УДК 524.3-325.4

Методы определения лучевых скоростей звезд

В.Е. Панчук[1,2], А.Н. Алиев[2], В.Г. Клочкова[1], М.В. Юшкин[1]

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия
[2] Ставропольский государственный университет, г. Ставрополь, Россия

Аннотация. Проведен обзор основных методов определения лучевых скоростей звезд и рассмотрены конструктивные особенности некоторых спектральных систем. Даны основные характеристики спектрографов трех типов (фокуса Кассегрена, фокуса Кудэ и оптоволоконных спектрографов). Оценены ошибки измерения лучевых скоростей, связанные с нестабильностью характеристик аппаратуры. Рассмотрены астрофизические ограничения на точность измерения лучевых скоростей звезд. Изложены принципы применения эталона Фабри-Перо в задаче повышения точности определения лучевых скоростей. Описаны методы абсолютной акселерометрии, как в задаче исследования колебаний солнечной поверхности, так и в задаче астросейсмологии. Приведены сведения о точностях измерения лучевых скоростей на приборах разных типов, оцениваются перспективы повышения точности акселерометрии. Обзор может быть полезен аспирантам и студентам физико-математических факультетов.

Methods for determination of radial velocities of stars

V.E.Panchuk[1,2], A.N.Aliev[2], V.G.Klochkova[1], M.V.Yushkin[1]

[1] Special Astrophysical Observatory RAS, Nighnij Arkhyz, Russia
[2] Stavropol State University, Stavropol, Russia

Abstract. A survey has been conducted of the fundamental techniques for determination of radial velocities of stars, and design features of some spectral systems have been considered. Basic performance characteristics of the spectrographs of three types (Cassegrain focus, Coude focus and fiber spectrographs) are presented. Radial velocity measurement errors caused by the instabilities of the instruments characteristics are estimated. Astrophysical limitations on the radial velocity measurement accuracy of stars are discussed. Principles of applications of the Fabry-Perot etalon to the task of improving the accuracy of determination of radial velocities are started. Methods of absolute accelerometry both in the problem of studying oscillations of the solar surface and in the task of astroseismology are described. Information on the accuracies of radial velocity measurement with facilities of different type is presented, prospectes of improving the accelerometry precision are being evaluated. This survey may be helpful for post-graduates and students of physico - mathematica departments.

1 Введение

Лучевой скоростью V_r называется составляющая вдоль луча зрения от скорости движения объекта относительно наблюдателя. В оптическом диапазоне лучевые скорости измеряются по линейчатым спектрам с использованием продольного эффекта Доплера, заключающегося в смещении спектральных линий на величину, пропорциональную лучевой скорости. Например, вследствие обращения Земли вокруг Солнца, периодическое смещение линий в зеленой области спектра звезды достигает величины 0.5 Å. Измерение компоненты скорости движения звезды но лучу зрения — одно из наиболее значительных достижений астрономической спектроскопии. Методика этих измерений была доведена до высокой степени совершенства еще в начале XX века, и с тех пор неизменно обновляется по мере внедрения новых фотоэлектронных и оптических технологий.

Задача определения величины доплеровского смещения спектральных линий сформулирована в астрономической спектроскопии одной из первых. Изучение лучевых скоростей является ключевым в различных астрономических и астрофизических направлениях. Измеряя собственные движения близких звезд и лучевые скорости достаточно далеких объектов в Галактике, можно получить представление о крупномасштабных движениях в различных направлениях от Солнца, т. е. о динамике всей Галактики. Измерение лучевых скоростей позволяет обнаружить дифференциальное вращение Галактики и изучить его особенности. По кривой вращения или по дисперсии скоростей возможны оценки массы Галактики. Большую роль играет измерение лучевых скоростей при изучении спектрально-двойных звезд. Для них возможно построить зависимость лучевой скорости от времени (кривая лучевых скоростей), что позволяет определить элементы орбиты и характеристики звезд. Удается найти не только размеры и формы звезд, но даже их массу (точнее, функцию масс). Развитие техники спектроскопического исследования двойных звезд привело к повышению точности измерения лучевых скоростей и, в итоге, к обнаружению маломассивных спутников вблизи нескольких десятков звезд. Пока эти спутники отождествляются с коричневыми карликами или с планетами типа Юпитера. Изучение вариаций лучевых скоростей позволило подтвердить гипотезу о пульсациях звездных оболочек. Кроме основных типов пульсирующих звезд (классических цефеид, мирид, короткопериодических переменных типа RR Лиры, δ Щита), методом измерения лучевых скоростей исследованы представители группы звезд с непериодическими изменениями блеска. Повышение точности измерения лучевых скоростей позволило приступить к изучению феномена нерадиальных пульсаций на высоких частотах, что открывает возможность "астросейсмического" зондирования внутренней структуры звезд. Измерение лучевых скоростей по отдельным линиям в сочетании с информацией об эффективных глубинах формирования линий в звездной атмосфере, позволяет исследовать разнообразные феномены потери вещества звездными атмосферами. Таким образом, например, исследуются механизмы взаимодействия звезд с межзвездной средой. В частности, были выявлены отклонения от симметричной картины такого взаимодействия.

Точность измерения лучевой скорости зависит от большого числа факторов: диаметра и фокуса используемого телескопа, конструкции спектрального прибора, типа светоприемника, уровня накопленного сигнала, техники калибровки регистрирующей системы (спектрограф и светоприемник), метода обработки сигнала. Поэтому определенное внимание уделяем ниже описанию перечисленных компонент процесса определения лучевой скорости. Вначале описана техника определения лучевых скоростей на спектрографах первого поколения, ориентированных на фотографическую регистрацию спектра. Затем перечислены основные типы фотоэлектрических светоприемников, используемых для измерения лучевых скоростей в оптическом диапазоне. Даны примеры спектральных приборов, использующих различные фотоэлектрические приемники. Приведены некоторые результаты исследований позиционных характеристик спектрографов и обработки эшелле-спектрограмм. Перечислены астрофизические эффекты, затрудняющие измерения лучевых скоростей движения центров звезд. Рассмотрены некоторые перспективные методы высокоточных определений лучевых скоростей и соответствующие конструктивные решения.

Предварительно отметим свойства процесса измерения лучевых скоростей звезд, общие для большинства методов. Структура электронных оболочек атомов такова, что большинство линий расположено в ультрафиолетовой и синей областях спектра. Оптимальным для измерения лучевых скоростей звезд является видимый диапазон (400-600 нм). На более коротких длинах волн число абсорбционных линий в спектрах звезд солнечного типа настолько велико, что перекрывающиеся линии существенно блокируют излучение фотосферы звезды. Кроме того, на ультрафиолетовой границе окна атмосферной прозрачности к спектру звезды подмешиваются линии, формирующиеся в земной атмосфере (например линии молекулы озона). В более длинноволновом участке, начиная с 680 нм, атомные линии редки, и на спектр звезды накладываются линии поглощения газовой компоненты земной атмосферы (теллурический спектр), показывающие скорость, практически совпадающую со скоростью движения точки наблюдателя. Поэтому ниже ограничимся вопросами техники измерения лучевых скоростей звезд в видимом диапазоне спектра. Основные компоненты астрономического спектрографа (щель, коллиматор, диспергирующий узел, камерный объектив, светоприемник) такие же, как и у лабораторного спектрографа, но существует ряд особенностей. Во-первых, астрономический спектрограф кроме задачи формирования и регистрации спектра, решает задачу согласования масштаба изображения звезды (на входе спектрографа) с величиной элемента разрешения светоприемника (на выходе спектрографа). В подавляющем большинстве случаев спектрограф существенно уменьшает изображение входной щели, т. е. фокусное расстояние коллиматора $\mathrm{F_{coll}}$ должно превышать фокусное расстояние камеры $\mathrm{F_{cam}}$. Это обстоятельство было понято не сразу, и конструктивно учитывается с конца 20-х годов XX века. Во-вторых, в астроспектроскопии стоимость конструкции осветительной системы спектрографа (т. е. телескопа) выше стоимости собственно спектрографа, поэтому время жизни спектрографа намного меньше времени жизни телескопа (это правило уже срабатывает даже для орбитальных систем). В итоге ряд астрономических объектов исследуется при помощи разнообразной совокупности спектрографов, что выдвигает определенные требования к процессу калибровки (стандартизации) наблюдений. Но основным отличительным признаком является недостаточный поток излучения на входе астрономического спектрографа, что отражается как на конструкции прибора, так и на продолжительности накопления сигнала. С точки зрения задачи измерения лучевых скоростей, это обстоятельство приводит к проблеме сохранения стабильности спектрографа в течение длительного времени, к проблеме сохранения свойств аппаратной функции спектрографа по всему полю светосильной камеры, уменьшающей масштаб изображения, а также к проблеме учета движения точки наблюдения в течение экспозиции.

2 Фотографическая эпоха определений лучевых скоростей

Смещение линий в спектре звезды стало первой характеристикой, получившей количественную физическую интерпретацию (теории, количественно объясняющие интенсивности линий, появились в результате становления атомной физики, разработки теории переноса излучения и выявления основных источников непрозрачности в звездной атмосфере). Фотографическим определениям предшествовали попытки визуальных измерений лучевой скорости. Вслед за пионерами спектроскопического метода, ряд исследователей пытались применить эффект Доплера к измерению скоростей движения звезд. Их усилия не увенчались успехом, так как задача была принципиально ограничена разрешающей способностью зрения. Килер (1894), наблюдавший визуально на 36-дюймовом рефракторе Ликской обсерватории, измерил лучевые скорости самых ярких звезд: Альдебарана, Арктура и Бетельгейзе. Метод сразу устарел благодаря появлению фотографии. После экспериментов Дрэпера (1877) фотографическая регистрация звездных спектров стала входить в практику астрономов, открывая путь становления и развития методики измерения доплеровских смещений. Измерение лучевых скоростей звезд — трудная задача из-за малости доплеровских смещений. При величине обратной линейной дисперсии около 40 Å/мм смещению спектральной линии на 0.1 мм соответствует значение лучевой скорости около 290 км/с. Лучевые скорости звезд обычно составляют около десятой доли этой величины, поэтому на фотографической пластинке измерения должны были производиться с точностью до нескольких микрон. Фотографический период измерения лучевых скоростей позволил сформулировать и решить ряд технических проблем, которые можно объединить терминами "тождественность заполнения оптики спектрографа" и "стабильность аппаратной функции". Фундаментальная задача состоит в том, чтобы система длин волн, определенная по линиям спектра сравнения, была бы применимой и для спектра звезды. Осветительная система источника спектра сравнения конструктивно отличается от оптики телескопа, служащей осветительной системой при регистрации спектра исследуемой звезды. В обоих пучках с точностью до тысячных долей ангстрема должно выполняться "тождество источника", суть которого состоит в том, что оптика спектрографа должна идентично заполняться светом от источника калибровки и светом от звезды. Это условие предъявляет строгие требования к оптико-механическим свойствам конструкций телескопа и спектрографа. Подвесной спектрограф не должен иметь больших гнутий относительно оптической оси телескопа при различных положениях телескопа, иначе при различных эволюциях телескопа будет изменяться характер заполнения коллиматора, т. е. будет нарушаться условие тождества источника. Спектрограф фокуса Кудэ, свободный от гнутий, также подвержен эффектам нарушения тождества источника, но уже из-за неидеальной юстировки перебрасывающей оптики. Из-за низкой чувствительности фотоэмульсий экспозиции звездных спектров были достаточно большими, поэтому именно в эпоху фотографических методов измерения лучевых скоростей, были решены проблемы систем крепления подвесных спектрографов, способов крепления оптических деталей, систем термической стабилизации спектрографов. Действие аберраций оптики спектрографа на изображения эмиссий спектра сравнения и абсорбционных линий на фоне непрерывного спектра звезды неодинаково, что также может привести к смещению изображения линий спектра сравнения относительно линий поглощения в спектре звезды. Поэтому наряду с проблемой стабильности аппаратной функции решался вопрос ее качества. Вначале измерения лучевых скоростей проводились на призменных спектрографах. Появление эффективных отражательных решеток с профилированным штрихом и изобретение камеры Шмидта привели к тому, что во второй половине XX века призменные спектрографы вышли из употребления.

Техника измерений фотографических спектрограмм определялась присутствием личных ошибок (измеритель субъективно совмещал центр фотографического изображения спектральной линии с изображением нити измерительного микроскопа), большим объемом вычислений, производимых вручную, и необходимостью термостабилизации измерительныых устройств. От значительной части вычислений, связанных с "редукцией фотопластинки", удалось избавиться после изобретения спектрокомпаратора, где доплеровские смещения измерялись путем сравнения (в поле зрения микроскопа) спектрограммы, подлежащей измерению, со стандартной спектрограммой с известной лучевой скоростью. Эффективность массовых фотографических определений лучевых скоростей возросла после переделки измерительных машин в проекционные системы (Петри и Гирлинг, 1948). Проекционный компаратор являлся высокопроизводительным прибором, когда требовалось измерить большое число одинаковых (по дисперсии, диапазону, спектральному классу), спектрограмм. Распространение спектрографов фокуса Кудэ позволило перейти к исследованию эффектов, связанных с малыми значениями скорости. Уточнение лабораторных длин волн не решает проблемы измерения малых скоростей по линиям, профили которых могут быть искажены эффектами слабого блендирования или асимметрией, возникающей вследствие конвекции в звездной атмосфере. Потребовалось построить системы эффективных длин волн линий в спектрах звезд разных классов.

2.1 Спектрографы с фотографической регистрацией

История создания и развития астрономических спектрографов с фотографической регистрацией насчитывает около 3/4 века, т. е. является наиболее продолжительной. Так как совершенствование астрономических фотоэмульсий в большинстве случаев не приводило к необходимости изменять конструкцию спектрографа, в фотографическую эпоху выделились спектрографы-долгожители, время использования некоторых из них приближалось ко времени жизни телескопа. Некоторые из этих приборов были затем переоборудованы в системы с фотоэлектрической регистрацией. В качестве стационарных спектрографов рассмотрим семейство спектрографов фокуса Кудэ, в качестве подвесных спектрографов — семейство спектрографов фокуса Кассегрена.

2.1.1 Спектрографы фокуса Кудэ

Начало истории дифракционных спектрографов фокуса Кудэ положено успехами технологии изготовления крупных дифракционных решеток, конец — успехами технологии изготовления крупногабаритных эшелле и появлением оптоволоконных решений. В табл. 1 приведены диаметры коллимированных пучков дифракционных спектрографов фокуса Кудэ.

Таблица 1: Диаметр коллимированного пучка d спектрографов фокуса Кудэ на телескопах с диаметром главного зеркала D (все размеры даны в мм.) Указан год ввода в эксплуатацию

Год	D	d	Обсерватория
1935	2500	110	Маунт Вилсон
1949	2050	100	МакДональд
1952	5080	304	Маунт Паломар
1956	2500	152	Маунт Вилсон
1959	1930	150	Верхний Прованс
1961	3000	165	Лик
1962	2100	220	Китт-Пик
1967	2600	280	Крымская АО
1968	2000	150	Таутенбург
1969	1520	150	ЕЮО
1969	2750	200	МакДональд
1970	2000	150	Шемаха
1971	1880	200	Маунт Стромло
1971	400	100	Канопус Хилл
1975	2200	300	Калар Альто, MPI
1977	2200	200	Гавайи
1981	3600	300	CFHT

Первый спектрограф фокуса Кудэ 2.5-м телескопа обсерватории Маунт Вилсон, использующий дифракционную решетку, появился при замене призмы на дифракционную решетку (1931 г.) в автоколлимационной схеме с объективом, имеющим фокусное расстояние 2.7 м.

Это привело к открытию Данхэмом межзвездных линий ионизованного титана. Были проведены также эксперименты с 4.5-м вогнутой решеткой. Работы Р. Вуда по совершенствованию технологии изготовления дифракционных решеток (с длиной заштрихованной части до 20 см) и изобретение камеры Шмидта позволили принципиально изменить облик кудэ-спектрографа. Зеркальный коллиматор с фокусным расстоянием 457 см формировал пучок, заполняющий дифракционную решетку размерами $15 \times 15\,\text{см}^2$, 787 штр/мм. В зависимости от угла наклона решетки диспергированные пучки направлялись либо на длиннофокусную камеру ($\mathrm{F} = 290$ см), либо на одну из камер Шмидта ($\mathrm{F} = 185$ см и $\mathrm{F} = 81$ см), вводимых в пучок поочередно. Значения обратной линейной дисперсии составляли 2.9, 4.5 и 10.4 Å/мм во втором порядке у 4000 Å. На длиннофокусной камере было впервые достигнуто разрешение $\mathrm{R} = 100000$. Из табл. 1 видно, что при переходе от 2.5-м к 5-м рефлектору диаметр коллимированного пучка кудэ-спектрографа увеличился вдвое, а на Ликском 3-м телескопе и 1.9-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса значения d снова вернулись к типичному для 2.5-м телескопа. Здесь наглядно проиллюстрировано действие принципа широкощельности, которым руководствуются астрономы при создании дифракционных спектрографов. Приведем некоторые цифры. Масштаб изображения звезды в фокусе Кудэ 2.5-м телескопа составляет 1 угл. с на 0.4 мм. Для того, чтобы коллиматор с относительным отверстием 1/30 заполнил решетку с длиной штриха 15 см, его фокусное расстояние сделано равным 457 см. Следовательно, если наблюдатель желает использовать все изображение диска звезды, то на камерах с фокусными расстояниями 290, 185 и 81 см ширины монохроматических изображений щели составят 0.25, 0.16 и 0.07 мм. Предел спектрального разрешения упомянутой 15-сантиметровой решетки, работающей в первом порядке, составляет 120000 и для того, чтобы реализовать такое разрешение, следует существенно сузить входную щель, оставив на щечках щели большую часть собранного телескопом света. Использовать при этом короткофокусные камеры спектрографа нельзя, т. к. ширина монохроматических изображений щели в этом случае будет меньше линейного разрешения фотоэмульсии. При переходе на 5-м телескоп масштаб изображений в фокусе Кудэ возрастает вдвое, т. е. до 1 угл. с на 0.8 мм. Поэтому, если астроном желает остаться в той же ситуации по уровню потерь света на щели, что и на 2.5-м телескопе, он должен использовать спектрограф с коллимированным пучком вдвое большего диаметра. Соответственно должны возрасти и размеры дифракционной решетки. Приведем пример точности определения лучевых скоростей методами фотографической регистрации. Спектрограф в фокусе Кудэ 2.5-м телескопа, с привязкой по теллурическим линиям молекулярного кислорода, ошибка измерения лучевой скорости Арктура составила 50 м/с, Проциона — 60 м/с при экспозициях от 1 до 6 часов (Гриффин и Гриффин, 1973а,б). Это предельная точность, реализованная для самых ярких звезд. При смене типа светоприемника: переход с фотопластинок на электроннооптические преобразователи (ЭОП), на фотоумножители, на телевизионные счетные системы и на матрицы приборов зарядовой связи (ПЗС) — часть кудэ-спектрографов была переоборудована, а часть была заменена другими приборами. Например, вместо кассетной части длиннофокусной камеры кудэ спектрографа 5-м телескопа был установлен фотоэлектрический прибор для кросс-корреляционного измерения лучевых скоростей (Гриффин и Ганн, 1974). К недостаткам схемы кудэ отнесем высокие потери на вспомогательных плоских зеркалах (от 2 до 5 плоских зеркал, в зависимости от схемы монтировки телескопа). На трех телескопах 3-4-метрового класса кудэ-спектрографы были заменены впоследствии на системы кудэ-эшелле. Приведем пример точности определения лучевой скорости. Hamilton'овский кудэ-эшелле-спектрограф 3-м Ликского телескопа, опорный спектр формировался абсорбционной йодной ячейкой, при экспозиции 5 минут, для звезды $\mathrm{m_V} = 4.5$ точность $\delta\mathrm{V} = 25$ м/с сохранялась на шкале 1.2 года (Марси и Батлер, 1992). Итак, переход от фотопластинок к матрицам ПЗС обеспечил выигрыш приблизительно на 7-8 звездных величин, без заметного увеличения точности определения лучевой скорости.

2.1.2 Спектрографы фокуса Кассегрена

Относительное отверстие телескопа системы Кассегрена составляет 1:8 ÷ 1:14. Поэтому в большинстве случаев, когда оптическая ось коллиматора продолжает главную оптическую ось телескопа среднего диаметра, диаметр коллимированного пучка не превосходит 70 мм (иначе значительная длина коллиматора приводит к заметной нежесткости конструкции спектрографа). Относительное отверстие камеры спектрографа должно быть около 1:2, при этом удается согласовать масштаб изображения звезды в плоскости светоприемника с удвоенной шириной элемента разрешения. При увеличении диаметра зеркала телескопа D, должен пропорционально возрастать диаметр коллимированного пучка d, на крупных телескопах он достигает 150 мм. Кассегреновские спектрографы не столь материалоемкие, как спектрографы фокуса Кудэ, поэтому под новые светоприемники создавались, как правило, и новые конструкции. В табл. 2 приведены основные характеристики избранных кассегреновских спектрографов крупных телескопов. Соотношение параметров спектрографа и светоприемника таково, что при одном значении рабочего угла дифракционной решетки не удается зарегистрировать участок спектра более чем 100–150 нм. Поэтому получили распространение двухлучевые системы, т. е. двойные спектрографы, предназначенные для одновременной регистрации, например синего и красного диапазонов. Свет, попадающий в спектрограф, разделяется светоделителем на два канала — “синий” и “красный”. В этом случае в таблице указаны фокусные расстояния камер в обоих каналах.

Таблица 2: Фокусные расстояния камер F_{cam}, диаметр коллимированного пучка d кассегреновских спектрографов на телескопах с диаметром главного зеркала D (все размеры даны в мм)

D	d	F_{cam}	Спектрограф
2000	75	150	UAGS
2200	90	140	Boller & Chivens
5080	146	229/152	5m Hale, double
3900	150	250/820	AAT, RGO
2500		235/500	INT, double IDS
4200	150	500/500	WHT, double + FORS

Во второй половине 60-х годов фирмой “Карл Цейсс Йена” для фокуса Кассегрена 1–2-м рефлекторов был разработан универсальный астрономический щелевой спектрограф (UAGS), а также его модификация для первичного фокуса. Диаметр коллимированного пучка составляет 75 мм, спектрограф оснащался комплектом дифракционных решеток, относительное отверстие коллиматора могло быть изменено от F/3 до F/18. Комплект камер Шмидта F = 175, F = 110 и F = 65 мм, используемых для фотографической регистрации, мог быть дополнен камерой Шмидта/Кассегрена F = 150 мм. Сочетание этой камеры с электроннооптическим преобразователем, со счетчиками фотонов и матрицами ПЗС (Афанасьев, 1990), позволило, например, выполнить основной объем спектроскопических исследований слабых объектов на 6-м телескопе в течение первых 20-ти лет наблюдений. С целью использования малоформатных матриц ПЗС камеры с внутренним фокусом переоборудовались либо в системы “ломаный Шмидт” (F = 175 мм), либо матрица встраивалась во внутренний фокус (F = 110 мм). Таким образом, спектрографы серии UAGS и их отдельные узлы использовались в САО РАН на протяжении более 30 лет как для наблюдений в фокусах Кассегрена 0.6 и 1-м телескопов, так и для наблюдений в первичном фокусе БТА. На "западных" телескопах подобную роль выполняет спектрограф фирмы Boller & Chivens. Остальные спектрографы, перечисленные в таблице, уже изначально проектировались под применение фотоэлектрических приемников.

Развитие технологии высокоэффективных отражающих и просветляющих покрытий позволило перейти к внедрению двухлучевых схем, т. е. к созданию двойного спектрографа, каждая ветвь которого оптимизирована под работу в избранном диапазоне длин волн. Основной проблемой, решаемой при конструировании светосильных камер спектрографов, является обеспечение во всем рабочем диапазоне длин волн кружка рассеяния, размеры которого согласованы с элементом разрешения светоприемника. Понятно, что разделение всего диапазона на две части упрощает задачу создания камеры для каждой ветви спектрографа. Облегчается и задача изготовления высокоэффективных покрытий оптических поверхностей, и пропускание каждой ветви возрастает. Кроме того, в каждой из ветвей может быть установлен светоприемник, оптимальный для работы в данном диапазоне. Впервые задача создания двойного спектрографа была решена Оуком и Ганном (1982) для фокуса Кассегрена 5-м телескопа Хэйла. Параметры коллиматоров "синей" (320 – 520 нм) и "красной" (520–1000 нм) ветвей коллиматоров, выполненных по схеме "обратный Кассегрен с линзой поля", позволяли проводить спектроскопию протяженных объектов (длина щели соответствует 1 угл. минуте). Дихроический светоделитель работал в расходящемся (F/15.7) пучке. Комплект решеток с размерами заштрихованной части 154×206 мм позволял работать с разрешением $\mathrm{R} = 1000 - 7500$. Камеры обеих ветвей выполнены по схеме "ломаный Шмидт", но фокусные расстояния различны. Эффективность телескопа, спектрографа и светоприемников (без учета потерь на щели) составляла около 10%.

Точность определения лучевых скоростей на кассегреновских спектрографах определяется их нежесткостью, что приводит к деколлимации оптической схемы спектрографа и, в итоге, к смещениям спектра на 0.5–2 элемента разрешения. Точность измерения лучевых скоростей стационарных спектрографов фокуса Кудэ определяется нежесткостью оптической схемы телескопа (если другие инструментальные эффекты, присущие собственно спектрографу, подавлены).

Существенным шагом в развитии кассегреновских спектрографов явилось изобретение эшелле – дифракционной решетки с большим углом блеска. Такая решетка оптимизирована для работы в высоких порядках дифракции, каждый из которых невозможно выделить при помощи порядкоразделительного фильтра. Поэтому для пространственного разведения дифракционных эшелле-порядков используется дополнительный диспергирующий элемент (призма или решетка, работающая в низких порядках дифракции), вектор дисперсии которого ориентирован в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии эшелле. С точки зрения обеспечения заданного спектрального разрешения применение эшелле-спектрографа в фокусе Кассегрена эквивалентно применению классического спектрографа в фокусе Кудэ, но во втором случае потери света выше. Первый в мире звездный спектрограф с первой отечественной эшелле был построен в фокусе Кудэ (Копылов и Стешенко, 1965), причем в дневное время эшелле использовалась в солнечном спектрографе КрАО (Северный и др., 1960).

Кассегреновские эшелле-спектрографы с фотографической регистрацией оказались достаточно популярными (верхняя половина табл. 3). Объясняется это удачной адаптацией схемы Черни-Тернера (Шредер, 1967, Шредер и Андерсон, 1971), в которой аберрации исправлены по большому полю камеры. Компенсация астигматизма возможна при определенных соотношениях углов схемы, относительных отверстий и фокусных расстояний камеры и коллиматора, поэтому данная схема пригодна только для телескопов диаметром менее 1 м, где можно ограничиться зеркальной камерой умеренной светосилы. При достаточно скромных размерах диаметра коллимированного пучка спектральное разрешение не отличалось от такового в классическом кудэ-спектрографе, габариты оптики спектрографа определяли на порядок более низкую стоимость прибора, потери света на оптике телескопа были ниже, и в середине 70-х классическая кудэ-спектроскопия была названа “астрономическим эквивалентом коляски для больных” (Крафт, 1978). Стартовавшие со скромного диаметра коллимированного пучка кассегреновские спектрографы дошли до рубежа d = 150 мм. В табл. 3 приведены основные параметры кассегреновских эшелле-спектрографов. Некоторые из этих спектрографов впоследствии были переоснащены фотоэлектронными светоприемниками (ЭОПы, линейки и матрицы ПЗС), формат которых не обеспечивал регистрацию всего эшелле-спектра. В нижней части табл. 3 приведены параметры спектрографов, изначально разработанных под матрицы ПЗС.

Таблица 3: Параметры эшелле-спектрографов фокуса Кассегрена. D — диаметр главного зеркала телескопа, d — диаметр коллимированного пучка, tg — тангенс угла блеска эшелле, gr/mm — плотность штрихов эшелле, Cross — тип кроссдисперсера и последовательность расположения относительно эшелле, F_{cam} — фокусное расстояние камеры, R — спектральное разрешение. Все размеры даны в мм. Указан год ввода в эксплуатацию

Год	D	d	tg	gr/mm	Cross	F_{cam}	R	
1971	900	55	2	73.5	gr/ech	750	30000	Pine Bluff
1973	1500	56	2	31.6	gr/ech	750	180000	Mt Hopkins Whipple
1975	2300	76		180	60prizm			Steward
1975	1500		2	79	gr/ech		34000	Oak Ridge, Harvard
1975	4000	130	2	31-79	gr/ech	590	80000	KPNO, CTIO
1976	910	50	2	79	45prizm	750	40000	Johns Hopkins
1977	610	90	2	79	gr/ech	750	54000	Mt John U Obs.
1977	1880	108	2	316	prizm	1624	117000	QUBES+Kottamia
1980	1000		2	79	gr/ech		30000	Siding Spring
1982	1500	83	2	79	gr/ech	204	22000	Vienna Univ. Figl Obs.
1982	1530	50	3.2	79.1	filter	760	160000	Arizona Univ LPL
1982	3600	150	2	31-79	gr/ech	560	30000	CASPEC
1984	3900	100	2	31.6	grizm	800	100000	Manchester
1985	1600		2	79	dpprizm		12000	Penn State Obs.
1986	1220		2	79	gr/ech		50000	Osmania Univ, Hyderabad
1990	3500	90	0.4	100	prizm	140	3500	Calar Alto
1991	2560	128	2	79	prizm	2000	170000	SOFIN
1991	2100	148	2	23.2	40dp	777	60000	McDonald, Sandiford
1991	2500	110	2	316	filter	901	100000	IACUB
	8000	160	2		prizms	500	50000	HROS Gemini

Точность определения лучевых скоростей на кассегреновских эшелле-спектрографах в среднем выше на величину отношения тангенсов угла блеска эшелле и дифракционной решетки низких порядков и ограничивается гнутиями инструмента. Однако при фотографической регистрации методу были доступны только самые яркие звезды.

