

## Протопланетные диски: эпоха великих космогонических открытий

В.В. АКИМКИН,  
кандидат физико-математических наук  
ИНАСАН

---

Сегодня благодаря труду тысяч астрофизиков и инженеров был “приподнят занавес” над прошлым Солнечной системы. С вводом в строй радиотелескопа ALMA в Чили ученые получили мощный инструмент для изучения протопланетных



дисков – мест рождения планетных систем. Новые качественные изображения протопланетных дисков существенно изменили наши знания о них, а теория формирования планет перешла в стадию, когда мы понимаем ее базовые принципы.

### ПРОТОПЛАНЕТНЫЕ ДИСКИ – КОЛЫБЕЛИ ПЛАНЕТ

Период молодости Солнечной системы завершился несколько миллиардов лет назад. Но можем ли мы заглянуть туда? Оказывается – да. Во-первых, осталось множество “улик”: метеориты, архитектура Солнечной системы, ее динамика и химический состав. Но есть и второй путь: в данный момент стадию формирования своих планетных систем

проходят другие звезды, многие из них похожи на Солнце. На этапе формирования звезду окружает плотный и холодный газопылевой диск, в котором складываются благоприятные условия для зарождения планет. Такие диски называют протопланетными. Смотри на них со стороны (см. 4-ю стр. обложки), астрофизики могут существенно обогатить наши знания в области космогонии – теории происхождения космических

тел и их систем, в частности, Солнечной системы.

Астрофизика – наука наблюдательная, и протопланетные диски – сложные объекты для наблюдений. Они компактные (сотни астрономических единиц) и холодные (вплоть до 5–10 K); к тому же стадия протопланетного диска коротка, что означает их редкую встречаемость в окрестности Солнца. Комбинация этих трех фактов (компактность, низкая температура

и относительная удаленность) предъявляет высокие требования к качеству телескопа.

Угловые размеры протопланетных дисков меньше угловой секунды, что почти в 2 тыс. раз меньше размера диска полной Луны. Подобного углового разрешения можно достичь с помощью современных оптических телескопов. Тем не менее, оптический диапазон не является оптимальным для наблюдения протопланетных дисков. Они, в отличие от их родительских звезд, имеют максимум излучения не в оптическом, а в инфракрасном диапазоне. Пограничной областью можно считать ближний ИК-диапазон с длиной волны около микрона. Изображение протопланетного диска в оптическом диапазоне – это картина отраженного света его центральной звезды, а в среднем и дальнем ИК-спектре – его собственное излучение. Для получения отчетливой картинки протопланетного диска в дальнем ИК-диапазоне ( $\lambda = 1$  мм) требуется телескоп, размер зеркала которого более километра. К счастью, интерферометрическая методика наблюдений позволяет использовать вместо одного большого телескопа пару одновременно работающих маленьких телескопов, разнесенных на

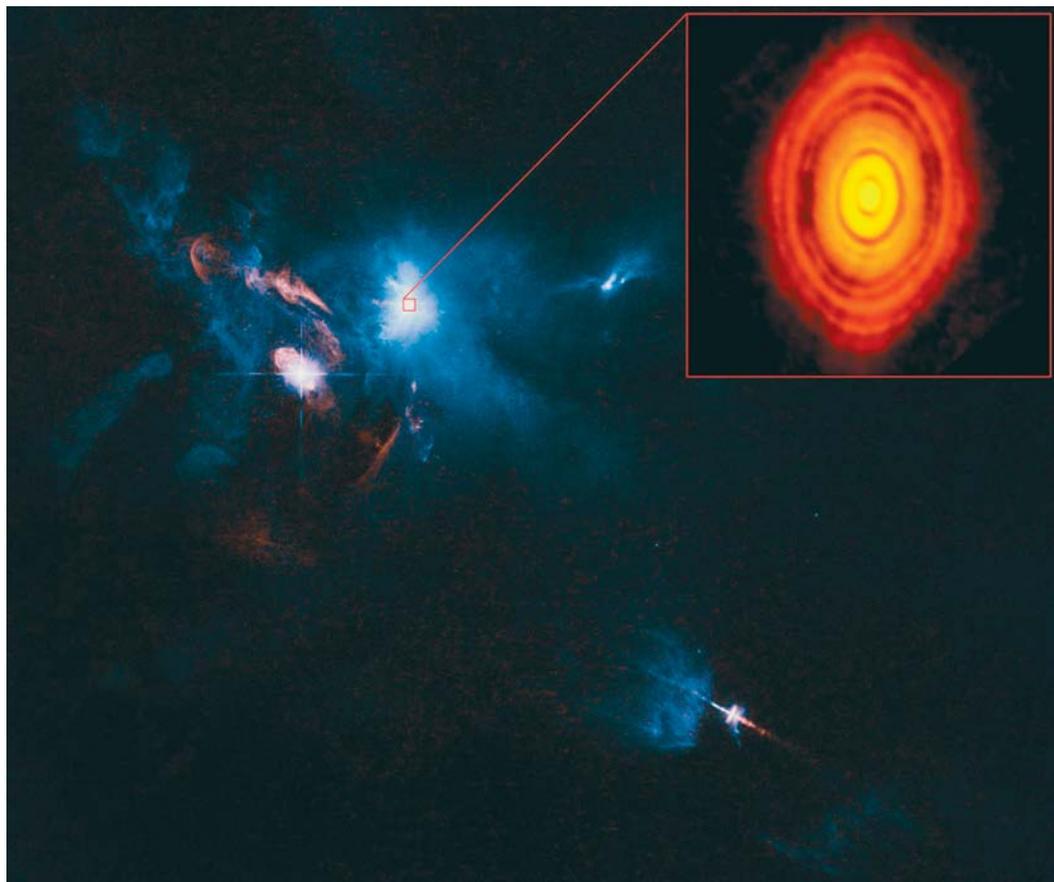
некоторое расстояние. Разрешающая способность такого комплексного инструмента-интерферометра определяется расстоянием между парой телескопов, а не диаметрами отдельных телескопов. Для получения качественного изображения требуется много таких пар телескопов, объединенных в единую сеть.

В 2013 г. астрономическое сообщество получило в свое распоряжение идеальный инструмент для наблюдения протопланетных дисков – интерферометр ALMA, который растянулся на 15 км на высокогорном пустынном плато Атакама в Чили. Он наблюдает на длинах волн от 0,3 до 10 мм на границе между дальним ИК- и радиодиапазоном. В единую сеть объединены 66 телескопов (радиоантенн), которые могут быть перемещены по площадке размером 15 км. Возможности ALMA на порядок превосходят интерферометры предыдущего поколения – таких, как NOEMA во французских Альпах или SMA на Гавайях. Скачок в чувствительности и разрешающей способности привел к качественным изменениям уровня наблюдений протопланетных дисков. Если раньше астрофизики довольствовались пространственным разрешением, соответствующим десяткам или сотням астрономических единиц, то

с ALMA стало возможным разглядеть детали размером в несколько астрономических единиц! Не удивительно, что открытия в области физики протопланетных дисков не заставили себя ждать.

#### ДИСК У HL TAU: ПЕРВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В начале 2015 г. поступили первые результаты работы ALMA. Объектами наблюдений стали астероид Юнона из Главного пояса, сильно линзированная субмиллиметровая галактика и окрестности молодой звезды HL Tau. Звезда HL Tau расположена внутри большой области звездообразования в созвездии Тельца на краю крупного молекулярного пузыря. Возраст HL Tau оценивается всего в 1 млн лет. По соседству расположены еще три молодых звезды – XZ Tau, LkHa358 и HN30, также входящие в так называемый “регион HL Tau”. Из-за большой запыленности пространства в окрестности HL Tau сама звезда не наблюдается в оптическом диапазоне, а видна лишь коническая отражательная туманность вокруг звезды. Снимки дисков в дальнем ИК-диапазоне не слишком “проигрывают” от присутствия вещества в окрестности звезды, и диск вокруг HL Tau проявляется в виде основного источника излучения. Лучшие предшествующие наблюдения имели



разрешающую способность 18 а.е., но благодаря ALMA удалось увидеть детали размером вплоть до 3,5 а.е. Самым большим удивлением стало открытие чередующихся темных и ярких concentрических колец, ранее не наблюдававшихся у подобных дисков.

Авторам исследования удалось также определить, что пыль внутри темных колец совсем не похожа на ту, которая наблюдается в межзвездной среде. В то время, как типичный размер межзвездной пылинки – менее

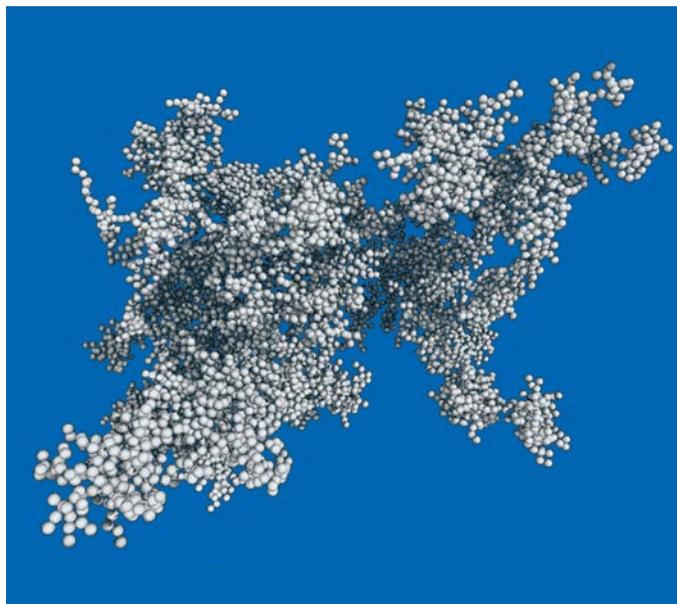
одного микрона, пыль в диске HL Tau имела размеры, сравнимые с длиной волны наблюдения, то есть составляла миллиметры. Это говорит о существенных процессах эволюции пыли внутри протопланетных дисков: в частности, о слипании пылинок и образовании крупных пылевых агрегатов. Методы наблюдения не позволяют делать выводы о присутствии более крупных пылинок, размерами в метр и более, но подобное предположение представляется вполне разумным.

