

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Косенко Дарьи Николаевны «Молекулы HD в холодной диффузной фазе межзвездной среды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 - физика космоса, астрономия

Астрохимия — стремительно развивающаяся отрасль астрономии, развитие которой обусловлено как совершенствованием наблюдательной техники, так и существенным расширением экспериментальных возможностей. Одно из важных направлений её развития — химия изотопологов, в первую очередь, соединений дейтерия. Дейтерированные молекулы наряду с «обычными» молекулами являются важным инструментом диагностики физической и химической эволюции межзвёздного вещества. Ключевую роль в интерпретации наблюдений изотопологов, содержащих дейтерий, играет понимание эволюции содержания молекулы HD.

В диссертации поставлен и решён целый ряд задач, относящихся к исследованию молекул HD в диффузной фазе межзвёздной среды — на своеобразном подготовительном этапе к появлению более сложных соединений дейтерия в молекулярных облаках. Хочется отметить комплексный подход к решению этих задач, включающий в себя и работу с наблюдениями, и построение теоретических моделей, и использование теоретических моделей для оценки физических условий в изучаемых объектах. Полученные результаты могут быть использованы во многих научных учреждениях, таких как ИНАСАН, УрФУ, АКЦ ФИАН, ЮФУ, и в других российских и зарубежных научных организациях. Это делает проведённые в диссертации исследования безусловно **актуальными**. Важным представляется вывод о значительной зависимости отношения концентраций HD/H<sub>2</sub> от условий в среде, что определяет невозможность использования этого отношения даже для оценки верхней границы на изотопическое отношение D/H. Очень интересным является также вывод о возможной связи источников космических лучей с областями звездообразования, сделанный в Главе 5 (хотя его стоило обсудить более подробно). Он, возможно, перекликается с предположениями о том, что ускорение частиц космических лучей может происходить на ударных волнах в молодых звёздных скоплениях.

Положения и выводы, сформулированные в диссертации, представляются вполне обоснованными. Их обоснованность и новизна подкрепляются большим объёмом и разнообразием использованных наблюдательных данных. Достоверность обеспечивается как тщательным анализом собственных данных, так и их сопоставлением с наблюдательными и теоретическими результатами других авторов. Важно, что имеющиеся отличия не просто констатируются, но обсуждаются с указанием возможных причин. Результаты диссертации представлены в авторитетных международных журналах, обеспечивающих высокий уровень экспертизы, и на конференциях высокого уровня.

Диссертация, конечно, не свободна от недостатков. В начале первой главы было бы уместно привести её краткое резюме (как в других главах). Было бы также неплохо, если бы в начале каждой главы указывались ссылки на работы, в которых опубликованы соответствующие результаты.

В диссертации встречаются неудачные формулировки, например, «значительная часть газа сосредоточена в определенных значениях  $T$  и  $n$ » (стр. 12), «излучение молекул  $H_2$  в эмиссии» (стр. 13), «вероятно видна лишь слабая корреляция» (стр. 95), «реакции... слабо зависят от температуры» (стр. 71). В последнем случае непонятно также, что подразумевается под слабой зависимостью от температуры в диапазоне 50–200 К. Если для константы скорости используется представление модифицированным уравнением Аррениуса, то зависимость от температуры везде одна и та же. Это следовало или пояснить, или сформулировать более аккуратно. На стр. 89 упоминается «известный гравитационно-линзированный квазар PKS 1830-211 на  $z = 0.89$ ». Это тоже не совсем корректная формулировка. На  $z = 0.89$  находится линзирующая галактика. Сам квазар находится на  $z = 2.5$  (Lidman et al. 1999).

Мне кажется некорректным использование термина «элемент» для обозначения химических соединений. Также, хотя термин «металлы» в отношении всех элементов тяжелее гелия в астрономии является общеупотребительным, кажется неправильным его использование в отношении конкретных фосфора и серы (стр. 45)

Один из основных результатов главы 2 касается обнаружения новой абсорбционной системы, содержащей молекулярный водород, в спектре квазара J 0812+3208, однако в тексте главы он только упоминается; обсуждение дано лишь в приложении. Коль скоро уж этот результат отнесён к основным, его стоило обсудить в основном тексте диссертации. Неясно также, о каком красном смещении обнаруженной системы идёт речь. В выводах указано значение  $z = 2.06678$ , но в приложении для этой системы упоминается также величина  $z = 2.06779$ .

В главе 4 следовало более чётко описать используемый список реакций, а также список неучтённых (дополнительных) реакций образования  $H^+$ . Не пояснено, почему не рассматривается реакция ионизации дейтерия космическими лучами. В астрохимические модели она, как правило, включается с той же константой скорости, что и для реакции ионизации H. Как вычислялся (и вычислялся ли) заряд пылинок для его учёта в реакции (4.7)? Почему считается, что скорость реакции (4.5) составляет 0.1 от скорости ионизации (4.4)? В базах данных UMIST и KIDA это отношение в два раза меньше. В Главе 4 показано, что в ряде случаев важную роль могут играть реакции разрушения молекул космическими лучами. Почему эти реакции не включены в основной вариант модели? В главе также недостаёт описания возможных сценариев применения модели. Утверждается, что эта модель

использована в Главе 5, но в действительности большая часть представленных там расчётов выполнена при помощи кода Meudon.

В главе 5 приводится среднее для нашей Галактики значение скорости ионизации космическими лучами  $1.3 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ , хотя уже на стр. 22 отмечается, что в диффузной среде эта величина должны быть больше, порядка как минимум  $10^{-16} \text{ с}^{-1}$ . Также в комментарии к рис. 5.5 указано, что в работе не удалось зафиксировать уменьшение скорости ионизации космическими лучами с ростом лучевой концентрации, поскольку в ней рассматривается диффузная среда с небольшими значениями  $N_{\text{H}2}$ . Однако в соответствии с другими работами (в том числе, и с процитированными в диссертации) полученное для нашей Галактики среднее значение  $1.3 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$  характерно скорее для больших значений  $N_{\text{H}2}$ . Это расхождение следовало прокомментировать.

Перечисленные выше замечания не являются существенными и не снижают общего положительного впечатления и ценности работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Все выносимые на защиту положения опубликованы в 8 статьях в ведущих международных журналах, в том числе в журналах 1-го квартиля WoS, что существенно превосходит требования положения о присуждении ученых степеней ФТИ им А. Ф. Иоффе. Личный вклад в совместных публикациях четко обозначен.

Считаю, что работа Д.Н. Косенко «Молекулы HD в холодной диффузной фазе межзвездной среды» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор Косенко Дарья Николаевна заслуживает присуждения ей искомой степени по специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия.

13 мая 2024 г.

Дмитрий Зигфридович Вибе,

доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, главный научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук

Рабочий почтовый адрес: ул. Пятницкая, 48, Институт астрономии РАН, Москва, Россия 119017

Подпись Д.З. Вибе заверяю: