

**ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АНАЛОГОВ
МЕЖЗВЕЗДНЫХ ЛЬДОВ**

**В. М. Картеева, М. Э. Ожиганов, М. Г. Медведев,
Р. С. Накибов, Г. С. Федосеев, А. И. Васюнин**

Уральский федеральный университет

Разработан метод контроля количественного соотношения компонентов в аналогах межзвездных льдов, получаемых в лабораторных условиях. По полученным данным с масс-спектрометра и ИК-спектрометра нами построены калибровочные кривые для различных чистых веществ. Калибровочная кривая демонстрирует зависимость средней скорости напыления исследуемого вещества на подложку от значения среднего ионного тока. С использованием этого метода в настоящее время в лабораторных условиях получают многокомпонентные аналоги межзвездных льдов и рассчитывают константы экстинкции вещества в различных окружениях. В данной работе представлена методика получения таких кривых и приведен пример.

**LABORATORY TECHNIQUE FOR OBTAINING
MULTICOMPONENT ANALOGUES
OF INTERSTELLAR ICE**

**V. M. Karteeva, M. E. Ozhiganov, M. G. Medvedev, R. S. Nakibov,
G. S. Fedoseev, A. I. Vasyunin**

Ural Federal University

We have developed a method for monitoring of the quantitative ratio of components in analogues of interstellar ice obtained in laboratory conditions. We have constructed calibration curves for various pure substances using the data obtained from the mass spectrometer and IR spectrometer. The calibration curve demonstrates the dependence of the average rate of deposition of the test substance on the substrate on the value of the average ion current. Currently, using this method, we obtain multicomponent analogues of interstellar ices and calculate the extinction constants of species in various environments. This paper presents a method for obtaining such curves and provides an example.

Введение

Звезды являются главным компонентом, доступным для наблюдения в видимом диапазоне. Однако при изучении космического пространства в других диапазонах обнаружено, что значительный вклад вносит вещество, сосредоточенное в межзвездных облаках, наблюдаемых в инфракрасном (ИК) диапазоне. Состоят такие космические объекты из газа, преимущественно гелия и водорода, и частиц пыли, размер которых не превышает 1 мкм. Из этого вещества, путем гравитационного коллапса, формируются звезды и планеты. Но межзвездный газ и частицы пыли не единственные компоненты межзвездного облака, на силикатных или графитовых частицах осаждаются летучие молекулы (рис. 1): водород, углерод, кислород, азот и т. д.

© Картеева В. М., Ожиганов М. Э., Медведев М. Г., Накибов Р. С., Федосеев Г. С.,
Васюнин А. И., 2024

Состав газовой фазы межзвездных облаков определяется за счет радиотелескопов. В настоящее время обнаружено около 300 химических соединений, в том числе изотопы и сложные органические молекулы. Последним уделяется особое внимание, поскольку можно будет поддержать какую-либо гипотезу о механизме появления жизни на нашей планете и о возможности реализации такого механизма в других областях Галактики.

Большая часть обнаруженных молекул, за исключением водорода, находится в вымороженном состоянии на межзвездной пыли. Это известно благодаря исследованиям космического пространства в инфракрасном диапазоне, так как молекулы, будучи замороженными в лед, имеют только колебательные состояния. Во время переходов между возбужденными колебательными уровнями молекулы поглощают инфракрасные фотоны, что позволяет обнаружить молекулы во льду посредством наблюдения соответствующих полос поглощения на спектрах ИК-излучения, регистрируемого с соответствующего направления.

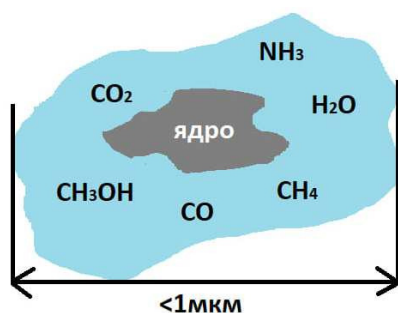


Рис. 1. Межзвездная пылинка

Запись спектров космических объектов в ИК-диапазоне осуществляется наземными обсерваториями, например Atacama Large Millimeter Array. Но при наблюдениях с поверхности Земли получаемые данные зашумлены преимущественно водяными парами и углекислым газом, даже особое местоположение телескопов не избавляет от этой проблемы. Также для изучения космического пространства были запущены космические аппараты Spitzer Space Telescope, Herschel Space Observatory и James Webb Space Telescope (JWST). Они оборудованы специальными инфракрасными детекторами и инструментами, которые позволяют собирать данные в этом диапазоне.

Чтобы интерпретировать полученные данные, требуется наличие спектров сравнения веществ [1] и коэффициенты экстинкции. Для этого используют специализированное лабораторное оборудование [2], с помощью которого выращиваются тонкие пленки льда на подложке в условиях сверхвысокого вакуума.

Описание методики

Для получения спектров сравнения аналогов межзвездного льда в лабораторных условиях собрана и запущена криогенная сверхвысоковакуумная установка. В ее состав входит главная камера, в которой поддерживается сверхнизкое давление. В главную камеру погружен криогенный держатель с закрепленным на нем германиевым окном.

Процесс получения спектров сравнения можно разбить на несколько этапов. Первоначально выполняется работа по заполнению линии дозировки исследуемыми газофазными чистыми веществами или смесями. Для контроля чистоты газов, находящихся в линии дозировки, осуществляются запись масс-спектров с помощью квадрупольного масс-спектрометра путем напуска исследуемого газа в камеру и сравнение результата со

справочной базой данных. После этого выполняется повторный запуск исследуемого вещества в главную камеру, при этом происходит осаждение молекул на германиевое окно, охлажденное до 8–10 К и записывается ИК-спектр сравнения аналогов межзвездного льда.

Рассмотренная выше методика проводится при снятии однокомпонентных ИК-спектров. В случае получения многокомпонентных смесей необходимо производить регулирование их соотношения. Для этого необходимо иметь калибровочные кривые для различных молекул.

В качестве калибровочной кривой выступает зависимость среднего ионного тока от средней скорости напыления, которую можно рассчитать, разделив лучевую концентрацию N на время напыления t . Лучевая концентрация определяется по данным ИК-спектров (1):

$$N = \frac{S \ln 10}{A}, \quad (1)$$

где S — площадь полосы поглощения на ИК-спектре (см^{-1}); A — константа экстинкции (молек/см); $\ln 10$ — коэффициент перевода поглощения в оптическую толщину.

Изложение результатов

В настоящее время на базе астрохимической лаборатории построены калибровочные кривые для всех основных компонент межзвездного льда, включая воду (H_2O), монооксид углерода (CO), углекислый газ (CO_2), метанол (CH_3OH) др. [3]. Рассмотрим их построение на примере монооксида углерода (CO).

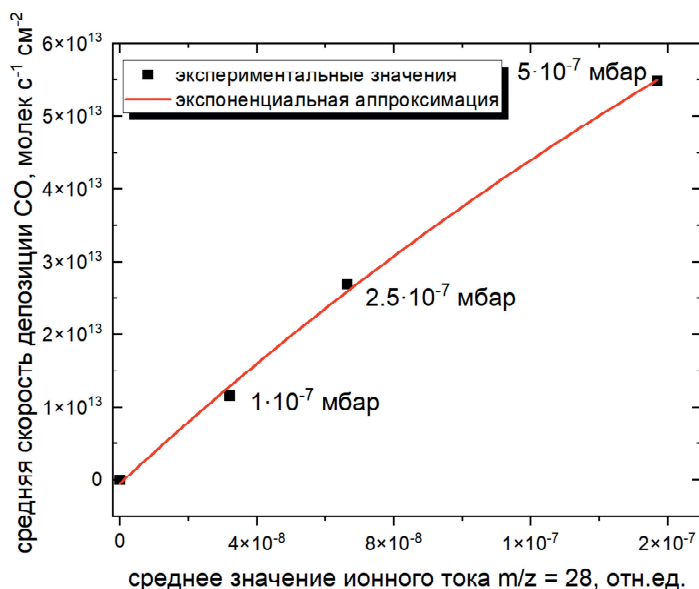


Рис. 2. Калибровочная кривая депозиции CO . Зависимость скорости напыления от значения среднего ионного тока при разных давлениях в камере: $P = 1 \cdot 10^{-7}$; $2.5 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-7}$ мбар

В ходе работы были получены масс-спектр вещества с зависимостью ионного тока от времени и серия ИК-спектров в среднем диапазоне. По данным первого получены величины средних ионных токов и времени депозиции. По ИК-спектрам были найдены площади пиков при различных давлениях в камере и рассчитана лучевая концентрация по

формуле (1) для полосы с позицией пика 2140 см^{-1} ($\text{C}\equiv\text{N}$ stretch). Значение константы экстинкции известно из литературных данных [4]. Полученные точки аппроксимируются экспоненциальной функцией (рис. 2), в дальнейшем получившаяся калибровочная кривая используется при выращивании многокомпонентного льда заданного состава. Необходимые значения скорости напыления каждого компонента льда на германиевое окно регулируются посредством установки соответствующих значений ионных токов для каждого из используемых компонентов льда с применением соответствующих индивидуальных калибровочных кривых. Точное значение скорости депозиции, необходимое для получения многокомпонентного льда заданного состава, устанавливается посредством интерполяции.

Заключение

Построение калибровочных кривых открывает возможность для проведения экспериментов с аналогами межзвездных льдов. Данные ИК-спектроскопии подобных аналогов межзвездных льдов могут напрямую использоваться для сравнения с данными ИК-спектроскопии инфракрасной космической обсерваторией JWST, а также для расчета коэффициентов экстинкции веществ в различных молекулярных окружениях, необходимых для расчета лучевой концентрации этих веществ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Библиографические ссылки

- [1] *Slavicinska K., Rachid M. G., Rocha W. R. M. et al.* The hunt for formamide in interstellar ices — A toolkit of laboratory infrared spectra in astronomically relevant ice mixtures and comparisons to ISO, Spitzer, and JWST observations // *A&A.* — 2023. — Vol. 677. — P. A13.
- [2] *Rachid M. G., Rocha W. R. M., Linnartz H.* Infrared spectra of complex organic molecules in astronomically relevant ice mixtures - V. Methyl cyanide (acetonitrile) // *A&A.* — 2022. — Vol. 665. — P. A89.
- [3] *McClure M. K., Rocha W. R. M., Pontoppidan K. M. et al.* An Ice Age JWST inventory of dense molecular cloud ices // *Nature Astronomy.* — 2023. — Vol. 7, № 4. — P. 431–443.
- [4] *Gerakines P. A., Schutte W. A., Greenberg J. M., van Dishoeck E. F.* The Infrared Band Strengths of H_2O , CO and CO_2 in Laboratory Simulations of Astrophysical Ice Mixtures. — 1995. [astro-ph/9409076](#).