

ИНФРАКРАСНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ И ИЗУЧЕНИЕ МАССИВНЫХ МОЛОДЫХ ЗВЁЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Излагаются введение в теорию и практику инфракрасной интерферометрии на примере изучения массивных молодых звёздных объектов, основы интерферометрии, а также наблюдаемые параметры и критерии их выбора. Обсуждаются последние достижения в интерферометрических исследованиях массивных молодых звёздных объектов.

An introduction to the theory and practical aspects of infrared interferometry is given in the context of the study of massive young stellar objects. Basic interferometric concepts, as well as observable quantities and their use, are presented. Recent advancements in interferometric studies of massive young stellar objects are discussed.

Введение

Звёзды с массой $\gtrsim 8 M_{\odot}$ (такие звёзды в данной обзорной лекции будут называться «массивными») составляют менее 0.4 % от общего числа всех звёзд, сформированных в настоящую эпоху Вселенной. Несмотря на это, по разным оценкам, считается, что при рождении нового «населения» звёзд примерно 17 % всеобщей звёздной массы приходится именно на них [1]. Массивные звёзды очень сильно влияют как на ближайшую окрестность, так и на содержащие их галактики.

подавляющее число массивных звёзд формируются в звёздных скоплениях [2, 3], образовавшихся в плотных молекулярных облаках. Из-за своих высоких температур и светимостей массивные звёзды способны ионизовать огромные объёмы в окружающей межзвёздной среде. Это сильное излучение может даже ионизовать плотные диски вокруг соседних звёзд, результатом чего может служить частичное или полное разрушение околзвёздных дисков [4, 5]. В то же время расширение ионизованной зоны разгоняет окружающий газ, что

может довести до рассеивания родительского молекулярного облака и, следовательно, приостановить дальнейшее образование звёзд в районе.

Большую часть времени своего существования ($\sim 10\text{--}30$ млн лет) массивные звёзды превращают водород в гелий в своих недрах за счёт процесса нуклеосинтеза. После ухода звезды с главной последовательности образуются более тяжёлые элементы вплоть до железа. Образование *еще* более тяжёлых элементов происходит, когда исчерпываются запасы ядерного топлива и массивная звезда взрывается как сверхновая. Этот великолепный взрыв разбрасывает материал в межзвёздную и межгалактическую среды, таким образом обогащая их тяжёлыми элементами, которые очень важны для жизни и ряда физических процессов (в том числе и для радиативного охлаждения при коллапсе молекулярных облаков и протозвёздных ядер).

Несмотря на важность роли, которую играют массивные звёзды в звёздных скоплениях и галактической эволюции в целом, о механизмах их образования и формирования известно довольно мало. Основным препятствием в образовании массивной звезды раньше считалось то, что (при сферической симметрии) давление излучения на падающее на звезду вещество должно превзойти силу тяготения довольно рано в процессе коллапса протозвёздного ядра, таким образом приостановив коллапс и ограничив массу звезды [6, 7]. Однако эта проблема решается в теоретических расчётах, если коллапс имеет не сферический, а дискообразный вид [8–10]. Тем не менее эти диски наблюдаются вокруг массивных звёзд с трудом (если они вообще наблюдаются, см. ниже), и сказать что-нибудь точно о них с точки зрения наблюдений пока крайне сложно (более подробное обсуждение теоретической стороны этой проблемы см. в работе R. Kuiper [11]).

В лекции речь пойдёт о так называемых массивных молодых звёздных объектах (MYSOs — Massive Young Stellar Objects — в англоязычной литературе). Данная классификация установлена наблюдательным путём и не имеет единого определения, но в ходе лекции ими будут условно считаться «глубоко погружённые объекты со светимостью $\gtrsim 10^4 L_{\odot}$ ». Примечательно, что масса в это определение напрямую не входит и что политкорректный термин «звёздный объект» просто скрывает наше великое невежество, когда речь идёт о таких объектах¹.

¹Например, каков спектральный класс объекта? Происходят ли в нём ядерные реакции? Не на главной последовательности ли он, и как это определить? И так далее.

Наблюдения MYSOs осложняются двумя неизбежными фактами. Во-первых, из-за чрезмерно быстрой эволюции массивные звёзды уже находятся на главной последовательности к тому моменту, когда они становятся видны в оптическом диапазоне (до этого они погружены в плотный газ молекулярного облака и/или околозвёздной оболочки, где поглощение света большое — $A_V \approx 10\text{--}100$ звёздных величин). Поэтому наблюдения MYSOs в оптическом диапазоне невозможны. Во-вторых, массивные звёзды и так по существу своему редки, что, как уже сказано, ведёт к тому, что они в среднем расположены на относительно больших расстояниях от нас ($\gtrsim 1$ кпк). Следовательно, в стандартных режимах наблюдений на единичных телескопах с диаметром вплоть до ~ 10 м MYSOs не разрешаются из-за дифракционного предела: они выглядят как точечные объекты.

Тем не менее в последнее десятилетие был осуществлён ряд работ, в которых тем или иным наблюдательным способом удаётся обойти дифракционный предел. Особое место занимает инфракрасная интерферометрия, в которой одновременно используются несколько телескопов. *Эффективный* диаметр таких интерферометров сегодня составляет десятки или сотни метров, что позволяет достигать пространственного разрешения до $\sim 0.001''$. В то же время эти интерферометры работают на длинах волн $\sim 1\text{--}13$ мкм (в зависимости от прибора), где поглощение света за счёт оболочки гораздо слабее, чем в оптическом диапазоне.

Астрономическая интерферометрия

Интерферометрическая видность

Одним из важнейших характеристик любого астрономического измерения является его *угловое разрешение*, которое в общем случае зависит от длины волны, применяемых измерительных приборов, атмосферных условий и т. д.

В области астрономии интерферометрия — это режим наблюдения, при котором когерентно складываются вместе сигналы нескольких телескопов (или нескольких апертур одного телескопа). Достигнутое таким образом угловое разрешение зависит от расстояния между телескопами (так называемого базиса) и может на порядок превысить разрешение отдельных составляющих интерферометр телескопов. Первые интерферометрические астрономические наблю-

дения были проведены для измерения диаметров ближайших звёзд Майкельсоном и Писом в 1921 г. [12].

Самой главной величиной любых интерферометрических наблюдений является интерферометрическая видность V . Эта величина включает в себя фазу и интенсивность интерференционной картины, и, согласно теореме Ван Циттерта—Цернике, равна преобразованию Фурье распределения интенсивности I :

$$V(u, v) = \frac{\iint I(\alpha, \beta) e^{-2\pi i(u\alpha + v\beta)} d\alpha d\beta}{\iint I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}, \quad (1)$$

где α, β — угловые координаты (например, в угловых секундах); u, v — угловые частоты (в обратных единицах). Таким образом, если при помощи интерферометра измерить V (или часть этой величины, например её амплитуду или фазу) для конечной выборки пространственных частот, мы получим некую информацию о распределении интенсивности I (или, простыми словами, как выглядит наш астрономический объект). Распределение измерений V по uv -пространству называется uv -покрытием. Чем лучше uv -покрытие, тем вернее наши представления о распределении интенсивности I . Следует отметить, что в пределе бесконечно многих измерений видности V на всех пространственных частотах (u, v) функцию $I(\alpha, \beta)$ можно получить в полном виде посредством обратного преобразования Фурье.

Пример использования интерферометрической видности

Вышеизложенное соотношение интерферометрической видности с распределением интенсивности довольно абстрактное для первого ознакомления с интерферометрией. В этом разделе приводится пример использования наблюдений видности V для измерения диаметра звезды.

В первом приближении наблюдаемую плоскость звезды можно описать как одноуровневый диск. Функция видности такого диска имеет следующий вид [13]:

$$V(u, v) = 2 \frac{J_1(\pi\Theta\sqrt{u^2 + v^2})}{\pi\Theta\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (2)$$

где Θ — угловой диаметр диска; J_1 — функция Бесселя первого рода и первого порядка. Так как функция видности зависит от всего одного параметра (диаметра диска), измерение видности на одной лишь

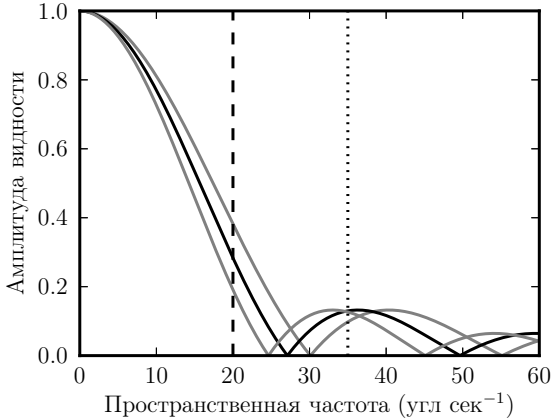


Рис. 1. Функция видности однородного диска с диаметром $0.047''$ (чёрная кривая) и аналогичные функции для диска с диаметром на 10 % меньше и больше (серые кривые). Штрихованной линией указана одна частота, на которой достаточно легко различить эти три кривые и соответственно определить диаметр звезды в данном примере. Точечной линией указана другая частота, на которой гораздо сложнее однозначно определить диаметр звезды

частоте *может быть* (в зависимости от частоты) достаточно, чтобы определить звёздный диаметр. На рис. 1 показана функция видности диска с диаметром $0.047''$ (это диаметр Бетельгейзе, измеренный Майкельсоном и Писом в 1921 г. [12]) вместе с функциями видности для диска с диаметром на 10 % больше и меньше того значения. Очевидно, что эти кривые пересекаются в некоторых местах, и возможность их различить зависит от того, на какой пространственной частоте проводятся наблюдения (что зависит в первую очередь от базиса — расстояния между телескопами). Хотя, если хорошо подобрать пространственную частоту или проводить наблюдения на нескольких частотах, диаметр звезды можно определить с большой точностью (следует отметить, что *правильность* этого определения всё-таки зависит от того, насколько справедливо предположение о том, что звезда выглядит как однородный диск).

Таким образом, если можно построить простую модель распределения интенсивности интересующего нас объекта, то достаточно «легко» найти параметры той модели. С другой стороны, если объ-

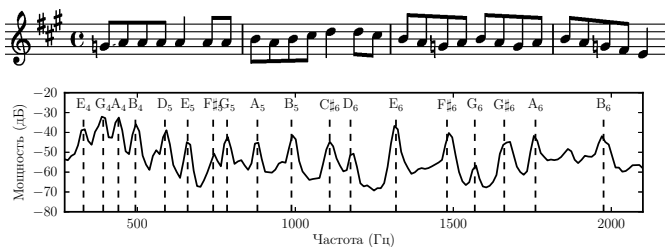


Рис. 2. Нотная запись открывающей фразы песни «Salt Creek» (сверху). Спектральное распределение мощности звуковой записи данной фразы, воспроизведенной на мандолине. Штриховыми линиями указаны частоты отдельных музыкальных звуков (снизу)

ект имеет более сложный вид или вообще невозможно заранее его предсказать, задача намного усложняется; её решение обычно требует хорошего *uv*-покрытия.

Музыкальная аналогия

Чтобы почувствовать суть задачи, когда исходная форма распределения интенсивности I полностью нам неизвестна, рассмотрим музыкальную аналогию. На рис. 2 представлены нотная запись короткой фразы из песни «Salt Creek» (сверху) и спектральное распределение мощности (СПМ) звуковой записи той же фразы. СПМ равно амплитуде преобразования Фурье среднего по времени звукового сигнала, поэтому спектр мощности можно считать аналогом функции видности.

Сейчас представим, что мы умеем измерять СПМ только на отдельных (звуковых) частотах. На рис. 2 видно, что повышения мощности приходятся на соответствующие музыкальным тонам частоты, поэтому по дискретным измерениям спектра мощности достаточно легко судить об относительной важности различных нот. Если хорошо подобрать 10–20 частот (что напоминает реальную ситуацию в инфракрасной интерферометрии), то заметим, что повышенная мощность наблюдается на частотах, соответствующих нотам А, В, С_♯, D, E, F_♯ и G_♯. Отсюда следует, что исходный «сигнал» воспроизводился в тональности или ля мажор, или фа-диез минор. Если постараться, то можно заметить маленький пик на частоте ноты G₆, что говорит о том, что лад данного воспроизведения не мажорный

и не минорный, а на самом деле миксолидийский.

Такой анализ спектра мощности даёт очень тонкую информацию об исходной звуковой записи — даже при сравнительно небольшом количестве измерений. То, что исходный звуковой сигнал, в общем, музыкальный, позволяет сразу получить его тональность и лад. Имея опыт в анализе преобразования Фурье музыкальных произведений, нетрудно представить, что мы сможем в будущем различать, например, какие музыкальные инструменты использовались, в каком они состоянии, какого жанра композиция и какие этнические элементы в ней присутствуют. . . Но такой анализ, увы, нам никогда не скажет, как песня *звучит*. Так же как и в астрономической интерферометрии, наблюдения функции видности не даёт нам *картину* (хотя существует несколько способов для «реконструкции» картин из интерферометрических наблюдений).

Применение инфракрасной интерферометрии для изучения массивных молодых звёздных объектов

Сегодня (или в недавнем прошлом) в мире действуют несколько инфракрасных интерферометров, таких как ISI [14], CHARA [15], Кеск-I [16] (демонтирован). Но подавляющее большинство интерферометрических работ по массивным молодым звёздным объектам на инфракрасных длинах волн было сделано на VLTI Европейской южной обсерватории на приборах AMBER (1—2.4 мкм, три телескопа) [17] и MIDI (8—13 мкм, два телескопа) [18].

Первые шаги

Работы по массивным молодым звёздным объектам с использованием инфракрасных интерферометров начали публиковаться только в 2007 г. В одной из первых работ de Wit и др. [19] представили амплитуду видности в полосе N (8—13 мкм) для одной точки в uv -пространстве для объекта W33A (расстояние 3.8 кпс, светимость $\sim 10^5 L_{\odot}$). В отличие от представленного выше примера со звёздным диаметром, в котором предполагалось, что исходная форма распределения интенсивности имеет вид однородного диска, тут форма распределения интенсивности заранее неизвестна. Поэтому одинарная точка в uv -пространстве, кажется, не так уж показательна. Однако благодаря именно этим интерферометрическим наблюдениям

впервые для молодой звезды были установлены наличие «тёплого» (~ 300 K) вещества и его примерные размеры (100–200 а. е.).

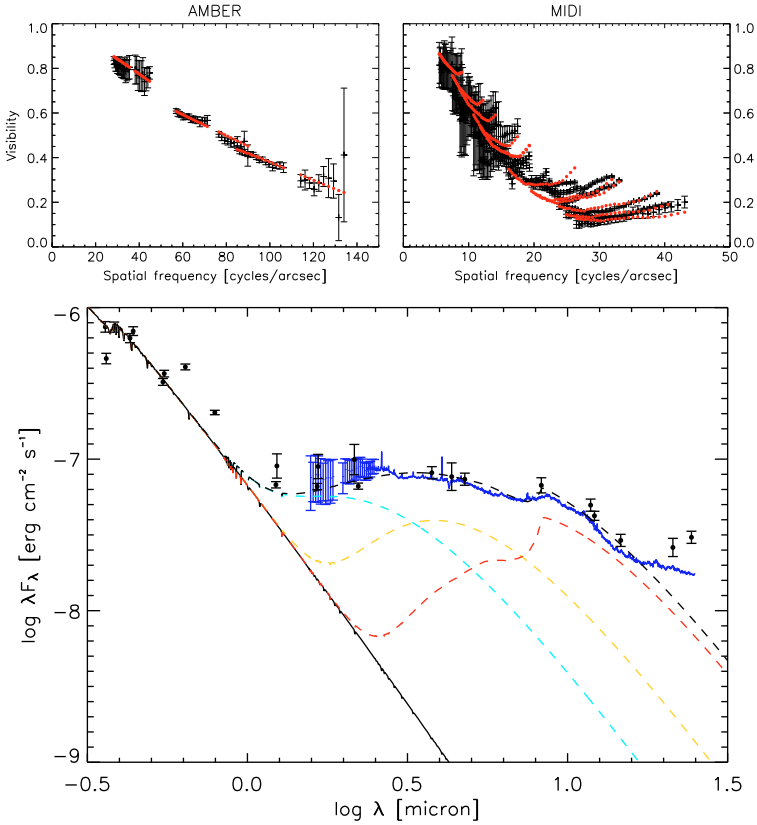


Рис. 3. Видность в ближнем (слева) и среднем (справа) инфракрасном диапазоне для объекта MWC 297. Наблюдения показаны с усами; модельные значения показаны точками (сверху). Спектральное распределение энергии. Верхняя точечная линия изображает суммарное излучение модели (снизу). Рисунок из работы [20]

Более сложное моделирование интерферометрических наблюдений объекта MWC 297 (расстояние 250 пк, светимость $\sim 10^4 L_\odot$) в полосах H (1.6–2.0 мкм), K (2.0–2.4 мкм) и N было сделано авторами Аске и др. [20]. В этой работе используется простая модель, составленная из гауссовых компонентов, которые излучают как чёр-

ные тела. Данная модель хорошо описывает интерферометрические данные и спектральное распределение энергии (рис. 3) и указывает на наклонённую структуру с размером $\lesssim 1.5$ а. е., при этом с минимальным комплектом свободных параметров (их всего семь).

Интерферометрия и модели переноса излучения

Начиная с 2009 г. начали публиковаться работы с общей методикой использования сетки из 200 000 моделей переноса излучения от Robitaille и др. [21]. Такая тактика привлекательна тем, что она позволяет посчитать видность и спектральное распределение энергии для сложных распределений вещества, например в виде околозвёздного диска и/или оболочки. В работах [22–27] эти относительно сложные модели использовались для подгонки спектрального распределения энергии; интерферометрические наблюдения в основном применялись только для того, чтобы исключить неподходящие модели. К сожалению, из-за большого количества свободных параметров и высокого вырождения в данном подходе остаётся место для сомнения в интерпретации интерферометрических наблюдений массивных молодых звёздных объектов.

Первое интерферометрическое изображение массивного молодого звёздного объекта

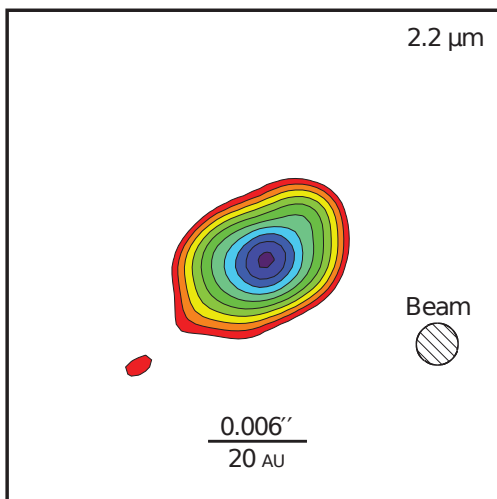


Рис. 4. Первое реконструированное интерферометрическое изображение массивного молодого звёздного объекта IRAS 13481-6124. Рисунок из работы [25]

Очень важное развитие в изучении массивных молодых звёзд было сделано авторами Kraus и др. [25] в 2010 г. Благодаря превосходному заполнению uv -плоскости им удалось получить первое реконструированное изображение объекта IRAS 13481-6124 (расстояние 3.6 кпк, светимость $\sim 3\text{--}6 \times 10^4 L_{\odot}$) на длине волны 2.2 мкм. Методика реконструкции изображений очень хороша тем, что она даёт независимое от моделей изображение (в отличие от использованных в предыдущих двух разделах приёмов). Однако её можно использовать только тогда, когда имеется отличное заполнение uv -плоскости, что требует много наблюдательного времени.

Полученное изображение (рис. 4) показывает вытянутую структуру, которая перпендикулярна крупномасштабному молекулярному истечению. Это пока единственное изображение массивного молодого звёздного объекта, в котором разрешается излучение от тёплой околзвёздной пыли на масштабе десятков астрономических единиц. Авторы работы считают, что показанная на рис. 4 структура

суть околозвёздный диск. Однако эта гипотеза была сделана на основе подобранных моделей переноса излучения (см. выше), стоит рассмотреть другие возможности (Voley, Kraus и др., готовится к печати).

Интерферометрический обзор массивных молодых звёздных объектов

Все вышеперечисленные работы были сосредоточены на изучении отдельных объектов. Общее количество рассмотренных таким образом объектов не превышает десяти, при этом в каждой работе формируются различные допущения и применяются различные подходы. В связи с этим авторами Voley и др. [28] был представлен интерферометрический обзор в полосе N для выборки из 25 объектов высокой и средней массы. Относительно простой геометрический анализ в этой работе избегает излишних сложностей, чтобы претендовать на более или менее однородное рассмотрение совокупности наблюдений.

На рис. 5 показаны результаты подгонки одномерных («1D», «1DOH») и двумерных («2DOH», «2D1D») гауссовых моделей к интерферометрическим наблюдениям вместе с направлением истечения или дисков (если есть о них информация в опубликованной литературе). Размерность использованной гауссовой модели зависит от uv -покрытия, когда возможно, используется двумерная модель.

Примечательно, что компактное излучение в среднем инфракрасном диапазоне разрешалось для 20 из 25 объектов, что говорит о широком распространении «тёплого» околозвёздного вещества на расстоянии десятков астрономических единиц вокруг молодых массивных звёзд. Дальше, когда uv -покрытие допускает использование двумерной модели, как правило, наблюдается значительное отклонение от сферической симметрии. Чаще всего это компактное излучение вытянуто перпендикулярно направлению истечения или параллельно диску (например, AFGL 2136, IRAS 13481-6124, R Mon), хотя стоит подчеркнуть, что иногда получается совсем наоборот (например, Mon R2 IRS3A, M8E-IR).

Заключение

Лекция была посвящена основам астрономической интерферометрии в инфракрасном диапазоне. Особое внимание было уделено

