

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Лазеры и волоконная оптика для астрофизики

П.Г. Крюков

Важной областью астрофизических исследований была и остаётся спектроскопия оптического диапазона. Гигантские телескопы строятся для сбора излучения самых отдалённых звёзд Вселенной для последующего исследования с помощью уникальных астрономических спектрографов. При этом возникает принципиальная проблема: передача чрезвычайно слабого излучения в фокусе движущегося телескопа на вход неподвижного спектрографа. Задача решается с помощью особой системы волоконно-оптической связи, причём изготовление нужных оптических волокон и их исследования составляют важную проблему волоконной оптики. Астрономическая спектроскопия включает прецизионные измерения доплеровских смещений спектральных линий в спектрах звёзд, позволяющие определить скорость движения звезды в направлении наблюдения (лучевую скорость, ЛС). Замечательной особенностью доплеровской спектроскопии является возможность прецизионных измерений весьма малых вариаций (фактически ускорений) ЛС в продолжительные интервалы времени. Примером такой вариации ЛС звезды является действие на неё планеты. Под влиянием планеты, вращающейся вокруг звезды, она испытывает периодическое изменение движения, которое проявляется в доплеровском смещении спектра звезды. Точные измерения этого смещения позволили косвенным способом открыть планеты вне Солнечной системы (экзопланеты). При этом важной проблемой является поиск экзопланет земного типа с возможной жизнью на них. Для этого требуется точность спектральных измерений, позволяющая определять вариации ЛС на уровне сантиметров в секунду за период порядка года. Подобные измерения, проведённые на протяжении 10–15 лет, позволили бы прямым способом определить предполагаемое ускорение разлёта Вселенной. Однако для таких исследований требуется точность спектральных измерений, превосходящая возможности традиционной спектроскопии (йодная ячейка, спектральные лампы). Рассматриваются методы радикального улучшения астрономической доплеровской спектроскопии, позволяющие обеспечить требуемую точность измерения доплеровских смещений. Они включают разработки систем волоконно-оптической связи телескопа с астрономическим спектрографом и прецизионных калибраторов астрономических спектрографов, основанных на достижениях лазерной физики и волоконной оптики.

**Ключевые слова:** спектрографы с волоконно-оптическим входом, доплеровская спектроскопия, лазерная гребёнка оптических частот, экзопланеты, динамика Вселенной

PACS numbers: 42.62.–b, 42.81.–i, 97.82.–j

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038331>

## Содержание

1. Введение (1179).
  2. Волоконно-оптическая связь телескопа со спектрографом (1180).
  3. Прецизионная калибровка астрономического спектрографа (1181).
  4. Исследования в астрофизике (1184).  
4.1. Исследования экзопланет. 4.2. Изменения фундаментальных констант во времени. 4.3. Прямое измерение ускорения разлёта Вселенной.
  5. Заключение (1185).
- Список литературы (1186).

П.Г. Крюков. Научный центр волоконной оптики РАН, ул. Вавилова 38, 119333 Москва, Российская Федерация; Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: [kryukov@fo.gpi.ru](mailto:kryukov@fo.gpi.ru)

Статья поступила 8 февраля 2017 г.,  
после доработки 13 февраля 2018 г.

## 1. Введение

Астрономия с последующим развитием в астрофизику представляет собой древнейшую точную науку, тесно связанную с математикой и физикой. Открытия в астрономии оказали огромное влияние на наши знания о Природе. Вместе с тем космические объекты всегда были объектами религиозного почитания. И в наше время астрономические знания сопровождаются псевдонаучными, а по существу, лженаучными рассуждениями, основанными на невежестве. Так, нередко можно встретить "глубокие" рассуждения об "уфологии", инопланетянах, летающих по всей Вселенной, как стая воробьёв, и даже оставивших следы на Земле. Рассматриваются проекты межзвёздных кораблей на основе термоядерных двигателей или "звёздного паруса", разгоняемого лазерным излучением до скоростей, близких к скорости света. Всё это основано на сознательном или бессознательном игнорировании двух твёрдо установленных наукой фактов: конечного значения скорости света и

огромных космических расстояний, для которых единичей измерения служит световой год, т.е. расстояние, проходимое светом за один год. Поэтому не может быть и речи о двусторонней связи с возможными обитаемыми экзопланетами и, тем более, посылке исследующих зондов. Реальным способом изучения космических объектов служит приём и анализ излучения, испускаемого ими. При этом следует иметь в виду огромные космические расстояния и соответственно время их прохождения даже со скоростью света. Чем дальше расположен изучаемый объект, тем отдалённее по времени исследуемое на нём явление. Это роднит астрофизику с палеонтологией и археологией.

Одним из эффективных методов астрофизических исследований служит астрономическая спектроскопия оптического диапазона. Для этого свет удалённых на огромное расстояние звёзд собирается телескопом и направляется на спектрограф. Стремление исследовать объекты на расстояниях до миллиардов световых лет привело к созданию гигантских телескопов. Размер зеркала телескопа до нескольких десятков метров необходим для сбора излучения в фокусе с интенсивностью, достаточной для изучения спектра. Собранный в фокусе телескопа исключительно малый по интенсивности свет посылаётся на вход астрономического спектрографа. Он должен иметь нужную разрешающую способность и высокую чувствительность. Это приводит к необходимости использовать дифракционные решётки типа эшелле большого размера и оптическую конструкцию с высокой механической и температурной стабильностью.

Астрономические спектрографы представляют собой стационарные установки с размерами в десятки метров и с исключительно точной механической и температурной стабильностью. Эти уникальные системы имеют собственные имена, образованные от аббревиатур, обозначающих назначение спектрографа: HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) — спектрограф для обнаружения экзопланет с помощью точного измерения лучевой скорости (ЛС), ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observation) — спектрограф для обнаружения твердотельных экзопланет земного типа и стабильных спектральных наблюдений, CODEX (COsmical Dynamics EXperiment) — спектрограф для прямого исследования динамики Вселенной. Возникает принципиальная проблема посылки собранного движущимся телескопом излучения на вход неподвижного спектрографа без потерь и искажений. Эта проблема решается путём разработки и создания специальной волоконно-оптической линии связи.

Одной из задач астрономической спектроскопии является точное измерение смещения спектра звезды, вызываемого эффектом Доплера. Такие измерения позволяют определить величину лучевой скорости звезды. Проводя измерения в разные промежутки времени, можно установить изменения ЛС во времени, т.е. определить величину ускорения в движении звезды. Это — доплеровская астрономическая спектроскопия. Выдающимся достижением стало открытие красного смещения спектров далёких галактик, пропорциональное расстоянию до них (закон Хаббла), которое легло в основу концепции разлёта Вселенной в результате Большого взрыва. Доплеровские смещения в этом случае огромны, соответствующие изменения ЛС достигают долей скорости света.

Однако и малые доплеровские смещения позволяют получить исключительно важные результаты. Так, при точном исследовании доплеровских смещений в спектрах звёзд на протяжении значительных промежутков времени было установлено [1], что ЛС исследуемой звезды испытывает малые, но строго периодические изменения, т.е. звезда при своём движении испытывает малые периодические ускорения. Это было интерпретировано как влияние на движение звезды планеты, обращающейся вокруг неё. Звезда и планета вращаются вокруг общего центра масс, что и вызывает периодическое изменение ЛС. Так было впервые косвенным, но не вызывающим сомнения способом доказано существование планет у звёзд за пределами Солнечной системы (экзопланет).

Величина доплеровского смещения спектра и соответствующего изменения ЛС зависит от соотношения масс звезды и планеты. Например, вращение Юпитера вокруг Солнца вызывает вариацию его движения, которая для внешнего наблюдателя показала бы максимальное изменение ЛС, равное  $12 \text{ м с}^{-1}$  с периодом в 12 лет, а вращения Земли — всего лишь  $9 \text{ см с}^{-1}$  с периодом 1 год. Это показывает, что для обнаружения с помощью доплеровской спектроскопии экзопланет, подобных Земле и вращающихся вокруг звёзд, подобных Солнцу, требуется точность спектральных измерений на уровне 10-го знака. Поскольку для таких измерений необходимо сравнение спектров, снятых в разное время, требуется точная калибровка спектрографа, которая производится путём регистрации вместе с исследуемым спектром спектра источника с хорошо определёнными спектральными линиями, например спектральных ламп или йодных поглощающих ячеек. Точность калибровки характеризуют величиной минимальной разницы ЛС, которую можно установить при продолжительных измерениях. Для спектральных ламп и йодных ячеек она составляет не менее нескольких метров в секунду, что позволяет обнаружить планеты типа Юпитера, но не планеты земного типа. Для их обнаружения и исследования требуется калибратор спектра с точностью порядка нескольких сантиметров в секунду. Такие калибраторы создаются на основе лазеров.

## 2. Волоконно-оптическая связь телескопа со спектрографом

Совершенно необходимой составной частью системы современного астрономического спектрографа является волоконно-оптическая связь с телескопом (fiber-fed spectrograph). В отличие от широко применяемой системы волоконно-оптической связи, в которой используется оптическое одномодовое волокно (ОМВ) и, по существу, довольно узкая область спектра, в астрономической системе волоконно-оптического сочетания телескопа со спектрографом необходимо обеспечить передачу чрезвычайно слабого излучения без искажений спектра в широком спектральном диапазоне и осветить им входную щель спектрографа. Оптическое волокно не только передаёт свет от телескопа к спектрографу, но и обеспечивает освещение входной щели спектрографа, нужное для достижения наилучшего разрешения и стабильности спектральных измерений, поскольку максимальная разрешающая сила спектрографа зависит от условий освещения щели. По существу, требуется не

оптический волновод традиционной волоконно-оптической связи, а световод для освещения входной щели спектрографа. С этой целью используются специально разработанные системы на основе многомодовых оптических волокон (МОВ) с большим размером (до сотен микрометров) сечения сердцевин.

Поскольку изображения в фокусе телескопа имеют микрометровые размеры, требуются системы микролинз для согласования с апертурой волокна и щелью спектрографа. При распространении излучения в оптическом волокне с большим диаметром сердцевин в нём возбуждается большое число мод, причём их распространение зависит от размера сердцевин, изгиба волокна, механических напряжений и т.д. Существенная особенность оптического волокна — его способность перемешивать большое число мод распространяющегося в нём излучения. Процесс этого перемешивания (scrambling) играет существенную роль в работе спектрографа с волоконным входом (fiber-fed spectrograph). Изображение звезды микрометровых размеров проецируется микролинзой на входной торец оптического волокна диаметром до сотен микрометров. Из-за ряда внешних условий, например, некоторой неточности движения телескопа (гидирование) изображение звезды несколько перемещается по сечению торца. Это передаётся на распределение излучения на выходе волокна и, в конечном счёте, на приёмник спектрографа. Чем слабее перемещение изображения звезды на входе волокна сказывается на смещении распределения света на приёмнике, тем выше точность измерения спектра.

Было показано [2], что степень перемешивания мод существенно влияет на работу волоконно-оптической связи астрономического спектрографа. Величина усиления перемешивания (scrambling gain) определяется как отношение относительного изменения распределения интенсивности на входе волокна к относительному изменению на выходе волокна. Эта величина зависит от устройства линии, и важно добиваться её увеличения. Поскольку доплеровская спектроскопия основана на сравнении спектров, полученных в разное время, нужно, чтобы процесс перемешивания мод, который зависит и от изгибов волокна, был неизменным и максимальным. С этой целью волокно при измерениях спектра подвергают специальному механическому воздействию, периодически изгибают его с частотой в десятки герц.

Для исследования процесса перемешивания мод в МОВ была предложена и продемонстрирована измерительная методика [3, 4], основанная на одновременном измерении пространственного распределения излучения в дальней и ближней зонах на выходе волокна. Излучение источника с широким спектром (набор оптических диодов) формируется линзовой системой в пучок, направляемый в исследуемое волокно. На выходе волокна измеряется распределение излучения по сечению с помощью микроскопного объектива с перемещением точным транслятором. С помощью такой методики были проведены исследования МОВ с размерами сечения сердцевин около 200 мкм и с различной формой сердцевин, а именно квадратной, шестиугольной, восьмиугольной и круглой [3, 4]. Оказалось, что величины усиления перемешивания мод существенно определяются свойствами границы сердцевин волокна с его оболочкой. Наилучшими для желаемых применений оказались волокна с восьмиугольной формой сердцевин.

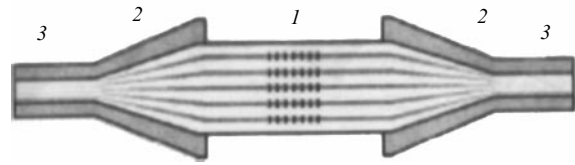


Рис. 1. Многосердцевинное волокно с брэгговскими решётками, записанными в каждой сердцевине. Концы волокна соединяются с помощью переходников с отрезками МОВ. 1 — одномодовые сердцевины с записанными брэгговскими решётками, 2 — переходники, 3 — отрезки МОВ [8].

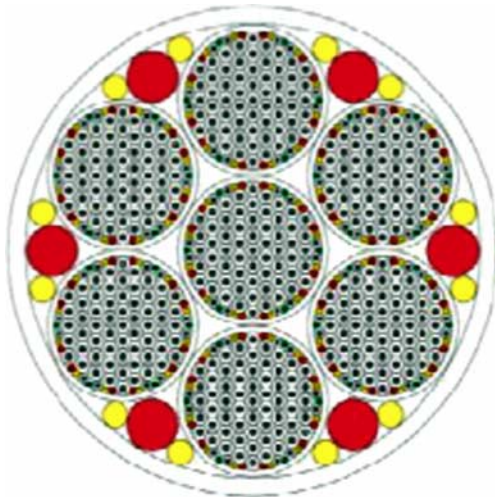
Недавно появились новые типы МОВ — волоконные световоды с полый сердцевинной большого диаметра [5, 6]. Их привлекательная особенность — отсутствие потерь на поглощение. Поскольку у этих волокон граница сердцевин с оболочкой принципиально отличается от обычных МОВ, а от неё зависит наполнение модами и перемешивание мод, то представляется важным провести исследования возможности использования таких волокон в системах fiber-fed астрономических спектрографов. Для исследований требуются образцы таких волокон, изготовление которых всецело определяется современной наукоёмкой технологией. Успехи технологии изготовления оптических волокон привели к особому направлению разработки систем астрономической волоконно-оптической связи, связанному с сочетанием одномодовых волокон с многомодовыми. Используются одномодовые волокна с малым диаметром оболочки, которые собираются в пучок. Получается волоконный световод большого диаметра, состоящий из многих сердцевин МОВ, т.е. многосердцевинное волокно (МСВ) [7].

На рисунке 1 показана конфигурация такого волокна. Оно состоит из 120 одномодовых сердцевин, причём в этих сердцевинах можно с помощью фемтосекундного лазера записать брэгговские решётки, с участием которых происходит фильтрация спектрального состава передаваемого излучения. Такая фильтрация позволяет устранить нежелательные линии спектра и тем самым улучшить регистрацию исследуемого спектра. Концы МСВ через переходники и отрезки МОВ соединяются с телескопом и со спектрографом.

Дальнейшее развитие методов изготовления оптических волокон привело к усовершенствованию многосердцевинного волокна [8]. На рисунке 2 показано сечение МСВ, состоящего из 511 индивидуальных одномодовых сердцевин. Исследование этого волокна показало, что оно превосходит МОВ с восьмиугольной формой сердцевин. Комбинации МОВ с МСВ рассматриваются как перспективный подход к совершенствованию астрономической волоконно-оптической связи телескопа со спектрографом [9].

### 3. Прецизионная калибровка астрономического спектрографа

Как уже отмечалось, для измерений разностей ЛС с точностью на уровне сантиметров в секунду требуется соответствующая по точности калибровка астрономического спектрографа. Традиционным методом калибровки спектрометра служит регистрация спектральных линий эталонного источника спектра с точно известными



**Рис. 2.** Сечение МСВ с внешним диаметром 562 мкм, состоящего из 511 одномодовых сердцевин с диаметрами от 1,8 до 3,4 мкм и расстояниями между ними от 4,8 до 5,8 мкм [8].

значениями длин волн (частот). Для астрономических спектрографов такими источниками являются: спектральные лампы типа полого катода с наполнением аргоном с примесями тория или урана, а также кюветы с парами йода, позволяющими получать узкие линии поглощения молекул  $I_2$ . По ряду причин такая калибровка не позволяет получать в продолжительных измерениях ЛС точность, лучшую, чем несколько метров в секунду. Однако важная задача астрофизики — поиски твердотельной экзопланеты, подобной Земле и вращающейся вокруг звезды, подобной Солнцу, — требует точности в несколько сантиметров в секунду при стабильных измерениях на протяжении более года. Ещё лучшая точность, на уровне  $\sim 1 \text{ см с}^{-1}$ , требуется для проведения спектральных измерений в течение 15–20 лет с целью прямого изучения особенностей динамики разлёта Вселенной.

Лазерные методы позволяют генерировать оптическое излучение с исключительно узкими спектральными линиями с частотами, значение которых определяется на основании стандартов частоты с прецизионной точностью, т.е. создавать синтезатор узких спектральных линий с точными значениями длин волн. Фигурально выражаясь, лазерная наука и техника позволяет создать "искусственный атом" с точно определёнными значениями длин волн спектральных линий. Хорошо известно, что лазер непрерывного действия с пассивной синхронизацией мод обладает замечательной особенностью: он испускает непрерывную строго периодическую последовательность фемтосекундных импульсов, а его спектр состоит из набора чрезвычайно узких спектральных линий с точным интервалом между ними и с протяжённостью спектра, соответствующей длительности импульса. Таким образом, лазер этого типа является источником лазерной гребёнки оптических частот (ЛГОЧ).

Интервал между линиями гребёнки определяется частотой следования фемтосекундных импульсов. В свою очередь, частота определяется оптической длиной резонатора лазера, которую можно точно регулировать пьезоэлектрическими устройствами. Тем самым получается источник спектральных линий с точным интер-

валом между ними. Поскольку импульсы фемтосекундной длительности обладают высокой интенсивностью, излучение такого лазера можно преобразовывать по частоте методами нелинейной оптики и расширять ЛГОЧ на всю ширину оптического диапазона.

Уникальная особенность ЛГОЧ привела к выдающимся успехам в области прецизионной метрологии с точностью свыше 17-го знака, а именно к созданию сверхточных оптических часов, прецизионному измерению константы Ридберга, передаче прецизионных сигналов частоты и времени на расстояния в сотни километров и др. Работы в этой области были отмечены Нобелевской премией по физике [10]. Успешные исследования с применением ЛГОЧ изложены в ряде работ, например [11–14]. Подробное описание методики измерений ЛГОЧ изложено в работе [15].

Естественно, возникло желание использовать ЛГОЧ для прецизионной калибровки астрономических спектрографов. Однако имеется существенная трудность. Типичные интервалы частот широко используемых фемтосекундных лазеров на сапфире не превышают 1 ГГц. А для волоконных фемтосекундных лазеров эта величина ещё меньше,  $\sim 250 \text{ МГц}$ . Между тем интервалы разрешения даже самых совершенных по разрешающей силе астрономических спектрографов составляют не менее нескольких ГГц. Это означает, что линии ЛГОЧ при регистрации такими спектрографами сольются и не будут разрешены. Указанный недостаток удаётся преодолеть путём фильтрации спектра ЛГОЧ с помощью эталонов Фабри–Перо [16–18].

Эталон Фабри–Перо обладает узкими полосами с высоким пропусканием на резонансных частотах (модах), значения которых определяются расстоянием между зеркалами (толщина эталона). Если толщина эталона меньше оптической длины резонатора лазера в кратное число раз ( $m$ ), то через него будут проходить частоты ЛГОЧ с разрешением в  $m$  раз. Толщину эталона, так же как и оптическую длину резонатора, можно регулировать с помощью пьезоэлектрической техники. Ширина линии пропускания эталона определяется коэффициентом отражения зеркал, предельные значения которого ограничены возможностями технологии. Поэтому для нужной степени фильтрации ЛГОЧ приходится использовать последовательно набор двух и даже трёх эталонов. В сочетании с такой системой эталонов Фабри–Перо фемтосекундные лазеры позволяют реализовать синтезатор спектральных линий, требующийся для прецизионной калибровки астрономических спектрографов, предназначенных для доплеровской спектроскопии. Многочисленные схемы фемтосекундных лазеров, нужных для этой цели, рассматриваются в обзоре [19]. Классической считается схема с использованием кристалла  $Ti$ : сапфир в качестве активной среды лазера. С использованием фильтрации эталонами Фабри–Перо удалось получить ЛГОЧ с интервалом 16 ГГц и использовать её в сочетании со спектрографом HARPS в астрофизических исследованиях [20].

Волоконные фемтосекундные лазеры более компактны и обладают лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с лазерами на сапфире. Поэтому наибольшее развитие получили системы ЛГОЧ на основе волоконных фемтосекундных лазеров. Принципиальная схема такого устройства показана на рис. 3. На основе этой схемы Институтом квантовой оптики (Германия) и

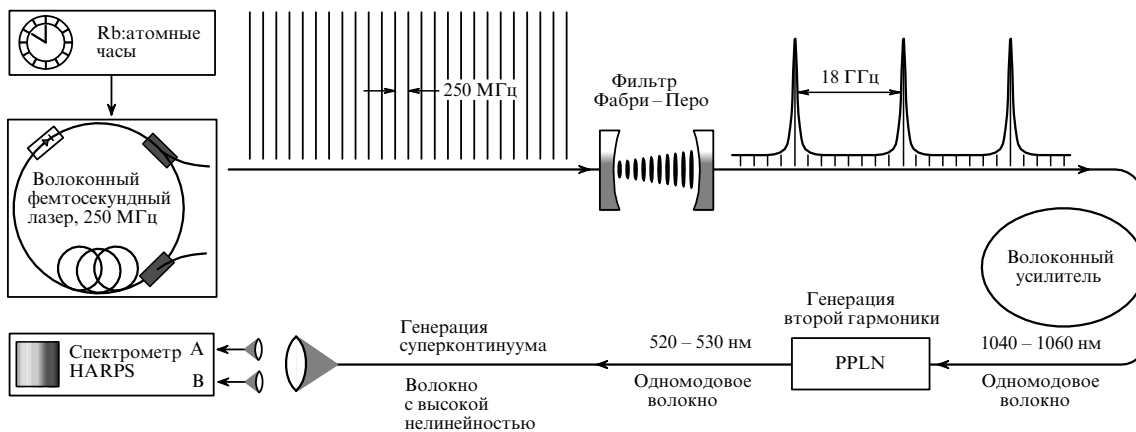


Рис. 3. Принципиальная схема калибратора астрономического спектрометра [21].

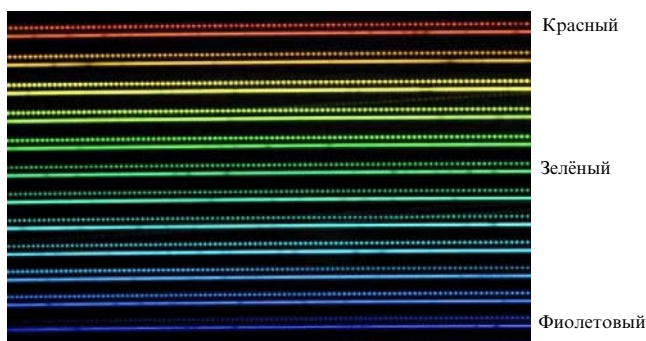


Рис. 4. Спектр гребёнки калибратора, зарегистрированный спектрометром.

фирмой Menlo Systems (Германия) был создан прецизионный калибратор для спектрографов, прошедший успешные испытания [21, 22]. В частности, проводилось сравнение точности калибраторов, установленных на разных спектрографах. Сравнительные испытания, проведенные на протяжении 6 лет, показали, что различие в точности калибраторов не превосходит  $2,5 \text{ cm}^{-1}$ .

На рисунке 4 показан спектр ЛГОЧ, зарегистрированный спектрографом HARPS. Несмотря на эти успехи, следует отметить, что, хотя созданная система позволяет получать точности калибровки на уровне нескольких сантиметров в секунду, она чрезвычайно сложна по сравнению с традиционными системами на основе спектральных ламп и йодной ячейки. Требуется совершенный фемтосекундный лазер с пьезоэлектрической регулировкой интервала ЛГОЧ, стабилизированной по стандарту частоты. Необходима специальная система регулировки фиксированного положения ЛГОЧ на шкале частот. Для этого, а также для расширения протяжённости ЛГОЧ на весь видимый диапазон нужна эффективная генерация суперконтинуума с помощью оптических волокон типа фотонных кристаллов.

Кроме использования непрерывного фемтосекундного лазера существует альтернативный лазерный способ генерации ЛГОЧ, основанный на эффектах нелинейной оптики, а именно на процессе четырёхволнового смешения интенсивного лазерного излучения в нелинейной среде с определённой дисперсией. Оптические одномодовые волокна обладают нужными свойствами. В области  $1,5 \text{ мкм}$  в волокне, активированном Er, можно

усилить излучение до требуемого уровня интенсивности, а ОМВ, широко используемые в системах волоконно-оптической связи, имеют аномальную дисперсию в указанной области спектра. Таким образом, используя комбинацию этих волокон, можно обеспечить условия, необходимые для реализации нелинейного эффекта.

Эти обстоятельства были с большим успехом использованы для нового принципа генерации ультракоротких импульсов лазерного излучения [23, 24]. Используя два лазера непрерывного действия с узкими спектральными линиями с определённой разностью по длине волны и с равными интенсивностями, можно получить в результате биения непрерывное излучение, модулированное по синусоиде. Излучение можно усилить и запустить в ОМВ, обладающее нелинейностью и аномальной дисперсией. В результате процесса четырёхволнового смешения происходит обострение максимумов синусоиды с формированием непрерывной последовательности импульсов фемтосекундной длительности.

Этот эффект был использован для создания системы ЛГОЧ, предназначенной для калибратора астрономического спектрографа [25]. Принципиальная схема показана на рис. 5. Устройство состоит из трёх секций. В первой секции с помощью двух лазеров, работающих на длинах волн в области  $1,5 \text{ мкм}$  с ширинами линий  $150 \text{ кГц}$ , формируется непрерывная синусоидальная последовательность излучения. Причём можно путём стабилизации частот этих лазеров получать биения с разными частотами ( $40, 80$  и  $160 \text{ ГГц}$ ). В следующей секции использовались ОМВ, легированные Er, с диодной накачкой для усиления с целью получения нужной интенсивности, а также ОМВ с аномальной дисперсией (SMF-28). Излучение сформированной последовательности фемтосекундных импульсов в третьей секции подвергалось преобразованию во вторую гармонику и генерации суперконтинуума в фотонно-кристаллическом волокне с целью получения ЛГОЧ видимого диапазона.

На рисунке 6 показан фрагмент спектра ЛГОЧ, генерируемого описанным способом. Привлекательная особенность такого подхода — отсутствие фемтосекундного лазера и весьма сложной в эксплуатации пьезоэлектроники. Интервалы ЛГОЧ могут составлять десятки ГГц. Это означает возможность использования спектрографов с не самым большим разрешением, что важно для расширения фронта поиска экзопланет. Однако надо

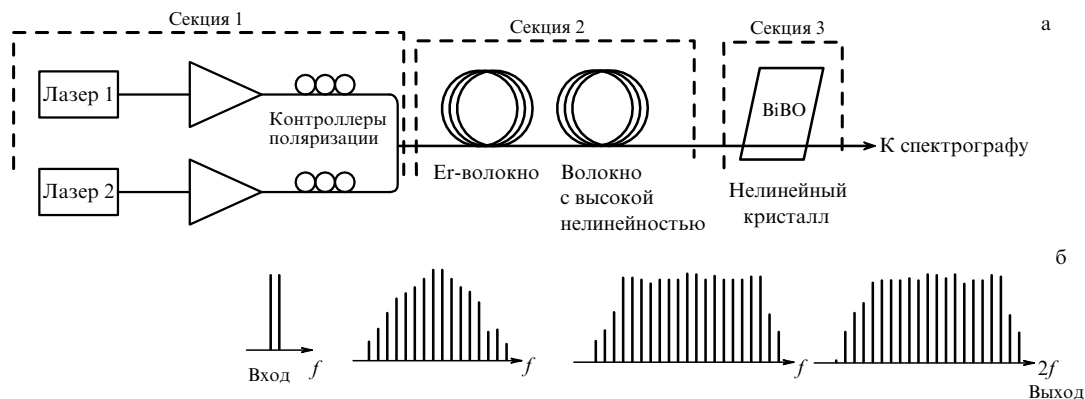


Рис. 5. Волоконно-оптическая система для генерации ЛГОЧ. (а) Принципиальная схема установки, (б) преобразование спектра в секциях установки [25].

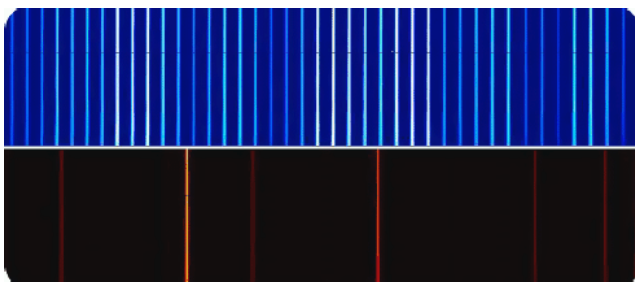


Рис. 6. Фрагмент спектра волоконно-оптической системы ЛГОЧ (вверху) и для сравнения спектр спектральной лампы (внизу).

иметь в виду, что увеличить интервал ЛГОЧ весьма непросто. Дело в том, что увеличение интервала соответствует увеличению частоты следования импульсов, приводящему к соответствующему уменьшению энергии в импульсе и его интенсивности. А это может привести к тому, что требуемый нелинейный процесс просто не начнётся. Кроме того, необходимо принимать во внимание различные эффекты ограничения интенсивности, включая опасность повреждения волокна и пр. Требуется тщательное экспериментальное исследование по подбору длин волокон, условий накачки и др.

Итак, лазерная физика позволяет создавать источники узких спектральных линий в оптическом диапазоне с точным определением их длин волн (частот). С их помощью можно, в принципе, калибровать астрономические спектрографы с точностью, достаточной для измерения доплеровских сдвигов на уровне нескольких сантиметров в секунду. Однако эти системы весьма сложные и дорогостоящие по сравнению с традиционными калибраторами на основе спектральных ламп и йодных ячеек, которые хотя и допускают получение точности лишь на уровне метров в секунду, но существенно проще и эффективнее в эксплуатации по сравнению с лазерными системами.

#### 4. Исследования в астрофизике

Метод доплеровской астрофизической спектроскопии даёт возможность проводить исследования особой значимости. Однако принципиальные трудности метода состоят в том, что требуются прецизионные измерения спектров на протяжении значительных интервалов времени, а также сравнение этих спектров. При этом должна

быть уверенность, что весьма малое различие в спектрах вызвано исключительно движением звезды с соответствующей ЛС. Это означает, что на самой звезде в период исследований не должно быть процессов с изменением спектра. Надо иметь в виду и искажения в атмосфере. Искажения передачи излучения от телескопа по волоконной линии связи при неточности гидирования телескопа также могут привести к ошибкам. Хотя точность калибраторов в лабораторных исследованиях достигает значений порядка нескольких сантиметров в секунду, точность реальных измерений на астрономических спектрографах пока на порядок ниже.

##### 4.1. Исследования экзопланет

Главное достижение доплеровской астрофизической спектроскопии — открытие экзопланет [1]. В настоящее время их число превысило тысячи. Важнейшим стимулом этих исследований служит стремление обнаружить экзопланету с возможной жизнью на ней. Как известно, в Солнечной системе существуют планеты двух типов: газовые гиганты типа Юпитера и Сатурна и твердотельные планеты типа Венеры, Земли, Марса. Эти типы планет сильно различаются по размеру и массе. В разделе 2 было указано, что чем меньше масса экзопланеты, тем меньше доплеровский сдвиг, поэтому твердотельные планеты труднее обнаружить. Необходимое условие жизни на экзопланете земного типа — существование воды в жидкой фазе, т.е. температура на поверхности должна быть в определённых пределах. Это означает, что экзопланета должна находиться на определённом расстоянии от звезды в так называемой "жизненной зоне". Таким образом, поиск твердотельных экзопланет земного типа ограничивается пределами точности измерений ЛС и размерами орбиты.

Как уже отмечалось, максимальное изменение скорости Солнца в результате действия Земли составляет всего лишь  $9 \text{ см с}^{-1}$ , что находится за пределами точности систематических измерений на существующих астрономических спектрографах, а размер орбиты соответствует периоду в один год. Для звёзд меньшей массы и температуры можно ожидать больших доплеровских сдвигов и меньших размеров орбиты экзопланеты. Поэтому повышенное внимание исследователей экзопланет привлекают звёзды малого размера М-типа (красные карлики). Малая масса звезды снижает точность измерения доплеровских сдвигов до величины порядка несколь-

ких метров в секунду, а меньшая температура допускает орбиты "жизненной зоны" с периодами на уровне десятка дней, а не года. Кроме того, звёзды этого типа наиболее распространены во Вселенной.

Исходя из этих соображений большой коллектив исследователей из нескольких обсерваторий, астрофизических институтов и университетов провёл тщательный анализ зависимостей ЛС от времени наблюдений, полученных на спектрографах типа HARPS при исследовании звезды Проксима Центавра. В результате в 2016 г. была обнаружена экзопланета земного типа, которая получила название Проксима b [26]. Она в 20 раз ближе к своей звезде, чем Земля к Солнцу, располагается в "зоне жизни" и совершает полный оборот вокруг звезды за 11,2 дня. Масса составляет 1,27 от массы Земли. Максимальное изменение ЛС составляло  $2 \text{ м с}^{-1}$ , что позволяло использовать в измерениях традиционные методы для калибровки спектрографа.

Для исследования экзопланет, обращающихся вокруг звёзд типа М-карликов, в обсерватории Калар Альто (Испания) был построен специальный спектрограф CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrograph — поиск в Калар Альто М-карликов с экзоземлями с помощью эшелле-спектрографов оптического и ближнего ИК-диапазона с высоким разрешением), предназначенный для работы с телескопом диаметром 3,5 м [27]. Из-за сравнительно низкой температуры звезды значительная часть излучения лежит в ближней ИК-области спектра. Поэтому спектрограф CARMENES состоит из двух отдельных эшелле-спектрографов, покрывающих диапазон от 0,55 до 1,7 мкм с разрешением  $R = 82000$ . Калибровка с точностью  $1 \text{ м с}^{-1}$  осуществляется с помощью усовершенствованной спектральной лампы со стабилизацией эталоном Фабри–Перо. Были выполнены исследования около 300 хорошо

известных М-карликов. Один из последних результатов опубликован в работе [28], результаты которой показаны на рис. 7. О важности и актуальности исследований, обсуждаемых в статье, можно судить по числу соавторов (148!) из 28 научных организаций.

#### 4.2. Изменения фундаментальных констант во времени

Тот факт, что регистрация спектров космических объектов, удалённых на огромные расстояния, означает также отдаление во времени, даёт принципиальную возможность сравнить спектр излучения, испущенного миллиарды лет тому назад, с существующими в настоящее время источниками. Как известно, Дирак ещё в 1937 г. выдвинул идею о том, что в соответствии с расширением Вселенной должны изменяться масштабы измерений и значения фундаментальных констант. Это могло бы сказаться на изменении во времени постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Прецизионные измерения с помощью ЛГОЧ дают принципиальную возможность постановки таких исследований [29]. С этой целью создаётся уникальный спектрограф ESPRESSO, предназначенный для работы с гигантским телескопом VLT [30]. Предполагается исследовать в спектрах квазаров так называемый "лес" линий Луман- $\alpha$ , сдвинутых красным смещением, и сравнить их с существующими спектрами.

#### 4.3. Прямое измерение ускорения разлёта Вселенной

Прецизионные спектральные измерения доплеровских сдвигов астрономических объектов позволяют, в принципе, детально исследовать важнейший вопрос современной науки — динамику Вселенной, а именно получить прямое подтверждение ускоренного разлёта, а также проблему "тёмной энергии". Ещё в 1962 г. была предложена идея такого исследования [31]. Предлагалось точно измерить скорость разлёта определённого космического объекта по красному смещению спектра, а затем повторить эти измерения через определённый промежуток времени. Различие скоростей даст величину изменения скорости. Однако оценки показали, что при существовавших в то время точностях спектральных измерений потребовались бы сотни лет для заметного эффекта. Методики с использованием ЛГОЧ радикально изменяют ситуацию. Для реализации этой идеи был разработан проект уникального спектрографа CODEX с гигантским телескопом E-ELT для измерения разлёта Вселенной [32]. Предполагается увеличить точность измерения доплеровских сдвигов до нескольких сантиметров в секунду и провести измерения на протяжении 15–20 лет.

## 5. Заключение

Итак, успехи в области физики лазеров и в волоконной оптике открывают возможности весьма важных применений в астрофизике, а именно для прецизионных измерений доплеровских сдвигов в спектрах звёзд. При этом огромное значение имеет наукоёмкая технология изготовления оптических волокон, а также методики их исследований. Это крайне важно для работы уникальных телескопов в сочетании с уникальными спектрографами. Высокая точность спектральных измерений достигается с помощью устройств ЛГОЧ. Следует отметить, что работы по совершенствованию систем волоконно-оптической связи телескопа со спектрометром, а также систем прецизионных калибраторов спектрометров на основе

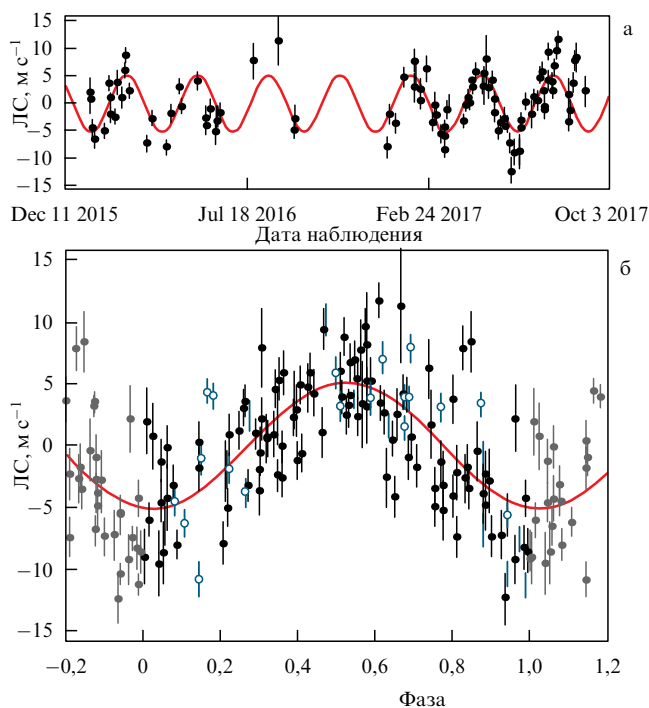


Рис. 7. Регистрация изменений ЛС во времени (а), результат с математической обработкой большого числа данных (б) [28].

ЛГОЧ успешно проводились и продолжают проводиться. Причём для достижения высоких результатов необходима взаимно заинтересованная кооперация высококвалифицированных специалистов в разных областях. Это астрономы, проводящие исследования на телескопах в обсерваториях. Это специалисты-оптики, работающие в астрофизических институтах, разрабатывающие и проводящие исследования спектрографов. Это технологи и специалисты по волоконной оптике, разрабатывающие и исследующие требуемые устройства. Это специалисты в области лазерной физики и техники. Естественно, что высокую квалификацию обеспечивают университеты. Опыт показывает, что только такая организация совместной научно-исследовательской работы приводит к успеху. Стремление получить решения актуальных проблем фундаментальной науки служит сильным стимулом для проведения таких исследований.

### Список литературы

1. Mayor M, Queloz D *Nature* **378** 355 (1995)
2. Avila G, Singh P, Albertsen M *Proc. SPIE* **6269** 62695O (2006)
3. Chazelas B et al. *Proc. SPIE* **7739** 773947 (2010)
4. Feder T et al. *Proc. SPIE* **8446** 844692 (2012)
5. Косолапов А Ф и др. *Квантовая электроника* **46** 267 (2016); Kosolapov A F et al. *Quantum Electron.* **46** 267 (2016)
6. Прямыков А Д и др. *Квантовая электроника* **46** 1129 (2016); Pryanikov A D et al. *Quantum Electron.* **46** 1129 (2016)
7. Birks T A et al. *Opt. Express* **20** 13996 (2012)
8. Gris-Sánchez I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **475** 3065 (2018)
9. Leon-Saval S G et al. *Opt. Express* **25** 17530 (2017)
10. Хэнш Т В *УФН* **176** 1368 (2006); Hänisch T W *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297 (2006)
11. Jones D J et al. *Science* **288** 635 (2000)
12. Holzwarth R et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** 2264 (2000)
13. Udem Th, Holzwarth R, Hänisch T W *Nature* **416** 233 (2002)
14. Cundiff S T, Ye J *Rev. Mod. Phys.* **75** 325 (2003)
15. Крюков П Г *УФН* **185** 817 (2015); Kryukov P G *Phys. Usp.* **58** 762 (2015)
16. Steinmetz T et al. *Science* **321** 1335 (2008)
17. Li C-H et al. *Nature* **452** 610 (2008)
18. Steinmetz T et al. *Appl. Phys. B* **96** 251 (2009)
19. McCracken R A, Charsley J M, Reid D T *Opt. Express* **25** 15058 (2017)
20. Glenday A G et al. *Optica* **2** 250 (2015)
21. Wilken T et al. *Nature* **485** 611 (2012)
22. Ycas G G et al. *Opt. Express* **20** 6631 (2012)
23. Dianov E M et al. *Opt. Lett.* **14** 1008 (1989)
24. Mamyshev P V, Chernikov S V, Dianov E M *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 2347 (1991)
25. Zajnulina M et al. *Appl. Phys. B* **120** 171 (2015)
26. Anglada-Escudé G et al. *Nature* **536** 437 (2016)
27. Quirrenbach A et al. *Pros. SPIE* **9147** 91471F (2014)
28. Reiners A et al. *Astron. Astrophys.* **609** L5 (2018)
29. Amendola L et al. *Phys. Rev. D* **86** 063515 (2012)
30. Pepe F A et al. *Pros. SPIE* **7735** 77350F (2010)
31. Sandage A *Astrophys. J.* **136** 319 (1962)
32. Pasquini L et al. *Pros. SPIE* **7735** 77352F (2010)

### Lasers and fiber optics for astrophysics

P.G. Kryukov

*Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, 119333 Moscow, Russian Federation; Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation E-mail: kryukov@fo.gpi.ru*

Optical spectroscopy has been and remains an important feature of astrophysical research. Huge telescopes are being built to collect radiation from the most distant stars in the Universe for subsequently studying it with unique astronomical spectrographs. The fundamental problem one faces here is that of transferring the extremely weak radiation focused by the moving telescope to the entrance of the stationary spectrograph. The solution is connecting telescopes to spectrographs with a fiber-optical connection, and research and development of the system's necessary components is currently a major task in the field of fiber optics. A key problem in astronomical spectroscopy is the precision measurement of Doppler line shifts in the spectra of stars to determine the velocity of a star along the observation line (radial velocity, RV). A remarkable feature of Doppler spectroscopy is that a precision measurement of quite small RV variations (in fact, accelerations) can last for long periods of time. Such star RV variations can be due, for example, to a planet orbiting the star; the action of the planet causes periodical changes in the motion of the star, thus leading to a Doppler shift of the star's spectrum. The precise measurements of this shift has provided an indirect method for searching and discovering planets outside the Solar System (exoplanets). The important particular problem of searching for habitable earthlike exoplanets requires a spectral measurement accuracy sufficient to detect RV variations at the level of a few centimeters per second per year. Ten-fifteen years of such measurements would provide a direct estimate of the hypothetical accelerated expansion of the Universe. However, the accuracy required for this is more than the conventional spectroscopy techniques (iodine cell and spectral lamps) are capable of. This paper reviews approaches to radically improve Doppler spectroscopy techniques to achieve the required shift measurement accuracy. These approaches include the development of fiber optical systems for connecting the telescope with the spectrograph and the development of precision calibrators of astronomical spectrograph using laser physics and fiber optics advances.

**Keywords:** fiber-fed astronomical spectrographs, Doppler spectroscopy, optical frequency comb, exoplanets, dynamics of the Universe

PACS numbers: **42.62. – b**, **42.81. – i**, **97.82. – j**

Bibliography — 32 references

*Received 8 February 2017, revised 13 February 2018*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (11) 1179–1186 (2018)

*Physics – Uspekhi* **61** (11) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038331>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.02.038331>