

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

*На правах рукописи*

Фролов Павел Николаевич

**МЕТОД АХРОМАТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО  
КОРОНОГРАФА С ПЕРЕМЕННЫМ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ СДВИГОМ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ И ФАЗОВЫХ КРИВЫХ  
ЭКЗОПЛАНЕТ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

|                        |   |
|------------------------|---|
| Научный руководитель:  | д.т.н. Тавров Александр Викторович<br>(ИКИ РАН, зав. лаб. «Планетной астрономии», отдел 53) |
| Официальные оппоненты: | Оппонент 1<br>(место работы, должность)<br><br>Оппонент 2<br>(место работы, должность)      |
| Ведущая организация:   | Организация   |

Защита состоится ДАТА в ЧЧ:ММ на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. НОМЕР.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В.Ломоносова и на сайте [phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-D501-001-66/](http://phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-D501-001-66/).

Автореферат разослан ДАТА.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.66,

к.ф.-м.н.

И.Н.Карташов

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы.**

Изучение непосредственной окрестности звезд, околозвездных дисков и внесолнечных планет (экзопланет) является одной из самых молодых, быстро развивающихся, обсуждаемых и публикуемых тем современной астрофизики и сравнительной планетологии. Одной из ключевых задач является получение прямых изображений планет и исследование их спектров. Наиболее амбициозной целью является обнаружение и изучение землеподобных планет в обитаемой зоне около ближайших звезд, а также анализ их спектров в поисках особенностей планетных атмосфер или возможных биологических маркеров – признаков существования жизни за пределами Земли.

К настоящему времени достоверно обнаружено более 3500 внесолнечных планет с момента первых сообщений о возможных компаньонах звезд планетной природы в 1988 году. Из них лишь 75 были обнаружены путем прямого наблюдения. На сегодняшний день именно непрямые методы наиболее развиты и статистически успешны в обнаружении и исследовании внесолнечных планет. Однако возможности непрямых методов ограничены в силу используемых методик, а получаемые результаты сильно зависят от моделей, применяемых для интерпретации данных. В то же время исследованный в настоящей диссертационной работе метод интерференционного коронографа позволит напрямую получить изображения планетных систем около ближайших звезд и измерить их спектры.

Прямое наблюдение внесолнечных планет в обитаемой зоне около ближайших звезд и их спектральный анализ – это сложная техническая задача из-за сочетания одновременно огромного яркостного контраста и малого углового расстояния между планетой и родительской звездой. Кроме того, планета представляет собой очень тусклый источник света (менее 27-ой звездной величины в случае землеподобной планеты около звезды солнечного типа на удалении в десятки парсек). Поэтому для успешного решения задачи прямого наблюдения экзопланет сегодня создаются космические телескопы,

которые планируется оснастить звездными коронографами для погашения яркого звездного света в ближайшей окрестности звезды.

Предложенный в настоящей работе метод звездной коронографии принципиально отличается от известных ранее тем, что имеет практическую реализацию, улучшает степень погашения звездного света и позволяет оптимизировать оптическую схему коронографа под особенности наблюдательных задач. Тем самым расширяется круг задач, для решения которых возможно применить данный метод звездной коронографии, поэтому тема диссертации является важной и востребованной.

### **Цели и задачи.**

Основной целью настоящей диссертационной работы является исследование метода ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом применительно к задаче прямого наблюдения слабоконтрастных объектов (например, планет или протопланетных дисков) в непосредственной окрестности звезд.

Для достижения целей диссертации были поставлены и решались следующие задачи:

1. Исследовать метод ахроматического интерференционного коронографа, дополнить его переменным вращательным сдвигом и определить его применимость для решения задачи погашения протяженного источника света.
2. Построить математическую модель исследуемого коронографа и оценить путем численного расчета его характеристики по погашению света звезд для наблюдения их непосредственной окрестности (вплоть до нескольких дифракционных радиусов).
3. Разработать оптическую схему, реализующую физический принцип ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом, на основе интерферометра общего пути (кольцевого).

4. Создать прототип коронографа, провести лабораторные эксперименты по погашению света яркого источника и наблюдению слабоконтрастных источников в его близкой окрестности, экспериментально проверить результаты теоретического анализа и численного расчета.
5. Исходя из исследованных новых расширенных возможностей метода ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом, проанализировать круг задач и применений разработанного метода помимо задачи получения изображений экзопланет.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Метод ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом погашает свет звезды, контрастируя изображение слабых источников в ее ближайшей окрестности, и может быть оптимизирован под особенности наблюдательных задач: угловой размер звезды, предполагаемые параметры орбиты планеты, размер телескопа, диапазон длин волн и др. Достижимый коронографический контраст достаточен для наблюдения планет-гигантов около ближайших звезд и уменьшает контраст между звездой и землеподобной планетой до величины, укладывающейся в динамический диапазон современных детекторов.
2. Разработанная оптическая схема, представляющая собой модификацию кольцевого интерферометра Саньяка со встроенным вращателем оптического изображения, содержащая 2 поляризационных светоделителя, 6 плоских зеркал и фазовую пластинку, реализует принцип ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом.
3. Фазовая пластинка (как хроматическая, так и ахроматическая) исправляет недостаточное пропускание полезного светового сигнала коронографа при малых ненулевых углах вращательного сдвига,

увеличивает его более чем на порядок и не нарушает эффекта погашения света яркого осевого источника при произвольном угле вращательного сдвига.

4. При работе с лабораторным прототипом ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом свет яркого точечного источника (модель звезды) с непрерывным спектром погашается при любых углах вращательного сдвига, при этом слабый источник света (модель планеты) в близкой окрестности яркого существенно контрастируется.
5. Применение коронографа для наблюдения фазовых кривых внесолнечных планет позволяет контрастировать фазовые кривые на фоне света звезды.

