

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Егикяна Арарата Геворковича

«ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ И ОБРАЗОВАНИЕ ПРЕДБИОМОЛЕКУЛ»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика»

Астрофизика по всем современным представлениям о классификации наук относится к наукам из области физики. Соответственно, теоретическая астрофизика является некоторой частью теоретической физики. Номенклатура научных специальностей ВАК не включает такие специальности как «теоретическая астрофизика» и «астрохимия», но включает более общую специальность «теоретическая физика», поэтому, хотя диссертации А.Г.Егикяна «Превращения атомов и молекул в межзвездных облаках и образование предбиомолекул», посвящена некоторым вопросам именно теоретической астрофизики и астрохимии, выбор диссертантом специальности «теоретическая физика» представляется обоснованным.

Надо отметить, что круг рассматриваемых в диссертации вопросов (тем) и объектов весьма широк, но объединён общей теоретической базой – теорией радиационно-химических превращений (реакций) атомов и молекул в межзвездных молекулярных облаках. Согласно определению из БРЭ, радиационно-химические реакции – это «совокупность физико-химических процессов и химических превращений, происходящих в результате воздействия на вещество ионизирующего излучения. Физические процессы взаимодействия излучения с веществом, предшествующие этим превращениям, также рассматривают как стадию Р.-х. р. Некоторые из процессов и превращений, составляющих Р.-х. р., могут иметь место при действии на вещество вакуумного УФ-излучения, электронного удара, электрического разряда, при поглощении мощности СВЧ-колебаний, а также в кавитационных полостях, создаваемых ультразвуковым полем в жидких средах.». Понятно, что это определение довольно общее, но, тем не менее, в контексте молекулярной астрофизики неполное. В астрофизических

условиях большую роль играет не только жёсткое ультрафиолетовое (УФ) излучение и ударные (столкновительные) процессы, но и космические лучи. Ионизация вещества вследствие воздействия этих факторов определяет и его физическое состояние, и химическую эволюцию, обеспечивая резкую активизацию различных химических взаимодействий. Изучению таких физико-химических процессов в межзвёздном и околозвёздном веществе посвящены усилия многих ученых, опубликованы десятки тысяч научных работ (проверено мной по базе данных ADS). Конечно, достигнут колоссальный прогресс, но всё же многие вопросы (проблемы) остаются нерешёнными. Вот здесь, в поиске ответов на эти нерешенные проблемы, и находится круг основных научных интересов диссертанта.

Диссертант описывает цель диссертации довольно общо — «основной целью работы является исследование возможностей радиационно-химических превращений атомов и молекул в межзвездных молекулярных облаках.» (см. стр. 4 автореферата). Многочисленные главы диссертации посвящены, естественно, более конкретно сформулированным вопросам (проблемам). Вопросов много, и в целях более глубокого анализа работы и достижений автора я ограничусь следующими из них, сгруппировав по нескольку глав диссертации:

1. Новые знания об образовании и эволюции ледяных оболочек вокруг тугоплавких пылинок в молекулярных облаках;
2. Проблемы выживания льдов в окрестностях горячих звезд;
3. Воздействие протонов солнечного ветра на льды в Солнечной системе;
4. Последствия проходов Солнечной системы сквозь молекулярные облака на атмосферу Земли.

Сразу отмечу, что по каждому из этих вопросов диссертант получил новые важные результаты.

Начну с п.1. Пыль — важнейший компонент межзвёздной и околозвёздной среды. Достаточно уже того, что наша планета да и другие планеты в нашей и других планетных системах образовались, в конечном итоге, из межзвёздной пыли. Даже возникновение жизни на планете может быть тесно связано с космической пылью. В холодных областях протопланетных дисков пылинки состоят из тугоплавких ядер, обычно силикатных и/или графитовых (большая часть которых образовалась в веществе, истекающем из звёзд на поздних стадиях звёздной эволюции), и окружающих эти ядра оболочек (мантий, шуб) из замёрзших летучих

(льдов). Ледяные «шубы» на мелких (не более 0,1 мк) ядрах-пылинках намерзают ещё в плотных молекулярных облаках (МО). Они содержат много различных видов молекул, в т.ч. относительно простые органические соединения, и могут затем существенно видоизменяться как в МО, так и в протопланетных дисках. Физические и химические изменения в ледяных мантиях пылинок – сложный комплекс процессов. Один из важнейших результатов этих процессов – образование сложных, в т.ч. тяжелых, органических соединений. Так что образовавшиеся в протопланетных дисках льдистые тела с каменистыми вкраплениями (кометезимали) уже несут в себе разнообразные органические соединения.

Эволюция льдов в значительной степени определяется радиационно-химическими реакциями, стимулируемыми различными ионизирующими факторами. Продвижению в понимании комплекса этих процессов – важнейшее направление астрофизических и астрохимических исследований. Диссертант здесь внёс свой вполне заметный вклад. Он впервые весьма детально рассчитал скорость осаждения метана на графитовые и/или силикатные пылинки в условиях сжимающихся молекулярных облаков. Показано, что вначале процесса вымерзания содержание метанового льда может даже превосходить содержание водяного льда и затем, за время сжатия облака, устанавливается на уровне 10-20 %. При этом показано, что дозы облучения льдов протонами космических лучей в значительном объёме стандартных облаков превышают пороговые значения, необходимые для инициации радиационно-химических превращений льдов и их смесей в сложные соединения (поликонденсации в сложные алифатические и ароматические углеводороды с относительным содержанием порядка 1-5 %) и т.п.

Льды наблюдаются не только в холодных МО и протопланетных дисках, но даже и в областях вокруг горячих звёзд, например в планетарных туманностях (ПТ). Диссертант является представителем традиционной для астрофизики в Армении школы экспертов, занимающихся теорией планетарных туманностей. В диссертации рассмотрены вопросы выживания льдов в планетарных туманностях. Речь идёт об очень молодых планетарных туманностях. Самые молодые ПТ (иногда называемые протопланетарными туманностями – ППТ) – это короткоживущие переходные объекты на эволюционной стадии между звёздами, находящимися на асимптотической ветви гигантов (АВГ), и собственно планетарными туманностями. Переход от почти сферической медленно расширяющейся массивной, относительно

холодной газо-пылевой оболочки вокруг звезды на АВГ к существенно асферичной высокоионизованной (в центральной части) туманности, на формирование которой оказывает мощное влияние высокоскоростной (сотни и тысячи км/с) звёздный ветер от центральной горячей звезды, до конца не изучен. Морфология молодых ПТ отличается от ППТ, но в спектрах есть большое (наследственное) сходство. Так во внешних слоях ППТ и молодых ПТ наблюдается множество молекул (в частности воды). Вода наблюдается даже в виде льда. Т.е. на динамической шкале жизни ППТ в плотных и холодных внешних слоях сбрасываемой оболочки льды успевают образоваться и даже проэволюционировать. Например, обнаруживаются свидетельства существования наряду с аморфным и кристаллического водяного льда. Это очень интересное явление, требующее теоретического рассмотрения. Диссертантом показана возможность существования H_2O и CO льдов за фронтом диссоциации в ПТ и показано, что теоретическое содержание водяного льда в ПТ зависит (так у диссертанта, но я бы написал осторожнее «коррелирует») от значений потока высокоэнергетических частиц. На примере молодой туманности NGC6302 показано хорошее согласие наблюдаемого и теоретического значений содержания льдов.

Льды под воздействием ионизирующих и других факторов испытывают значительные физико-химические изменения. Например, в ряде проводимых в разных странах лабораторных экспериментов, имитирующих условия облучения льдов в Солнечной системе УФ-излучением Солнца и солнечным ветром, продемонстрированы очень сложные и важные для понимания эволюции органики в Солнечной системе изменения, в частности образование органических веществ от простейших до очень тяжёлой органики (т.н. дёгтей). Диссертант исследовал воздействия на льды солнечного ветра и галактических космических лучей (КЛ). Он рассчитал энергетические потери частиц КЛ в 12 веществах – аналогах льдов, затем рассчитал скорости облучения и дозы для этих льдов и показал, что энергии, поглощённой льдами на поверхности тел на окраинах Солнечной системы на шкале ~ 1 млн лет, достаточно для их существенного изменения. Это важно для многих аспектов исследования Солнечной системы. Приведу лишь один пример – долгопериодические кометы обычно считаются носителями исходного, непереработанного вещества, из которого образовались тела Солнечной системы. Результаты, полученные диссертантом, заставляют к этому положению отнестись критично. По

крайней мере, внешние слои даже этих, очень далёких от Солнца объектов, могут быть уже существенно изменены.

