АСТРОФИЗИКА

TOM 52

МАЙ, 2009

выпуск 2

ОБ ОБЛУЧЕНИИ ПЫЛИ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКАХ. І. УФ ДОЗЫ

А.Г.ЕГИКЯН

Поступила 27 августа 2008 Принята к печати 18 февраля 2009

Рассчитаны потоки излучения внутри молекулярных облаков, обусловленные соседней звездой класса A, или изотропным межзвездным излучением. Показано, что излучение в диапазоне $912\text{\AA} < \lambda < 2067\text{\AA}$ проникает достаточно глубоко, чтобы за время жизни облаков обусловить дозы облучения водяного льда порядка 100 зВ/а.е.м. и более, как при наличим очага звездообразования, так и без него. Обсуждается возможность использования этих результатов для астрофизической интерпретации опубликованных данных лаьорагорных экспериментов по облучению смесей льдов типа $H_2O:CH_3OH:NH_3:CO$. Формирующиеся в результате радиационно-химической трансформации сложные органические вещества, возможно, играют важную роль в предбиологической эволюции пылевой компоненты молекулярных облаков.

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

1. Введение. Как известно, многие сложные, в том числе и органические соединения образуются в плотных молекулярных облаках в газовой и твердой фазах. Единственным источником ионизации во внутренних частях облака являются космические лучи [1]. Начиная с энергий 0.1 МэВ и выше, их проникающая способность достаточна, чтобы обусловить облучение внутренних слоев. В наиболее плотные части облаков в состоянии проникнуть частицы с энергиями в несколько ГэВ и выше. Космические лучи, состоящие в основном из протонов, ионизуют атомы и молекулы водорода с образованием молекулярного иона Н3, инициирующего цепочку ион-молекулярных реакций, которые приводят, например, к формированию простых гидридов (вода, аммиак, метан) [2]. Реакции на поверхностях пылинок (твердая фаза) начинают играть роль при наличии ледяных мантий, состоящих из смерзшихся вышеперечисленных летучих соединений (вода, аммиак, метан), и, возможно и более сложных насыщенных углеводородов, образующихся в плотных внутренних слоях, защищенных от внешнего жесткого ультрафиолетового излучения [1]. Известно, что для этого необходимо иметь значение наблюдаемого поглощения A, > A, причем должно быть

 $N = 1.9 \cdot 10^{21} (A_V - A_0),$

где N - количество атомов (молекул) водорода на луче зрения, в см⁻², A_{ν} - поглощение, в зв. вел., A_0 - пороговое значение поглощения, при котором

начинают наблюдаться льды [2]. Поскольку самым распространенным льдом является водяной, именно для него и указываются значения А.: например. пля темного облака в Тельце A = 3.2 ± 0.1, в Южной Короне (R CrA) -Ао ≈ 3.4, для облаков в Змее (Serpens) и Змееносце (P Oph) ~ Ао ≈ 5.5 и 10-15 зв. вел., соответственно [2]. Такие вариации пороговых значений поглошения от облака к облаку легко объяснимы: облака в Тельце и Южной Короне ассоциируются с областями формирования звезд малых масс, гле звезды ранних спектральных классов отсутствуют, в то время как облако. например, в Змееносце, физически связано с ОВ-ассоциацией [2]. Таким образом, поле излучения в облаке ограничивает наличие льдов и, в то же время, необходимо для их фотохимической трансформации. Внутренние области облака, защищенные от ультрафиолетового излучения, облучаются протонами космических лучей, что подтверждается прямыми наблюдениями инфракрасных линий поглощения Н⁺ [1]. Дело в том, что концентрация ионов n(H₁) в облаке прямо связана со скоростью ионизации водорода космически и лучами, поток которых можно оценить теоретически, если n(H1) известна. В современных физико-химических моделях молекулярных облаков скорость ионизации космическими лучами задается параметрически. принимая ее постоянной внутри облака [1]. Это верно для частиц с энергиями в несколько единиц ГэВ и выше, и не соответствует действительности в лиапазоне энергий МэВ-ГэВ, на который и приходится максимальное значение потока галактических космических лучей. Таким образом, для корректной интерпретации линий Н₃⁺ в спектрах молекулярных облаков, равно как и для количественных расчетов облучения льдов, необходимо знание распределения потока мягкой компоненты космических лучей (МэВ-ГэВ) вдоль радиуса облака, в зависимости от параметров облака. Принципиально решенная для жесткой компоненты (ГэВ-ТэВ и больше) внутри наиболее плотных областей облаков, эта задача остается неиследованной численно для мяткой компоненты, не говоря уже об ее использовании в проблеме интерпретации наблюдений Н⁺ и при расчетах доз облучения льдов.

Далее, обычно считается, что УФ-излучение не проникает во внутренние области облаков, за исключением случаев особой волокнистой структуры, неоднородного распределения плотности туманностей и т.д., позволяющих облучение вещества более глубоких слоев. Однако в любом случае предполагается, что пыль может поглотить количество энергии излучения, необходимое для инициирования важных фотохимических реакций только вне облаков, где льды не наблюдаются (так как время жизни ледяных мантий пылинок намного меныше характерного времени реакций), либо же в условиях поверхности диска новорожденной звезды [3]. В настоящей статье будет показано, что УФ-излучение при 912Å < λ < 2067Å (6 эВ < hv < 13.6 эВ) также играет важную роль, и в состоянии обеспечить необходимое облучение

льдов внутри облаков в ограниченном диапазоне значений А.

Продукты фотолиза и радиолиза льдов и их смесей могут играть важную роль в образовании многих органических соединений, наблюдаемых в спектрах молекулярных облаков. Лабораторные данные показывают, например, что СН, образуется из продуктов фотолиза смеси H,O + CH,OH [4]. Более того, широкий спектр молекул СН, НСО, Н,СО, СО, и ХСМ был выявлен при УФ облучении смеси H,O:CH,OH:NH,:CO в соотношении 100:50:10:10 [4]. Такая смесь считается хорошим аналогом ледяных покрытий межзвездных пылинок. Интересно отметить, что изменение процентного соотношения ингредиентов смеси дает качественно отличные результаты: УФ облучение смеси H,O:CH,OH:NH,:CO в соотношении 100:50:1:1 (при 15 К) приводит к образованию гексаметилентетрамина (С, Н, N,) и весьма сложных углеводородов, содержавших вплоть до 22 атомов углерода, устойчивых при комнатной температуре [5,6]. Гексаметилентетрамин (уротропин) интересен тем, что при кислотном гидролизе образует аминокислоты [7]. Углеводороды классов сложности, наблюдавшихся в экспериментах [6], подобны природтым бит, мам (смесям алифатических и ароматических углеводородов), которые давно уже считаются адекватными аналогами для воспроизведения фотометрических характеристик ядер комет и поверхностей астероидов [8]. Методы прямого наблюдения таких сложных молекул в космосе, игравших, вероятно, весьма важную роль в предбиологической эволюции органического вещества, пока еще только разрабатываются [9]. Неизвестны также количественные данные по радиационно-химическим выходам образующихся в экспериментах веществ. К тому же цитированные экспериментальные данные по фотопоглощению льдов включают только каналы распада (фотолиз), без учета вновь образовавшихся молекул. Можно, однако, отметить относительно высокую потенциальную эффективность таких радиационно-индуцированных химических превращений смесей льдов в условиях рассматриваемых моделей молекулярных облаков.

Чтобы иметь возможность оценить степень радиационно-химической трансформации соответствующих продуктов, необходимо знать дозы облучения (количество поглощенной энергии) химических соединений фотонами и протонами, в зависимости от поглощения в туманности. Расчет потоков излучения внутри облака, при известном внешнем источнике, в настоящее время для заданной (стационарной одномерной и статической) модели не представляет особого труда (см. например, [10]). В то же время количественные данные о дозах облучения, в особенности об их радиальных зависимостях, отсутствуют. Наблюдательные и экспериментальные данные, подтверждающие доминирующее участие облучения в процессах формирования сложных органических веществ в ледяных мантиях пылинок, обсуждались в недавних обзорах [1-3]. Настоящая статья посвящена расчетов для протонов космических

лучей будут представлены в последующей статье.

2. Поле УФ-излучения внутри облаков. Молекулярные облака представляют собой межзвезлные газо-пылевые облака с преобладанием Н., в диапазоне концентраций, размеров и температур порядка n~10² - 10⁴ см⁻³. L~1-30 пк и T~10-100 К, соответственно [1]. В зависимости от наличия или отсутствия очага (очагов) звездообразования, молекулярные облака подразделяются на статические и динамические [1,2]. Во втором случае подразумевается наличие областей формирования звезд, в свою очерсль различающихся массами образующихся звезд. В так называемых гигантских молекулярных облаках возможно наличие центрального сгущения-ядра с $n \sim 10^7$ см⁻³ и $L \sim 0.1$ пк, и просто сгущений, с $n \ge 10^5$ см⁻³ и $L \le 0.0001 - 0.1$ пк. В связанных с очагами звездообразования облаках имеются также молодые звезды разных светимостей [1,2]. Содержание пыли не превосходит 1% от массы облака. Сами пылинки обладают силикатными или графитовыми япрами с размерами d~0.01-0.1 мк и ледяными мантиями с размерами по нескольких 0.1 мк. Межзвездное УФ-излучение и излучение от звезд внутри облака, взаимодействуя с веществом облака при большой оптической толшине. образует области HII, HI и H, с соответствующими переходными зонами. теория которых хорошо известна [11].

Для расчета интенсивности поля излучения в зависимости от раличса облака была использована программа CLOUDY [10], версия 26.02.2006 (http:/ /www.nublado.org), которая для заданного внешнего поля излучения, размеров облака, концентрации вещества, атомарного химического состава (30 элементов, от водорода до элементов группы железа), содержания и типа пыли рассчитывает ионизационно-атомарно-молекулярную и термическую структуру газовой и пылевой компонент облака и интенсивности нескольких миллионов спектральных линий от радио- до ренттеновского диапазона, для стационарной. одномерной и статической модели. Интенсивность падающего на облако излучения и его спектральный состав, равно как и распределение плотности вдоль радиуса, можно задать как аналитически, так и численно. Уравнения стационарности решаются для моделей многоуровенных атомов, ионов и молекул. Эффекты переноса излучения в непрерывном спектре и важнейших оптически толстых линиях учитываются в рамках приближенной теории вероятности выхода, которая дает приемлемую точность даже в случае линий, при постоянстве кинематических условий в областях формирования линий, что должно выполняться в используемой статической и однородной модели. С учетом этого обстоятельства точность рассчитанного поля излучения внутои облака, т.е. суммы ослабленного поглощением внешнего и собственного диффузного излучения туманности, как в континууме, так и в линиях, порядка 10% [10]. Следует подчеркнуть, что CLOUDY является непревзойденной по количеству одновременно учитываемых атомов, ионов и молекул,

по полноте рассматриваемых элементарных процессов, характеризующих взаимодействие излучения с газо-пылевым веществом, по точности используемых атом-ион-молекулярных параметров, сечений процессов, скоростей реакций и т.д.

Итак, для данной модели облака (в плоско-параллельном приближении) Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ

N₽	Параметры источника излучения		Расстояние до облака см	Концентрация Н ₂ в облаке см ⁻³	А _у зв. всл.
1	звезда T= 10000 K	светимость 3.45 - 10 ³⁴ эрг с ⁻¹	1017	103	50
2	звезда Т = 10000 К	светимость 3.45 · 10 ³⁴ эрг с ⁻¹	1018	103	50
3	межзвездное изотропное	интегральный поток 1.6 · 10 ⁻³ эрг см ⁻² с ⁻¹	7 10	103	50
4	межзвездное изотропное	интегральный поток 1.6 · 10 ⁻² эрг см ⁻² с ⁻¹		103	50



Рис.1. Поле излучения внутри облака для модели 1. Вверху, слева: внешнее излучение (см. текст), палакощее на облако; справа: ослабленное внешнее излучение на границах 1-й (сплошная кривая) и 10-й (прерывистая кривая) зоны. Внизу, слева: диффузное излучение туманности (на границах 1-й и 10-й зон, соответственню); справа: суммарное (сумма ослабленного внешнего и диффузного) излучение (на границах 1-й и 10-й зон, соответственню). Везде указаны величины что J_{*} - в эрт см⁻² с⁻¹, J_{*} - интенсивность излучения в эрт см⁻² с⁻¹ Ср⁻¹ Ги⁻¹, v - частота излучения) в зависимости от энергии фотонов, выраженных в ридбергах, (1Ry = 13.6 эВ).

рассчитывалась интенсивность поля излучения в каждой из десяти зон, на которые было разделено облако. В табл.1 приведены параметры некоторых из представляющих интерес моделей. В качестве источников излучения были выбраны звезда Главной последовательности с чернотельным излучением, соответствующим температуре $T_{xyy} = 10000$ К, и межзвездное (изотропное) поле излучения, характерное для областей диска Галактики [10,12], с масштабными множителями 1 (модель 3) и 10 (модель 4). В табл.1 указаны интегральные светимость и потоки излучения.

Спектральные характеристики излучения, падающего на облако и изменяющегося вдоль его радиуса (точнее, на границах первой и десятой зон), указаны на рис. 1,2. Приведены прямые результаты расчетов CLOUDY, величины $4\pi\nu J_{\nu}$ (в эрг см⁻² с⁻¹, J_{ν} - интенсивность излучения в эрг см⁻² с⁻¹ Ср⁻¹ Гц⁻¹, ν - частота излучения) в зависимости от энергии фотонов, выраженных в ридбергах (1Ry=13.6эВ). Наличие излучения с энергией больше 1Ry внутри облака, хотя и весьма ослабленное, есть следствие хорошо известного явления: с ростом энергии L_c - кванта коэффициент поглощения уменьшается, так что такие кванты могут проникать глубже [10]. Вклад фотонов вышеуказанного диапазона энергий (6 < $h\nu$ < 13.6 эВ) в общее поле излучения определяется величиной G_0 [13], выраженной в стандартных единицах, характеризующих среднее межзвездное поле излучения, 1 Habing = 1.6 · 10⁻³ эрг см⁻² с⁻¹ [14,15]:

 $v(\lambda=912Å)$

J, dv



Рис.2. То же, что и на рис.1, но для модели 4.

Следует подчеркнуть, что использованная нами процедура CLOUDY для задания характерного межзвездного поля излучения определяет поток (рис.2), интегральная характеристика которого (табл.1, модель 3) порядка 1 Habing. В модели 4 была использована в 10 раз большая величина, характерная для спиральных рукавов Галактики [12]. В близких окрестностях звезд этот показатель, очевидно, намного больше.

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

$$\frac{dD}{dt} = 4\pi \int_{v}^{v_1} J_v \sigma_v \frac{1}{M} dv,$$

где J_v - интенсивность излучения, M - молекулярный вес, а σ_v - сечение поглощения вещества льдинки в диапазоне $v_1 - v_2$. Зависимость сечения поглощения водяного льда (M=18) от длины волны в диапазоне 1100-1800 Å указана на рис.3 [16]. Можно рассчитать также интегральный поток излучения в диапазоне длин волн, представляющий интерес: F_i (1100Å < λ < 1800Å) и $F(\lambda > 912Å)$

$$F=4\pi\int_{v_1}^{v_2}J_v\,dv\,,$$

и соответствующие безразмерные величины $G_1 = F_1/1.6 \cdot 10^{-3}$ и $G = F/1.6 \cdot 10^{-3}$. Количественное соответствие между величинами G и G_0 , для модели 1 (рис.4) иллюстрируется спектральными кривыми в диапазоне 912Å < λ < 2067Å, характеризующими излучение звезды на внутренней границе туманности, и



Рис.3. Зависимость сечения поглощения водяного льда (см²) от длины волны в диапазоне 1100-1800 Å [7]. Рис.4. Поле излучения в случае модели 1, в диапазоне 912Å < λ < 2067Å. Сплопиная линия - суммарное излучение туманности, на границе 10-й зоны, пересчитанное к внутренней границе. Прерывистая линия - излучение звезды у внутренней границы туманности.

суммарное излучение туманности на границе 10-й зоны, пересчитанное к внутренней границе (т.е., к первой зоне) для непосредственного сравнения.

Количество поглощенной льдинкой энергии D за время 1 (доза), при постоянстве источника излучения, очевидно равно:

$$D=(dD/dt)t$$
.

Относительные потоки (величины G, G₀, G₁) и дозы, рассчитанные для всех четырех моделей, приведены на рис.5. Интересно отметить возрастание потока излучения (в диапазонах, характеризующих величины G₀, G₁) для моделей 1,2 (рис.5): после минимума при $N = 1.0 \cdot 10^{22}$ см⁻², поток начинает увеличиваться с возрастанием N, вызывая увеличение облучения. Ясно, что при наличии близкого источника излучения (звезды) увеличение потока в некотором ограниченном спектральном диапазоне с увеличением размеров туманности вызвано возрастанием меры эмиссии туманности при оптической толщине порядка и больше 1, что как раз имеет место при вышеупомянутом значении N, и отражает увеличивающийся вклад диффузного излучения в



Рис.5. Дозы поглощенной энергин УФ-излучения водяным льдом, в диапазоне 1100-1800 Å, в зависимости от концентрации облака по лучу зрения, в см⁻². Вверху, слева - модель 1 - верхняя сплощная, 2 - нижняя сплощная линии; внизу, модель 4 верхняя сплощная, 3 - нижняя сплощная линии. Слева: - величина G_{0} (диапазон 912Å - 2067Å, см. текст) - сплощные, величина G_{1} (диапазон 1100-1800Å, см. текст) прерывястые, величина G (диапазон $\lambda > 912Å$, см. текст) - штрих-пунктирные линии; справа - дозы поглощенной энергии за 10 и 50 млн лет, в зВ, модели 1 (верхняя), 4 (нижняя) сплощные, модели 2 (верхняя), 3 (нижняя) прерывястые линии. Вертикальные пунктирные линие указывают границу образования льдов, горизонтальные - диапазон минимальных доз, вызывающих радиационно-химические трансформации. диапазон 1000-2000 Å (см. рис.1, кривые для диффузного и суммарного излучений). Для межзвездного поля излучения этот эффект отсутствует (рис.5, модели 3,4). Граница образования льдов, рассчитанная по данным табл.1, указана вертикальной пунктирной линией: левее ее льды не наблюдаются. На рис.5, справа, горизонтальными пунктирными линиями отмечены значения двух пороговых доз, 100 эВ/а.е.м. и 1.4 эВ/а.е.м., при превышении которых в лабораторных экспериментах наблюдается синтез сложных органических соединений. Первое из них использовалось при интерпретации ранних лабораторных работ и является завышенным, второе взято из результатов недавних экспериментов (см. ниже).

Основной вывод, который можно сделать из приведенных на рис.5 распределений доз, заключается в следующем: за 10 млн лет возможно накопление дозы облучения порядка и болыше 100 эВ льдинками туманностей вплоть до глубин $A_V \leq 50$, если не далее чем на расстоянии 0.033 пк от внутренней границы туманности находится звезда класса не позднее A (со светимостью не менее 10 L_{\odot} - модель 1). Звезды несколько боле ранаето типа и/или с большими светимостями, очевидно могут обусловить такое же облучение и с больших, чем 0.033 пк расстояний. Случаи со звездами типа О и ранних подклассов В в данной модели исключаются, поскольку необходимо одновременно учитывать эволюционные изменения источника излучения и прогрев пыли до температур нескольких сот градусов, вызывающий быстрое испарение льдов (так называемые области "hot cores" [1,2]). На рис.6 показано



Рис.6. Радиальное распределение температур в туманности. Слева - пылевая, справа газовая компоненты. Вверху - модели 1 (сплощная), 2 (пунктирная) линии, внизу модели 3 (пунктирная), 4 (сплощная) линии.

распределение температур газа и пыли вдоль радиуса. Для всех моделей температура пыли в областях с $\Delta r \ge 3 \cdot 10^{18}$ см ниже 30 K, что достаточно пля сохранения не только водяного, но и, например, метанового, льдов.

Обсуждаемая выше ситуация типична для многих областей звездообразования [17], где, как установлено прямыми наблюдениями, звезды рождаются группами в несвязанных друг с другом областях [18], причем звезды в молодых звездных скоплениях, все еще связанных с родительским облаком, могут иметь весьма высокие пространственные плотности [19]. Вышеприведенная оценка времени облучения ~10 млн лет как раз следует из времени жизни облаков с областями звездообразования [17-19].

Время жизни гигантских молекулярных облаков без областей звездообразования ограничено характерным динамическим временем компактных сгущений в облаках порядка 30 млн лет [20,21]. Время жизни меньших по массе карликовых молекулярных облаков [21] больше и ограничено только столкновениями с другими протяженными межзвездными облаками (характернс з время свободного пробега ~50-100 млн лет [22]). Расчетные дозы облучения льдов для облаков в межзвездном поле излучения (модели 3,4) за время ~50 млн лет, также показаны на рис.5. Превышение пороговой дозы 100 эВ имеет место в узком диапазоне $\Delta A_V \leq 1$ (модель 3) и $\Delta A_V \leq 2$ (модель 4), считая от (наблюдаемой) границы образования льдов $A_0 \sim 3$. При $N \sim 2 \cdot 10^{21}$ см⁻², концентрации в облаке $n \sim 10^3$ см⁻³ и отношении масс газа и пыли ~100, количество облученного льда составит несколько процентов массы Солнца и более.

Точность вычислений в рамках данной модели ограничена только точностью расчетных потоков CLOUDY ~10% (см. выше) и точностью сечения фотопоглощения водяного льда ~30% [16,23]. В работе [24] приведены также экспериментальные данные фотопоглощения льдов H₂O (8.4 · 10⁻¹⁸ см² - с точностью 30% совпадает с данными [16], 7.0 · 10⁻¹⁸ см²), СН, (5.7 · 10⁻¹⁸ см²) и CH,OH (3.6 $\cdot 10^{-18}$ см²), измеренных при $\lambda = 1216$ Å, как для чистых льдов, так и их смесей, с точностью ~20-40%. Зависимости этих сечений от длины волны неизвестны, но поскольку при La они близки к сечению водяного льда, для приближенной оценки можно считать, что дозы, приведенные на рис.5 верны и в случае метанового и метанолового льдов, уменьшенные соответственно в 8.4/5.7 и 8.4/3.6 раз. Действительно, в упомянутых экспериментах использовалась водородная лампа, адекватно воспроизводящая спектр в рассматриваемом диапазоне, и излучавшая поток ~ 3.10¹⁴ фотон/см² с с двумя максимумами при Lα и λ~1600Å, со средней энергией 7.4 эВ. Образцы облучались в течение 2.10 дней (1.728.10⁶ с) [6], получив суммарную дозу ~25 эВ/молекулу [5] (что соответствует сечению фотопоглощения σ (смесь) ~ 2.7 · 10⁻²¹ см²), или в пересчете на эквивалентную атомную единицу массы водяного льда, ~1.4 эВ/а.е.м. Используя данные рис.5, находим,

что в модели 1 наименьшее значение величин G₀, G, (~10⁻²) соответствует при 7.4 эВ потоку ~ 8.5 · 10⁸ фотон/см² с). Экспериментальные данные [23] о сечении фотодеструкции смеси Н.О:СН.ОН в соотношении 100:10 относятся опять-таки к среднему значению энергии фотонов 7.4 эВ - 2.7 · 10⁻¹⁹ см² (точность ~30%). Как указывалось выше, только для Н.О известна зависимость сечения фотопоглощения от длины волны (рис.3, по данным [16]), откуда находим $4 \cdot 10^{-20}$ см² и $7 \cdot 10^{-18}$ см² при 7.4 эВ и 10.2 эВ ($\lambda = 1216$ Å), соответственно. Этих данных недостаточно для количественного анализа, поскольку неизвестны кинетические коэффициенты скоростей реакций и элементарных процессов в твердой фазе, можно, однако, грубо оценить величину минимального отношения доз облучений Q ~ F(модель). t(модель). σ(водяной лед)/ F(лампа) t(лампа) σ(смесь)~500-σ(водяной лед)/σ(смесь)~ ~72-12000 и заключить, что за 10 млн лет смеси льдов получат в условиях модели 1 во столько же раз большую дозу, чем это необходимо лля синтеза сложных молекул с массами более 200 a.e.m. В условиях моделей 3 и 4, выбирая G, ~ 10⁻⁴, получим Q~3-600. Подчеркном, что в обоих случаях была использована более консервативная (в данном случае) оценка σ (H₂O:CH₃OH) ~ 2.7 · 10⁻¹⁹ см² [23], а не σ (H₂O:CH₃OH:NH₃:CO) ~ 2.7 · 10⁻²¹ см² [5]. Такой разброс в значениях Q есть очевидное следствие незнания зависимостей сечений фотопоглощения смесей от длины волны. Более четкую и простую оценку величины Q можно получить из простой констатации факта, что сложные органические молекулы образовались в экспериментах, получив дозу ~1.4 эВ/а.е.м при облучении, т.е. для этих веществ пороговое значение минимальной дозы, вызывающей радиационнохимические трансформации, порядка 1.4 эВ/а.е.м., и Q~100.

Вопрос о воздействии переоблучения на образовавшиеся сложные молекулы экспериментов [5,6] специально не исследован, хотя в [9] отмечается уменьшение эмиссионных характеристик (в видимой области) без изменения спектра, что характерно для больших, функционально организованных органических молекул. Интересно отметить, что переоблучение при этом составило всего лишь 1% от исходной дозы. Еще раз подчеркнем, что для полного количественного анализа необходимы сечения реакций по всем каналам радиационно-химических превращений, которые ни экспериментально, ни теоретически пока еще неизвестны.

Из вышеизложенного следуют три вывода. Первое - поскольку в экспериментах [5,6] сложные органические молекулы синтезировались в результате фотолиза с дозой облучения ~1.4 эВ/а.е.м., то использованное при интерпретации данных на рис.5 пороговое значение минимальной дозы в 100 эВ/а.е.м., вызывающей радиационно-химические трансформации, завышено на один-два порядка, и вероятную границу образования этих молекул следует отодвинуть в глубь туманности. Второе - в условиях модели

2 также возможно получить минимальную дозу практически во всем объеме туманности. Третье - в условиях моделей 3 и 4 объем достаточного облучения соответствует диапазону значений $\Delta A_V \leq 5$, считая от (наблюдаемой) границы образования льдов $A_0 \sim 3$, при этом масса облученного льда может составить не менее одной массы Солнца.

Лальнейшую судьбу органического вещества обсуждаемого типа в молекулярных облаках можно проследить в более конкретизированных моделях. учитывающих неоднородности распределения плотности вещества туманности. эволюцию молодых звезд-источников и возможное испарение льдов, а также влияние начального химического состава на структуру ледяных мантий [25]. Другой аспект проблемы заключется в следующем. Как известно, современная теория образования Земли не допускает возможности существования летучих соелинений типа воды, окисей углерода и тем более сложных органических веществ в условиях только что образовавщейся планеты, связывая последующее появление атмосферы и океанов с веществом комет, интенсивно сталкивавшихся с јем лей в первые полмиллиарда лет ее существования [3]. При этом не исключается, что вещество комет полностью, или частично, состоит из вещества родительского молекулярного облака, тем самым связывая прелбиологическую эволюцию на Земле с еще более ранней химической эволюцией молекулярных облаков [3]. А попадет ли рассмотренный в данной работе облученный лед в будущем в область формирования комет, выживет ли там. сможет ли быть занесен на какую-либо планету земного типа и принять участие в эволюции органического вещества, на все эти вопросы можно будет ответить только в рамках единой модели, учитывающей все многообразие определяющих параметров процесса.

4. Заключение. В данной работе показана принципиальная возможность облучения ледяных мантий пылинок молекулярных облаков во внешних частях, достаточно холодных и защищенных от жесткого внешнего излучения, но куда все еще проникает излучение в диапазоне 912Å < $\lambda < 2067Å$. Как оказалось, эти две границы не совпадают в двух случаях, причем расстояние между ними может быть значительным. Во-первых, если звезда находится от молекулярного облака на достаточно близком (зависящем от класса и светимости) расстоянии, например, не более 0.3 пк при светимости звезды класса А порядка десяти солнечных, облучаются области вплоть до $A_{\nu} \leq 50$. И, во-вторых, межзвездное поле излучения само в состоянии обеспечить необходимую дозу облучения на расстояниях от границы образования льдов порядка $\Delta A_{V} \leq 5$. В обоих случаях речь идет о пороговой дозе в 1.4 эВ/а.е.м., накопленной за соответствующее время жизни облака. Данные недавних экспериментов по облучению смесей типа H,O:CH,OH:NH,:CO в соотношении 100:50:1:1 [5,6] указывают на образование весьма сложных органических соединений, содержавших вплоть

до 22 атомов углерода, при накоплении дозы не более 1.4 эВ/а.е.м. Отсюда следует потенциальная возможность синтеза этих веществ в молекулярных облаках при наличии вышеперечисленных условий.

Часть этой работы выполнена во время визита в UCL, Лондон, при финансовой поддержке Королевского Общества Великобритании. Автор благодарен Д.Вильямсу и С.Вити за ценные замечания и стимулирующее обсуждение, и рецензенту за замечания, способствующие улучшению работы.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна, Армения, e-mail: arayeg@web.am

ON DUST IRRADIATION IN MOLECULAR CLOUDS. I. UV DOSES

A.G.YEGHIKYAN

Radiation fluxes caused by a nearby star A or an isotropic interstellar radiation field, inside of molecular clouds are calculated. It is shown that photons in the spectral range $912\text{\AA} < \lambda < 2067\text{\AA}$ penetrate deeply into the clouds with or without star-forming regions to such an extent to arrange irradiation doses of water ice of 100 eV/a.m.u. and more during the clouds lifetime. A possibility to use these data to interpret known laboratory results from the ultraviolet photolysis of realistic ice analogs like H₂O:CH₂OH:NH₃:CO producing potentially important pre-biological complex molecules is discussed.

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

ЛИТЕРАТУРА

- 1. P.Ehrenfreund, S.B.Charnley, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 38, 427, 2000.
- 2. D.C.B. Whittet, Dust in the galactic environment, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2003.
- 3. P.Ehrenfreund, W.Irvine, L.Becker et al., Rep. Prog. Phys., 65, 1427, 2002.
- 4. L.J.Allamandola, S.A.Sandford, G.J.Valero, Icarus, 76, 225, 1988.
- 5. H.Cottin, C.Szopa, M.H.Moore, Astrophys. J., 561, L139, 2003.
- 6. J.P.Dworkin, J. Seb Gillette, M.P.Bernstein et al., Adv. Space Res., 33, 67, 2004.

- 7. Y. Wolman, S.L. Miller, J. Iban~ez, J.Oro, Science, 174, 1039, 1971.
- 8. L.V. Moroz, G.Arnold, A.V. Korochantsev, Icarus, 134, 253, 1998.
- 9. M.Gudipati, J.P.Dworkin, X.Chillier, L.J.Allamandola, Astrophys. J., 583, 514, 2003.
- 10. G.J.Ferland, Publ. Astron. Soc. Pacif., 110, 761, 1998.
- 11. J.E.Dyson, D.A. Williams, The physics of the interstellar medium, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997.
- 12. J.H.Black, Interstellar Processes (Eds. D.J.Hollenbach, H.A.Thronson), Dordrecht: Reidel, p.731, 1987.
- 13. N.P.Abel, G.J.Ferland, G.Shaw, P.A.M. van Hoof, Astrophys. J. Suppl., 161, 65, 2005.
- 14. J.S.Mathis, P.G.Mezger, N.Panagia, Astron. Astrophys., 128, 212, 1983.
- 15. S.S. Prasad, S.P. Tarafdar, Astrophys. J., 267, 603, 1983.
- 16. S.G. Warren, Applied Optics, 23, 1206, 1984.
- 17. E.F. van Dishoeck, G.A.Blake, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 36, 317, 1998.
- 18. C.J.Lada, E.A.Lada, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 41, 57, 2003.
- 19. W.J.Henney, S.J.Arthur, Astron. J., 116, 322, 1998.
- 20. L.Blitz, F.H.Shu, Astrophys. J., 238, 148, 1980.
- 21. F.H.Shu, F.C.Adams, S.Lizano, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 25, 23, 1987.
- 22. J. Talbot, Jr., M.J. Newman, Astrophys. J. Suppl., 34, 295, 1977.
- 23. H. Cottin, M.H. Moore, Y. Benilan, Astrophys. J., 590, 874, 2003.
- 24. G.A. Baratta, G. Leto, M.E. Palumbo, Astron. Astrophys., 384, 343, 2002.
- 25. A. Yeghikyan, S. Viti, D. Williams, in preparation, 2008.