возрастает*».

Сам по себе рост магнитного поля при коллапсе вообще говоря не означает, что роль магнитного поля возрастает. Роль магнитного поля на последующих стадиях эволюции зависит от многих факторов, в частности, от степени вмороженности и диссипации магнитного поля, изучению которых посвящено много работ.

4. В начале Раздела 2.3 приводится следующее объяснение:

«*Гравитационного ускорение зависит от радиуса как ~ R^{-1}. Противодействует силе гравитации сила, вызванная градиентом внутреннего давления. В случае однородного изотермического сжатия плотность будет зависеть от радиуса как ~ R^{-2} , тогда соответствующее изменение в ускорении будет так же ~ R^{-1}. Гравитационное силы и градиент давления растут одинакового при сжатии и таким образом радиальный коллапс может быть остановлен давлением.*»

Это объяснение может запутать читателя, не знакомого с решением рассматриваемых задач. Ведь начальное облако является однородным, в нем нет градиентов давления и в начальный момент времени оно начнет сжиматься как целое под действием нескомпенсированной гравитации. Со временем волна разрежения будет распространяться от внешней границы к оси облака, формируя градиенты давления и делая облако неоднородным, для которого приведенные оценки далеко не очевидны. Понятно, что автор хочет «на пальцах» объяснить динамику цилиндрического облака, но, на мой взгляд, это следовало бы сделать более аккуратно.

5. Интересным и важным результатом исследования фрагментации цилиндрического облака является вывод о том, что гравитационно-связанные уплотнения формируются при характерных масштабах возмущений в том числе и меньших критических (полученных аналитически в других работах). Автор дает объяснение этому:

«*Развитие фрагментации в случае λ<λ* может быть обусловлено тем, что значение λ* в работе Чандрасекара и Ферми выводится в предположении несжимаемой жидкости, из-за чего оценка критического значения длины волны может быть завышенной. Фрагментация, вызванная магнитозвуковыми волнами с длиной волны λ<λ*, равновесных волокон может быть обусловлена медленным радиальным сжатием, которое приводит к росту плотности, в результате чего критическая длина в процессе эволюции волокна уменьшается.*»

На мой взгляд, полезно было бы подтвердить эти предположения дополнительными расчетами или провести подробный теоретический анализ используемых критериев.

Диссертация, в целом, написана строгим научным языком и хорошо проиллюстрирована. Форма ссылок позволяет различить результаты, полученные соискателем, от результатов других авторов. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В тексте диссертации, однако, есть опечатки и неудачные фразы. Приведу некоторые из них:

1. Стр. 14 «Наблюдения проводились за огромными комплексами межзвездных облаков - в частности, за близко расположенными комплексами, в основном находящимися в поясе Гулда». Здесь не ясно находились ли наблюдатели за этими комплексами, или они проводили наблюдения за эволюцией комплексов?

2. Стр. 18 «Большинство наблюдаемых волокон расположено в близко находящейся области рукава Центавра, которая занимает огромную часть внутренней Галактической плоскости и обладает гелиоцентрическим расстоянием в ~ 4 пк.» Имеется ввиду 4 кпк?

3. Стр. 23 «Приведенные распределения для протозвездных ядер и кандидатов в протозвездные ядра совпадают на массах выше ~ 1 $M\odot$, поскольку для данных значений ядра достаточно массивны для самогравитации и поэтому могут считаться дозвездными.» Следует читать «протозвездными»?

4. Стр. 27 «Волокна, сформированные в сценарии S, могут появляться много где в результате турбулентности, но образованные таким образом волокна не достаточно плотны, чтобы формировать звезды.» Выражение «много где» не придает ясности.

5. Стр. 31 В подписи к рисунку 1.17 указаны значения A=3 и A=5, а в легенде на графиках A=3 и A=10.

Отмечу, однако, что отмеченные выше замечания нисколько не умоляют высокого уровня работы. Диссертация *Султанова Ильяса Марсовича* представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и достоверными. Полученные в диссертации результаты важны для построения полной картины процесса формирования звезд. Полученные в результате расчетов параметры гравитационно-связанных уплотнений могут быть использованы в качестве начальных условий при дальнейшем моделировании эволюции протозвездных облаков. Полученные соискателем результаты опубликованы в 9 статьях, в том числе в 4 статьях, рекомендованных ВАК, а также прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях.

Диссертация полностью соответствует критериям, установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (в текущей редакции), и специальности 1.3.3 — Теоретическая физика и отрасли физико-математические науки, а ее автор *Султанов Ильяс Марсович* заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН
(119017, Москва, ул. Пятницкая д. 48),
доктор физ.-мат. наук,
pavyar@inasan.ru, +7(495) 951-27-35 Я.Н. Павлюченков

Подпись в.н.с. Института астрономии РАН Я.Н. Павлюченкова заверяю

Ученый секретарь Института астрономии РАН
кандидат физ.-мат. наук М.С. Мурга

29.10.2026