*“Регион” HL Tau и ее окрестности в созвездии Тельца на расстоянии 450 св. лет от нас. На врезке – протопланетный диск вокруг звезды HL Tau. Снимок составлен из изображений, полученных в октябре 2014 г. радиотелескопом ALMA (Чили) и Космическим телескопом им. Хаббла. Фото ESO/NRAO/ NASA/ ESA.*

ПЛАНЕТЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ  
В ПРОТОПЛАНЕТНОМ ДИСКЕ

В течение нескольких месяцев после публикации данных ALMA стали появляться работы с интер-

*Пылинка из слипшихся в протопланетном диске микронных частиц, прилетевших из межзвездной среды (теоретическая модель). Из подобной пылинки могла зародиться Земля. Рисунок А. Сейзингера (Университет Тюбингена, Германия).*



претацией наблюдений HL Tau с позиций теории формирования планет. Самый логичный и сразу приходящий в голову сценарий – существование внутри темных колец протопланет, которые под действием собственной гравитации “вырыли канавки” (появились промежутки между яркими кольцами) в родительском диске. Для того чтобы прокопать широкое и глубокое кольцо в диске, планета должна быть довольно большой – с массой, сравнимой с Юпитером или Сатурном. Но гравитация планет-гигантов оказывает влияние и на соседние планеты, это может сделать систему динамически неустойчивой: планеты могут быть “разбросаны” по всему диску.

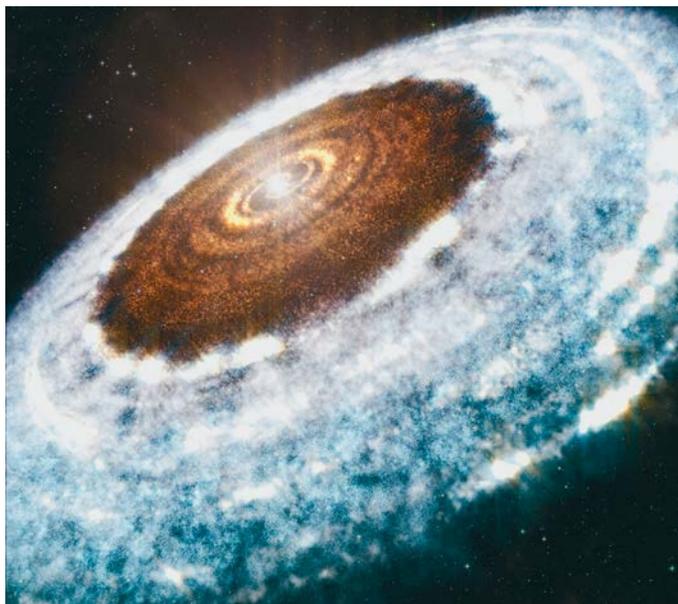
Одним из способов создать устойчивую к разбросу конфигурацию планет можно считать четкую синхронизацию орбитального вращения планет и возникновение резонансов между ними – когда на целое число оборотов одной планеты приходится целое число оборотов другой. Пример подобной синхронизации

“демонстрируют” Юпитер и Сатурн, они находятся в резонансе, равном 2 : 5, то есть на два оборота Сатурна приходится ровно пять оборотов Юпитера. Существование планетной системы в диске HL Tau является вероятным, но не единственным сценарием возникновения колец. HL Tau – довольно молодая звезда, поэтому присутствие нескольких массивных планет вокруг нее на такой ранней стадии может показаться удивительным. Массивные планеты должны заметно излучать, но пока они в HL Tau не обнаружены. Другая гипотеза основывается на наблюдениях крупных сгустков вещества в диске HL Tau на интерферометре VLA Национальной радиоастрономической обсерватории США. Эти сгустки могут быть гравитационно

неустойчивыми и только впоследствии, в ходе коллапса могут сформировать планету. При этом яркие кольца интерпретируются как места концентрации вещества, где лишь в будущем сформируются планеты, а темные кольца – промежутки между ними.

ЛИНИИ ЛЬДОВ  
КАК ГИПОТЕЗА  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕЦ

К двум теориям возникновения колец из-за крупномасштабной протопланетной активности добавилась изящная теория, опирающаяся на летучие химические соединения. Протопланетный диск, как и межзвездное вещество, на 99% состоит из газа и на 1% – из твердых углистых или силикатных пылинок. Такие пылинки тугоплавки, их сублимация



*Представление художника о линии испарения воды (граница между центральной темной областью и светлым кольцом) в протопланетном диске. Внутри “линии льдов” вода находится в газообразной форме, снаружи – в виде ледяных “мантий” на поверхности пылинок. Рисунок А. Ангелих.*

мантии, а затем начинают испаряться – это меняет аэродинамические и прочностные свойства пылинок. Снаружи, от “линии льдов”, крупные пылинки с “мантиями” быстро дрейфуют к центру диска, но, как только пылинка пересекла линию льдов и ее мантия испарилась, то скорость дрейфа падает. И тут начинает проявляться эффект, знакомый жителям крупных городов, попадающих в дорожные пробки: чем медленнее движутся машины, тем их скопление быстрее растет. По разные стороны от линии льдов скорость дрейфа пылинок разная и, следовательно, различается и их концентрация. Для наблюдателя это будет выглядеть как смена светлой полосы на темную. Присутствие нескольких летучих соединений, испаряющихся на разных расстояниях от центральной звезды, может дать объяснение наблюдаемому чередованию светлых и темных колец.

