



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

Легкоступов М.С.

К вопросу об  
астрофизических  
исследованиях  
протопланетных дисков  
звезд

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Легкоступов М.С. К вопросу об астрофизических исследованиях протопланетных дисков звезд // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 6. 19 с. doi:[10.20948/prepr-2019-6](https://doi.org/10.20948/prepr-2019-6)  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-6>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**М.С. Легкоступов**

**К вопросу об астрофизических  
исследованиях протопланетных  
дисков звезд**

**Москва — 2019**

## **Легкоступов М.С.**

К вопросу об астрофизических исследованиях протопланетных дисков звезд

Представлен краткий аналитический обзор избранных работ по астрофизическим наблюдениям протопланетных дисков звезд. Показано, что данные астрофизических наблюдений в целом подтверждают справедливость модели протопланетных колец – модели образования планетных систем звезд, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных колец) в протопланетном диске звезд.

**Ключевые слова:** астрофизические наблюдения, протосолнечная туманность, коллапс, протопланетный диск, гравитационная неустойчивость, протопланетное кольцо, планетная система

## **Michail Semenovich Legkostupov**

To the question of astrophysical studies of protoplanetary disks of stars

A brief analytical review of selected works on astrophysical observations of protoplanetary disks of stars is presented. It is shown that the data of astrophysical studies generally confirm the validity of the model of protoplanetary rings - the model of formation of planetary systems of stars, which is based on the origin and development of large-scale gravitational instability (protoplanetary rings) in the protoplanetary disks of stars.

**Key words:** astrophysical observations, protosolar nebular, collapse, protoplanetary disk, gravitational instability, protoplanetary ring, planetary system

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 17.

## **Введение**

Более двух веков ученые не оставляют попыток получить решение величайшей и загадочной проблемы образования Солнечной планетной системы, но достоверной модели до сих пор не было получено. До настоящего времени исследования носили в основном характер теоретических работ, основанных на данных, относящихся к Солнечной системе. Но для нормального развития науки «всякое теоретическое обобщение должно непременно проверяться на опыте» (нобелевский лауреат Петр Капица). В связи с отсутствием экспериментальных результатов в этом направлении решение данной проблемы столкнулось с определенными трудностями: и все-таки эксперимент – критерий истины. Но поставить такого масштаба эксперимент у человека нет возможностей. Рождение звезд и их планетных систем находится в руках природы, и эти явления происходят и в настоящее время. Единственный способ получения экспериментальных данных – это проведение астрофизических наблюдений за рождением звезд и их планетных систем (и природа предусмотрела такую возможность).

В отличие от физики, в основе которой лежит эксперимент, связанный с произвольным изменением условий протекания явления, астрофизика основывается на наблюдениях, когда исследователь не имеет возможности влиять на ход физического процесса. При этом временной интервал, например, эволюции звезд и их планетных систем на много порядков превышает человеческую жизнь. Однако при изучении того или иного явления обычно имеется возможность наблюдать его на многих небесных объектах при различных условиях, в том числе на разных стадиях его эволюции, так что в конечном счёте астрофизика может получать достоверные экспериментальные результаты.

За последние десятилетия методы астрофизических наблюдений получили существенное развитие. Последнее достижение – это введение в строй в 2013 году радиоастрономического комплекса ALMA в чилийской пустыне Атакама, работающего в миллиметровом диапазоне радиоволн, который позволяет получать, например, изображения протопланетных дисков с высокой степенью разрешения.

В настоящее время существуют две основные модели образования планетных систем. Общепринятой моделью является модель (теория) образования планет путем аккумуляции твердых тел и частиц (модель твердотельной аккумуляции) [1, 2, 3, 4]. Альтернативными моделями являются модели крупномасштабных гравитационных неустойчивостей, например, модель протопланетных колец, основные положения которой представлены в работах [5–15]. К этому же направлению исследований принадлежат работы [16–19]. Достаточно полное описание модели протопланетных колец с обоснованием ее основных положений дано в работе [20]. В данной работе будут использоваться представления этой модели.

Астрофизические исследования последних лет привели к неожиданному открытию газопылевых колец в протопланетных дисках звезд [21–26], которые были предсказаны при разработке модели крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (модели протопланетных колец) [5–15]. Таким образом, появилась реальная возможность экспериментальной проверки достоверности теоретических моделей образования планетных систем как Солнца, так и других звезд. В проведении этих работ весьма полезными могут быть рекомендации нобелевского лауреата Петра Капицы: «Открытие возникает тогда, когда вы стремитесь из фактов сделать обобщение, когда вы ищете противоречие между отдельными фактами и существующими теориями. Это искание и надо делать исходным пунктом своей работы».

### **1. Краткий аналитический обзор избранных работ по астрофизическим наблюдениям протопланетных дисков звезд**

Гипотезы образования как Солнца и Солнечной системы, так и звездных систем солнечного типа можно разделить на две группы [2]. Первая из них восходит к классическим гипотезам Канта [27] и Лапласа [28] о совместном образовании звезды и ее планетной системы из единой газопылевой протозвездной (протосолнечной) туманности. Вторая группа гипотез предполагает раздельное образование звезды и ее протопланетного диска, из которого впоследствии формируются планеты [2].

В результате астрофизических наблюдений за молодыми звездами солнечного типа была доказана достоверность основополагающей гипотезы о совместном образовании звезды солнечного типа и ее планетной системы из единой газопылевой протозвездной (протосолнечной) туманности, а также достоверность следующих важных гипотез [29–33]:

- процесс планетообразования начинался в газопылевом протопланетном диске;
- закон вращения газопылевых протопланетных дисков близок к закону Кеплера.

По нашим представлениям, невозможно правильно описать образование планетной системы без рассмотрения его в рамках единого процесса сжатия (коллапса) протозвездной (протосолнечной) туманности [7, 12], в результате которого сформировалась звезда (Солнце), протопланетный диск и далее планетная система. Эти представления обосновываются в работе [20].

Рассмотрим результаты астрофизических исследований, в которых были получены изображения протопланетных дисков с высокой степенью разрешения, с точки зрения двух моделей образования планетных систем: модели твердотельной аккумуляции [1–4] и модели протопланетных колец [20].

Протопланетные диски на изображениях, полученных при астрофизических наблюдениях, представляют собой яркие кольцевые газопылевые структуры, разделенные темными промежутками, в которых плотность газопылевого вещества существенно понижена [21, 24, 25, 26].

Обратимся к монографии [2], где на странице 138, рис. 18 схематически представлена эволюция протопланетного диска, а в таблице 9 приведены характеристики основных стадий его эволюции в модели твердотельной аккумуляции. Видно, что ни на рисунке, ни в таблице нет данных об образовании кольцевых газопылевых структур. И это понятно: в этой модели основной процесс связан с образованием планетезималей в пылевом субдиске, который идет по всему субдиску, и не выделен определенными границами (процессы объединения образовавшихся твердых тел в протопланетном диске носят стохастический характер [2]). Таким образом, в модели твердотельной аккумуляции образования планет невозможно объяснить возникновение наблюдаемых в астрофизических исследованиях структур в протопланетных дисках звезд в виде ярких газопылевых кольцевых структур, разделенных темными промежутками.

В модели протопланетных колец [20] газопылевые кольцевые структуры в протопланетных дисках, предсказанные в работах [5–15], были названы протопланетными кольцами [7]. Возникают они в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска. Более того, в работе [12] в 2014 году было высказано предположение, что такие структуры могут быть открыты в протопланетных дисках звезд: «К сожалению, мы не можем увидеть прошлое: как происходило (или не происходило) образование протопланетных колец. Единственная надежда экспериментального подтверждения – это наблюдение образования протопланетных колец в протопланетном диске другой звезды».

Проанализируем более детально возможную связь «ярких» колец, которые наблюдаются в астрофизических исследованиях в протопланетных дисках звезд, с протопланетными кольцами модели [20].

Так как наблюдаемые в астрофизических исследованиях яркие кольца состоят из пылевых частиц и газа, то естественно в рассматриваемой модели [20] предположить, что эти кольца являются протопланетными кольцами, а образовались они в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска. В процессе гравитационной неустойчивости газопылевая среда перемещается из пространства диска, соответствующего темным промежуткам, в яркие кольца, создавая структуру ярких газопылевых колец с темными промежутками между ними. Таким образом, в этом процессе плотность газопылевой среды в ярких кольцах возрастает, а в темных промежутках между ними падает [14, 15].

Для дальнейшего сопоставления модели протопланетных колец с результатами астрофизических исследований целесообразно привести более подробные данные о протопланетных кольцах и их эволюции в рамках этой модели.

Протопланетные кольца возникают в гравитационно неустойчивой среде протопланетного диска в результате возмущения, вызванного предположительно достаточно резким уменьшением аккреционного потока газопылевого вещества из протопланетного диска на Солнце. В начальные

моменты возникновения и развития гравитационной неустойчивости среда диска представляет собой осесимметричное чередования участков диска с повышенной и пониженной плотностями. При этом газопылевая среда из областей с пониженной плотностью перемещается в области с повышенной плотностью. Следует подчеркнуть, что при этом процессе перемещаются не только пылевые частицы, но и газовая компонента среды. При дальнейшем развитии гравитационной неустойчивости области диска с повышенной плотностью среды образуют газопылевые кольца, а в промежутках между ними плотность газопылевой среды продолжает уменьшаться. В процессе эволюции протопланетные кольца сжимаются, а затем в силу их гравитационной неустойчивости [12] фрагментируют (разбиваются) на газопылевые сгущения.

Таким образом, можно выделить две стадии в эволюции протопланетных колец: первая стадия – стадия зарождения и развития протопланетных колец носит осесимметричный характер геометрии протопланетных колец; вторая стадия – это стадия фрагментации протопланетных колец (распада кольца на газопылевые сгущения) имеет существенно не осесимметричный характер геометрии (knotty rings).

Протопланетные кольца в модели протопланетных колец в заключительной фазе своего образования (перед фрагментацией на газопылевые сгущения) представляют собой осесимметричные тороидальные газопылевые кольца, плотность среды в которых возрастает от поверхности кольца к его центральной линии [7, 8, 9, 16, 17]. В промежутках между кольцами плотность газопылевой среды может достигать предельно низких значений.

На второй стадии эволюции протопланетное кольцо может состоять из отдельных газопылевых сгущений, которые взаимодействуя между собой, сталкиваясь и объединяясь, и приводят к образованию протопланеты и ее спутников (спутника).

Таким образом, в модели протопланетных колец протопланеты формируются из протопланетных колец. Поэтому на первой стадии эволюции протопланетных колец (перед фрагментацией на газопылевые сгущения) между ними не может быть никаких протопланет (планет).

Так как наблюдаемые газопылевые облака (протопланетные диски) вокруг звезд находятся на разных стадиях эволюции, то, в принципе, есть возможность наблюдать протопланетные диски различных звезд на разных стадиях их эволюции: на стадии зарождения протопланетных колец, на стадии сжатия протопланетных колец, на стадии фрагментации протопланетных колец и, наконец, на стадии формирования протопланеты.

Для проверки достоверности модели протопланетных колец [20] при проведении астрофизических наблюдений требуется получение достаточно подробных данных о фрагментации протопланетных колец на газопылевые сгущения и дальнейшем образовании из них протопланет.

Во-первых, не очевидно, что после распада протопланетного кольца на газопылевые сгущения из них должна образоваться протопланета. Вероятно, первыми работами, в которых теоретически был получен результат образования протопланеты из кольца газопылевых сгущений, являются работы Энеева-Козлова [34–37].

В работе Кривцова А.М. и Галимова Е.М. с соавторами [38] также было показано, что протопланетное кольцо при превышении пороговой концентрации частиц распадается на фрагменты (кластеры) с последующим образованием одного или двух пылевых объектов.

Протопланетное кольцо не является независимым образованием. В системе протопланетных колец оно гравитационно взаимодействует со всеми кольцами. Фрагментация протопланетного кольца и дальнейшая его эволюция зависит как от гравитационной устойчивости самого кольца, так и от воздействий на него со стороны других колец. Показателен пример из Солнечной планетной системы. Известно, что между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс астероидов. С точки зрения модели протопланетных колец пояс астероидов – это протопланетное кольцо, из которого не смогла образоваться протопланета. Одна из возможных причин такой эволюции кольца – влияние Юпитера. Таким образом, вероятно, не существует строгой определенности (или очередности) при образовании протопланет из протопланетных колец: все определяется сложным взаимодействием в системе (структуре) протопланетных колец.

Перейдем к рассмотрению результатов астрофизических исследований протопланетных дисков звезд.

### **1.1. Анализ результатов работы Carlos Carrasco-González and et al., 2016 [24]**

В данной работе исследовался протопланетный диск звезды HL Tau. Масса звезды сравнима с массой Солнца. Возраст звезды оценивается в пределах  $10^5$  –  $10^6$  лет, звезда находится на стадии Т Тельца. Астрофизические наблюдения проводились с помощью радиоастрономических комплексов ALMA и VLA.

Результаты наблюдений, представленные в этой работе, сводятся к следующему:

- на полученных изображениях высокой степени разрешения протопланетный диск звезды оказался разбит на семь ярких газопылевых колец, которые отделены друг от друга темными промежутками;

- в темных промежутках между кольцами плотность газопылевой среды существенно снижена (интенсивность излучения в сравнении с яркими кольцами падает в 3–6 раз);

- плотность газопылевой среды в кольцах возрастает с уменьшением их радиуса;

- несмотря на то, что масса звезды меньше массы Солнца ее протопланетный диск простирается на расстояние, более чем втрое превышающее расстояние от Солнца до Нептуна;



- авторы данного исследования оценивают массу пылевой компоненты протопланетного диска, равной  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  массы Солнца;
- целенаправленный поиск массивных протопланет во внешних промежутках между яркими кольцами дал отрицательный результат;
- внутреннее кольцо протопланетного диска оказалось разорванным, с образованием в месте разрыва газопылевого сгущения, масса пыли которого оценивается в 3–8 масс Земли;

По данным работы [39] у звезды HL Tau наблюдается джет (высокоскоростная ионизированная струя), что говорит о том, что протопланетный диск находится в активном аккреционном состоянии.

Как было показано, модель твердотельной аккумуляции не может привести к наблюдаемым структурам газопылевых колец. Однако, как следует из этой работы [24], предпринимаются попытки объяснить наблюдаемые структуры, используя не полную модель твердотельной аккумуляции, а лишь отдельные ее представления. Так темные промежутки между кольцами интерпретируют как пространство, которое образовавшаяся протопланета «очистила» от пыли в процессе своего формирования. Следует отметить, что модель твердотельной аккумуляции создавалась многими учеными в рамках определенных предположений и является хорошо аргументированной при сделанных предположениях. В случаях, когда используется только одно из предположений этой модели для объяснения наблюдаемых явлений, то, как правило, это только запутывает общую картину явления. В данном случае, например, сразу возникает вопрос: в силу каких законов пространство протопланетного диска так резко разделено на зоны, в одних из которых протопланеты уже образовались, а в соседних процесс образования находится только в самой начальной стадии эволюции протопланетного диска. Ответ не известен.

С другой стороны, следует подчеркнуть, что в модели протопланетных колец пространство между протопланетными кольцами в силу гравитационной неустойчивости среды диска освобождается как от пыли, так и от газовой компоненты. И на данном этапе решающую роль в проверке достоверности существующих моделей, как всегда решает эксперимент.

Ответ на многие поставленные вопросы могут дать астрофизические исследования темных промежутков между яркими газопылевыми кольцами, когда все газопылевые кольца находятся на стадии эволюции до заключительной стадии их фрагментации. Если на этой стадии эволюции в промежутках между кольцами протопланет нет и существенно понижена плотность газовой компоненты (в силу гравитационной неустойчивости из промежутков между кольцами удаляется как пыль, так и газ), то значит достаточно хорошо работает модель протопланетных колец. Если, хотя бы одно исследование достоверно покажет, что на этой стадии эволюции протопланетных колец (все газопылевые кольца находятся на стадии эволюции до заключительной стадии их фрагментации) в одном из темных промежутков

находится протопланета, то ошибочна как модель протопланетных колец, так и теория твердотельной аккумуляции – необходимо будет строить новую модель.

