

# Дебрис-диски

С. Г. Шульман

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
Главная (Пулковская) Астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Звёзды главной последовательности часто окружены межзвёздным веществом, которое может быть классифицировано как планеты и дебрис-диски. Последние состоят из астероидов, комет, пыли и газа. Пыль и газ делают дебрис-диски наблюдаемыми за счёт теплового излучения и рассеянного света. Дебрис-диски могут эволюционировать миллиарды лет. При этом в них возможны случайные процессы, приводящие на короткое время к усилению яркости. Есть основания полагать, что в дисках из маленьких пылинок могут образовываться планетезимали размерами в сотни километров (подобные наблюдаемым в Солнечной системе в поясе астероидов и в поясе Койпера). Системы с дебрис-дисками являются важными кандидатами для поиска больших планет. В последнее время накопилось очень много наблюдательных данных, включающих в себя статистические данные, разрешённые изображения дисков, обнаружение газа и многое другое. Изучение и интерпретация этих данных может позволить не только лучше понять физику дебрис-дисков, но и существенно продвинуться в изучении процессов образования планет.

## 1 Введение

Около звёзд главной последовательности часто наблюдаются диски. Эти диски называются дебрис-дисками и сильно отличаются от протопланетных дисков около молодых звёзд. В отличие от протопланетных дисков, дебрис-диски являются оптически-тонкими, обычно не имеют газа, не создают аккрецию на звезду и имеют меньшую массу.

Наличие в системе дебрис-диска приводит к инфракрасному избытку в спектре. В 80-х годах стали находить звёзды главной последовательности с инфракрасным избытком. Первыми четырьмя такими звёздами стали: Вега,  $\beta$  Pictories, Фомальгаут и  $\epsilon$  Eridani. В 1984 году Смит и Террил получили изображение первого дебрис-диска. Это был наблюдаемый с ребра диск протяжённостью в 400 а.е. около  $\beta$  Pic.

Дебрис-диски, состоящие из астероидов, комет, газа и пыли, играют важную роль в изучении планетных систем. Они могут обладать сложной структурой, поэтому очень важны наблюдения, разрешающие структуру дисков, что даёт широкие возможности для моделирования строения дисков и распределения энергии в спектре. Большой вклад в наблюдения дебрис-дисков внёс космический телескоп Spitzer. Ещё лучшие результаты дают наблюдения на космическом телескопе Herschel, обладающем большим пространственным

разрешением и более широким диапазоном длин волн. Кроме того, произошло существенное повышение разрешающей способности наземных наблюдений в диапазоне от ближнего инфракрасного излучения (например, CHARA, VLTI, LBTI) до (суб)миллиметрового (ALMA, SMA и CHARMA).

Изучение дебрис-дисков может помочь понять происхождение планетных систем и дебрис-диска в Солнечной системе, преимущественно состоящий из тёплой пыли среди внутренних планет, пояс астероидов и холодную пыль с планетезималиями в поясе Койпера.

В данной работе мы рассмотрим строение, эволюцию и свойства дебрис-дисков на основе имеющихся наблюдательных данных и результатов моделирования. Будут продемонстрированы результаты наблюдений на различных длинах волн, спектральные распределения энергии, особенности отдельных дисков и статистические данные, касающиеся обнаружения дисков, их осей наклона и корреляции со свойствами звёзд и обнаружением экзопланет. Будет рассмотрена схема дебрис-диска, демонстрирующая возможные пылевые зоны.

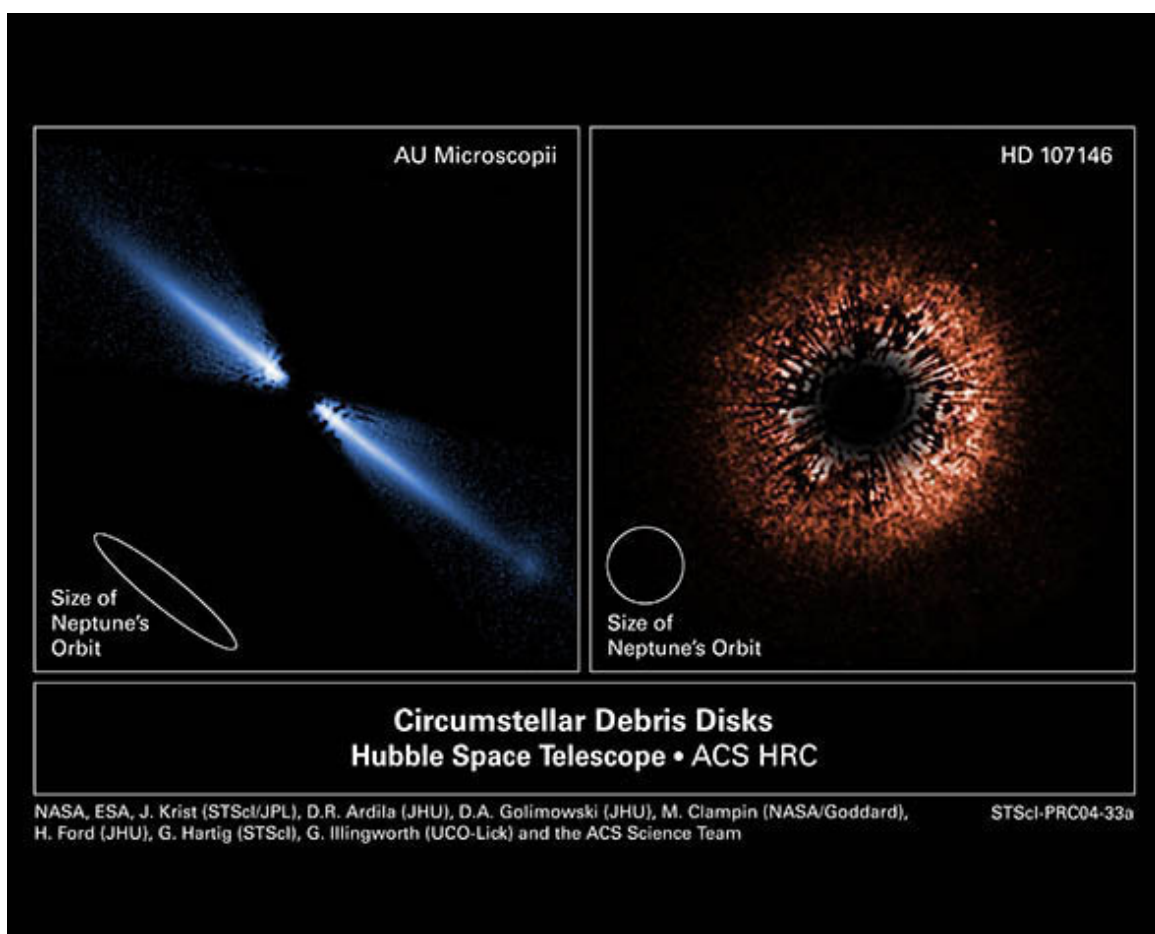


Рис. 1: Дебрис-диски AU Mic (слева) и HD 107146 (справа), полученные при наблюдениях на телескопах Spitzer и HST. (Figure credits: NASA, ESA, C. Beichman (JPL), D. Ardila (JHU) and J. Krist (STScI/JPL) 2004)

## 2 Наблюдения дисков

В оптическом и ближнем ИК диапазоне пылинки рассеивают свет звезды, тем самым подсвечивая те зоны диска, где преобладает мелкая пыль (см. рис. 1), хотя наиболее заметно тепловое излучение пыли. Избыток инфракрасного излучения является типичным свидетельством наличия дебрис-диска. Первыми признаками наличия дебрис-дисков были обнаруженные инфракрасные избытки у нескольких звезд, а именно Веги,  $\beta$  Pictoris, Фомальгаут и  $\epsilon$  Eridani.

Если диск состоит из нескольких компонентов с разными свойствами на различных расстояниях от звезды, наблюдения на разных длинах волн могут выявлять различные компоненты диска. Но это не означает, что все компоненты должны присутствовать или быть наблюдаемыми. Для многих дисков только один компонент, обычно (но не всегда) соответствующий поясу Койпера, преобладает в наблюдаемой эмиссии. В таком случае наблюдения на разных длинах волн свидетельствуют о наличии пылинок разных размеров. Наблюдения на больших длинах волн выявляют пылинки больших размеров.

Отношение светимости потенциально существующего диска к светимости фотосферы звезды по большей части определяется температурой фотосферы звезды и расстоянием до системы. Наблюдения на Spitzer и Herschel хорошо подходят для изучения связи свойств диска и звезды, таких как доля излучения диска и его природа.

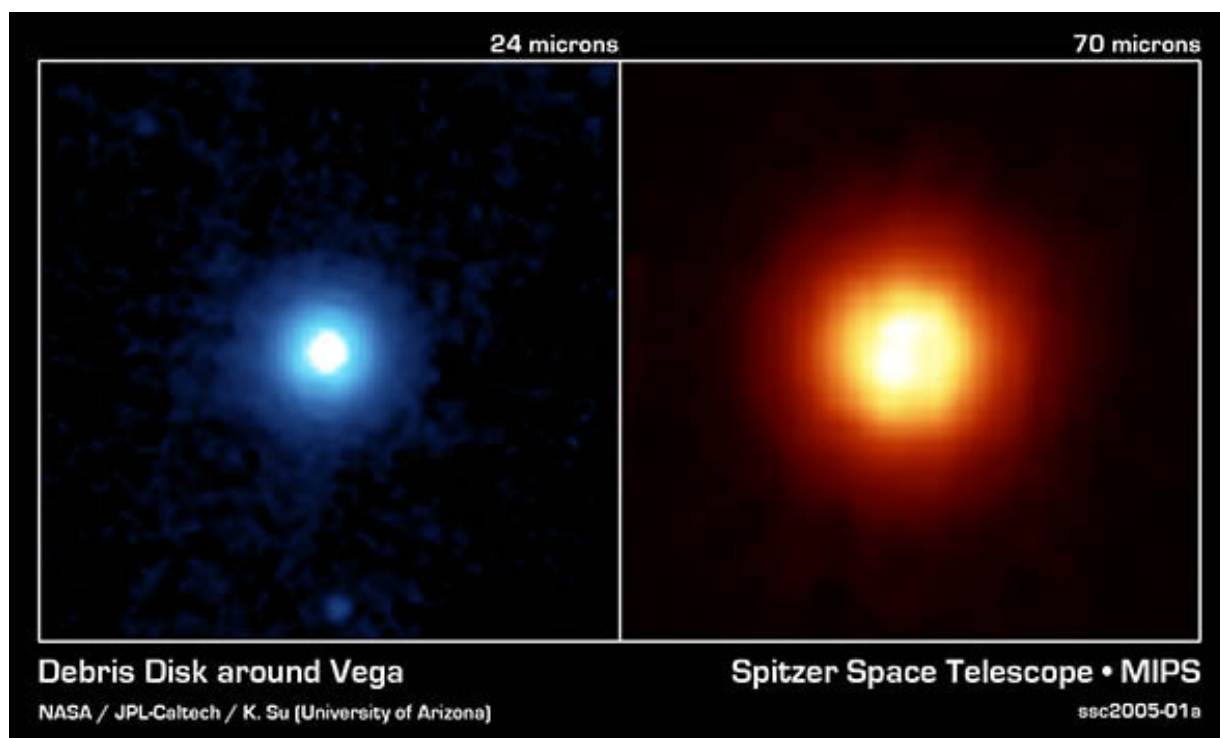


Рис. 2: Изображения дебрис-диска около Веги, полученные на космическом телескопе Spitzer на длинах волн 24  $\mu\text{m}$  и 70  $\mu\text{m}$ . (Figure credits: NASA/JPL-Caltech/K. Su 2005)

Для наблюдения слабых дисков требуется повышать чувствительность, что приводит к возможности искажений результатов из-за внегалактического фонового излучения. Этот эффект влияет на определяемые углы наклона дисков, интерпретацию структур и обнаружение новой популяции холодных дисков. Внегалактическое фоновое излучение является типичной проблемой для далёкого-ИК и субмиллиметрового диапазонов, но недавно было также обнаружено его существенное влияние на точность наблюдений, проводимых на WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer).

## Далёкий ИК и субмиллиметровый диапазоны

Многие диски наблюдаются только при наблюдениях на больших длинах волн ( $\geq 60 \mu\text{m}$ ), что соответствует холодной ( $\lesssim 100 \text{ K}$ ) пыли на расстояниях от 10 до 100 а.е. Дебрис-диски, обнаруженные IRAS, были преимущественно аналогами пояса Койпера.

Больше всего дебрис-дисков обнаружено у звёзд спектрального класса А: 33% и 25% на длинах волн в  $70 \mu\text{m}$  и  $100 \mu\text{m}$ , соответственно. Для звёзд солнечного типа (классов FGK) различные обзоры дали присутствие дисков у 10% – 20% звёзд. Хотя есть видимое уменьшение доли звёзд с дисками при переходе от класса А к классу К, следует отметить, что это, скорее всего, связано с возрастными звёздами, которые для звёзд поздних классов бывают заметно больше. Среди звёзд классов FGK одного возраста нет какой-либо зависимости частоты встречаемости дисков от спектрального класса и значения доли звёзд с дебрис-дисками для звёзд классов AFGK одного возраста не имеют статистически значимых различий.

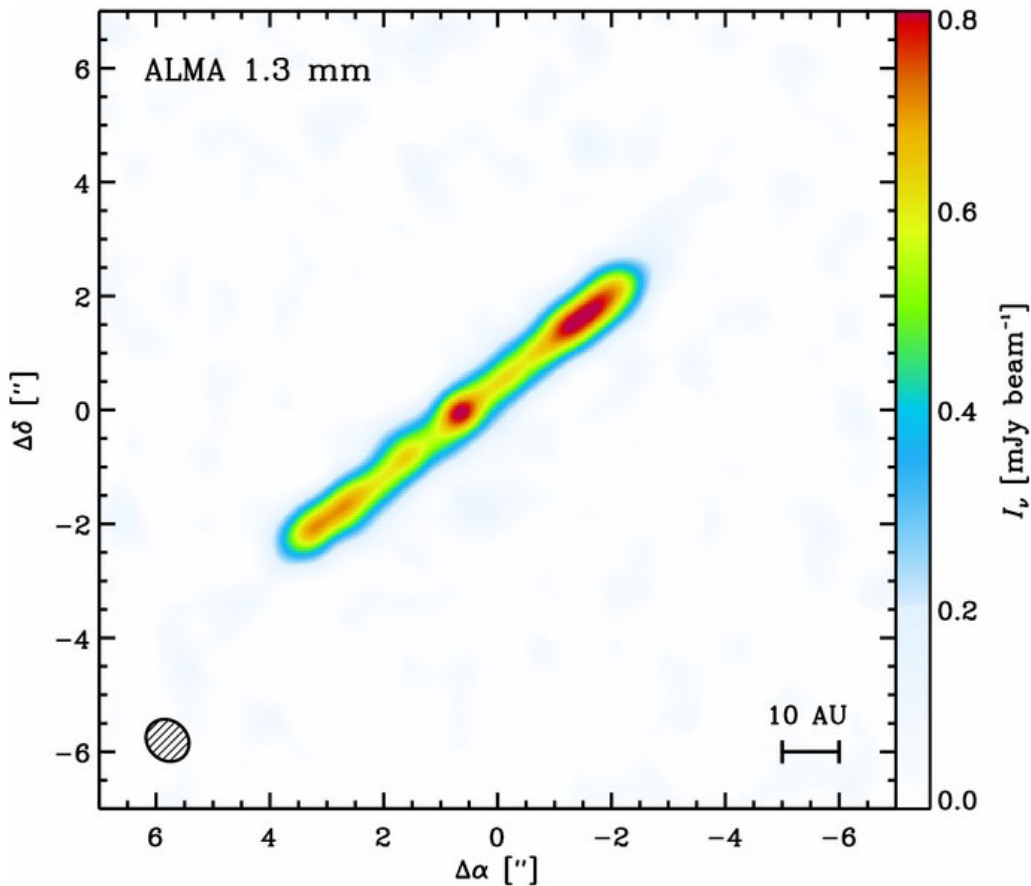


Рис. 3: Изображение AU Mic, полученное ALMA на длине волны 1.3 мм. Эллипс в левом нижнем углу представляет  $0''.80 \times 0''.69$  ( $8 \times 7$  а.е.) синтетический лепесток. (MacGregor et. al. 2013)

Количество пыли в диске часто описывается в терминах относительной светимости пыли,  $f_d \equiv L_d/L_*$ , которое обычно оценивается исходя из предположения, что пыль имеет чисто чёрнотельный или модифицированный (с учётом полос поглощения пыли с разным химическим составом) чёрнотельный спектр излучения. Значения  $f_d$  могут изменяться в пределах  $\sim 10^{-3} - 10^{-6}$  с явным уменьшением содержания пыли в старых системах, хотя и с большой дисперсией значений. Тем не менее нет чёткой зависимости содержания пыли от спектрального класса для звёзд от позднего В до М классов.

Чувствительность телескопов относительно обнаружения пыли может быть различна и зависеть от потока излучения звезды. Spitzer имеет чувствительность  $f_d \sim 10^{-5}$ . У Herschel ожидается лучшая чувствительность. В связи с этим есть надежда на обнаружение более холодных дисков вокруг звёзд класса А.