2.1.3 Основной звездный спектрограф БТА

ОЗСП БТА (Васильев и др., 1977) смонтирован во вторичном фокусе телескопа и был предназначен для фотографической регистрации спектров ярких звезд. Условия эксплуатации спектрографов фокуса Нэсмита соответствуют состоянию, промежуточному между условиями эксплуатации подвесного кассегреновского спектрографа (изменение как азимута, так и зенитного расстояния для основной оси спектрографа), и условиями эксплуатации спектрографа фокуса Кудэ (неизменное положение основных осей спектрографа). В случае ОЗСП изменяется только ориентация осей по азимуту, поэтому точности измерения лучевых скоростей, казалось, должны были занимать промежуточное положение между случаями кассегреновского спектрографа и спектрографа фокуса Кудэ. Однако практика показала, что спектральное разрешение, теоретически реализуемое на длиннофокусной камере ($F = 3100$ мм), в несколько раз снижалось из-за нежесткости конструкции и турбуленции воздуха в объеме четырехэтажного спектрографа. Систематические сдвиги линий, уверенно наблюдаемые на этой камере, проявлялись и на камере $F = 605$ мм, приблизительно в пятикратно уменьшенном масштабе, что позволило сделать вывод об основном источнике нестабильности. Возникающие при этом ошибки определения лучевых скоростей по фотографическим спектрам при работе с камерой $F = 605$ мм составляли 2 – 3 км/с, и могли быть понижены до 1 – 2 км/с путем частых позиционных калибровок. В 1990 году ОЗСП был оснащен матрицей ПЗС (Панчук, 2001). За счет мер по изменению теплового режима объема ОЗСП и сокращения среднего времени экспозиции точности определения лучевых скоростей удалось довести до 1 км/с. На спектрографе удалось регистрировать абсорбционные спектры ярких квазаров (Варшалович и др., 1996).

3 Определение лучевых скоростей с фотоэлектрической регистрацией

Массовое определение лучевых скоростей фотографическим методом оказалось весьма трудоемким и “подслеповатым” – удавалось изучать относительно близкие звезды. Развитие представлений о динамической эволюции Галактики потребовало изучения ее удаленных областей, недоступных фотографическому методу. Были и другие мотивы применения новых систем регистрации для измерения лучевых скоростей (необходимость изучать относительно быстрые процессы, необходимость исследования слабых объектов новой природы). На первых этапах новые типы светоприемников применялись на реконструированных старых спектрографах. Поэтому вначале перечислим основные типы светоприемников, используемых для определения лучевых скоростей.

3.1 Типы светоприемников

В данном разделе мы не претендуем на полноту изложения, обращая внимание на те свойства светоприемников, которые существенны в задаче измерения лучевых скоростей.

3.1.1 Фотоэлектронный умножитель

Для усиления слабых электронных потоков может быть использовано явление вторичной электронной эмиссии. Эта идея положена в основу фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), содержащего кроме фотокатода и анода несколько промежуточных электродов, являющихся эмиттерами вторичных электронов. Точность определения лучевых скоростей звезд зависит, главным образом, от величины инструментальных эффектов. Если влияние инструментальных эффектов в значительной степени снижено, то на первый план выступают характеристики светоприемника (например квантовая эффективность, спектральная чувствительноть, и, главное, фотонный шум). Темновой ток ФЭУ можно разделить на составляющие: а) термоток с фотокатода, усиленный умножающей системой, а также термотоки с динодов, усиливаемые с тем меньшим коэффициентом, чем больше номер динода (поэтому основной вклад вносит термоэмиссия первого динода); б) токи утечки между электродами ФЭУ; в) ток автоэлектронной эмиссии с динодов и других электродов.

При надлежащем выборе конструкции, технологии изготовления и режима эксплуатации ФЭУ величина темнового тока может быть существенно понижена. Однако темновой ток, определяемый термоэлектронной эмиссией, принципиально не может быть исключен полностью, и минимальная величина темнового тока ФЭУ определяется термоэлектронной эмиссией фотокатода, усиленной динодной системой. Квантовая эффективность лучших образцов ФЭУ составляет 20-30% в максимуме кривой спектральной чувствительности. Для повышения эффективности использовались специальные оптические схемы (Оук, 1969). Относительно высокая чувствительность ФЭУ в сочетании с принципом мультиплексности (см. раздел 3.2.2) обеспечила в течение двух десятилетий лидирующие позиции этого одноканального светоприемника в задачах массовых определений лучевых скоростей звезд.

3.1.2 Электроннооптические преобразователи

Электроннооптический преобразователь (ЭОП) — особая разновидность вакуумного фотоэлемента, предназначенная для преобразования и усиления оптических изображений (Щеглов, 1963). Основные элементы ЭОПа сосредоточены в цилиндрической колбе, где создан вакуум и на торцах которой нанесены с внутренней стороны полупрозрачный фотокатод и флуоресцирующий экран. Внутри колбы смонтированы электроды электронной оптики, между катодом и экраном ЭОПа приложено ускоряющее напряжение. Система электрических или (и) магнитных полей заставляет покинувшие фотокатод электроны двигаться таким образом, что все электроны из любой точки фотокатода фокусируются, вне зависимости от векторов начальных скоростей, в определенной точке экрана. Магнитная фокусировка обеспечивает сравнительно большой (по сравнению с электростатической фокусировкой) размер рабочего поля. Величина постоянного тока, пропускаемого через соленоид, должна поддерживаться с большой точностью. ЭОП с магнитной фокусировкой является "нежестким" светоприемником, на положение спектра влияет не только нестабильность фокусирующей системы, но и ориентация соленоида относительно вектора магнитного поля Земли. Экран ЭОПа излучает изотропно, оптика, перебрасывающая изображение с экрана на фотоэмульсию, собирает лишь долю света, испускаемого экраном, и фотоэмульсии обычно достигает несколько процентов излучения экрана. В видимой области спектра такой ЭОП дает незначительный выигрыш в чувствительности по сравнению с фотоэмульсиями, поэтому применение нашли многокаскадные ЭОПы. Многокаскадные ЭОПы с фотографической регистрацией применялись для исследования лучевых скоростей слабых объектов, преимущественно внегалактической природы (см. например Афанасьев, 1990). В таких задачах не требуется точность лучше, чем 30 – 50 км/с. ЭОП с фотографической регистрацией способен зарегистрировать слабый объект в том случае, если этот объект можно различить над фоном темнового свечения экрана, т. е. из-за темнового свечения экрана применение ЭОПов не увеличивает контраст изображения. Темновой фон ЭОПа частично объясняется термоионной эмиссией фотокатода. Проблема сохранения контраста изображения была решена путем интегрирования ЭОПов в цифровые системы счета фотоэлектронных событий.

3.1.3 Телевизионные системы счета фотонов

Принцип счета фотонных событий при помощи телевизионной мишени как промежуточного запоминающего устройства, был внедрен в астрономическую практику более 30 лет назад (Боксенберг и Барджесс, 1973). В телевизионном спектрофотометре усилителем светового потока перед телевизионной трубкой является ЭОП. Изображение с люминесцентного экрана ЭОПа переносится на фотокатод телевизионной трубки с помощью объектива. Телевизионная трубка работает как однокадровый буфер, запоминающий все вспышки, пришедшие за время накопления кадра. Предельная проницающая способность прибора ограничивается не его собственными шумами, а фоном неба и диаметром изображений звезд. Значительное влияние на стабильность системы оказывает магнитное поле Земли: так, при изменении азимута телескопа на 90° линии спектра сравнения сдвигались на 8 каналов (Балега и др., 1979). Приведем пример точности определения лучевой скорости при помощи телевизионной системы счета фотонов: SEC видикон на выходе спектрографа Кудэ в сочетании с кросс-корреляционной техникой обработки сигнала, наблюдения на 1.8-м телескопе, время накопления сигнала 18 минут, для $\mathrm{m_V} = 10$ $\delta\mathrm{V} = 1$ км/с, (Да Коста и др., 1977). На подвесных системах точность была намного ниже — сказывались гнутия конструкции, утяжеленной весом соленоидов ЭОПа.

3.1.4 Матрицы приборов зарядовой связи

Основным элементом приборов с зарядовой связью (ПЗС) является элементарный МОП-конденсатор, сформированный в структуре полупроводника. Если к электроду такого конденсатора приложить потенциал, формируется область, обедненная основными носителями. Манипулируя напряжениями между электродами, можно объединять соседние потенциальные ямы, т.е. переносить заряд. При наличии третьего электрода можно создавать регистры с направленным переносом заряда (ПЗС-регистры). Для предотвращения растекания заряда в направлении, перпендикулярном его перемещению, с обеих сторон регистра создаются области с повышенным легированием, называемые стоп-каналами. ПЗС-регистры служат основой при формировании матричных ПЗС. Поскольку накапливаемый заряд перемещается вдоль границы полупроводник-окисел, такие приборы называются приборами с поверхностным каналом переноса заряда (Вишневский и др., 1992). Плотность дефектов внутри полупроводника ниже, чем на поверхности, и выгоднее канал переноса сместить внутрь, к границе раздела проводимости. Приборы с объемным каналом обладают следующими преимуществами: в объеме меньше дефектов и переносимый заряд подвергается меньшим искажениям, что позволяет переносить намного меньший заряд, чем в ПЗС с поверхностным каналом. При малошумящем выходном устройстве это приводит к тому, что динамический диапазон ПЗС с объемным каналом оказывается больше; силовые линии управляющих потенциалов внутри полупроводника направлены вдоль канала и в большей степени, чем в "поверхностных" ПЗС, ускоряют перемещение заряда. Кроме этого, носители заряда имеют объемную подвижность, а не поверхностную, что также повышает быстродействие прибора; в приборах с объемным каналом можно создавать области встроенного потенциала, формирующие под собой потенциальную яму (виртуальные фазы). Количество управляющих фаз может быть уменьшено до одной, поверхность полупроводника оказывается полностью доступной для света, что улучшает чувствительность приборов и открывает возможность работы в коротковолновой области (короче 400 нм). Из процессов, порождающих пару дырка-электрон, отметим два: процесс термогенерации и внутренний фотоэффект. Количество заряда, порождаемое при термогенерации в единицу времени, связано с тепловыми колебаниями решетки полупроводника, плотностью дефектов в кристалле и на границе раздела, а генерируемое фотоэффектом — пропорционально освещенности и зависит от длины волны излучения. Мощность термогенерационного процесса сильно зависит от температуры. Ее уменьшение на $100\,^0$C приводит к снижению мощности процесса в два раза, а при охлаждении до $-100 \div -170^\circ$C, на временах в десятки минут тепловые процессы порождают единицы пар дырка–электрон, что позволяет использовать такие приборы в астрономии при длительных экспозициях. По структуре ПЗС можно разделить на два класса: линейные и матричные. Матричные приборы нашли более широкое применение в научных исследованиях, так как проще решаются вопросы согласования высоты спектра и размера элемента ПЗС, возможна более оптимальная обработка за счет информации о распределении энергии поперек дисперсии спектра, с эшелле-спектрографом объем спектральной информации может на порядок и более превышать объем информации, регистрируемый линейным ПЗС (при данном спектральном разрешении).

Применение ПЗС в научных экспериментах, в том числе и для задач астрономии, потребовало принятия новых технических и технологических решений. Для улучшения чувствительности в коротковолновой области начали протравливать подложку и проецировать изображение на ПЗС с обратной стороны, разработали покрытия, обеспечивающие "перекачку" коротковолнового излучения в длинноволновую область, разработали приборы с виртуальной фазой. Однако полный потенциал применения ПЗС не освоен. Совершенствование приборов продолжается и направлено на улучшение спектральной чувствительности в широких областях, повышение управляющей способности, снижение шума считывания и т. д. В САО РАН разработка светоприемников на основе ПЗС и применение в практике астрономических наблюдений начаты в 80-е годы (Борисенко и др., 1991, Рядченко, 1992). В 90-е годы на 6-м телескопе матрицы ПЗС формата 512×512 и 1024×1024 элементов использовались уже на всех спектрографах. В 2001 году на БТА начаты наблюдения с ПЗС 2048×2048 элементов (Панчук и др., 2002a). Приведем примеры точности первых определений лучевой скорости по наблюдениям с линейкой RETICON на спектрографах фокуса Кудэ: а) с привязкой по теллурическим линиям молекулярного кислорода — на 2.7-м телескопе, за 4 ночи, Арктур и Альдебаран, $\delta\mathrm{V} = 7$ м/с (Смит, 1983); б) с привязкой по линиям абсорбционной ячейки — на 3.5-м телескопе, за 3 ночи, Процион, $\delta\mathrm{V} = 10$ м/с (Кэмпбэлл, 1983). Наши измерения спектров малометалличных субкарликов, выполненные по эшелле-спектрам, зарегистрированным с матрицей ПЗС 2048×2048 элементов, показали внутреннюю точность $\delta\mathrm{V} = 20$ м/с для звезд $\mathrm{m_V} = 8$. Такая высокая точность достигается за счет большого числа измеренных линий.

3.2 Типы спектральных приборов

С целью демонстрации основных технологических тенденций, приведем описание шести типов спектральных приборов: солнечного магнитографа; корреляционного измерителя лучевых скоростей с одноканальным приемником (ФЭУ); поляриметра с резонансной ячейкой; поляризационного спектрометра, стационарного оптоволоконного спектрографа с матрицей ПЗС, используемого на телескопах диаметром 1-2 м; спектрографов с матрицами ПЗС, работающими в фокусе Нэсмита крупных телескопов.

3.2.1 Солнечный магнитограф

Идея солнечного магнитографа, сконструированного Бэбкоком (1953), состоит в следующем. Если посредством вращения поляроида гасить попеременно то одну, то другую из составляющих магнитно расщепленной линии, то в случае слабого поля будут наблюдаться не две составляющие, а небольшие колебания в крыльях линии. При этом необходимо удерживать линию на входе фотометра, т. е. компенсировать изменения лучевых скоростей. Бэбкок применил механический способ компенсации, Никулин и др. (1958) усовершенствовали схему магнитографа, применив, в частности, электрическую схему компенсатора лучевой скорости. Это устройство используется и при измерении лучевых скоростей, для предварительной установки линии на щели фотометра. Таким образом компенсировался доплеровский сдвиг в системе "Солнце-наблюдатель". Кроме того, оптическая часть магнитографа была модифицирована с тем, чтобы можно было одновременно наблюдать две любые спектральные линии. С этой целью использовалась мозаика из двух различных дифракционных решеток (Северный, 1966). Точности измерения магнитного поля в 1 гаусс соответствовала точность измерения доплеровских сдвигов на 2.2 м/с. Усовершенствование схемы магнитографа позволило выполнить точные измерения лучевых скоростей. С этой целью центральная часть изображения солнечного диска пропускалась через круглый поляроид с электрооптической модуляцией, а неполяризованный свет от кольца диска постоянно регистрировался вторым ФЭУ. Работая по линии с нулевой магнитной чувствительностью, Северный и др. (1976) обнаружили периодические (160 мин) флуктуации лучевой скорости с амплитудой 2 м/с, что формально соответствует изменению радиуса солнечной поверхности на 10 км. Метод не свободен как от ошибок гидирования, так и от эффекта дифференциальной прозрачности (при больших зенитных расстояниях прозрачность в пределах угловых размеров солнечного диска изменяется, следовательно, излучение, регистрируемое от различных частей диска, "взвешивается" различным образом).

3.2.2 Одноканальные корреляционные спектрометры

Метод фотоэлектрического измерения лучевых скоростей с помощью маски, соответствующей линиям в спектре звезды, был предложен Фелжеттом (1955) и впервые реализован Гриффином (1967). Затем измеритель лучевых скоростей был установлен в спектрографе фокуса Кудэ 5-м телескопа (Гриффин и Ганн, 1974). Эти работы открыли новые этапы как в астрономическом приборостроении, так и в астрофизике и звездной астрономии, поэтому остановимся на них подробнее. Доплеровское смещение измеряется методом оптической кросс-корреляции между звездным спектром и маской, размещенной в фокальной плоскости спектрографа. Маска устроена так, что задерживает фотоны, излучаемые атмосферой звезды в континууме, и пропускает фотоны, принадлежащие области спектральных линий. Изображение спектра сканируется вдоль маски и определяется положение, при котором достигается минимум пропущенного излучения. Этот минимум соответствует совпадению темных спектральных линий с прозрачными щелями маски. Сканирование спектра осуществляется колебанием плоскопараллельной пластинки, установленной после щели. Для измерения лучевой скорости звезды $\mathrm{m_B} = 14$ с точностью 1 км/с требовалось затратить всего 4 минуты времени 5-м телескопа. Хорошо известны преимущества кросс-корреляционного метода: высокая чувствительность, точность и продуктивность измерений. Очевидны и недостатки метода: ограничения на спектральные классы звезд и неприменимость к объектам с пекулярными спектрами. Кроме этого, регистрируются только обобщенные параметры спектра, а информация об индивидуальных линиях утрачивается. Основным недостатком кросс-корреляционной системы, установленной в фокусе Кудэ 5-м телескопа, является невозможность собирать свет с большого участка спектра, апертурные ограничения возникали на этапе сбора света от маски на катод фотоумножителя. Этот недостаток был устранен при разработке кросс-корреляционного измерителя лучевых скоростей, в основу которого был положен кассегреновский эшелле-спектрометр CORAVEL (Баранн и др., 1979). Обратная линейная дисперсия эшельного спектрографа, как и доплеровский сдвиг, пропорциональна длине волны, поэтому такой измеритель может работать в широком спектральном диапазоне. Инструменту присущи все систематические ошибки, типичные для дифракционного спектрометра. Для ярких звезд инструментальная ошибка не зависит от звездной величины и постоянна на уровне 120 м/с. Спектрографы фокуса Кудэ больших телескопов обеспечивали более высокую точность, однако не следует забывать, что прибор CORAVEL разработан для кассегреновского фокуса небольших телескопов. Для слабых звезд точность CORAVEL ограничивается фотонным шумом ($\delta\mathrm{V} = 400$ м/с для $\mathrm{m_V} = 15$ на 1-м телескопе за 1 час накопления сигнала). Ограничение со стороны фотонных шумов является фундаментальным результатом, тогда как низкая точность ярких объектов является следствием конструктивных особенностей (нежесткости механической конструкции, особенностей гидирования и т. п.). Эти недостатки впоследствии были преодолены путем создания стационарного (неподвижного) корреляционного спектрометра, соединенного оптическим волокном с фокальной поверхностью телескопа. Метод успешно использовался для изучения звездной кинематики, динамики скоплений, частоты встречаемости спектрально-двойных и определения их орбит, для измерения скоростей осевого вращения звезд поздних спектральных типов.

Приведем основные характеристики измерителя лучевых скоростей звезд поздних спектральных классов, предназначенного для работы в кассегреновском фокусе рефлекторов среднего диаметра (Токовинин, 1987). Как и в случае CORAVEL, основу прибора составляет эшельный спектрограф. Диаметр коллимированного пучка 60 мм, 45-градусная призма обеспечивает кросс-дисперсию около 120 Å/мм в области 500 нм, что для эшелле R2 с плотностью 75 штр/мм обеспечивает достаточное разведение порядков. Спектр протяженностью от 400 нм до 600 нм, в фокальной плоскости имеет размеры 60×20 мм. Использование дополнительного изламывающего зеркала обеспечивает компактность, жесткость и простоту термостатирования спектрографа. Обратная линейная дисперсия на волне 440 нм составляет 2 Å/мм, что соответствует смещению 7.4 мкм на 1 км/с, гнутие спектрографа эквивалентно ошибке от 0.1 до 0.6 км/с. Входной щелью служит стеклянная пластинка толщиной 100 мкм с полированными торцами. Благодаря многократным отражениям в пластинке выходной торец освещен равномерно, поэтому погрешности гидирования и фокусировки телескопа не влияют на точность измерений. За щелью находится качающаяся пластинка толщиной 3 мм, модулирующая положение спектра с частотой 10 Гц и амплитудой, равной полуширине аппаратного контура. Модулирующая пластинка перекрывает узкий диапазон лучевых скоростей, поэтому прибор снабжен дополнительным устройством сдвига линий, воспроизводимость установки которого лучше чем 0.2 км/с. Спектр звезды строится по маске, прорези которой соответствуют абсорбционным линиям. При смещении спектра по маске измеряется уменьшение пропущенного потока при совпадении спектральных линий с прорезями. От полуширины и контраста этого профиля "обобщенной" спектральной линии, т. е. кросс-корреляционной функции спектра звезды и маски, зависит точность измерения скорости. При ширинах входной щели и прорезей по 100 мкм для солнечного спектра полная ширина профиля по уровню 0.5 (FWHM) составляет 16.4 км/с, а контраст равен 22%. Для предельно слабых звезд преобладающим источником шума являются флуктуации темнового тока ФЭУ, и в этом случае щель и прорези маски должны быть в 1.4 раза шире линий в спектре звезды, в то время как для ярких звезд щель и прорези должны быть уже, чем ширина звездных линий. Свет, пропущенный маской, собирается конденсорной линзой на фотокатод фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов. Для исключения шумов, связанных с мерцанием и дрожанием изображения на щели, при фотоэлектрическом измерении лучевых скоростей спектр быстро и многократно смещают относительно маски на небольшую величину и накапливают корреляционный профиль в цифровой памяти. Предельная точность всего прибора составляет 50 м/с, смещение нуля в течение ночи не превышало 1 км/с. Приведем характерную точность измерения лучевых скоростей на приборах данного класса: CORAVEL — на 1-м телескопе ЕЮО, за 1 час, мультищелочной ФЭУ, звезда типа Арктура, оптимальная маска, для $\mathrm{m_V} = 10$ ошибка составляет $\delta \mathrm{V} = 50$ м/с (Баранн и др., 1979).

3.2.3 Резонансные спектрометры

Методом, свободным от инструментальных эффектов, присущих дифракционным спектрографам, является использование ячеек, заполненных парами щелочных металлов (Исаак, 1961; Родди, 1965; Фосса и Родди, 1971). Натриевая ячейка (Грец и др., 1976) помещена в магнитное поле, что в комбинации с установленным перед ячейкой линейным поляроидом обеспечивает поглощение в узких спектральных окнах, соответствующих положениям зеемановских компонент резонансной линии натрия. Величина магнитного поля подобрана такой, чтобы положения спектральных окон были расположены на участках максимальной крутизны крыльев профиля линии натрия, формирующейся в звездной атмосфере, а ширина спектральных окон определяется температурой ячейки. Излучение в районе резонансной линии натрия выделяется на входе прибора узким (4 Å) интерференционным фильтром. Два фотоумножителя, снабженные анализаторами круговой поляризации, регистрируют компоненты резонансного рассеяния, интенсивность которых пропорциональна потокам, попадающим в ячейку в крыльях линии. В другой схеме (Брукс и др., 1978) используется один фотоумножитель, а поляризации переключаются электрооптическим модулятором. Здесь основным источником ошибок (с амплитудой до 1 м/с) являлось изменение угла входа в модулятор, т. е. ошибки гидирования. Основным преимуществом спектрометра является высокая светосила (прибор не имеет щели), основным недостатком — работа по одной линии. Принципиально важным обстоятельством является стабильность шкалы длин волн, что позволяет измерять абсолютную лучевую скорость. Этим методом обнаружены и исследованы 5-минутные осцилляции Солнца. Оба резонансных спектрометра показали большую чувствительность к положению изображения Солнца и азимуту. Другое преимущество метода в том, что резонансные ячейки являются нулевыми реперами, т. к. сравниваются свойства одних и тех же атомов (в атмосфере Солнца и в приборе). Для изучения колебаний лучевой скорости система должна быть откалибрована по всем известным движениям, в основном движениям Земли. В этом смысле процедура такая же, что и при наблюдениях с магнитографом: в течение каждого дня наблюдений необходимо измерять дневной тренд скорости и удалять его. Оставшиеся колебания скорости являются солнечными, гелиосейсмического происхождения. Эта техника была использована для наблюдений ярких звезд. Фосса и др. (1984) использовали натриевую ячейку в абсорбционном варианте (где квантовая эффективность выше, чем в случае резонансной ячейки). В течение двух ночей накопления сигнала на 3.6-м телескопе были обнаружены колебания (p-моды) у α Центавра ($\mathrm{m_V} = -0.1$). Недостаток метода состоит в работе по одной линии, причем вблизи абсорбционного ядра, где поток минимальный.

3.2.4 Поляризационный спектрометр

Спектры, регистрируемые в виде зависимости амплитуда–длина волны, достаточно сложно откалибровать по длине волны. Классическим способом является использование дисперсионной кривой, построенной по спектру сравнения. Это означает, что калибровка наблюдаемого спектра выполняется по отдельным точкам этого спектра, соответствующим положению линий спектра сравнения. Серковски (1972) предложил метод, в котором калибровка длины волны осуществляется для каждой точки спектра. Суть метода состоит в том, что излучение звезды искусственно поляризуется таким образом, что плоскость линейной поляризации вращается с изменением длины волны. Многоэлементный приемник измеряет не только число отсчетов в каждом канале, но и угол поляризации. Схема поляризационного спектрометра содержит поляризатор, широкоугольный фазовый элемент, обеспечивающий сдвиг фазы между пучками с ортогональной поляризацией, четвертьволновую пластинку, превращающую эллиптически поляризованный свет в линейно поляризованный, и вращающуюся полуволновую пластинку. Система призм Волластона и линз строит на входной щели спектрографа два изображения звезды. Каждый элемент светоприемника в спектрографе освещается по синусоидальному закону с частотой, вчетверо превышающей частоту вращения полуволновой пластинки. Электроника измеряет интенсивность сигнала и фазу модуляции, последняя обратно пропорциональна длине волны. Периодичность повторения угла поляризации с изменением длины волны определяется разностью показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей и толщиной фазового элемента. Разность показателей чувствительна к температуре кристалла, поэтому кристалл термостатировался с точностью 0.01° С. Точность калибровки лучевой скорости (1 км/с) определяется и точностью изготовления плоскостей кристалла. Важно отметить, что предложенный метод обладает высокой широкощельностью (при разрешении эшелле-спектрографа 0.15 Å, спектральная чистота, определяемая параметрами фазового элемента, не должна быть хуже 1 Å). На 2-м телескопе за 4 минуты накопления сигнала от звезды $\mathrm{m_V} = 10$ обеспечивалась точность измерения лучевой скорости 1 км/с.

3.2.5 Оптоволоконные многоканальные спектрографы

Центральный пик аппаратной функции спектрографа можно рассматривать как свертку монохроматического изображения равномерно освещенной щели и углового распределения монохроматической интенсивности в той части турбулентного диска звезды, которая проецируется на щель. Поэтому повышение требований к точности определения лучевых скоростей ограничено принципиальным пределом, свойственным для дифракционных спектрографов, на входной щели которых оптика телескопа строит изображение звезды. Во-первых, из-за атмосферной дисперсии положения центров тяжести монохроматических изображений щели различаются. Во-вторых, характер заполнения коллиматора может изменяться при разных ориентациях телескопа (этот эффект сильно выражен для фокуса кудэ и слабее — для фокусов Нэсмита и Кассегрена). Отсюда следовал вывод, что реперы с точно известными длинами волн должны впечатываться в спектр звезды непрерывно в процессе получения спектрограммы. С этой целью использовались либо линии теллурического спектра (Гриффин и Гриффин, 1973а,б), либо спектры, формирующиеся в абсорбционных ячейках с парами HF (Кэмпбелл и Уокер, 1979), или J_2 (Марси и Батлер, 1992). Однако последний прием затрудняет использование спектра для измерения интенсивностей линий. Если первая проблема может быть почти полностью решена установкой компенсатора атмосферной дисперсии, то кардинальное решение второй возможно только в том случае, если на вход спектрографа подается поток с постоянной угловой апертурой, не зависящей от качества изображения и точности сопровождения объекта. Оптоволоконное сочетание телескопа и спектрографа является важным технологическим моментом, определяющим облик большинства современных дифракционных спектрографов высокого разрешения. К преимуществам метода отнесем: а) фиксированные координаты входа в спектрограф как в течение одной экспозиции, так и между экспозициями, включая и калибровки; б) возможность размещения спектрографа в хорошо стабилизированных условиях; в) возможность обеспечить заполнение апертуры спектрографа, не зависящее от координат изучаемого объекта; г) расширенная возможность создания многомодовых схем на многопрограммном телескопе. В середине 80-х была сформулирована и начала реализовываться идея спектроскопического мониторинга избранных звезд на телескопах, распределенных по долготе (Multi-Site Continuous Spectroscopy — MUSICOS). Понятно, что такие наблюдения следовало выполнять на приборах, обладающих близкими или идентичными характеристиками. С этой целью были выполнены работы по созданию недорогих и удобных в транспортировке спектрографов. Первым таким прибором был спектрограф ISIS (Феленбок и Гьерин, 1988). Спектрограф построен по схеме Черни-Тернера, оснащен двумя сменными решетками, на нем можно было использовать резатель изображения (входной торец оптоволоконного жгута круглый, а на выходе отдельные волокна выстроены в “щель”). Одним из преимуществ оптоволоконного спектрографа является возможность использования осевого зеркального коллиматора, оптоволоконный вход в который практически не виньетирует коллимированный пучок. Спектрограф и его модификации использовались преимущественно на телескопах 2-м класса (Китай, Гавайи, Франция). Первая кампания координированных наблюдений была проведена в 1989 г. Стратегия MUSICOS предусматривала расширение одновременно регистрируемого диапазона, и был разработан недорогой эшелле-спектрограф (Бодра и Бем, 1992). В совокупности с волокном пропускание спектрографа составляло 0.17. Применение оптоволоконного сочетания телескопа со спектрографом имеет два недостатка. Первый — конус света на выходе волокна не имеет центрального темного пятна, вызванного экранированием вторым зеркалом телескопа. Следовательно, применение любой схемы спектрографа, имеющей центральное экранирование, приведет к дополнительным потерям света. Вторым недостатком является неполное перемешивание апертуры — угловое распределение интенсивности на выходе может изменяться вследствие переменного заполнения апертуры волокна на входе. Игнорирование этого обстоятельства серьезно ограничивает точность определения положений линий в спектре. К числу почти преодоленных трудностей отнесем также угловую деградацию апертуры (телесный угол выходного конуса света всегда превышает угол на входе в оптоволокно), т. е. применение оптоволокна всегда ухудшает “широкощельность” прибора. С учетом этих обстоятельств создавалось большинство конструкций оптоволоконных эшелле-спектрографов. В табл. 4 указаны основные параметры оптоволоконных спектрографов.

Таблица 4: Оптоволоконные эшелле-спектрографы. Диаметры телескопа (D), коллимированного пучка (d) и фокусное расстояние камерного объектива (F) указаны в мм

Год	D	d	F	R	Спектрограф
1982	1930	160	1000	<35000	ISIS OHP
1987	750	80	300	20000	Heidelberg
1991	2000	100	400	35000	MUSICOS
1993	1930	100	300	42000	ELODIE
1994	1500	100	690	51000	AFOE
1995	5000	200	610	40000	Palomar
1996	2200	150	450	40600	FOCES
1998	1200				CORALIE
1999	1520	136	410	48000	FEROS
2001	3600	200	1660	<200000	SARG TNG
2002	3600	200	760	90000	HARPS

Приведем пример точности определения лучевой скорости на оптоволоконной системе: FEROS, на 1.5-м телескопе в течение 2-х часов, для звезды $m_V = 12$, точность $\delta V = 21$ м/с сохраняется в течение двух месяцев (Кауфер и др., 1999).