Авторы этой работы [24] предлагают следующий сценарий образования газопылевых колец и их эволюции в протопланетном диске HL Tau: «The presence of dark and bright concentric rings has been commonly interpreted as the result of planet formation already ongoing in the HL Tau disk. However, since HL Tau is a very young T Tauri star, the presence of several (proto)planets sufficiently massive to carve holes in the disk at this early stage is somewhat surprising. On the other hand, alternative formation mechanisms, not requiring the presence of protoplanets, seem also possible. Moreover, sensitive searches for massive (proto)planets in the outer dark rings have yielded negative results (see Section 1 and references therein). We propose a scenario in which the HL Tau disk may have not formed planets yet, but rather is in an initial stage of planet formation. Instead of being caused by (proto)planets, the dense rings could have been formed by an alternative mechanism. Our 7.0 mm data suggest that the inner rings are very dense and massive, and then they can be gravitationally unstable and fragment. It is then possible that the formation of these rings result in the formation of dense clumps within them like the one possibly detected in our 7.0 mm image. These clumps are very likely to grow in mass by accreting from their surroundings, and then they possibly represent the earliest stages of protoplanets. In this scenario, the concentric holes observed by ALMA and VLA would not be interpreted as a consequence of the presence of massive (proto)planets. Instead, planets may be just starting to form in the bright dense rings of the HL Tau disk».

Хотя авторам работы [24] неизвестен альтернативный механизм образования протопланетных колец, как, по-видимому, неизвестны и работы по модели протопланетных колец [20], в которых этот механизм описан, но этот сценарий в своих основных чертах совпадает с эволюцией протопланетного диска в рамках модели протопланетных колец. Вероятно, протопланетный диск HL Tau действительно находится на начальной стадии фрагментации (распада) внутреннего протопланетного кольца в силу его гравитационной неустойчивости, в результате которого начали образовываться газопылевые сгущения.

Авторам этой работы удалось убедительно зафиксировать уникальный момент в эволюции протопланетных колец диска, когда кольца уже сформировались, а внутреннее кольцо в силу его наибольшей плотности подверглось фрагментации. Начальная фрагментация этого кольца произошла только в одном месте. Остальные кольца на этот момент сохраняют свою осевую симметрию.

Если модель протопланетных колец верна, то на этой стадии эволюции протопланетного диска звезды HL Tau следует ждать дальнейших экспериментов, подтверждающих отсутствие протопланет в темных промежутках между яркими кольцами.

## 1.2. Анализ результатов работы Sean M. Andrews, David J. Wilner and et al., 2016 [25]

В данной работе исследовался протопланетный диск звезды TW Нуа. Масса звезды сравнима с массой Солнца, а ее возраст – около  $10^7$  лет. Звезда находится на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рассела. Астрофизические наблюдения проводились с помощью радиоастрономического комплекса ALMA.

Результаты астрофизических наблюдений, представленные в этой работе, сводятся к следующим:

- в протопланетном диске наблюдался ряд концентрических кольцеобразных подструктур в виде ярких зон и узких темных колец (шириной 1–6 а.е.) с небольшими контрастами (5-30%); авторы связывают эти особенности с концентрациями пылевой составляющей среды диска, радиальный дрейф которой был замедлен или остановлен;

- темные кольца в диске TW Нуа в сравнении с диском HL Тау значительно менее глубокие и более узкие;

- никаких значительных не осесимметричных структур не обнаружено;

- наблюдаемые упорядоченные структуры газопылевых колец открыты в двух очень разных протопланетных дисках HL Тау и TW Нуа, которые отличаются по возрасту примерно в 10 раз (диск TW Нуа является более старым и внутренне менее светящимся).

Авторы делают следующие выводы:

- полученные данные подтверждают появившуюся гипотезу, что образование хорошо упорядоченных, азимутально симметричных газопылевых подструктур является важной и преобладающей стадией в эволюции протопланетных дисков;

- «such features are the observational hallmarks of the long-speculated solution to the fundamental problem of the fast migration of disk solids that has subverted the standard theory of the planet formation process for decades».

Авторы не видят возможности объяснить наблюдаемую структуру протопланетного диска TW Нуа в рамках классической теории образования планетных систем (в рамках модели твердотельной аккумуляции) [1–4]. В работе обсуждаются различные дополнительные механизмы образования кольцевой структуры в дисках, которые разделяются по своим воздействиям на три группы: магнитные, химические и динамические воздействия.

В группу динамических воздействий входит и широко обсуждаемая гипотеза о возникновении темных колец в результате образования планет в этих областях пространства. Критические замечания по этой гипотезе представлены в разделе 1.1 данной работы.

Механизмы в группе химических воздействий приводят, как правило, к изменению агрегатного состояния среды, существенно не меняя общую концентрацию среды. Это действительно может повлиять на интенсивность излучения, но получить периодическую структуру в этом случае, вероятно,

затруднительно. Справедливость этой гипотезы может быть доказана экспериментально путем измерений состава среды и ее плотности в зависимости от радиуса протопланетного диска. Такие измерения также необходимы для проверки и всех других гипотез и предположений.

Магнитные воздействия вызывают возражения в силу их слабости, так как речь идет о перемещении планетарных масс, гравитационное взаимодействие которых значительно превосходит магнитные взаимодействия при возможных скоростях среды протопланетного диска.

В данной работе [25] не проводился анализ результатов исследований в рамках модели протопланетных колец [20]: по-видимому, авторам также неизвестны эти работы.

Вероятно, не следует повторять, как наблюдаемая в этой работе газопылевая структура протопланетного диска естественно, просто и красиво возникает в общих чертах в рамках модели протопланетных колец [20]. Однако следует остановиться на сравнении результатов этой работы с данными работы [24].

Так как протопланетный диск TW Нуа на порядок старше диска HL Тау, то следовало ожидать, что наблюдаемая структура ярких колец с темными промежутками между ними в диске TW Нуа будет находиться на более поздней стадии эволюции, чем в диске HL Тау. В действительности наблюдается противоположная картина: структура ярких колец с темными промежутками между ними в диске TW Нуа соответствует более ранней стадии эволюции, чем в диске HL Тау. Протопланетные кольца в диске TW Нуа, вероятно, начинают только зарождаться, поэтому контраст между яркими и темными кольцами выражен незначительно. Так как плотность среды диска возрастает с уменьшением радиуса, то гравитационная неустойчивость во внутренних кольцах наступает раньше, и они формируются с опережением по времени. Более глубокий первый промежуток перед первым ярким кольцом в модели протопланетных колец, вероятно, обусловлен именно этим обстоятельством.

Вопрос: почему гравитационная неустойчивость в диске TW Нуа реализовалась значительно позднее, чем в диске HL Тау, на данный момент остается открытым.

Если модель протопланетных дисков верна, то для протопланетного диска TW Нуа также следует ожидать подтверждения отсутствия планет в темных промежутках между яркими кольцами.

### **1.3. Анализ результатов работы Mayra Osorio, Guillem Anglada, Carlos Carrasco-González and et al., 2014 [21]**

В данной работе исследовался протопланетный диск звезды HD 169142. Масса звезды составляет две массы Солнца, а возраст –  $5,4 \cdot 10^6$  лет. Звезда находится на стадии Т Тельца. Астрофизические наблюдения проводились с помощью радиоастрономического комплекса VLA.

Результаты астрофизических наблюдений, представленные в этой работе, сводятся к следующему:

- протопланетный диск HD 169142 наблюдается в виде трех газопылевых колец с двумя промежутками между ними, в которых пыль практически отсутствует;

- первое кольцо расположено в границах по радиусу  $\approx 0,5 - 0,6$  а.е.; второе кольцо –  $\approx 28 - 42$  а.е.; третье кольцо –  $\approx 67 - 240$  а.е.;

- первый промежуток расположен в границах по радиусу  $\approx 0,6 - 28$  а.е.; второй промежуток –  $\approx 42 - 67$  а.е.;

- второе кольцо имеет более сильное излучение и азимутальную асимметрию в виде двух газопылевых сгущений, вытянутых вдоль центральной линии кольца;

- обнаружен компактный источник излучения в середине второго промежутка (кольцевого зазора).

В данной работе [21] предложена модель излучения, которая включает в себя излучение звезды и протопланетного диска. Показано, что результаты расчета по этой модели находятся в хорошем согласии с данными наблюдений.

В работе делаются ссылки на различные предлагаемые механизмы образования кольцевой структуры в протопланетном диске: фотоиспарение, рост частиц пыли, образование протопланет (физические процессы образования планет не указаны).

Авторы делают следующие выводы:

- предполагается, что компактный источник излучения в середине второго промежутка связан с нахождением в этом месте протопланеты массой  $0,6$  массы Юпитера, а именно: с излучением пыли, которую эта протопланта аккумулирует на себя;

- распределение пыли в трех кольцах с промежутками между ними позволяет предположить, что диск HD 169142 разрушается как минимум двумя планетами или субзвездными объектами.

В данной работе не проводился анализ результатов исследований в рамках модели протопланетных колец [20]: по-видимому, авторам также неизвестны эти работы.

Рассмотрим результаты астрофизических наблюдений, представленные в этой работе, с точки зрения модели протопланетных колец [20].

В отличие от модели (теории) твердотельной аккумуляции [1–4] в модели протопланетных колец [20]:

- нет необходимости изобретать физические процессы, которые могли бы привести к образованию структуры газопылевых колец с промежутками между ними: в модели протопланетных колец такая структура возникает в результате естественного действия фундаментального принципа – принципа гравитационной неустойчивости;

- нет необходимости встраивать представления модели твердотельной аккумуляции в структуру газопылевых колец для образования протопланет в промежутках между кольцами: в модели протопланетных колец протопланеты образуются из протопланетных колец.

В работе [21] приведены подробные данные о структуре второго кольца. По представлениям модели протопланетных колец второе кольцо находится на заключительной стадии образования протопланеты, когда из двух газопылевых сгущений, которые отчетливо видны на изображении, должна образоваться протопланета и ее спутники (или спутник). В рамках модели протопланетных колец, вероятно, на этой стадии эволюции протопланетного диска из других протопланетных колец, которые присутствовали на более ранних стадиях эволюции, протопланеты уже образовались и могут находиться в промежутках между кольцами. Следует подчеркнуть, что при образовании протопланеты из протопланетного кольца видимая ширина промежутка между оставшимися кольцами возрастает. Ширина второго промежутка между газопылевыми кольцами составляет 25 а.е. Для сравнения, это расстояние превышает расстояние от Солнца до планеты Уран, на котором в Солнечной системе размещается семь планет. Поэтому предположение авторов работы [21], что компактный источник излучения в середине второго промежутка связан с нахождением в этом месте протопланеты, не противоречит представлениям модели протопланетных колец. Ширина первого промежутка между газопылевыми кольцами сравнима со вторым промежутком. Поэтому не исключено, что и в первом промежутке тоже сформировалась протопланета (или протопланеты) из располагавшихся там ранее протопланетных колец.

Исходя из представлений модели протопланетных дисков, следует ожидать достоверных данных об открытиях протопланет в промежутках между кольцами протопланетного диска HD 169142.

#### **1.4. Анализ результатов работы D. Fedele, M. Tazzari, R. Booth and et al., 2018 [26]**

В данной работе исследовался протопланетный диск AS 209 звезды *Ophiuchus*. Масса звезды составляет 0,9 массы Солнца, а возраст –  $(0,5-1) \cdot 10^6$  лет. Звезда находится на стадии Т Тельца. Астрофизические наблюдения проводились с помощью радиоастрономического комплекса ALMA.

Результаты астрофизических наблюдений, представленные в этой работе, сводятся к следующим:

- излучение пылевой среды диска проявляется на изображениях в виде яркого центрального ядра и двух колец более слабой интенсивности на радиусах 75 а.е. и 130 а.е., которые разделены двумя темными промежутками на радиусах 62 а.е. и 103 а.е.;

- первое кольцо имеет ширину, равную  $\approx 18$  а.е., второе кольцо –  $\approx 22$  а.е.;

- внутренний промежуток шириной  $\approx 16$  а.е. частично заполнен пылевыми частицами миллиметрового размера, внешний – шириной  $\approx 30$  а.е. в целом свободен от пыли.

- осесимметричность ярких колец детально, например, как в работах [21, 24], не исследовалась.

В данной работе также представлены результаты 3D гидродинамического моделирования (FARGO-3D) взаимодействия планета-диск. Показано, что

внешний пылевой промежуток (разрыв) согласуется с наличием гигантской планеты (масса планеты составляет  $\sim 0,7$  массы Сатурна). Моделирование также показывает, что эта же планета может быть источником внутреннего промежутка (разрыва) при  $r = 62$  а.е. Исследована возможность второго сценария, при котором появляется вторая планета внутри внутреннего промежутка. Второй сценарий может быть реализован при массе внутренней планеты меньше 0,1 массы Юпитера.

В работе [26] также было высказано предположение, что протопланеты могут быть сформированы в результате процессов, связанных с гравитационной нестабильностью среды протопланетного диска, но конкретный механизм при этом не был указан.

Рассмотрим результаты астрофизических наблюдений, представленные в этой работе, исходя из представлений модели протопланетных колец [20]. Общая структура газопылевых колец протопланетного диска AS 209 также соответствует представлениям модели протопланетных колец. Однако определить на какой стадии эволюции находится наблюдаемая структура протопланетных колец достаточно сложно, так как отсутствуют необходимые, более подробные данные о симметрии протопланетных колец. Исходя из ширины промежутков между кольцами, структура протопланетных колец протопланетного диска AS 209 должна находиться на стадии фрагментации колец, а из отдельных протопланетных колец, возможно, могли уже сформироваться протопланеты (в большей степени это относится к внешнему пылевому промежутку). Но в этом случае, по крайней мере, некоторые из наблюдаемых протопланетных колец должны были иметь симметрию отличную от осевой.

Следует остановиться на вопросе о проведении математического моделирования взаимодействий в рамках модели протопланетных колец. С позиций модели протопланетных колец проводить математическое моделирование взаимодействия планета-диск не имеет смысла: в этой модели известен механизм образования газопылевых колец – это гравитационная неустойчивость протопланетного диска [20]. В этой модели целесообразно проводить математическое моделирование образования структуры гравитационно неустойчивых протопланетных колец и дальнейшей их эволюции (фрагментации протопланетных колец, образования протопланет), включая и математическое моделирование взаимодействий протопланета (протопланеты)-система гравитационно неустойчивых протопланетных колец.

## **2. Сравнительный анализ и обсуждение результатов работ [21, 24, 25, 26]**

Основные результаты астрофизических наблюдений в рассмотренных работах [21, 24, 25, 26] в общем виде могут быть сведены к следующим:

- все исследованные протопланетные диски имели структуру ярких колец с темными промежутками между ними;

- в ярких кольцах плотность пылевой компоненты повышена, в темных промежутках плотность пылевой компоненты снижена, а в отдельных случаях практически отсутствует;

- ширина ярких колец и темных промежутков между ними отличается у разных дисков в широком диапазоне от единиц а.е. до десятков а.е.;

- структура ярких колец протопланетных дисков меняется от осесимметричных до фрагментированных на отдельные газопылевые сгущения;

- в работе [24] целенаправленный поиск массивных протопланет во внешних промежутках между яркими кольцами дал отрицательный результат;

- в работе [21] обнаружен компактный источник излучения в середине второго промежутка (кольцевого зазора), который идентифицируется с нахождением в этом месте протопланеты с массой, равной 0,6 массы Юпитера.

В рассмотренных работах высказывается точка зрения, что наблюдаемые структуры в виде ярких газопылевых колец с темными промежутками между ними являются закономерными явлениями в эволюции протопланетных дисков звезд.

