

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.Э. Дерзский
Физический факультет МГУ
E-mail: derzskij@physics.msu.ru

Распространенность элементов - относительное содержание элементов в космическом веществе. Часто под Р. э. подразумевают распространенность не только химических элементов, но также и их изотопов по отдельности, то есть более общее понятие - распространенность нуклидов (РН). Среднюю РН определяют по совокупности данных геохимии, космохимии и астрофизики тремя основными методами: исследованием состава образцов земного, метеоритного и лунного вещества; изучением спектров электромагнитного излучения Солнца, звезд и межзвездной среды; определением содержания нуклидов в солнечных и галактических космических лучах.

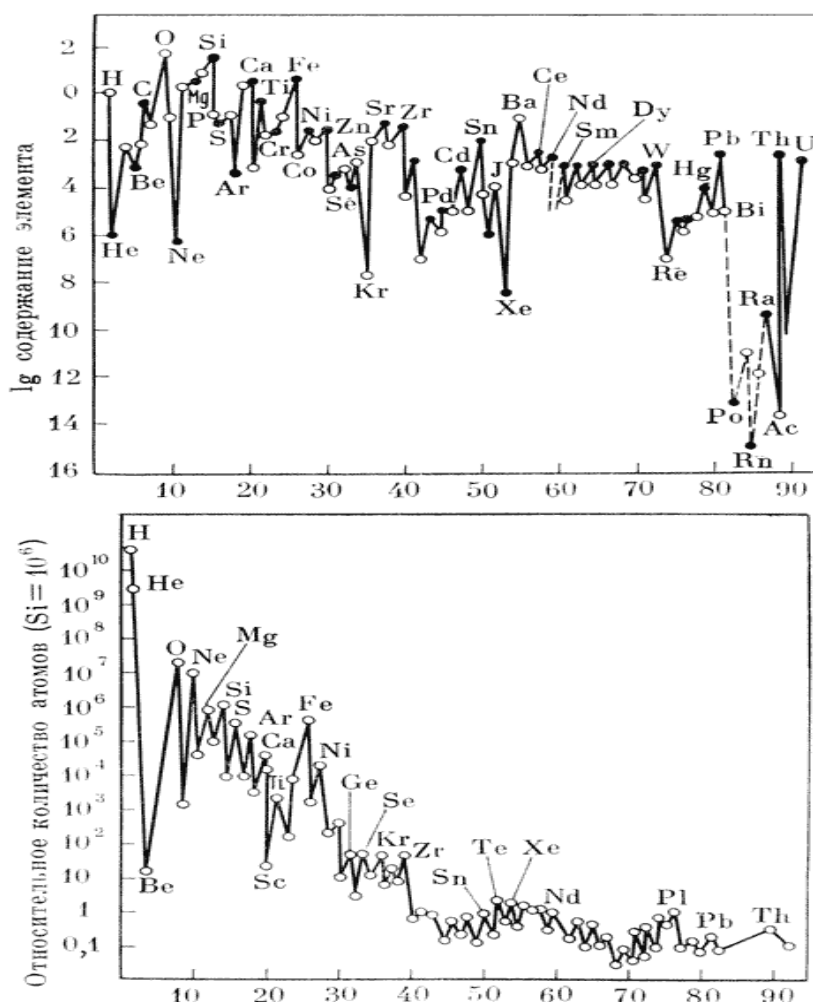


Рис. 1. Кривые распространенности элементов на Земле (верхний график) и в Солнечной системе (нижний).

Изотопный состав вещества достаточно хорошо изучен только для Солнечной системы. В Солнце заключена большая часть массы Солнечной системы. Однако спектральный анализ содержания элементов и нуклидов в

солнечной атмосфере не обладает столь большой точностью, как химические, радиохимические и масс-спектроскопические анализы состава метеоритного и планетного твердых веществ. Поэтому содержание нуклидов в метеоритах рассматривается в качестве стандарта при систематизации распространенности большинства элементов.

На рис. 1 (нижний график) в логарифмической шкале показана РН в Солнечной системе, нормированная на содержание кремния. Приведенные данные получены в основном из анализа состава метеоритов. Систематизация этих данных выполнена А. Камероном (A. Cameron) [3].

Можно выделить следующие особенности распространенности элементов:

1. Вещество во Вселенной в основном состоит из водорода - 90% всех атомов. По распространенности гелий занимает второе место, составляя ~ 10% от числа атомов водорода. Так как распространенность этих элементов вследствие их летучести на Земле, Луне и метеоритах мала, их действительное содержание в природе оценивают с привлечением косвенных данных: анализа внутреннего строения звезд и состава вещества межзвездной среды, а также выводов космологии. Водород и гелий имеют в основном первичное, космологическое происхождение.

2. Существует глубокий минимум, соответствующий литию, бериллию и бору. Их низкое содержание объясняется тем, что эти нуклиды при звездных температурах легко вступают в различные ядерные реакции.

3. Сразу за этим глубоким минимумом следует максимум, обусловленный повышенной распространенностью углерода и кислорода.

4. Вслед за кислородным максимумом идет скачкообразное падение вплоть до скандия.

5. Наблюдается резкое повышение распространенности элементов в районе железа ("железный пик").

6. После $A \sim 60$ уменьшение распространенности происходит более плавно.

7. Наблюдается заметное различие между элементами с четным и нечетным Z . Как правило, элементы с четным Z являются более распространенными.

8. Ряд ядер, так называемые обойденные ядра - ^{74}Se , ^{78}Kr , ^{92}Mo , ^{96}Ru и др., имеют распространенность на два порядка меньшую, чем соседние ядра.

Сравнивая распространенности элементов в Солнечной системе и на Земле, можно заметить резкие провалы в районе He, Ne, Ar, Kr, Xe (инертные газы) на Земле по сравнению с Солнечной системой. Это можно объяснить так: большинство элементов содержатся на Земле в химических соединениях, поэтому удерживаются на планете. Инертные газы в реакции практически не вступают, поэтому легко улетучиваются с Земли.

На рис. 2 приведена стандартная кривая РН в Солнечной системе, построенная согласно данным А. Камерона [3], четко обнаруживает указанные выше максимумы и является главной наблюдательной основой теории нуклеосинтеза в природе. Согласно этой теории, основные процессы

образования ядер в природе включают космологический нуклеосинтез в горячей Вселенной, приводящий к образованию гелия, термоядерное горение легких элементов от водорода до кремния в недрах звезд, синтезирующее элементы «железного пика», а также процессы медленного и быстрого захвата нейтронов ядрами с образованием тяжелых нуклидов вплоть до изотопов висмута и урана. Особый интерес в теории нуклеосинтеза представляет происхождение обойденных ядер. Распространенность обойденных нуклидов примерно на два порядка меньше распространенности ядер, образующихся в процессах нейтронного захвата. Синтез обойденных ядер объясняют обычно ядерными реакциями с участием протонов (p, γ), (p, n) или слабыми взаимодействиями с участием нейтрино, возникающими при взрыве сверхновой. Возможен также вклад в механизм их синтеза тройного деления ядер с вылетом обогащенных нейтронами легких заряженных частиц.

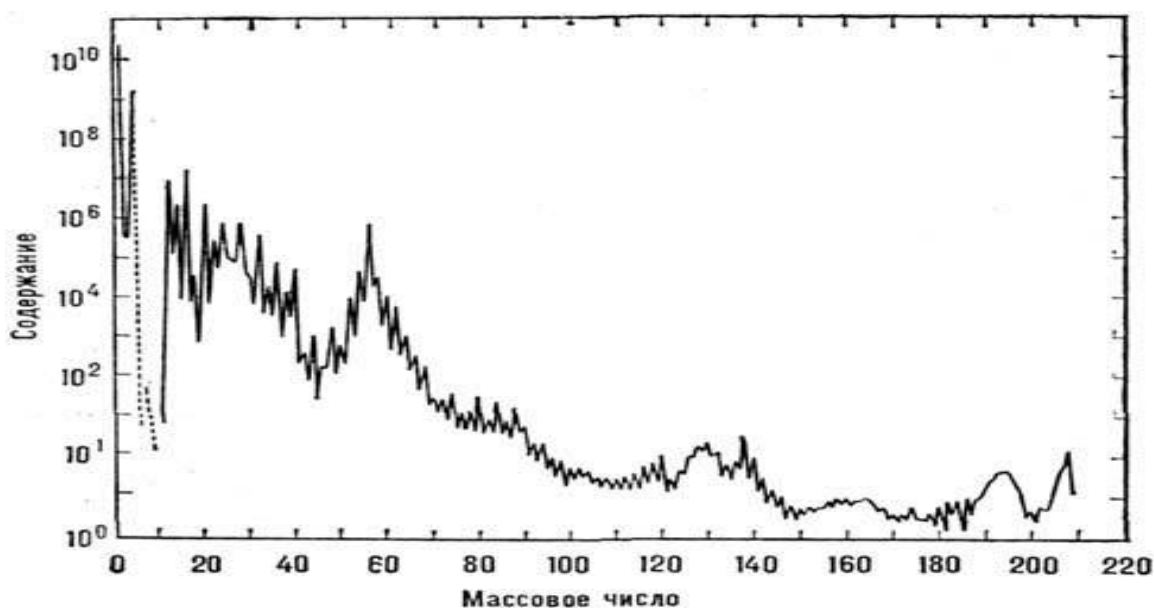


Рис. 2. Стандартная кривая распространённости нуклидов.

Несмотря на то, что состав большинства звезд, галактик и межзвездной среды в основном следует стандартной кривой РН, существуют отклонения от нее, вызванные различными физическими причинами. Старые звезды, принадлежащие гало Галактики и шаровым звездным скоплениям, содержат тяжелых элементов в 10 - 10^3 раз меньше, чем Солнечная система. Это связано с химической эволюцией галактик. Некоторые группы звезд содержат тяжелые элементы в пропорциях, существенно отличающихся от стандартных распространенностей, таковы, например, так называемые суперметаллические звезды (бариевые, CNO и др.). Существуют также обогащенные и обедненные гелием звезды, звезды с низким содержанием Са. Звезды с аномальным химическим составом составляют примерно 10% всех звезд, находящихся вблизи главной последовательности и имеющих температуру поверхности от 8000 до 20 000 К.

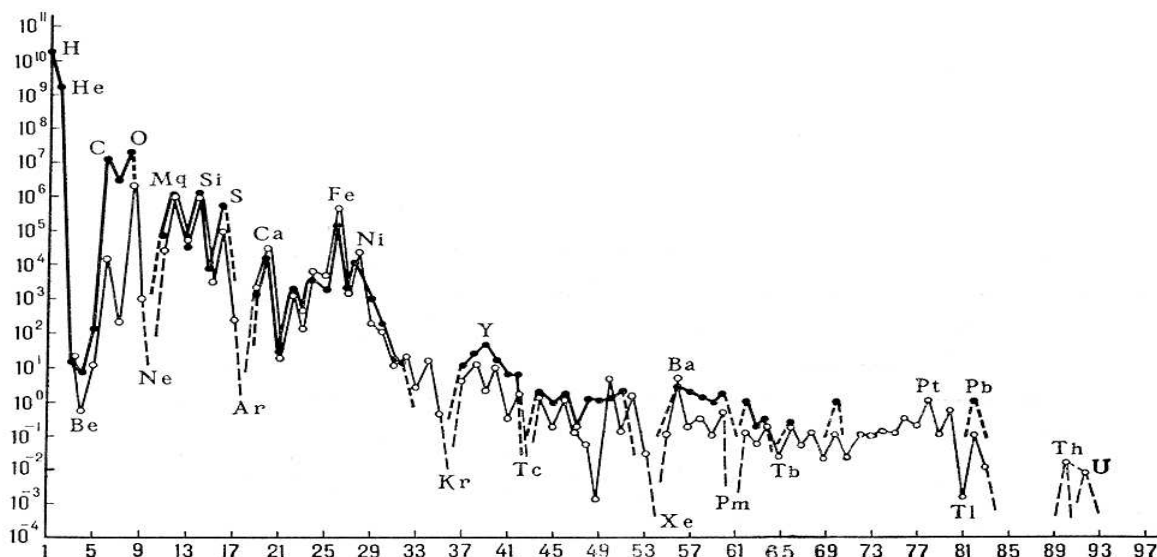


Рис. 3. Распространённость химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах); по оси абсцисс — порядковые номера элементов, по оси ординат — число атомов данного элемента на 10^6 атомов Si.

В целом картины распространённости на Земле и Солнце весьма схожи, что является дополнительным аргументом в пользу теории образования Солнечной системы из одного гигантского газопылевого облака около 4,6 млрд. лет назад.

Квazarы

От англ. quasar - QUASi stellAR radio source, т.е. похожий на звезду радиисточник. Это класс внегалактических объектов, отличающихся очень высокой светимостью и настолько малым угловым размером, что в течение нескольких лет после открытия их не удавалось отличить от точечных источников — «звезд».

Впервые квазары обнаружили в 1960 г. как радиисточники, совпадающие в оптическом диапазоне со слабыми звездообразными объектами. В 1963 г. М.Шмидт (США) доказал, что линии в их спектрах сильно смещены в красную сторону. Принимая, что это красное смещение вызвано эффектом Доплера, возникшего в результате удаления квазаров, до них определили расстояние по закону Хаббла. Долгое время квазары оставались самыми далекими объектами Вселенной, доступными для наблюдения.

Сейчас мы получаем информацию о тех квазарах, которые существовали около 10 миллиардов лет тому назад (т.е. происходит «просвечивание» Вселенной). Это смещение во времени (возможность путешествия в прошлое и получения знаний о ранних этапах эволюции Вселенной) происходит потому, что на передачу информации с помощью света могут потребоваться

миллиарды лет. Поэтому те квазары, которые излучают сейчас, можно будет наблюдать через 10 миллиардов лет, когда их излучение придет к нам.

Из известных ныне квазаров, общее число которых более 10 000, самый близкий удален на 260 000 000 световых лет, самый далекий – на 14 млрд. световых лет. Квазары, пожалуй, наиболее старые из объектов, наблюдаемых нами, т.к. с расстояния в миллиарды световых лет обычные галактики не видны ни в один телескоп. Изучая ближайшие квазары, удалось определить, что они располагаются в ядрах крупных галактик; вероятно, это характерно и для остальных квазаров. Наблюдая оптический спектр излучения квазаров, можно судить о распространенности элементов во Вселенной во времена, отстоящие от нынешних на 10-12 млрд. лет. Ниже приведен пример такого спектра.

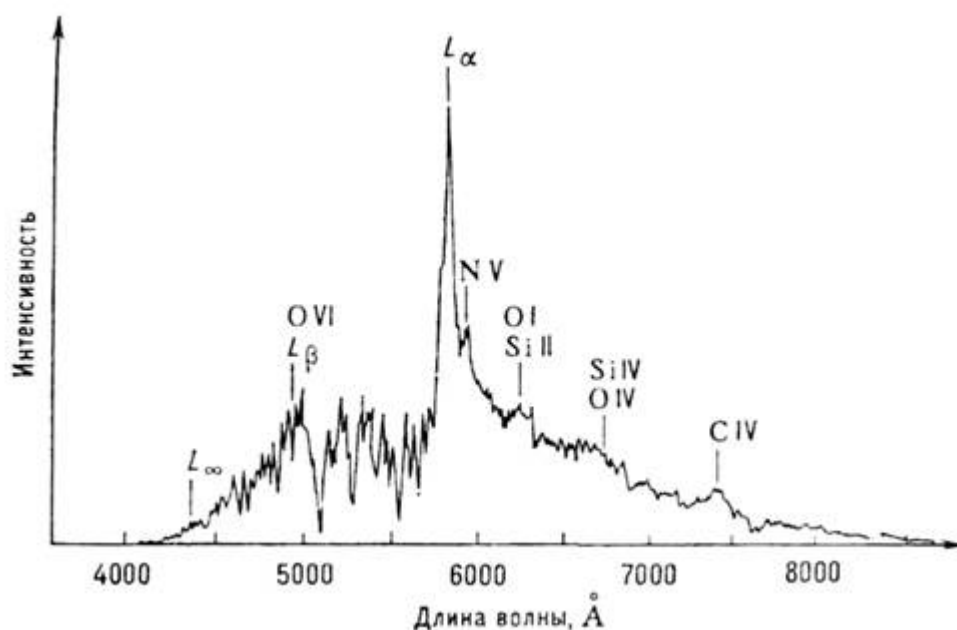


Рис. 4. Оптический спектр квазара PKS 2000-330 с красным смещением $z = 3,78$.

Литература:

1. Д. А. Франк-Каменецкий, Д. К. Надёжин, Распространенность элементов, в кн.: Физика космоса, 2 изд., М., 1986; Ядерная астрофизика, пер. с англ., М., 1986; В. П. Чечев, Я. М. Крамаровский, Синтез элементов во Вселенной, М., 1987.
2. В.Г. Сурдин, Статья «Квазар». <http://www.astronet.ru/db/msg/1162240>
3. Cameron A. G. W. Abundances of the elements in the solar system. Space Science Rev. 15, 121—146, 1973.