3.2.6 Нэсмитовские спектрографы

Применение оптоволоконной техники на крупных телескопах затруднено из-за проблемы согласования большого масштаба изображения с элементом разрешения светоприемника. Поэтому, несмотря на прогресс оптоволоконной технологии, продолжается процесс оснащения крупнейших телескопов спектрографами, размещаемыми на подвижных платформах фокуса Нэсмита.

- **Эшелле-спектрограф 10-м телескопа (HIRES)**

  Спектральное разрешение прямо пропорционально произведению диаметра коллимированного пучка на тангенс угла блеска решетки и обратно пропорционально произведению диаметра зеркала телескопа на угловую ширину щели спектрографа. Поэтому для сохранения угловой ширины щели и спектрального разрешения при переходе на телескопы средних и больших диаметров, необходимо увеличивать как угол блеска (т. е. применять эшелле), так и увеличивать диаметр коллимированного пучка. Одновременное увеличение этих параметров приводит к большой длине нарезанной части дифракционной решетки, выходящей за технологические ограничения современных делительных машин. Поэтому крупногабаритные эшелле компонуются из мозаики, каждый элемент которой является эшелле-решеткой с предельными технологическими размерами. Эшелле-спектрограф HIRES 10-метрового телескопа Keck имеет рекордный диаметр коллимированного пучка (300 мм), что привело к необходимости использования мозаичной эшелле с длиной нарезанной части 1220 мм (мозаика из трех решеток с размером нарезанной части 305×406 мм каждая). Угол блеска 69°, число штрихов — 52.7 штр/мм. Мозаичная решетка скрещенной дисперсии с эффективной длиной 610 мм состоит из двух частей (с размером нарезанной части 305×406 мм каждая). Прибор смонтирован на платформе нэсмитовского фокуса телескопа. Предщелевая часть содержит компенсатор вращения поля, компенсатор атмосферной дисперсии, системы подсмотра поля и автоматической коррекции положения объекта, систему калибровки спектра, абсорбционную йодную ячейку. После щели устанавливаются фильтры, необходимые для разделения порядков решетки скрещенной дисперсии. Коллиматор (1:13.7) содержит два сменных сферических зеркала, имеющих высокоэффективные покрытия, оптимизированные для работы в диапазонах 340–3000 нм и 300–450 нм. Диаметр коллимированного пучка 300 мм, апертура коллиматоров предусматривает использование резателей изображения. Конструкция камеры с внутренним фокусом (1:1) предусматривает работу от 300 нм — УФ-границы окна атмосферной прозрачности (телескоп Keck установлен на высоте 4200 м, где поглощение в близком УФ-диапазоне невелико) — до 2000 нм. Шесть оптических поверхностей элементов камеры сферические и седьмая — плоская. Светоприемником "первого света" служила матрица ПЗС 2048×2048 элементов, размер пикселя 24×24 мкм. Модуль, содержащий светоприемник, расположен преимущественно в центральном пятне коллимированного пучка, образованного тенью вторичного зеркала телескопа. Такая схема исключает увеличение формата светоприемника. Оптика спектрографа позволяет достичь $R = 100000$. Для прецизионных измерений лучевых скоростей спектрограф оснащен абсорбционной йодной ячейкой. Стоимость ядра прибора, т. е. в варианте, позволяющем выполнить первые наблюдения, оценивалась в 3.1 млн. USD (Фогт, 1992). С небольшими изменениями схема HIRES повторена при разработке спектрографа HDS 8-м телескопа Subaru (Ногучи и др., 2002).

- **Эшелле–спектрограф 6-м телескопа (НЭС)**

  6-метровый телескоп БТА (Иоаннисиани, 1970), вступивший в строй в 1975 году, являлся самым крупным оптическим телескопом планеты до начала 90-х, когда начал работать 10-метровый телескоп Keck-1. БТА является первой альтазимутальной системой, на которой отрабатывались новые технические решения, положенные в основу большинства конструкций современных крупных телескопов, созданных за последние 20 лет. Не исключение составляют и спектрографы, размещенные в трех фокусах БТА (в главном фокусе 1:4 и двух нэсмитовских, 1:30). Спектрографы первого поколения, ориентированные на прямую фотографическую регистрацию или на фотографическую регистрацию через ЭОП, были разработаны преимущественно на этапе создания БТА в институтах и на предприятиях отечественной оптической промышленности. Спектрографы второго поколения, ориентированные на применение телевизионных систем счета фотонов, создавались уже силами САО АН СССР (Афанасьев, 1990; Клочкова и Панчук, 1991; Клочкова и др., 1991). Спектрографы третьего поколения, к числу которых относится и НЭС, также созданы в САО РАН. Основные элементы конструкций (дифракционные решетки и другие крупногабаритные оптические детали) изготовлены отечественной промышленностью. Четыре спектрографа фокусов Нэсмита (Панчук и др., 2002б) размещены стационарно на телескопе, таким образом, их предварительная подготовка к наблюдениям облегчена. Сборка и наладка спектрографов осуществлялась непосредственно на телескопе, без нарушения расписаний наблюдений.

  Нэсмитовский эшелле-спектрограф (НЭС) является основным спектральным прибором БТА, ориентированным на исследования звезд и звездообразных объектов с величиной спектрального разрешения до $R = 80000$. Предщелевые устройства (подсмотр поля, канал спектров сравнения, узел анализатора линейной и круговой поляризации (Найденов, 2003), узел йодной ячейки (Панчук и др., 1998), узел эталона Фабри-Перо, разделители спектра, подсмотр щели) — являются общими для трех спектрографов, размещенных в фокусе Нэсмит-2: ОЗСП (Панчук, 2001), НЭС (Панчук и др., 1999а), РЫСЬ (Панчук и др., 1999б). Щелевая часть эшелле-спектрографа НЭС является общей и для эшелле-спектрометра РЫСЬ. После щелевой части свет последовательно проходит трехзеркальный коллиматор (2 плоских ломающих зеркала и парабола, F = 7200 мм), эшелле, одну из сменных решеток скрещенной дисперсии, зеркально-линзовую камеру Шмидт-Кассегрен-Може. Мозаичная эшелле ($\theta_b = 63.^\circ5$, 37.5 штр/мм, размер заштрихованной части 600×300 мм), ориентирована в автоколлимации: $\alpha = \beta = \theta_b$, $\gamma > 0$. Хронологически это вторая мозаичная эшелле в мировой астрономической практике (после HIRES). Диаметр коллимированного пучка равен 240 мм, световой диаметр коррекционной пластины Шмидта составляет 305 мм, фокусное расстояние камеры 600 мм. Спектрограф НЭС эксплуатируется на БТА с января 1998 года, а с 2001 года на нем установлена матрица ПЗС 2048×2048 элементов. Наблюдаются разнообразные объекты, вплоть до ярких квазаров (15–16 зв. вел.) с величиной спектрального разрешения R = $60000 - 80000$.

- **Эшелле–спектрограф 8-м телескопа (UVES)**

  Наиболее эффективным спектрографом высокого разрешения является UVES (Деккер и др., 1992), вступивший в работу на 8-м телескопе в 2000 году. Прибор является воплощением ряда прогрессивных идей, прошедших проверку на прообразе — эффективном многомодовом инструменте (EMMI), которым в 80-е был оснащен 3.6-м телескоп NTT. Как и EMMI, UVES состоит из двух ветвей, "синей" и "красной", что позволило обеспечить высокое пропускание (более 25%) каждой из ветвей. Пропускание линзовых камер составляет 90%. Спектрограф оснащен мозаичной эшелле (R4), при изготовлении которой использовалась новая технология репликации на монолитную основу. Точность относительной юстировки двух реплик обеспечивает теоретическое разрешение эшелле около 800000. Рабочее спектральное разрешение UVES равно 100000. Формат матриц в обеих ветвях составляет 2048×4096 15-микронных элементов. Объем трудозатрат на создание UVES составил 40 человеко-лет, стоимость проекта 6.7 млн. марок.

3.3 Определение лучевых скоростей по эшелле-спектрам

С внедрением в спектроскопическую практику матриц ПЗС техника измерения лучевых скоростей претерпела значительные изменения. Во-первых, в целом ушли со сцены одноканальные спектрометры типа CORAVEL. Во-вторых, измерения выполняются исключительно на эшелле–спектрографах. В-третьих, спектрографы телескопов средних диаметров (до 2 м включительно) стали оптоволоконными. В-четвертых, для более крупных телескопов разработаны эшелле-спектрографы высокого разрешения с матрицами ПЗС форматом 2048×2048 и даже 4096×4096 элементов. И, наконец, созданы методы обработки эшелле-спектров, позволяющие оперировать с сигналами, сравнимыми с шумами считывания ПЗС (Келоз, 1995).

3.3.1 Метод измерения отдельных линий

Метод измерения положений линий в эшелле–спектрах, ставший уже классическим, включает процедуру построения маски по спектру сравнения. Из-за того, что оптика канала спектра сравнения неидентична оптике звездного канала, всегда остается рассогласование этих каналов, состоящее в различном заполнении оптики спектрографа светом от звезды и светом от источника калибровки. Это рассогласование приводит к неточностям в построении дисперсионной кривой и к ошибкам определения длин волн в спектре звезды. Поэтому дисперсионную кривую можно построить и по солнечному спектру, получаемому либо от источника рассеянного света (сумеречное небо), либо от света, отраженного Луной или планетами и спутниками планет.

Устранение систематических ошибок осуществляется привязкой лучевых скоростей, полученных по спектру звезды, к лучевым скоростям, полученным либо по деталям, формирующимся в атмосфере Земли (теллурические абсорбции и ионосферные эмиссии), либо по деталям, формирующимся в межзвездной среде (резонансные абсорбции атомов и ионов, резкие межзвездные полосы). Классические спектроскопические методы измерения лучевых скоростей основаны на принципе измерения каждой спектральной линии, поэтому применение этих методов возможно лишь, начиная с таких уровней S/N, при которых линия уже уверенно выделяется на фоне шума. Роль классических методов безусловна в тех случаях, когда в атмосферах исследуемых звезд существует поле скоростей и могут наблюдаться дифференциальные сдвиги лучевых скоростей, измеряемых по различным группам линий. Примеры спектров таких объектов приведены в атласах пекулярных звезд высокой светимости (Ченцов и др., 1999, 2001, Клочкова и др., 2003). Не избежать классических методов измерения лучевых скоростей и в случае сложных абсорбционно-эмиссионных спектров. Однако существует множество ситуаций, когда метод измерения положений отдельных линий оказывается неэкономичным.

Одну оценку точности метода измерения отдельных линий получим, используя измерения, проведенные одним из авторов (А.А.Н.) в порядке ознакомления с методом. Выполнена обработка эшелле-спектров звезд HD 115444 и α Персея, с последующим измерением положений отдельных линий и вычислением лучевой скорости. По 14-ти линиям, измеренным в спектре HD 115444, значение лучевой скорости составило -28.56 км/с, дисперсия 1.181, ошибка среднего 0.307 км/с. По 256-ти линиям в спектре α Персея получена лучевая скорость -2.096 км/с, дисперсия 1.005, ошибка среднего 0.063 км/с. Получили, что ошибка среднего приближенно пропорциональна корню квадратному из числа измеренных линий, отклонение от этой зависимости связываем с различной шириной линий в спектре сверхгиганта α Персея и малометалличного субгиганта. Вторая оценка получена в результате измерений восьми спектров 4-х субкарликов разной металличности — ошибка среднего по всем линиям одной спектрограммы изменяется от 17 до 40 м/с, составляя в среднем 24 м/с.

3.3.2 Кросс-корреляционные методы

Фелжетт (1955) предложил метод оптической кросс-корреляции, идея которого состоит в том, что в схеме с одноканальным приемником пик кросс-корреляционной функции формируется путем сдвига изображения спектра относительно маски (набора щелей), которая выделяет характерные для данного типа звезд спектральные линии. Маска является обобщенной характеристикой абсорбционного спектра, включающей информацию о металличности, параметрах уширения линий и лучевой скорости. Важным практическим свойством метода является то, что для получения обобщенной информации о спектре (достаточной для построения кросс-корреляционной функции) необходимо гораздо меньше наблюдательного времени, чем для регистрации спектра до уровня, когда абсорбционные линии уверенно выделяются. Появление многоэлементных светоприемников позволяет развить указанный подход. Маска щелей заменяется спектром стандарта, который регистрируется отдельно. Затем можно выполнить кросс-корреляционное сравнение спектров исследуемой звезды и стандарта. Успех применения кросс-корреляционных методов измерения лучевых скоростей определяется также соотношением ширины аппаратной функции спектрографа и ширин линий в спектрах исследуемых объектов (желательно, чтобы ширина аппаратной функции была меньше ширин линий). Таким образом, развитие кросс-корреляционных методов измерения лучевых скоростей связывается с увеличением R. Желательно, чтобы отношение S/N в спектре-образце было по возможности максимальным. Вторым требованием является реализация достаточного спектрального разрешения в обоих спектрах, отсюда следует преимущество работы в высоких порядках дифракционной решетки. Важной особенностью эшелле-спектра является одинаковая величина сдвига линий, находящихся в разных спектральных порядках, при изменении лучевой скорости объекта. К недостатку многоэлементных ПЗС можно отнести тот факт, что полезная информация отягощена шумами считывания, роль которых в суммарном сигнале возрастает при увеличении числа элементов, регистрирующих спектр. Чем больше мы регистрируем спектральных порядков, тем большее число элементов матрицы (пикселей) формирует шумовую компоненту. Поэтому естественным решением является отказ от элемента скрещенной дисперсии. Действительно, если величина сдвига спектральной линии не зависит от номера порядка, то эти линии незачем разводить пространственно поперек дисперсии эшелле. Напомним, что двумерное изображение эшелле-спектра содержит искажения положений линий, обусловленные как особенностями комбинации эшелле–элемент скрещенной дисперсии, так и ошибками поля камеры по второй координате. Итак, в предположении о равномерном распределении линий по спектру, обрабатывать n неразведенных порядков эшелле-спектра эмиссионного объекта выгодней, чем один порядок — точность измерения возрастает при этом в корень из n раз. Важно подчеркнуть, что в полоску переналагающихся порядков попадут и те, которые при использовании элемента скрещенной дисперсии одновременно в эшелле-кадр не попадают (из-за требований на высоту щели или из-за ограниченных размеров светоприемника и поля камеры). Преимущество данного метода перед классическими измерениями состоит в увеличении проницающей способности: а) за счет исключения потерь на решетке скрещенной дисперсии, б) за счет использования спектральных порядков, не попадающих в эшелле-кадр, в) за счет снижения роли шумов считывания. Была выполнена экспериментальная проверка идеи измерения лучевых скоростей по неразведенным порядкам абсорбционного спектра (Клочкова и др., 2001). При S/N = 50 в неразведенных порядках спектра K-звезды внутренняя точность составляет 0.4 км/с. Факторами, ограничивающими точность определения лучевой скорости в данном конкретном варианте наблюдений, являются: а) уровень “косметики” используемого экземпляра ПЗС, б) нестабильность положения светоприемника относительно фланца криостата, в) снижение контраста спектральных деталей из-за переналожения порядков. Предложенный метод перспективен для массовых измерений лучевых скоростей слабых звезд с точностями 1–2 км/с. Как в методе измерения положений отдельных линий, так и в кросс-корреляционном методе одним из главных недостатков является неодновременность регистрации спектра сравнения и спектра звезды. При регистрации спектров ярких звезд — стандартов лучевых скоростей, разность положений оптического центра звезды в течение короткой экспозиции практически не успевает измениться, тогда как при длительных экспозициях исследуемых звезд такая разность успевает осредниться за счет неточностей процесса гидирования и большого количества колебаний положений звезды, вызванных особенностями системы управления телескопом. Этот эффект, известный авторам (П.В.Е. и К.В.Г.) еще со времен фотографической спектроскопии, приводил к тому, что лучевые скорости исследуемых звезд определялись с точностью более высокой, чем точность определения лучевых скоростей ярких звезд-стандартов. Кроме того, к недостаткам классического способа привязки положений линий исследуемого спектра к спектру репера отнесем: а) неодинаковое заполнение оптики спектрографа реперным излучением и исследуемым потоком, б) переменное (во времени) положение звезды на щели и постоянное — реперных изображений, в) переменная интенсивность сигнала от исследуемого спектра, обусловленная неточностями гидирования и переменными атмосферными условиями в течение экспозиции. Последнее не позволяет точно определить “центр тяжести” экспозиции во времени, на который интерполируются измерения реперных спектров, полученных до и после основной экспозиции, и для которого вычисляется гелиоцентрическая поправка. Большая часть этих недостатков устраняется методами, обеспечивающими одновременность засветки апертуры спектрографа спектром исследуемой звезды и спектром сравнения: метод абсорбционной ячейки, метод эталона Фабри-Перо в отражении, метод двухволоконного сочетания телескопа и спектрографа. В первом методе используется абсорбционный реперный спектр, т. е. калибровка является одновременной. Во втором методе на спектр звезды накладываются узкие абсорбции, сформированные пиками аппаратной функции ЭФП, т. е. калибровка также одновременная. В третьем методе центры калибровочной экспозиции эмиссионного спектра и экспозиции звездного спектра могут не совпадать по времени, поэтому калибровка является квазиодновременной.

3.4 Позиционные нестабильности современных спектрографов

Хатцес и Кохран (1992), исследуя кудэ-эшелле-спектрограф (Талл и др., 1995) 2.7-м телескопа обсерватории МакДональд, обнаружили вариации положения спектра, соответствующие ошибкам определения лучевой скорости на 20 м/с и 100 м/с на шкале минуты и часы, соответственно. Смещение спектра в оптоволоконном кудэ-эшелле-спектрографе 1.5-м телескопа за 4.5 часа соответствует ошибке 200 м/с (Браун и др., 1994). Нестабильность кудэ-спектрографа сверхвысокого разрешения (Ге и др., 2002a) 1.5-м телескопа с адаптивной оптикой составляет 37 м/с в течение часа. Таким образом, размещение спектрографа в неподвижном фокусе и даже оптоволоконное сочетание не есть панацея от позиционных нестабильностей. В 1998 г. обнаружены позиционные нестабильности НЭС, не связанные непосредственно с оптико-механической конструкцией спектрографа (Клочкова и др., 1999). Было показано, что эти нестабильности возникают в модуле светоприемника, дополнительные аргументы были получены в результате исследований этого же светоприемника на других эшелле-спектрографах БТА. Этой же методикой изучалась позиционная стабильность НЭС с матрицей ПЗС 2048 $\times$ 2048 элементов (Панчук и др., 2002a). Определения положений линий спектра сравнения при неподвижном телескопе показали, что характер изменения положения линий со временем такой же, как и с прежним светоприемником, но амплитуда изменений значительно уменьшилась. Были выполнены также измерения положений линий при различных режимах работы телескопа (наведение, повторное наведение, сопровождение объекта). Пришли к выводу, что при использовании матрицы ПЗС 1040 $\times$ 1160 элементов главным источником позиционных нестабильностей являлись смещения, происходящие в модуле светоприемника, т. е. вклад нежесткости спектрографа был мал по сравнению со смещениями в модуле светоприемника и выделить его не удалось. С матрицей 2048 $\times$ 2048 элементов были выделены смещения, коррелирующие с резкими изменениями температуры подкупольного пространства телескопа, что позволяет выполнять учет таких смещений, соблюдая необходимый режим калибровок. Заметим, что сочетание резких изменений температуры подкупольного пространства и режима наблюдений в случае БТА маловероятно. Зарегистрированные нестабильности не изменяют значимо ширину пика аппаратной функции, но ограничивают точность измерения лучевых скоростей. Например, из одного эксперимента следует, что сдвиг между соседними спектрами сравнения, вызванный нестабильностями, не превосходит 0.05 пикселя/час, что проявится в изменении лучевой скорости не более чем на 80 м/с в течение часового интервала между экспозициями. Если предположить, что в течение научной экспозиции сдвиг нарастает линейно, то ошибку определения лучевой скорости вследствие нестабильностей светоприемника можно снизить до 10 м/с. Достижение такой точности в полной процедуре измерения лучевых скоростей будет уже ограничиваться другим эффектом — неидентичного заполнения оптики спектрографа излучением исследуемого объекта и излучением источника спектра сравнения. Стабильность калибровки нэсмитовского спектрографа UVES составляет “порядка 50 м/с за дни” (Д’Одорико, 2000). Наиболее высокая степень стабильности продемонстрирована для оптоволоконного кудэ-эшелле-спектрографа FEROS (Кауфер и Паскуини, 1998) 1.5-м телескопа ЕЮО – 30 м/с на шкале в два месяца (Кауфер и др., 1999).

4 Фундаментальные ограничения точности лучевых скоростей

Ограничения точности определения лучевых скоростей определяются физическими свойствами измеряемого объекта и особенностями измерителя. Рассмотрим сначала астрофизические ограничения, затем инструментальные эффекты.

4.1 Физические эффекты в звездных атмосферах

В подавляющем большинстве случаев в спектрограф попадает излучение, усредненное по диску звезды. "Взвешивание" потока, идущего от центральных и периферийных зон диска, хорошо описывается теорией переноса излучения в гидростатической атмосфере. Наличие движений в звездной атмосфере также сказывается на спектре, но тип весовых функций может быть другим. Все это может отражаться на определении скорости движения центра звезды. Ниже рассмотрим эффекты, принципиально ограничивающие точность измерения лучевых скоростей теми методами, где используется обобщенная (т. е. усредненная по спектру данной звезды) информация о форме и положениях линий. К таким методам прежде всего относятся разновидности кросс-корреляционных методов. Применение кросс-корреляционной техники предполагает, что поле (радиальный градиент) скоростей в звездной атмосфере не изменяется со временем, или изменения градиента незначительны на шкале измерения ожидаемых изменений скорости. В противном случае может снижаться точность измерения лучевых скоростей. Астрофизические явления, которые могут приводить к понижению точности, следующие: когерентные колебания, конвективные движения, сверхгрануляция, циклы звездной активности, вспышки и вращение. Для того, чтобы отделить перечисленные эффекты от кинематического ускорения, следует построить амплитудную диаграмму распределения скоростей.

4.1.1 Атмосферы звезд солнечного типа

Ожидаемая амплитуда некинематических изменений лучевой скорости, проинтегрированной по диску звезды солнечного типа, мала (менее 100 м/с). Кратковременные вариации (менее 1 часа), связанные с когерентными осцилляциями и сверхгрануляцией, имеют малые амплитуды на Солнце, и ожидаются у звезд солнечного типа. Вариации на промежуточной временной шкале (дни–месяцы) связаны с модуляцией вращением (большие группы пятен или области вспышек). Они могут модулировать ядра сильных (хромосферно чувствительных) линий, на положения слабых линий влияние не оказывают. Следовательно, при поиске невидимых спутников звезд эти эффекты не должны проявиться. Все же положения ядер сильных линий следует проверять на корреляцию с потоками в линиях H и K- дублета CaII (исследования эффектов модуляции этих потоков вращением можно найти у Вогана и др. (1981)). Следует выделить один эффект, который может повлиять на результат поиска долгопериодических малоамплитудных колебаний лучевой скорости, вызванных присутствием невидимого компонента. Ливингстон (1982) показал, что профили слабых, немагниточувствительных линий солнечного спектра, изменяются с циклом солнечной активности. Периодические изменения поверхностного магнитного поля влияют на конвекцию, т. е. приводят к изменению асимметрии профилей линий. Бисекторы линий на промежуточных глубинах профилей могут изменяться с периодом солнечной активности на 75 м/с. Изменения асимметрии солнечных линий заподозрил и Брунинг (1984).

4.1.2 Атмосферы с радиальными движениями вещества

Структура стационарной атмосферы звезды может быть приближенно описана одномерной моделью атмосферы, где основным условием является уравнение гидростатического равновесия. В процессе эволюции звезды изменяются условия энерговыделения различных слоев, следовательно, изменяются условия переноса энергии, и может сложиться ситуация, когда на определенных уровнях модели условие гидростатического равновесия не выполняется. Атмосфера начинает расширяться, что сопровождается потерей вещества в межзвездную среду. При определенном количестве вещества, теряемого атмосферой, эти процессы отражаются на форме линий. Так, например, если вещества, находящегося в расширяющейся области, достаточно для формирования ядер сильных линий, то лучевые скорости, измеренные по положениям ядер и крыльев сильных линий, будут различаться. Если измерения лучевых скоростей выполняются преимущественно по доплеровским ядрам, то такие измерения по сильным и слабым линиям могут систематически различаться. Эффект достаточно хорошо изучен в спектрах сверхгигантов, например, в спектрах одного и того же горячего сверхгиганта могут наблюдаться как эффекты расширения, так и сжатия внешних слоев (Ченцов, 1980).

4.1.3 Атмосферы, химически неоднородные по поверхности

В атмосферах некоторых типов химически пекулярных звезд наблюдаются зоны концентрации избранных элементов (и их ионов), где преимущественно формируются соответствующие спектральные линии. Осевое вращение "пятнистой" звезды приводит к эффекту изменения формы линий, а при недостаточном спектральном разрешении — модулирует положение ядер линий. В линиях различных элементов положения линий, сформированных от видимой полусферы звездной атмосферы, различаются. Точность применения кросс-корреляционной техники тотально, по всем линиям спектра таких звезд, будет ограничена.

4.1.4 Атмосферы с конвекцией

В атмосферах более холодных звезд значительную роль играет конвективный перенос энергии. В приближении теории длины пути перемешивания (Бем-Витензе, 1964) конвекция наступает тогда, когда адиабатический градиент меньше лучистого. Это условие может выполняться в глубоких слоях атмосфер холодных звезд. (Приближение длины пути перемешивания означает, в частности, что конвективный элемент исчезает, пройдя расстояние, сравнимое с его размерами). В звездной атмосфере конвективный перенос энергии составляет всего проценты от лучистого переноса. Кроме длины пути перемешивания, классическими свободными параметрами модели являются параметры микротурбулентного и макротурбулентного уширения линии (Грей, 1980). В последнее десятилетие расширились возможности численного моделирования гидродинамических процессов и процессов лучистого переноса и появились модели атмосфер с размерностью больше единицы. Таким образом удалось освободить модели звездных атмосфер от перечисленных нефизичных параметров. Современная трехмерная модель атмосферы холодной звезды представляет собой последовательность одномерных моделей, зависимых от времени и точки на поверхности звезды. Для каждой точки (элементарной площадки) можно вычислить профили различных спектральных линий, а затем получить профили этих линий, проинтегрированные по видимой полусфере звезды. Поток излучения от поверхности, покрытой конвективными элементами (гранулами), определяется преимущественно более горячими (яркими) участками конвективных элементов. Эти участки поднимаются в атмосфере, доплеровские ядра линий, формирующихся в этих участках, имеют коротковолновое смещение. Холодные участки конвективных элементов, опускающиеся в атмосфере, дают длинноволновое смещение ядер линий, но вклад от холодных участков менее значителен из-за пониженной яркостной температуры. В области крыльев линий, где поток выше, вклад от холодных участков несколько выше. Интегральный профиль линии показывает небольшую асимметрию (синесмещенное ядро). Эффект асимметрии принято описывать бисекторами линий — кривыми, образованными совокупностью точек, равноудаленных от синего и красного крыльев линий на заданных уровнях остаточной интенсивности. Линии различной глубины формируются преимущественно при различных плотностях и температурах, поэтому указанный эффект асимметрии должен различаться от линии к линии (или между группами линий близкой интенсивности). Если число конвективных элементов невелико, т. е. эти элементы крупные, то эффект асимметрии будет являться и функцией времени. Лучевую скорость звезды уже нельзя описать одной величиной, поэтому эффекты асимметрии накладывают принципиальное ограничение на точность процедур определения лучевых скоростей кросс-корреляционными методами.

4.1.5 Влияние темного спутника

Близкий спутник может оказать влияние на форму спектральных линий центральной звезды посредством эффекта отражения (Шарбонье и др., 1998). По характеру возмущений профилей линий можно восстановить угол наклона орбиты, а затем и массу спутника. Метод позволяет определить также комбинацию радиуса и альбедо спутника. Требуемая точность регистрации профилей линий является сегодня предельно достижимой.

4.1.6 Гравитационное смещение

Амплитуда гравитационного красного смещения в атмосферах звезд достигает трех порядков: от 30 км/с в атмосферах белых карликов до 30 м/с в атмосферах сверхгигантов. Из-за неточностей в определении ускорения силы тяжести методом моделей атмосфер радиус и масса звезды не определяются точнее 5%, и для одиночной звезды гравитационное смещение не может быть вычислено точнее чем 50 м/с.

4.2 Инструментальные эффекты

Большинство реализованных методов измерения лучевых скоростей не являются ограниченными по точности со стороны квантовых шумов светоприемника. Основную роль играют ошибки, связанные с инструментальными эффектами. Такие ошибки можно разделить на две группы: связанные с пространственными различиями аппаратной функции по полю камеры спектрографа и связанные с изменениями аппаратной функции во времени.

4.2.1 Аппаратная функция и уровень сигнала

Кросс-корреляционные методы определения лучевых скоростей основаны на предположении о равноправности всех точек спектра (т. е. статистика сигнала в каждой точке отражает только наличие той или иной детали в спектре звезды, и каждая спектральная деталь искажена влиянием аппаратной функции спектрографа одинаково). Кроме того предполагается, что в спектре отсутствуют линии, имеющие другую лучевую скорость (например линии спектра земной атмосферы или линии спутника в случае наблюдений спектрально двойной звезды). Из-за эффектов виньетирования в камере спектрографа и эффекта изменения концентрации света вдоль порядка эшелле-спектра распределение энергии вдоль спектра изменяется. Если такой спектр обработать кросс-корреляционным методом — положение максимума корреляционной функции будет содержать ошибку, отражающую различный вес разных участков спектра. Следовательно, предварительно спектр звезды должен быть перенормирован (представлен, например, в единицах уровня непрерывного спектра). При такой нормировке уровень шумов в центральной и периферийных частях спектра различен. Из-за неидентичности аппаратной функции спектрографа по полю камеры возможны два эффекта. Во-первых, если ширина аппаратной функции неодинакова, чувствительность кросс-корреляционного метода окажется различной в центральной и периферийной частях спектра. Во-вторых, из-за дисторсии возможен эффект систематического занижения (завышения) лучевой скорости, определяемой по разным частям кадра. Если дисторсия симметрична относительно центра кадра, то такие систематические ошибки определения сдвига по противоположным частям кадра должны компенсироваться, но не полностью, т.к. распределение линий в спектре неравномерное.

4.2.2 Изменения параметров спектрографа

Нежесткость спектрографа также ограничивает точность измерения лучевой скорости. Если в промежутке между получением спектра исследуемой звезды и спектра звезды-стандарта лучевых скоростей изменяются относительное расположение оптических элементов спектрографа, их форма или показатели преломления — внутренняя точность метода в значительной мере будет обесценена. Сделаем оценки применительно к спектрографу НЭС.

При коэффициенте линейного расширения металла около 10^{-6} изменение температуры конструкции НЭС на 1° вызовет изменение фокусного расстояния коллиматора на 0.007 мм, что для случая автоколлимации приведет к уширению спектральной линии на 0.2 мкм. При факторе широкощельности НЭС (12) уширение спектральной линии в фокальной поверхности камеры не превосходит 0.02 мкм. На сдвигах линий уширение может проявиться только в случае асимметричных линий. При заведомо завышенной асимметрии (10%) указанное уширение линии может вызвать сдвиг не более чем на 0.002 мкм, что соответствует ошибке лучевой скорости 0.2 м/с. Следовательно, при изменении температуры металлической конструкции на 1° изменениями размеров прибора можно пренебречь.

Изменение показателя преломления воздуха составляет порядка 10^{-6} на 1° и 0.4×10^{-6} на 1 мм ртутного столба. Такой же величины будут изменения угла распространения луча (Зайдель и др., 1972). При фокусном расстоянии камеры $F = 600$ мм изменение температуры на 1° приведет к смещению положения спектральной линии на 0.6 мкм, что в случае спектрографа НЭС соответствует изменению лучевой скорости на 75 м/с. Изменение давления на 1 мм рт. ст. вызовет ошибку лучевой скорости на 30 м/с.

Изменения показателя преломления стекла в наибольшей степени проявляются в сдвигах линий у призменных приборов. У современных дифракционных спектрографов эти изменения проявляются из-за изменение фокусного расстояния линз. Изменение показателя преломления плавленого кварца, из которого изготовлена оптика зеркально-линзовой камеры НЭС, составляет 15×10^{-6} на 1°. Изменение фокусного расстояния происходит также и по закону линейного температурного расширения. Из суперпозиции этих двух факторов следует, что суммарным эффектом можно пренебречь.

Изменения постоянной дифракционной решетки при увеличении температуры на 1° оценили по формуле решетки, подставляя значения углов, характерные для эшелле R2 в автоколлимации. Угол дифракции уменьшится на 4×10^{-6}, что приведет к сдвигу линий на 2.4 мкм, эквивалентному изменению лучевой скорости на 300 м/с.

При конструировании современных спектрографов, предназначенных преимущественно для определения лучевых скоростей, решается, в частности, и задача минимизации перечисленных инструментальных эффектов.

5 Перспективные методы определения лучевых скоростей звезд

К числу перспективных отнесем дальнейшее совершенствование методов одновременной калибровки и развитие методов быстрого контроля и подстройки спектрографа. Фундаментальное различие методов состоит в том, выполняются ли измерения некогерентного излучения или когерентного. При работе с некогерентным излучением уже с начала 70-х годов первое место удерживают разновидности кросс-корреляционной техники, в основу которой положен принцип мультиплексности (Фелжет, 1955). Ограничения точности методов связаны с инструментальными эффектами, присущими дифракционным спектрографам. Эти же ограничения работают и в метрологической задаче точного определения длин волн линий различных атомов и ионов. Однако основные метрологические достижения прошедшего столетия обязаны использованию свойства когерентности. Это позволило уйти в область регистрации очень низких потоков излучения (например от передатчика марсианской миссии Викингов на Землю поступал сигнал 10^{-10} эрг/с, тогда как в задаче изучения колебаний фотосферы Солнца астроном оперирует с величинами порядка несколько эрг/с). Различие этих величин иллюстрирует перспективность когерентной техники по сравнению с некогерентной. Первым шагом для установления связи между исследуемым оптическим спектром и лабораторно тестируемой частотой явился принцип гетеродинной спектроскопии (Аббас и др., 1976). Но такой путь непригоден для спектроскопии в оптическом диапазоне. Во-первых, гетеродинный спектрометр может использоваться с телескопом, где диаметр изображения меньше диска Эйри (Конн, 1985). Для оптического диапазона это означает применение телескопа с диаметром объектива в несколько сантиметров. С этой точки зрения принцип гетеродинной спектроскопии подходит больше для орбитальных, дифракционно-ограниченных телескопов. Второе ограничение более фундаментальное — это узкая рабочая полоса гетеродинного спектрометра, определяемая полосой приемника. Существующие гетеродинные спектрометры работают в ИК-диапазоне, но там информация о лучевой скорости бедна и сложна, т. к. плотность линий звездного спектра низкая, а плотность теллурических линий высока.

Итак, кросс-корреляционная техника работы с некогерентным излучением показала высокую эффективность, но и сильную зависимость от инструментальных эффектов, тогда как принцип гетеродинирования, свободный от упомянутых инструментальных эффектов, неэффективен из-за трудностей выполнения условия когерентности. По-видимому, перспективными могут оказаться попытки сочетать достоинства этих принципов. Идеальным решением было бы сохранение принципа мультиплексности и контроль состояния спектрографа когерентными методами.

5.1 Проект поиска внесолнечных планет (HARPS)

HARPS (High Accuracy Radial-velocity Planetary Search) является спектрографом высокого разрешения, предназначенным для высокоточных измерений лучевых скоростей. Проектная точность HARPS составляет 1 м/с (Пепе и др., 2000). Светоприемником является мозаика из двух матриц ПЗС 4096×2048 элементов каждая, такие размеры позволяют регистрировать одновременно диапазон 380–680 нм с величиной спектрального разрешения R = 90000. Спектрограф имеет оптоволоконное сочетание с 3.6-м телескопом ЕЮО, отличающимся лучшим в мире монолитным зеркалом данного класса. Калибровка длин волн осуществляется спектром Th+Ar, регистрируемым одновременно со спектром исследуемой звезды. С этой целью на входе спектрографа установлены два оптоволоконных канала: звездный и калибровочный. Основной отличительной чертой HARPS является схема белого зрачка, суть которой состоит в том, что пучки, расходящиеся после эшелле, перехватываются зеркальным коллиматором и направляются на плоское зеркало, расположенное вблизи торца оптоволокна. Это зеркало отклоняет расходящиеся пучки на другую область зеркального коллиматора. Затем коллимированные монохроматические пучки попадают на гризму (призма плюс прозрачная решетка), непосредственно за которой установлена линзовая камера с матрицей ПЗС. Схема белого зрачка позволяет уменьшить апертуру камеры спектрографа, что крайне важно для достижения высокого разрешения. Вблизи узкого плоского зеркала установлена ограничивающая диафрагма, снижающая рассеянный свет. Из-за низкого уровня рассеянного света оказывается возможным разместить между порядками эшелле-спектра звезды систему порядков эшелле-спектра сравнения. Объем, в котором размещен спектрограф, вакуумирован, что, в сочетании с другими мерами, позволяет поддерживать температуру оптических элементов с точностью 0.01° C в течение ночи. Спектрограф вступил в строй в конце 2002 года. В целом, проект HARPS отражает стремление сохранить принцип мультиплексности при резком снижении инструментальных эффектов.

5.2 Схемы с эталоном Фабри-Перо

Проблема стабилизации крупногабаритных спектрографов заставила искать кардинальные решения — спектральный прибор должен быть малогабаритным (что позволяет его легко стабилизировать) и удобным в управлении. Естественно, обратиться к основному инструменту сверхвысокого разрешения — интерферометру (эталону) Фабри-Перо (ИФП или ЭФП), действие которого основано на прохождении света между двумя плоскопараллельными светоделительными поверхностями. В результате многократных отражений от полупрозрачных поверхностей в ИФП образуется ряд параллельных световых пучков. Если за эталоном поместить собирающую линзу, то в ее фокусе образуется ряд ярких колец, соответствующих различным порядкам интерференции. Интенсивность каждого последуюшего пучка в эталоне мало отличается от интенсивности предыдущего, что обуславливает высокую разрешающую способность прибора.

Соотношения, описывающие характеристики эталона Фабри-Перо, можно найти в учебниках (Толанский, 1955, Зайдель и др., 1972). Здесь только напомним основные закономерности. Угловая дисперсия эталона зависит лишь от длины волны и угла падения. Постоянная эталона — интервал длин волн, соответствующий расстоянию между соседними кольцами, равна отношению углового расстояния к угловой дисперсии. Разрешающая способность и контрастность эталона Фабри-Перо значительно увеличиваются при увеличении коэффициентов отражения зеркал r. Чем больше коэффициент отражения, тем выше требования к точности изготовления зеркал δt. Например, если $\mathrm{r} = 85\%$, то $\delta\mathrm{t} = \lambda/40$, а если $\mathrm{r} = 94\%$, то $\delta\mathrm{t} = \lambda/100$. Изменение температуры эталона, а также атмосферного давления смещает интерференционные кольца. Температурное смещение колец пропорционально толщине эталона. Однако изменение разности хода в результате расширения распорного кольца частично или полностью компенсируется уменьшением показателя преломления воздуха при повышении температуры.

Обратимся к примерам использования эталона Фабри-Перо в практике измерения лучевых скоростей.

При работе с эталоном Фабри-Перо требуется решить задачу выделения одного рабочего спектрального порядка эталона (путем применения интерференционного фильтра) или задачу пространственного разведения совокупности рабочих порядков (путем скрещивания ЭФП со спектральным прибором). Первый метод применен на БТА для массовых определений лучевых скоростей звезд в составе шаровых скоплений (Моисеев, 2002). При этом была достигнута точность 2 км/с для $\mathrm{m_V} = 17.5$. Стремление увеличивать спектральное разрешение ИФП вступает в конфликт с выделением одного рабочего порядка при помощи интерференционного фильтра. Поэтому наблюдения с высоким разрешением на ИФП возможны, если установить последовательно два (или даже три) ИФП. Параметры этих ИФП должны быть подобраны так, чтобы на выходе система имела только один порядок интерференции, а все соседние были погашены в отдельных ИФП. Такая система называется PEPSIOS (Миберн, 1979). Точность измерений лучевой скорости с PEPSIOS (Трауб и др., 1978): приведено для 1-м телескопа, за 1 час, для $\mathrm{m_V} = 2\,\delta\mathrm{V} = 10$ м/с. Достоинства систем PEPSIOS, очевидные в эпоху одноканальных светоприемников, сегодня не оправдывают значительных потерь света в такой схеме. Более перспективным является сочетание ИФП со спектрографом, оснащенным многоканальным светоприемником.

Существуют два основных типа совместной установки эталона и спектрографа — внутренняя и внешняя. При внутренней установке эталон помещается между коллиматором и диспергирующим элементом спектрографа. Достоинством такой установки является компактность, отсутствие дополнительных оптических деталей, возможность быстрой трансформации в обычный спектрограф. Недостаток внутренней установки — большое количество рассеяного света. При внешней установке эталон располагается в параллельном световом пучке, образованном конденсором, а дополнительный объектив строит изображения колец на входной щели. Внешняя установка дает меньшее количество рассеяного света. Метод скрещивания эталона со спектральными приборами существует давно, но в астрофизической практике известно лишь несколько применений эталона Фабри-Перо в сочетании с эшелле для наблюдений точечных объектов с высоким спектральным разрешением. Во-первых, это метод сканирования спектра одним порядком перестраемого эталона, скрещенного с эшелле, у которой широкополосным интерференционным фильтром выделен только один порядок дифракции, регистрация сигнала производилась одноэлементным приемником (Миберн, 1979). Во-вторых, такой же принцип использован со 100-канальным приемником типа Digicon (Серковски, 1976). В-третьих, была сделана попытка одновременной регистрации большого числа порядков интерференции, в этом случае применялась внутренняя установка эталона (Бэйтс и др., 1978, МакМиллан и др., 1985). Предложена схема использования ИФП в отраженном свете (Кохран и Янг, 1985), в этом случае на спектр звезды накладывается система узких абсорбций, положение которых определяется аппаратной функцией эталона. Исследование возможности применения эталона Фабри-Перо в высоких порядках интерференции ($m > 20000$) на БТА выполнено в работе Панчука (2000). Указан ряд возможных астрономических применений, таких, как изучение протяженных объектов с эмиссионными спектрами (протопланетарные туманности), исследование колебаний фотосферы Солнца путем регистрации отраженного (Луна) или рассеяного (дневное небо) света, спектрофотометрия протяженных источников с абсорбционными спектрами. (Применение ИФП на внешней установке со спектрографом НЭС БТА мы рассмотрим в отдельной статье). Использование ИФП как устройства, более светосильного, чем дифракционный спектрограф, обеспечивает достижение более высокого спектрального разрешения (при данной светосиле), и, следовательно, предоставляет принципиальную возможность увеличения точности измерения лучевой скорости. Состояние ИФП может контролироваться в когерентной области (Найденов и Чунтонов, 1976).

5.3 Метод абсолютной акселерометрии

Проблема измерения абсолютных значений лучевой скорости (в одной из систем) имеет ряд принципиальных ограничений (например трудности построения системы отсчета). Однако в большинстве задач, связанных с исследованиями небольших изменений лучевой скорости (астросейсмология, поиск планет), знание абсолютного значения скорости излишне, достаточно измерить величину изменения скорости (ускорение). П.Конн (1984) предложил следующее принципиальное решение проблемы: необходимо измерять не абсолютные скорости, а только изменения этих скоростей у данного объекта. Ускорения измеряются относительно первичных стандартов частоты. Прежде чем изложить технику метода акселерометрии, остановимся на астрофизической мотивации задачи и кратко суммируем развитие альтернативных технологий.

Выделяются две проблемы, требующие резкого повышения точности измерения лучевых скоростей: звездная сейсмология и поиск планет вне Солнечной системы (внесолнечных планет). Проблемы объединяются чисто технологически — в обоих случаях необходимо обойти астрофизические ограничения, налагаемые на задачу измерения лучевой скорости с точностью, превосходящей 10–20 м/с. Например, из-за турбулентных движений в атмосфере невозможно определить скорость движения центра звезды с ошибкой менее 100 м/с. Даже для Солнца, где турбулентные движения в атмосфере изучены достаточно подробно, обнаружение гравитационного красного смещения, эквивалентного поправке на 600 м/с, является проблемой. Однако сейсмические осцилляции лучевой скорости с амплитудой менее 0.1 м/с удалось обнаружить (Грец и др., 1980). Характерные цифры в проблеме поиска внесолнечных планет таковы: движение юпитероподобной планеты вокруг солнечноподобной звезды обеспечивает колебания центра масс системы с амплитудой 13 м/с и периодом в 12 лет. Пока нет надежды измерить абсолютную скорость с точностью в несколько м/с, т.к. атмосферные феномены могут маскировать движения центра масс (например в течение 11-летнего цикла солнечной активности форма магниточувствительных линий изменяется, т.е. изменяются положения центров таких линий). Поэтому и в проблеме поиска внесолнечных планет критичным является определение не абсолютной скорости, а ее изменений.