#### **Научная новизна работы.**

Все результаты диссертационной работы, представленные к защите, являются новыми.

Предложен эффективный метод решения задачи прямого наблюдения слабоконтрастных источников света (например, планет) в непосредственной окрестности звезд с помощью ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом, выполненным на основе интерферометра общего пути.

Предложено использовать метод ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом для наблюдения фазовых кривых внесолнечных планет, что позволит контрастировать их на фоне звезды и тем самым упростит их изучение.

Решена проблема недостаточного пропускания коронографа при малых ненулевых углах вращательного сдвига путем внесения в схему фазовой пластинки, при этом она не изменяет соотношения фаз между волнами, распространяющимися в разных плечах интерферометра и не нарушает работоспособности метода.

## **Практическая значимости работы, область применения результатов.**

Предложенный и исследованный в работе метод звездной коронографии применим для прямого наблюдения слабоконтрастных объектов в непосредственной окрестности звезд в максимально широком диапазоне длин волн, а также для применения в спекл-интерферометрии и других астрономических задачах в качестве интерферометра вращательного сдвига. Причем данный метод позволяет адаптировать и оптимизировать оптическую схему в зависимости от решаемых наблюдательных задач различного формата без необходимости вносить изменения в конструкцию.

Непосредственная практическая значимость состоит в выработке рекомендаций по формированию блока научной аппаратуры для непосредственного наблюдения и исследования внесолнечных планет и околозвездных дисков в планируемых российских экспериментах на наземных и космических телескопах, в частности, "Планетный мониторинг", "Звездный патруль", "Спектр-УФ".

## **Достоверность полученных результатов и апробация результатов работы.**

Достоверность результатов, полученных в диссертации, основывается на использовании известных моделей физических явлений, а также признанных методов и подходов физической оптики. Правильность выбранных подходов также подтверждается тем, что полученные теоретические и численные результаты согласуются с результатами проведенных экспериментов.

По результатам работы подана заявка на патент на полезную модель: заявка № 201613675 от 13.09.2016.

Основные материалы работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и семинарах в период с 2013 по 2016 годы:

- 11-ая, 12-ая и 13-ая конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 2014, 2015, 2016.
- 56-ая научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, 2013.
- 40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Moscow, 2014.
- Научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение фотоники», Москва, 2015.
- Российско-германский молодежный семинар «Перспективы космической науки и исследований космоса», Берлин, 2016.
- SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Edinburgh, 2016.
- Научные семинары, проводимые в ИКИ РАН, МФТИ, МГУ.

#### **Публикации и личный вклад автора.**

Основные материалы диссертации опубликованы в 8 статьях в международных и российских журналах, из которых 6 публикаций сделаны в журналах из перечня ВАК.

Все исследования, содержание и результаты которых изложены в настоящей диссертационной работе, проведены лично автором в процессе научной деятельности. Автором осуществлялись: проработка и применение методов решения к задачам, поставленным в диссертации; проведение численных расчетов, моделирований, подготовка и осуществление экспериментов, обработка их результатов; подготовка докладов и текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 135 страниц, 77 рисунков, 136 наименований списка литературы.



## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи проведенных исследований, приведены положения, выносимые на защиту, акцентированы их научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** по литературным источникам проведен обзор современного состояния задачи обнаружения и исследования внесолнечных планет, а также рассмотрены методы и инструменты, применяемые для решения этой задачи.

В п. 1.1 приведена краткая статистика открытий экзопланет, сделанных к настоящему времени. На начало 2017 года достоверно обнаружено более 3500 внесолнечных планет, из которых лишь 75 были найдены путем прямого наблюдения [1, 2].

В п. 1.2 содержится обзор не прямых методов поиска внесолнечных планет, их особенности, преимущества и недостатки [3, 4].

В п. 1.3 проанализирован метод прямого наблюдения окрестностей звезд и необходимые для его применения инструменты. Прямое наблюдение внесолнечных планет позволит получить изображения планетных систем около ближайших звезд и измерить их спектры, но представляет собой сложную техническую задачу из-за сочетания огромного яркостного контраста и малого углового расстояния между планетой и родительской звездой. Для ее успешного решения необходимы [5]: телескоп диаметром от 2 метров, чтобы собрать световой сигнал планеты; система прецизионной адаптивной оптики для исправления волнового фронта; звездный коронограф для погашения яркого звездного света. Также в п. 1.3 приведен обзор завершенных, проводимых в настоящее время и планируемых в будущем эксперименты по прямому наблюдению внесолнечных планет около ближайших звезд как на наземных, так и на космических телескопах.

В п. 1.4 рассмотрены различные типы звездных коронографов, которые применяются в прямом наблюдении окрестностей звезд для погашения яркого

звездного света. Традиционные звездные коронографы ослабляют свет яркого осевого источника с помощью фокальных фазовых масок и апподизации входного зрачка. Из-за этого их рабочий спектральный диапазон значительно ограничен в силу хроматичности центральных элементов оптических схем, хотя известны и ахроматические модификации. В то же время ахроматические схемы коронографов, работающие в широком спектральном диапазоне, обладают серьезным преимуществом: они позволят сократить время наблюдения, а также упростить возможный спектральный анализ.

В настоящей диссертационной работе в качестве предмета исследования был выбран метод ахроматического интерференционного коронографа [6], дополненный переменным вращательным сдвигом [7], что позволяет более эффективно погашать свет звезды. Данный метод звездной коронографии до сих пор не был проработан до применения в эксперименте: не было известно оптической схемы, не была решена проблема механической стабильности плеч интерферометра, не было исследовано пропускание полезного светового сигнала.

Использование переменного вращательного сдвига позволяет изменять рабочие параметры схемы и тем самым эффективнее погашать свет звезды, а также адаптировать коронограф под особенности наблюдательных задач без изменения конструкции.

**Вторая глава** посвящена теоретическому анализу применения переменного вращательного сдвига в ахроматическом интерференционном коронографе для решения задачи наблюдения слабых источников света (планет, околозвездных дисков, протопланетных дисков и др.) в непосредственной близости от яркого протяженного источника света (звезды).

В п. 2.1 описан принцип работы интерферометра с переменным вращательным сдвигом. См. рисунок 1. Полученное телескопом изображение звезды и планеты коллимируют в плоскопараллельный пучок и направляют в интерферометр, где оно разделяется на два равных по интенсивности изображения. Одно из них сдвигается по фазе на  $\pi$  радиан относительно

другого и одновременно поворачивается также относительно второй копии на заданный угол  $\psi$  вокруг оптической оси, совпадающей с осью звезды (направлением на звезду). При совмещении этих двух изображений в результате интерференции в противофазе свет от звезды значительно ослабляется (зануляется). В то же время свет от двух копий изображения планеты не гасится, так как они оказываются геометрически разделёнными (при ненулевом угле поворота).

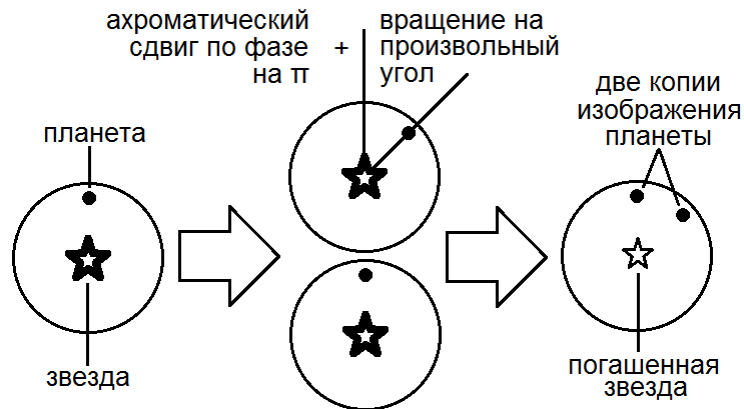


Рисунок 1 – Принципиальная схема работы ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом

В пп. 2.2 – 2.5 приведен анализ формирования изображений звезды и планеты в схеме ахроматического интерференционного коронографа общего пути с переменным вращательным сдвигом, а также выполнены оценки пропускания полезного светового сигнала (планетного света). Коронографическое изображение, получаемое с помощью такой схемы, представляет собой пары копий изображения неосевых источников (планет) на фоне остаточного (не полностью погашенного из-за конечного физического размера) света протяженного осевого источника (звезды), см. формулы 1 и 2, см. рисунок 2 [7].

$$I_{star} = \frac{\theta^2}{4} \cdot \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \cdot \frac{J_2^2(\pi D \rho / \lambda)}{\rho^2}, \quad (1)$$

$$I_{planet} = \frac{\varepsilon}{4} \cdot \left[ A\left(\alpha - \rho_0 \cos\left(\varphi + \frac{\psi}{2}\right), \beta - \rho_0 \sin\left(\varphi + \frac{\psi}{2}\right)\right) - A\left(\alpha - \rho_0 \cos\left(\varphi - \frac{\psi}{2}\right), \beta - \rho_0 \sin\left(\varphi - \frac{\psi}{2}\right)\right) \right]^2. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – декартовы координат на небесной сфере и в фокальной плоскости,  $\alpha^2 + \beta^2 = \rho^2$ ,  $\rho_0$  – угловое расстояние между планетой и звездой,  $\lambda$  – длина волны,  $D$  – диаметр телескопа,  $\Theta$  – угловой размер звезды,  $\psi$  – угол вращательного сдвига,  $J_2$  – функция Бесселя первого рода второго порядка,  $\varphi$  – фаза движения планеты по орбите ( $0 \dots 2\pi$ ). Контраст между планетой и звездой  $\varepsilon$  (в видимом диапазоне) [8]:

$$\varepsilon = A_g \cdot \left(\frac{r_{\text{planet}}}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin \phi + (\pi - \phi) \cos \phi}{\pi}\right). \quad (3)$$

Здесь  $A_g$  – геометрическое альбедо,  $r_{\text{planet}}$  – радиус планеты,  $a$  – расстояние между планетой и звездой,  $\phi$  – фазовый угол звезда-планета-наблюдатель. Последний множитель представляет собой фазовую функцию для случая, когда планета считается сферой, рассеивающей по закону Ламберта. Эта функция принимает значение  $1/\pi$  при максимальном наблюдаемом удалении планеты от звезды ( $\psi = \pi/2$ ).  $A$  – функция Эйри в случае телескопа с круглой апертурой диаметром  $D$  [9]:

$$A = \frac{2J_1(\pi D \rho / \lambda)}{\pi D \rho / \lambda}. \quad (4)$$

Здесь  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

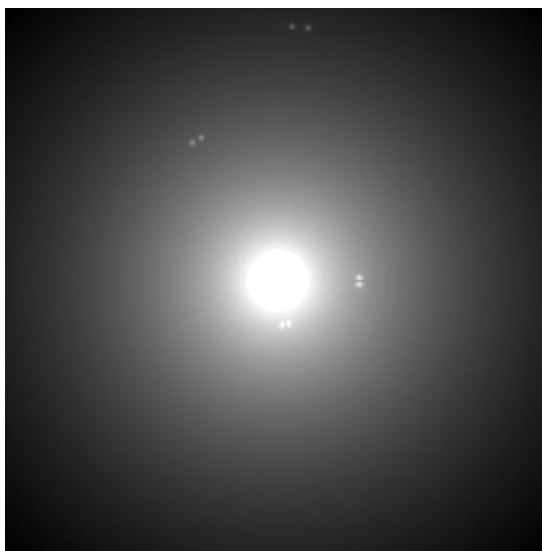


Рисунок 2. Остаточная засветка от аналога Солнца и изображения планет-гигантов аналога Солнечной системы (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) на темном выходе ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом. Удаление 10 парсек, телескоп 2.4 м,  $\lambda = 0.35 \dots 0.85$  мкм, вращательный сдвиг  $3.6^\circ$

Функция пропускания коронографа (см. рисунок 3) растягивается вдоль оси пространственной координаты с коэффициентом  $1/\sin(\psi/2)$ , так что угол вращения в плечах интерферометра определяет степень погашения света осевого источника (звезды) и коэффициент пропускания света неосевого источника (планеты). Это позволяет подобрать оптимальное значение угла вращения при известных (или предполагаемых) параметрах наблюдения. Так достигается максимальная степень ослабления яркого осевого источника (звезды) вместе с пропусканием наибольшего количества полезного светового сигнала (от планеты). Максимальное пропускание полезного светового сигнала (света планеты) составляет 28.3% для неполяризованного света на входе и 56.6% – для линейно поляризованного.

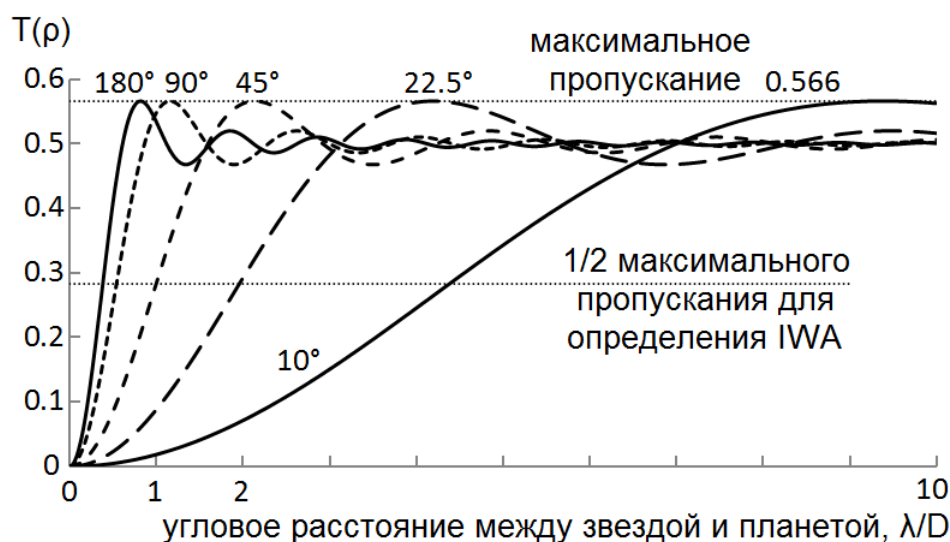


Рисунок 3 – Зависимость пропускания света неосевого источника (планеты) на темном выходе коронографа от углового расстояния между осевым и неосевым источниками (звездой и планетой) для значений угла вращательного сдвига 180°, 90°, 45°, 22.5° и 10°

В п. 2.6 введено понятие коронографического контраста с целью количественной оценки эффективности применения коронографа для погашения звезды и контрастирования планеты. Коронографический контраст (CC) – это отношение интегральных интенсивностей изображения двух копий планеты  $I_{planet}$  и фоновой засветки рассеянным светом звезды  $I_{star}$  в круговой

области радиусом  $R \sim 0.5\lambda/D$  с центром в одной из копий в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda$ :

$$CC(\rho_0, \psi, \theta) = \frac{\int_{\Delta\lambda} \iint_S I_{planet} d\lambda d\alpha d\beta}{\int_{\Delta\lambda} \iint_S I_{star} d\lambda d\alpha d\beta} \quad (5)$$

На рисунке 4 приведена карта зависимости логарифма коронографического контраста  $\lg(CC(\rho_0))$  от углового расстояния между звездой и планетой  $\rho_0$  для различных значений угла вращательного сдвига  $\psi$ . Параметры моделирования: Солнечная система на удалении 10 парсек наблюдается телескопом диаметром  $D = 2.4$  м, диапазон длин волн  $\lambda = 0.35$  мкм ...  $0.85$  мкм,  $\lambda_0 = 0.5$  мкм, угловой размер звезды  $\theta = 0.02\lambda_0/D$ , радиус области интегрирования  $R = 0,5\lambda_{max}/D$ ,  $\lambda_{max} = 0.85$  мкм.

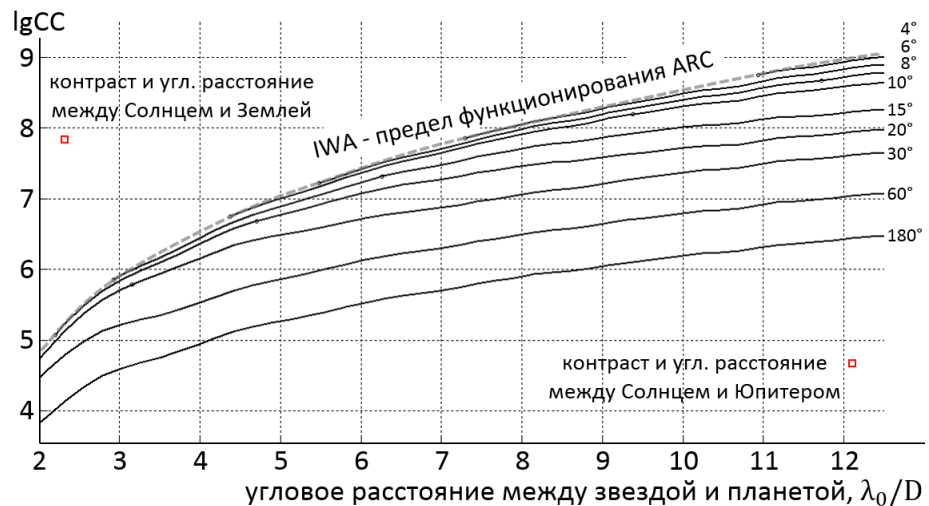


Рисунок 4 – Карта коронографического контраста  $\lg(CC(\rho_0))$

Как можно видеть из рисунка 4, в схеме коронографа с переменным вращательным сдвигом свет звезды гасится на один-два порядка эффективнее при углах  $5^\circ \dots 45^\circ$ , чем при фиксированном повороте на  $180^\circ$ . Достижимый в схеме коронографический контраст позволяет визуализировать экзопланеты-гиганты близнеца нашей Солнечной системы в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах при наблюдении с расстояния 10 парсек с помощью телескопа метрового класса. Кроме того, это дает возможность уменьшить

контраст между аналогом Солнца и экзо-Землей до величины, укладываемой в динамический диапазон современных детекторов.

**Третья глава** посвящена разработке практического решения, реализующего исследованный в работе принцип коронографа.

В п. 3.1 предложена оптическая схема ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом, на основе модификации кольцевого интерферометра Саньяка (интерферометра общего пути [10]), см. рисунок 5.

Оптическая схема содержит два поляризационных светоделителя – PBS1 и PBS2, а также шесть плоских зеркал M1...M6, три из которых (M3, M4 и M5) образуют вращатель оптического изображения и выводят световой луч из плоскости интерферометра.

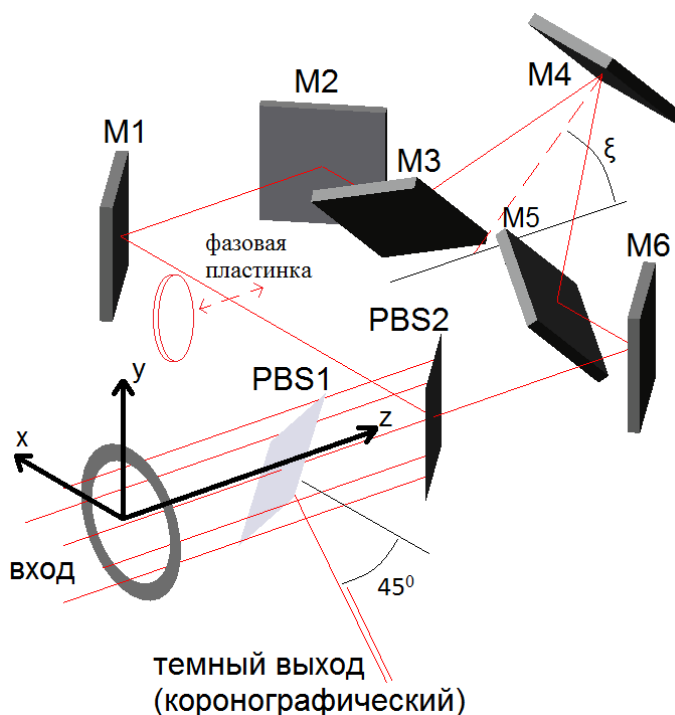


Рисунок 5 – Оптическая схема ахроматического интерференционного коронографа общего пути с переменным вращательным сдвигом (нуль-интерферометра общего пути)

В пп. 3.2 – 3.3 представлен алгоритм поляризационного расчета [11], примененный для разработки оптической схемы. Результат поляризационного расчета состоит в том, что на темном выходе коронографа две волны, являющиеся копиями распределения света на входе и распространяющиеся в

разных направлениях, имеют равную интенсивность, одинаково поляризованы и находятся в противофазе. Таким образом две копии осевого источника (звезды) на темном выходе коронографа погашаются в результате интерференции в противофазе, тогда как две копии неосевого источника (планеты) не интерферируют, поскольку оказываются геометрически разделены при ненулевом вращательном сдвиге.

Также в результате расчета показано, что оптическая схема коронографа может работать с реальными оптическими элементами – зеркалами и светоделителями, – имеющими материальные спектральные и поляризационные характеристики.

В п. 3.4 описаны особенности схемы при ее использовании с малыми углами вращательного сдвига, при которых обеспечивается лучшее погашение света точечного осевого источника света (звезды). Внесение фазовой пластинки в оптическую схему коронографа обеспечивает дополнительный поворот вектора поляризации при распространении света в плечах интерферометра и предотвращает снижение пропускания полезного светового сигнала при малых углах вращательного сдвига.

В п. 3.5 оценен рабочий спектральный диапазон коронографа. Типичный возможный рабочий спектральный диапазон коронографа составляет 0.3...2 мкм, в котором пропускание полезного света (планеты) в среднем по всем длинам волн составляет около 16%. При уменьшении спектрального окна возможно достичь большего пропускания.

**Четвертая глава** посвящена экспериментам с созданным в ходе работы лабораторным прототипом коронографа, которые проводились с целью проверить выполненные ранее теоретический анализ метода коронографа и численный поляризационный расчет предложенного варианта оптической схемы.

В п. 4.1 описан испытательный стенд, на котором проводились эксперименты с лабораторным прототипом, см. рисунок 6. В качестве источников монохроматического света использовались одномодовый зеленый



лазер с длиной волны 532 нм, который моделировал звезду, и одномодовый красный лазер с длиной волны 632 нм, который моделировал планету. Источником белого света с непрерывным спектром была галогеновая лампа (450...750 нм). Свет от каждого из источников света направляется в соответствующий пространственный фильтр, состоящий из микроскопного объектива и круглой диафрагмы диаметром 10 мкм для лазерного света и диаметром 50 мкм для белого света. Затем расходящийся пучок направляется в коллиматор (фокус 40 см), формирующий на выходе плоскопараллельный пучок. При отражении от зеркала на пьезоэлектрической платформе пучок направляется в коронограф через круглую апертуру со световым диаметром 5 мм, которая ограничивает диаметр светового пучка.

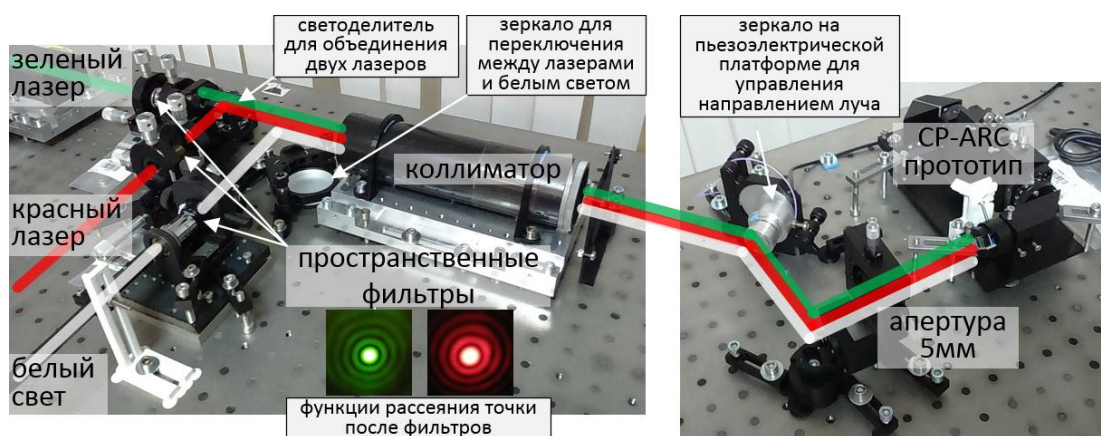


Рисунок 6. Схема эксперимента

В п. 4.2 описан эксперимент по демонстрации эффекта погашения точечного источника света, который показал применимость коронографа для наблюдения слабоконтрастных источников в окрестности ярких. А именно было продемонстрировано погашение яркого точечного источника света (имитирующего звезду) и наблюдение в непосредственной близости от него слабого, ранее ненаблюдаемого источника (имитирующего планету), см. рисунки 7 и 8.

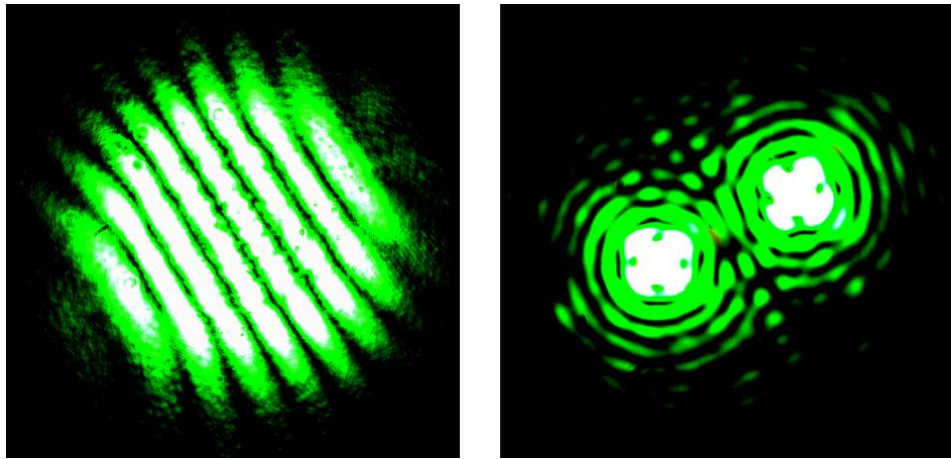


Рисунок 7. Экспериментальное моделирование точного наведения коронографа на звезду и погашения звездного света. Зеленый лазер моделирует звезду, красный – планету. Ошибка наведения на звезду около  $4\lambda/D$ . Изображения в плоскости зрачка (слева) и в плоскости изображения (справа)

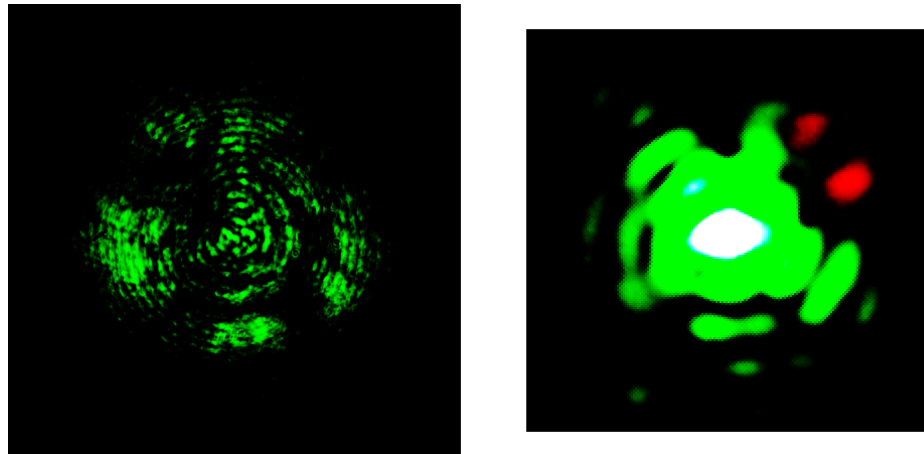


Рисунок 8. Экспериментальное моделирование точного наведения коронографа на звезду и погашения звездного света. Зеленый лазер моделирует звезду, красный – планету. Ошибка наведения на звезду около  $0.01\lambda/D$ . Изображения в плоскости зрачка (слева) и в плоскости изображения (справа). Изображение справа увеличено в три раза. Угол вращательного сдвига  $20^\circ$ .

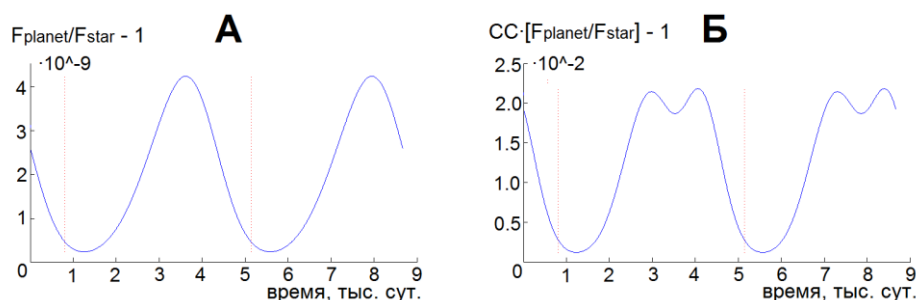
В п. 4.3 описан эксперимент с внесением в оптическую схему фазовой пластинки. Его целью было проверить результаты, полученные в ходе численного расчета пропускания схемы коронографа при малых углах вращательного сдвига после внесения в схему фазовой пластинки. Эксперимент показал, что фазовая пластинка не нарушает эффекта погашения света от осевого источника и улучшает пропускание полезного светового сигнала при малых ненулевых углах поворота оптического изображения. При

этом абсолютное значение коэффициента пропускания составляет около 10...20%.

В пятой главе приведены возможные новые применения результатов настоящей диссертационной работы.

Звездный коронограф представляет собой оптический инструмент, который решает задачу погашения яркого точечного источника света для наблюдения его близкой окрестности и исследования в ней слабоконтрастных объектов и особенностей. Таким образом, помимо поиска и изучения внесолнечных планет коронограф может применяться для наблюдения и исследования целого ряда объектов, расположенных как в нашей Галактике, так и за ее пределами. Также в п. 5.1 перечисляются такие объекты.

В ситуации, когда звездный коронограф не позволяет получить изображения экзопланеты, он может использоваться для констатирования ее фазовой кривой – периодического изменения количества отраженного планетой света при ее движении по орбите, что описано в п. 5.2. Отношение интенсивностей планетного света и фоновому звездного света увеличивается на величину достигаемого коронографического контраста, см. рисунок 9. Однако коронограф влияет не только на абсолютную величину наблюдаемого отношения световых потоков планеты и звезды, но и изменяет форму кривой. Это предъявляет дополнительные требования к восстановлению фазовой кривой по наблюдательным данным.



А) – фазовая кривая системы Солнце-Юпитер; Б) – наблюдаемая фазовая кривая  
Рисунок 9. Сравнение фазовой кривой системы Солнце-Юпитер, наблюдаемой без использования коронографа и с ним. Расстояние наблюдения 10 парсек, наклонение орбиты  $\pi/4$ , длина волны 1 мкм, диаметр телескопа 1 м, угол вращательного сдвига  $10^\circ$

Рассмотренный в настоящей работе ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом представляет собой кольцевой (общего пути) нуль-интерферометр со встроенным вращателем оптического изображения. Это позволяет использовать его для решения различных оптических задач, помимо задачи прямого наблюдения окрестностей звезд. Например, было исследовано его применение в качестве существенно несбалансированного по амплитуде интерферометра для исправления волнового фронта собираемого телескопом света, что описано в п. 5.3.

При решении прикладной астрономической задачи поиска и изучения внесолнечных планет или иных объектов звездный коронограф используется совместно с инструментом, анализирующим спектр собираемого света. В п. 5.4 описаны проблемы, связанные с наблюдением планет в окрестности звезд. А именно низкая интенсивность и большая зашумленность полезного сигнала, которые накладывают значительные ограничения на спектральный анализ, делая возможным на сегодняшний день лишь получение спектров низкого разрешения – порядка 10...100 спектральных каналов на видимый диапазон.

В п. 5.5 описаны планируемые и разрабатываемые проекты космических телескопов, которые нацелены в том числе на поиск экзопланет с помощью звездных коронографов. В настоящее время коронографы достаточно широко и успешно применяются в экспериментах по наблюдению и исследованию экзопланет на наземных телескопах совместно с самыми передовыми и совершенными системами адаптивной оптики для компенсации влияния земной атмосферы. В ближайшее десятилетие ожидается запуск нескольких космических телескопов видимого и ИК диапазонов, оснащенных звездными коронографами: зарубежные PICTURE-C [12], James Webb Space Telescope, WFIRST-AFTA [13]; отечественные Спектр-УФ, Планетный мониторинг, Звездный Патруль.

**В заключении** подводятся итоги исследований, обобщены и перечислены основные результаты диссертационной работы.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Метод ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом погашает звездный свет на 1-2 порядка эффективнее при малых ненулевых углах вращения  $5^\circ \dots 45^\circ$ , чем это позволяет классический ахроматический интерференционный коронограф с фиксированным вращательным сдвигом на  $180^\circ$ . Абсолютные значения достигаемого коронографического контраста (5...9 порядков) позволяют визуализировать в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах экзопланеты-гиганты близнеца нашей Солнечной системы, наблюдаемого с расстояния около 10 парсек с помощью телескопа диаметром от 1 метра. К тому же это дает возможность значительно уменьшить в контраст между аналогом Солнца и экзо-Землей до величины, укладывающейся в динамический диапазон современных детекторов (3 порядка). Кроме того, исследованный в диссертации коронограф может быть легко оптимизирован в зависимости от стоящих перед ним наблюдательных задач и их особенностей: угловой размер звезды, предполагаемые параметры орбиты планеты или характерные размеры протопланетного диска, диапазон длин волн, размер телескопа, параметры его входной апертуры и др.

Разработана оптическая схема, реализующая метод ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом. Схема представляет собой нуль-интерферометр общего пути (модификацию кольцевого интерферометра Саньяка), содержит два поляризационных светоделителя, шесть плоских зеркал и фазовую пластинку. На основе оптической схемы был создан лабораторный прототип коронографа.

Фазовая пластинка в схеме исправляет недостаточное пропускание полезного светового сигнала коронографа при малых ненулевых углах вращательного сдвига. Пропускание увеличивается более, чем на порядок, с долей процента до 10...20%, в зависимости от используемых оптических элементов. При этом фазовая пластинка не нарушает эффекта погашения света яркого осевого источника (звезды).

Эксперименты с лабораторным прототипом ахроматического интерференционного коронографа с переменным вращательным сдвигом продемонстрировали применимость метода для решения задачи наблюдения слабоконтрастных источников в близкой окрестности звезды. Был погашен свет от яркого точечного источника (модели звезды) с непрерывным спектром при различных углах вращательного сдвига, так что на его фоне стал существенно контрастным и видимым свет от слабого источника (модели планеты).

Предложенный и исследованный в работе метод звездного коронографа возможно и целесообразно применять для наблюдения фазовых кривых напрямую ненаблюдаемых планет, что позволяет уменьшить контраст между фазовой кривой и звездой на величину 5...9 порядков в широком диапазоне длин волн.

#### 4. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Основные результаты по теме диссертации изложены в следующих публикациях в журналах из перечня ВАК:

1. Tavrov A., Korablev O., Ksanfomaliti L., Rodin A., Frolov P., Nishikawa J., Tamura M., Kurokawa T., Takeda M. Common-path achromatic rotational-shearing coronagraph // Optics Letters, Vol. 36, Issue 11, pp. 1972-1974, 2011. DOI: 10.1364/OL.36.001972
2. Фролов П. Н., Ахметов И. И., Шкурский Б. Б., Гвоздовский И. В., Киселев А. В., Кораблев О. И., Тавров А. В. Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом для исследования внесолнечных планет // Астрономический вестник, том 47, № 6, 2013. С. 518-527. DOI: 10.7868/S0320930X13060029.
3. Ахметов, И. И., Фролов, П. Н., Шкурский, Б. Б., Ринкевичюс, Б. С., Киселев, А. В., Тавров, А. В. Ахроматический 3d-интерферометр для контроля и анализа качества волнового фронта // Измерительная техника, № 8, 2013. С. 28-30. ISSN 0368-1025.
4. Фролов П. Н., Ананьева В. И., Ксанфомалити Л. В., Тавров А. В. Наблюдение фазовых кривых экзопланет с помощью звездного коронографа // Астрономический вестник, том 49, № 6, 2015. С. 448-458. DOI: 10.7868/S0320930X15050047.
5. Frolov P., Shashkova I., Bezmyannikova Yu., Kiselev A., Tavrov A. Achromatic interfero-coronagraph with variable rotational shear: reducing of star leakage effect, white light nulling with lab prototype // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2(1), 011002, 2016. DOI: 10.1117/1.JATIS.2.1.011002.
6. Shashkova I., Shkursky B., Frolov P., Bezmyannikova Yu., Kiselev A., Nishikawa J., Tavrov A. Extremely unbalanced interferometer for precise wavefront control in stellar coronagraphy // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2(1), 011011, 2016. DOI: 10.1117/1.JATIS.2.1.011011.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. // Энциклопедия внесолнечных планет (The Extrasolar Planets Encyclopaedia): [сайт]. URL: <http://exoplanet.eu/>
2. // База данных по экзопланетам (Exoplanet Orbit Database & Exoplanet Data Explorer): [сайт]. URL: <http://exoplanets.org/>
3. Perryman M. The Exoplanet Handbook. Cambridge University Press, 2011. 424 pp.
4. Seager S., editor. Exoplanets. University of Arizona Press, 2010. 500 pp.
5. Lyon R.G., Clampin M. Space telescope sensitivity and controls for exoplanet imaging // Optical Engineering, Vol. 51, No. 3, 2012. pp. 1-16.
6. Rabbia Y., Gay J., Rivet J.P. The Achromatic Interfero Coronagraph (Le Coronographe Interférentiel Achromatique) // Comptes Rendus Physique, Vol. 8, No. 3-4, 2007. pp. 385-395.
7. Aime C., Ricort G., Carlotti A., Rabbia Y., Gay J. ARC: an Achromatic Rotation-shearing Coronagraph // Astronomy & Astrophysics, Vol. 517, Article Number A55, 2010. pp. 1-10.
8. Madhusudhan N., Burrows A. Analytic Models for Albedos, Phase Curves, and Polarization of Reflected Light from Exoplanets // The Astrophysical Journal, Vol. 747, No. 1, 2012. pp. 1-16.
9. Борн М., Вольф Е. Основы оптики. 2-е изд. Москва: Наука, 1973. 720 с.
10. Tavrov A.V., Kobayashi Y., Tanaka Y., Shioda T., Otani Y., Kurokawa T., Takeda M. Common-path achromatic interferometer–coronagraph: nulling of polychromatic light // Optics Letters, Vol. 30, No. 17, 2005. pp. 2224-2226.
11. Tavrov A.V., Miyamoto Y., Kawabata T., Takeda M., Andreev V.A. Generalized algorithm for the unified analysis and simultaneous evaluation of geometrical spin-redirection phase and Pancharatnam phase in a complex interferometric system // Journal of the Optical Society of America A, Vol. 17, No. 1, 2000. pp. 154-161.
12. Cook T., Cahoy K., Chakrabarti S., Douglas E., Finn S.C., Kuchner M., Lewis N., Marínan A., Martel J., Mawet D., et al. Planetary Imaging Concept Testbed Using a Recoverable Experiment–Coronagraph (PICTURE C) // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Vol. 1, No. 4, 2015. pp. 1-8.
13. Проект WFIRST - Wide-Field Infrared Space Telescope [Электронный ресурс] // Сайт NASA: [сайт]. URL: <http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>