

Лабораторная работа № 2

Изучение звездного коронографа.

Составитель и ведущий преподаватель:
Тавров Александр Викторович

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется интерференция света в нуль интерферометре вращательного сдвига, изучаются теория геометрической фазы, теория пространственной когерентности и принцип действия ахроматического интерференционного погашения света. Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с теорией интерференции, пространственной когерентности [1] и принципом ахроматического интерференционного коронографа [2].

Непосредственное наблюдение экзопланет требует космического базирования ахроматического звездного коронографа, совмещенного с телескопом 0,8...1,5 м. При наблюдениях с Земли мешает атмосфера, существующие системы адаптивной оптики технически не позволяют достичь дифракционного разрешения телескопа.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОРОНОГРАФА

Интерферометр содержит два или несколько небольших телескопа, разнесенных на достаточное расстояние друг от друга (рис. 1). Чем дальше расстояние между телескопами, тем больше оптическая разность хода волн (ОРХ). Для выключения осевого источника (звезды) применяют ахроматический сдвиг фазы на 180° . Для достижения ахроматизма используется сдвиг геометрической фазы в неплоском интерферометре.



Рис. 1. Разность хода в звездном интерферометре

Коронограф – это один телескоп с разрешением, достаточным для разделения звезды и планеты (рис. 2).

Для справки: телескоп, с диаметром зеркала 1 м. разрешит 1 астрономическую единицу (а.е.)– расстояние от Земли до Солнца, удаленные на 5 парсеков.

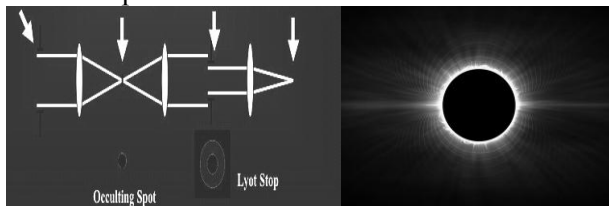


Рис. 2. Принцип солнечного коронографа и изображение короны солнца

Ахроматический интерферометр общего пути предназначен для наблюдения экзопланеты – слабого внеосевого источника света на фоне звезды – яркого осевого источника. Изображение планеты и его копия приобретают ахроматический фазовый сдвиг на 180 градусов и интерферируют в противофазе после интерферометра вращательного сдвига (рис. 3).

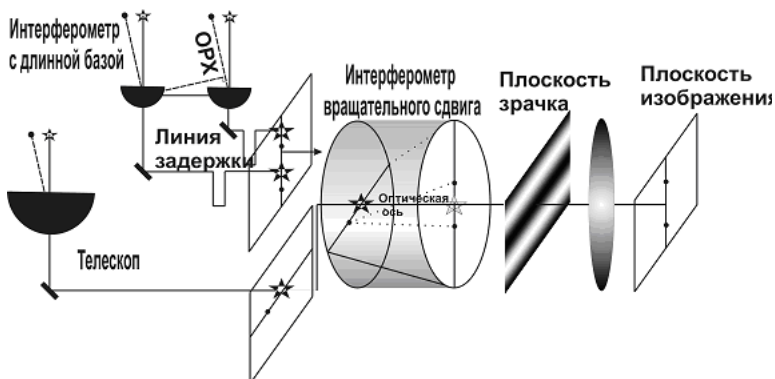


Рис. 3. Размещение нуль-интерферометра вращательного сдвига для звездного коронографа

Ахроматический фазовый сдвиг обусловлен геометрической фазой в схеме трехмерного интерферометра. Процесс интерференции пространственно разделяет темное и светлое поля изображения звезды, перенаправляя их по разные стороны светоделителя. Процесс интерференции не ослабляет изображение планеты и перенаправляет его с равной интенсивностью по обе стороны светоделителя (рис. 4). Схема интерферометра общего пути обеспечивает механическую стабильность к внешним воздействиям.

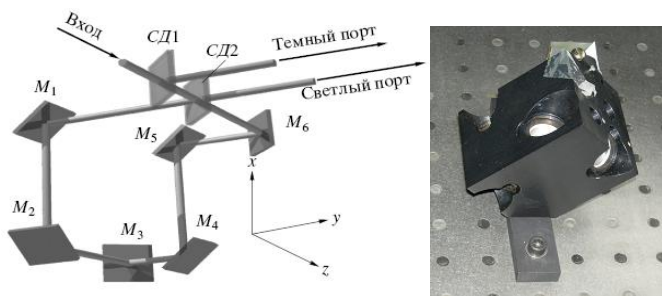


Рис. 4. Схема и фото нуль-интерферометра вращательного сдвига

3. ПРИНЦИП ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОГАШЕНИЯ СВЕТА

С целью ослабления фонового сигнала за счет сдвига геометрической фазы реализована пространственная (неплоская) схема кольцевого интерферометра Саньяка, внутри которого излучение распространения по трем пространственным координатам, как вдоль граней куба, (рис. 4).

Неплоская схема кольцевого интерферометра осуществляет поворот поляризации на азимут $+90^\circ$ при распространении волны в прямом направлении (по часовой стрелке) и на азимут -90° при распространении волны в обратном направлении (против часовой стрелки). Оптическая схема интерферометра содержит шесть последовательных плоских зеркал, обозначенных М1–М6 и два светоделителя СД1 и СД2.

Две волны, прошедшие через интерферометр в противоположных направлениях, приобретают взаимный геометрический поворот переносимых изображений на 180° .

Геометрический поворот плоскости колебаний электрического вектора на 180° обуславливает фазовый сдвиг на π -радиан для интерференции в режиме темного поля. Режим деструктивной интерференции, содержащий темное поле, локализован со стороны грани светоделителя СД2, обращенной в противоположном направлении к входному лучу (рис. 5).

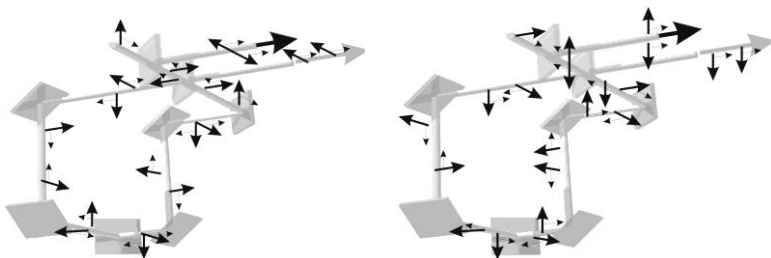


Рис. 5. Локализации темного и светлого полей по разные стороны светоделителя для двух ортогональных поляризаций свига

Другой выход интерферометра – светлый порт находится со стороны светоделителя СД2, обращенной направо по ходу падающего луча (рис. 4).

Таким образом, по одну сторону светоделителя возникает светлое поле интерференции, и этот выход обозначен «светлым выходом». По другую сторону светоделителя СД2 возникает темное поле интерференции на «темном выходе», который направлен навстречу входному лучу.

Для наблюдения «темного выхода» предусмотрен светоделитель СД1. Конструктивно СД1 – широкополосный поляризационный светоделительный кубик для видимого диапазона длин волн. Через светоделитель СД1 входное излучение с вертикальной линейной поляризацией проходит практически без потерь, и интерферометр анализирует полную энергию линейно поляризованного входного излучения. Плечи интерферометра поворачивают азимут поляризации входящего излучения на $\pm 90^\circ$, и выхо-

дящий свет приобретает поляризацию, совпадающую с режимом отражения светоделителя СД1. Снова без существенных потерь результат интерференции перенаправлен на «темный выход» интерферометра.

Изображение планеты – внеосевой источник света, направленный в интерферометр и наблюдаемый на том же «темном выходе» интерферометра, показывает другой результат: плоская волна распространяется с наклоном относительно оси интерферометра, на темном выходе преобразуется интерферометром в две волны, также имеющие взаимный наклон волновых фронтов. Данная интерференционная картина в плоскости зрачка оптической системы соответствует двум источникам, разделенным в пространстве в плоскости изображения, которое наблюдают в фокусе собирающей линзы. Таким образом, парные изображения планеты – точечные внеосевые источники – оказываются геометрически разделенными в плоскости изображения и поэтому не интерферируют друг с другом.

Реальные дифракционные изображения точечных источников соответствуют функциям рассеяния точки (ФРТ) (рис. 6) оптической системы телескопа и интерферометра, имеющих конечную апертуру.

Достаточно близкий к оптической оси внеосевой источник образует малый наклон волнового вектора к оси интерферометра, и две ФРТ имеют малый латеральный сдвиг внутри главного максимума (лепестка) ФРТ. Слабо разрешимый источник и его реплика интерферируют в противофазе, погашая друг друга лишь частично из-за латерального сдвига ФРТ. Максимальный разностный сигнал имеет планета, наклоненная к оптической оси (поворотной оси интерферометра вращательного сдвига) на угол приблизительно в два раза меньше углового разрешения телескопа.

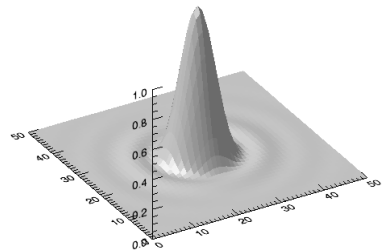


Рис. 6. Дифракционное изображение точечного источника – функция рассеяния точки (картина Эйри)

Интерферометр вращательного сдвига складывает волновые фронты с взаимным поворотом на 180° . Это обуславливает зависимость степени ослабления сигнала – интерференционного контраста от функции когерентности источника света.

Степень ослабления излучения осевого источника – непосредственно измеряемая экспериментальная величина, одинаковая при измерении как в плоскости зрачка, так и в плоскости изображения. Светоделитель отделяет темное и светлое поля интерференции, что делает возможным одновременное измерение интенсивностей темного $I_{\text{Null}}^{\text{ed}}$ и светлого I_{Bright} полей. Их отношение равно коронографическому контрасту, определяющему степень ослабления сигнала:

$$NC = \frac{I_{\text{Null}}^{\text{ed}}}{I_{\text{Bright}}} . \quad (1)$$

В задаче коронографии звезда – это протяженный источник света, некогерентно освещенный диск с радиусом k_0 , записанным в единицах углового спектра. Интерферометр, установленный в плоскости зрачка телескопа с круговой апертурой и с однородным пропусканием (без апподизации) ослабит сигнал согласно выражению (2). Степень ослабления сигнала зависит как от параметров излучения, длины волны λ , углового размера звезды Θ , так и диаметра телескопа D (см. рис. 7):

$$NC(\Theta) = 1 - (1 - J_0(2k_0R)) / (k_0R)^2 , \quad (2)$$

где $2k_0R = 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Theta}{2} \right) \left(\frac{D}{2} \right) = \pi\Theta D / \lambda$.

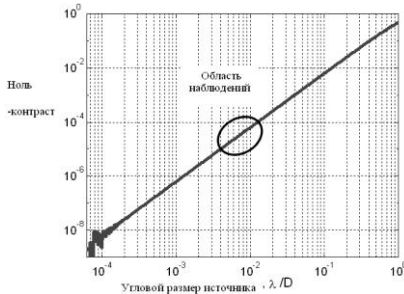


Рис. 7. Теоретическая зависимость нуль-контраста от углового размера источника

Если принять разрешение телескопа равным λ/D , то выражение (2) определит зависимость максимально возможного ослабления сигнала от углового размера звезды в единицах λ/D . Указанная зависимость показана на рис. 7. Как видно из рис. 7, предложенный интерферометр вращательного сдвига принци-

пиально не зануляет излучение осевого протяженного источника, который представим суперпозицией некогерентных точечных источников. В зависимости от размера осевого источника, измеряемого в единицах разрешения телескопа λ/D , контраст ослабления уменьшается согласно выражению (2) и рис. 7.

4. НАБЛЮДЕНИЕ КОРОНЫ ОСЕВОГО ИСТОЧНИКА

Прямые непосредственные методы наблюдения слабоконтрастных астрообъектов, например экзопланет, ограничены на практике техническим требованием понизить высокий оптический контраст в модели «звезда – экзопланета» до приемлемого уровня фотодетектирования. Яркий фоновый источник света – звезда имеет излучение на 6–10 порядков энергетически превышающее отраженное излучение слабого источника света – экзопланеты. Требуемое изменение контраста изображения как энергетически, так и в латеральном направлении для слабоконтрастного объекта, находящегося вблизи ослепляющего яркого светового источника, составляет непосредственную задачу звездной коронографии.

Схема установки для наблюдения коронографического изображения приведена на рис. 8. Коллимированный луч от гелий-неонового лазера Л направлен юстируемым зеркалом 31 на нуль-интерферометр НИ. Свет после нуль-интерферометра перенаправлен на экран Э дополнительной линзой Л и зеркалом 32. На экране возможно экспериментально пронаблюдать коронографическое изображение с учетом расходимости неколлимированного лазерного луча.

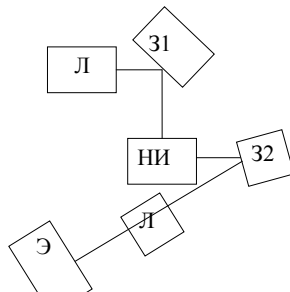


Рис. 8. Схема установки для наблюдения коронографического изображения

5. НАБЛЮДЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

Интерферометр вращательного сдвига визуализирует область пространственной когерентности. Благодаря вращению по-

ля зрения интерферируют точки зрочка, диаметрально противоположные или повернутые на другой угол, соответствующий вращательному сдвигу (рис. 9).

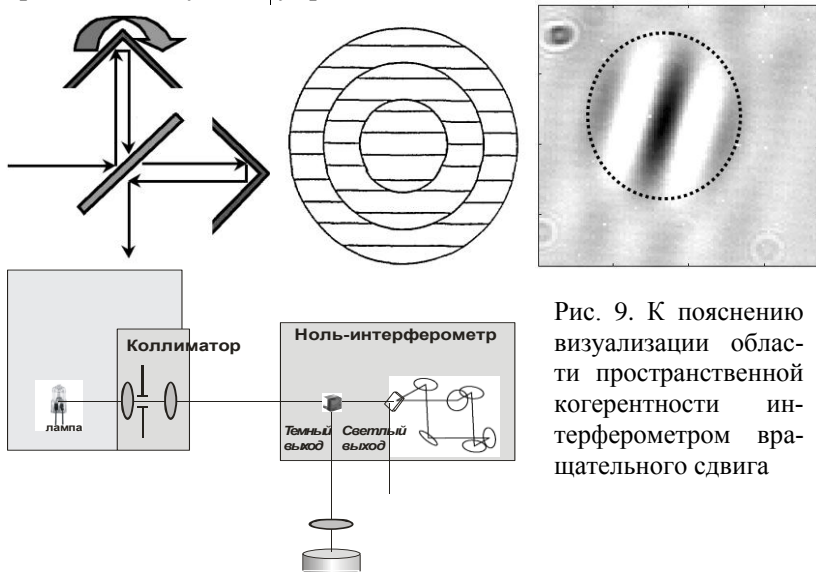


Рис. 9. К пояснению визуализации области пространственной когерентности интерферометром вращательного сдвига

Звезда, представленная протяженным источником — равномерно освещенным диском ослабляется коронографом в плоскости изображения телескопа до максимально возможного теоретического значения контраста:

$$\overline{NC} = \overline{NC}_1 = \frac{1 - (1 - J_0(2k_\theta R)) / (k_\theta R)^2}{1 + (1 - J_0(2k_\theta R)) / (k_\theta R)^2}. \quad (3)$$

6. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФАЗЫ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В 1984 М. Берри проанализировал и обобщил ряд динамических систем, к которым принадлежит, в частности, классический интерферометр. Он предложил учитывать и измерять фазу системы, когда физическая система проходит циклический путь в параметрическом пространстве или в пространстве состояний системы. Основополагающий вывод: для вычисления общей фазы

волны в физической системе недостаточно учитывать только оптическую длину пути, по которому распространяется волна. Классическая аддитивная составляющая фазы получила название *динамической фазы*. Другая неклассическая аддитивная часть общей фазы получила название *геометрической фазы* из-за ее зависимости от геометрии пути (или эволюции системы) и, в общем, независимости геометрической фазы от длины волны. Геометрическая фаза также известна как фаза Берри, и ей посвящено большое количество обзорных исследований. Исторически геометрическую фазу в оптике подразделяют на несколько типов, из которых две наиболее распространенные геометрические фазы: – фаза перенаправления спина (spin re-direction phase) и фаза Панчаратнама (Pancharatnam phase). Новые типы геометрических фаз учитывают циклическое преобразование поперечных мод высоких порядков в когерентных волнах, например, переход поперечной моды $TEM_{10} \leftrightarrow TEM_{20}$ возможно описать геометрической фазой.

6.1. Геометрическая фаза перенаправления спина

При неплоском распространении световой волны в трехмерном пространстве, например вдоль граней куба или пирамиды, световая волна приобретает геометрическую фазу, которая зависит от геометрии пути распространения.

Знак фазового сдвига зависит от направления вращения электрического вектора, знак фазового сдвига принимают положительным для правой круговой поляризации и отрицательным для левой круговой поляризации.

Отображаемая на сфере направлений траектория луча может быть не обязательно непрерывной и даже незамкнутой. В этом случае замыкание пути на сфере направлений производят по топологическим геодезическим линиям. Примером служит отражение на системе зеркал, показанное на рис. 10, где геометрическая фаза равна удвоенному углу Φ .

Разделение геометрической фазы перенаправления спина и динамической фазы или поляризационного поворота, возникающих при отражении от материала зеркала составляет нетривиальную задачу даже в простом случае при использовании диэлек-

трических материалов с равными р- и s-поляризационными компонентами отражения.

Эффект геометрической фазы перенаправления спина можно проследить во многих неплоских оптических системах с призмами, зеркалами, световодами. Часто не производят отдельного измерения геометрического вращения фазы или поворота поляризации из-за того, что эти эффекты смешаны с другими оптическими эффектами, и их разделение представляет непростую задачу.

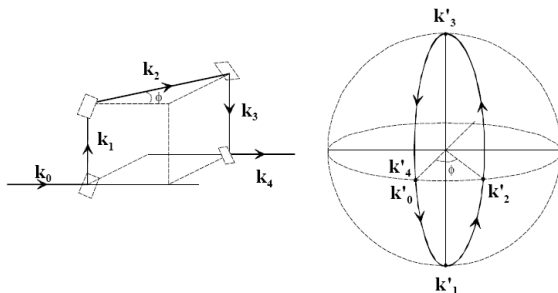


Рис. 10. Неплоская траектория распространения света системой зеркал обуславливает геометрическую фазу, которая графически определена на сфере направлений дискретными точками, соединенными по геодезическим линиям – окружностям для оценки величины фазы

6.2. Геометрическая фаза Гюйи

Для объяснения принципа действия интерференционного коронографа по схеме интерферометра Майкельсона, где в одном плече установлена переворачивающая изображение оптическая система с прохождением изображения через фокус, а в другом плече интерферометра не установлено фокусирующей оптики, следует упомянуть геометрическую фазу Гюйи (Göyü), возникающую при прохождении световой волны через фокус оптической системы. Ахроматическая фаза Гюйи – частный случай фазы перенаправления спина, но которая имеет место не только при отражении как фаза перенаправления спина, но и в оптической системе, работающей на проход, при преломлении (рис. 12).

6.3. Геометрическая фаза Панчаратнама

Геометрическая фаза обусловлена циклическим преобразованием состояния поляризации, она была открыта С. Панчаратнамом. Позднее фаза Панчаратнама была отнесена к разновидности фазы Берри. Преобразования поляризации, не уменьшающие степень когерентности, удобно учитывать с помощью матриц и векторов Джонса, которые, в частности, удобно применить для расчета геометрической фазы Панчаратнама.

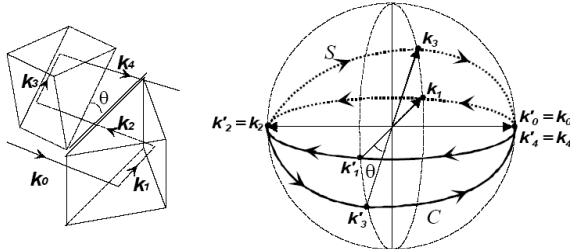


Рис. 11. Схема поворота изображения и синхронизированного поворота электрического вектора в случае идеального отражения диэлектрическими зеркалами с равными р- и s-компонентами отражения

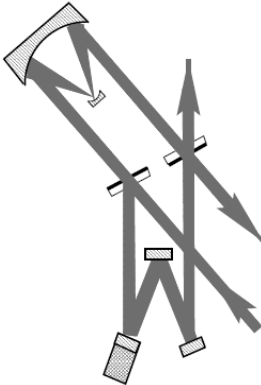


Рис. 12. Схема интерферометра Майкельсона с поляризационным поворотом на 180° при прохождении через фокус в одном плече интерферометра и при отсутствии прохождения через фокус в другом плече интерферометра

Графическую иллюстрацию фазы Панчаратнама показывают на сфере Пуанкаре – единичной сфере, северный полюс которой соответствует правой круговой поляризации и южный полюс – левой круговой поляризации, на экваторе располагают линейную поляризацию с азимутами, соответствующими меридиональному углу. Эллиптическую поляризацию характеризует азимут и фазовый угол. Поляризации с переменными азимутами $\Theta = 2\varphi$, расположены вдоль меридиональных углов сферы Пуанкаре, и поляризационные фазовые углы (анизотропия) $\psi = \Delta$ соответствуют азимутальным углам на сфере Пуанкаре.

Пример оптической схемы, модулирующей геометрическую фазу Панчаратнама, построен на трех волновых пластинах по схеме «ЧПЧ» (QHQ – quarter-half-quarter), которая реализует последовательные фазовые задержки на $\lambda/4$ – четверть длины волны, на $\lambda/2$ – половина длины волны и на $\lambda/4$ – четверть длины волны между ортогонально поляризованными компонентами поля. Среднюю $\lambda/2$ (полуволновую) волновую пластину поворачивают вокруг оптической оси, и ее поворот модулирует геометрическую фазу Панчаратнама. На входе модулятора линейно поляризованный свет с азимутом, ориентированным под углом 45° к быстрой оси $\lambda/4$ (четвертьволновой) пластины преобразуется в круговую поляризацию. При прохождении через четвертьволновую пластину поворот $\lambda/2$ пластины модулирует фазу круговой поляризации. Последняя $\lambda/4$ -волновая пластинка преобразует поляризацию волны на выходе к исходной линейной поляризации со сдвигом геометрической фазы (рис. 13).

Для получения ахроматизированного фазового сдвига в идеальном случае, не зависящего от длины волны, используют квазиахроматичные волновые пластины, склеенные из материалов с положительной и отрицательной дисперсиями, компенсирующими малые рассогласования длины волны.

Для более широкого спектрального диапазона применяют также призмы-ромбы Френеля и модификации призм Френеля, использующие фазовые сдвиги полного внутреннего отражения (рис. 14). Остаточные хроматичности классической призмы Френеля составляют доли градуса для видимого диапазона длин волн.

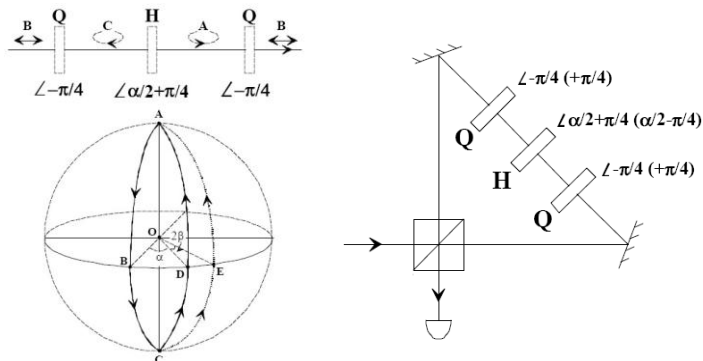


Рис. 13 ЧПЧ (QH) модулятор геометрической фазы Панчаратнама

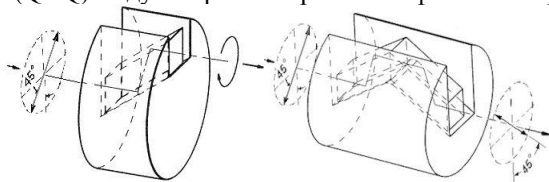


Рис. 14. $\lambda/4$ - и $\lambda/2$ -волновые пластины – призмы Френеля, используемые для квазиахроматической фазовой модуляции

Рабочее задание

1. Пронаблюдать картину на экране при различном угловом рассогласовании источников, поворачивая винт юстировочного зеркала 31 (рис. 8).
2. Сфотографировать изображение короны и объяснить причину возникновения темного поля и короны.
3. Ввести несимметричные aberrации в падающий пучок (перекрыть половину диаметра падающего пучка) и наблюдать уменьшение разрешения изображения.
4. При выключенном лазере! Просмотреть систему интерферометра с выхода на вход, помещая на входе маркер-стрелку и наблюдать и описать изображения маркера.
5. Ознакомиться с теоретическим описанием.

Контрольные вопросы

1. Как выполняется закон сохранения энергии при интерферометрии?
2. Как работает интерференционный звездный коронограф?
3. Объяснить, что такое геометрическая фаза?
4. Почему интерферометр работает ахроматически?
5. Как устроен интерферометр вращательного сдвига?
6. Почему затемняется осевой источник и не затемняется внеосевой источник?
7. Почему пространственная когерентность влияет на коронографический контраст?

Литература

1. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. 2-е испр. изд. гл. 10 – Наука, 1973.
2. *Тавров А. В.* Физические основы ахроматической нуль-интерферометрии для звездной коронографии // Журнал экспериментальной и технической физики (ЖЭТФ) 2008. – том 134, вып. 6(12) С. 1103–1114.