При том же уровне чувствительности, обнаружение дисков вокруг звёзд спектрального класса М сопряжено с трудностями, например, выметанием пыли звёздным ветром, которое более эффективно, чем у более массивных звёзд (у звёзд класса М ключевую роль в выметании пыли играет не излучение, а звёздный ветер, который сильнее чем у звёзд более ранних классов из-за высокой температуры короны и повышенной магнитной активности). Маленькие частицы пыли выметаются из системы и необходимо наблюдать на больших длинах волн. Исходя из наблюдений протопланетных дисков и экзопланет вокруг звёзд классов М, можно ожидать, что вокруг них встречаются диски чаще, чем это обнаруживается в настоящее время.

Субмиллиметровые наблюдения дебрис-дисков обычно выявляют Релэй-Джинсовский хвост излучения внешней холодной пыли. Они обеспечивают некоторые ограничения на свойства наблюдаемой пыли, например убывающий по степенному закону коэффициент поглощения и определение массы пыли размером до  $\sim 1$  мм, так как эмиссия на этих длинах волн является оптически тонкой. Хотя многие наблюдатели сосредотачиваются на наблюдении дисков, уже обнаруженных на других длинах волн, часть дисков было открыто и при субмиллиметровых наблюдениях.

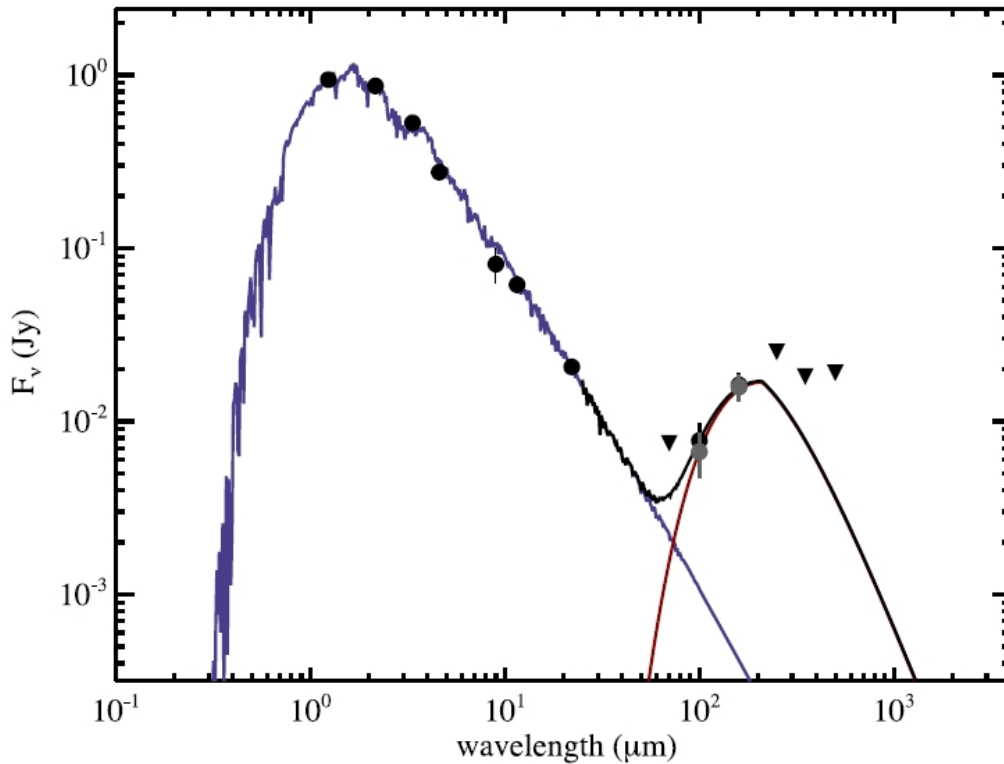


Рис. 4: Распределение энергии в спектре Фомальгаут С (LP 876-10). Точками отмечены потоки, а треугольниками — верхние границы  $3\sigma$ . Чёрные символы соответствуют измеренным потокам, а серые — потокам с вычтенным вкладом излучения звезды (т.е. потокам от диска). Модель звёздной фотосферы с эффективной температурой 3200 К показана синим цветом, чёрнотельное излучение диска с температурой 24 К — красным, а спектр звезды и диска — чёрным. (Kennedy et. al. 2014)

## Средний ИК-диапазон

Тёплая пыль в зонах обитания звёзд солнечного типа особенно интересна и как возможный индикатор начинающегося формирования планеты земного типа, и как источник затмений для будущего получения изображения таких планет. Избыток излучения в средней-ИК области спектра сложно обнаружить, поскольку пылевая эмиссия перекрывается излучением звезды. Например, если смотреть издалека, зодиакальный свет в Солнечной системе на 4 порядка менее яркий, чем Солнце на длине волны  $10 \mu\text{m}$ . В связи с таким ограничением, фотометрические обзоры тёплой пыли в среднем-ИК имеют систематический предел, связанный с неточностями калибровки инструментов и определения параметров звёздной фотосферы. Тем не менее, был достигнут заметный прогресс в обнаружении тёплой пыли, аналогичной наблюдаемой в Солнечной системе. Это так называемый экзозодиакальный свет.

У Spitzer фотометрические и спектроскопические пороги наблюдений в среднем ИК имеют сильную зависимость от длины волны, спектрального типа и возраста. Только у нескольких процентов немолодых звёзд солнечного типа наблюдается избыток в среднем ИК диапазоне. Для молодых звёзд уровень обнаружения избытка заметно выше и сравним с уровнем обнаружения избытка в далёком ИК. Для звёзд спектрального класса А избыток а длине волны  $24 \mu\text{m}$  наблюдается у 32% звёзд, что соответствует значениям для далёкого ИК.

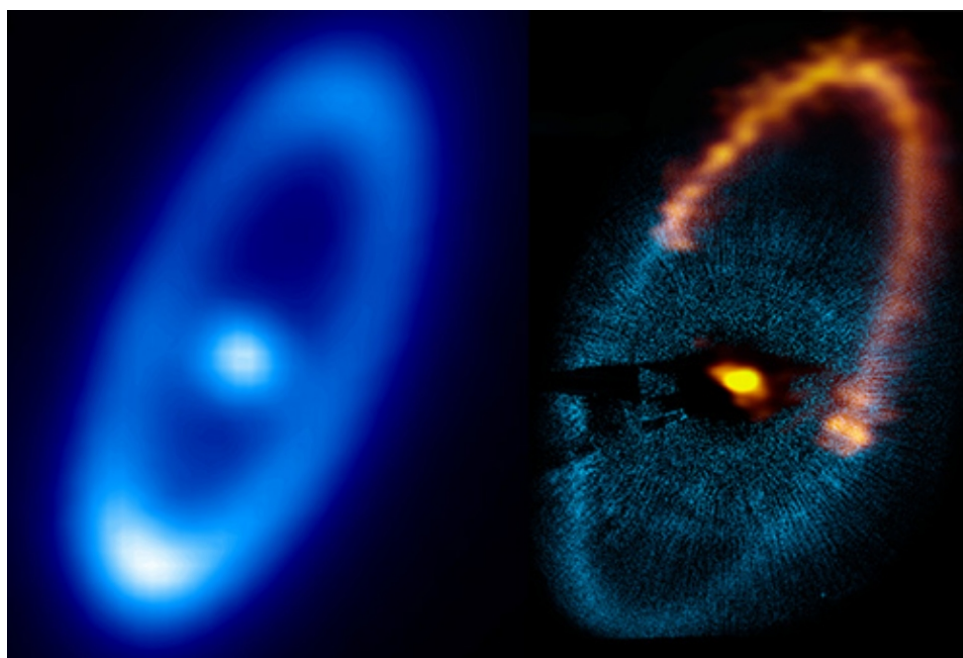


Рис. 5: Изображения Фомальгаута на длине волны  $70 \mu\text{m}$  на телескопе Herschel (Acke et. al., *A&A* **540**, 125 (2012)) слева и комбинация изображений HST/ALMA  $850 \mu\text{m}$  (Kalas et. al., *Nature* **435**, 1067 (2005); Boley et. al. *ApJ* **750**, 21 (2012)) справа, демонстрируют влияние длины волны наблюдений и разрешения на получаемое изображение. Herschel и ALMA имеют достаточную чувствительность для разрешения центрального компонента (ассоциируемого с тёплой пылью, видимой на  $24 \mu\text{m}$  Stapelfeldt et. al. 2004) и показывают отчётливую внутреннюю границу диска и его смещение относительно звезды. Это смещение и очевидная асимметричность яркости диска, наблюдаемая Herschel, связаны с наличием у Фомальгаута планеты. (Figure credits: Herschel, ESA/Herschel/PACS/B.Acke/KU Leuven; ALMA, ESO/NOAJ/NRAO; HST, NASA/ESA)



Спектральные наблюдения или наблюдения на разных длинах волн не только позволяют лучше увидеть структуру пыли, но и определить её температуру, которая плохо определяется по малому числу фотометрических наблюдений. Так для многих систем с обнаруженным Spitzer сильным избытком на  $32 \mu\text{m}$  было показано, что данный избыток относится к коротковолновой части ранее обнаруженного излучения холодной пыли, а не к эмиссии тёплой пыли. И только 2 системы (1% от изученных) имели избыток на длине волны  $10 \mu\text{m}$ , идентифицированный как излучение пыли на расстоянии 1 а.е. от звезды. Другие системы с избытком излучения от тёплой пыли были выявлены в обзорах IRAS, AKARI и WISE.

В спектрах таких пылевых систем обычно присутствуют сильные силикатные особенности на длине волны  $10 \mu\text{m}$ , которые дают важную информацию о размере и строении пыли. Эти данные о строении пыли, её плотность и короткое время её существования ( $\approx 100 \text{ Myr}$ ), связанное со взаимными столкновениями, говорят о её возникновении в результате особых столкновительных процессов (например, рассматривается возможность того, что при столкновении тел, размером с астероид, одно из них может разлететься в пыль, которой будет достаточно для наблюдений системы). Образование такого пояса, аналогичного поясу астероидов, видимо, сильно зависит от особенностей формирования планет. Среди молодых звёзд ( $<120 \text{ Myr}$ ) примерно 1% имеет такую тёплую пыль. Но вокруг старых звёзд она встречается редко.

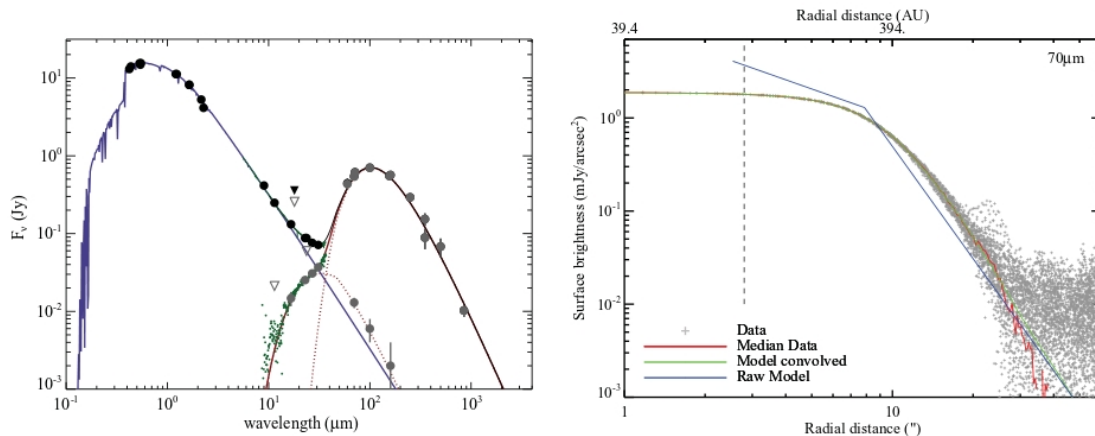


Рис. 6: (Слева) Распределение энергии в спектре HR 8799. Диск показан с независимыми кривыми для теплового чёрнотельного компонента и холодного чёрнотельного компонента. Звёздная эмиссия соответствует излучению звезды с эффективной температурой  $T_{eff} = 7380 \text{ K}$  и светимостью  $L_* = 5.4L_\odot$ , соответствующих звезде позднего типа A или раннего F. Температура дисковых компонент соответствует  $153 \pm 15 \text{ K}$  (тёплый неразрешённый компонент, не детектируемый Herschel) и  $36 \pm 1 \text{ K}$  (холодный разрешённый компонент). На спектральном распределении плотности тепловое различие между гало и планетезимальным поясом отсутствует. (Справа) Радиальный профиль диска на длине волны  $70 \mu\text{m}$ . HWHM обозначено пунктирной линией. Завал в пространственной яркости около  $10''$  очень заметен и является подтверждением двухкомпонентной модели внешнего диска. Наблюдательные данные хорошо соответствуют модельному профилю яркости до  $20\text{--}30''$  ( $800\text{--}1200 \text{ a.e.}$ ) (Matthews et. al. 2014)

## Ближний ИК диапазон

Внутри тёплой зоны-обитания была обнаружена ещё одна категория пыли: очень горячая пыль ( $T \approx 1000$  K), которая наблюдается при интерферометрических наблюдениях в ближнем ИК-диапазоне. Вега была изучена наиболее детально. Наилучшее согласование с избытком 1.3% в полосе K, сочетающимся с фотометрическим верхним пределом в среднем ИК диапазоне, даёт система из  $\sim 1 \mu\text{m}$  пылинок, собранных во внутренний диск с внутренним радиусом 0.2 а.е. Такая пыль ещё может существовать, т.к. температура сублимации около 1700K. Существуют и другие системы с избытком излучения в ближнем ИК диапазоне. В обзоре CHARA избыток в ближнем ИК обнаружен у  $28 \pm 7\%$  исследованных объектов. Избыток в ближнем ИК чаще наблюдается у звёзд спектрального класса A ( $50 \pm 13\%$ ), чем у звёзд классов FGK ( $18 \pm 7\%$ ). Что интересно, избыток в полосе K несколько чаще наблюдался у звёзд солнечного типа с избытком в далёком ИК, хотя этот эффект и не оказался достаточно сильным, чтобы считать его статистически значимым. Для звёзд класса A подобного обнаружено не было.

## 3 Структура диска

В основе теоретического моделирования дебрис-дисков лежит образование одного или нескольких поясов планетезималей. Например, в Солнечной системе они представлены поясом астероидов и поясом Койпера. Планетезимали сталкиваются на значительных скоростях, образуя при этом более мелкие тела и пыль. Такие процессы, приводящие к образованию пыли, называются каскадами столкновений.

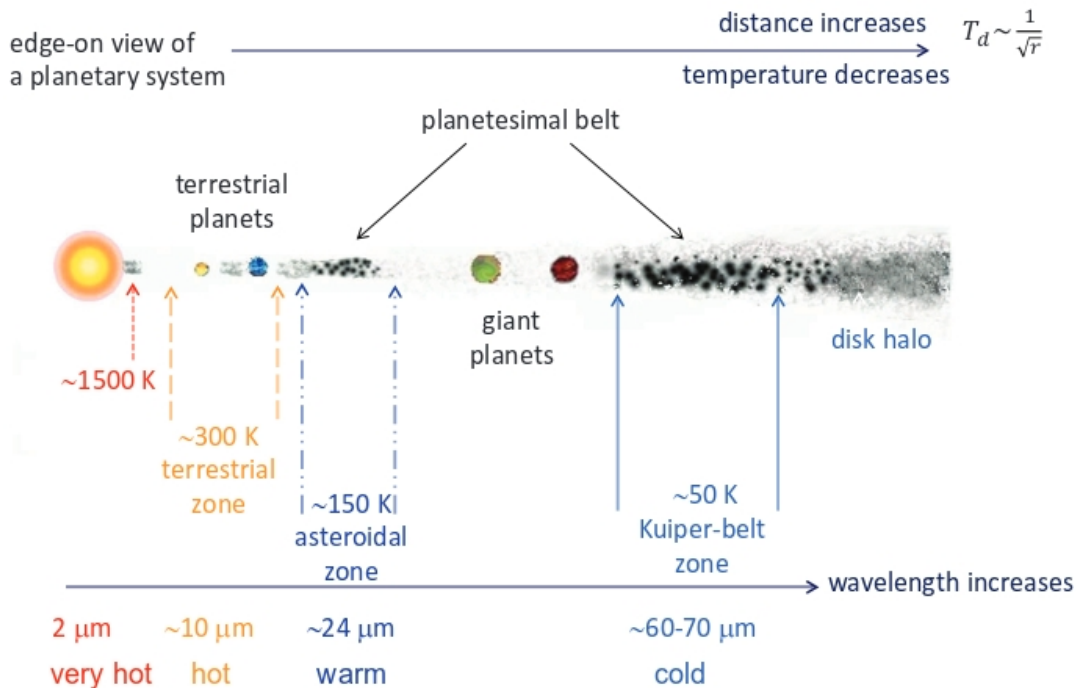


Рис. 7: Схема расположения пяти зон пыли в дебрис-диске. (Su and Rieke 2014)

Многие свойства каскадов столкновений получают аналитически. Для точной интерпретации часто используется численное моделирование столкновений с учётом светового давления. Методы моделирования делятся на три группы: решение задачи N-тел (учёт траекторий отдельных тел), статистические методы (описание системы функциями распре-



деления параметров частиц), гибридные методы (детальное описание динамики и столкновений с использованием суперчастиц, представляющих рой частиц близкого размера на одной орбите).

Столкновения вместе с давлением излучения и силами трения приводят к определённому распределению пыли в зависимости от расстояния до звезды. Размер частиц также будет зависеть от расстояния до звезды.

Если трение не играет существенной роли по сравнению с каскадами столкновений, узкий пояс планетезималей будет окружён гало из маленьких пылинок на эллиптических орбитах. Перицентры орбит будут находиться в кольце, где они образовались, а апоцентры за его пределами. Чем меньше пылинки, тем протяженней будет гало. Оптическая толщина гало будет изменяться по закону  $\tau \propto r^{-1.5}$ , где  $r$  — расстояние до звезды. А пылинки, движущиеся по гиперболическим орбитам создадут гало с оптической плотностью  $\tau \propto r^{-1}$ .

В противоположном случае, когда трение играет ключевую роль в формировании системы, изменение профиля оптической толщины станет круче  $\tau \propto r^{-2.5}$ , а внутри кольца, где появляется пыль, её плотность будет почти равномерной:  $\tau \propto r^0$ .

Для многих дисков малой плотности, наблюдавшихся на Herschel, одинаково важны оба процесса. Тогда диск одновременно испытывает утечку вещества внутрь и снаружи приобретает гало из маленьких пылинок. Соотношение между гало и заполнением внутренних областей диска зависит ещё от множества факторов, главным образом от характеров процесса образования пыли.

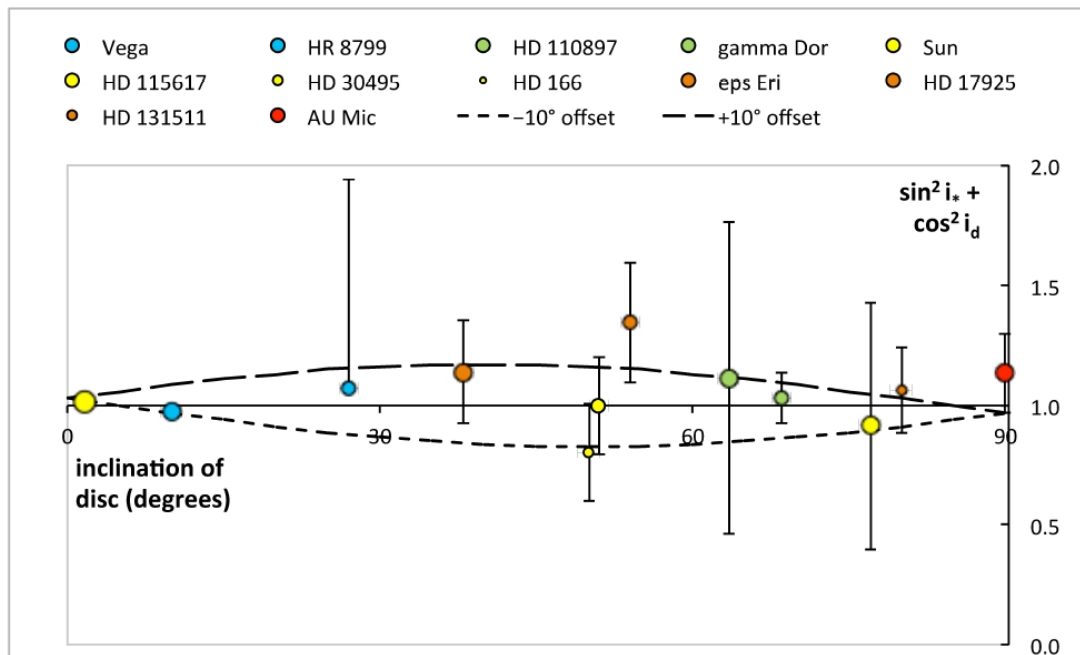


Рис. 8: График зависимости  $\sin^2 i_* + \cos^2 i_d$  от наклона диска, где  $i_d$  — угол между лучом зрения и осью диска, а  $i_*$  — угол между лучом зрения и осью вращения звезды. Отклонения значения по оси ординат от 1 показывают, что оси вращения диска и звезды не совпадают. Цвет значков соответствует спектральным типам от голубого для A до красного для M. Меньшие значки отвечают звёздам на большем расстоянии. Отрезки ошибок определения величин по оси абсцисс опущены для наглядности. Кривые показывают изменения  $\sin^2 i_* + \cos^2 i_d$  с наклоном диска для звезды, имеющей относительный наклон в  $10^\circ$ . (Greaves et. al.2014)

Многочисленные наземные и космические наблюдения дисков, проведённые на всех длинах волн, показали, что в общих чертах структуру дисков можно представить в виде пяти пылевых зон с четырьмя различными температурами, что приводит к тепловой эмиссии, наблюдаемой в четырёх разных диапазонах длин волн (см. рис. 7).

Большинство дисков показывают плотную, холодную ( $\approx 50$  К) пыль, образующую систему, похожую на пояс Койпера. Такая пыль наблюдается в далёком ИК диапазоне в районе  $70 \mu\text{m}$ . Ближе к звезде 20% дисков имеют тёплую ( $\approx 150$  К) пыль, собранную в аналог пояса астероидов на границе линии замерзания воды. Ещё ближе к звезде, в земной зоне, пыль с температурой  $\approx 300$  К светит на длине волны около  $10 \mu\text{m}$ . Некоторые системы имеют ещё более горячую пыль с температурой порядка 1500 К. Избыток эмиссии от очень горячей пыли был обнаружен в ходе наземных интерферометрических наблюдений в ближнем ИК диапазоне. Наконец, пятая зона — это протяженное дисковое гало.

Не все диски имеют все пять зон. Более того, температуры всех зон, кроме зоны на границе воды и льда, могут заметно отличаться в зависимости от конкретного положения поясов планетезималей и планет. Различия между пылевыми зонами различных звёзд связаны с различиями в формировании и эволюции систем.

Ось вращения диска обычно оказывается близка к оси вращения звезды. На рисунке 8 показана зависимость  $\sin^2 i_* + \cos^2 i_d$  от наклона диска. Для большинства звёзд, для которых были проведены независимые измерения угла между лучом зрения и осью диска  $i_d$  и угла между лучом зрения и осью вращения звезды  $i_*$  относительный наклон осей оказался менее  $10^\circ$ .

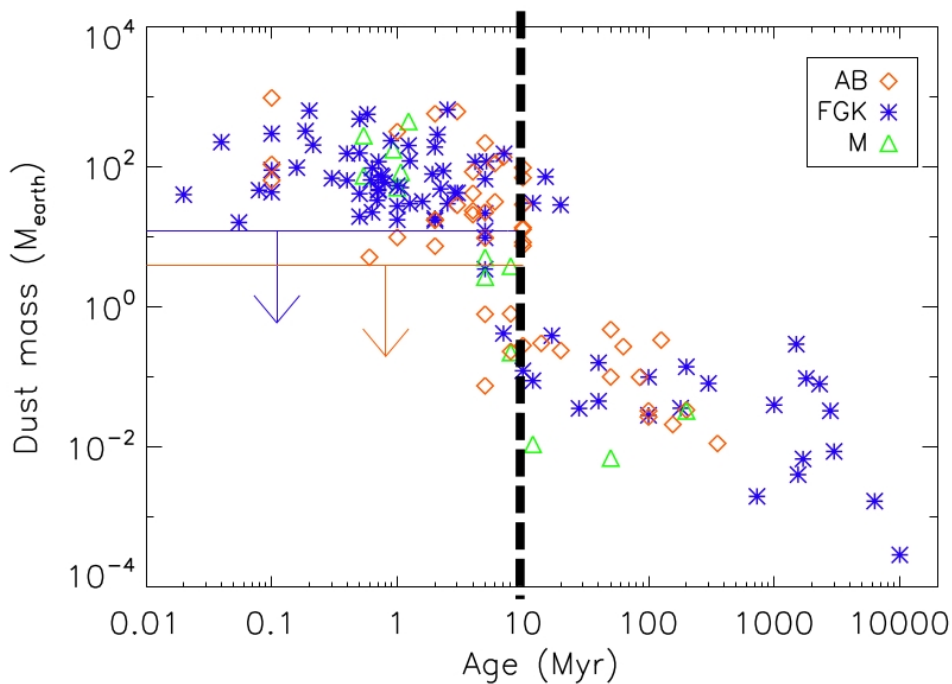


Рис. 9: Массы пыли околозвёздных дисков, основанные на анализе (суб)миллиметровых потоков от звёзд до главной последовательности и на ней. Наблюдательные ограничения, соответствующие чувствительности в несколько мJy показаны стрелочками: синяя для 20 К дисков вокруг звёзд типа Т Таври и красная для 50 К дисков вокруг звёзд типа Ae Хербига. (Panić et al.2013)

## 4 Эволюция дисков

При изучении дебрис-дисков важно понимать разницу между дебрис-диском и протопланетным диском. В ряде исследований рассматривались излучения диска в молодых системах. Они убедительно показали, что 50% протопланетных дисков, определяемых по сильному избытку в ближнем ИК диапазоне пыли вблизи звезды, исчезает к 3 миллионам лет. А их доля у звёзд в возрасте от 10 миллионов лет пренебрежимо мала. Измерения масс дисков в субмиллиметровом диапазоне дали тот же результат.

Для образования пыли в результате столкновений планетезимали в дебрис-диске должны сталкиваться с достаточными для фрагментации скоростями. Это значит, что диски должны быть возмущёнными. В различных моделях рассматриваются разные варианты возмущения. Например, возможны существенные возмущения в двойных и кратных системах или возмущение от прохождения близких звёзд в молодых кластерах. Также рассматривается вариант с образованием планетезимали размером около 1000 км, тогда её будет хватать для возмущения диска.

Образующаяся при столкновении планетезималей пыль в результате образует дебрис-диск. Считается, что дебрис-диски — это диски старше 10 миллионов лет. По сравнению с протопланетными дисками, дебрис-диски являются оптически тонкими, почти не имеют газа (только в молодых дебрис-дисках есть немного газа), в системах с дебрис-дисками нет аккреции на звезду.

Дебрис-диски наблюдаются вокруг многих звёзд главной последовательности. Избыток инфракрасного излучения уменьшается с возрастом системы примерно до 1 миллиарда лет. После этого изменений инфракрасного избытка не наблюдается. У звёзд спектрального класса А уменьшение избытка на длине волны  $24 \mu\text{m}$  значительно быстрее, чем на длине волны  $70 \mu\text{m}$ . Уменьшение избытка заметно и на более длинных волнах: 100 и  $160 \mu\text{m}$ . Характерная шкала убывания растёт с длиной волны. Верхняя граница отношения наблюдаемого потока системы к потоку звезды может быть аппроксимирована кривой распада  $1 + t_0/t$ , где  $t_0$  равно 150, 400 и 800 миллионов лет для  $24$ ,  $70$  и  $100/160 \mu\text{m}$  соответственно.

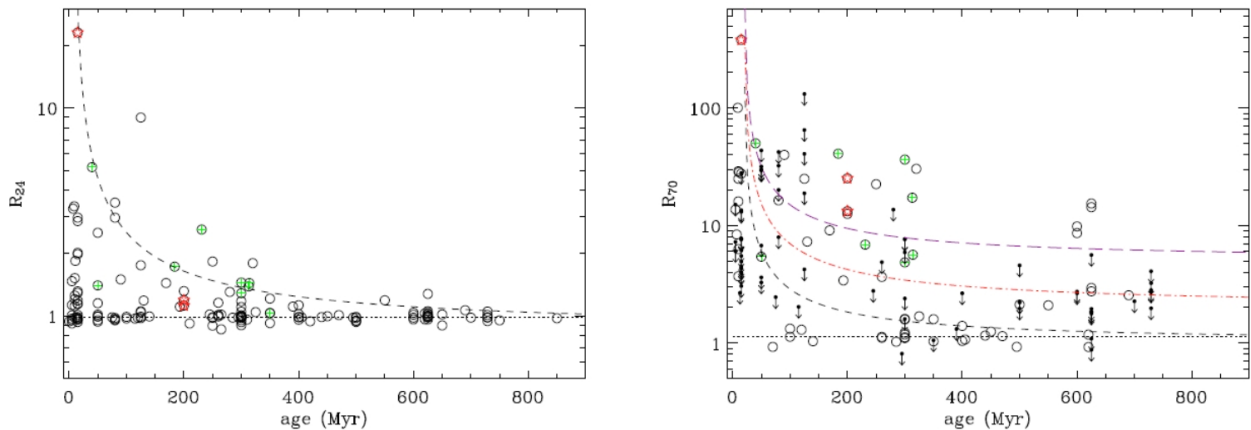


Рис. 10: (Слева) Зависимость избытка на  $24 \mu\text{m}$  от возраста звезды. Избыточная эмиссия определяется по отношению наблюдаемой плотности потока излучения к ожидаемой от фотосферы звезды.  $\beta$  Pic, Вега и Фомальгаут дополнительно отмечены звёздочками. Звёзды из обзора IRAS показаны значками с крестиками. Кривая распада  $t_0/t$  с  $t_0 \approx 150$  Myr отмечена пунктирной линией. (Справа) Аналогичный график для избытка на длине волны  $70 \mu\text{m}$ . Верхние пределы показаны точками со стрелочками вниз. Три кривых распада  $t_0/t$  представлены на графике: пунктирная линия для  $t_0 \approx 150$  Myr, штрихпунктирная для  $t_0 \approx 400$  Myr и длинный пунктир для  $t_0 \approx 800$  Myr. (Su et. al.2006)

## 5 Возмущения в диске и планеты

Многие дебрис-диски обладают сложной структурой: полостями, кольцами, неоднородностями светимости, некомпланарными подсистемами и другими. Многие особенности таких структур можно объяснить наличием в системе планеты. Более того, в ряде случаев наблюдения действительно показывают наличие планет в диске.

Хотя существует хорошо известная корреляция между металличностью звезды и наличием у неё планет-гигантов, следов зависимости дебрис-дисков от металличности не было выявлено. При этом дебрис-диски чаще встречаются вокруг звёзд с обнаруженными планетами. Графики зависимости доли звёзд с избытком излучения на длине волны  $70 \mu\text{m}$  от его величины показаны на рисунке 11. Следует отметить, что обнаруженную зависимость ещё нельзя считать статистически значимой, а при наблюдениях на длине волны  $100 \mu\text{m}$  зависимость становится более явной.

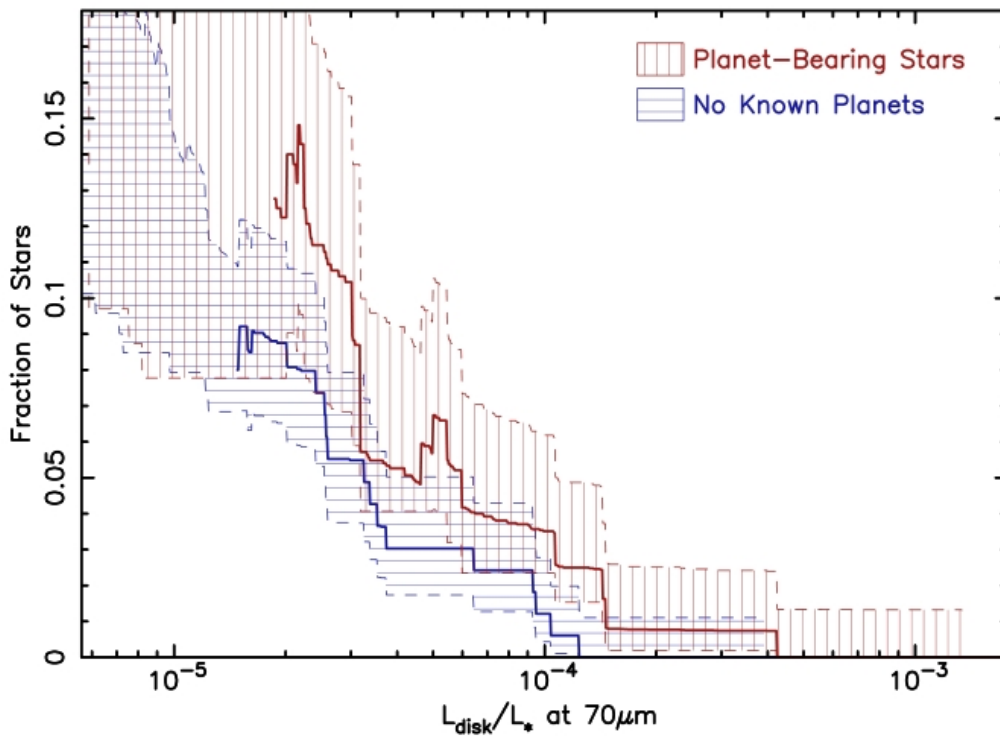


Рис. 11: Общая доля звёзд с избытком излучения на волне  $70 \mu\text{m}$  как функция светимости диска для систем с планетами и без. Доля светимости диска  $L_{disk}/L_*$  получена исходя из величины  $70 \mu\text{m}$  эмиссии, отнесённой к светимости звёздной фотосферы. Для обоих случаев систем с планетами и без, пылевые диски со светимостями  $L_{disk}/L_* > 10^{-4}$  редки. Диски со светимостью  $L_{disk}/L_* \approx 10^{-5}$  обнаруживаются гораздо чаще. Неопределённости в  $1\sigma$  в распределении  $L_{disk}/L_*$  обозначены заштрихованными областями. Хотя пыль около звёзд с планетными системами номинально ярче, различия нельзя считать статистически значимыми. (Bryden et. al. 2009)

После образования пылинки движутся вокруг звезды преимущественно по Кеплеровским орбитам. В системе без планет только орбиты малых пылинок испытывают небольшие возмущения из-за давления излучения. Когда же в системе присутствуют массивные тела (как в Солнечной системе), орбиты пылинок могут испытывать существенные изменения из-за возмущающего гравитационного потенциала.

