

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԵՂԻԿՅԱՆ ԱՐԱՐԱՏ ԳԵՎՈՐԳԻ

**ԱՏՈՄՆԵՐԻ ԵՎ ՍՈԼԵԿՈՒԼՆԵՐԻ ՓՈԽԱԿԵՐՊՈՒՄՆԵՐԸ ՄԻՋԱՍՏՂԱՅԻՆ
ԱՄՊԵՐՈՒՄ ԵՎ ՆԱԽԱԿԵՆՍԱՍՈԼԵԿՈՒԼՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՅՈՒՄԸ**

Ա.04.02 - “Տեսական ֆիզիկա” մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական
գիտությունների դոկտորի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Մեղմագիր

ԵՐԵՎԱՆ 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕГИКЯН АРАРАТ ГЕВОРКОВИЧ

**ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ
И ОБРАЗОВАНИЕ ПРЕДБИОМОЛЕКУЛ**

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 "Теоретическая физика"

Ереван – 2020

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ԵՊՀ ֆիզիկայի ֆակուլտետի գիտական խորհրդի կողմից

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ ֆիզ.մաթ.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ա.Ա.Սահարյան
ՌԳԱ թղթակից-անդամ, ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր,
պրոֆեսոր Բ.Մ.Շուստով
ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր, պրոֆեսոր Ա.Ֆ.Խոլտիգին

Առաջատար կազմակերպություն ՌԳԱ Ֆիզիկայի Ինստիտուտ, ԱՏԿ Պուշինոյի
Ռադիոաստղագիտական աստղադիտարան

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2020 թ. ապրիլի 18-ին ժամը 12.00-ին:
Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի խորհրդի նիստում:
Հասցեն 0025, Երևան, Ա.Մանուկյան փ. 1:
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքվել է 05.03.2020:

Ֆիզիկայի 049 Մասնագիտացված
Խորհրդի գիտական քարտուղար



դոցենտ Վ.Պ.Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена Ученым Советом Физического факультета ЕГУ

Официальные оппоненты доктор физ.мат. наук, профессор А.А. Саарян
член-корреспондент РАН, доктор физ.мат.
наук, профессор Б.М. Шустов
доктор физ.мат.наук, профессор А.Ф. Холтыгин

Ведущая организация Физический институт РАН, Пушчинская
Радиоастрономическая Обсерватория АКЦ ФИАН.

Защита состоится 18-го апреля 2020 г. в 12.00 часов
на заседании Специализированного совета физики 049 при Ереванском
Государственном университете по адресу: 0025, Ереван, ул. А.Манукяна 1.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ
Автореферат разослан 05.03.2020

Ученый Секретарь
Специализированного совета 049 физики



доцент В.П.Калантарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Задача о радиационно-химических превращениях атомов и молекул в межзвездных газовых туманностях представляет значительный интерес с астрофизической точки зрения, в связи с непрерывно возрастающим объемом наблюдательных данных о существовании разнообразных, в том числе и весьма сложных, химических соединений во всех без исключения, межзвездных облаках. Молекулы, в газовой и твердой фазах, наблюдаются везде, как в высоковозбужденных планетарных туманностях, и, в собственно, разреженной межзвездной среде, так и в плотных, холодных, молекулярных облаках, как с очагами звездообразования, так и без них. Интерес к молекулярной фазе вещества в космосе обусловлен не только новыми возможностями интерпретации и диагностики физических условий небесных объектов, но и той, недавно выявившейся ролью, которую разные молекулы играют в динамике и тепловом балансе туманностей. Существует также точка зрения, что космические молекулы играли определенную, возможно, очень важную роль в предбиологической эволюции вещества во Вселенной, вообще, и на Земле, в частности. Суммируя эту точку зрения, можно сделать следующие два утверждения. Предбиологической эволюции органического вещества на Земле в первые полмиллиарда лет ее существования предшествовала эволюция химическая (А), в том числе и в условиях, отличных от земных, и скорее всего соответствующих космическим объектам, функционирующим задолго до образования Земли (В). Каким именно образом возникли на Земле самовоспроизводящиеся по некоей универсальной программе белковые структуры, обменивающиеся с окружающей средой веществом, энергией и информацией, науке еще неизвестно, в том числе не доказан и сам факт их земного происхождения. В настоящее время с первым из вышеприведенных утверждений (А) согласны все астрофизики в силу ее тривиальности: еще бы, после открытия углеродсодержащих сложных молекул в межзвездных облаках в 60-70-х гг. XX века вопрос об эволюции органического вещества (определяемого в вышеуказанном смысле - как углеродсодержащих соединений) "органично" вписался в классические проблемы физики и химии межзвездных облаков. Со вторым утверждением (В), особенно с последней фразой, ставящей под сомнение зарождение жизни в земных условиях, скорее всего, не согласится большинство биологов, и в первую очередь, специалисты, занимающиеся вопросами происхождения жизни на Земле. Согласно стандартным учебникам биологии жизнь (в смысле самовоспроизводящихся по некоей универсальной программе белковых структур, обменивающихся с окружающей средой веществом, энергией и информацией) зародилась именно на Земле, доказательством чему (оставляя в стороне весьма тонкие и деликатные вопросы собственно (пред)биологической эволюции) являются результаты классических же опытов Миллера-Юри 50-х г., об образовании сложных углеводов и аминокислот в смеси воды, аммиака и метана, под воздействием электрического разряда.

Настоящая работа посвящена вопросам не предбиологической, или, тем более, биологической эволюции, а связанной с ними астрофизической задаче образования сложных химических соединений в условиях межзвездных облаков. Относительно же результатов вышеуказанных экспериментов Миллера-Юри, необходимо подчеркнуть здесь и сейчас, что они свидетельствуют, скорее, о невозможности зарождения известной нам формы жизни на Земле: под воздействием характерных источников энергии (электрический разряд, УФ излучение, высокоэнергичные частицы) в смеси паров воды, аммиака и метана синтезируется только рацемическая смесь (пред)биомолекул, без признаков нарушения молекулярной симметрии, характерной для жизни. Подчеркнем, кстати, что именно благодаря этому факту, свидетельствующему о том, что внесезонный этап в (пред)биологической трансформации органического вещества не менее важен, чем последующий земной, астрофизические исследования, и, впервые очередь, условия радиационно-химических превращений атомов и молекул, и приобрели за последние 20-30 лет такое важное значение в решении проблемы происхождения жизни.

Цели и задачи работы.

Основной целью работы является исследование возможностей радиационно-химических превращений атомов и молекул в межзвездных молекулярных облаках. Задачи, рассмотренные здесь, прямо связаны, (но не исчерпываются) вопросами химической эволюции в межзвездных облаках: где именно, как именно и под воздействием каких именно факторов образуются сложные химические соединения в Галактике вообще, и в объектах, предшествующих Солнечной системе, в частности. Наблюдательные данные свидетельствуют о распространенности в Космосе сложных химических соединений (тяжелых углеводородов, аминокислот, сахаров, спиртов и т.п.), равно как и необходимых условий не только для их образования, но и последующего усложнения до (пред)биомолекул. Поэтому проблемы химической и (пред)биологической эволюции вещества во Вселенной прямо связаны друг с другом вообще, и с астрофизическими задачами, возникающими при их исследовании, в частности. Некоторые из них и рассмотрены с необходимой степенью детализации в диссертации с помощью методов, характерных для теоретической физики и астрофизики.

Научная новизна работы.

В работе впервые количественно рассчитана скорость осаждения метана на графитовые и/или силикатные пылинки в условиях сжимающихся молекулярных облаков. Показано, что метановый лед превосходит по абсолютному содержанию водяной лед в первые 100 тысяч лет сжатия облака от начального значения концентрации молекулярного водорода порядка 10^2 , 10^3 см⁻³, затем устанавливается на уровне 10-20 % от общего содержания льдов, при достижении конечного значения концентрации 10^6 , 10^7 см⁻³, за время сжатия облака порядка 1

млн лет. Последующая возможность облучения протонами космических лучей, согласно экспериментальным данным, приводит к трансформации метанового льда (в матрице водяного) путем твердофазной радиационно-химической поликонденсации в сложные алифатические (алканы и алкены) и ароматические углеводороды, с числом атомов углерода вплоть до 30, с относительным содержанием порядка 1-5 % в ледяных оболочках пылинок, согласующегося с наблюдениями. Впервые рассчитаны потоки космических лучей в диапазоне МэВ-ГэВ, и ультрафиолетовых квантов (6-13.6 эВ) внутри плотных сгущений облаков, где возможно существование ледяных оболочек пылинок. В качестве источников внешнего поля излучения рассматривались: (а) галактические космические лучи с известным энергетическим распределением, (б) ультрафиолетовое излучение от близких А звезд и (в) межзвездного фона, (г) ультрафиолетовое излучение А, F, G карликов, раз в несколько десятков – сотен тысяч лет проходящих через любое молекулярное облако, причем излучение вызывается аномальной компонентой космических лучей (д) аномальная компонента космических лучей, образующихся при взаимодействии звездных ветров G карликов с веществом столкнувшихся облаков. При этом впервые показано, что дозы облучения льдов в значительном объеме стандартных облаков превышают пороговые значения, необходимые для инициации радиационно-химических превращений льдов и их смесей в сложные соединения типа углеводородов, аминокислот и т.п. В работе также впервые рассчитана 2-мерная газодинамическая модель течения нейтрального вещества молекулярных облаков, с которыми Солнце столкнулось не менее 10 раз за все время существования. При этом впервые количественно показано, что поток нейтрального газа, проникающего в атмосферу Земли, достаточен для существенного снижения содержания озона в мезосфере, что, согласно известным климатическим моделям, могло инициировать глобальное оледенение. Наконец, в работе впервые рассчитаны дозы облучения льдов – аналогов покрытий объектов пояса Койпера и комет Солнечной системы протонами солнечного ветра, влияющих на их фотометрические показатели. Рассмотрены эволюционные изменения гелиосферы и изменения доз облучения за все время жизни Солнца, протонами солнечного ветра и высокоэнергичными протонами аномальной составляющей космических лучей, возникающих в гелиосфере. Предложена аналитическая формула для потока высокоэнергичных частиц в зависимости от параметров звездного ветра, и на примере солнечного ветра, показано ее хорошее согласие с наблюдательными данными зонда Вояджер-1. Показано, что теоретическое содержание водяного льда в планетарных туманностях зависит от значений потока высокоэнергетических частиц, и, на примере молодой туманности NGC6302 показано хорошее согласие наблюдаемого и теоретического значений содержания льдов. Впервые рассмотрено диффузионное ускорение протонов в процессе Ферми-1 на фронте магнитогидродинамической ударной волны планетарных и WR туманностей, до энергий порядка 1-100 МэВ и выше, и показано, что времена ускорений и диффузии частиц, а также максимально возможное значение энергии согласуются с наблюдаемыми параметрами звездных

ветров. Предложено использовать рассчитанные дозы облучения в моделях образования фуллеренов. Впервые проанализировано теоретическое содержание водяного льда в активных галактиках, и показана ее чувствительность к потоку космических лучей. Рассмотрен вопрос о влиянии условий WR галактик на молекулы РАН и сделан вывод о перманентном источнике РАН с короткой (5-10 млн лет) шкалой времени. Впервые предложены две аналитические модели планетарных туманностей, первая - динамическая, в рамках теории течений с загружаемой массой, в которой распределение плотности и скорости расширения туманности зависит от параметров звездного ветра. Также объяснено образование быстрых течений в планетарных туманностях и особенности формирования профилей спектральных линий. Вторая (полу)аналитическая модель – ионизационная, с двумя источниками ионизации, от ядра и горячего звездного ветра, позволила объяснить поведение спектральных линий [OIII] в IC4997.

Прикладное значение работы.

Рассчитанные в настоящей работе астрохимические модели эволюции содержания льдов и их смесей, в условиях холодных (10-20 K) плотных областей межзвездных молекулярных облаков могут быть использованы при интерпретации инфракрасных спектров таких облаков, в которых присутствуют большое количество особенностей, идентифицируемых с колебательными полосами льдов в диапазоне нескольких мкм – несколько десятков мкм. Разработанные в работе методики определения потоков ультрафиолетового и корпускулярного излучений внутри облаков могут быть использованы во всех задачах анализа содержания молекул, их ионов и радикалов, чувствительного к значениям потоков излучения. Полученный в работе вывод о существенном вкладе в дозу облучения льдов ультрафиолетовыми фотонами и энергичными частицами от проходящих через облака звезд-карликов, одновременно доказывает факт их воздействия на ион-молекулярную структуру облаков, на значение скорости ионизации молекулы водорода, то есть величин, непосредственно получаемых из наблюдений (например, H_3^+ , CN, и т.п.), и во многих случаях необъяснимых без привлечения новых источников излучения. Рассчитанные в работе дозы поглощения льдов объектов Солнечной системы могут быть использованы при интерпретации их фотометрических характеристик, зависимости от радиального расстояния, и даже от угла наклона к эклиптике. Полученный в работе вывод о существенном снижении содержания озона в мезосфере при прохождении Солнца через стандартное молекулярное облако должен обязательно учитываться во всех палеоклиматических моделях на характерных временах порядка несколько сот миллионов лет. Наконец, факт, следующий из полученных в работе результатов, о наличии большого количества органического (углеродсодержащего) вещества (аминокислот, сложных углеводов и т.п.) на поверхности Земли, до момента первого "проявления" живых организмов 3.8 млрд лет назад, может (и должен быть!) использован в теориях происхождения жизни на Земле. Дозы облучения водяного льда, рассчитанные для условий планетарных туманностей, туманностей

WR, некоторых активных галактик можно использовать для решения многих задач радиационной астрохимии, в моделях образования РАН, фуллеренов и т.п. Аналитические формулы и модели, полученные или разработанные автором, можно использовать для быстрой оценки многих астрофизических и астрохимических параметров.

Основные результаты, выносимые автором на защиту.

1. Решение нестационарной задачи образования льдов в оболочках пылинок сжимающихся протозвездных облаков (с учетом, в том числе 166 соединений, реагирующих по более, чем 1779 фото-радио-химическим каналам) показало, что в первые 10^5 лет обилие твердого метана в пылинках превышает обилие водяного льда, и только потом, снижается до конечного значения 10-20% (от воды). Такое содержание метана достаточно, чтобы облучение ультрафиолетовым излучением и космическими лучами привело к образованию сложных алифатических и ароматических углеводородов с обилием 1-5 % (от воды), согласующегося с наблюдениями. Согласно современной модели образования Солнца, Земли и комет, из наших данных следует, что на поверхности Земли, до момента образования жизни, 3.8 ± 0.1 млрд лет, в значительных количествах ($\geq 10^{15}$ г) существовали смеси тяжелых алифатических и ароматических углеводородов, которых, наряду с аминокислотами, также следует рассматривать в качестве предбиомолекул.

2. Поскольку в типичных молекулярных облаках существуют льды, прежде всего водяной, а также CO, NH₃, CH₄, и т.п. считая от границы образования льдов (в единицах поглощения в видимом диапазоне) $A_V \sim 3$, тогда ультрафиолетовое излучение от внутренних источников (космические лучи и т.п.) в состоянии обеспечить дозу облучения льдов пылинок типичных облаков, превышающее пороговое значение 25 эВ/мол., достаточную для инициирования радиационно-химических реакций с образованием сложных органических соединений (углеводородов, аминокислот, и т.п.) за время жизни облаков 10-50 млн лет, практически во всем объеме облака. Галактические космические лучи с существующим потоком в диапазоне 1 МэВ и выше в состоянии обеспечить дозу облучения льдов пылинок молекулярных облаков, превышающее пороговое значение 0.3 эВ/а.е.м., достаточную для инициирования радиационно-химических реакций с образованием сложных органических соединений (углеводородов, аминокислот, и т.п.) за время жизни облаков 10-50 млн лет, во всей области облака. Теоретические значения радиальных зависимостей скоростей ионизации H₂ в типичных молекулярных облаках галактическими космическими лучами, построенные (феноменологически) с учетом магнитного поля облака, убывают с возрастанием столбцовой плотности, особенно выраженное (на порядок и более) в сгущениях плотности, что следует учитывать в количественных астрохимических расчетах. Звезды главной последовательности A,F,G классов, примерно каждые 70-200 тыс. лет проходят через типичное молекулярное облако, дополняя дозу

облучения льдов ультрафиолетовыми фотонами и аномальной компонентой космических лучей.

3. Согласно нашей газодинамической модели обтекания солнечным ветром межзвездных облаков, через которые проходит Солнце примерно каждые 30 млн лет (HI облака), и 300-400 млн лет (H₂ облака), гелиосфера сжимается до области планет-гигантов в первом случае, и вплоть до орбиты Земли – во втором, обеспечивая в последнем случае поток входящих в земную атмосферу атомов водорода порядка $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, при прохождении Солнца через молекулярное облако с концентрацией $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, поток атомов водорода, порядка $3 - 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, проникающий в земную атмосферу, вызывает уменьшение содержания атмосферного озона, от 2-4%, на высоте стратопазузы (~50 км), вплоть до 50-80% у мезопазузы (~80 – 90 км), с образованием глобального и постоянного слоя мезосферных ледяных "серебристых" облаков: согласно существующим климатическим моделям, этого достаточно для инициирования глобального оледенения.

4. Дозы облучения 12 льдов-аналогов, рассчитанные при их взаимодействии с протонами солнечного ветра и с галактическими космическими лучами, на расстояниях 40 а.е. и 10000 а.е., показывают, что они достаточны для коренной радиационно-химической перестройки льдов поверхности, включая изменение их фотометрических характеристик. Рассчитаны изменения потоков протонов, как принадлежащие солнечному ветру с энергиями около 1 кэВ, соответствующих скорости направленного течения порядка 400 км/с, так и относящимся к аномальной компоненте (космических лучей), ускоренных на границе гелиосферы до энергий порядка 1-100 МэВ, за все время существования гелиосферы. Получены аналитические зависимости скоростей облучения водяного льда на разных этапах эволюции гелиосферы, важных для анализа радиационно-химических трансформаций льдов Солнечной системы.

5. Предложена полуаналитическая формула расчета потока энергетических протонов в диапазоне примерно 1-100 МэВ в зависимости от доли кинетической энергии звездного ветра, затраченной на ускорение частиц на фронте ударной волны в диффузионной модели ускорения Ферми-1. Для солнечного ветра со стандартными параметрами предсказанная формулой величина интенсивности согласуется с наблюдаемой Вояджер-1 с точностью до коэффициента меньше 2. Оценки потока в данном диапазоне энергий особенно важны при расчетах доз облучений веществ объектов Солнечной системы. Рассчитаны потоки энергетических протонов в диапазоне примерно 1-100 МэВ в модели диффузионного ускорения в процессе Ферми-1 на фронте ударной волны быстрого звездного ветра, взаимодействующего с медленным веществом туманности (планетарной и WR). Рассчитанные время ускорения, диффузии и максимальной энергии соответствуют наблюдаемым параметрам звездных ветров, а значения потоков энергетических частиц превышают среднегалактические на 5-7 порядков на радиусе ударной волны. Вычисленные дозы облучения за характерное время

объектов можно использовать при оценках радиационно-химических превращений наблюдаемых в этих объектах РАН, НАС и фуллеренов.

6. Показано возможное существование H_2O и CO льдов в условиях за фотодиссоциационными фронтами ранних, и, с оговорками, умеренно развитых планетарных туманностей. Данный теоретический факт подтверждается инфракрасными наблюдениями молодой планетарной туманности NGC 6302, причем наблюдаемая столбцовая плотность для H_2O согласуется с рассчитанным, при общепринятых параметрах NGC 6302. В значительной части объема NGC 6302 корпускулярные (протоны 1-10 МэВ) дозы превышают 20 эВ/аеМ для систем типа графиты/фуллериты, вплоть до значений 2000 эВ/аеМ. Эти оценки можно использовать в существующих моделях образования фуллеренов, например, посредством декомпозиции НАС и/или дефрагментации РАН.

7. Предложена модель образования водяного льда в условиях активных галактик. Рассчитаны ионизационные модели области с узкими спектральными линиями в стандартном сценарии активной галактики, при которых получаются наблюдаемые столбцовые плотности водяного льда. Оказалось, что теоретические значения содержания льдов сильно зависят от уровня потоков космических лучей, и при превышении значения скорости ионизации водорода 10^{-16} с^{-1} на 1-2 порядка содержание льдов падает более чем на 2-3 порядка и линии льда исчезают в спектре. Таким образом, наличие льда (наблюдаемая столбцовая плотность) является хорошим количественным индикатором уровня активности галактики. Рассмотрен также вопрос о выживаемости молекул РАН в условиях WR галактик. Молекулы подвержены корпускулярному излучению от ударных волн множества звездных ветров WR, характерных для подобных галактик. Рассчитанные дозы облучения за характерное время существования этих звезд (WR) на 1-2 порядка превышают лабораторные пороговые значения дефрагментации молекул, откуда сделан вывод о перманентном источнике пыли (и РАН), отличном от WR звезд. Возможный источник пыли в этих условиях – остатки сверхновых.

8. Предложены две аналитические модели планетарных туманностей. Динамическая аналитическая модель планетарной туманности дана в рамках теории течений с загружаемой массой, в которой распределение плотности и скорости расширения туманности зависит от параметров звездного ветра, а также объясняется образование быстрых течений и формирование характерных профилей спектральных линий поглощения. Также предложено объяснение временных изменений интенсивностей линий [OIII] в спектре IC 4997 на основе полуаналитической модели, в которой ионизация осуществляется не только центральной звездой, но и излучением горячего переменного звездного ветра.

Достоверность результатов и выводов диссертации определяется физической обоснованностью моделей астрофизических объектов и использованием при анализе поставленных задач строгих математических методов, тщательным тестированием применяемых для моделирования численных схем, совпадением

полученных результатов с известными ранее и с данными наблюдений реальных астрофизических объектов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр теоретической физики, астрофизики и общей физики ЕГУ, Бюраканской астрофизической обсерватории, института Аргеландера (Бонн, Германия), института М. Планка ядерной физики (Гейдельберг, Германия), департамента химии университета «La Sapienza» в Риме (Италия), департамента химии и института Астрономии университета на Гавайях (США), на 23 международных конференциях по физике межзвездной среды, астрохимии, астробиологии, гелиофизике, и физике активных галактик (тезисы докладов опубликованы).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 39 (+1 будет представлена) научных статьях и 23 тезисах международных конференций.

Личный вклад автора. По материалам **1-ой главы автором** предложена идея анализа образования сложных соединений и проведены все постановки задач в области молекулярной астрофизики и осуществлялось общее руководство работой. По материалам **2-ой главы автором** выполнена постановка задач моделирования газовых туманностей вообще, с учетом молекулярной составляющей (**п.2.1**), и только атомарной (**п. 2.2**), на основе оригинальной фотоионизационной модели **автора** с учетом 15 атомов и их важнейших ионов, причем атомные параметры (силы осцилляторов, сечения фотоионизации и рекомбинации, силы электронных ударов) рассчитаны **автором**. Идея о псевдорезонансных линиях и методе определения расстояний туманностей с их помощью принадлежит **Г. Гурзадяну**. Все численные результаты, их интерпретация, написание статей **п.2.2 – автора**. Новые оригинальные модели **автора п. 2.3, 2.4** разработаны на основе работ **John Dyson** по физике газодинамических течений с загружаемой массой (по планетарным туманностям все постановки задач **авторские**), и **David Williams** по физике и химии молекулярных облаков, где **автором** поставлена задача о радиационно-химической поликонденсации твердого метана в условиях облаков. В описанных в **3-й главе** исследованиях **автору** принадлежит лидирующая роль в постановках задач о роли метана в образовании тяжелых углеводородов путем твердофазной радиационно-химической поликонденсации метана. **D.Williams и S.Viti** предоставили компьютерную программу Astrochemistry-UCL, дополненную **автором** учетом двух дополнительных химических путей образования метана. Посредством этой программы **автором** выполнены все численные расчеты по метану, необходимые в исследованиях этой главы. Интерпретация результатов проведена преимущественно **автором**, все статьи по результатам 3-й главы, написаны **автором, D.Williams, и S.Viti** принимали конструктивное участие в обсуждении и интерпретации результатов и в редактировании статьи, **Y.Keheyan**

принимала участие в редактировании соответствующей статьи. В **главах 4-6,10-13 автором** полностью выполнены постановки задач, получены все аналитические и численные результаты, их интерпретации, написаны все статьи по этим темам. Все численные расчеты в этих главах выполнены **автором** по компьютерной программе **Cloudy (G.Ferland)**, в свободном доступе (версии 8, 13 и 17). В **главе 7 Л.Барсамян** принадлежит примерно четверть численных результатов, все остальное – постановка задачи, алгоритм расчета потока энергетических протонов в плотной молекулярной среде межзвездного облака, написание компьютерной программы, численные расчеты и их интерпретация, написание статьи – **автора**. В **главах 8,9 Hans Fahr** принимал конструктивное участие в обсуждении и интерпретации результатов и редактировании 4 статей, все остальное – постановка задач, численные расчеты и их интерпретация, написание статей – **автора**. Численные результаты **главы 8** получены посредством компьютерной программы **CLAWPACK (LeVeque)**, в свободном доступе имеется программа решения газодинамических уравнений с нулевыми правыми частями. Программы для ЭВМ с ненулевыми правыми частями, равно как и модификации для решения 2-жидкостных моделей осуществлены **автором**. Аналитические результаты о содержании озона в возмущенной мезосфере – **авторские**. В **главах 5,7,10,13,15** использованы результаты компьютерных расчетов ионизационных потерь заряженных частиц в среде, **SRIM (J.Ziegler)**, в свободном доступе. В **главе 14 А.Самсонян** принадлежат результаты измерения оптических толщин и столбцовых плотностей водяного льда, наблюдаемого в спектрах некоторых активных галактик. Постановка задачи, численные расчеты посредством Cloudy, интерпретация результатов принадлежат **автору**. В **главе 15 Ж.Мартиросян** принимала равное участие в постановке задачи и в редактировании статей, также ей принадлежат результаты расчетов числа ионизирующих водород квантов на основе рекомбинационных линий водорода, измеренных ею в SDSS спектрах 9 галактик WR. Численное моделирование посредством **Cloudy** в **главе 15**, расчеты потоков энергетических протонов и доз облучения РАН (с использованием **SRIM**), написание статей – **автора**.

Структура диссертации и объем. Диссертацию предваряет список положений, выносимых автором на защиту. Диссертация состоит из введения, 2-ой главы с описанием физико-химических аналитических и численных моделей межзвездных облаков и 13 последующих глав с описанием основных результатов работы. Диссертацию завершает заключение, список публикаций автора по теме диссертации, список цитированной литературы из 506 наименований и список сокращений. Общий объем диссертации составляет 304 страниц, включая 73 графика и 3 рисунка.

Краткое содержание работы.

Настоящая работа посвящена вопросам радиационно-химической трансформации атомов и молекул в условиях газовых туманностей и образования сложных соединений типа аминокислот и тяжелых углеводов. В **Главе 1** содержится

введение и общая постановка задачи. Для адекватного описания этих процессов, и правильной интерпретации наблюдательных данных, необходимо иметь физико-химические модели межзвездных облаков, с достаточной степенью детализации. Вопросам построения таких моделей посвящена **Глава 2**. В **Главе 3** рассматриваются некоторые вопросы химической эволюции межзвездных облаков на примере усложнения соединений углерода, начиная с ее атомарного состояния в газовой фазе. Под химической эволюцией, (предшествующей "предбиологической"), в данной работе понимается усложнение химических соединений при химических реакциях, в результате которых образуются (синтезируются) вещества, необходимые для первичных биохимических превращений. Их очень трудно, или вообще невозможно получить в (разреженной) газовой фазе, особенно если речь идет о соединениях, содержащих более, чем несколько атомов углерода. Намного проще они синтезируются в твердой фазе, например, в ледяных мантиях межзвездных пылинок, и только затем, возгоняясь, переходят в газ, или же, при более низких температурах, остаются в составе пылинок, с возможностью дальнейших преобразований при наличии соответствующих источников энергии. Количественным расчетам образования и накопления молекул в твердой фазе, в ледяных оболочках пылинок молекулярных облаков, посвящена **Глава 3**. В частности, детально рассмотрен вопрос об образовании метана в газовой и твердой фазах, в сжимающемся облаке. Поставлена и решена нестационарная задача образования льдов в оболочках пылинок сжимающихся протозвездных облаков (с учетом, в том числе 166 соединений, реагирующих по более, чем 1779 фото-радио-химическим каналам). Модели рассчитывались по компьютерной программе Astrochemistry-UCL. Решение показало, что в первые 10^5 лет обилие твердого метана в пылинках превышает обилие водяного льда, и только потом, снижается до конечного значения 10-20% (от воды) (Рис.1). Такое содержание метана достаточно, чтобы облучение ультрафиолетовым излучением и космическими лучами привело к образованию сложных алифатических и ароматических углеводородов с обилием 1-5 % (от воды), согласующегося с наблюдениями. Согласно современной теории образования Солнца, Земли и комет, из наших данных следует, что на поверхности Земли, до момента образования жизни, $3,8 \pm 0.1$ млрд лет, в значительных количествах ($\geq 10^{15}$ г) существовали смеси тяжелых алифатических и ароматических углеводородов, которых, наряду с аминокислотами, также следует рассматривать в качестве предбиомолекул.

Следует подчеркнуть, что сама пыль в межзвездных облаках, как известно, образоваться не в состоянии - мало давление насыщающих паров. Пыль, точнее ядра пылинок в виде графитовых или силикатных частиц субмикронных размеров, образуется в условиях холодных ветров разнообразных AGB звезд - прародительниц планетарных туманностей, являющихся, вместе с красными гигантами и сверхновыми, одним из основных поставщиков газа и пыли в межзвездную среду. Пылинки конденсируются в газе на расстоянии нескольких радиусов звезды и играют фундаментальную роль в динамике звездного (холодного) ветра. Разумеется, пыль конденсируется в условиях и других

галактических объектов, например, в оболочках сверновых, новых, и т.п., то есть в условиях явлений, которые носят нерегулярный характер, в отличие от планетарных туманностей – закономерного итога эволюции большинства звезд с массой меньше $8 - 9M_{\odot}$. Образовавшиеся таким образом и поступившие в межзвездную среду пылинки лишены ледяных мантий – они образуются и растут только в защищенных, во внутренних, плотных и холодных областях молекулярных облаков, то есть, проэволюционировавших частей разреженных диффузных облаков, слияние которых и приводит к образованию молекулярных облаков.

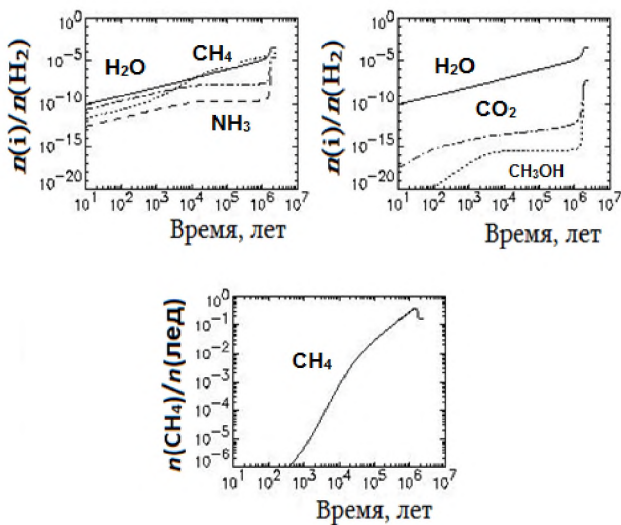


Рис.1. Эволюция содержания льдов в оболочках пылинок в стандартной модели. Вверху слева (сверху вниз): H_2O – сплошная кривая, CH_4 , CO , NH_3 ; вверху справа (сверху вниз) H_2O – сплошная кривая, CO_2 , CH_3OH ; внизу – содержание метана.

Однако для химических реакций усложнения (полимеризации, поликонденсации и т.д.) также необходимы и источники энергии – ультрафиолетовое излучение и энергичные частицы. В **Главах 4-7** обсуждаются разнообразные источники – ультрафиолетовое излучение от звезд, и от межзвездного фона, обусловленные космическими лучами. Теоретические модели межзвездных облаков рассчитывались по компьютерной программе Cloudy (G. Ferland), непревзойденной по количеству и качеству учитываемых элементарных процессов взаимодействия атомов, ионов и молекул друг с другом и с излучением. Спектры излучения, в том числе переработанные и излучаемые самой туманностью, для одной из моделей, показаны на Рис. 2 (**Глава 4**). Далее, к анализируемым источникам относятся галактические космические лучи (**Глава 5**), ультрафиолетовое излучение от А, F, G звезд-карликов, время от времени

проходящие через молекулярные облака, и энергетические частицы (аномальная компонента космических лучей) возбуждающими это самое ультрафиолетовое излучение (Глава 6), и, наконец, сама аномальная компонента космических лучей, возрастающая при прохождении звезд через облака (Глава 7). Ультрафиолетовое излучение от внутренних источников (космические лучи и т.п.) в состоянии обеспечить дозу облучения льдов (H_2O , CO , NH_3 , CH_4) пылинок типичных облаков, превышающее пороговое значение 25 эВ/мол., достаточную для инициирования радиационно-химических реакций с образованием сложных органических соединений (углеводородов, аминокислот, и т.п.) за время жизни облаков 10-50 млн лет, практически во всем объеме облака (Рис. 3), как это и показано в Главе 4. Далее, показано, что галактические космические лучи с потоком в диапазоне 1 МэВ и выше (Рис. 4,5) внутри молекулярного облака (или сгущения в нем) в состоянии обеспечить дозу облучения льдов пылинок, превышающее пороговое значение 0.3 эВ/а.е.м., достаточную для образования сложных органических соединений за время жизни облаков (Рис. 6,7) (Глава 5). Звезды главной последовательности А, F, G классов, примерно каждые 70-200 тыс. лет проходят через типичное молекулярное облако, дополняя дозу облучения льдов ультрафиолетовыми фотонами и аномальной компонентой космических лучей. Дело в том, что звезды диска не только вращаются относительно галактического центра (с периодом, например для Солнца, около 225 млн лет), но и колеблются относительно галактической плоскости с периодом порядка 60 млн лет, то есть примерно каждые 30 млн лет Солнце пересекает галактическую плоскость с возможностью столкновения с молекулярными облаками, которые концентрируются как раз к плоскости Галактики. В литературе исследовалась возможность прохождения Солнца через облака на основе данных о распределении облаков по размерам и скоростям в диске Галактики, и было показано, что за все время существования Солнце сталкивалось не менее 10 раз с плотными молекулярными облаками, и не менее 100 раз с диффузными нейтральными облаками. Очевидно, что такой же вывод верен и для всех классов звезд: при наличии дифференциальных скоростей между звездами и облаками в диске, время от времени они должны сталкиваться. В частности, ясно, что время t_f свободного пробега звезд с пространственной плотностью q , движущихся со скоростью V через объем галактического диска, содержащий облака с радиусами R можно оценить по следующей формуле

$$t_f = \frac{1}{\pi R^2 q V}, \quad (1)$$

полагая, для простоты, все параметры постоянными. Пример более рафинированного анализа, относящегося к столкновениям Солнца с межзвездными облаками с известными распределениями по размерам и скоростям, можно найти в литературе, а для наших оценок достаточно ограничиться средними значениями радиусов и относительных скоростей. Полагая средний размер облаков порядка 10-30 пк, среднюю относительную скорость порядка 10 км/с и $q=1.4 \cdot 10^{-3}$ пк³, получим $t_f = 70000 - 220000$ лет. Указанные значения могут отклоняться в ту или иную сторону, с соответствующим изменением величины t_f не более десяти раз.

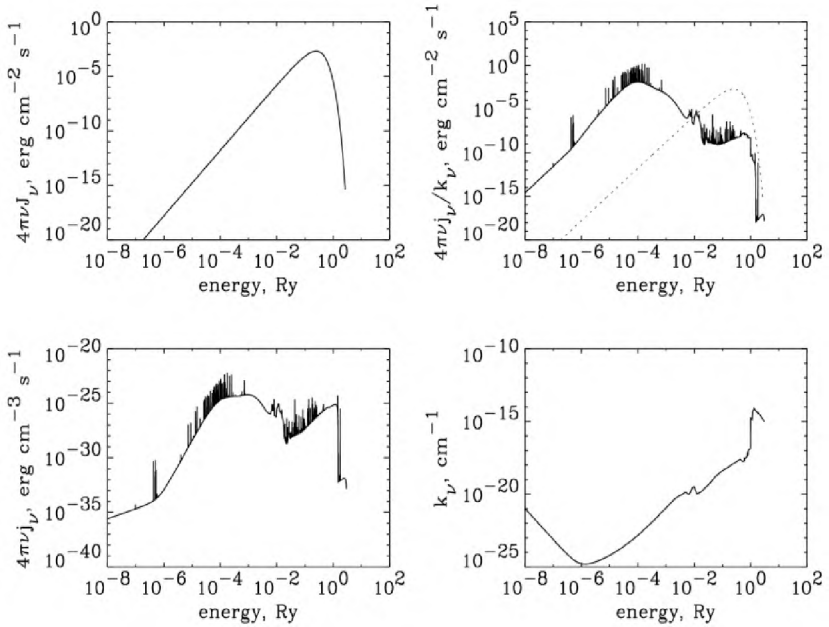
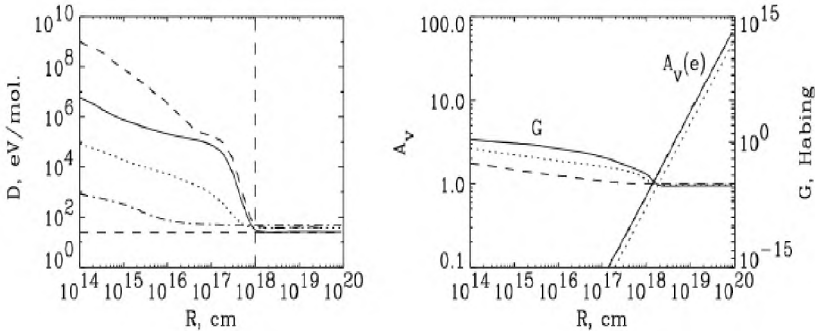


Рис. 2. Поле излучения для одной из моделей (звезда $T_{\text{эфф}} = 10000$ К, светимость $3.5 \cdot 10^{34}$ эрг·с $^{-1}$, расстояние от звезды 10^{17} см, n (H_2) в облаке 10^3 см $^{-3}$). Скорость ионизации H_2 космическими лучами $\zeta = 1 \cdot 10^{-16}$ с $^{-1}$. Вверху, - слева: внешнее излучение, падающее на облако; - справа: рассчитанная Cloudy функция источников на внешней границе, пересчитанная к внутренней (сплошная кривая) и, для сравнения, падающее (прерывистая кривая). Внизу, - слева: коэффициент излучения туманности (на внешней границе); - справа: коэффициент поглощения (на внешней границе). $4\pi\nu\mathcal{J}_\nu$ - в эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, \mathcal{J}_ν - интенсивность излучения, эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·Ср $^{-1}$ ·Гц $^{-1}$, ν - частота излучения) в зависимости от энергии фотонов, выраженных в ридбергах, ($1\text{Ry} = 13.6$ эВ).



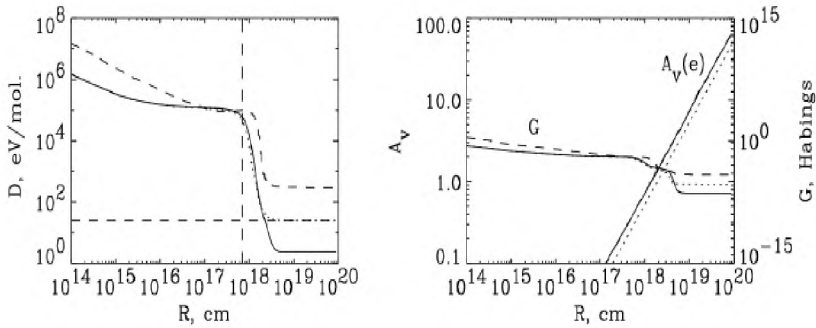


Рис. 3. Дозы поглощенной энергии ультрафиолетового излучения водяным льдом, в диапазоне 1100-1800 Å, в зависимости от глубины облака R , за 50 млн. лет. Вверху, слева – модели 1-4 (расстояние до звезды, $R_i = 10^{16}$ см (тире), 10^{17} см (сплошная), 10^{18} см (точки), 10^{19} см (точки – тире)). Вертикальная прерывистая линия показывает границу существования льдов, горизонтальная – пороговое значение экспериментальной дозы. Вверху, справа, величина $A_V(e)$, характеризующая поглощение и рассчитанная Cloudy (для сравнения, рядом, точками, изображена величина $0.526 \cdot 10^{-21} n_H \cdot R$). Также показана величина G , характеризующая ультрафиолетовое излучение: модели 2-4 (сверху вниз). Внизу – то же самое, для моделей 5-7 (межзвездный УФ, потоки 1 и 10 Habing), сверху вниз, соответственно.

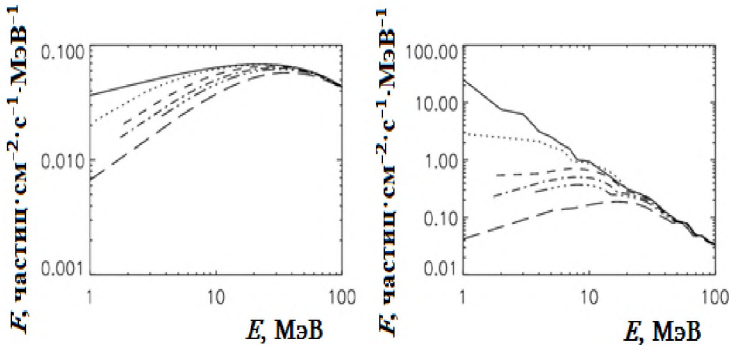


Рис. 4. Дифференциальные потоки протонов внутри молекулярного облака со средней плотностью $n = 10^3$ см⁻³. Кривые соответствуют (сверху вниз) значениям расстояния от границы облака 0, 1, 5, 10, 15 и 30 пк, или столбчатой концентрации 0, 3, 15, 30, 45 и 90 (в единицах 10^{21} см⁻²), соответственно. Даны результаты наших расчетов для двух распределений, известных из литературы.

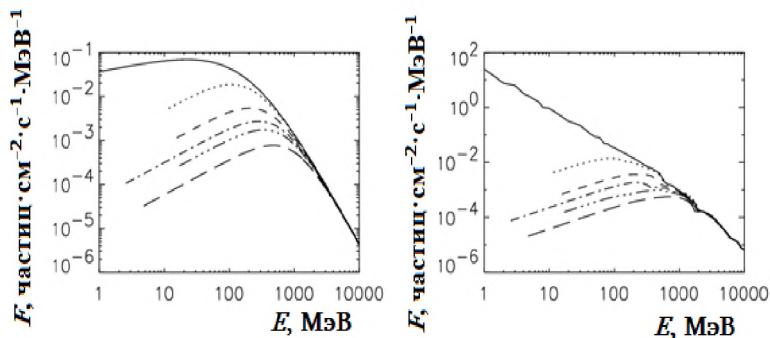


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для случая сгущения со средней плотностью $n = 10^6$ см^3 , для значений столбцовой плотности вплоть до 10^{26} см^{-2} .

Однако очевидно, что за время жизни порядка 10 млн. лет (что является минимальным значением для облаков с O, B звездами, для облаков без звезд, или со звездами малой массы время жизни порядка 50 млн. лет) каждая туманность испытывает по крайней мере несколько десятков (возможно сотен) столкновений со звездой классов A, F и G.

УФ излучение появляется во внутренних областях облаков только в диапазоне 6-13 эВ, в основном, из-за индуцированного космическими лучами излучения молекулярного водорода в полосах Лаймана и Вернера. Рассчитанные Cloudy распределения водорода и его производных вдоль радиуса туманности, а также соответствующие температуры газа и пыли - на Рис. 8.

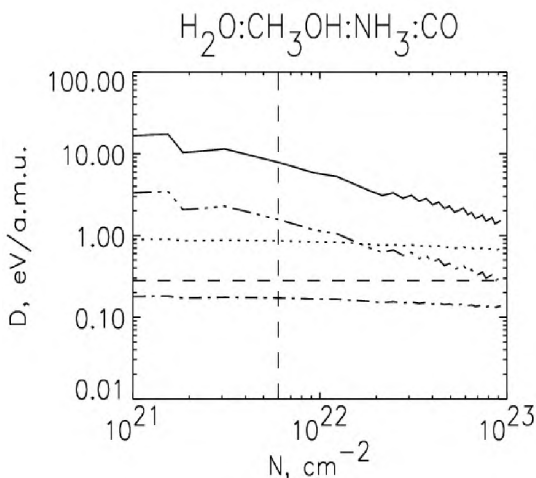


Рис. 6. Дозы поглощенной энергии (эВ/а.е.м.) смеси льдов, в соотношении 100:50:1:1, протонами, в зависимости от концентрации облака по лучу зрения, в см². Кривые (сверху вниз, попарно) соответствуют временам накопления 50 и 10 млн. лет, на основе 2 разных распределений космических лучей. Вертикальная пунктирная линия указывает границу образования льдов, горизонтальная – пороговое значение дозы, вызывающей образование винилового спирта.

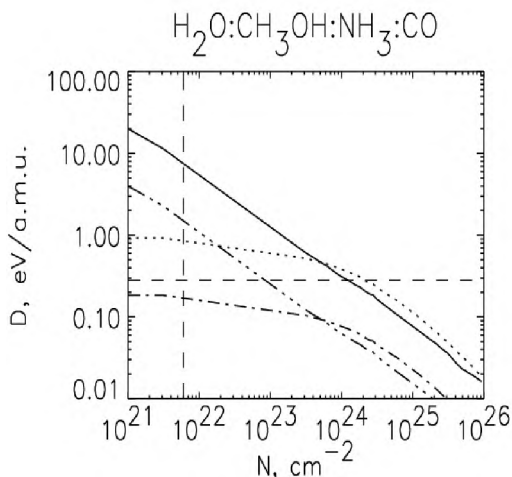


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, для случая ступищения внутри молекулярного облака, со средней плотностью $n = 10^6 \text{ см}^{-3}$, со значениями x из рис. 4, и для значений столбцовой плотности вплоть до 10^{26} см^{-2} .

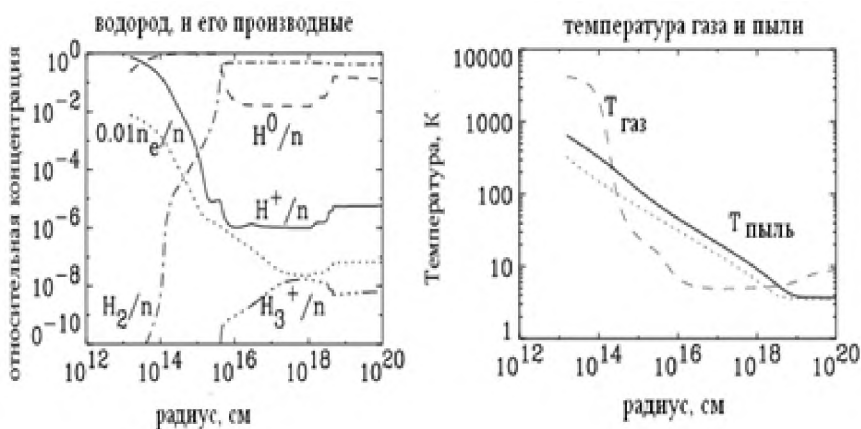


Рис. 8. Концентрации электронов (заниженные в 100 раз), тепловых протонов, атомов и молекул водорода в зависимости от радиуса туманности (слева), через которую проходит звезда. Справа указаны температуры газа и пыли в зависимости от радиуса туманности, через которую проходит звезда. Указаны средние равновесные значения температур пылевой составляющей по двум группам (состоящих из 10 подгрупп каждая, со своим распределением по размерам и концентрациям) “графитовых” и “силикатных” пылинок, типичных для молекулярных облаков в Орионе: сплошная линия – средняя по “графитовым”, точки – по “силикатным”. Прерывистая линия указывает температуру газа.

Итак, фотоны в диапазоне энергий 6-13.6 эВ имеют возможность добраться до внутренних областей облаков в случае прохождения звезды через облако и обусловить дозы облучения, показанные на Рис. 9.

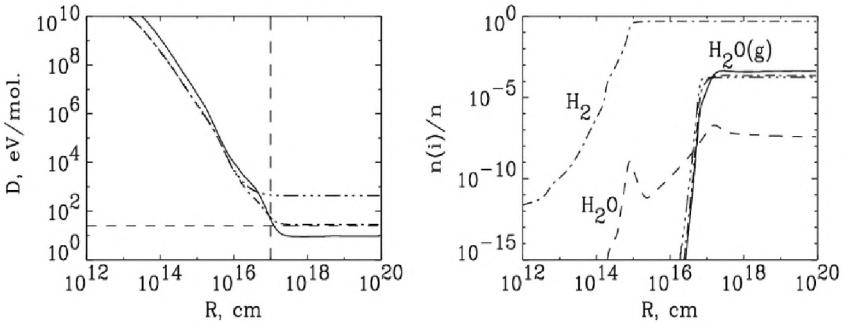


Рис. 9. Доза УФ облучения водяного льда за $7 \cdot 10^6$ лет в диапазоне 6-13.6 эВ, в зависимости от радиуса туманности, для трех значений величин ζ : 10^{-16} , 10^{-15} и 10^{-14} c^{-1} (снизу вверх, соответственно). Время накопления образуется за 700 прохождений звезд-карликов, облучающих льды в области $(2 - 3) \cdot 10^{17} \text{ см}$. Справа – распределение водяного газа H_2O и льда $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$.

Данные о потоках высокоэнергичных протонов показаны на Рис. 10, как вне облака, так и внутри, в зависимости от столбцовой плотности облака, рассчитанные в приближении «непрерывного торможения».

Глава 8 посвящена взаимодействию солнечного ветра с веществом межзвездного облака, при прохождении Солнца через облако. Течение как атомов, так и протонов взаимодействующих газов, описывается системой газодинамических уравнений двухжидкостной модели (2-4),

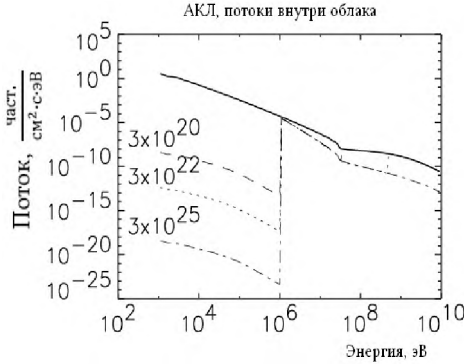


Рис. 10. Энергетические потоки аномальных космических лучей. Сплошная линия соответствует потоку на границе астросферы. Цифры на графике показывают значения столбцовой плотности (в см^{-2}), соответствующие данному распределению по энергиям.

