

## STAR DUST IN HANDS

Yu. A. SHUKOLYUKOV

*Until recently, primordial protoplanetary gas-dust material was considered as being both chemically and isotopically homogeneous. Instead, it has been found that the primary matter of Earth is isotopically heterogeneous. In meteorites, there have been discovered many specimens of mineral particles which contain large isotopic anomalies of many chemical elements, elements which were formed during the nuclear processes in stars.*

**Еще недавно считалось, что первичное протопланетное газо-пылевое облако было химически и изотопно однородным. Как оказалось, первичное вещество Земли было очень изотопно-гетерогенным. В метеоритах обнаружены минеральные частицы с резкими изотопными аномалиями многих химических элементов. Такие частицы образовались в результате ядерных процессов в звездах.**

## ЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ В РУКАХ

Ю. А. ШУКОЛЮКОВ

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

### ВВЕДЕНИЕ: СНАЧАЛА БЫЛО ВСЕ ТАК ЯСНО...

Раньше исследователи, изучавшие Солнечную систему, представляли ее начало так: планеты и Солнце образовались из очень хорошо перемешанного горячего газового облака. Ни одно твердое тело, ни одна минеральная частица в нем не могли уцелеть и должны были бы превратиться в пар, газ. Протопланетное облако, следовательно, представлялось совершенно однородным по химическому и изотопному составу. В основе такой картины лежали надежные термодинамические оценки устойчивости минеральных частиц при высокой температуре, расчеты физико-химических равновесий пар—жидкость—твердое тело, которые верны и сегодня, но при одном условии — если температура газового облака была действительно столь высокой... Прежние экспериментальные данные об изотопном составе химических элементов свидетельствовали: и земное, и внеземное (метеоритное) вещество по изотопному составу как будто не отличаются. Казалось, все ясно...

### ИСКОПАЕМЫЕ ИЗОТОПЫ

Так бы и оставались астрономы, космохимики и планетологи в заблуждении, представляя протопланетное облако химически и изотопно однородным, если бы профессору университета Беркли Дж. Рейнолдсу не попалось в руки, точнее, в его сверхчувствительный масс-спектрометр для изотопного анализа благородных газов, это странное “ископаемое”: изотоп ксенона с массовым числом 129 — потомок вымершего изотопа иода <sup>129</sup>I.

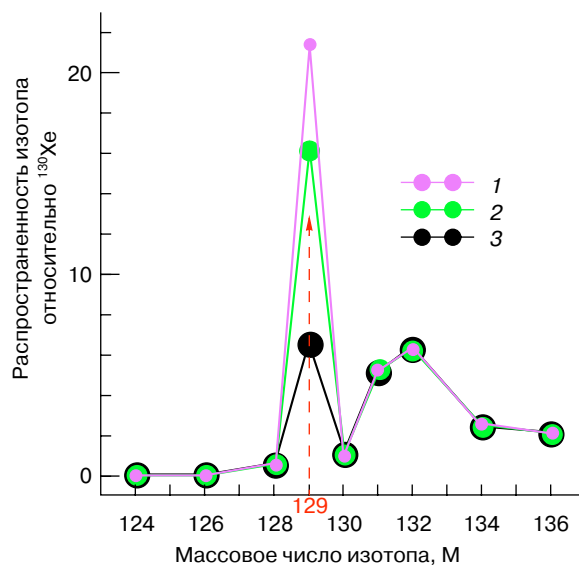
Благородный газ ксенон состоит из 9 изотопов [1, 2]. Изотопный состав ксенона был хорошо известен как для земного ксенона, так и для метеоритов. Но в одном из метеоритов Дж. Рейнолдс впервые наткнулся на огромный избыток изотопа <sup>129</sup>Xe. Вслед за ним это наблюдали во многих лабораториях. Вот пример того, насколько аномальным, необычным может быть ксенон некоторых метеоритов. Изотопный состав ксенона метеоритов-хондритов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Название “хондриты” возникло из-за того, что в метеоритах этого типа в изобилии встречаются хондры — каменные шарики размером от долей миллиметра до нескольких миллиметров — капли быстро застывшего расплава. Вещество некоторых таких метеоритов — углистых хондритов, богатых углеродом и летучими элементами, — вероятно, очень близко по составу первичному материалу Солнечной системы [3]. Названия метеоритам дают по местности, где их находят, часто это имена городов, населенных пунктов, горных хребтов или других географических объектов.