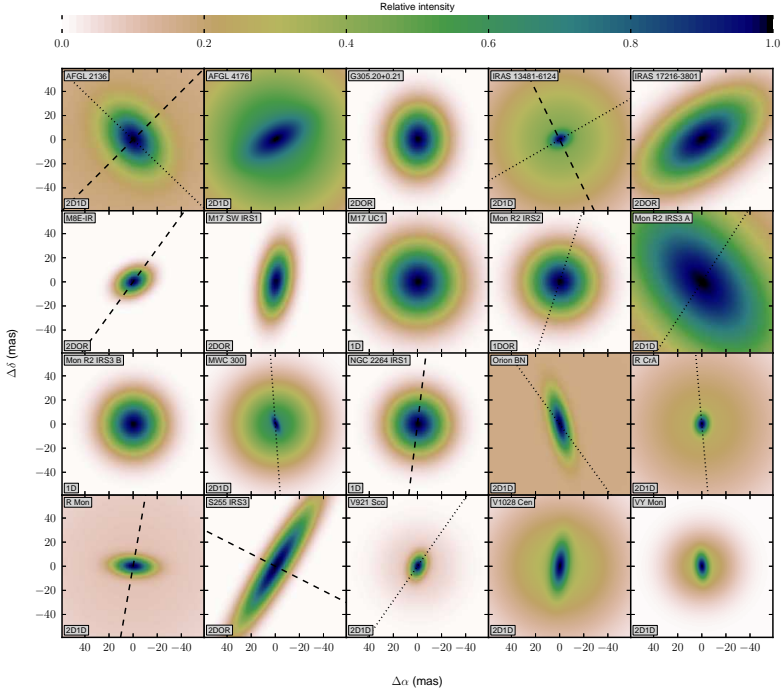


Рис. 5. Результаты подгонки гауссовых моделей к интерферометрическим наблюдениям для двадцати молодых звёздных объектов высокой и средней массы. Точечными линиями показаны позиционный угол диска (если он есть), штрихованными — позиционный угол истечения (если он есть). Подписями снизу указано, какая модель использовалась — в зависимости от uv -покрытия — для подгонки. Рисунок взят из работы [28]

изучению массивных молодых звёздных объектов, однако представленные методы также применимы и для изучения других объектов (в том числе кратных систем, звёзд типа Херbigа и Т Тельца, проэволюционировавших звёзд, галактик с активными ядрами, планетных систем и т. д.).

Благодаря инфракрасной интерферометрии впервые становится возможным разрешение околозвёздного материала вокруг массивных звёзд на актуальных для аккреционных процессов масштабах. Это означает, что именно сейчас открывается новая территория в области образования массивных звёзд. Первые наблюдения, хотя и

сильно ограничены, уже доставляют нам уникальную информацию об этих объектах. Разумеется, в скором будущем можно ожидать развития как самих интерферометрических приборов, так и методов анализа интерферометрических данных.

Наконец, для заинтересованного читателя рекомендуются обзорные статьи [29] (по формированию массивных звезд) и [30] (по использованию инфракрасной интерферометрии для изучения молодых массивных звёзд).

Библиографические ссылки

1. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2001. — Vol. 322. — P. 231–246.
2. *de Wit W. J., Testi L., Palla F. et al.* The origin of massive O-type field stars. I. A search for clusters // Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 425. — P. 937–948.
3. *de Wit W. J., Testi L., Palla F., Zinnecker H.* The origin of massive O-type field stars: II. Field O stars as runaways // Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 437. — P. 247–255.
4. *O’Dell C. R., Wen Z., Hu X.* Discovery of new objects in the Orion nebula on HST images - Shocks, compact sources, and protoplanetary disks // Astrophys. J. — 1993. — Vol. 410. — P. 696–700.
5. *Fang M., van Boekel R., Wang W. et al.* Star and protoplanetary disk properties in Orion’s suburbs // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 504. — P. 461–489.
6. *Kahn F. D.* Cocoons around early-type stars // Astron. Astrophys. — 1974. — Vol. 37. — P. 149–162.
7. *Wolfire M. G., Cassinelli J. P.* Conditions for the formation of massive stars // Astrophys. J. — 1987. — Vol. 319. — P. 850–867.
8. *Yorke H. W., Sonnhalter C.* On the Formation of Massive Stars // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 569. — P. 846–862.
9. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F.* Radiation-Hydrodynamic Simulations of Collapse and Fragmentation in Massive Protostellar Cores // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 656. — P. 959–979.

10. *Kuiper R., Klahr H., Beuther H., Henning T.* A solution to the radiation pressure problem in the formation of massive stars // arXiv 1211.7064. — 2012.
11. *Kuiper R. G.* Modeling the formation of massive stars : Ph.D. thesis / Ruperto-Carola University of Heidelberg. — 2009.
12. *Michelson A. A., Pease F. G.* Measurement of the diameter of alpha Orionis with the interferometer. // *Astrophys. J.* — 1921. — Vol. 53. — P. 249–259.
13. *Berger J. P., Segransan D.* An introduction to visibility modeling // *New Astron. Rev.* — 2007. — Vol. 51. — P. 576–582.
14. *Hale D. D. S., Bester M., Danchi W. C. et al.* The Berkeley Infrared Spatial Interferometer: A Heterodyne Stellar Interferometer for the Mid-Infrared // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 537. — P. 998–1012.
15. *ten Brummelaar T. A., McAlister H. A., Ridgway S. T. et al.* First Results from the CHARA Array. II. A Description of the Instrument // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 628. — P. 453–465.
16. *Tuthill P. G., Monnier J. D., Danchi W. C. et al.* Michelson Interferometry with the Keck I Telescope // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2000. — Vol. 112. — P. 555–565.
17. *Petrov R. G., Malbet F., Weigelt G. et al.* AMBER, the near-infrared spectro-interferometric three-telescope VLTI instrument // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 464. — P. 1–12.
18. *Leinert C., Graser U., Przygodda F. et al.* MIDI - the 10 μm instrument on the VLTI // *Astrophys. Space. Sci.* — 2003. — Vol. 286. — P. 73–83.
19. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D., Mottram J. C.* VLTI/MIDI 10 μm Interferometry of the Forming Massive Star W33A // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 671. — P. L169–L172.
20. *Acke B., Verhoelst T., van den Ancker M. E. et al.* MWC 297: a young high-mass star rotating at critical velocity // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 485. — P. 209–221.
21. *Robitaille T. P., Whitney B. A., Indebetouw R. et al.* Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. I. A Grid

- of 200,000 YSO Model SEDs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 167. — P. 256–285.
22. *Linz H., Henning T., Feldt M. et al.* Mid-infrared interferometry of massive young stellar objects. I. VLTI and Subaru observations of the enigmatic object M8E-IR // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 505. — P. 655–661.
 23. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D., Lumsden S. L.* The origin of mid-infrared emission in massive young stellar objects: multi-baseline VLTI observations of W33A // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 515. — P. A45.
 24. *Follert R., Linz H., Stecklum B. et al.* Mid-infrared interferometry of massive young stellar objects. II. Evidence for a circumstellar disk surrounding the Kleinmann-Wright object // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 522. — P. A17.
 25. *Kraus S., Hofmann K.-H., Menten K. M. et al.* A hot compact dust disk around a massive young stellar object // *Nature.* — 2010. — Vol. 466. — P. 339–342.
 26. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D. et al.* Mid-infrared interferometry towards the massive young stellar object CRL 2136: inside the dust rim // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 526. — P. L5.
 27. *Grellmann R., Ratzka T., Kraus S. et al.* Mid-infrared interferometry of the massive young stellar object NGC 2264 IRS 1 // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A109.
 28. *Boley P. A., Linz H., van Boekel R. et al.* The VLTI/MIDI survey of massive young stellar objects . Sounding the inner regions around intermediate- and high-mass young stars using mid-infrared interferometry // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A24.
 29. *Beuther H., Churchwell E. B., McKee C. F., Tan J. C.* The Formation of Massive Stars // *Protostars and Planets V.* — P. 165–180.
 30. *de Wit W. J.* Advances in Understanding Young High-Mass Stars Using Optical Interferometry // *Circumstellar Dynamics at High Resolution* / ed. by A. C. Carciofi, T. Rivinius : *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 2012. — Vol. 464. — P. 329.