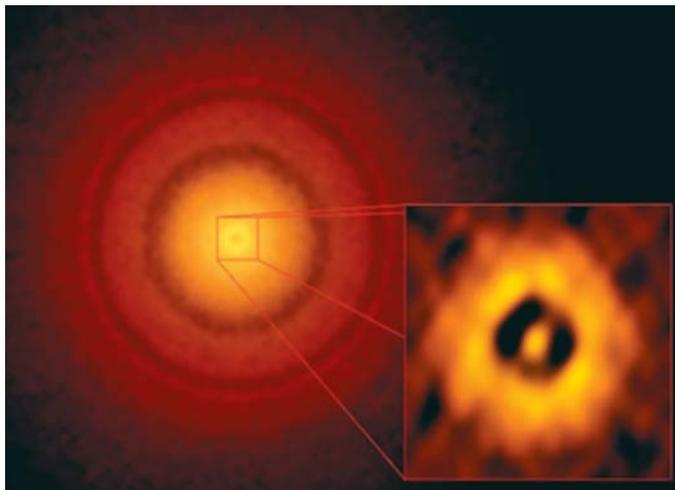
В копилке астрофизиков-теоретиков существует еще одна элегантная

(переход из твердого состояния в газообразное) происходит при 1000–1800 К. Но типичные температуры, характерные для процессов в протопланетных дисках, – ниже, и многие другие соединения могут находиться там и в твердом, и в газообразном состоянии: к самым распространенным относятся вода, угарный и углекислый газы. К примеру, при характерном протопланетном давлении температура сублимации  $\text{H}_2\text{O}$  равна приблизительно 150 К,  $\text{CO}_2$  – 80 К, а  $\text{CO}$  – 25 К. Температура в протопланетном диске увеличивается при приближении к центральной звезде: то есть около звезды она может превышать температуру сублимации, а на периферии диска – быть ниже. Поверхность, на которой температура

в диске равна температуре сублимации данного соединения, называется “линией льдов”.

Пылинки в протопланетном диске движутся и вращаются вместе с газом вокруг звезды. Однако газ, представляя собой сплошную среду, может двигаться со скоростью, отличной от скорости пылинок, что приводит к действию на них дополнительной силы аэродинамического сопротивления. Под действием этой силы пылинки начинают дрейфовать по спирали (чаще всего, внутрь, к центральной звезде) – причем тем быстрее, чем они крупнее. В ходе такого движения пылинка может пересечь одну (или несколько) “линий льдов” летучих соединений. Они сначала находятся на поверхности пылинок в виде ледяной

Кольца в пылевом диске вокруг звезды TW Нуа в созвездии Гидры на расстоянии 176 св. лет от нас. На врезке – центральная область с беспрецедентным пространственным разрешением в несколько астрономических единиц. Изображение получено в конце 2015 г. с помощью радиотелескопа ALMA (Чили). Фото ESO/NAOJ/NRAO.



гипотеза возникновения колец из-за присутствия летучих соединений. Пылинки в протопланетном диске, скорее всего, представляют собой весьма пористые структуры, образованные из слипшихся друг с другом мелких мономеров размером около микрона. Если летучего соединения мало (и оно не покрывает полностью пылинку), то его молекулам энергетически выгодно быть в точках соприкосновения мономеров. Наличие льда в этих местах делает пылинку хрупкой при столкновениях с другими, поскольку блокируется одна из возможностей диссипации энергии за счет изгиба. Пылинки эффективнее дробятся снаружи от “линии льдов”: скорость их дрейфа там ниже, а плотность выше, чем внутри от “линии льдов”. Эта гипотеза в некотором смысле противоположна описанному

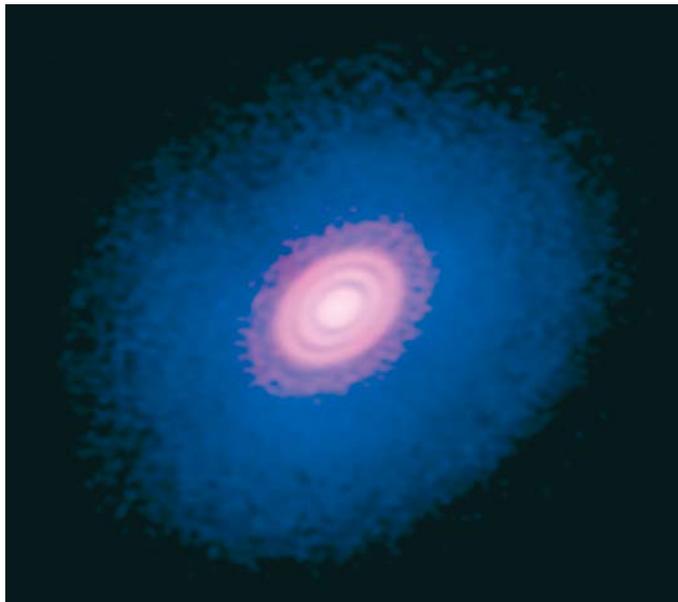
выше предположению о влиянии летучих соединений на возникновение колец в протопланетных дисках, поскольку предсказывает ровно противоположную череду темных и светлых колец.