Результаты исследований, как правило, анализируются в представлениях теории твердотельной аккумуляции [1–4]. Так как наблюдаемые явления в рамках этой теории (твердотельной аккумуляции) объяснить не представляется возможным, то предлагаются различные дополнительные гипотезы для объяснения этих результатов, но при этом оставаясь в рамках теории твердотельной аккумуляции.

В работах [5–15] предложена модель крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (модель протопланетных колец), в основе которой лежит фундаментальный принцип гравитационной неустойчивости (в работах [5–15] этот принцип используется в форме Джинса [40]). В результате действия этого принципа происходит с одной стороны коллапс (сжатие) протосолнечной туманности с образованием звезды, а с другой стороны происходит противоположное явление – распад протопланетного диска на протопланетные кольца, из которых в дальнейшем образуются протопланеты.

В предыдущих разделах были рассмотрены результаты астрофизических наблюдений, представленные в работах [21, 24, 25, 26], в рамках модели протопланетных колец, следуя работе [20]. Результаты сравнения астрофизических наблюдений [21, 24, 25, 26] и теоретических работ [5–15, 20] дают основания полагать, что наблюдаемая структура протопланетных дисков в виде ярких колец с темными промежутками между ними подтверждает основные положения модели протопланетных колец [20]. В рамках этой модели результаты астрофизических наблюдений, представленные в работах [21, 24, 25, 26], можно классифицировать в следующей последовательности по отношению к эволюции структуры протопланетных колец:

- структура протопланетных колец в астрофизических наблюдениях работы [25] соответствует начальной стадии зарождения протопланетных



колец; в этом случае в темных промежутках между кольцами не следует ожидать присутствия протопланет;

- структура протопланетных колец в астрофизических наблюдениях работы [24] соответствует начальной стадии фрагментации протопланетных колец: зафиксирован разрыв первого протопланетного кольца с образованием одного газопылевого сгущения; в этом случае в темных промежутках между кольцами также не следует ожидать присутствия протопланет;

- структура протопланетных колец в астрофизических наблюдениях работы [21], вероятно, соответствует заключительной стадии фрагментации протопланетных колец: зафиксирована фрагментация яркого газопылевого протопланетного кольца на два газопылевых сгущения; в этом случае в темных промежутках между кольцами следует ожидать присутствия протопланет, которые образовались из ранее находившихся в этих местах протопланетных колец;

- структура протопланетных колец в астрофизических наблюдениях работы [26], вероятно, соответствует более ранней стадии эволюции, по сравнению со структурой, наблюдаемой в работе [21]; в этом случае, по-видимому, следует ожидать обнаружения асимметрии в некоторых газопылевых кольцах диска AS 209 при более детальных исследованиях и, возможно, присутствия протопланет в темных промежутках.

В работе [12], было высказано предположение, что гравитационная неустойчивость протопланетного диска и образование протопланетных колец могут возникнуть на стадии активного аккреционного процесса. Астрофизические наблюдения протопланетных дисков звезд [24] подтверждают справедливость этого предположения.

### **Заключение**

В настоящей работе приведены результаты сравнения данных астрофизических наблюдений [21, 24, 25, 26] и теоретических работ [5–15, 20], которые дают основания полагать, что наблюдаемые структуры протопланетных дисков в виде ярких колец с темными промежутками между ними подтверждают основные положения модели протопланетных колец [20].

В заключение автор выражает глубокую благодарность Жукову В.Т., Меньшову И.С., Долголевой Г.В., Плинер Л.А., Забродиной Е.А. за интерес к работе и полезные обсуждения. Автор также выражает искреннюю признательность Гавреевой М.С. за помощь в оформлении работы.

### **Библиографический список**

1. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
2. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.

3. Wetherill G. W. Formation of the terrestrial planet // Annu. Rew. Astron. Astrophys. 1980. V. 18. P. 77-113.
4. Chambers J. E. Planetary accretion in the inner Solar system // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 223. P. 241-252.
5. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Механизм аккумуляции планетарных тел. Программа № 25 фундаментальных исследований Президиума РАН. М.: 2004.
6. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца на начальной ее стадии. Программа № 25 фундаментальных исследований Президиума РАН. М.: 2006, инв. № 8-3-06.
7. Забродин А.В., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Мануковский К.В., Плинер Л.А. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2006. № 70. 44 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2006-70>.
8. Zabrodin A. V., Zabrodina E. A., Legkostupov M. S., Manukovskii K. V. and Pliner L. A.. Some Models for the Protoplanetary Disk of the Sun at the Initial Stage of its Evolution // Problems of Biosphere Origin and Evolution, vol. 1 (Editor E. M. Galimov). New York: "Nova Science Publishers, Inc." 2013. P. 405.
9. Забродин А.В., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Мануковский К.В., Плинер Л.А. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. (Под ред. Э.М. Галимова). М.: Либроком, 2008. С. 297-316.
10. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть I. Постановка задачи // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 34. 19 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-34>
11. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть II. Дисперсионные уравнения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 35. 33 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-35>
12. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть III. К развитию и обоснованию модели // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 36. 24 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-36>
13. Долголева Г.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А. Численное моделирование гравитационной неустойчивости протопланетного диска в одномерном приближении. Часть I. Однородная изотропная среда // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 49. 44 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-49>
14. Долголева Г.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 2. С. 130 -148.

