

## О ВОЗМОЖНОМ МНОГООБРАЗИИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ МЕТЕОРИТНЫХ АЛМАЗОВ

Устинова Г. К. (ГЕОХИ РАН)

*ustinova@dubna.net.ru*; тел.: 8 (496) 213 0267

Ключевые слова: *досолнечные реликты, астрофизические источники, досолнечный алмаз, изотопные аномалии, благородные газы, ударные волны*

### Досолнечные реликты

Одними из самых массивных объектов в Галактике являются галактические молекулярные облака, чья масса может достигать  $10^6 M_{\odot}$ . Они формируются при выбросах эволюционирующих звезд и взрывах сверхновых и состоят из смеси газа, в основном молекулярного водорода, и межзвездной пыли, являющейся смесью вещества из разных звездных источников. Естественно, что именно такие газопылевые облака сами являются наиболее активными областями звездообразования [1]. В частности, основу протосолнечного вещества составляло вещество гигантского газопылевого облака, которое за  $\sim 10$  млн. лет своего существования до коллапса в протосолнце равномерно перемешалось сверхзвуковой турбулентностью с продуктами нуклеосинтеза около десятка сверхновых [2]. В ранних конденсационных моделях [3, 4 и др.], предполагалось, что энергии гравитационного коллапса было достаточно для испарения всей досолнечной пыли, которая затем переконденсировалась при равновесных условиях в аккреционном диске, приведя к изотопной и химической гомогенизации протопланетного облака. Однако открытие многочисленных изотопных аномалий в метеоритах заставило отказаться от концепции гомогенности протопланетного облака [5]. Действительно, моделирование и анализ возможных процессов на ранней стадии Солнечной системы приводит к выводу, что протопланетное облако по своим физико-химическим условиям не было однородным [6-8]. Например, из-за радиального градиента тепловой и лучистой энергии испарение досолнечной пыли не было полным и равномерным на разных расстояниях от протосолнца. Естественно, что зерна досолнечной пыли не представительны для валового состава протосолнечного облака. Их содержание в примитивных хондритах крайне мало: наиболее распространенные зерна досолнечного алмаза составляют  $\sim 1400$  мкг/г, карбида кремния (SiC)  $\sim 14$  мкг/г, графита  $\sim 10$  мкг/г, шпинели ( $MgAl_2O_4$ )  $\sim 1$  мкг/г, корунда ( $Al_2O_3$ )  $0.05$  мкг/г, нитрида кремния ( $Si_3N_4$ )  $>0.004$  мкг/г [9]. Предположение досолнечной природы этих зерен основывается на характерных изотопных аномалиях, обусловленных особенностями изотопных составов их звездных источников. Так, обогащение большей части зерен SiC изотопами  $^{13}C$ ,  $^{14}N$ ,  $^{22}Ne$  и элементами s-процесса указывает на их происхождение в атмосферах AGB- звезд, а обогащение графита изотопами  $^{12}C$ ,  $^{15}N$ ,  $^{18}O$ ,  $^{28}Si$  и вымершими радионуклидами  $^{26}Al$ ,  $^{41}Ca$  и  $^{44}Ti$  является индикатором сверхновых и звезд Вольфа-Райе [9,10]. В то же время о происхождении наиболее распространенных в хондритах зернах досолнечного алмаза до сих пор нет единого мнения [9-12 и др.].

### Досолнечный алмаз

Медианное значение размеров метеоритного алмаза  $\sim 3$  нм (в 10-1000 раз меньше других межзвездных частиц), что не позволяет исследовать индивидуальные зерна и получать информацию о механизме их образования (все изотопные данные по метеоритным наноалмазам основаны на анализе элементов и газов, экстрагированных из миллиардов индивидуальных зерен [11]). С другой стороны, лабораторные эксперименты по синтезу искусственного наноалмаза демонстрируют крайне широкий спектр физико-химических условий (возможных сочетаний температур, давлений и исходного вещества) для осуществления этого процесса [13]. Действительно, искусственные наноалмазы получены как в процессах детонационного синтеза при высоких давлениях и температурах (ультрадисперсный наноалмаз, или UDD) [14], так и методом химического парового отложения атомов углерода при низких давлениях и умеренных температурах (CVD-процесс, который используется для эпитаксиального роста ультра нанокристаллических алмазных пленок, или UNCD) [15], а также при облучении углеродистых материалов лазером, интенсивным ультрафиолетовым излучением (УФ) и потоками частиц высоких энергий [13]. Ввиду многообразия астрофизических условий это позволяет ожидать повсеместного