Читатель мог обратить внимание, что астрофизики-теоретики объяснили присутствие колец в протопланетном диске как минимум четырьмя версиями. Ответ на вопрос, какая именно из гипотез верна, будет дан в ходе новых наблюдений – ведь интерферометр ALMA постоянно совершенствуется. Например, могут быть непосредственно найдены планеты в кольцах или обнаружено движение колец внутрь (или наружу). Каждый новый факт дополняет общую картину: делает одни гипотезы более вероятными, а другие отбрасывает. Возможно, правильная гипотеза еще даже не высказана.

#### ПЫЛЕВОЙ ДИСК ВОКРУГ ЗВЕЗДЫ TW НУА

Система HL Tau считается молодой даже по меркам молодых звезд: ее возраст оценивается в 1 млн лет (при среднем возрасте протопланетных дисков – около 3 млн лет). Близкая к нам звезда TW Нуа в созвездии Гидры (176 св. лет от нас) находится по другую сторону от среднего возраста – ей около 10 млн лет, поэтому стало удивительным обнаружение в ее диске нескольких колец, с первого взгляда похожих на кольца в диске HL Tau. Эта система примерно в три раза ближе к нам, чем HL Tau; она – ближайшая к Земле, где обнаружен газопылевой диск. Он виден “плашмя”, и кольца представляют собой практически идеальные окружности без каких-либо асимметричных деталей.

Во внешнем диске отчетливо видны два темных кольца – на расстоянии 22



*Газопылевой диск вокруг звезды HD163296 в созвездии Стрельца на расстоянии 400 св. лет от нас. Внутри диска обнаружены три больших темных кольца на расстоянии в 60, 100 и 160 а.е. от светила; возможно, в них формируются планеты. Красным цветом показано свечение пыли, синим – монооксида углерода. Изображение сделано в августе 2015 г. с помощью радиотелескопа ALMA (Чили). Фото ESO/NAOJ/NRAO.*

и 37 а.е. Заметны также чуть более “слабые” кольца радиусами 12, 28, 31 и 43 а.е. Примечательной особенностью TW Нуа считается яркое кольцо внутри радиуса 2,5 а.е. Здесь расположена темная область со светлым пиком в центре. Данные наблюдения впечатляют: характерный размер этих структур сравним с орбитами Земли, Марса и Главного пояса астероидов, но они видны в газопылевом диске на расстоянии 176 св. лет! Существование темной области может быть объяснено взаимодействием молодых планет с диском, при этом центральный пик яркости совпадает с положением самой звезды.

Природа колец около TW Нуа так же загадочна, как и в случае с HL Тау. Авторы открытия рассматривают все гипотезы их

образования: присутствие планет в темных кольцах; влияние линий льдов; возникновение ловушек для пылинок, в которые их тянут особенности взаимодействия с потоками газа. Ученые осторожны в проведении прямой параллели между кольцами в HL Тау и TW Нуа из-за сильно различающихся их эволюционных статусов, масс дисков и контрастов яркости колец. Независимо от того, какой именно действует механизм, новые наблюдения показали, что симметричные упорядоченные структуры, вероятно, являются важной характерной особенностью протопланетных дисков.

#### СИСТЕМА КОЛЕЦ В ДИСКЕ HD163296

Третьим диском, у которого обнаружили множественные кольца в даль-

нем ИК-диапазоне, стал диск вокруг звезды HD163296 (созвездие Стрельца, 400 св. лет от нас) возрастом около 5 млн лет. На его изображении прослеживаются три темных кольца радиусом 60, 100 и 160 а.е. в пылевой подсистеме. Важно, что группе астрофизиков во главе с Андре Изелла из Университета Райса (США) удалось получить качественное изображение диска не только в непрерывном излучении пылинок, но и в линейчатом излучении газа. В случае HL Тау подобное изображение сложно получить из-за большого количества газа в оболочке диска, закрывающего сам диск. А снимок TW Нуа имеет не такое уж высокое разрешение, как его изображение в пылевом континууме, что

затрудняет сравнение газа и пыли.

Первое, что бросается в глаза, – газовый диск HD 163296 намного обширнее, чем пылевой. Радиус газового диска около 550 а.е., а пылевого – “все-го” 250 а.е. Наиболее логичное объяснение этому состоит в том, что крупные пылинки дрейфуют по спиральным траекториям по направлению к центральной звезде. Только довольно крупные макроскопические пылинки, размером более 1 мм, способны дрейфовать, а мелкая микронная пыль, характерная для межзвездной среды, динамически сцеплена с газом и почти не движется. Поэтому расхождение размеров газовой и пылевой подсистем рассматривается как дополнительный признак роста пыли в протопланетных дисках.

Наблюдение не только пыли, но и газа в дисках позволяет использовать

дополнительные ограничения в создании гипотез их образования. Андре Изелла с соавторами отмечают, что они обнаружили пониженное содержание газа в HD 163296 в местах, совпадающих со средним (100 а.е.) и внешним (160 а.е.) кольцом в пыли. Внешнее кольцо на границе пылевого диска – неглубокое, но оно все же прослеживается. Это увеличивает вероятность того, что причиной возникновения колец может быть гравитационное влияние молодых планет. Для того, чтобы породить заметные кольца, масса планет должна быть близка к массе Сатурна; на месте же внутреннего кольца в пыли совершенно не видно какое-либо уменьшение плотности газа, что противоречит планетной гипотезе. Поэтому ученые связывают возникновение внутреннего темного кольца в диске с другими факторами – такими, как

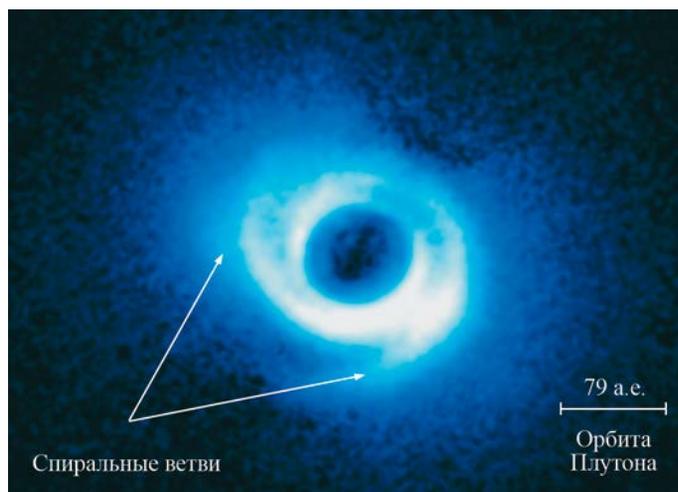
“линии льдов” и области пониженной вязкости диска. С другой стороны, внутреннее и среднее кольца удивительно похожи и объяснение их формирования двумя различными механизмами выглядит неожиданным. Подобные результаты еще раз подчеркивают отсутствие полного понимания эволюции протопланетных дисков, что и делает увлекательным это направление исследований.

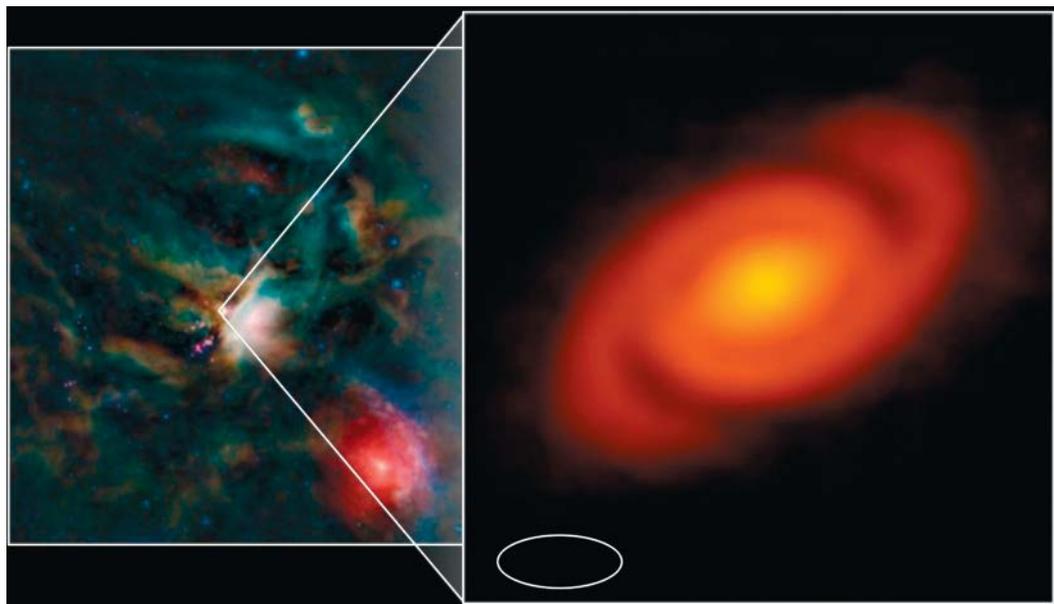
#### ЦАРСТВА СПИРАЛЕЙ

Исследования протопланетных дисков были бы не такими интересными, если бы в них наблюдались лишь идеальные концентрические кольца. Протопланетные диски со спиральными ветвями известны еще до ввода в строй интерферометра ALMA. Одним из таких примеров является диск SAO 206462 (HD135344B) в созвездии Волка. Изображение

---

*Спиральные ветви в диске размером около 100 а.е. вокруг звезды SAO 206462 (HD135344B) в созвездии Волка на расстоянии 450 св. лет от нас. Спиральные ветви могли возникнуть в результате воздействия двух планет, которые вращаются вокруг звезды на расстоянии в 55 и 126 а.е. Снимок получен в октябре 2011 г. с помощью телескопа “Subaru” в обсерватории Мауна-Кеа (Гавайи, США). Фото NAOJ.*





*Пылевой диск Elias 2-27 размером около 300 а.е. с правильной крупномасштабной спиральной структурой. На врезке для сравнения масштаба указаны размеры пояса Койпера (120–160 а.е.). Изображение получено с помощью радиотелескопа ALMA (Чили). Фото ESO/NAOJ/NRAO)/NASA.*

этого диска получено на 8,2-м телескопе “Subaru” в ближнем ИК-диапазоне. В то время как в дальнем ИК-спектре излучает, в основном, пыль, то излучение в ближнем – результат рассеяния света центральной звезды на мелких пылинках в атмосфере протопланетных дисков. Иными словами, по инфракрасному изображению можно отследить, скорее, свойства поверхности диска, а не его недр.