15. Dolgoleva G.V., Legkostupov M.S., Pliner L.A. On the issue of the Solar protoplanetary disk // *Mathematical models and computer simulations*. 2018. Vol. 10. Issue 5. P. 616–628.
16. Brushlinskii K.V., Pliner L.A., Zabrodina E.A., Menshov I.S., Zhukov V.T., Dolgoleva G.V., Legkostupov M.S. Gravitational instability in the Proto planet disk // *III International conference BIOSPHERE ORIGIN AND EVOLUTION / Abstracts*. – Rithymno, Crete, Greece, October 16–20, 2011. P. 31–33.
17. Брушлинский К.В., Долголева Г.В., Жуков В.Т., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Меньшов И.С., Плинер Л.А. К вопросу об эволюции протопланетного диска Солнца // *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*. Научный сборник под ред. академика Э.М. Галимова. М.: Красанд, 2013. С. 33–46.
18. Menshov I.S., Zhukov V.T., Legkostupov M.S., Pliner L.A., Dolgoleva G.V., Zabrodina E.A. On the problem of the gravitational instability of the protoplanetary disk of the Sun // *81<sup>st</sup> annual meeting of the Meteoritical Society / Abstracts*. – July 22 – 27, 2018, Moscow, Russia;
19. Menshov I.S., Zhukov V.T., Legkostupov M.S., Pliner L.A., Dolgoleva G.V., Zabrodina E.A. On the problem of the gravitational instability of the protoplanetary disk of the Sun // *Meteoritics and Planetary Science*. 2018. Vol. 53. Issue S1. P. 6017.
20. Легкоступов М.С. К вопросу о модели образования планетных систем звезд // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2018. № 229. 31 с.  
doi:10.20948/prepr-2018-229  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-229>
21. Mayra Osorio, Guillem Anglada, Carlos Carrasco-González and et al. Imaging the inner and outer gaps of the pre-transitional disk of HD 169142 at 7 mm // *Astrophys. J. Lett*. 2014. Vol. 791. L36.
22. Brogan C.L., et al.: (ALMA Partnership), The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region // *Astrophys. J. Lett*. 2015. Vol. 808. L3.
23. Ruobing Dong, Zhaohuan Zhu, and Barbara Whitney. Observational signatures of planets in protoplanetary disks. I. Gaps opened by single and multiple young planets in disks // *The astrophysical journal letters*. 2015. Vol. 809. № 1.
24. Carlos Carrasco-González, Thomas Henning, Claire J. Chandler, Hendrik Linz, Laura Pérez, Luis F. Rodríguez, Roberto Galván-Madrid, Guillem Anglada, Til Birnstiel, Roy van Boekel, Mario Flock, Hubert Klahr, Enrique Macias, Karl Menten, Mayra Osorio, Leonardo Testi, José M. Torrelles, and Zhaohuan Zhu. The VLA view of the HL TAU disk: disk mass, grain evolution, and early planet Formation // *The astrophysical journal letters*. 2016. Vol. 821. № 1. L16.
25. Andrews S.M., Wilner D.J., Zhu Z., Birnstiel T., Carpenter J.M., Pérez L. M., Bai X.-N., Öberg K. I., Hughes M., Isella A.: Ringed substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk // *Astrophys. J. Lett*. 2016. Vol. 820. L40.

26. D. Fedele, M. Tazzari, R. Booth and et al. ALMA continuum observations of the protoplanetary disk AS 209 // *A&A*. 2018. Vol. 610. A24.
27. Кант И. Всеобщая естественная история и теория неба // Кант И. Сочинения в шести томах. Т. 1. М.: Мысль, 1963. 543 с.
28. Лаплас П.С. Изложение системы мира. Л.: Наука, 1982. 376 с.
29. Beckwith S. V. W., Sargent A. I., Chini R. S., Gusten R. A survey for circumstellar disks around young stellar object // *Astron. J.* 1990. V. 99. P. 924 – 945.
30. Сурдин В.Г. Рождение звезд. М.: URSS, 2001. 264 с.
31. Calvet N., D’Alessio P., Hartmann L. et al. Evidence for a Developing Gap in a 10 Myr Old Protoplanetary Disk // *Astrophys. J.* 2002. V. 568. P. 1008–1016.
32. Reipurth B., Jewitt D., Keil K. (eds). *Protostars and planets V*. Tucson // Univ. Arisona Press, 2007. 951 p.
33. Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: ЛКИ, 2009. 576 с.
34. Козлов Н.Н., Энеев Т.М. Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного диска // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 1977. № 134.
35. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // *Астр. вест.* 1981. Т. XV. № 2. С. 80–94.
36. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. // *Астр. вест.* 1981. Т. XV. № 3. С. 131–140.
37. Энеев Т.М. Кольцевое сжатие вещества в капельной модели протопланетного облака // *Астр. вест.* 1993. Т. XXVII. № 5. С. 3–25.
38. Murachev A.S., Tsvetkov D.V., Galimov E.M., Krivtsov A.M. Numerical Simulation of Circumsolar Ring Evolution. *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*. 2018. Vol. 87. P. 251–262.
39. Anglada G., López R., Estalella R., Masegosa J., Riera A., Raga A.C. Proper motions of the jets in the region of HH 30 and HL/XZ Tau // 2007. *Astronomical Journal*. Vol. 133. Issue 6. P. 2799 – 2814.
40. Jeans J. H. *Astronomy and cosmogony*. Cambridge, 1929.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Краткий аналитический обзор избранных работ по астрофизическим наблюдениям протопланетных дисков звезд.....	4
2. Сравнительный анализ и обсуждение результатов работ [21, 24, 25, 26] ....	14
Заключение.....	.16
Библиографический список.....	16