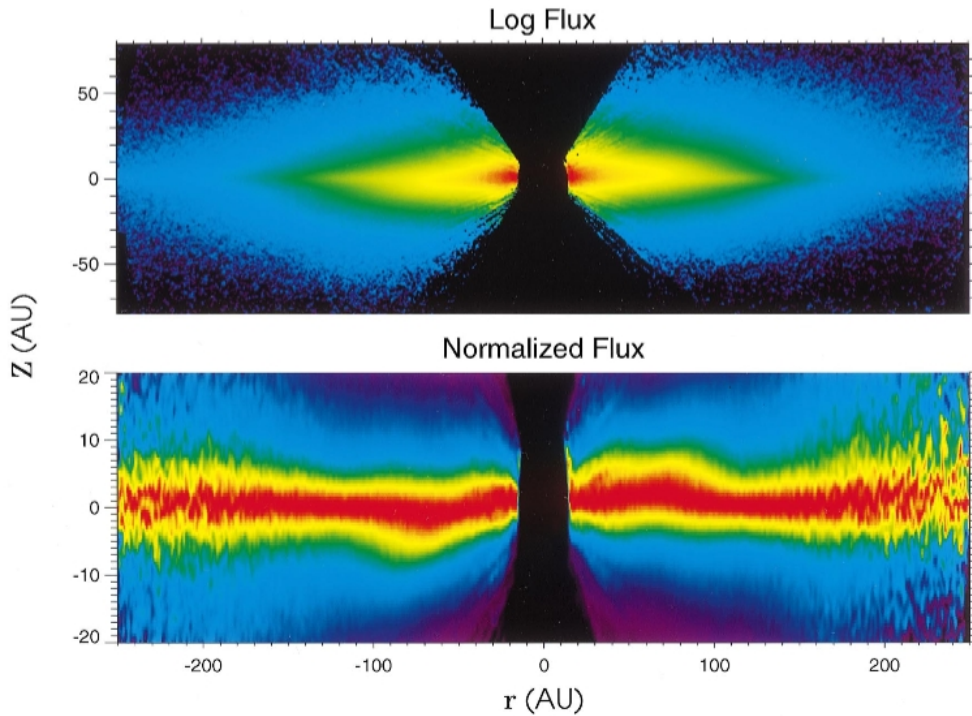


Рис. 12: STIS/CCD коронографические изображения диска  $\beta$  Pic. Полуширина затемнённой области 15 а.е. Наверху изображение диска с потоком в логарифмической шкале, внизу поток диска нормирован на максимальный поток, полученный на том же расстоянии от звезды, а масштаб вертикальной шкалы увеличен в 4 раза. (Heap et. al. 2000)

Возникающие при этом возмущения орбит можно разделить на три вида.

Вековые возмущения являются эффектом долговременного влияния гравитации планеты. Такие возмущения эквиваленты влиянию от массы планеты, равномерно распределённой по её орбите. Для почти круговых и компланарных орбит влияния эксцентриситета и наклона орбиты разделяются и играют важную роль. Эксцентриситет орбиты планеты влияет на эксцентриситет и ориентацию перицентров всего вещества в диске. Наклон орбиты планеты изменяет плоскость движения вещества. В случае системы с одной планетой диск начинает выравниваться с её орбитой. Процесс выравнивания происходит на большой временной шкале и зависит от расстояния до планеты. Эволюция диска вплоть до стационарного состояния может занять десятки миллионов лет. Вековые возмущения распространяются далеко за пределы орбиты планеты.

Когда плоскость орбиты планеты не совпадает с плоскостью диска, по диску будет распространяться искривление. На больших расстояниях вещество ещё не заметит влияние планеты и движется в первоначальной плоскости диска, а на близких уже сменит плоскость диска и начнёт обращаться компланарно с планетой. Это явления широко известно как  $\beta$  Pic феномен. Искривление размером в 80 а.е. послужило основанием для предсказания в системе  $\beta$  Pic (возрастом 12 Мут) наличия внутренней планеты с массой  $9M_{Jup}$  на расстоянии  $\approx 9$  а.е. от звезды. Впоследствии планеты была обнаружена в ходе прямых наблюдений. Подобное возмущение также возможно в системе с несколькими планетами.

Планета на орбите с заметным эксцентриситетом будет вызывать в диске с изначально равномерным распределением планетезималей спиралеобразное возмущение плотности. Появление такой спирали вызвано неравномерной прецессией близких орбит планетезималей, что также приводит к их пересечениям, делающим столкновения гораздо более



частыми. На больших шкалах времени эксцентриситет орбиты планеты может придать эксцентричность диску. Это будет наблюдаться как смещение центра симметрии диска или как следующая из этого асимметричность яркости диска, возникающая из-за того, что часть диска находится ближе к звезде.

В двойных системах вековые возмущения могут быть ещё сильнее, поскольку в двойной системе орбита компаньона может иметь большой наклон или эксцентриситет, а возмущающий потенциал будет больше. Тогда может начать проявляться эффект Лидова-Козаи, когда большие наклоны переходят в большие эксцентриситеты. Тем не менее, даже в таких случаях существуют стационарные решения.

Другим возможным вариантом возмущений будут резонансные возмущения. Они реализуются тогда, когда частицы дебрис-диска обращается вокруг звезды целое число раз ( $p$ ) на каждое целое ( $p + q$ ) число оборотов планеты. При таком определении может быть бесконечно много резонансов, но сильнейшим будет резонанс первого порядка ( $q = 1$ ).