распространения наноалмаза в космосе. Действительно, анализ наблюдений межзвездной экстинкции показывает, что до 10% межзвездного углерода может быть связано в межзвездном алмазе [16]. Наноалмаз с аналогичным метеоритному логнормальным распределением по размерам зафиксирован в околозвездных дисках в системах эмиссионных звезд Хербига HD97048 и Elias 1 [17], в богатых углеродом протопланетных облаках [18] и даже в межпланетной пыли [19]. Лабораторные эксперименты также показывают, что возможна нуклеация зародышей алмаза под действием УФ фотолиза межзвездных ледяных смесей ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ) в молекулярных облаках и их дальнейший рост под действием УФ в диффузных облаках [20]. Естественно, что возможное многообразие астрофизических источников находит свое отражение в многообразии разрабатываемых моделей синтеза наноалмаза в разных астрофизических процессах. Предложен ряд механизмов формирования наноалмаза в сверхновых: путем конденсации при низких давлениях (аналогично CVD-процессу) в расширяющихся газовых оболочках [21], при ударном метаморфизме графита или зерен аморфного углерода из-за высокоскоростных столкновений зерен в межзвездных ударных волнах [22], при отжиге частиц графита интенсивным УФ сверхновых II типа [23], путем трансформации углеродистых зерен при облучении высокоэнергичными ионами [24] и др. Предложены модели конденсации наноалмаза в CVD-процессе в атмосферах углеродных звезд [25] и в протосолнечном облаке [19], а в [26] рассмотрены возможности генезиса наноалмаза и его обогащения аномальным ксеноном в областях эволюции красных гигантов на стадиях создания бинарных систем углеродных звезд и последующей вспышки углеродно-детонационной сверхновой (SnI). Широкие возможности синтеза наноалмаза в космосе свидетельствуют о существовании разных популяций зерен наноалмаза, различающихся как своей структурой, обусловленной механизмом генезиса [12], так и (главное) своим изотопным составом, являющимся точным индикатором их астрофизических источников [10]. В этой связи, наибольшее внимание привлекает популяция зерен наноалмаза, содержащих аномальную компоненту ксенона *Xe-HL*, изотопные соотношения которой могут указывать на обогащенность продуктами *p*- и *r*-процессов при вспышке сверхновой SnII, хотя соотношения изотопов C являются практически солнечными [21,27,28].

### Благородные газы

Считается, что изотопные составы благородных газов в досолнечных зернах могут отражать источник их происхождения. Примерно 4% индивидуальных зерен основной популяции SiC являются носителями аномальной компоненты *Ne-E(H)*, состоящей практически из чистого  $^{22}Ne$ , который мог образоваться по реакции  $^{14}N + 2\alpha$  в гелиевой оболочке AGB-звезд. Характерным для этих звезд является *s*-процесс, приводящий к относительному обогащению четных изотопов над нечетными, что действительно наблюдается в изотопных системах Kf-S и Xe-S в отдельных зернах SiC [29]. Редкие зерна досолнечного графита являются носителями аномальной компоненты *Ne-E(L)*, тоже состоящей из практически чистого  $^{22}Ne$ , который мог образоваться при распаде *in situ* радиоактивного  $^{22}Na$  при вспышках новых [28]. Аномальная компонента *Xe-HL* (а также *Ne-HL*, *Ne-HL*, *Ar-HL* и *Kr-HL*), наряду с благородными газами солнечного состава, наблюдается только в зернах наноалмаза, указывая на их происхождение при вспышках сверхновых [27,28].

Основная проблема, с которой приходится сталкиваться при использовании данных по благородным газам – это вопрос о том, как они попали в досолнечные зерна. Естественные процессы – захват и имплантация – непосредственно связаны с механизмами генерации самих досолнечных зерен. Поскольку компонента *Xe-HL* наблюдается только в наноалмазе метеоритов и отсутствует в других досолнечных реликтах, естественно предположить, что эта компонента формировалась в тех же условиях, в которых синтезировался наноалмаз. Наиболее непротиворечивым механизмом этого процесса является одновременное с синтезом наноалмаза формирование аномальной компоненты *Xe-HL* и ее захват в условиях распространения взрывных ударных волн от вспышек сверхновых [30]. Синтез алмаза и его обогащение *Xe-HL* возможны и в экстремальных *PT*-условиях области предфронта волны, и путем нуклеации в области разрежения за фронтом волны, и при облучении углеродистых зерен частицами высоких энергий. Аномальный изотопный состав *Xe-HL* является следствием усиления жесткости спектра радиоактивных частиц и его обогащения тяжелыми ионами при ускорении в ударных волнах [31,32].

Не менее важен и вопрос о том, как благородные газы могли сохраниться в досолнечных зернах, переживших экстремальные *PT*-условия коллапса протосолнечного облака в протосолнце. Ранее при исследовании генезиса аномальных компонент *Ne-E* было показано [33,34],