Проблема последствий прохождений Солнечной системы сквозь молекулярные облака привлекает внимание учёных уже пару десятков лет. Особый толчок дала публикация книги (Solar journey: the significance of our galactic environment for the heliosphere and Earth. Ed. P.C.Frish, Springer, 2006). Кстати, диссертант является соавтором (вместе с H.Fahr) главы 11 (Accretion of interstellar material into the heliosphere and onto Earth) этой классической книги.

Проблема интересна ещё и тем, что она имеет прикладное, хотя и весьма отдалённое во времени значение. Она относится к т.н. классу астрофизических угроз. Диссертант – известный эксперт по этой проблеме. Солнечная система раз в несколько десятков миллионов лет проходит через диффузные межзвёздные облака (концентрация частиц до 10^2 см^{-3}), и на порядок реже – через более плотные молекулярные облака (концентрация частиц не менее 10^3 см^{-3}). Диссертант показал, используя разработанную им численную модель газового (нейтрального водородного) течения, обтекающего гелиосферу, что гелиосфера может быть сжата до размеров орбиты Земли и количественно оценил поток водородных атомов, проникающих при этом в атмосферу Земли. Поток атомов водорода, проникающих в мезосферу, как это впервые показано диссертантом, достаточен для связывания молекул озона в модифицированном атмосферном цикле кислорода, с неизбежными серьёзными климатическими последствиями. Учёт влияния оксидов азота, обусловленных частицами аномальных космических лучей, на стратосферный озон, также указывает на возможность уменьшения его (озона) содержания.

К сожалению, диссертация не лишена очевидных недостатков.

Очень большой список затрагиваемых вопросов не позволил диссертанту провести изложение с равной и достаточной степенью глубины. Есть главы (лучше сказать главки) аж по 7-8 страниц! (Например, главы 7 и 14). Выглядят они мелко. Похоже, что диссертант не очень пытался составить из отдельных работ (глав) связный текст. Поэтому в диссертации довольно много необязательных повторов и есть впечатление некоторого сумбура. Пример необязательного повтора: на стр. 7 читаем «достаточную для инициирования радиационно-химических реакций с образованием сложных органических соединений (углеводородов, аминокислот, и т.п.) за

время жизни облаков 50 млн лет, практически во всем объеме облака.». Через две строки этот текст повторяется.

Как я понял, результаты главы 15 не были опубликованы. Возможно, они направлены для публикации в журнал *ApSS*, но каков будет результат пока неясно. Т.е. на момент написания диссертации этот материал ещё не прошёл серьёзную научную экспертизу, и представлять его здесь не стоило бы.

Некоторые результаты, выносимые на защиту, сформулированы весьма многословно и суть положений размывается. Пример: формулировка результата 2, начинающаяся со слов «поскольку...» настолько расплывчата, что выделить основную мысль (или мысли) очень трудно. Вообще в ряде положений, выносимых на защиту, в которых требуется просто и чётко сформулировать положение, выносимое на защиту, диссертант пытается довольно сумбурно изложить и постановку проблемы, и методику исследования, и основную аргументацию. Это и приводит к размытию основного посыла.

Использование литературы не всегда точное. Например, на стр.57 читаем «(Rawlings et al. 1992, и ссылки там). Вследствие ионизации КЛ-ми, пылинки обладают зарядом, и параметр C_e учитывает электростатический эффект: $C_e = 1$ для нейтральных, и $C_e = 1 + (16.71 \cdot 10^{-4}/aT)$, для заряженных пылинок». Тут сразу несколько некорректностей. Во-первых, заряд пылинки в этих условиях обуславливается не ионизацией, а адсорбцией электронов и потому отрицателен. Во-вторых, в статье Rawlings et al. 1992, из которой взята эта формула, она дана для пылинки с фиксированным зарядом -1, а C_e (в оригинале просто C) учитывает заряд не пылинки, а прилипающей к пылинке частицы и формула дана для ионов зарядом +1.

Диссертант слабо отслеживал свежие научные публикации. В обширном списке литературы (всего 507 ссылок) на работы последних 5 лет других авторов за последние 5 лет ссылок едва набирается десяток. Об этом же свидетельствуют, например, фразы типа «непрерывно пополняемого банка данных UMIST (McElroy et al. 2013)» на стр. 57. Тот кто, отслеживает прогресс в этой сфере, знает, что с этого самого 2013 г база данных UMIST не пополнялась.

Диссертант поразительно беспечно отнёсся к требованиям оформления диссертации. Очевидно, что необходимой вычиткой текста

диссертант пренебрёг. В результате такого неряшливого подхода к оформлению диссертации, она вызывает следующие замечания:

- *Нумерация рисунков.* Согласно и правилам оформления и просто здравому смыслу иллюстрации следует нумеровать (арабскими цифрами) сквозной нумерацией по всему тексту диссертации или в пределах каждой главы. В последнем случае номер иллюстрации состоит из номера главы и порядкового номера иллюстрации, разделённых точкой. Пример того как должно быть: Рисунок 1.1 – Наименование рисунка. В представленной же диссертации рисунки нумеруются внутри глав без указания номера главы. Более того, иногда нумерация ведётся внутри какого-то раздела главы. Например. В разделе 5.6 своя нумерация рисунков, не связанная с нумерацией в главе 5. Поэтому в этой главе после рис.7 на стр.107 следует рис.1 на стр. 109, а потом рис.2 и т.д. Так что в одной главе находится по несколько рисунков с одинаковыми номерами, а во всей диссертации иллюстраций с одинаковыми номерами десятки! Даже непонятно, как можно было пропустить столь существенный дефект оформления.
- *Та же ерунда с нумерацией таблиц.* Например, за таблицей 1 на стр. 193 сразу следует таблица 5 на стр. 199.
- *Качество рисунков.* Рисунки специально и единообразно для диссертации не подготавливались, а скопированы из разных источников. Диссертант даже не привёл их к примерно одинаковому масштабу (сделать это можно было очень быстро и просто), поэтому есть сильно переразмеренные рисунки (например, рис.1 на стр. 98, рис.4 на стр. 133 и т.д). О единообразии надписей на рисунках нет и речи.
- *Написания формул* даны разными шрифтами (можно сравнить, например, написания формул (2.2.2), (2.2.7) и (9.2). Прыгающие по размерам и написанию шрифты (как и рисунки) выглядят проявлением подхода «и так сойдёт».
- *Ссылки* не всегда есть, там где им положено быть. Например, на стр. 20 перечислены используемые в работе модели и программные комплексы CLOUDY, ASTROCHEMISTRY, CLAWPACK, но соответствующих ссылок нет. Впрочем ссылки сделаны, но гораздо позже (на CLOUDY–на 51 стр., на ASTROCHEMISTRY– на 55 стр., на CLAWPACK– на 55 стр).

Последние замечания, конечно, не слишком существенны, но таких мелких погрешностей, бросающихся в глаза при внимательном чтении, довольно много. А вот опечаток в тексте диссертации очень мало.

Я по понятным причинам не делаю замечаний языкового характера, но все же отмечу, что в тексте, довольно много неудачных выражений, например: «космическим объектам, функционирующим задолго до образования Земли» (стр. 13).

Полученные автором диссертации новые важные результаты можно квалифицировать как крупное достижение в области теоретической физики (астрофизики). Диссертация выполнена на высоком теоретическом уровне. Основные результаты диссертации опубликованы в многочисленных работах в ведущих научных изданиях. В автореферате содержание диссертации изложено полно и правильно. Правда, неряшливое оформление диссертации существенно снижает впечатление от работы. Однако, по содержанию диссертация удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям. Считаю, что её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

член-корр. РАН

Б.М.Шустов

«Подпись руки Б.М.Шустова удостоверяю»

директор Института астрономии РАН

член-корр.



Д.В.Бисикало

18 марта 2020г.