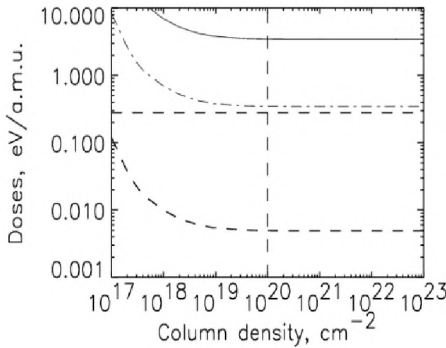


Рис. 11. Дозы облучения водяного льда аномальной компонентой космических лучей, образующихся при прохождении звезд, подобных Солнцу через молекулярное облако размера около 30 пк, с относительной скоростью 10 км/с. Предполагается, что дозы аккумулируются при многократных прохождении, 700, 70 и 1, сплошная, точка-тире, тире. Горизонтальная (прерывистая) линия указывает пороговое значение дозы образования винилового спирта, вертикальная – граница льдов.

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \nabla(\rho_j \mathbf{V}_j) = S_{\rho,j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_j \mathbf{V}_j)}{\partial t} + \nabla \Pi_j = \rho_j(1 - \mu_j) \nabla \left(\frac{GM}{R} \right) + S_{V,j}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_j}{\partial t} + \nabla[\mathbf{V}_j(E_j + P_j)] = \rho_j(1 - \mu_j)\mathbf{V}_j\nabla\left(\frac{GM}{R}\right) + S_{E,j}, \quad (4)$$

где ρ_j, \mathbf{V}_j и P_j – это плотность, скорость и (скалярное) давление атомов ($j = n$) и протонов ($j = p$) течения, соответственно, $\Pi_{ik,j} = \rho_j V_i V_k + P_j \delta_{ik}$ – гидродинамический тензор натяжений, и $E_j = \frac{1}{2} \rho_j V_j^2 + \frac{P_j}{\gamma-1}$ – плотность энергии. В правых частях содержатся источниковые члены, обусловленные гравитацией и фотоионизацией от Солнца, и взаимной перезарядкой атомов и протонов:

$$S_{\rho,n} = -\beta_{phi} \rho_n + \frac{\rho_p^2 \alpha}{m_p},$$

$$S_{\rho,p} = \beta_{phi} \rho_n - \frac{\rho_p^2 \alpha}{m_p},$$

$$S_{V,n} = -\beta_{phi} \rho_n \mathbf{V}_n - v_{ce}^- \rho_n (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_p) + \frac{\rho_p^2 \alpha}{m_p},$$

$$S_{V,p} = \beta_{phi} \rho_n \mathbf{V}_n + v_{ce}^- \rho_n (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_p) - \frac{\rho_p^2 \alpha}{m_p},$$

$$S_{E,n} = -\beta_{phi} E_n + v_{ce}^- (E_p - E_n),$$

$$S_{E,p} = \beta_{phi} E_n - v_{ce}^+ (E_p - E_n).$$

Здесь скорости реакций перезарядки определяются согласно соотношениям: $v_{ce}^- = \sigma_{ce} \cdot v_{rel} \cdot n_p$, $v_{ce}^+ = \sigma_{ce} \cdot v_{rel} \cdot n_n$, $v_{rel} = \sqrt{3.76 \cdot 10^8 (T_p + T_n) + (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_p)^2}$ (в см/с), $\sigma_{ce} = [2.1 \cdot 10^{-7} - 9.2 \ln(v_{rel})]^2$ (в см²), n_p и n_n – концентрации протонов и атомов, соответственно. Коэффициент фоторекомбинации протонов с электронами, $\alpha = 4.0 \cdot 10^{-10} / T_p^{0.8}$ (в см³/с), причем предполагается, что $n_p \sim n_e$. Начальные и граничные условия выбраны следующим образом: течение изначально нейтрального водорода вокруг невозмущенной гелиосферы слева направо, причем в силу симметрии течения относительно оси, нижняя граница является "отражающей", а вытекание вещества происходит через верхнюю и правую границы. В нашей модели параметры среды внутри сжатой гелиосферы никак не влияют на поведение сверхзвукового течения вне гелиопаузы: при $n_n \sim n_H \sim 10^3$ см⁻³, граница гелиосферы порядка $r_{sh} \cong 1$ а.е. Итак, система (2-4) с вышеупомянутыми правыми частями, записанная в стандартной форме для атомов и ионов водорода, была решена компьютерной программой CLAWPACK по схеме

Годунова, отдельно для атомов и протонов, методом последовательных приближений: обычно две итерации были достаточны, чтобы относительная погрешность вектора невязки искомых функций не превышала бы 0.001.

Итак, согласно нашей газодинамической модели обтекания солнечным ветром межзвездных облаков, через которые проходит Солнце примерно каждые 30 млн лет (HI облака), и 300-400 млн лет (H₂ облака), гелиосфера сжимается до области планет-гигантов в первом случае, и вплоть до орбиты Земли – во втором, обеспечивая в последнем случае поток входящих в земную атмосферу атомов водорода порядка $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Рис. 12, 13). Таким образом, именно при прохождении Солнца через молекулярное облако с концентрацией молекулярного водорода $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, поток нейтральных атомов водорода облака, порядка $3 - 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, и проникает в земную атмосферу. Поступление нейтрального водорода в верхние слои атмосферы вызывает существенные изменения содержания важных климатообразующих газов. В частности, нейтральный водород вызывает уменьшение содержания атмосферного озона, от 2-4%, на высоте стратопазы (~50 км), вплоть до 50-80% у мезопаузы (~80 – 90 км) (Рис.14), с образованием глобального и постоянного слоя мезосферных ледяных "серебристых" облаков: согласно существующим климатическим моделям, этого достаточно для инициирования глобального оледенения.

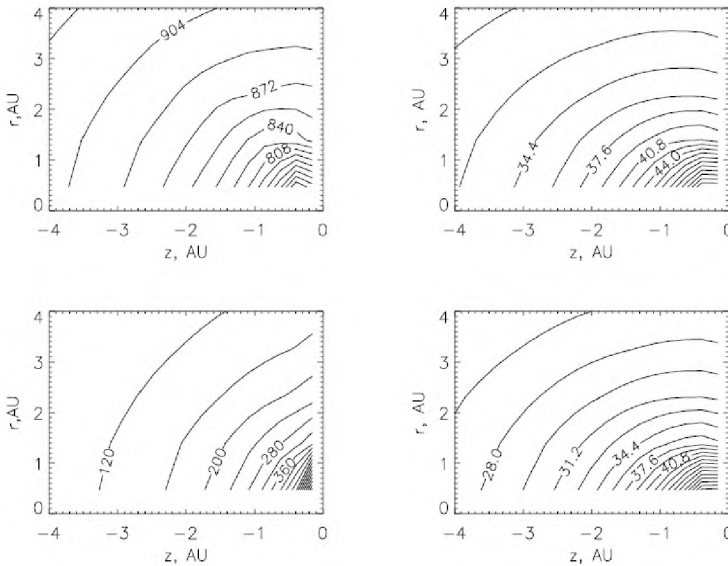


Рис. 12. Линии равной концентрации и осевых скоростей атомов (вверху) и протонов (внизу) течения, на плоскости (z, r) . Контурные значения концентраций

маркированы числами в см^{-3} (слева), а скоростей – в км/с (справа). Значения параметров: $n_i = 1000 \text{ см}^{-3}$, $V_i = 26 \text{ км/с}$, $T_i = 100 \text{ К}$, $\beta_0 = \beta_{phi}$, $\mu = 0.1$.

Итак, в **главах 4-7** показано, что дозы облучения, обусловленные рассмотренными источниками, достаточны для радиационно-химической трансформации простейших льдов, метана, метанола, аммиака, окиси и двуокиси углерода, или их смесей в матрице доминирующего водяного льда, в весьма сложные углеводороды и аминокислоты. Эти **главы (4-7)**, вместе с **главой 3**, содержат большую часть основных результатов работы (первые 2 "основных положений, вынесенных на защиту"), заключающиеся в том, что в условиях межзвездных молекулярных облаков сложные органические соединения, типа углеводородов и аминокислот, образуются в достаточном количестве, чтобы автоматически инкорпорироваться в область звездообразования и войти в состав комет. Согласно современной схеме образования Солнечной системы, этого достаточно, чтобы вся эта органика впоследствии была кометами же занесена на Землю.

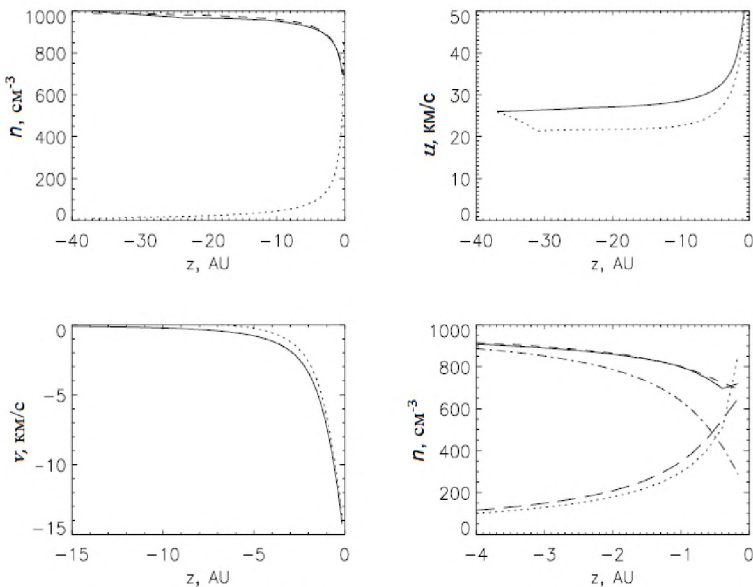


Рис. 13. Распределения концентраций n (вверху, слева), и осевых компонент скорости u (вверху, справа), атомов (сплошные кривые) и протонов (точечные кривые) течения, в зависимости от координаты z , при $r = 0$ (тангенциальная компонента скорости, v , показана при $r = 1$ а.е., внизу, слева). Разрешение вдоль оси z равно 0.2 а.е. Внизу, справа, сплошной и точечной кривыми (для атомов и протонов, $G \neq 0$), и кривыми "тире-точка" и "длинные тире" (для атомов и

протонов, $G = 0$), соответственно. Распределение плотности согласно "холодной кинетической" теории, с теми же параметрами, показано вверху, слева, и внизу, справа, кривой из "тире".

Остальные 6 основных результатов представляют собой, во-первых, уже упомянутую количественно рассчитанную газодинамическую модель обтекания веществом молекулярного облака (с которым, возможно, столкнулось Солнце), вокруг сжавшейся гелиосферы, с выводом о возможности аккреции Землей нейтрального водорода с потоком порядка $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Глава 8). Во-вторых, расчеты уменьшения озона в мезосфере атмосферы (на высоте 80 км, на 50-80%) при вышеотмеченном значении темпа проникновения водорода в атмосферу, с выводом о неизбежных климатических изменениях (Глава 9), и, наконец, в третьих, количественные расчеты облучения льдов Солнечной системы протонами солнечного ветра, с обсуждением вероятных последствий (Глава 10).

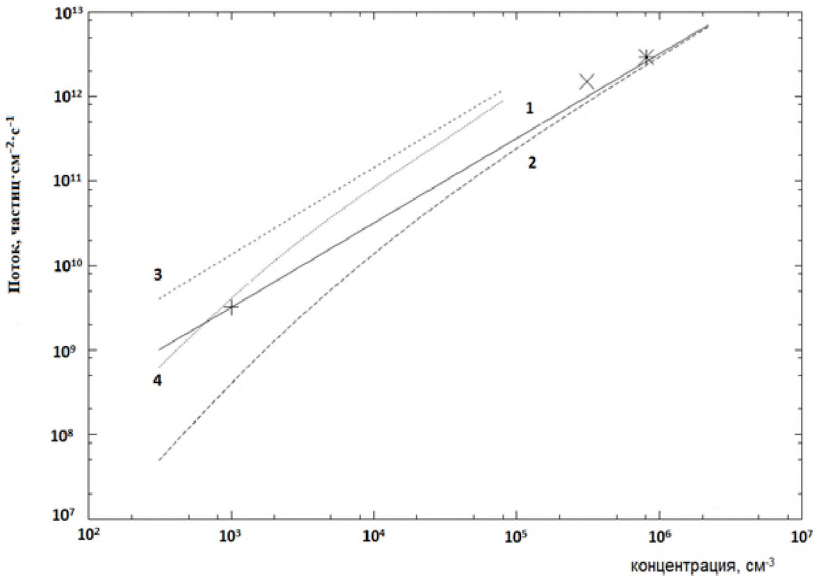


Рис. 14. Поток внеземного водорода у орбиты Земли, $\Phi(H)$, и нисходящего потока паров воды в мезосфере, $\Phi_{\text{down}}(H_2O)$, в зависимости от концентрации молекулярного облака. Кривыми "1" - $\Phi(H)$, и "2" - $\Phi_{\text{down}}(H_2O)$, показаны результаты наших расчетов, кривыми "3" - $\Phi(H)$, и "4" - $\Phi_{\text{down}}(H_2O)$, результаты, рассчитанные нами согласно одной модели из литературы. Критические значения потока $\Phi(H)$ из (9.3), соответствующие прохождению через облако с радиусами 10 пк и 5 пк, маркированы символами (*) и (x), соответственно. Символ (+) показывает значение концентрации нашей стандартной модели с $n \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$.