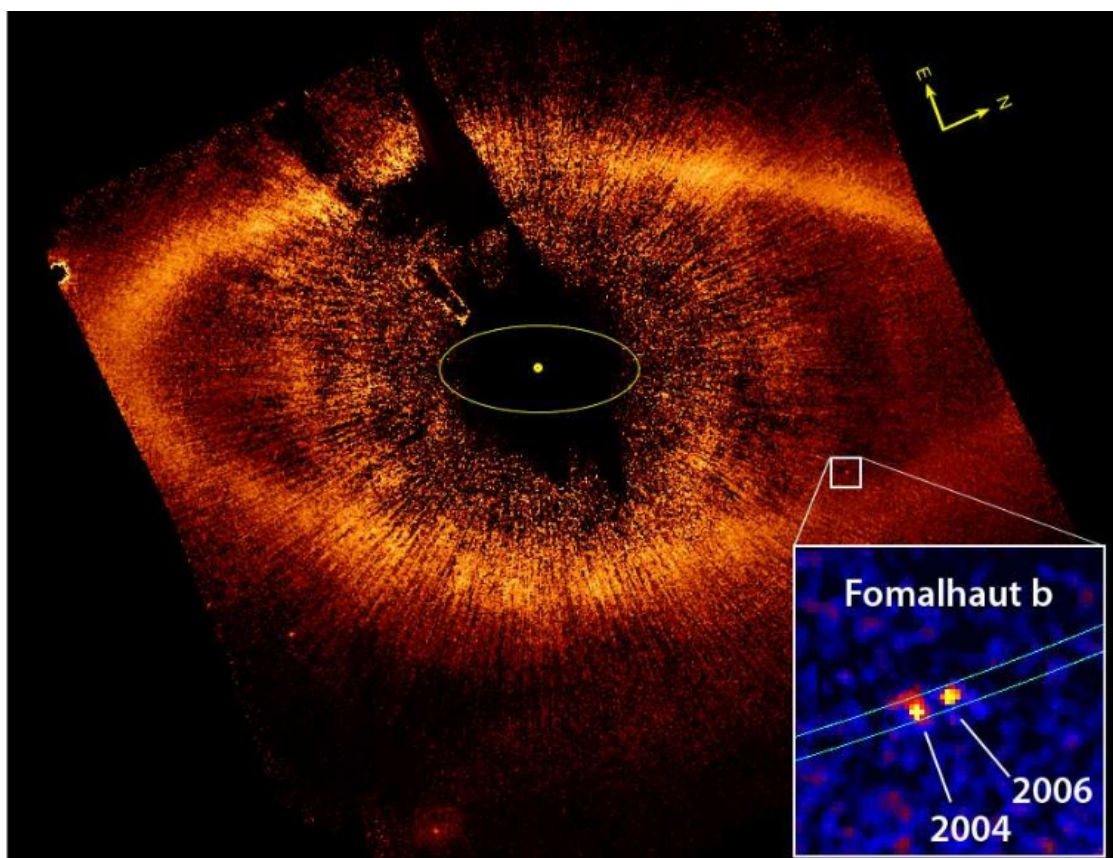


Рис. 13: Полученное на телескопе имени Хаббла коронаграфическое изображение Фомальгаута на длине волны  $0.6 \mu\text{m}$ , показывающее положение планеты Фомальгаут b (белый квадрат) на расстоянии  $12.7''$  от звезды и точно на внутренней границе пылевого пояса. Все остальные видимые объекты являются звёздами и галактиками поля или ошибками. Тусклая нижняя часть пылевого пояса лежит за картинной плоскостью. Для получения ориентации с севером вверху и западе слева, изображение следует повернуть на  $66^\circ$  против часовой стрелки. Жёлтый круг показывает положение звезды позади затмевающего пятна. Жёлтый эллипс с центром в звезде имеет большую полуось в 30 а.е. ( $3.9''$ ), что соответствует орбите Нептуна в Солнечной системе. Вставка показывает положение Фомальгаута b относительно Фомальгаута в 2004 и 2006 годах. Движение Фомальгаута b выглядит проходящим в пылевом поясе. (Kalas et al. 2008)



При резонансе в дисках возникают очищенные от вещества зоны. Из наблюдений следует, что чётко очерченный внутренний край дисков может существовать миллиарды лет. Аналогично, дебрис-диск в Солнечной системе стабилен на протяжении более чем 4.5 миллиардов лет. Из этого следует, что во внесолнечных дебрис-дисках подобные области динамически стабильны, а, значит, в них есть планеты, расположенные в щелях дисков. Резонанс также может приводить к уплотнениям в диске, поскольку мигрирующая планета может сопровождаться находящимися в резонансе с ней планетезималиями.

Третьим видом гравитационного возмущения является рассеяние. Процессы рассеивания лучше всего описываются как гиперболические столкновения планетезимали с планетой, в результате которого планетезималь приобретает большой импульс, существенно меняющий её орбиту, а планета испытывает небольшое возмущение. В Солнечной системе примером рассеяния служат кометы, переходящие в пояс Койпера под действием взаимодействия с гигантскими планетами. Аналогичные процессы могут быть и во внесолнечных системах. Другим примером является рассеяние диска в поясе Койпера, при котором объекты выбрасывают в облако Оорта под действием гравитационного взаимодействия с Нептуном. Образование рассеянного диска может быть неотъемлемым следствием существования планет. В некоторых моделях образования планет наблюдается и образование рассеянного диска. Рассеяние неизбежно и в случае расположения планеты в середине диска. Недавнее открытие, что Фомальгаут b находится внутри диска делает вероятным, что рассеяние может быть важным эволюционным процессом.

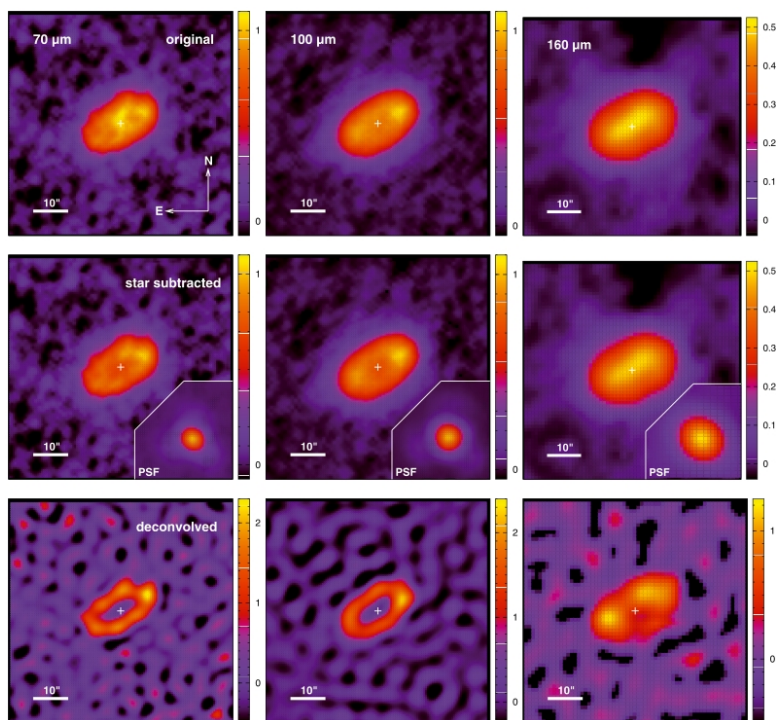


Рис. 14: Изображение кольца HD 207129. Оригинальный снимок (вверху), снимок с вычитанной звездой (в середине) и обработанный фильтром Винера (внизу) на трёх длинах волн наблюдений. Структура кольца чётка видна на изображениях, полученных на длинах волн  $70 \mu\text{m}$  и  $100 \mu\text{m}$ . Изображение ориентировано так, что север вверху и запад слева. Шкала расстояний представлена на изображениях.  $10''$  соответствует 160 а.е. Цветовая шкала проградуирована в  $\text{mJy}/\text{arcsec}^2$ . Положение звезды, определённое по изофотам на изображениях на  $70 \mu\text{m}$  и  $100 \mu\text{m}$ , отмечено крестом на каждом изображении. (Marshall et. al. 2011)

В массивных дисках влияние рассеяния на планету может быть существенно. Рассеяние будет оказывать диссипационное воздействие на планету. Эксцентриситет будет уменьшаться, а большая полуось орбиты начнёт изменяться, что приведёт к миграции планеты. Для получения сильного влияния миграции на диск она может не быть значительной. Например, в кратной системе даже небольшая миграция может привести к неустойчивости системы. Если рассеяние не достаточно сильно, чтобы влиять на планетезимали, оно всё равно может сильно изменять распределение пыли.

## 6 Заключение

В последние годы получено много новой информации о дебрис-дисках. Много данных было получено с космических телескопов *Herschel*, *Spitzer* и *WISE*. Наблюдения на наземных интерферометрах также дают много информации. Были получены разрешённые изображения многих дисков, которые позволили существенно продвинуться в моделировании.

Наблюдения выявили различные пылевые области в дисках. Кроме холодной пыли наблюдается тёплая и горячая. Природа горячей пыли остаётся не до конца понятой. В частности это связано с её расположением близко к звезде, что существенно усложняет наблюдения.

В изучении дебрис-дисков остаётся ещё целый ряд вопросов, касающихся природы горячей пыли, причин возникновения каскадов столкновений, эволюции дисковых структур, в частности, дисковых гало, связи дисков с планетами и кратностью звёзд.

Далеко не во всех системах будет возможно получить изображения планет, но разрешение дисков позволит провести связь между дисковыми структурами и планетами. Возможно будет получить изображения дисков с характерными деталями, наблюдаемыми у Фомальгаута или  $\beta$  Pictories.

## Список литературы

- [1] B. Acke et. al., *A&A* **540**, 125 (2012)
- [2] A.C. Boley et. al. *ApJ* **750**, L21 (2012)
- [3] J.S. Greaves et. al., *MNRAS* **438**, L31 (2014)
- [4] Heap et. al., *ApJ* **539**, 435 (2000)
- [5] P. Kalas et. al., *Nature* **435**, 1067 (2005)
- [6] P. Kalas et al., *Science* **322**, 1343 (2008)
- [7] G.M. Kennedy et. al., *MNRASL* **438**, L96 (2014)
- [8] M.A. MacGregor et. al., *ApJ Letters* **762**, L21 (2013)
- [9] B.C. Matthews et. al., *IAUS* **229**, 348 (2014)
- [10] B.C. Matthews et. al., *AsJ* **780**, 97 (2014)
- [11] B.C. Matthews et. al. in «Protostars and Planets, VI», p521 (2014)

- [12] J.P. Marshall et. al., *A&A* **529**, A117 (2011)
- [13] O. Panić et al., *MNRAS* **435**, 1037 (2013)
- [14] P. Plavchan et. al., *ApJ* **631**, 1161 (2005)
- [15] G. H. Rieke et. al., *ApJ* **620**, 1010 (2005)
- [16] B.A. Smith and R.J. Terrile, *Science* **226**, 1421 (1984)
- [17] K.R. Stapelfeldt et al., *ApJ* **154**, 458 (2004)
- [18] K. Y. L. Su et. al., *ApJ* **653**, 675 (2006)
- [19] K. Y. L. Su and G. H. Rieke, *IAUS* **299**, 318 (2014)
- [20] M. C. Wyatt et. al., *Ap&SS* **357**, 103 (2015)