У диска SAO 206462, помимо двух хорошо выраженных, несимметричных спиралей, виден также внутренний темный “провал” размером в несколько десятков астрономических единиц. В появ-

лении спиралей и внутреннего провала могут быть “виновны” планеты, чье динамическое воздействие на газопылевую диск приводит к его существенной перестройке. Возможны и альтернативные объяснения: внутренний “провал” мог образоваться в результате рассеяния диска из-за его перегрева центральной звездой, а спирали – из-за гравитационной неустойчивости вещества в протопланетном диске.

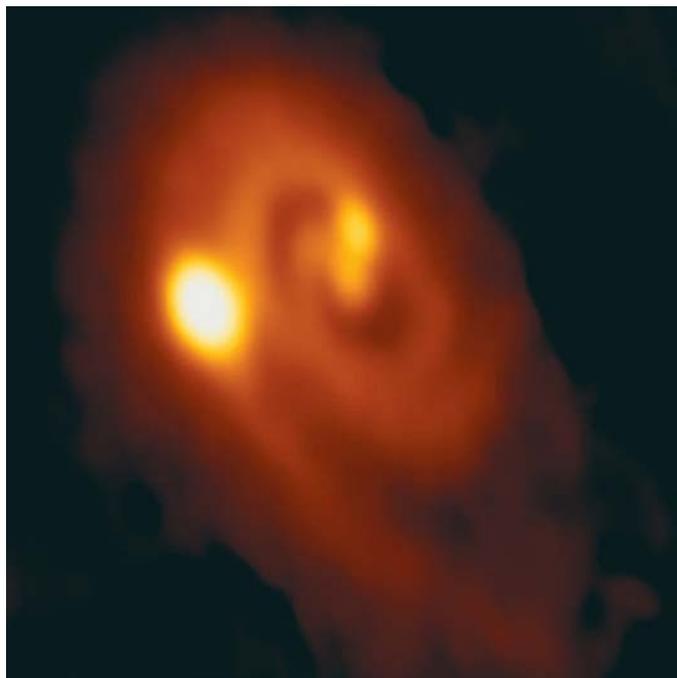
С помощью радиоинтерферометра ALMA первое детектирование спиралей состоялось для протопланетного диска Elias 2-27, расположенного в области звездообразования

ρ Змееносца. Основная масса пыли сосредоточена в самых плотных недрах диска, а не в поверхностных слоях (от которых приходит излучение в ближнем ИК-спектре). Поражает практически идеальная симметрия спиралей. Наблюдатели галактик называют подобную структуру внушающим уважение словосочетанием “grand design” (крупномасштабная упорядоченная структура). Внутри спиралей прослеживается также и темное кольцо. Команда авторов, получивших изображение Elias 2-27 на телескопе ALMA, обсуждают несколько возможных механизмов формирования спиралей (при-

*Система L1448 IRS3B из трех формирующихся звезд и вещества вокруг них в созвездии Персея на расстоянии 750 св. лет от нас. Изображение получено с помощью радиотелескопа ALMA (Чили). Фото ESO/NAOJ/NRAO.*

сутствие планет, гравитационная неустойчивость) и даже их комбинацию, оставляя вопрос интерпретации открытым.

В случае предыдущих примеров протопланетных дисков присутствие у центральной звезды некоторого компаньона звездной или планетной массы рассматривалось как возможное, но не обязательное. Для системы L1448 IRS3B в молекулярном облаке Персея существование нескольких звезд очевидно. Об этом свидетельствует само изображение этой системы: две протозвезды около центра разделены расстоянием в 61 а.е., третья протозвезда расположена в спиральном рукаве на 183 а.е. восточнее; полный радиус системы оценивается в 400 а.е. Примечательно, что система L1448 IRS3B является очень молодой, ее возраст оценивается всего в 150 тыс. лет. Система L1448 IRS3B служит идеальным примером “бурной жизни” дисков вокруг кратных звезд, и указывает на качественное отличие в истории формирования планет вокруг них, по сравнению с одиночными



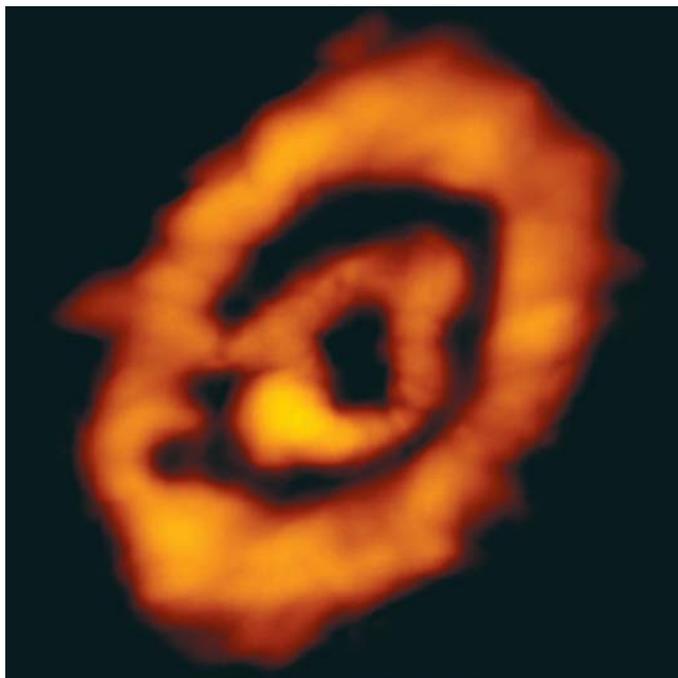
звездами. Ученые надеются, что подобные системы не слишком редки (живут довольно долго) и будут еще обнаружены с помощью ALMA, это позволит понять физику дисков вокруг кратных звезд.

#### МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОЛЬЦА В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Кольца и спирали, видимые в дальнем ИК-диапазоне, показывают распределение пылевой компоненты, доля которой в общей массе диска – всего около 1%. Основную массу диска (около 99%) составляют молекулярный водород и гелий, но их очень сложно наблюдать. В газе присутствуют и примеси, концентрация которых в 10 тыс. и более

раз меньше концентрации водорода. Их содержание по отношению к водороду значительно меняется по объему диска: например, из-за вымерзания на пылинках при низких температурах, под влиянием разрушения диссоциирующим излучением звезды или в результате участия примесей в химических реакциях. При благоприятных условиях примесные молекулы могут очень сильно излучать.

Примером такой примеси является молекулярный ион  $\text{HCO}^+$ ; его дейтерированный аналог ( $\text{DCO}^+$ ) был обнаружен с помощью ALMA в диске звезды IM Lup в созвездии Волка (500 св. лет от нас). Неожиданным оказалось то, что его распределение по диску имеет форму двух



Распределение молекулы дейтерированного формиума ( $\text{DCO}^+$ ) в диске вокруг похожей на Солнце звезды IM Lup в созвездии Волка на расстоянии 500 св. лет от нас. Кольца размерами около 90 и 300 а.е. объясняются химическими реакциями с участием молекулы  $\text{DCO}^+$  и разрушающим действием излучения центральной звезды. По данным К. Оберг, полученным с помощью радиотелескопа ALMA. Фото NRAO/ESO/NAOJ.

колец. Внутреннее кольцо астрохимии объясняют низкими температурами и присутствием большого количества молекулы CO, из которой образуется  $\text{DCO}^+$ . Ближе к звезде становится слишком жарко для формирования  $\text{DCO}^+$ , а дальше – слишком холодно для существования CO в газовой фазе. Присутствие внешнего кольца стало удивительным и говорит о том, что к периферии диска сильно падает не только температура, но и плотность. Это позволяет излучению звезды (за счет рассеяния) проникать в центральную плоскость диска, возобновлять запасы газофазного CO и снова “запускать производство”  $\text{DCO}^+$ . Кольца в линиях молекул обна-

ружены также и в других дисках (TW Hya, DM Tau). Важность таких наблюдений связана с тем, что по распределению тяжелых (дейтерированных) аналогов молекул можно многое узнать об эволюции протопланетных дисков и Солнечной системы.

#### ЦАРСТВО ХОЛОДА “ЛЕТАЮЩЕЙ ТАРЕЛКИ”

У объекта с длинным названием 2MASS J16281370-2431391 есть броское прозвище “Летающая тарелка”, смысл которого становится ясен при взгляде на его изображение. Примечательным является то, что диск виден на фоне свечения туманности  $\rho$  Змееносца и поглощает часть ее излучения: то есть Земля

в буквальном смысле находится в тени “Летающей тарелки”. Новые наблюдения на ALMA и на 30-м телескопе IRAM в Испании позволили понять, что некоторые области диска холоднее, чем фоновое излучение. Температура в них опускается до  $-266^\circ\text{C}$  – всего на  $7^\circ$  выше абсолютного нуля! Подобная температура заметно ниже, чем ожидаемая (15–20 K), и говорит о том, что наши знания о свойствах пылинок следует пересмотреть. Этот вывод важен и в контексте других наблюдений протопланетных дисков, поскольку структура и состав космических пылинок определяют их способность излучать и тем самым играют важную роль



*Часть молекулярного облака  $\rho$  Змееносца. На врезке – протопланетный диск “Летающая тарелка” (2MASS J16281370-2431391) размером около 230 а.е., находящийся на расстоянии 390 св. лет от нас. Температура пылинок в нем опускается до неожиданно низких температур ( $-266^{\circ}\text{C}$ ). Изображение сделано с помощью KTX. Фото NASA/ESA.*

при интерпретации изображений протопланетных дисков.

За последние два года (с момента публикации первых результатов работы интерферометра ALMA) наши представления о

протопланетных дисках претерпели качественные изменения, их изображения перестали быть размытыми, на них стали проявляться детали, связанные с формированием планет. Каждый новый

результат удивляет, вызывает больше вопросов, чем дает ответов. Именно это способствует прогрессу в понимании возникновения нашей (и других) планетных систем.