Грозная и Никольская из Метеоритной коллекции Российской Академии наук были исследованы в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН [4] (рис. 1). Причиной огромных “всплесков” распространенности изотопа  $^{129}\text{Xe}$ , как выяснилось, был  $\beta$ -распад радиоактивного иода  $^{129}\text{I}$ , превращающегося в  $^{129}\text{Xe}$  в некоторых метеоритах. Но откуда бы взяться  $^{129}\text{I}$  в метеоритах? Ведь в масштабе истории Солнечной системы с возрастом 4,6 млрд. лет [5, 6] изотоп  $^{129}\text{I}$  – очень короткоживущий изотоп. Среднее время жизни, отпущенное природой каждому его атому, – 24 миллиона лет [7]. В Солнечной системе и в самом деле сегодня нет  $^{129}\text{I}$ . Это вымерший изотоп. А ископаемый  $^{129}\text{Xe}$  – его прямой “потомок”, память о былом существовании вымершего  $^{129}\text{I}$ , подобная палеонтологическим остаткам прежней жизни на Земле. Оказалось, вымерший  $^{129}\text{I}$  не был одиноким в новообразованной Солнечной системе. Вскоре в метеоритах нашли следы еще одного подобного изотопа. Ученые Арканзасского университета П. Курода и М.В. Роуе обнаружили в метеорите-ахондрите<sup>1</sup> Пасамонте ксенон с очень странным изотопным составом, похожим на изотопный состав ксенона, образующегося при спонтанном делении урана и более тяжелых элементов. Но в этом ксеноне были и специфические особенности. Уж не ископаемый ли это потомок вымершего трансуранового элемента, например плутония, его изотопа  $^{244}\text{Pu}$ ? Ответить на этот вопрос помогло то, что еще до начала поисков  $^{244}\text{Pu}$  в метеоритах он был создан в лабораториях физиков. Среднее время существования каждого атома этого  $\alpha$ -радиоактивного изотопа 122 миллиона лет, много меньше возраста Солнечной системы (4,6 млрд. лет).

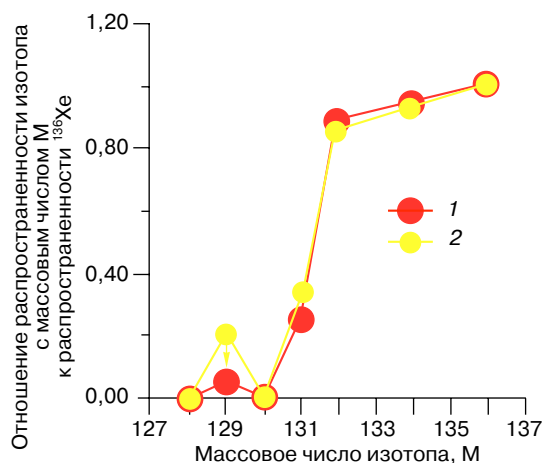
Изотоп  $^{244}\text{Pu}$  обладает способностью и к самопроизвольному делению с образованием стабильных изотопов ксенона в числе продуктов этого ядерного превращения. Нужно было сравнить изотопный состав необычного метеоритного ксенона с тем, который имеет ксенон, образующийся при самопроизвольном делении  $^{244}\text{Pu}$  в лабораториях. Все имевшееся количество  $^{244}\text{Pu}$  (0,015 г) запаляли в герметизированную ампулу и подождали 2 года. За это время накопилось хоть и очень мало ксенона – продукта спонтанного деления  $^{244}\text{Pu}$  (всего-то  $10^{-14}$  см<sup>3</sup>), – его хватило для масс-спектрометрического определения изотопного состава. Он оказался в точности таким же, что и изотопный состав открытого П. Куродой и М.В. Роуе ксенона метеорита Пасамонте. Его характерная особенность – очень большой избыток самых тяжелых изотопов  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ . В последующих экспериментах других исследователей и с другими метеоритами присутствие ископаемого ксенона – продукта деления  $^{244}\text{Pu}$  было под-

<sup>1</sup> Название “ахондриты”, то есть “лишенные хондр”, применяют к дифференцированным метеоритам, вещество которых было переплавлено на родительских телах. Обычно они состоят из базальтов.



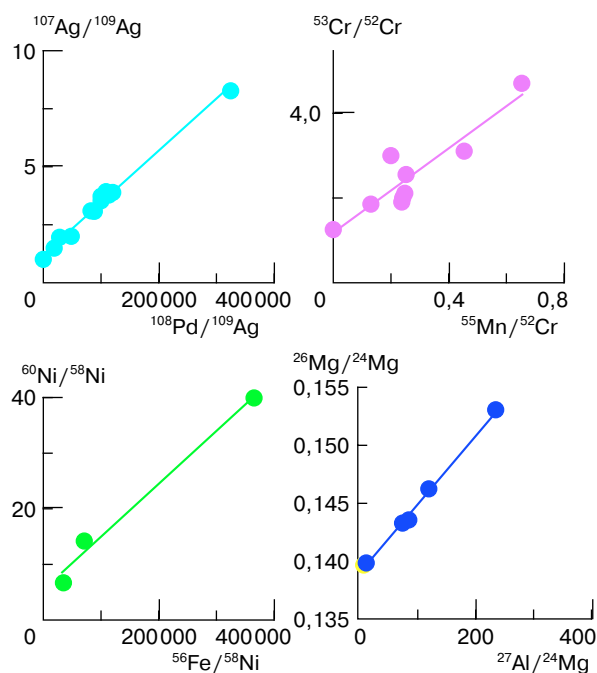
**Рис. 1.** Избыток ископаемого изотопа ксенона  $^{129}\text{Xe}$  в метеоритах. Это потомок вымершего изотопа иода  $^{129}\text{I}$ . 1 – Метеорит Грозная, 2 – Никольская, 3 – усредненные данные для метеоритов без избытка  $^{129}\text{Xe}$ .