При расчетах облучения льдов были использованы значения потерь энергии протонов, вычисленные по формуле Бете-Блоха и модифицированной в компьютерной программе SRIM (Ziegler, J). При этом, дозы облучения 12 льдов-аналогов, рассчитанные при их взаимодействии с протонами солнечного ветра и с галактическими космическими лучами, на расстояниях 40 а.е. и 10000 а.е., показывают, что они достаточны для коренной радиационно-химической перестройки льдов поверхности, включая изменение их фотометрических характеристик. В Главе 11 обсуждается эволюция гелиосферы за время жизни Солнечной системы. Используя наблюдательные данные о звездных ветрах подобных Солнцу, но находящихся на разных этапах развития звезд, удалось вывести аналитические формулы, описывающие зависимости темпа потери массы и скорости истечения от времени, в частности, для темпа потери массы $\dot{M}_w = 4\pi r^2 n_w m_p V_w$,

$$\dot{M}_w = 236 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_n + \alpha_v},$$

(в единицах современного значения $\dot{M} = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ г/с} = 2.0 \cdot 10^{-14} M_\odot/\text{уг}$), где n_w и V_w относятся к области с радиусом r и где $\alpha_n = -2$, $\alpha_v = -0.5$, $\tau = 0.7 \text{ Гуг}$. Эволюционную зависимость интенсивности частиц ветра от времени $J_p = J_E(E)/E$ (с размерностью частиц/(см² · с · ср · ΔE), у орбиты Земли, получим в виде

$$J_p(E) = 1.39 \cdot 10^{13} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_n - \alpha_v} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ}}.$$

Изменение скорости облучения, например, водяного льда со временем (в единицах эВ · с⁻¹ · а.е. м.⁻¹), у орбиты Земли, получена в виде формулы:

$$D_r = \frac{0.12\pi J_p(E)S(E)E}{nM(n)} = 5.6 \cdot 10^{-7} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_n + \alpha_v} S(E).$$

Функция суммарных энергетических потерь многих льдов и их смесей, $S(E)$, известна, например, $S(0.8 \text{ кэВ}) = 19 \text{ кэВ}/\mu$ для водяного льда. При этом, $E \equiv E_p$ и определяется согласно $E_p = m_p \frac{V_w^2}{2} = 6310 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{2\alpha_v} \text{ эВ}$ (в современную эпоху средняя энергия протонов ветра порядка 0.8 кэВ). Графики приведенных функций показаны на Рис. 15. Далее, при рассмотрении некоторых явлений в гелиосфере, описан процесс диффузионного ускорения протонов на фронте ударной волны вплоть до энергий 100 МэВ и выше (процесс Ферми-1), и предложена формула интенсивности энергетических протонов в зависимости от параметров солнечного ветра. Эта формула позволяет получить для интенсивности ускоренных протонов при энергии 1 МэВ значение, согласующееся с прямыми наблюдениями зонда Вояджер-1 с точностью до множителя меньше 2. Формула применима ко всем звездам, звездные ветры которых формируют астросферы – области взаимодействия с окружающим межзвездным газом:

$$(1/4\pi)\varepsilon \dot{M}_* V_*^2 = \int_{E_1}^{E_2} J_E(E) dE \cdot A,$$

где скорость потери массы звездой, например, в случае Солнца, в ходе эволюции меняется в пределах $\dot{M}_* = 10^{-14} - 10^{-12} M_\odot/\text{уг}$, установившаяся скорость

течения, $V_* = 400 - 1100$ км/с, $F_E(E)dE = 4\pi J_E(E)dE$ – поток энергии частиц в интервале энергий dE , $J_E(E)$ – связанная с потоком интенсивность, $E_1 = 1$ МэВ, $E_2 = 100$ МэВ, и A – площадь характерной поверхности, совпадающая с поверхностью сферического ударного фронта, $A = 4\pi r_t^2$.

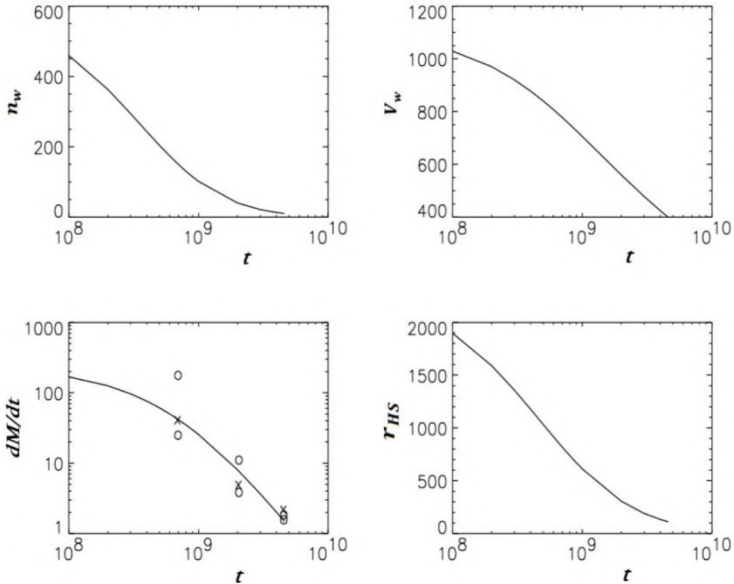


Рис. 15. Зависимости n_w (протон/см³), V_w (км/с), dM/dt (в единицах $\dot{M} = 2.0 \cdot 10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$) и радиуса гелиосферы r_{HS} (А.Е.) от времени t (лет) в истории Солнца. Внизу слева показаны верхние и нижние границы ("о") в эпохи 0.7, 2 и 4.6 Гур, определенные по наблюдениям выборки подобных Солнцу звезд разных возрастов. Теоретические значения для тех же эпох отмечены "х".

Полагая $J_E = J_E(E_1)(E_1/E)^\gamma$, где $\gamma = 2.3 - 2.7$ (теоретически возможны и большие значения, однако, например, для солнечного ветра согласно наблюдениям, $\gamma = 2.3$). При $E_1 = 1$ МэВ

$$J_p(E_1) = (1.9 - 3.7) \cdot \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-0.5} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ}}.$$

Из вышеприведенных значений параметров, получим при $t = 4.6$ Гур, $J_p(E_1) = (0.69 - 1.3)$ частиц/см² · с · ср · МэВ, с точностью до множителя 2 совпадающего с экспериментальным значением Вояджер-1 (Voyager-1). Во всех случаях, получены также аналитические формулы для доз облучения водяного льда, в зависимости от времени, необходимых для многих задач радиационной физики и химии льдов Солнечной системы. В **Главе 12** приводятся результаты анализа наблюдательных данных об эмиссии водяного льда в молодых планетарных туманностях.

Интересно, что вычисленная нами модель Cloudy для NGC 6302 предсказывает количество льда, совпадающее с наблюдаемым. Предсказывается доза облучения, способствующая за время молодой фазы развития образованию соединений, подобных полициклическим ароматическим углеводородам, и даже фуллеренов. В

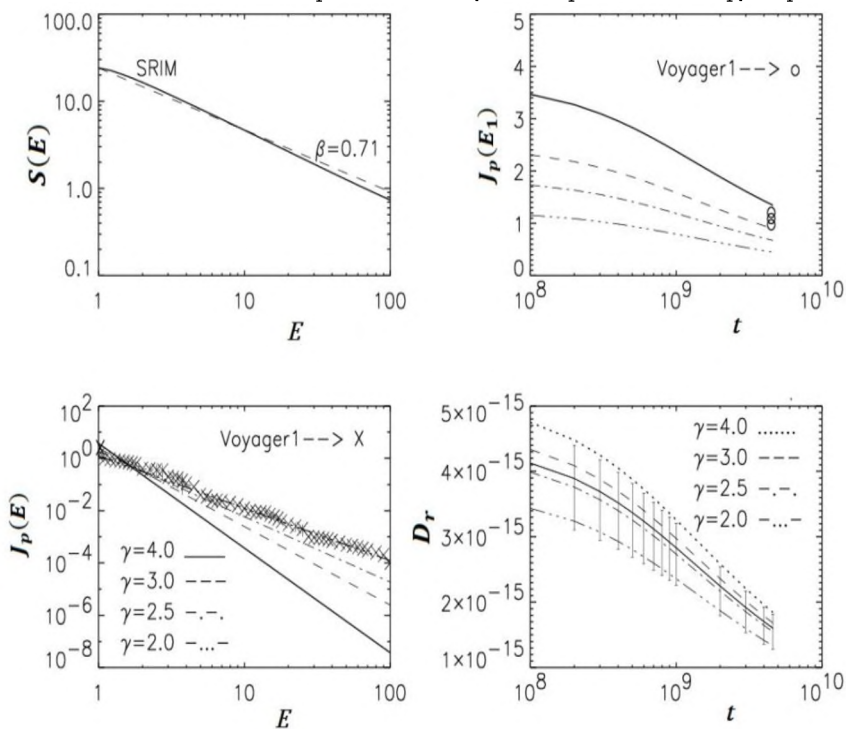


Рис. 16. Энергетические потери протонов в водяном льду $S(E)$ (кэВ/ μ) в зависимости от энергии E (МэВ), (SRIM, Ziegler, J.), в сравнении с аппроксимирующей функцией (вверху, слева). Зависимость дифференциальной интенсивности протонов при 1 МэВ у границы гелиосферы $J_p(E_1)$ (частиц \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$ \cdot ср $^{-1}$ \cdot МэВ $^{-1}$) от времени t (лет), показано также наблюдаемое современное значение (Voyager 1) (вверху справа). Показаны также энергетические спектры $J_p(E)$ (1-100 МэВ) в зависимости от γ (внизу, слева) и эволюционные изменения D_r (эВ \cdot с $^{-1}$ \cdot а.е.м. $^{-1}$) с указанием относительного отклонения от среднего в зависимости от γ (внизу, справа).

Главе 13 обсуждается возможность применения известной модели диффузионного ускорения частиц на фронте гелиосферной ударной волны (Ферми 1) в условиях планетарных туманностей и туманностей Вольф-Райе. Предсказанные потоки энергетических частиц в диапазоне 1-100 МэВ за характерное время жизни этих объектов в состоянии обусловить дозы облучения, достаточные для важных

радиационно-химических превращений, например, полициклических ароматических углеводородов и фуллеренов. В **Главе 14** приводятся результаты расчетов Cloudy содержания водяного льда, наблюдавшегося во многих активных галактиках, как с активными ядрами, так и с взрывным звездообразованием. Показано, что содержание льда, а именно, значение столбцовой плотности, зависит от значения потока космических лучей, и что повышение уровня потока влечет снижение содержания льда, что позволяет использовать наблюдения водяного льда для определения уровня активности галактики. В **Главе 15** обсуждается наличие полициклических ароматических углеводородов в галактиках Вольф-Райе. Показано, что доза облучения космическими лучами (энергичными частицами от звезд Вольф-Райе) полициклических ароматических углеводородов за время жизни этих звезд достаточна, в соответствии с лабораторными данными, для разрушения молекул (с потерей ароматических свойств). Но эти молекулы наблюдаются, стало быть имеется их перманентный источник со шкалой времени, задаваемой звездами Вольф-Райе. Скорее всего, таким источником являются как раз сверхновые II типа, конечного продукта этих звезд. В остатках этих сверхновых, возможно, и формируются эти молекулы, кстати, вполне наблюдаемые в остатках галактических сверхновых. В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Список работ автора, опубликованных по теме диссертации.

1. **Yeghikyan, A., Martirosyan, J. 2020**, On the survival of PAH molecules in WR galaxies, (16 pages), to be submitted to Journal of Astrophysics and Astronomy.
2. **Yeghikyan, A., Samsonyan, A. 2019**, Water Ice in AGN and starbursts, ComBAO, 66, 143-152.
3. **Yeghikyan, A., Martirosyan, J. 2018**, WR galaxies and PAH: observations and modeling, ComBAO, LXV, 2, 303-314.
4. **Yeghikyan, A. 2018a**, On the Possibility of Particle Acceleration in Shock Waves in WR Nebulae, Astrophysics, 61, 469-482 (Астрофизика 2018, 61, 523-539)
5. **Yeghikyan, A. 2018b**, Astrochemistry as the basics of Astrobiology: from simplest molecules to bioindicators on exoplanets surfaces, ComBAO, 65, p. 33-64.
6. **Yeghikyan, A. 2018c**, Anomalous cosmic ray fluxes in diffusive shock acceleration processes in the heliosphere and in planetary and WR-nebulae, Physics & Astronomy International Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 149-153.
7. **Yeghikyan, A. 2017a**, The Origin of Life from the Astrophysical Point of View, Lecture given for young astrophysicists in: The First Joint International Conference on Astrophysics for Young Scientists, St.Petersburg, p. 3-9.
8. **Yeghikyan, A. 2017b**, On dust irradiation in planetary nebulae in the context of survivability of ices, Molecular Astrophysics, Volume 8, p. 40-47.
9. **Yeghikyan, A. 2017c**, Evolution of Energetic Particle Fluxes in the Early Heliosphere, Astrophysics, Volume 60, Issue 3, pp.374-386 (Астрофизика, 60, 405-418).

10. **Yeghikyan, A. 2017d**, Ices Under Conditions of Planetary Nebulae, ASP Conf. Ser. 511, 98-106.
11. **Yeghikyan, A. 2016a**, Irradiation of ices inside molecular clouds in cosmic ray dominated regions of galaxies, Eds.: A. Mickaelian, et al. Yerevan, NAS RA, p. 162-169.
12. **Yeghikyan, A. 2016b**, On Survivability of Ices in Active Galaxies, ASP Conf. Ser. 505, 144-150.
13. **Yeghikyan, A. 2015**, Was the Universe always a convenient place for the origin of life? Eds.: H. Harutyunian, A. Mickaelian, S. Farmanyany. Yerevan, "Gitutyun" Publ. House, NAS RA, p. 72-82.
14. **Егикян, А., Барсамян, Л., 2013**. Об облучении льдов в молекулярных облаках. IV. Дозы, обусловленные аномальной компонентой космических лучей, *Астрофизика*, **56**, 481-492.
15. **Егикян, А., 2013**. К вопросу о радиусах астросфер, *Астрофизика*, **56**, 267-275.
16. **Егикян, А., 2013с**, Об облучении пыли в молекулярных облаках. III. Внутренние источники УФ фотонов от А, F, G карликов, *Астрофизика*, **56**, 155-166.
17. **Егикян, А., 2011**, *Астрофизика*, Об облучении пыли в молекулярных облаках. II. Дозы, обусловленные космическими лучами, **54**, 103-117.
18. **Yeghikyan, A., 2011b**. On the cosmic ray induced ionization rate in molecular clouds, *ISRN Astronomy & Astrophysics*, **1**, 1-10.
19. **Егикян, А., 2009**, *Астрофизика*, Об облучении пыли в молекулярных облаках. I. УФ дозы, **52**, 312-324.
20. **Yeghikyan, A. 2008**, Theoretical investigation of cosmic ray processing of solar system ices, *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **5**, 1 - 4.
21. **Yeghikyan, A., Fahr, H. 2006**. Accretion of interstellar material into the heliosphere and onto Earth, in: *Solar Journey: The Significance of our Galactic Environment for the Heliosphere and Earth*, P.Frisch (ed.), *Astrophysics and Space Science Library*, **338**, Ch.11, p.317-348, Kluwer AP.
22. **Yeghikyan, A., Fahr, H. 2004**. Terrestrial atmospheric effects induced by counter-streaming dense interstellar cloud material, *Astron. Astrophys.* **2004**, **425**, 1113-1118.
23. **Yeghikyan, A., Fahr, H. 2004**. Effects induced by the passage of the Sun through dense interstellar clouds. I. Flow outside of the compressed heliosphere, *Astron. Astrophys.* **415**, 763-770.
24. **Keheyan, Y., Cataldo, F., Yeghikyan, A. 2004**, Cosmic ray-induced polycondensate hydrocarbons in giant molecular clouds, *Astrophysics*, **47**, 422-431.
25. **Yeghikyan, A., Fahr, H. 2003**, Consequences of the Solar System passage through dense interstellar clouds, *Annales Geophysicae*, **21**, 1263-1273.
26. **Yeghikyan, A., 2003**, On accretion of hydrocarbon content of interstellar clouds by The Earth, L.M.Celnikier, J.Tran Thanh Van (eds.). *Frontiers of Life, Proc. 12emes Rencontres de Blois*, Gioi Publ., 59-63.
27. **Yeghikyan, A., Viti, S., Williams, D. 2001**, The formation of heavy hydrocarbons in molecular clouds, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **326**, 313-316.

28. Каграманов, Ю., Егикян, А. 2000, О генезисе нефти, Геология нефти и газа, No. 5, 53-60.
29. Егикян, А. 1999, Широкие линии поглощения в спектрах планетарных туманностей как индикаторы быстрых течений, Астрофизика, **42**, 519-530.
30. Егикян, А. 1997, О вариациях интенсивностей линий [O III] в спектре планетарной туманности IC 4997, Астроном. Журнал, **41**, 600-610.
31. Gurzadyan, G., Egikyan, A. 1991a, Excitation class of nebulae-an evolution criterion? *Astrophys. and Space Sci.*, **181**, 73-88.
32. Gurzadyan, G., Egikyan, A., Terzian, Y. 1991a, Planetary nebula with a peculiar spectrum in the UV: CN 3-1, *Astrophys. and Space Sci.*, **176**, 9-20.
33. Gurzadyan, G., Egikyan, A., Terzian, Y. 1991b, Planetary nebula with a neutral envelope? *Astrophys. and Space Sci.*, **175**, 191-206.
34. Gurzadyan, G., Egikyan, A. 1991b, Pseudoresonance absorption lines in planetary nebulae's spectra: discovery? *Astrophys. and Space Sci.*, **175**, 15-21.
35. Егикян, А. 1989а, Определение температур центральных звезд планетарных туманностей, Астрофизика, **30**, 270-281.
36. Егикян, А. 1989б, Атомные данные псевдорезонансных линий Al II и Si II: интерпретация коротковолнового спектра AU Mon., Астрофизика, **30**, 654-662.
37. Гурзadyan, Г., Егикян, А. 1988, Метод определения расстояния планетарной туманности посредством псевдорезонансных линий, ДАН СССР, **300**, 316-320.
38. Егикян, А. 1987, Псевдорезонансные линии Si III в спектрах планетарных туманностей, Астрофизика, **26**, 263-274.
39. Егикян, А. 1985, Вероятности переходов группы псевдорезонансных линий, Космические исследования, **23**, 794-797.
40. Егикян, А. 1984, Силы осцилляторов и вероятности переходов псевдорезонансных линий, Астрофизика, **20**, 341-350.

Примечание: Yeghikyan \equiv Egikyan (изменение в связи с заменой паспорта в 1996 г.)

TRANSFORMATIONS OF ATOMS AND MOLECULES IN INTERSTELLAR CLOUDS AND ORIGIN OF PRE-BIOMOLECULES

ABSTRACT

The dissertation is devoted to the analysis of the conditions for the origin of complex compounds such as amino acids and heavy hydrocarbons (the so-called pre-biomolecules) in interstellar molecular clouds. From this point of view, planetary nebulae and Wolf-Rayet nebulae were also considered, and fluxes of energetic particles in the range of 1-100 MeV and higher were calculated using the author's semi-analytical formula. The processes in the solar system, including the evolution of the heliosphere, and the chemistry of the earth's atmospheric ozone are also studied. The methods of analysis developed were used to solve some astrochemical problems of various objects,

including planetary nebulae and active galaxies. Interstellar cloud theoretical models were calculated using the Cloudy computer program, and some others as well, including those developed by the author. The following results are obtained in the dissertation.

1. The solution of a nonstationary problem of ice formation in the dust grains of contracting protostellar clouds (including 166 species reacting via more than 1779 photo-radio-chemical channels) has shown that the abundance of solid methane in the dust particles reaches to a final value of 10-20% (of water). Such a methane content is sufficient for irradiation with ultraviolet and cosmic rays radiation to lead to the formation of complex aliphatic and aromatic hydrocarbons with an abundance of 1-5% (of water), which is consistent with observations. According to the modern model of the Sun, Earth and comets formation, it follows from our data that on the surface of the Earth, before the formation of life, 3.8 ± 0.1 Gyr ago, mixtures of heavy aliphatic and aromatic hydrocarbons existed in significant quantities ($\geq 10^{15}$ g) which along with amino acids, should also be considered as pre-biomolecules.

2. In molecular clouds the ultraviolet radiation from internal sources (cosmic rays, etc.) is able to provide an irradiation dose of ice dust particles (containing H_2O , CO , NH_3 , CH_4 etc.) exceeding the threshold value of 25 eV/mol., sufficient to initiate radiation-chemical reactions with the formation of complex organic compounds (hydrocarbons, amino acids, etc.) during the lifetime of the clouds about 10-50 million years. In molecular clouds galactic cosmic rays with a flux in the range of 1 MeV and higher are able to provide a dose of ice dust particles in excess of the threshold value of 0.3 eV/a.m.u., sufficient to initiate radiation-chemical reactions with the formation of complex organic compounds, etc., during the lifetime of the clouds 10-50 million years. Stars of the main sequence of A, F, G classes, approximately every 70-200 thousand years pass through a typical molecular cloud and arrange the additional dose of ice irradiation with ultraviolet photons (originated via H_2 molecules) and the anomalous cosmic rays component coming from the astrospheric shocks.

3. According to our gas-dynamical model, the solar wind flows around the interstellar clouds through which the Sun passes approximately every 30 million years (HI clouds) and 300-400 million years (H_2 clouds), the heliosphere shrinks up to Earth's orbit - in the second case, providing a flux of neutral hydrogen atoms about $(3 - 4) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ entering the earth's atmosphere. For molecular clouds with a concentration of $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$, the flow of hydrogen atoms is of the order of $(3 - 4) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ penetrating the terrestrial atmosphere causes a decrease in atmospheric ozone content, up to 50-80% at the mesopause (~ 80 -90 km), with the formation of a global and constant layer of mesospheric icy noctilucent clouds: according to existing climate models, this is enough to initiate a global glaciation.

4. Radiation doses of 12 interstellar ice-analogues calculated during their irradiation by solar wind protons and galactic cosmic rays at distances of 40 AU and 10000 AU from the Sun, show that doses are sufficient for a radiation-chemical transformation of surface ices, including changes of their photometric characteristics. Proton fluxes were calculated, either belonging to the solar wind with energies of about 1 keV, or related to the anomalous component, accelerated at the heliospheric boundary

to energies of the order of 1-100 MeV, over the entire lifetime of the heliosphere. Analytical formulae of the irradiation doses of water ice at different stages of the evolution of the heliosphere are obtained, which are important for the analysis of radiation-chemical transformations of ices in the solar system.

5. A semi-analytical formula is proposed for calculating the flux of energetic protons in the range of about 1-100 MeV, depending on the fraction of the kinetic energy of stellar wind spent on particle acceleration at the shock front in the diffusive Fermi-1 model of particles acceleration. For solar wind standard parameters, the intensity predicted by the formula agrees well with the observed Voyager 1 value. Estimates of the flux in this energy range are especially important when calculating the doses of radiation of species. The fluxes of energetic protons in the range of about 1-100 MeV were calculated in the model of diffusive acceleration in the Fermi-1 process at the shock of a fast stellar wind interacting with slow wind matter of a nebula (planetary and WR). The calculated acceleration and diffusion times, and also the maximum energy correspond to the observed parameters of stellar winds, and the fluxes of energetic particles exceed the average galactic one by 5-7 orders of magnitude at the radius of the shock wave. The calculated radiation doses for the characteristic time of the objects can be used in evaluating the radiation-chemical transformations of PAH, HAC, and fullerenes observed in planetary and WR nebulae.

6. It is possible that H_2 ices exist under conditions beyond the photodissociation fronts of early, and, with some reservations, moderately developed planetary nebulae. This theoretical fact is confirmed by the observations of the young nebula NGC 6302, and the observed column density for H_2O ice is consistent with the calculated value on the base of known parameters of NGC6302. In a significant part of the nebula volume, the corpuscular (protons 1–10 MeV) doses exceed 20 eV/amu for graphite/fullerite systems and reach 2000 eV/amu. These estimates can be used in recent models of fullerene formation, for example, by HAC decomposition and/or PAH defragmentation.

7. A model of the formation of water ice under conditions of active galaxies is proposed. The ionization models of the region with narrow spectral lines were calculated in the standard scenario of an active galaxy, in which the observed column densities of water ice are agreed with calculated. It turned out that the theoretical values of the ice content strongly depend on the level of cosmic ray fluxes, and when the hydrogen ionization rate by cosmic rays exceeds $10^{-16} s^{-1}$ by 1-2 orders of magnitude, the ice features disappear in the spectrum. Thus, the presence of ice (observed column density) is a good quantitative indicator of the level of galactic activity. The question of the survival of PAH molecules under the conditions of WR galaxies was also considered. Molecules are subject to corpuscular radiation from shock waves of many WR stellar winds characteristic of such galaxies. The calculated radiation doses for the characteristic lifetime of these stars are usually larger than the laboratory threshold values of PAH molecular defragmentation. So it is concluded that the permanent source of dust (and PAH) different from the AGB stars existed in such galaxies. A possible source of dust under these conditions is probably supernova remnants.

8. A dynamical analytical model of the planetary nebula in the framework of the theory of mass loaded flows is proposed, in which the distribution of the density and expansion velocity of the nebula depends on the stellar wind parameters. Also the formation of fast flows and corresponding characteristic profiles of absorption spectral lines in the spectrum of nebulae are explained. An explanation is also proposed of the temporal changes of the intensities of the [OIII] lines in the spectrum of IC4997 based on a semi-analytical model.

ԱՏՈՄՆԵՐԻ ԵՎ ՄՈՒԵԿՈՒՆԵՐԻ ՓՈԽԱԿԵՐՊՈՒՄՆԵՐԸ ՄԻՋԱՍՏՂԱՅԻՆ ԱՄՊԵՐՈՒՄ ԵՎ ՆԱԽԱԿԵՆՍԱՄՈՒԵԿՈՒՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՑՈՒՄԸ

ԱՍՓՈՓՈՒՄ

Ատենախոսությունը նվիրված է բարդ միացությունների, ամինաթթուների և ծանր ածխաջրածինների (այսպես կոչվող նախակենսամոլեկուլների) առաջացման պայմաններին միջաստղային մոլեկուլային ամպերում: Դիտարկվել են նաև մոլորակաձև և WR միգամածությունները, ընդ որում եներգետիկ մասնիկների հոսքերը 1-100 ՄԷՎ դիսպագնում հաշվարկվել են հեղինակի առաջարկած կիսաանալիտիկ բանաձևով: Դիտարկվել են նաև երևույթներ արեգակնային համակարգում, մասնավորապես, հելիոլորտի էլյույուցիան, երկրային մթնոլորտի օզոնի քիմիան և այլն: Մշակված վերլուծության մեթոդները օգտագործվել են զանազան օբյեկտների որոշ աստղաքիմիական խնդիրներ լուծելու համար, այդ թվում նաև ակտիվ գալակտիկաների դեպքում: Միջաստղային ամպերի տեսական մոդելները հաշվարկվել են Cloudy համակարգչային ծրագրի օգնությամբ, հաշվարկների ժամանակ օգտագործվել են նաև մի շարք այլ ծրագրեր, այդ թվում նաև մշակված հեղինակի կոդմից: Աշխատանքի հիմնական արդյունքներն են.

1. Նախաստղային սեղմվող ամպերում փոշու հատիկներում սառույցների առաջացման ոչ սաացիոնար խնդրի լուծումը (1779 ֆոտոռադիացիոն-քիմիական փոխազդեցություններով 166 միացություններ) ցույց տվեց, որ մեթանի պարունակությունը հասնում է 10-20% ջրի արժեքից: Մեթանի դեպքում դա հերիք է, որպեսզի գերմանուշակագույն կամ տիեզերական մասնիկների ճառագայթման հետևանքով առաջանան բարդ ալիֆատիկ և արոմատիկ ածխաջրածիններ 1-5 % ջրի նկատմամբ, ինչը համընկնում է դիտողական տվյալների հետ: Համաձայն Արեգակի, Երկրի և գիսավորների առաջացման ժամանակակից տեսությանը, Երկրի մակերևույթի վրա կյանքի առաջացմանը 3.8 ± 0.1 մլրդ տարի առաջ նախորդել էր ծանր ալիֆատիկ և արոմատիկ ածխաջրածինների կուտակումը ($\geq 10^{15}$ գ), որոնց, ամինաթթուների հետ միասին, պետք է դիտարկել որպես նախակենսամոլեկուլներ:

2. Ներքին աղբյուրներով (տիեզերական մասնիկներ և այլն) պայմանավորված գերմանուշակագույն ճառագայթումը մոլեկուլային ամպերում ի վիճակի է պայտհովել սառույցների (H_2O, CO, NH_3, CH_4 և այլն) 25 էՎ/մոլ. ճառագայթահարման դոզայի շեմային այն արժեքի գերազանցմանը, որը հերիք է

բարդ օրգանական միացությունների (ածխաջրածինների, ամինաթթուների և այլն) առաջացմ: Այդ դոզան կուտակվելու է ամպերի 10-50 մկն տարիների կյանքի տևողության ընթացքում: Գալակտիկ տիեզերական մասնիկները (≥ 1 ՄէՎ) առկա հոսքով ի վիճակի են ապահովելու սառույցների 0.3 էՎ/ա.գ.մ. ճառագայթահարման դոզայի շեմային այն արժեքի գերազանցմանը, որը հերիք է բարդ օրգանական միացությունների (ածխաջրածինների, ամինաթթուների և այլն) առաջացմանը: Այդ դոզան կուտակվելու է ամպերի 10-50 մկն տարիների կյանքի տևողության ընթացքում: Գլխավոր հաջորդականության A,F,G դասի աստղերը ամեն 70-200 հազար տարիների ընթացքում անցնում են սովորական մոլեկուլային ամպերով, լրացնելով գերմանուշակագույն ֆոտոններով և տիեզերական մասնիկների ոչ սովորական բաղադրամասով պայմանավորված ճառագայթահարման դոզան:

3. Ամեն մի 30 մկն տարին մեկ Արեգակը անցնում է միջաստղային HI ամպերով և 300-400 մկն տարին մեկ H_2 ամպերով: Համաձայն միջաստղային ամպերի հետ արեգակնային քամու փոխազդելու մեր զազադինամիկական մոդելի հելիոլորտը սեղմվում մինչև Երկրի ուղեծիրը – երկրորդ դեպքում: Երկրի ուղեծրի մոտ միջաստղային ամպի կույթը ապահովում է ջրածնի չեզոք ատոմների ներհոսք Երկրի մթնոլորտ մոտ $3 - 4 \cdot 10^9$ սմ⁻²վ⁻¹ արժեքով $\sim 10^3$ սմ⁻³ կոնցենտրացիա ունեցող ամպով անցնելիս: Այդ դեպքում մթնոլորտային օզոնի բաղադրությունը պակասում է 50-80 % $\sim 80 - 90$ կմ բարձրության վրա: Դա բերում է մշտական և համատարած սառցե միջնոլորտային «արծաթափայլ» ամպերի շերտի առաջացմանը, որը, իր հերթին, բերում է համատարած սառցակալմանը:

4. Արեգակնային քամու պրոտոնների և տիեզերական զալակտիկական մասնիկների 12 սառույցների ճառագայթահարման դոզաները 40 ա.մ. և 10000 ա.մ. հեռավորության վրա ցույց են տալիս, որ դրանք բավական են սառույցների ճառագայթային-քիմիական վերակառուցման համար, ընդհուպ լուսաչափական բնութագրերի փոփոխությանը: Հաշվարկված են արեգակնային քամու և տիեզերական մասնիկների ոչ սովորական բաղադրամասի պրոտոնների հոսքերի էվոյուցիոն փոփոխությունները հելիոլորտի կյանքի տևողության ընթացքում: Քամու պրոտոնների էներգիան մոտ 1 կէՎ, մինչդեռ ոչ սովորական բաղադրամասի պրոտոնները պայմանավորված են հելիոլորտի սահմանին արագացման պրոցեսներին, մոտ 1-100 ՄէՎ դիսպագնում: Ստացված են ջրի սառույցի ճառագայթահարման արագության անալիտիկ բանաձևեր հելիոլորտի էվոյուցիայի տարբեր փուլերում, որոնք կարևոր են Արեգակնային համակարգի սառույցների ճառագայթային քիմիական վերակառուցման համար:

5. Մոտ 1-100 ՄէՎ դիսպագնում էներգետիկ պրոտոնների հոսքը հաշվարկելու համար կիսասանալիտիկ բանաձև է առաջարկված, որտեղ աստղային քամու կինետիկ էներգիայի մասնաբաժինը ծախսվում է մասնիկների արագացման վրա: Արագացումը նկարագրվում է հարվածի ալիքի ֆրոնտում Ֆերմի-1 արագացման դիֆուզիոն մոդելի շրջանակներում: Արեգակնային քամու պարամետրերի համար արագացված մասնիկների ինտենսիվության արժեքը

հավասար է Վոյաջեր-1 դիտողական տվյալին: Նաև հաշվարկված են էներգետիկ մասնիկների հոսքերը 1-100 ՄէՎ դիսպագնում Ֆերմի-1 դիֆֆուզիոն արագացման պրոցեսում արագ աստղային քամու հարվածի ալիքի ֆրոնտում, որը առաջանում է մոլորակաձև և WR միգամածությունների դանդաղ ընթացող նյութի հետ փոխազդեցության ժամանակ: Հաշվարկված արագացման և դիֆուզիայի ժամանակները, ինչպես նաև առավելագույն հնարավոր էներգիայի արժեքը համապատասխանում են աստղային քամիների դիտվող պարամետրերի արժեքներին, իսկ էներգետիկ մասնիկների հոսքերը գերազանցում են միջին գալակտիկականը 5-7 կարգով հարվածի ալիքի ճակատի շրջակայքում: Հաշվարկված ճառագայթահարման դոզաների արժեքները այդ օբյեկտների կյանքի ընթացքում կարելի է օգտագործել այդ օբյեկտներում դիտվող PAH, HAC և ֆուլերենների ճառագայթային քիմիական փոխակերպումները հասկանալու համար:

6. Յույց է տրված երիտասարդ, և որոշ վերապահումներ, միջին զարգացած մոլորակաձև միգամածություններում հնարավոր է H_2O սառույցների գոյությունը ֆոտոդիսոցիացիոն սահմանից դեպի դուրս: Նման տեսական փաստը հաստատվում է երիտասարդ մոլորակաձև միգամածության NGC6302 ինֆրակարմիր դիտումներով, ընդ որում, H_2O -ի սառույցի պունյակային խտությունը համընկնում է տեսականի հետ, որը հաշվարկված է NGC6302 հայտնի պարամետրերի արժեքների դեպում: NGC6302 միգամածության ծավալի զգալի մասում կորպուսկուլյար (1-10 ՄէՎ պրոտոնները) դոզաները գերազանցում են 20 էՎ/գ.ա.մ. գրաֆիտ/ֆուլլերիտ համակարգերի համար, ընդհուպ 2000 էՎ/գ.ա.մ. արժեքը: Այդ գնահատականները կարելի է օգտագործել ֆուլերենների առաջացման ժամանակակից մոդելների հստակեցնելու նպատակով, օրինակ, HAC և/կամ PAH-րի քայքայման միջոցով:

7. Հաշվարկված է սառցե ջրի առաջացման մոդել ակտիվ գալակտիկաներում: Ակտիվ գալակտիկաների ստանդարտ սցենարի շրջանակներում հաշվարկված են նեղ սպեկտրալ գծերով տիրույթների իոնիզացիոն մոդելները, որոնց արդյունքում ստացվում են սառցե ջրի դիտվող պունյակային խտությունները: Պարզվում է, որ սառույցի պարունակությունը խիստ կախված է տիեզերական մասնիկների հոսքի արժեքից, և ջրածինը իոնացնելու արագությունը 10^{-16} վ⁻¹ արժեքը 1-2 կարգով գերազանցելու դեպքում սառույցի պարունակությունը նվազում է ավելի քան 2-3 կարգով և սառույցի համապատասխան շերտերը վերանում են սպեկտրից: Այսպիսով, սառույցի առկայությունը (դիտվող պունյակային խտությունը) լավ ցուցանիշ է գալակտիկայի ցածր ակտիվության համար: Քննարկվել է նաև PAH մոլեկուլների գոյատևումը WR գալակտիկաներում: Մոլեկուլները գտնվում են կորպուսկուլյար ճառագայթման ազդեցության տակ, որի աղբյուրն են նման գալակտիկաներին բնորոշ բազմաթիվ WR աստղային քամիների հարվածի ալիքները: Հաշվարկված ճառագայթահարման դոզաները այդ աստղերի կյանքի տևողություն ընթացքում գերազանցում են PAH մոլեկուլների քայքայման լաբորատոր շեմային արժեքները, որտեղից հետևում է փոշու (և PAH) անընդհատ գործող աղբյուրի

գոյությունը, որը, տարբերվելով այդ աստղերից (այդ թվում նաև AGB աստղերից), կարող է նպաստել փոշու (և PAH-ի) առաջացմանը այդ WR աստղերի պայթյունից հետո, գերնոբերի թաղանթներում:

8. Մոլորակաձև միգամածության դինամիկ անալիտիկ մոդելը ձևակերպված է բեռնվող զանգվածով հոսանքի տեսության շրջանակներում, որտեղ խտության և լայնացման արագության բաշխվածությունը կախված է աստղային քամու պարամետրերից, և բացատրվում են արագ հոսանքների առաջացումը և համապատասխան կլանման սպեկտրալ գծերի պրոֆիլները: Նաև առաջարկվում է [OIII] գծերի ժամանակային փոփոխությունները IC4997 միգամածության սպեկտրում կիսասանալիտիկ մոդելի հիման վրա: