

УДК 520.353; 520.84

## МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ, НЕЛИНЕЙНОЙ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ АСТРОФИЗИКИ

© 2018 П. Г. Крюков<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 19 мая 2017 года; принята в печать 1 апреля 2018 года

Прецизионные измерения доплеровских смещений линий в спектрах звезды, позволяющие измерить ее лучевую скорость (ЛС), являются важной областью астрофизических исследований. Замечательная особенность доплеровской спектроскопии — возможность надежных измерений весьма малых вариаций ЛС (фактически ее ускорений) в продолжительные интервалы времени. Примером такой вариации ЛС звезды является действие на нее планеты. Под влиянием планеты, вращающейся вокруг звезды, последняя демонстрирует 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, находящихся в зоне обитаемости. Для этого требуется точность спектральных измерений, позволяющая определять вариации ЛС на уровне сантиметров в секунду на периодах длительностью порядка года. Также подобные измерения, проведенные на протяжении 10–15 лет, позволили бы прямым способом определить предполагаемое ускорение расширения Вселенной. Однако для таких исследований требуется точность спектральных измерений, превосходящая возможности традиционной спектроскопии (йодная ячейка, спектральные лампы). Рассматриваются методы радикального улучшения возможностей астрономической доплеровской спектроскопии, позволяющие достичь требуемой точности измерения доплеровских смещений. Проблему прецизионной калибровки можно решить путём создания системы лазерного синтезатора оптических частот с исключительно высокой точностью и стабильностью.

Ключевые слова: *методики: спектроскопические*

### ВВЕДЕНИЕ

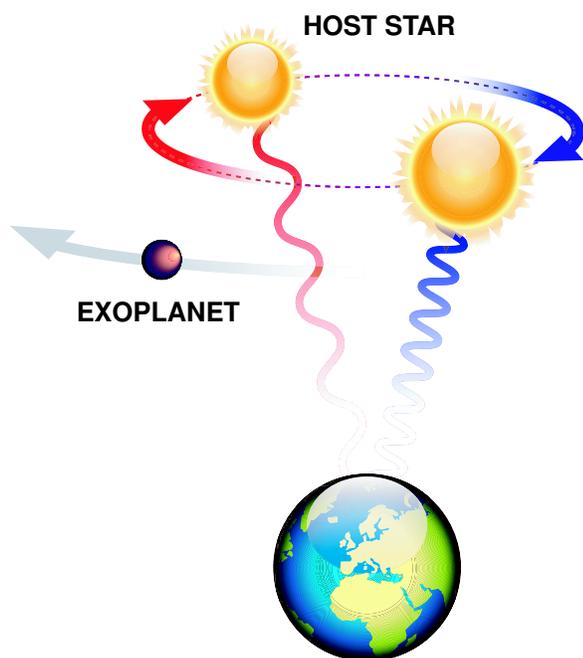
Значительная часть наших знаний о природе тел во Вселенной и о ее устройстве получена путём изучения спектров астрофизических объектов. Важную роль в таких исследованиях играют методы спектроскопии высокого разрешения в видимом диапазоне длин волн. Помимо определения химического состава и свойств космических тел, спектральные измерения позволяют детектировать с высокой точностью их лучевые скорости (ЛС) по эффекту Доплера. Этот метод лежит в основе доплеровской спектроскопии. Точность измерения ЛС определяется разрешающей способностью и калибровкой астрономического спектрографа, используемого при наблюдениях.

Выдающимся достижением доплеровской спектроскопии в астрономии стало открытие красного смещения спектральных линий далёких галактик, пропорционального расстоянию до них (закон

Хаббла), обусловившее развитие концепции расширения Вселенной в результате Большого взрыва. Доплеровские смещения в этом случае огромны, соответствующие ЛС достигают долей скорости света.

Однако и анализ малых доплеровских смещений позволяет получить исключительно важные результаты. Так, при определении с высокой точностью доплеровских смещений в спектрах звёзд было установлено [1], что имеют место незначительные, но строго периодические изменения ЛС исследуемой звезды. Они были интерпретированы как влияние планеты. Планета и звезда вращаются вокруг общего центра масс (см. рис. 1), что вызывает периодическое изменение скорости движения звезды в направлении наблюдателя. Тем самым впервые косвенным способом было доказано существование планет у звёзд за пределами Солнечной системы (экзопланет). Таким образом,

\*E-mail: kryukov@fo.gpi.ru



**Рис. 1.** Доплеровское смещение спектра звезды, вызванное воздействием вращающейся вокруг неё планеты.

доплеровская спектроскопия делает возможным обнаружение и исследование экзопланет.

Амплитуда доплеровского сдвига спектральных линий и, соответственно, изменения ЛС, зависит от отношения масс экзопланеты и звезды. Например, для экзопланет типа Юпитера изменения ЛС составляют порядка десятков метров в секунду, а для экзопланет типа Земли лежат в области нескольких сантиметров в секунду. Поэтому для обнаружения и исследования экзопланет земного типа точность спектроскопических измерений должна быть предельно высокой.

Высокая точность измерения ЛС дает возможность исследовать динамику Вселенной. Для этого также требуются измерения ЛС с точностью до сантиметров в секунду, проводимые на протяжении 15–20 лет.

Существенными для решения упомянутых задач являются размеры и характеристики телескопа, которые налагают ограничения на проведение исследований и измерений, а также нужное спектральное разрешение используемого спектрографа. Для реализации необходимой точности спектральных измерений требуются высокая механическая и температурная стабильность спектрографов. Этим во многом определяется сложность и уникальность их конструкции. Примером спектрографа, предназначенного для поиска и исследования экзопланет, является HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher), название которого подчеркивает его назначение [2]. Он

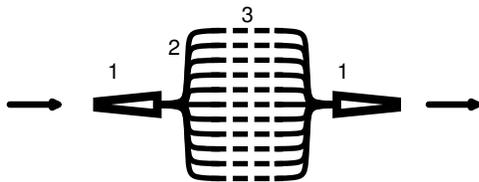
установлен на телескопе с зеркалом диаметром 3.6 м в обсерватории La Silla (ESO) в Чили. Это спектрограф со скрещенной дисперсией, перекрывающий диапазон длин волн от 380 до 690 нм в порядках эшелле от 89 до 161. Разрешение составляет 115 000. Регистрация производится матрицей из двух  $2k \times 4k$  CCD. Обеспечена высокая механическая стабильность, давление в корпусе менее 0.1 гПа и стабильность температуры менее 0.01 К. Ещё более совершенными являются спектрограф ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations) (VLT, ESO) [3], разработанный, как следует из его названия, для изучения экзопланет, подобных Земле, и спектрограф CODEX (COsmical Dynamics EXperiment) [4], спроектированный для прямого измерения ускорения расширения Вселенной. Он будет установлен на строящемся телескопе E-ELT (ESO).

Требования высокой механической и температурной стабильности и значительные размеры подобных систем обуславливают их стационарность. Таким образом, возникает принципиальная проблема передачи света, сфокусированного движущимся телескопом, на шель неподвижного спектрографа. Для этих целей используется оптическое волокно. При этом излучение необходимо перенести от телескопа без искажений и потерь и оптимальным образом осветить шель спектрографа, поскольку от условий этого освещения зависит его спектральное разрешение. Это весьма ответственная задача, решению которой уделяется огромное внимание, и проводятся обширные исследования.

Доплеровская астрофизическая спектроскопия принципиально требует прецизионной калибровки зарегистрированных спектров, которая может достигаться путём использования лазерных устройств генерации чрезвычайно узких спектральных линий с точным определением их длин волн. Такая калибровка даёт возможность сравнивать спектры, снятые на протяжении значительных интервалов времени (вплоть до десятилетий) и в разных обсерваториях и точно определять малые изменения ЛС. Разработке и созданию прецизионных калибраторов астрономических спектрографов уделяется огромное внимание.

## 1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТЕЛЕСКОПА СО СПЕКТРОГРАФОМ

На протяжении многих лет оптические волокна используются для связи спектрографа с телескопом. В отличие от широко распространенной системы волоконно-оптической связи, в которой применяется одномодовое оптическое волокно (ООВ) и, по существу, выделяется довольно узкая область спектра, в астрономической системе волоконно-оптического сочетания телескопа



**Рис. 2.** Принципиальная схема волоконно-оптической связи, сочетающей МОВ и ООВ: 1 — МОВ со многими сердцевинами, 2 — ООВ, 3 — брэгговские решетки.

со спектрографом необходимо обеспечить передачу чрезвычайно слабого излучения без искажений спектра в широком спектральном диапазоне. С этой целью используются специально разработанные конструкции систем волоконно-оптической связи на основе многомодовых оптических волокон (МОВ) с большим размером сердцевины (до сотен микрон) [5]. Сочетание телескопа со спектрографом, установленным стационарно, обеспечивается с помощью специальной волоконно-оптической системы, которая также служит для решения проблемы высокой стабильности оптико-механической конструкции спектрографа. В Российской Федерации системы такого вида, обозначаемые как *fiber-fed*, разрабатываются в обсерватории САО РАН [6, 7]. Поскольку изображения звезд в фокусе телескопа имеют микронные размеры, требуются системы микролинз для согласования со входом и выходом таких волокон, а также с апертурой входной щели спектрографа.

Следует принимать во внимание тот факт, что оптическое волокно не является идеальным переносчиком света [8]. В ходе наблюдений волоконный тракт может подвергаться случайным воздействиям, связанным с гидрированием телескопа и изменениями структуры светового пучка в волокне. Распространение в МОВ излучения с широким спектром приводит к возбуждению многих мод, число которых определяется размером сердцевины, а также характеристиками МОВ (изгибами, механическими напряжениями и др.). При распространении в МОВ происходит перемешивание мод (*scrambling*), и из-за нестабильного наполнения модами МОВ имеет место некоторое искажение распределения излучения на выходе волокна в ближней и дальней зонах (модовый шум) [8]. Это влияет на работу спектрографа, поскольку искажения в ближней зоне проявляются в условиях освещения входной щели спектрографа, а искажения в дальней зоне — в распространении света в нём. Важными задачами являются выбор и изготовление МОВ с минимальными искажениями передаваемого света.

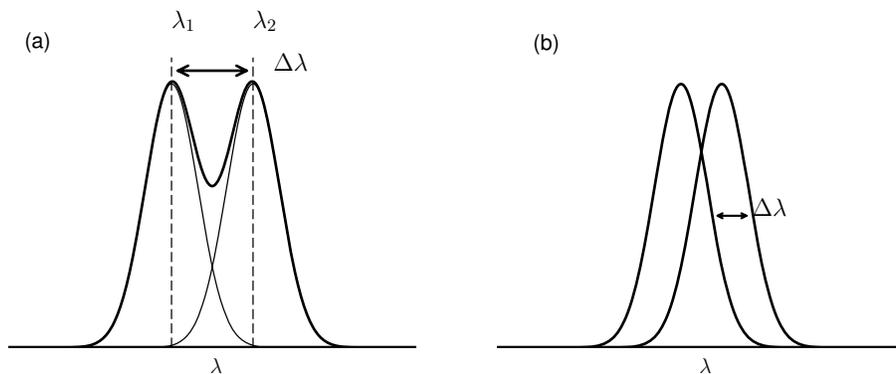
Для исследования МОВ с различной конфигурацией сердцевины волокна была создана специальная измерительная установка [9]. Применялась

методика, позволяющая детально измерять излучение на выходе из МОВ в ближней и дальней зонах при сканировании поперек сечения волокна узкого пучка с вариацией длин волн. С помощью этой установки были проведены детальные исследования с целью выбора МОВ, оптимального для применения в астрономии. Измерения проводились для МОВ, изготавливаемых различными фирмами, причём рассматривались волокна с разной формой сердцевины, не только круглой, но и квадратной, шестигранной и восьмигранной, с размерами около 200 мкм. Было установлено, что МОВ с восьмигранной формой сердцевины существенно превосходят волокна с круглой сердцевиной [9]. Помимо выбора оптимальной конфигурации сердцевины, для улучшения передачи света по волокну используют механическую систему для периодического (с частотой десятки Герц) изгибания волокна, что приводит к лучшему перемешиванию мод. Сравнительно недавно появились новые типы МОВ — волоконные световоды с полой сердцевиной [10, 11]. Представляется целесообразным исследовать возможность использования таких волокон в системах волоконно-оптической связи телескопа со спектрографом.

Поскольку перемешивание многих мод в МОВ искажает освещение щели спектрографа, предлагается новый подход к разработке волоконно-оптической системы, представляющей комбинацию ООВ и МОВ. Он базируется на фотонике многомодовых волокон в астрономии [12]. В работе [13] обстоятельно описана технология изготовления такой волоконно-оптической системы, в которой сочетаются ООВ и МОВ. На рис. 2 схематически показан ее принцип. Входное МОВ получается тесной сборкой проплавлением многих ООВ и представляет собой по существу оптическое волокно с множеством сердцевины. С помощью конусного переходника ООВ могут быть разведены, и в каждом из них можно записать брэгговскую решетку, используя фемтосекундный лазер. Это позволяет отфильтровать излучение от нежелательных полос ОН. Затем ООВ снова сводятся в МОВ для передачи излучения на вход спектрографа.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ДОПЛЕРОВСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Главной задачей доплеровской спектроскопии является не разрешение узких спектральных линий, а сравнение спектров и определение ЛС по эффекту Доплера. При этом спектр движущегося астрономического объекта сравнивается со спектром неподвижного лабораторного источника. Сравнивая два значения ЛС астрономического объекта, измеренные в разное время, можно определить изменение ЛС за этот интервал времени,



**Рис. 3.** Особенности доплеровской спектроскопии: (а) разрешение двух линий при одновременной регистрации, (б) сравнение положения двух линий при раздельной регистрации.

а именно — ускорение движения исследуемого объекта.

Обычно разрешающая сила спектрометра определяется способностью разделить две соседние спектральные линии (согласно критерию Рэля) при их одновременной регистрации, как показано на рис. 3а. При этом требуется относительная калибровка по длинам волн (частотам). В случае измерения доплеровского смещения с целью определения ЛС и её изменения производится сравнение спектров, зарегистрированных раздельно через значительный промежуток времени (до нескольких лет!), и необходима абсолютная калибровка для всех серий спектров. Точная, и, что самое главное, абсолютная калибровка шкалы длин волн (частот) позволяет путём сравнения определять малые смещения спектра даже для относительно широких спектральных линий, как показано на рис. 3б. В этом случае высокая разрешающая способность спектрометра требуется не для разрешения спектральных линий, а для точной регистрации формы спектра. Поэтому астрономические спектрографы, предназначенные для измерения весьма малых доплеровских смещений, характерных для спектров звезд с экзопланетами, подобными Земле, должны обладать, помимо высокой чувствительности и разрешающей способности, очень точной абсолютной калибровкой длин волн (частот). Эта калибровка должна быть основана на использовании стандартов частоты Международных эталонов времени (цезиевых, Cs, и рубидиевых, Rb, атомных часов), подобно тому, как это делается в системе ГЛОНАСС. Лазерные методы позволяют реализовать прецизионную калибровку спектрографов, предназначенных для обнаружения и исследования экзопланет.

### 3. ПРЕЦИЗИОННАЯ КАЛИБРОВКА АСТРОНОМИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА

Традиционным методом калибровки оптических спектрометров является регистрация спектральных линий эталонного источника спектра с точно известными длинами волн (частот). Для астрономических спектрографов такими источниками известных спектральных линий являются спектральная лампа типа полого катода с наполнением аргоном с примесями тория или урана, а также кювета с парами йода, позволяющая получать узкие линии поглощения молекул  $I_2$ . По целому ряду причин такая калибровка не позволяет получить точность в продолжительных измерениях ЛС лучше, чем примерно  $1 \text{ м с}^{-1}$ . Однако для одной из актуальнейших задач астрофизики — поиска земноподобной экзопланеты, вращающейся вокруг звезды, подобной Солнцу — этого недостаточно. Необходима точность измерения ЛС около  $10 \text{ см с}^{-1}$  при стабильных измерениях на протяжении по крайней мере одного года. Ещё большая точность, на уровне порядка  $1 \text{ см с}^{-1}$  при наблюдениях в течение 10–15 лет, требуется для прямого измерения динамики расширения Вселенной.

Лазерные методы позволяют генерировать оптическое излучение с исключительно узкими спектральными линиями с частотами, точные значения которых определяются на основании стандарта частоты, т.е. создавать синтезатор узких спектральных линий с точно определёнными значениями частот. Фигурально выражаясь, лазерные науки и техника позволяют создать «искусственный атом» с очень точными частотами его спектральных линий. Это повышает точность метрологических измерений вплоть до 17-го знака. Именно благодаря успехам лазерной физики, нелинейной и волоконной оптики, удаётся реализовать требуемую точность калибровки астрономических спектрографов.

### 3.1. Лазерная гребенка оптических частот на основе фемтосекундного лазера

Исследования лазеров с целью получения импульсов излучения ультракороткой длительности, вплоть до фемтосекунд, привели к созданию непрерывно работающего лазера с пассивной синхронизацией мод. Этот лазер обладает замечательнейшей особенностью: он испускает фемтосекундные импульсы в строго периодической последовательности, а его спектр состоит из широкого набора чрезвычайно узких спектральных линий с точным интервалом между ними — лазерной гребенки оптических частот (ЛГОЧ). Поскольку импульсы фемтосекундной длительности обладают высокой интенсивностью, их можно преобразовывать по частоте методами нелинейной оптики. Используя оптические волокна особой конфигурации (т.н. фотонные кристаллы), можно расширить спектральную протяженность ЛГОЧ вплоть до октавы. Таким образом, получается синтезатор оптических частот в виде чрезвычайно узких и регулярно расположенных спектральных линий, простирающихся на весь видимый диапазон. Эта уникальная особенность привела к ряду исключительно важных результатов в области прецизионной метрологии: созданию сверхточных оптических часов, измерениям электромагнитных частот с точностью до 17-го знака, передаче их на расстояния до сотен километров и др. Работы в этой области были отмечены Нобелевской премией по физике [14].

Частота интервала между спектральными линиями ЛГОЧ равна частоте повторения фемтосекундных импульсов в непрерывной последовательности  $f_{\text{греб}}$ , которую можно регулировать изменением оптической длины резонатора лазера. Частота каждой линии  $f_n$  характеризуется номером  $n$ , значения которого последовательно возрастают от 1 до  $10^5$ – $10^6$ . Весь спектр ЛГОЧ как целое может перемещаться в пределах частоты  $f_0$ , изменяющейся от 0 до  $f_{\text{греб}}$ . Оно определяется разностью между фазовой скоростью света внутри резонатора лазера на длине волны максимума спектра и групповой скоростью фемтосекундного импульса, т.е. разностью между фазой несущей частоты и максимума огибающей импульса, которая зависит от величины дисперсии групповых скоростей (ДГС) внутри резонатора и может регулироваться. Итак, частота каждой линии ЛГОЧ определяется как  $f_n = n \times f_{\text{греб}} + f_0$ . Замечательно, что обе частоты ( $f_{\text{греб}}$  и  $f_0$ ) лежат в радиодиапазоне, допускают точную и плавную регулировку и измерение с сопоставлением их значений с частотой эталона секунды (цезиевый стандарт). Для того чтобы определить  $n$ , достаточно измерить длину волны, которая соответствует положению линии  $f_n$  с точностью, лучшей, чем величина интервала между

соседними линиями ЛГОЧ. Это можно сделать с помощью стандартных методов спектроскопии. Такой длине волны соответствует частота, близкая к частоте  $f_n$ . Разделив это значение на величину интервала ЛГОЧ  $f_{\text{греб}}$ , получаем значение  $n$ . Частоту  $f_{\text{греб}}$  можно плавно регулировать изменением оптической длины резонатора лазера с помощью пьезоэлектрического толкателя, а затем измерить стандартными методами электроники и зафиксировать нужное значение. Регулировка и измерение частоты  $f_0$  сложнее. Поскольку эта частота зависит от внутрирезонаторной ДГС, её можно регулировать изменением величины ДГС, причём требуется весьма малое, но строго регулируемое изменение. Величина ДГС активной среды лазера зависит от величины инверсной населенности. Поэтому можно реализовать необходимое регулирование точным контролем интенсивности источника накачки лазера (лазерного диода). Точное определение значения величины  $f_0$ , нужного для регулировки, достигается с помощью методики интерферометрического сравнения частот краев ЛГОЧ. Эта довольно сложная методика описана в работе [15]. Она включает генерацию суперконтинуума в микроструктурируемом оптическом волокне с целью расширения спектра ЛГОЧ с превышением октавы. Поскольку в настоящее время существуют прецизионные узкополосные лазеры в оптическом диапазоне (оптические стандарты частоты), стабилизацию ЛГОЧ можно осуществить и с помощью методики сравнения оптических частот [16]. Операции, приводящие к точному определению частот ЛГОЧ, превращают лазерный генератор ЛГОЧ в синтезатор оптических частот с прецизионно точными значениями [17]. Представляется, что такой источник ЛГОЧ — идеальный инструмент калибровки спектрометра. Однако в случае астрономических спектрографов имеется неприятное обстоятельство. Типичные интервалы частот ЛГОЧ на основе широко используемых твердотельных фемтосекундных лазеров на сапфире не превышают 1 ГГц. А для волоконных фемтосекундных лазеров эта величина еще меньше — 250 МГц. Между тем, интервалы разрешения даже самых совершенных астрономических спектрографов составляют не менее нескольких гигагерц. Это значит, что линии ЛГОЧ при регистрации такими спектрографами сольются и не будут разрешены. Требуется преодоление этого недостатка. Это удастся сделать путем фильтрации спектра ЛГОЧ с помощью эталонов Фабри–Перо [18]. Эталон Фабри–Перо обладает 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

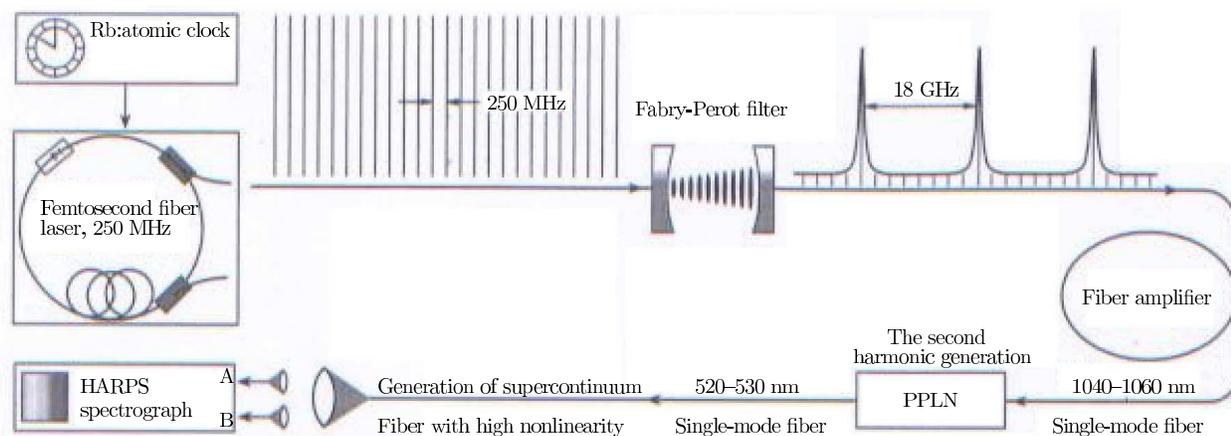


Рис. 4. Схема фемтосекундного калибратора для астрономического спектрографа.

него будут проходить частоты ЛГОЧ с разрежением в  $m$  раз. Толщину эталона можно регулировать так же, как и оптическую длину резонатора лазера, с помощью пьезоэлектрической техники. Ширина линии пропускания эталона определяется коэффициентом отражения зеркал и, соответственно, возможностями технологии. Для нужной степени фильтрации ЛГОЧ приходится использовать последовательно набор двух и даже трёх эталонов. С помощью такой методики удалось преобразовать ЛГОЧ фемтосекундного лазера на сапфире (длина волны примерно 780 нм) с интервалом частоты в 1 ГГц в ЛГОЧ с интервалом частоты вплоть до десятков гигагерц. Это позволяет калибровать астрономические спектрографы высокого разрешения для измерения разностей ЛС с точностью на уровне нескольких сантиметров в секунду [19].

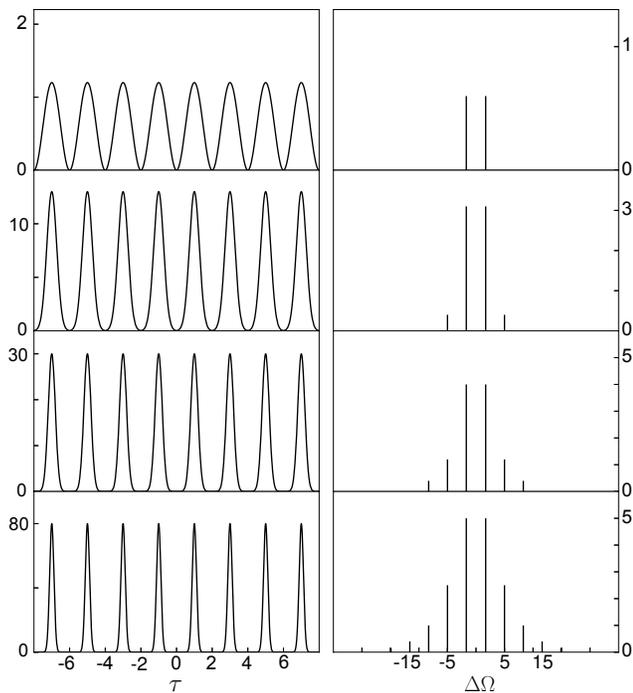
Более эффективным по габаритам, стоимости и эксплуатации, чем лазер на сапфире, является волоконный фемтосекундный лазер (Yb-волокно, длина волны примерно 1550 нм) с частотой повторения импульсов 250 МГц. Он был использован в системе ЛГОЧ [20], предназначенной для калибровки спектрографа HARPS. Схема установки приводится на рис. 4. На основе этой схемы Институтом квантовой оптики (Германия) и фирмой Менло Системс (Германия) был создан прецизионный калибратор астрономических спектрографов, который с успехом прошел испытания на спектрографе HARPS. Был получен замечательный результат — открыта экзопланета в «жизненной зоне» [21]. Были также проведены сравнительные измерения на независимых спектрографах HARPS и FOCES на протяжении шести лет [22], которые показали принципиальную возможность долговременных измерений ЛС с точностью порядка сантиметров в секунду.

Несмотря на эти успехи, следует отметить, что, хотя созданная система позволяет получать точ-

ность калибровки астрономического спектрографа, нужную для измерений разностей ЛС на уровне нескольких сантиметров в секунду, она чрезвычайно сложна. Требуется совершенный фемтосекундный лазер с пьезоэлектрической регулировкой частоты повторения импульсов, стабилизированной по стандарту частоты. Необходима специальная система регулировки положения ЛГОЧ, включающая генерацию суперконтинуума с шириной спектра, превышающей октаву. Наконец, требуется фильтрация ЛГОЧ набором эталонов Фабри-Перо с помощью пьезоэлектрической регулировки. Необходимость механической пьезоэлектрической регулировки представляется большим недостатком. Даже при выполнении указанных требований интервал ЛГОЧ ограничивается приблизительно 20 ГГц, из-за чего эта система годится только для уникальных спектрографов предельно высокого разрешения. Исключительная сложность этой системы калибровки, особенно при сравнении с традиционными методиками, сильно ограничивает ее практическое применение.

### 3.2. Волоконно-оптическая система ЛГОЧ

Кроме использования непрерывного фемтосекундного лазера существуют другие лазерные способы генерации ЛГОЧ, основанные на эффектах нелинейной оптики, в частности, на процессе четырехволнового смешения лазерного излучения в оптическом волокне, обладающем нелинейностью. Этот нелинейный эффект получается при распространении в одномодовом оптическом волокне излучений двух непрерывных одночастотных лазеров с определенным интервалом между их длинами волн и с равными интенсивностями. В результате биения двух оптических частот и при определенных характеристиках оптического волокна (нелинейность и дисперсия), а также



**Рис. 5.** Изменение формы импульса (а) и спектра (б) за счёт нелинейного преобразования при распространении излучения в оптическом волокне, обладающем нелинейностью и аномальной дисперсией.

при определённой интенсивности лазеров излучение преобразуется в регулярную последовательность ультракоротких импульсов в виде оптических солитонов. Этот эффект был продемонстрирован и детально исследован в работах [23, 24], которые проводились с целью получения импульсов ультракороткой длительности в интересах развития волоконно-оптической системы связи. Естественно, что непрерывная последовательность импульсов в виде оптических солитонов имеет соответствующий спектр ЛГОЧ. На рис. 5 показано изменение формы импульсов и спектра при распространении излучения в волокне. Эти результаты были использованы, как подход, основанный на нелинейной волоконной оптике, для генерации ЛГОЧ, предназначенной для калибровки астрономических спектрографов [25]. Важнейшим обстоятельством была возможность использования в этом подходе достижений волоконной оптики в результате развития систем волоконно-оптической связи. Так, оказалось, что стандартное коммуникационное одномодовое волокно типа SFM-28 обладает в диапазоне 1.5 мкм не только (хоть и слабой) нелинейностью, но и аномальной дисперсией, что требуется для реализации исследуемого нелинейного эффекта. Потери в волокне позволяют работать с длинами до километра, что даёт возможность получить эффективное нелинейное преобразование. Нужная интенсивность достигается при

использовании дополнительной секции Ег-волокна с эффективной диодной накачкой. Требуемые узкополосные непрерывные лазеры также получили огромное развитие в работах по волоконно-оптической связи. Нелинейный процесс преобразования с формированием оптических солитонов во времени (с соответствующим спектром в частотной области) описывается обобщённым нелинейным уравнением Шредингера. На основе теоретических исследований можно подобрать длины волокон для оптимальной генерации ЛГОЧ.

В результате получается нелинейная волоконно-оптическая система для генерации ЛГОЧ, принципиальная схема которой показана на рис. 6. Она состоит из двух непрерывных лазеров с равными интенсивностями и частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , причём частота одного  $\omega_1$  строго фиксирована, а частота второго  $\omega_2$  регулируется, так что в результате биений получается синусоидальная последовательность излучения с периодом ЛГОЧ  $|\omega_2 - \omega_1|/2\pi$ . Это излучение распространяется через три секции оптических одномодовых волокон. В первой секции происходит первоначальное преобразование излучения синусоидальной формы в последовательность импульсов с некоторым сжатием. Вторая секция — усиливающее волокно, которое увеличивает интенсивность и эффективность нелинейного процесса, что за счёт последующего сжатия приводит к формированию регулярной последовательности фемтосекундных импульсов с соответствующим спектром. Таким образом, при подборе определённой дисперсии и нелинейности волокна происходит эффективное преобразование синусоидальной последовательности в последовательность импульсов с прогрессирующим сжатием. Наконец, для получения ЛГОЧ, необходимой для астрономического спектрографа, используется третья секция специального волокна с высокой нелинейностью, типа фотонного кристалла для спектрального уширения за счёт генерации суперконтинуума.

Замечательная особенность этого подхода — полное отсутствие систем механического пьезоэлектрического регулирования. В отличие от рассмотренной выше системы не требуется сложный фемтосекундный лазер. Используются два непрерывных узкополосных лазера, важнейшее преимущество которых — получение ЛГОЧ с интервалами до десятков гигагерц по сравнению 18–20 ГГц, являющихся пределом для фемтосекундной системы. Это позволяет работать со спектрографами не самого высокого разрешения. Правда, надо иметь в виду, что увеличение этого интервала весьма непросто. Дело в том, что увеличение интервала соответствует увеличению частоты следования ультракоротких импульсов. Это означает, что при заданной средней

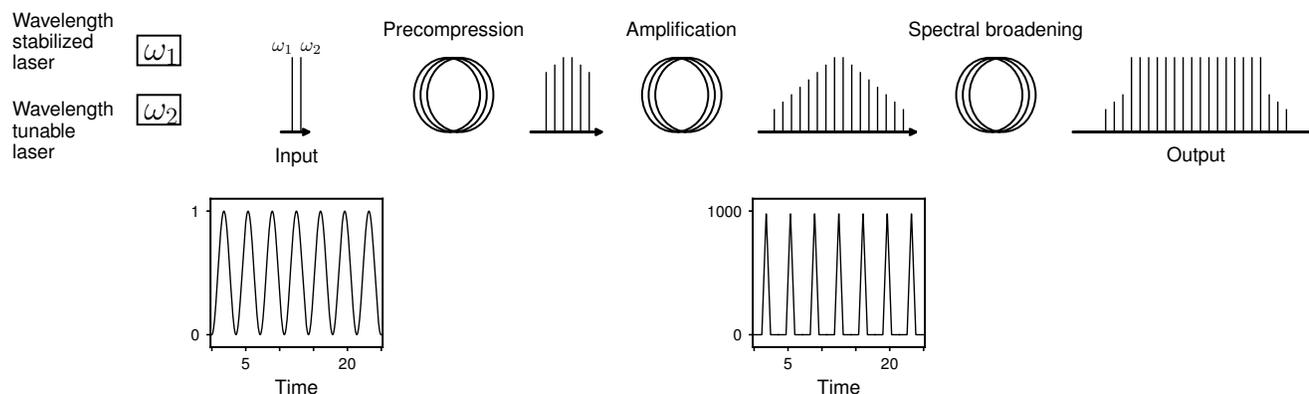


Рис. 6. Схема волоконно-оптического калибратора для астрономического спектрографа.

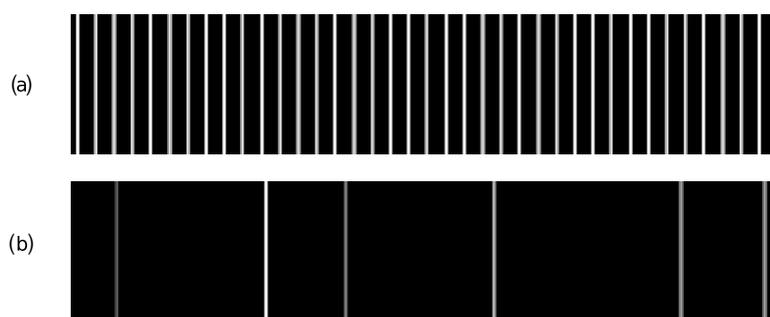


Рис. 7. Спектр линий волоконно-оптического калибратора (а) и для сравнения линии спектральной лампы (б).

мощности лазерного излучения энергия и интенсивность импульса уменьшаются. А это может привести к тому, что требуемый нелинейный процесс просто не состоится. Кроме того, необходимо принимать во внимание различные эффекты ограничения интенсивности, включая опасность повреждения волокна интенсивным излучением и др. Поэтому требуется тщательное экспериментальное исследование по подбору длин волокон и условий накачки усилительного волокна. Эти трудности были преодолены в работе [22], важным результатом которой является существенное увеличение интервала между линиями. На рис. 7 показаны линии волоконно-оптического калибратора и для сравнения — линии спектральной лампы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исключительно важные проблемы астрофизики — поиск экзопланет земного типа, а также прямое измерение динамики Вселенной — исследуются с помощью доплеровской спектроскопии, позволяющей, в принципе, измерять ЛС и их вариации на уровне сантиметров в секунду. Для таких исследований требуются специфические системы

волоконно-оптической связи телескопа со спектрографом. Успехи волоконной оптики и технологии изготовления оптических волокон делают создание этих систем возможным. Также требуются системы прецизионной калибровки спектрографа, обеспечивающие нужную точность измерений на протяжении значительных интервалов времени (вплоть до десятков лет). Традиционные методики не отвечают нужным требованиям. Подходы на основе лазерной физики, нелинейной и волоконной оптики позволяют решить проблему прецизионной калибровки астрономических инструментов путём создания системы лазерного синтезатора оптических частот с исключительно высокой точностью и стабильностью. Подобные задачи решаются при сотрудничестве многих научных организаций различного профиля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Mayor and D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
2. F. Pepe, M. Mayor, G. Rupprecht, et al., *Messenger* **110**, 9 (2002).
3. F. Pepe, P. Molaro, S. Cristiani, et al., *Astronomische Nachrichten* **335**, 8 (2014).
4. L. Pasquini, S. Cristiani, R. García López, et al., *Proc. SPIE* **7735**, 77352F (2010).

5. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
6. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
7. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, and G. G. Valyavin, *Proc. SPIE* **9908**, 99086D (2016).
8. G. Avila and P. Singh, *Proc. SPIE* **7018**, 70184W (2008).
9. T. Feger, A. Brucalassi, F. U. Grupp, et al., *Proc. SPIE* **8446**, 844692 (2012).
10. A. F. Kosolapov, G. K. Alagashev, A. N. Kolyadin, et al., *Quantum Electronics* **46**, 267 (2016).
11. A. D. Pryamikov, A. F. Kosolapov, G. K. Alagashev, et al., *Quantum Electronics* **46**, 1129 (2016).
12. J. Bland-Hawthorn and P. Kern, *Physics Today*, **65**, 31 (2012).
13. S. G. Leon-Saval, C. H. Betters, J. R. Salazar-Gil, et al., *Optics Express* **25**, 17530 (2017).
14. T. W. Hänsch, *Usp. Fiz. Nauk* **176**, 1368 (2006).
15. D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, et al., *Science* **288**, 635 (2000).
16. R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, et al., *Applied Physics B: Lasers and Optics* **31**, 97 (1983).
17. R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch, et al., *Physical Review Letters* **85**, 2264 (2000).
18. T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, et al., *Applied Physics B: Lasers and Optics* **96**, 251 (2009).
19. C.-H. Li, A. J. Benedick, P. Fendel, et al., *Nature* **452**, 610 (2008).
20. T. Wilken, G. L. Curto, R. A. Probst, et al., *Nature* **485**, 611 (2012).
21. G. Anglada-Escudé, P. J. Amado, J. Barnes, et al., *Nature* **536**, 437 (2016).
22. R. A. Probst, G. Lo Curto, G. Ávila, et al., *Proc. SPIE* **9908**, 990864 (2016).
23. E. M. Dianov, P. V. Mamyshev, A. M. Prokhorov, and S. V. Chernikov, *Optics Letters* **14**, 1008 (1989).
24. P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, and E. M. Dianov, *IEEE J. Quantum Electronics* **27**, 2347 (1991).
25. M. Zajnulina, J. M. C. Boggio, M. Böhm, et al., *Applied Physics B: Lasers and Optics* **120**, 171 (2015).

## Methods of Laser, Non-Linear, and Fiber Optics in Studying Fundamental Problems of Astrophysics

P. G. Kryukov

Precise measurements of Doppler shifts of lines in stellar spectra allowing the radial velocity to be measured are an important field of astrophysical studies. A remarkable feature of the Doppler spectroscopy is the possibility to reliably measure quite small variations of the radial velocities (its acceleration, in fact) during long periods of time. Influence of a planet on a star is an example of such a variation. Under the influence of a planet rotating around a star, the latter demonstrates periodic motion manifested in the Doppler shift of the stellar spectrum. Precise measurements of this shift made it possible to indirectly discover planets outside the Solar system (exoplanets). Along with this, searching for Earth-type exoplanets within the habitable zone is an important challenge. For this purpose, accuracy of spectral measurements has to allow one to determine radial velocity variations at the level of centimeters per second during the timespans of about a year. Such measurements on the periods of 10–15 years also would serve as a direct method for determination of assumed acceleration of the Universe expansion. However, the required accuracy of spectroscopic measurements for this exceeds the possibilities of the traditional spectroscopy (an iodine cell, spectral lamps). Methods of radical improvement of possibilities of astronomical Doppler spectroscopy allowing one to attain the required measurement accuracy of Doppler shifts are considered. The issue of precise calibration can be solved through creating a system of a laser optical frequency generator of an exceptionally high accuracy and stability.

Keywords: *techniques: spectroscopic*