что наблюдаемые диапазоны содержаний Ne- $E(H)$  в SiC (2060-35800)  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г и Ne- $E(L)$  в графитовых шариках (4240-14000)  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г хондрита Murchison [35,36], скорее всего, были образованы радиоактивными частицами, ускоренными на фронте взрывной ударной волны от вспышки последней сверхновой. Досолнечные зерна должны были неизбежно потерять как термоядерный, так и радиогенный <sup>22</sup>Ne предыдущих поколений, а также <sup>21</sup>Ne от досолнечного облучения этих зерен, поскольку температура локальных процессов в коллапсирующем протосолнечном облаке могла превышать 1500-2000 К [8, 37]. Аналогично, можно ожидать, что досолнечный наноалмаз, скорее всего, тоже потерял газы предыдущих поколений, а наблюдаемая популяция наноалмаза с аномальной компонентой Xe- $HL$  была генерирована при прохождении взрывной ударной волны от вспышки последней сверхновой [30]. По данным [32], последняя сверхновая была углеродно-детонационной сверхновой (SnI), условия при зарождении и вспышке которой могут рассматриваться, как наиболее благоприятные для синтеза наноалмаза [26]. Наконец, предлагаемая концепция согласуется с результатами исследований [19], что распространенность наноалмаза уменьшается с увеличением гелиоцентрического расстояния и, что он не содержится в пыли комет. Это позволяет поставить закономерный вопрос о том, что весь ли наноалмаз является досолнечным.

### Литература

1. Clayton D.D. // Protostars and Planets. Tucson: UAP. 1978. P. 18-52.
2. Larson R.B. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1981. 194. P. 809-826.
3. Cameron A.G.W. // Icarus. 1962. 1. P. 13-69.
4. Hoyle F. Origin of the Solar System // N.Y.; London: Acad. Press. 1963. P.63.
5. Wasserburg G.J. // Protostars and Planets II. Tucson: UAP. 1978. P. 703-737.
6. Huss G.R. // Earth, Moon and Planets. 1988. 40. P. 165-211.
7. Shu F.H., Shang H., Lee T. // Science. 1996. 271. P. 1545-1552.
8. Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. Эволюция ранней Солнечной системы (космохимические и физические аспекты) // Москва: УРСС. 2004. 261 с.
9. Huss G.R. // Antarct. Meteorite Res. 2004. 17. P. 132-152.
10. Hoppe P., Zinner E. // JGR. 2000. 105. P. 10371-10385.
11. Bernatowicz T.J., Croat T.K., Daulton T.L. // Meteorites and the Early Solar System. Tucson: UAP. 2006. P. 109-126.
12. Daulton T.L. // Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamonds // Netherlands: Springer. 2005. P. 49-62.
13. Shenderova O.A., Zhirnov V.V., Brenner D.W. // Critical reviews in solid state and materials sciences. 2002. 27. P. 227-356.
14. Greiner N.R., Philips D.S., Johnson J.D., Volk F. // Nature. 1988. 333. P. 440-442.
15. Jiao S., Sumant A., Kirk M.A., et al. // J. Applied Physics. 2001. 90. P. 118-122.
16. Lewis R.S., Anders E., Draine B.T. // Nature. 1989. 339. P. 117-121.
17. Van Kerckhoven C., Tielens A.G.G.M., Waelkens C. // Astron. Astrophys. 2002. 384. P. 568-584.
18. Hill H.G., Jones A.P., d'Hendecourt L.B. // Astron. Astrophys. 1998. 336. P. 41-44.
19. Dai Z.R., Bradley J.P., Joswiak D.J., et al. // Nature. 2002. 418. P. 157-159.
20. Kouchi A., Nakano H., Kimura Y., Kaito C. // Astrophys. J. 2005. 626. P. L129-L132.
21. Clayton D.D., Meyer B.S., Sanderson C.I., et al. // Astrophys. J. 1995. 447. P. 894-905.
22. Tielens A.G.G.M., Seab C.G., Hollenbach D.J., McKee C.F. // Astrophys. J. 1987. 319. P. L109-L113.
23. Nuth III J.A., Allen J.E. // Astrophys. Space Sci. 1992. 196. P. 117-123.
24. Ozima M., Mochizuki K. // Meteoritics. 1993. 28. P. 416-417.
25. Lewis R.S., Tang M., Wacker J.G., et al. // Nature. 1987. 326. P. 160-162.
26. Jorgensen U.G. // Nature. 1988. 332. P. 702-705.
27. Clayton D.D. // Astrophys. J. 1989. 340. P. 613-619.
28. Huss G.R., Lewis R.S. // GCA. 1995. 59. P. 115-160.
29. Nichols R.H. et al. // LPS XXIII. 1992. P. 989-990.
30. Ustinova G.K. // LPS XL. 2008. Abstr. #1007.
31. Устинова Г.К. // Геохимия. 2002. 9. P. 915-932.
32. Устинова Г.К. // Астрон. Вестник. 2007. 41. P. 252-277.
33. Лаврухина А.К., Устинова Г.К. // Астрон. Вестник. 1992. 26. P. 62-71.
34. Лаврухина А.К., Устинова Г.К. // Геохимия. 1993. 3. P. 320-331.

35. Lewis R.S., Amari S., Anders E. // Nature. 1990. 348. P. 293-298.  
36. Amari S., Anders E., Virag A., Zinner E. // Nature. 1990. 345. P. 238-240.  
37. Wasson J.T. // Protostars and Planets. Tucson: UAP. 1978. P. 555-572.
- 

*Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009*

*Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)*

*URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2009/informbul-1\\_2009/planet-29.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-29.pdf)*

*Опубликовано 1 сентября 2009 г.*

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

*При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна*