

## ОБ ОБЛУЧЕНИИ ПЫЛИ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКАХ. III. ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ ЗВЕЗДНЫХ УФ ФОТОНОВ ОТ A-F-G КАРЛИКОВ

А.Г.ЕГИКЯН

Поступила 14 сентября 2012

Принята к печати 5 декабря 2012

Рассчитаны потоки излучения внутри межзвездных газопылевых молекулярных облаков, обусловленные проходящими через облака звездами классов А, F и G. Показано, что излучение в диапазоне  $912 < \lambda < 2067 \text{ \AA}$  проникает достаточно глубоко, чтобы за время пересечения облаков обусловить дозы облучения, достаточные для инициирования химических реакций в ледяных оболочках пылинок. Обсуждается возможность использования этих результатов для астрофизической интерпретации опубликованных данных лабораторных экспериментов по облучению смесей льдов типа  $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{OH}:\text{NH}_3:\text{CO}$ . Формирующиеся в результате радиационно-химической трансформации сложные углерод-содержащие вещества, возможно, играют важную роль в предбиологической эволюции пылевой компоненты молекулярных облаков.

**Ключевые слова:** *молекулярные облака: поле излучения: льды: дозы облучения*

1. *Введение.* Для образования многих сложных химических соединений в межзвездных молекулярных облаках, как в газовой, так и в твердой фазах, необходимы источники энергии, роль которых обычно играют ультрафиолетовые (УФ) фотоны и космические лучи, иницилирующие соответствующие химические реакции. Вклад поля излучения внешних звезд класса А, равно как и межзвездного изотропного УФ-излучения в дозу облучения, необходимый для образования достаточно сложных соединений, изучался в работе [1], а участие энергетических протонов и альфа-частиц космических лучей - в [2]. Поскольку УФ-излучение от внешних звезд проникает во внутренние области облаков только в диапазоне 6-13 эВ, именно их вклад и оценивался в [1], тогда как звездные фотоны больших энергий эффективно поглощаются во внешней оболочке облака. С другой стороны, такие фотоны имеют возможность добраться до внутренних областей облаков в случае прохождения звезды через облако. В работе [3] исследовалась возможность прохождения Солнца через межзвездные облака на основе данных о распределении облаков по размерам и скоростям в диске Галактики, и было показано, что за все время существования Солнце сталкивалось с плотными молекулярными облаками не менее 10 раз, и не менее 100 раз - с диффузными нейтральными

облаками. Очевидно, что качественно 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, содержащего облака с радиусами  $R$ , можно оценить по следующей формуле [4]

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

полагая, для простоты, все параметры постоянными. Пример более рафинированного анализа, относящегося к столкновениям Солнца с межзвездными облаками с известными распределениями по размерам и скоростям, дан, как уже указывалось, в [3], а для наших оценок достаточно ограничиться средними значениями радиусов и относительных скоростей. Величину  $q$  для А, F и G-классов (пространственная плотность которых не так мала, как у О, В-звезд, а УФ-светимость достаточно высока по сравнению с более многочисленными представителями К и М-классов) оценим из следующих соображений: в галактическом диске с радиусом 15 кпк и толщиной 2 кпк имеется 200-400 млрд звезд, из которых 6.5% относятся к классу G, 3% - F и 0.5% - A [5], тогда  $q = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ пк}^{-3}$ , что совпадает с наблюдательными данными по функции светимости в галактической плоскости [6]. Если учесть, что столкновения звезд с межзвездными облаками диска наиболее вероятны на расстояниях не более 100 пк от центральной галактической плоскости, то следует использовать в 10 раз меньшую оценку:  $q = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ пк}^{-3}$ . Полагая средний размер облаков порядка 10 пк, и среднюю относительную скорость порядка 10 км/с, получим  $t_f = 220000$  лет. Указанные значения средних для галактических туманностей могут отклоняться в ту или иную сторону, с соответствующим изменением величины  $t_f$ , не более десяти раз. Однако очевидно, что за время жизни порядка 10 млн лет (что является минимальным значением, [1] и ссылки там) каждая туманность испытает, по крайней мере, одно столкновение со звездой классов А, F и G. Таким образом, задача определения поля УФ-излучения звезды, проходящей через туманность, представляет определенный интерес с точки зрения облучения пылинок облака во внутренних областях, защищенных от внешнего излучения. Методика расчета поля излучения внутри облака, обусловленного проходящей звездой, обсуждается в разделе 2, результаты расчета доз облучения водяного льда пылинок облаков приводятся в разделе 3, заключение - в разделе 4.

*2. Поле излучения в окрестности звезды, движущейся сквозь туманность.* При относительной скорости звезды и туманности порядка 10 км/с размер динамической  $\text{H}^+$  области (то есть области, в пределах которой скорость фотоионизации атомов водорода уравнивается

скоростью их притока в эту область) для Солнца составляет порядка 1 а.е. [7]. Расстояния такого порядка звезда, подобная Солнцу, пройдет за время меньше 1 года, в то время как характерное время установления стационарности определяется временем рекомбинации, превышающей в данном случае (при концентрации облака  $n_e = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) 30 лет [7]. Таким образом, суммарное поле излучения, генерируемое звездой в туманности, можно считать установившимся на расстояниях от звезды порядка и более 100 а.е., где уже применима стационарная модель. Впрочем, как уже было указано во *Введении*, в данной задаче нас интересует поле излучения на намного больших расстояниях, чтобы оценить насколько далеко от звезды может проникнуть УФ-излучение. Использованная при расчетах модель и соответствующая компьютерная программа Cloudy (версия 10.00, [www.nublado.org](http://www.nublado.org), 2010) [8], начиная с версии 08.00 (2008) позволяет, в принципе, производить расчеты при нестационарном поле излучения. Тем не менее, при расчетах был использован стационарный режим, позволяющий рассчитать не зависящее от времени поле излучения, тем более, что в этих условиях гелиосфера сжимается как раз до размеров порядка 1 а.е. [4,7], а корректно описать ее (гелиосферу) посредством Cloudy пока невозможно. С точки зрения поставленной задачи более важно, что начиная с версии 08.00 (2008), Cloudy позволяет учитывать адвективные члены в уравнениях ионизационного и теплового баланса, позволяя рассчитать поле излучения вполне самосогласованным способом.

Итак, для данной (одномерной) модели облака рассчитывалась интенсивность поля излучения, обусловленная звездой, проходящей со скоростью  $V_e = 10 \text{ км/с}$  через туманность с концентрацией  $n_e = 10^3 \text{ см}^{-3}$ , в зависимости от радиуса туманности. В табл.1 приведены параметры конкретных моделей, рассчитанных в данной работе. В качестве источников излучения были выбраны звезды Главной последовательности с чернотельным излучением, соответствующим эффективным температурам в диапазоне  $T = 6000 - 10000 \text{ К}$  и с радиусами  $R$  и светимостями  $L$  [9], указанными в табл.1. Указаны также размеры астросфер  $R_p$  в астрономических единицах (а.е.), совпадающие, очевидно, с внутренней границей облака, и число зон по радиусу, на которые

Таблица 1

## ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗД, ДЛЯ КОТОРЫХ ПРОВОДИЛИСЬ РАСЧЕТЫ

Класс звезды	$T$ , К	$R$ , $R_\odot = 1$	$L$ , $L_\odot = 1$	$R_p$ , а.е.	Число зон
G2V	5780	1	1	1.0	670
F2V	7000	1.2	3.0	1.3	732
A7V	8000	1.5	8.2	1.7	763
A2V	9000	2.0	23	2.1	800
A1V	9500	2.3	39	2.7	815
A0V	10000	3.0	80	3.5	846

разбивалось облако при расчетах. В режиме расчета динамической модели облака, возбуждаемого звездой класса А, F или G, проходящей через нее с относительной скоростью 10 км/с, самосогласовано с переносом излучения в континууме и наиболее важных резонансных линий, вычислялась тепловая и ионизационная структура облака с заданным химическим составом, который был принят идентичным обычно наблюдаемому в молекулярных облаках. Учитывались первые 30 элементов периодической системы со всеми ионами и более чем 20 наиболее распространенных молекул. Задавалось содержание пыли, ее состав и распределение по размерам, типичным для молекулярных облаков. В кинетических уравнениях баланса учитываются практически все важные элементарные процессы взаимодействий атомов, ионов, молекул и пылинок с излучением, и между собой, причем Cloudy использует наиболее современные значения кинетических коэффициентов. Скорость ионизации  $H_2$  протонами космических лучей в программе задается в качестве свободного параметра и была принята равной  $3 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ . Способ самосогласованного расчета скорости ионизации молекулярного водорода межзвездных облаков космическими лучами указан в работе [10]. Отметим, что увеличение (уменьшение) значения скорости ионизации  $H_2$  протонами до 10 раз не сказывалось на результатах расчетов Cloudy.

Следует отметить, что границы астросфер (аналогов гелиосфер) характеризуют расстояние от звезды до области туманности, где уравновешиваются динамические давления сверхзвукового звездного ветра и набегающего (также со сверхзвуковой скоростью  $V_w$ ) газа туманности. Динамическое давление установившегося звездного ветра определяется темпом потери массы звезд,  $\dot{M}_w$ , и скоростью истечения  $V_w$ , поэтому границу астросферы в первом приближении можно оценить по формуле [7]:

$$R_l = \sqrt{\frac{\dot{M}_w \cdot V_w}{4\pi n_c m_p V_c^2}},$$

где  $m_p$  - масса протона.

Можно показать, что темп потери массы звезд промежуточных и поздних классов Главной последовательности определяется, главным образом, скоростью вращения, причем эта зависимость хорошо совпадает с эмпирической, выявленной по рентгеновским наблюдениям [11], поэтому, полагая, что для этих классов звезд скорость установившегося истечения меняется также, как и параболическая, границы астросфер были оценены по вышеприведенной формуле.

Результаты расчетов модели туманности с проходящей через нее звездой, приведены на рис.1-3. Спектральные характеристики излучения, падающего на облако от звезды и изменяющегося вдоль его радиуса, указаны на рис.1 (на примере звезды с эффективной температурой и светимостью Солнца). Чтобы не загромождать рисунок, указаны характеристики поля излучения

на границах, соответственно, ближайшей и наиболее удаленной от звезды зон. Приведены прямые результаты расчетов CLOUDY, величины  $4\pi\nu J_\nu$  (в единицах  $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ,  $J_\nu$  - интенсивность излучения в  $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Ср}^{-1} \text{Гц}^{-1}$ ,  $\nu$  - частота излучения) в зависимости от энергии фотонов, выраженных в ридбергах ( $1\text{Ry} = 13.6 \text{эВ}$ ), для звездного излучения на внутренней и внешней

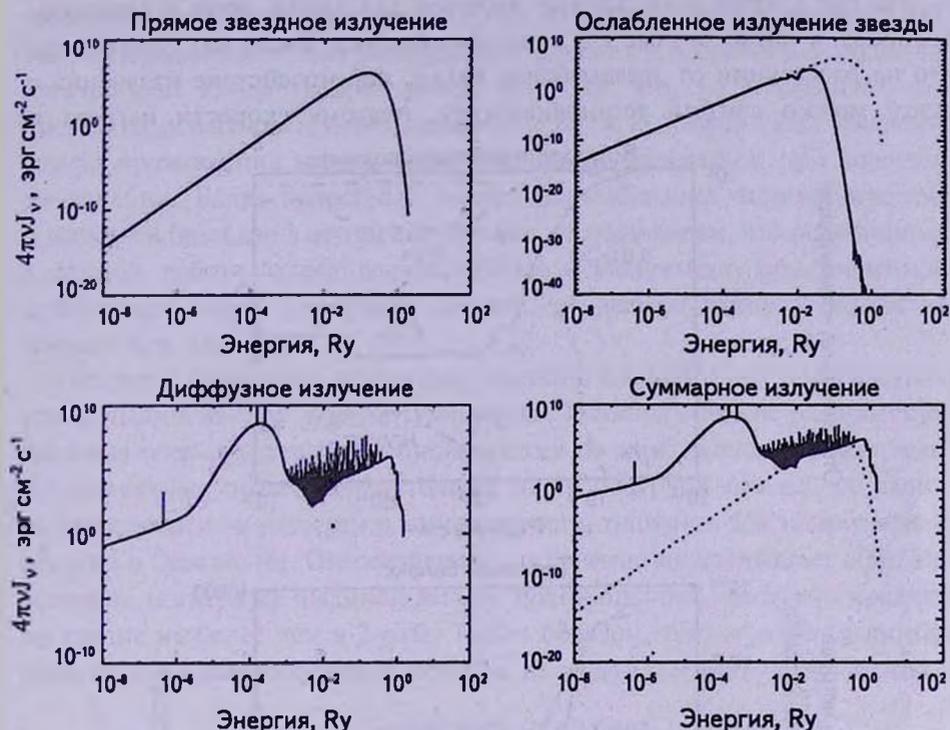


Рис.1. Спектральные характеристики поля излучения звезды класса G2V и солнечной светимости, проходящей через туманность с однородной концентрацией  $n_e = 10^5 \text{см}^{-3}$  со скоростью 10 км/с. Показаны прямое звездное излучение на внутренней и внешней границах облака (вверху), диффузное излучение самого облака (внизу, слева) и сумма диффузного и ослабленного, пересчитанного к внутренней границе для сравнения с прямым звездным (внизу, справа, прерывистая кривая).

границах облака, для генерируемого облаком диффузного излучения, и суммы всех указанных, на внешней границе облака (для сравнения, прямое звездное излучение на внутренней границе указано с суммарным, также перерассчитанным к внутренней границе). Химический состав облака был принят равным обычному среднему для молекулярных облаков [8], внешняя граница устанавливалась на расстоянии, соответствующем значению плотности по лучу зрения, равной  $10^{23} \text{см}^{-2}$ .

Как и следовало ожидать, диффузное излучение облака в диапазоне длин волн, соответствующим энергиям меньше 1 Ry, превалирует над прямым звездным, вследствие переработки коротковолнового излучения

звезды. Ниже будет показано, что именно благодаря этому обстоятельству, внутри плотного молекулярного облака и появляются фотоны с энергиями в диапазоне 6-13.6 эВ, с интенсивностью, достаточной, чтобы обусловить дозу УФ-облучения пылинок облака, необходимой для инициирования важных радиационно-химических превращений в ледяных мантиях этих пылинок.

На рис.2 приведены данные расчетов для атома, иона и молекулы водорода, а также данные для теплового баланса. Выше уже отмечалось, что на расстоянии от звезды более 100 а.е. взаимодействие излучения с газом можно считать установившимся, поэтому скорости нагрева и

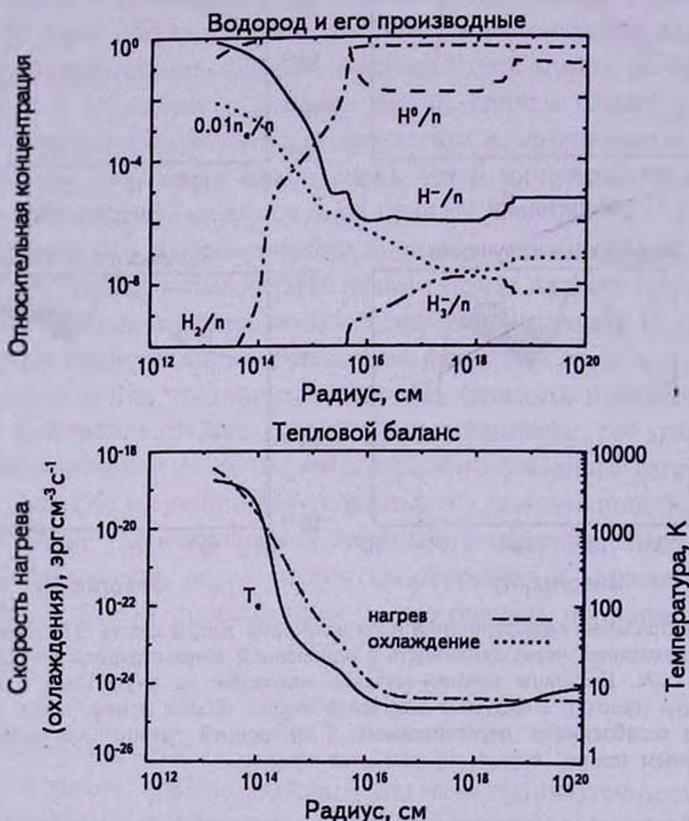


Рис.2. Концентрации электронов (заниженные в 100 раз), тепловых протонов, атомов и молекул водорода в зависимости от радиуса туманности (сверху), через которую проходит звезда с характеристиками, указанными на рис.1. Снизу указаны данные по тепловому балансу и радиальная зависимость электронной температуры.

охлаждения должны быть в точности равны друг другу, обуславливая равновесную электронную температуру порядка обычно наблюдаемой (несколько десятков К и менее).

Следует отметить, что плотность по лучу зрения молекулярного иона  $H_3^+$  по данным рис.2 получается порядка  $1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  (при радиусе облака

порядка 30 пк), в то время как, согласно наблюдениям, среднее по разным направлениям значение этой величины порядка  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  [12]. Однако при радиусе порядка 10 пк теория и наблюдения, очевидно, совпадают. С другой стороны, существуют облака, для которых из наблюдений известны значения локальных относительных концентраций, порядка  $10^{-9}$ , в то время как рассчитанное выше значение (рис.2) почти на порядок превышает ее [12-14]. На 1-2 порядка превышает наблюдаемые значения и рассчитанное значение электронной концентрации (рис.2) [13]. Так что, не исключено, что посредством наблюдательных данных по  $\text{H}_3^+$  и  $n_e$  можно будет выявлять случаи прохождения звезды через туманность, разумеется, при хорошем разрешении. Более подробный анализ разнообразных астрохимических показателей будет дан в другой статье. Здесь же подчеркнем, что поставленная в данной работе задача расчета УФ-дозы облучения, обусловленной проходящей через туманность звездой, от выбора радиуса облака не зависит (см. также рис.5).

На рис.3 приведены результаты расчетов CLOUDY по температурам газа и пыли в данной модели туманности. Указаны средние равновесные значения температур пылевой составляющей по двум группам "графитовых" и "силикатных" пылинок, состоящих из 10 подгрупп каждая, со своим распределением по размерам и концентрациям, типичных для молекулярных облаков в Орионе [8]. Относительное отклонение не превышает 50%, т.е. значения температур пылинок данной подгруппы отличаются от средней по группе не более чем в 2 раза. Таким образом, температура пылинок, характерных для молекулярных облаков, не превышает нескольких десятков

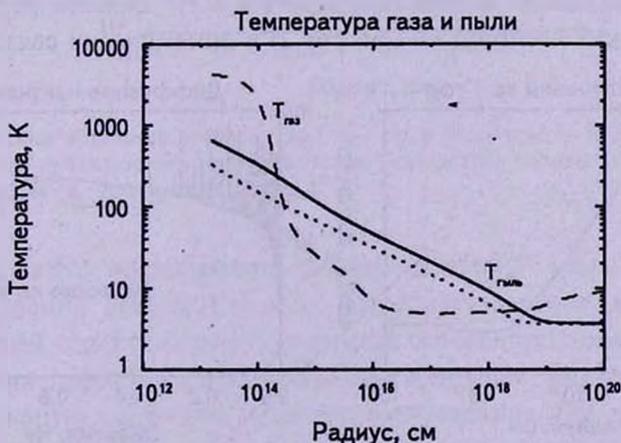


Рис.3. Температуры газа и пыли в зависимости от радиуса туманности, через которую проходит звезда с характеристиками, указанными на рис.1. Указаны средние равновесные значения температур пылевой составляющей по двум группам (состоящих из 10 подгрупп каждая, со своим распределением по размерам и концентрациям) "графитовых" и "силикатных" пылинок, типичных для молекулярных облаков в Орионе [8]: сплошная линия - средняя по "графитовым", точки - по "силикатным". Прерывистая линия указывает температуру газа.

градусов при расстоянии от звезды, больше (в данной модели)  $10^{16}$  см (что соответствует столбцовой плотности более  $10^{19}$  см $^{-2}$ ). Ясно, что при таких температурах ледяные мантии пылинок не испарятся и подвергнутся облучению УФ-излучением звезды.

3. *Дозы облучения льдов внутри облаков: результаты и обсуждение.* Количество поглощенной льдинкой энергии излучения за единицу времени и на атомную единицу массы (а.е.м.) можно рассчитать по формуле

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4\pi}{M} \int_{\nu_1}^{\nu_2} J_{\nu} \sigma_{\nu} d\nu,$$

где  $J_{\nu}$  - интенсивность излучения,  $M$  - молекулярный вес, а  $\sigma_{\nu}$  - сечение поглощения вещества льдинки в диапазоне  $\nu_1 - \nu_2$ . Зависимость сечения поглощения водяного льда ( $M=18$ ) от длины волны в диапазоне 1100-1800 Å приведена в работе [1], и ссылки там.

Количество поглощенной льдинкой энергии  $D$  за время  $t$  (доза), при постоянстве источника излучения, очевидно равно:  $D = (dD/dt) \cdot t$ .

На рис.4 приведены результаты расчетов дозы облучения водяного льда за 1 год в диапазоне 6 - 13.6 эВ излучением звезды класса G2V (см. табл.1), проходящей через однородное молекулярное облако с концентрацией  $n_c = 10^3$  см $^{-3}$ . Как видно из рис.4, во всем диапазоне размеров, 1 - 30 пк, характерных для молекулярных облаков и их комплексов, доза облучения за 1 год порядка 100 эВ. Ясно, что этот результат относится ко всем туманностям (т.е., не зависит от их размеров), поскольку диффузное излучение в диапазоне 6 - 13.6 эВ генерируется в  $H^+$  области размерами не более нескольких десятков а.е (см. рис.2) и динамически связанной с

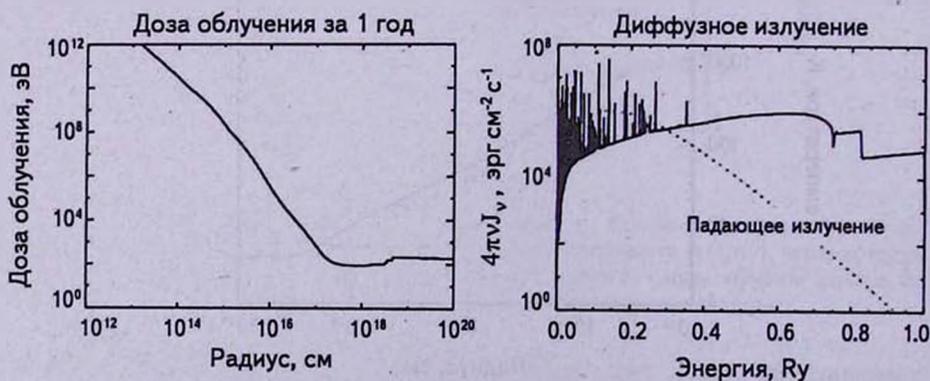


Рис.4. Доза облучения водяного льда за 1 год в диапазоне 6 - 13.6 эВ, в зависимости от радиуса туманности, через которую проходит звезда с характеристиками, указанными на рис.1 (слева). Показана также спектральная характеристика суммарного поля излучения звезды в рассматриваемом диапазоне (сплошная кривая, справа), пересчитанная к внутренней границе для сравнения с прямым звездным излучением, падающим на внутреннюю границу туманности ("астросферу") - прерывистая кривая.

движущейся звездой. Время прохождения звездой туманности, с радиусом, скажем, порядка 1 пк, в данном случае относительной скорости порядка 10 км/с, не менее  $10^5$  лет, что обусловит суммарную дозу не менее  $10^7$  эВ.

Результаты расчетов для звезд-карликов других классов, более ранних, чем Солнце (A и F), приведены на рис.5. Температуры и светимости этих звезд указаны в табл.1: они относятся к звездам Главной последовательности от G2 до A0.

По данным рис.5, тот же результат верен и для всех рассмотренных классов звезд: во всем диапазоне размеров, 1 - 30 пк, характерных для молекулярных облаков и их комплексов, доза облучения за 1 год порядка  $100$  эВ, а за время прохождения туманности звездой, порядка  $10^5$  лет и более, аккумулированная доза облучения получается не менее  $10^7$  эВ. Как известно, [1] и ссылки там, пороговая доза облучения смесей льдов с преобладанием  $H_2O$ , необходимая для инициации важных радиационно-химических превращений, не превышает 1-2 эВ на а.е.м. (!).

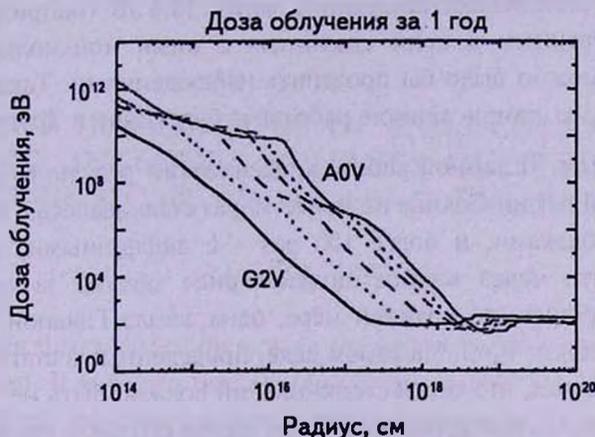


Рис.5. Доза облучения водяного льда за 1 год в диапазоне 6 - 13.6 эВ, в зависимости от радиуса туманностей, через которые проходят звезды A-F-G классов, с характеристиками, указанными в табл.1.

Итак, любое молекулярное облако "прозрачно" в диапазоне 6 - 13.6 эВ для излучения звезды Главной последовательности классов A-F-G, проходящей через туманность, в смысле беспрепятственной возможности накопления льдами пылинок облака дозы облучения, на несколько порядков превышающую пороговое значение, необходимое для синтеза сложных углеродсодержащих молекул. Например, данные недавних экспериментов по облучению смесей льдов типа  $H_2O:CH_3OH:NH_3:CO$  в соотношении 100:50:1:1 [15,16] указывают на образование весьма сложных органических соединений, содержащих вплоть до 22 атомов углерода, при накоплении дозы не более 1.4 эВ/а.е.м.

Таким образом, на основании вышеприведенных расчетов можно сделать следующий вывод: за все время существования, не менее  $10^7$  лет, внутренние области любого молекулярного облака подвергаются облучению в диапазоне 6 - 13.6 эВ излучением проходящей через облако звезды Главной последовательности А-F-G классов, достаточной для синтеза множества сложных углеродсодержащих молекул. Следует подчеркнуть, что во всех опубликованных работах других авторов, посвященных взаимодействию УФ-фотонов на газ и пыль молекулярных облаков, рассматривались только самые внешние области облаков (PDR - photon dominated regions), где ледяные мантии пылинок, как известно, отсутствуют [12-14]. Основным же источником энергии, обуславливающим облучение льдов во внутренних областях, считались космические лучи - протоны и альфа-частицы высоких энергий [2]. В рассмотренном же в настоящей работе сценарии УФ-фотоны "доставляются" во внутренние области самой проходящей звездой. Не исключено, что воздействие этих фотонов на содержание некоторых молекул и радикалов с потенциалом ионизации менее 13.6 эВ (например, СН), окажется существенным в цепи связанных с ними ион-молекулярных реакций, и, это можно было бы проверить наблюдениями. Такой анализ выходит, однако, за рамки данной работы и будет дан в другом месте.

4. *Заключение.* В данной работе классический результат [3] о том, что за время своей жизни Солнце не менее 10 раз сталкивалось с плотными межзвездными облаками, и более 100 раз - с диффузными, дополнен утверждением, что через каждое молекулярное облако за время его существования прошла, по-крайней мере, одна звезда Главной последовательности классов А, F, G. На самом деле, приведенные в статье оценки свидетельствуют о том, что таких столкновений должно быть не менее 10. Но даже придерживаясь консервативной точки зрения об одном столкновении, с точки зрения воздействия УФ-излучения звезды на внутренние области туманности, результаты моделирования в данном сценарии УФ-облучения в диапазоне 6 - 13.6 эВ ледяных мантий пылинок с преобладанием воды, представляют определенный интерес для астрохимии и астробиологии. В частности, моделирование посредством Cloudy показало, что доза облучения водяного льда за время прохождения облака звездой не менее  $10^5$  лет, составляет не менее  $10^7$  эВ/а.е.м. в любой области облака с однородной концентрацией  $10^3$  см<sup>-3</sup>, до значений концентраций по лучу зрения вплоть до  $10^{23}$  см<sup>-2</sup>. Рассчитанная величина доз облучения на 5-6 порядков превышает пороговое значение для смесей с преобладанием водяного льда при синтезе сложных углеродсодержащих молекул, несомненно игравших важную роль в предбиологической эволюции вещества в облаках - источниках звездообразования. Далее, появление интенсивного поля излучения в указанном диапазоне 6 - 13.6 эВ во внутренних областях молекулярных облаков неизбежно

должно воздействовать на всю цепочку ион-молекулярных реакций соединений с потенциалом ионизации менее 13.6 эВ. Можно ожидать, что для некоторых молекулярных облаков это воздействие будет иметь наблюдаемый эффект.

Часть этой работы выполнена во время визита в Институт Аргеландера при Университете Бонна, при финансовой поддержке фонда Александра фон Гумбольдта, Германия. Автор благодарен Г.Фару (Hans Fahr) за ценные замечания, и Д.Вильямсу (David Williams), обратившему внимание автора на необходимость учета всех УФ-фотонов в химии облаков. Работа выполнена также при частичной поддержке гранта Армянского Национального Научного и Образовательного Фонда (ANSEF), Нью Йорк, США.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А. Амбарцумяна, Армения, e-mail: ayarayeg@gmail.com

## ON DUST IRRADIATION IN MOLECULAR CLOUDS. III. INTERNAL SOURCES OF STELLAR UV PHOTONS FROM A-F-G DWARF STARS

A.G.YEGHIKYAN

Radiation fluxes caused by moving through molecular clouds A, F, G stars are calculated. It is shown that photons in the spectral range  $912 < \lambda < 2067 \text{ \AA}$  penetrate deeply into the clouds to such an extent to arrange enough irradiation doses to initiate chemical reactions in icy mantles of dust grains during the stars passage time. A possibility to use these data to interpret known laboratory results from the ultraviolet photolysis of realistic ice analogues like  $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{OH}:\text{NH}_3:\text{CO}$  producing potentially important pre-biological complex molecules is discussed.

Key words: *molecular clouds: radiation field: ices: irradiation doses*

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.Егикян, *Астрофизика*, 52, 289, 2009.
2. А.Егикян, *Астрофизика*, 54, 88, 2011.
3. J.Talbot, Jr., M.J.Newman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 34, 295, 1977.
4. A.Yeghikyan, H.Fahr, *Ann. Geophysicae.*, 21, 1263, 2003.
5. K.Scherer, H.Fichtner, S.E.S.Ferreira, I.Busching, M.S.Poigietter, *Astrophys. J.*, 680, L105, 2008.
6. S.W.McCuskey, *Astron. J.*, 88, 1175, 1983.
7. A.Yeghikyan, H.Fahr, *Astron. Astrophys.*, 415, 763, 2004.
8. G.Ferland, K.Korista, D.Verner et al., *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 110, 761, 1998.
9. *Allen's Astrophysical Quantities*, (A.N.Cox, ed.), Springer, 2000.
10. A.Yeghikyan, *Inter. Schol. Res. Net. Astron. Astrophys.*, 2011, 1, 2011.
11. H.Fahr, A.Yeghikyan, submitted to *Astron. Astrophys.*, 2012.
12. A.Shaw, *Astrochemistry*, John Wiley & Sons, 2006.
13. A.Tielens, *The physics and chemistry of the interstellar medium*, CUP, 2005.
14. B.T.Dralne, *Physics of the interstellar and intergalactic medium*, PUP, 2011.
15. H.Cottin, M.H.Moore, Y.Benilan, *Astrophys. J.*, 590, 874, 2003.
16. J.P.Dworkin, J. Seb Gillette, M.P.Bernstein et al., *Adv. Space Res.*, 33, 67, 2004.