тверждено; например, в метеорите Червоный Кут (рис. 2), впервые исследованном нами [6]. Дальнейшее исследование привело к открытию и других вымерших изотопов. Изучая железные метеориты, Дж. Вассербург с сотрудниками Калифорнийского университета в Пасадене, США [7] обнаружили в метеоритах сверхмикроскопические количества



**Рис. 2.** Ископаемые изотопы ксенона  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  и  $^{131}\text{Xe}$  в метеорите Червоный Кут (2). Эти изотопы – потомки вымершего плутония  $^{244}\text{Pu}$  (1). Изотопный состав метеоритного ксенона и ксенона, выделенного из искусственного препарата плутония, почти полностью совпадает. Это доказывает былое присутствие  $^{244}\text{Pu}$  в метеорите.

серебра, но не обычного, а обогащенного изотопом  $^{107}\text{Ag}$  (серебро состоит из изотопов  $^{107}\text{Ag}$  и  $^{109}\text{Ag}$ ). Этот изотоп мог быть ископаемым потомком вымершего “прародителя”,  $\beta$ -радиоактивного изотопа палладия  $^{107}\text{Pd}$  (среднее время жизни его атомов около 9,5 миллионов лет). Следовательно, чем больше в метеорите соотношение палладия и серебра, тем серебро должно быть богаче изотопом  $^{107}\text{Ag}$  — потомком  $\beta$ -радиоактивного палладия. Так оно и оказалось (рис. 3). Были открыты и другие вымершие изотопы. Это  $\beta$ -радиоактивные изотопы мар-



**Рис. 3.** Доказательство былого присутствия в метеоритах вымерших, короткоживущих изотопов  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  $^{26}\text{Al}$  — линейные корреляции изотопных отношений. Эти некогда существовавшие в природе изотопы оставили о себе память в метеоритах: избытки их дочерних изотопов, соответственно  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ .

ганца  $^{53}\text{Mn}$ , алюминия  $^{26}\text{Al}$  [7], железа  $^{60}\text{Fe}$ , недавно открытого в Калифорнийском университете Сан-Диего А. Шуколюковым и Г. Лугмайром. Перед исследователями встал вопрос: откуда взялись такие короткоживущие изотопы в метеоритном веществе? После тщательного теоретического анализа всех возможностей образования их при различных ядерных процессах заключение было неожиданным: вымершие изотопы не могли образоваться в Солнечной системе, они — пришельцы из космического пространства!

### РОЖДЕННЫЕ В ЗВЕЗДЕ

Каждые 100 — 200 лет на ночном небосводе появляется внезапно вспыхнувшая яркая звезда. Некоторое время она сияет необычно сильно, но ее яр-

кость быстро угасает. Такая вспышка означает, что закончила свой жизненный путь одна из звезд, озарив космическое пространство своим прощальным светом... Вместо звезды остается огромное облако газа, которое можно увидеть в телескоп.

Но какое отношение имеет все это к  $^{129}\text{I}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и другим вымершим изотопам? Оказалось, самое прямое. На ранних стадиях эволюции крупных звезд массой более 6 масс нашего Солнца в их недрах действуют созданные самой природой термоядерные реакторы. Благодаря огромным температуре и давлению в недрах больших звезд атомные ядра водорода соединяются, образуя ядра гелия. Высвобождается невообразимо большая энергия, поддерживающая ядерное горение звезды. По мере исчерпания “горючего” — водорода — температура снижается, звезда под действием силы гравитации сжимается. Это вызывает слияние все более тяжелых атомных ядер — гелия, углерода, азота. В недрах звезды выделяется огромное количество энергии. Звезда ярко сияет в космическом пространстве, щедро излучая энергию. Однако, когда запасы ядерного горючего иссякают, термоядерный источник энергии начинает “глохнуть”. Температура звездных недр падает. Поэтому мощнейшие силы гравитации теперь без помех начинают сжимать звезду. Она катастрофически быстро сокращается в объеме и уплотняется столь сильно, что теперь атомные ядра даже железа и более тяжелых элементов могут вступать в реакции нуклеосинтеза с выделением энергии. Температура быстро достигает миллиардов градусов. В ядерных реакциях внезапно образуется огромное количество нейтронов. Их поток так велик, что даже самые короткоживущие новообразованные радиоактивные ядра не успевают распасться до того, как в них вбиваются все новые и новые нейтроны. В этом взрывном  $\gamma$ -процессе нуклеосинтеза образуются все более тяжелые атомные ядра середины и конца Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

Вот здесь-то, в таком термоядерном процессе, в  $\gamma$ -процессе, и родились  $^{129}\text{I}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и другие вымершие изотопы — в самом горниле ядерной печи, в грандиозном взрыве звезды. Их рождение случилось именно потому, что в небе вспыхнула сверхновая звезда. Но как же добрались новорожденные  $^{129}\text{I}$  и  $^{244}\text{Pu}$  от сверхновой до Земли?

### ПОСЛАНЦЫ СВЕРХНОВОЙ НА ЗЕМЛЕ

Итак, 4,6 миллиарда лет назад грандиозный взрыв разбросал вещество сверхновой, включавшее  $^{129}\text{I}$  и  $^{244}\text{Pu}$ , в межзвездное пространство. Ударная волна от взрыва разнеслась в космических окрестностях сверхновой. На ее пути оказалось одно из многочисленных газопылевых облаков, разбросанных между звездами. Пронизав это облако, ударная волна “впрыснула” в него газообразное вещество сверхновой, в том числе и новорожденные  $^{129}\text{I}$  и

$^{244}\text{Pu}$ , которые рассеялись в протопланетном облаке. Она сыграла роль не только транспортного средства для  $^{129}\text{I}$  и  $^{244}\text{Pu}$ , но и спускового крючка, запустившего процесс образования Солнечной системы: под действием ударной волны облако начало сгущаться, конденсироваться. Мельчайшие пылинки стали объединяться, захватывать газы из окружающего их пространства. Из мелких частиц образовались более крупные, затем появились комки размером в сантиметры и метры, а из них сформировались зародыши будущих планет и позднее сами планеты. В этих-то процессах аккреции – собирания вещества из пыли и газа –  $^{129}\text{I}$  и  $^{244}\text{Pu}$  и попали в строительный материал, из которого сложились большие планеты. Остатки, космический “строительный мусор” в виде бесчисленных метеоритов и сегодня сохраняются в астероидном поясе между Марсом и Юпитером. Метеориты, вырвавшиеся из него на Землю, приносят нам изотопные ископаемые – продукты распада некогда существовавших в минералах  $^{129}\text{I}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и других вымерших изотопов, родившихся в ослепительном взрыве сверхновой звезды.

Стало очевидным: при образовании Солнечной системы в нее были заброшены ударными волнами от взорвавшейся неподалеку сверхновой звезды атомы многих короткоживущих изотопов. Они вошли в состав первых минералов и там оставили после себя память в виде ископаемых стабильных изотопов. Казалось бы, проблема происхождения вымерших изотопов после открытия в метеоритах их ископаемых потомков  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{26}\text{Mg}$  решена. Но... (как часто в науке возникает это слово – и обескураживающее, и стимулирующее новое продвижение вперед!) в метеоритах обнаружилась еще одна изотопная загадка.

## СВЕРХТЯЖЕЛЫЙ ЭЛЕМЕНТ В МЕТЕОРИТАХ?!

Многие исследователи, изучив некоторые метеориты – углистые хондриты, обратили внимание на избыток в них тяжелых изотопов ксенона –  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  – типичных продуктов деления. Однако их соотношения никак не соответствовали изотопному составу ксенона, образующегося при самопроизвольном делении ни хорошо известных изотопов урана или тория, ни  $^{244}\text{Pu}$ , ни искусственно синтезированных трансурановых элементов. Уж не скрыты ли в углистых хондритах следы самопроизвольного деления еще одного вымершего элемента – далекого зауранового, сверхтяжелого? Такое предположение пришлось как нельзя кстати! Как раз именно в это время физики-теоретики пришли к выводу, что в природе могут существовать очень тяжелые химические элементы. Хотя устойчивость атомных ядер быстро падает по мере утяжеления элементов, хотя среднее время жизни атомов уменьшается от 6,5 миллиардов лет для урана (92-я клетка Периодической системы элементов Д.И. Менделеева) до нескольких минут для атомов лоуренсия

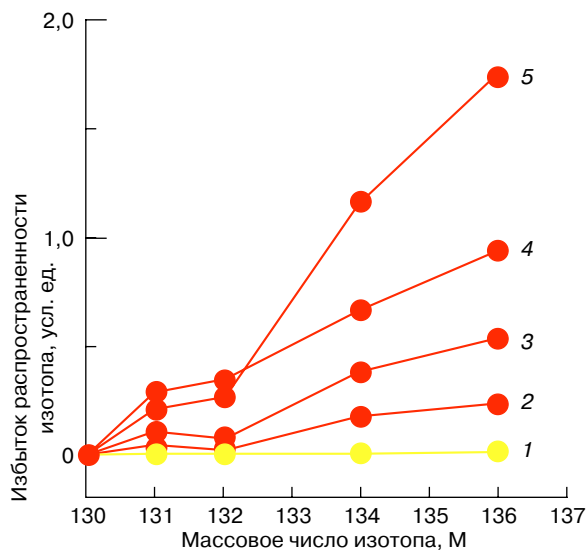
(103-я клетка), но дальше, по мере роста атомного номера гипотетических химических элементов их устойчивость, казалось, может быстро возрасти. Расчеты не исключали, что элементы № 108 – 114 могли бы оказаться достаточно стабильными [8]. Этот островок стабильности в море соседних нестабильных ядер мог возникнуть, как предполагали, из-за того, что у таких химических элементов в атомных ядрах наборы протонов и нейтронов должны быть близкими “магическим числам” 114 и 184 – так физики в полушутку называют особо прочные комбинации этих частиц в ядрах атомов. Гипотетические сверхтяжелые элементы могли бы оказаться настолько устойчивыми, что из них, благодаря очень небольшой критической массе, можно было бы делать малогабаритные ядерные энергетические установки и, увы, миниатюрные атомные бомбы огромной разрушительной силы. Физики-экспериментаторы в Дубне под Москвой под руководством Г.Н. Флерова и в Беркли, США, во главе с Г. Сиборгом с помощью гигантских ускорителей пытались создать рукотворные сверхтяжелые элементы – № 102, № 103, № 104, ..., двигаясь от одной клетки Периодической системы Д.И. Менделеева к следующей. Одновременно с физиками-ядерщиками начали охоту за сверхтяжелыми элементами и исследователи метеоритов: ведь если в метеоритах найдены доказательства существования трансуранового элемента плутония, то почему бы там же не найти изотопные следы и более тяжелых трансуранов – сверхтяжелых элементов? Совместно с нашей группой активные поиски сверхтяжелых элементов в метеоритах с помощью физических методов начал со своими сотрудниками и Г.Н. Флеров, открывший задолго до этого вместе с К.А. Петржаком само явление самопроизвольного деления ядер. Казалось, и здесь удача улыбалась исследователям: в некоторых метеоритных минералах обнаружилось видимые в микроскоп следы пролета – треки, как думали, ядер сверхтяжелых элементов, составной части галактического космического излучения. Теоретически сверхтяжелые ядра при каждом акте спонтанного деления должны были бы испускать 4 – 6 нейтронов – вроде бы и такую множественность эмиссии нейтронов из некоторых метеоритов удалось зафиксировать.

Пионером экспериментальных поисков ископаемых изотопов ксенона – продуктов спонтанного деления сверхтяжелых элементов в метеоритах – были Э. Андерс и его исследовательская группа в Чикагском университете. Вслед за ними в погоню за этими элементами включились и другие исследователи, в том числе и наша лаборатория. Основная идея состояла в том, чтобы найти и выделить минералы, где прежде концентрировался сверхтяжелый элемент, а теперь содержится его потомок – ксенон с особым изотопным составом. Однако метеоритные минералы очень тонкозернисты. Мельчайшие зерна разных минералов к тому же нередко



срастаются так, что не оторвать, а то и вырастают одно в другое. Поэтому придумали химический метод разделения минералов: для исследования одних минералов другие, ненужные минералы просто растворяют. Конечно, сказать-то это просто, а на самом-то деле для разделения множества разнообразных минералов, входящих в состав метеоритов, пришлось изобрести сложнейшие химические схемы. На минерал воздействуют последовательно при разной температуре и при различной концентрации соляной, плавиковой, азотной, хлорной кислотами, перекисью водорода. Минералы метеорита постепенно растворяются. В остающихся нерастворимых остатках исследовали ксенон.

По мере растворения вещества ксенон в оставшихся остатках обогащался тяжелыми изотопами  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$  относительно  $^{130}\text{Xe}$ , заведомо не образующегося в процессах деления. Иллюстрацией такого изменения изотопного состава ксенона при последовательном растворении образцов метеоритов-хондритов из метеоритной коллекции Российской Академии наук могут служить данные, полученные нашей научной группой [9] (рис. 4). И все же таинственный незнакомец не давался в руки исследователей и, подобно тому, как все меньшие матришки прячутся внутри крупных, скрывался во все более мелкозернистых и химически устойчивых фракциях минералов. Казалось, вот-вот можно бу-



**Рис. 4.** Увеличение избытка тяжелых изотопов ксенона по мере частичного растворения вещества метеорита-хондрита Ефремовка при действии на метеорит химических растворителей.

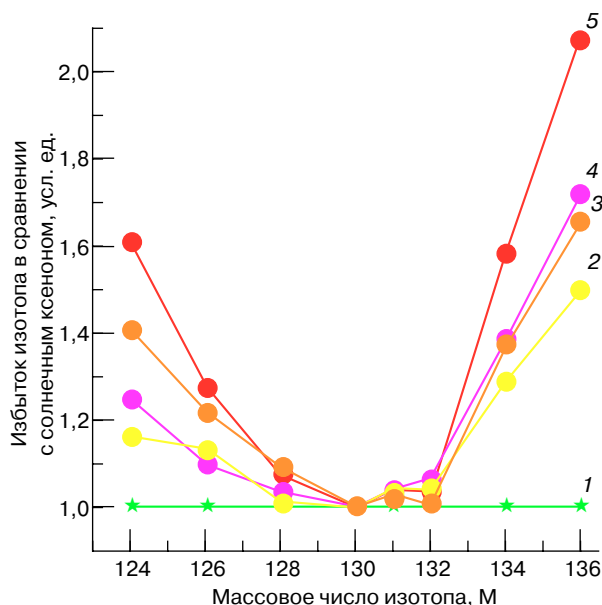
(1) Исходное вещество метеорита, (2) + HCl + HF, (3) + HCl + HF + NaOH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HNO<sub>3</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, (4) + HCl + HF + NaOH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HNO<sub>3</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + HClO<sub>4</sub>, (5) + HCl + HF + NaOH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HNO<sub>3</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + + HClO<sub>4</sub> + NaOH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HClO<sub>4</sub>.

дет выделить чистый ксенон деления сверхтяжелого элемента...

Однако природа приготовила сюрпризы охотникам за сверхтяжелыми элементами. О. Мануэл из Университета Миссури в США увидел то, что многие почему-то не замечали. Он предложил представить изотопный состав предполагаемого ксенона деления сверхтяжелого элемента не в форме изотопных соотношений с  $^{136}\text{Xe}$ , а сравнить его с изотопным составом солнечного ксенона. После этого стало совершенно очевидным, что загадочный ксенон обогащен не только тяжелыми, но всегда почти столь же сильно и легкими изотопами  $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$ ,  $^{128}\text{Xe}$  (рис. 5). Это был “нокаут” для гипотезы сверхтяжелых элементов! Ведь легкие, нейтронно-дефицитные изотопы ксенона никак не могут образоваться при делении атомных ядер — закон сохранения энергии и массы этого не позволяет. Выходит, и тяжелые изотопы образовались не при самопроизвольном делении гипотетического сверхтяжелого элемента, а в ином ядерном процессе?

#### АЛМАЗЫ, ПАДАЮЩИЕ СО ЗВЕЗД

Второй сюрприз природы касался минерала-носителя загадочного “ксенона деления сверхтяжелого элемента”. Исследуя один минерал за другим — шпиль, элементарный углерод, хромит, — Э. Андерс и



**Рис. 5.** Обогащение ксенона не только тяжелыми ( $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ ), но и легкими изотопами ( $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$ ,  $^{128}\text{Xe}$ ), опровергающее гипотезу сверхтяжелого элемента в метеоритах-хондритах.

1 – Солнечный ксенон, 2 – метеорит Грозная, 1100°C, 3 – метеорит Алленде, 800°C, 4 – метеорит Каинсаз, легкая минеральная фракция, 900°C, 5 – метеорит Ефремовка, нерастворимый остаток, 1300°C.

его сотрудники в конце-концов получили из метеорита тончайшую минеральную фракцию из очень мелких зерен размером всего  $\approx 15$  ангстрем, составляющую миллионные доли от исходной массы. Это был... алмаз! Высокотемпературный минерал, в котором сверхтяжелый элемент из-за его возможных химических свойств сравнительно легкого летучего элемента не мог сконцентрироваться.

В Открытом Университете в Милтон Кэйинз группа английских исследователей под руководством К. Пиллинджера определила изотопный состав азота из этого алмаза. Он оказался аномальным: распространенность изотопа  $^{14}\text{N}$  на целую треть выше нормальной земной распространенности. Это могло быть результатом его образования в звездах, но ни в коем случае не в Солнечной системе! В нерастворимых остатках некоторых других метеоритов — углистых хондритов были обнаружены и иные изотопные аномалии, говорящие о досолнечном, звездном их происхождении. Так, в ходе постепенного растворения вещества метеорита Марчисон выделился ксенон, снова невиданный по изотопному составу: он был обогащен изотопами  $^{128}\text{Xe}$ ,  $^{130}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  и сильно обеднен  $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$  и  $^{136}\text{Xe}$ . Это было убедительным свидетельством в пользу звездного происхождения и ксенона, и содержащих его минералов. Дело в том, что ксенон именно с таким изотопным составом должен был образоваться в s-процессе звездного синтеза элементов путем последовательного встраивания все новых и новых нейтронов в атомные ядра, но при потоке нейтронов не столь большом, как в r-процессе в сверхновой. Немецкие исследователи Ф. Бегеманн и У. Отт в Макс-Планк Институте химии в Майнце подтвердили это: в тех же самых минералах они обнаружили и криптон-s и барий-s с очень специфическим и необычным изотопным составом, который указывал на их звездное происхождение.

Оказалось, что в метеоритах есть еще один благородный газ с далеких звезд — неон. Обычно неон состоит из трех изотопов:  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$ . Американские исследователи Д.С. Блэк и Р.О. Пепин неожиданно столкнулись с новым явлением: из нагретых углистых метеоритов при  $\approx 1000^\circ\text{C}$  выделялся неон, на 99% обогащенный изотопом  $^{22}\text{Ne}$ , то есть почти чистый моноизотоп. Он скрывается в двух минеральных фазах — в углистом веществе и в высокотемпературном минерале — шпинели. Изотоп  $^{22}\text{Ne}$  не мог образоваться ни при каких ядерных реакциях в Солнечной системе. Место его рождения — звезды. Было пока не вполне ясно, звезда какого типа породила Ne-E. Но одно обстоятельство стало особенно важным: ведь изотоп  $^{22}\text{Ne}$  — главная составная часть Ne-E — образуется не сразу. Сначала в оболочке звезды обязательно возникает родительский изотоп  $^{22}\text{Na}$ , а уж при его последующем  $\beta$ -распаде рождается  $^{22}\text{Ne}$ . Среднее время жизни атомов радиоактивного  $^{22}\text{Na}$  всего 3,7 года. Он не успел бы добраться до Солнечной системы, распался бы в пу-

ти, и вместо него поступил бы в нее  $^{22}\text{Ne}$ . В Солнечной системе  $^{22}\text{Ne}$  обязательно смешался бы с другими изотопами неона. Между тем, в метеоритах он встречается почти в чистом виде. Значит, сначала  $^{22}\text{Na}$  вошел в состав углистого вещества и шпинели — носителей Ne-E в метеоритах, и уже только там превратился в  $^{22}\text{Ne}$ . Лишь после этого Ne-E попал на Землю.

В очень тугоплавких минералах метеоритов-хондритов сотрудники Чикагского университета во главе с Р.Н. Клэйтоном обнаружили необыкновенный кислород. Если в воздухе, которым мы дышим, кислород состоит из трех изотопов  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , то в некоторых минералах метеоритов содержится лишь чистый моноизотоп  $^{16}\text{O}$ . Это тоже продукт звездных ядерных реакций. Углерод в частицах карбида кремния диаметром менее 0,001 см оказался в два раза обогащенным тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$  относительно легкого  $^{12}\text{C}$ , а в азоте, содержащемся в карбиде кремния, изотопное отношение  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  в 20 раз превысило нормальное. Столь же впечатляющими оказались вариации изотопного состава кремния, неодима, кальция, титана, стронция, бария, самария в метеоритном карбиде кремния. Из всех этих данных об изотопных аномалиях в метеоритах следовало: звездные ксенон, криптон, неон, кислород, углерод, азот, кремний, кальций, титан, неодим были доставлены в рождавшуюся Солнечную систему минеральными частицами, возникшими в звезде еще до того, как образовалось само Солнце! Все это означало: звездные минералы способны сохраняться в веществе метеоритов.

## ИСКОПАЕМЫЕ МОЛЕКУЛЫ

При изучении некоторых метеоритов-хондритов исследователи столкнулись с необычным по изотопному составу водородом. В земном водороде изотопные концентрации, или распространенность двух его изотопов, легкого протия ( $^1\text{H}$ ) и тяжелого дейтерия ( $^2\text{D}$ ), соотносятся как  $\text{D}/\text{H} \approx 1,56 \cdot 10^{-4}$ . Однако при нагревании метеоритов-хондритов водород меняет свой изотопный “облик”, словно хамелеон. Например, при исследовании в нашей лаборатории одного из метеоритов-хондритов при  $700 - 900^\circ\text{C}$  неожиданно появился водород, обогащенный дейтерием почти в 5 раз в сравнении с водородом Земли. Вероятно, он содержался в скрытых в веществе метеорита частицах, происходящих из межзвездных молекулярных облаков. При дальнейшем повышении температуры из каких-то минералов стал выделяться и обедненный дейтерием газ — первичный водород Галактики с очень низким изотопным отношением  $\text{D}/\text{H}$ . Для того чтобы понять происхождение богатого дейтерием водорода, группа американских исследователей под руководством М. Эпстайна с помощью химических реагентов выделила из метеоритов вещества — носители дейтерия. Это легко растворимая в кислотах смесь органических соединений

вроде amino- и монокарбоксильных кислот и органические полимеры, или керогены, — их молекулы представляют собой объемные, пространственные цепочки с поперечными связями из соединенных атомов углерода, водорода, азота, серы, кислорода. В том, насколько сложны эти соединения, можно убедиться, взглянув на молекулярную формулу одного из них —  $C_{100}H_{48}N_{1,8}S_2O_{12}$ ! Вот здесь-то водород и оказался обогащенным тяжелым изотопом в десятки раз. Никакими ядерными реакциями или процессами изотопного фракционирования в метеоритах, да и вообще в Солнечной системе, такое избирательное обогащение дейтерием не объяснить. Но это было еще не последним странным результатом. Сегодня у исследователей метеоритов есть замечательная возможность изучать не только крупные метеориты, но и микрометеориты — мельчайшие частицы, носящиеся между планетами. Их собирают в верхних слоях атмосферы на высоте 20 км при помощи специальных самолетов. Размер каждого из таких микрометеоритов менее сотой доли миллиметра. В Вашингтонском университете в Сент-Луисе, США, Е. Циннер и его коллеги обнаружили, что в разных участках каждой отдельной межпланетной частицы — микрометеорита [8] избыток дейтерия может быть десятикратным в сравнении с изотопным составом земного водорода. При этом в тех участках, где был обнаружен такой странный водород, зафиксирована и повышенная концентрация углерода. Следовательно, водород входит в состав каких-то органических молекул, щедро обогащенных дейтерием. Это “ископаемые молекулы”! Они приходят из межзвездных газовых облаков, в которых распространность дейтерия огромна. Причина этого — ионно-молекулярные реакции при очень низкой температуре ( $<100^\circ\text{K}$ ), сопровождающиеся энергетически выгодным процессом — очень интенсивным обогащением тяжелыми изотопами одних молекул и обеднением других. Новообразованные в межзвездном облаке в сотнях реакций молекулы воды, метана, цианистого водорода, аммиака, ионы  $\text{DCO}^+$  и множество других веществ в тысячи раз обогащены дейтерием. Они конденсируются на поверхности пылинок, особенно на углеродсодержащих частицах. Такие частицы вошли в состав газопылевого протопланетного облака, и при последующей аккреции, собирании твердого вещества, часть из них оказалась в составе метеоритов, а оставшиеся продолжают носиться в межпланетном пространстве. Именно такие космические пылинки и принесли из невообразимо далеких межзвездных облаков в нашу Солнечную систему столь необычные для Земли ископаемые молекулы, меченные дейтерием.

## ФЕНИКС, ВОССТАЮЩИЙ ИЗ ПЕПЛА

Открытие и изучение изотопной гетерогенности вещества Солнечной системы — одно из крупнейших фундаментальных научных достижений нашего столетия. Удалось продвинуться далеко вперед в понимании того, из какого вещества возникли 4,6 миллиардов лет тому назад планеты. Если раньше исходное вещество Солнечной системы представлялось совершенно однородным облаком горячего газа или же газа, очень хорошо перемешанного с неотличимыми одна от другой частицами космической пыли — скучной, однообразной, серой космической пыли, то сегодня мы представляем это газопылевое облако совсем иначе. *Облако пепла угасших звезд, состоявшее из газа и разных по составу частиц самого разнообразного происхождения, — вот из чего возникла наша Солнечная система.* Изотопные аномалии в досолнечных частицах — свидетельства тех ядерных процессов в звездах, в которых эти частицы образовались. Круг замкнулся: от рождения звезд к их гибели, от ядерных бурь к пеплу, и снова к воссозданию из него, словно птица Феникс, юной звезды, начинающей с этого мига неумолимое движение к катастрофе — таков вечный путь, предначертанный веществу Галактики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Озима М., Подосек Ф.* Геохимия благородных газов. Л.: Недра, 1987.
2. *Шуколюков Ю.А., Левский Л.К.* Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М.: Атомиздат, 1972.
3. *Додд Р.Т.* Метеориты. М.: Мир, 1986.
4. *Шуколюков Ю.А., Данг Ву Минь.* Продукты деления трансураниевых элементов в космосе. М.: Наука, 1984.
5. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989.
6. *Шуколюков Ю.А.* Часы на миллиард лет. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. *Meteorites and the Early Solar System / J. F. Kerridge, M. S. Matthews, Eds.* Tucson: University of Arizona Press, 1988.
8. *Флеров Г.Н., Ильинов А.С.* На пути к сверхэлементам. М.: Педагогика, 1982.
9. *Фисенко А.В., Данг Ву Минь, Семенова Л.Ф.* и др. Изотопный состав ксенона в кислотно-нерастворимых остатках углистого хондрита Ефремовка CV3. Метеоритика. 1987. № 46. С. 58 — 72.

\* \* \*

Юрий Александрович Шуколюков, доктор химических наук, профессор, зав. лабораторией изотопной геохимии, космохимии и геохронологии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Автор 7 монографий и более 300 статей.