Какими техническими средствами решалась эта задача с момента постановки обеих проблем? В гелиосейсмологии первым измерителем колебаний явился магнитометр Бэбкока, применяемый по линиям с нулевой магнитной чувствительностью. При этом использовался свет от всего диска Солнца. Северный и др. (1976) применили методику сравнения излучения, поступающего от центральной части солнечного диска и от краевой зоны. Таким образом были обнаружены 160-минутные осцилляции лучевых скоростей. В звездной спектроскопии следует отметить работу Гриффинов (1973а,б), где ряд систематических ошибок был исключен путем привязки измерений линий фотографического звездного спектра к измерениям линий теллурического спектра. Смит (1982, 1983) отметил, что точность этого метода ограничена тропосферными ветрами. Идею реперного абсорбционного спектра развили Кэмпбэлл и Уокер (1979), используя абсорбционную ячейку, заполненную парами HF, более практичный вариант, на парах молекулы йода, развили Кохран и Хатцес (1992), Марси и Батлер (1992). Для сканирования одной линии звездного спектра Трауб и др. (1978) применили мультиплекс из эталонов Фабри-Перо. Преимущества работы по совокупности линий (7 линий в спектре Арктура) продемонстрировал Смит (1982, 1983), используя Reticon в спектрографе фокуса Кудэ. Серковски (1976, 1979) первым предложил сочетание эталона Фабри-Перо с эшелле-спектрографом, работающим в одном дифракционном порядке. Эту идею развили МакМиллан и др. (1985, 1993) и Панчук (2000), используя эшелле-спектрограф с матрицей ПЗС. П. Конн (1984) предложил метод акселерометрии, идея которого состоит в переносе измерений в когерентную область. Опишем принцип работы абсолютных солнечного и звездного акселерометров (Конн, 1984, 1985, 1994).

5.3.1 Абсолютный солнечный акселерометр

Основу солнечного акселерометра (Конн, 1985) составляет перестраиваемый интерферометр Фабри-Перо, через который проходит некогерентное излучение солнечного спектра, смешанное с когерентным излучением лазера с перестраиваемой частотой. После ИФП излучение попадает в дифракционный спектрограф, где регистрируется приемником с числом элементов не менее четырех. Два элемента регистрируют два соседних порядка ИФП, через которые проходит излучение, образованное в крыльях линии фотосферного спектра. ИФП перестраивается так, чтобы сигнал в обоих порядках был одинаков. При этой настройке ИФП линия излучения перестраиваемого лазера регистрируется в другом месте фокальной плоскости дифракционного спектрографа, где расположены два других элемента светоприемника, регистрирующие два других соседних порядка ИФП. Перестраивая частоту лазерного излучения, можно добиться равенства сигнала в этих порядках ИФП. Частота настройки лазера будет соответствовать положению центра тяжести измеряемой линии фотосферного спектра (разумеется, выполняется пересчет частоты с учетом номеров порядков). Остается измерить частоту настройки лазера. Эта процедура выполняется в канале калибровки частот, где излучение перестраиваемого лазера смешивается с излучением опорного лазера, работающего на стабилизированной частоте. При этом измеряется частота биений. Итак, в абсолютном солнечном акселерометре потоки в крыльях линии не измеряются, а выравниваются, состояние ИФП (расстояние между пластинами, или давление воздуха) также не измеряется, измеряется только частота, образованная комбинацией когерентного излучения опорного и перестраиваемого лазеров. Итоговым результатом является разность скоростей в два соседних момента наблюдения. Исходными параметрами являются скорость света и частота стабилизированного лазера, последняя известна с точностью 10^{-11}, что соответствует накопленной за год ошибке измерения в 3 мм/с. Точность метода прямопропорциональна ширине используемой линии фотосферного спектра и обратно-пропорциональна корню квадратному из числа отсчетов в солнечном канале, т.е. ограничена фотонными шумами. Техническую проблему, по-видимому, составляет диапазон изменения лучевой скорости от солнечной полусферы (± 300 м/с по обе стороны от меридиана в течение дня и ± 500 м/с в течение года, что соответствует диапазону изменения частот, не реализуемому в перестраиваемом лазере). Выход из затруднения видим в смене пары рабочих порядков ИФП на соседнюю.

5.3.2 Абсолютный звездный акселерометр

В отличие от солнечного акселерометра, в звездном недостает света. Поэтому основное требование к звездному акселерометру — работа по большому числу линий. Нежелательным, из энергетических соображений, является и размещение ИФП в основном канале с целью одновременной регистрации спектра звезды и ИФП. Эшелле-спектрограф с матрицей ПЗС, соединенный с телескопом или опорным каналом через оптоволоконный оптический коммутатор, регистрирует либо спектр звезды, либо непрерывное излучение, прошедшее через перестраиваемый ИФП (Конн, 1985, 1994). Пусть первой, опорной эпохе наблюдений звезды и канала ИФП соответствуют значения лучевой скорости звезды V1 и расстояния между пластинами эталона SP1. В последующую эпоху “2” скорость изменится к V2 и расстояние к SP2. Последствия для обоих спектров подобны — они смещаются вдоль шкалы частот. Задачей является подобрать такое значение SP2, чтобы смещения оказались равными. Каждый из зарегистрированных спектров сравнивается с опорным, при этом регистрируются две ошибки рассогласования. Первая, пропорциональная сдвигу звездного спектра относительно первого звездного, отправляется в спектрограф с целью стабилизации линий относительно элементов матрицы ПЗС. После этого регистрируется спектр ИФП. Вторая ошибка рассогласования, указывающая на разность между сдвигом звездных спектров (отражающим как изменения лучевой скорости, так и нестабильность спектрографа) и сдвигом спектров ИФП (отражающим только нестабильность спектрографа), служит для перенастройки ИФП. Перенастройка ИФП отражает изменения лучевой скорости, таким образом, спектр ИФП повторяет смещения звездного спектра. Степень перенастройки ИФП контролируется, как и в солнечном акселерометре, измерительным каналом, содержащим настраиваемый и опорный лазерные источники. Частота, образованная комбинацией частот лазеров, регистрируется гетеродинным детектором и измеряется частотомером. Изменение этой частоты такое же, как если бы один лазер находился на поверхности звезды, а второй — в точке наблюдателя. ПЗС-спектрограф работает как нулевое отсчетное устройство, т.е. сдвиг линий не измеряется, а только оценивается знак и порядок величины сдвига для оценки степени перенастройки ИФП. Численное моделирование процесса измерения изменения лучевой скорости на абсолютном звездном акселерометре (Конн, 1985) дает оценку ошибки $\delta \mathrm{V} = 0.16$ м/с для звезды $\mathrm{m_V} = 10$ при наблюдениях на 1-м телескопе в течение часа. При попытке достигнуть предел точности измерения изменений лучевой скорости на спектрографе ELODIE, периодически калибруемом посредством ИФП, эти оценки подтвердились (Конн и др., 1996). Основным недостатком абсолютного звездного акселерометра является последовательная регистрация звездного и калибровочного спектров, что сохраняет чувствительность метода к некоторым систематическим ошибкам, присущим дифракционным спектрографам. Поэтому в конструкции такого спектрографа должны быть предприняты меры по обеспечению стабильности на временах, сравнимых со временем экспозиции. На характерных временах регистрации всей совокупности спектров работает система “автоподстройки” спектрографа, т.е. стабилизации положения линий относительно элементов матрицы ПЗС.

5.4 Интерферометр внешней дисперсии

Предложена и испытана схема доплеровского измерителя, представляющего собой гибрид недиспергирующего интерферометра Майкельсона и дифракционного спектрографа (Ге и др., 2002б; Эрскин, 2003). Интерферометр с фиксированной разностью хода установлен перед входом в дифракционный спектрограф. В фокальной плоскости спектрографа на спектре объекта формируется система фазовых полос, соответствующих абсорбционным линиям. Эффект Доплера сдвигает фазовую полосу для каждой спектральной линии, этот сдвиг практически одинаков для всего регистрируемого спектрального диапазона. Такие фазовые полосы наблюдаются и с эталоном Фабри-Перо на внешней установке (см. рис. 4 — 8 в работе Панчука, 2000), но интерферометр Майкельсона является более светосильным прибором, чем ЭФП. По сравнению с голографическим гетеродинным спектрографом (Дуглас и др., 1991; Франдсен и др., 1993), где дифракционная решетка установлена в одном из плеч интерферометра, рассматриваемый метод имеет значительно более широкую спектральную полосу.

5.5 Бесщелевой спектрограф с интерферометрическими реперами

Напомним еще об одном решении проблемы нестабильности дифракционного спектрографа. Линник (1961) предложил схему бесщелевого дифракционного спектрографа, в который включена плоскопараллельная пластинка (или система пластинок), формирующая интерференционные полосы. Эти полосы могут быть использованы в качестве реперов (“спектр” сравнения). Достоинствами схемы является одновременность позиционной калибровки (система полос формируется излучением исследуемой звезды) и нечувствительность к механическим деформациям спектрографа. Одновременно был предложен оригинальный способ автоматического гидирования посредством смещения полевой линзы коллиматора.

6 Соответствие методов и задач

Кратко остановимся на адекватности методов измерения лучевых скоростей решаемым задачам. Показано (Конн, 1985), что с применением многоэлементных спектрографов ошибка измерения лучевой скорости может быть существенно понижена (в 30 раз) относительно одноканального спектрометра типа CORAVEL. Поэтому из области точных измерений лучевых скоростей одноэлементные методы сегодня вытеснены.

6.1 Одновременные измерения лучевых скоростей

Задача решается либо применением устанавливаемого в редукторе светосилы перестраиваемого ИФП, работающего в одном порядке, выделенном интерференционным фильтром (Моисеев, 2002), либо применением многообъектных оптоволоконных спектрографов (Счентгиорги и др., 1998). В первом случае реализуются точности выше 1–2 км/с, достаточные, например, для решения задачи о дисперсии скоростей звезд в составе шаровых скоплений. Во втором случае точность зависит от схемы и конструкции дифракционного спектрографа, но ограничивается из-за неполного перемешивания апертур в световодах небольшой длины и возникающими отсюда ошибками вследствие неточной центрировки изображений звезд на торцах световодов и неточного гидирования.

6.2 Массовые измерения лучевых скоростей

Задача измерения скоростей звезд в составе рассеянных скоплений, ассоциаций, или в поле, не может быть решена методами одновременной спектроскопии совокупности объектов. Последовательное измерение сотен звезд требует усилий по оптимизации метода наблюдений. В качестве удачного примера приведем спектрограф Лэтэма (1985), где метод регистрации счетчиком фотонов или линейкой ПЗС в избранном порядке эшелле дополнялся кросс-корреляционным сравнением с эталонным спектром звезды (Вет, 1985). При 15-ти отсчетах на канал (или 90 отсчетов на элемент спектрального разрешения) на 1.5-м телескопе удалось достичь точности 0.7 км/с для звезд в составе рассеянных скоплений (Мэтью и др., 1986). Современный подход к решению этой задачи предусматривает применение стабилизированных оптоволоконных эшелле-спектрографов, снабженных перемешивателем апертур (скрамблером).

6.3 Массовые измерения эмиссионных спектров

При измерении сдвигов эмиссионных линий разведение порядков эшелле-спектра необязательно. Следовательно, можно сэкономить свет, исключив из схемы спектрографа элемент скрещенной дисперсии, а также выиграть на снижении вклада от шумов считывания, располагая весь эшелле-спектр в одну линию (Панчук и др., 1999б). К сожалению, метод не получил широкого практического применения. Было показано, что метод регистрации неразведенных порядков эшелле-спектра пригоден и в случае абсорбционных спектров (Клочкова, 2001), но этот метод еще предстоит оптимизировать по числу используемых порядков в избранном диапазоне длин волн. При этом упрощается задача одновременной регистрации спектра сравнения.

6.4 Высокоточные измерения скоростей отдельных звезд

Здесь успешно конкурируют два метода: наблюдения через абсорбционную йодную ячейку и оптоволоконные наблюдения с одновременной регистрацией спектра сравнения (ELODIE, CORALIE, FEROS, HARPS). Первый метод предпочтителен на телескопах большого диаметра, где оптоволоконное сочетание еще представляет проблему. (Решение этой проблемы мы видим в переносе на спектрографы высокого разрешения техники мультизрачковых спектрографов среднего разрешения, где проблема эффективного использования света решена путем сочетания многолинзового блока с оптоволоконным входом). Точности, характерные для абсорбционных ячеек и двухволоконных спектрографов, составляют от 20 до 5 м/с. Абсорбционные ячейки применяются, в среднем, на инструментах бо̀льшего диаметра.

Кроме этих двух методов, интерес заслуживают варианты скрещивания сканирующего интерферометра Фабри-Перо с эшелле-спектрографом, т.к. результатом сканирования является набор значений интенсивности излучения, пропущенного в порядках ИФП. Следовательно, от задачи измерения смещений линий мы переходим к задаче измерения интенсивностей, что намного экономичней (общее доказательство этого утверждения приведем в отдельной статье).

6.5 Измерения, ограниченные свойствами светоприемника

Как правило, рассматриваются ограничения фотонными шумами. Строго говоря, всегда можно найти настолько слабый объект, точность определения лучевой скорости которого ограничена, например, шумом считывания матрицы ПЗС. Усилия по снижению шумов считывания должны сопровождаться улучшением "косметических" характеристик матриц ПЗС (матрицы с неудовлетворительной косметикой непригодны для кросс-корреляционной техники). Для более ярких объектов наступает ситуация, когда точность ограничивается свойствами спектрального прибора (инструментальные ошибки) и особенностями метода наблюдений. Максимальная чувствительность кросс-корреляционной методики для звезд солнечного типа достигается вблизи 4300 и 5100 ÅÅ, оптимальное спектральное разрешение при переходе от 3500 до 7000 Å уменьшается вдвое, составляя в среднем R = 45000 (Мерлин, 1985). При спектральном разрешении R = 60000, среднем для спектрографа НЭС, в области 4300 Å средний наклон элемента солнечного спектра составляет величину уровня континуума на половину ангстрема. Достижение точности 3 м/с по измерениям одной точки, имеющей такой среднестатистический наклон, требует обеспечить уровень сигнала S/N = 10000. Эту величина понижается в корень квадратный из числа элементов разрешения, т. е. в 26 раз для одного эшелле-порядка НЭС. Используя 10–15 порядков эшелле-кадра, получим условие S/N = 100, реализуемое за 1 час при средних атмосферных условиях для звезд m_B = 8–9 (Панчук и др., 2002). В режиме теплового удара инструментальные нестабильности НЭС могут достигать 10 м/с за 10 минут. Таким образом, ограничение точности лучевой скорости свойствами светоприемника наступает скорее от возрастания скважности (время считывания сравнимо со временем экспозиции), чем со стороны шумов считывания. В эпоху “медленных” фотоэлектрических приемников — матриц ПЗС, модуляционные методы, разработанные в основном для борьбы с нестабильностями на входе спектрометра, оказались вытесненными. Не исключено, что с появлением “быстрых” матриц ПЗС удастся модернизировать часть старых приемов, разработанных для одно- и двухканальных систем. Кроме того, применение быстродействующих матриц ПЗС позволит обратиться к задаче создания адаптивного спектрального прибора.

7 Выводы

В историческом аспекте перечислены основные составляющие методической части проблемы увеличения точности определения лучевых скоростей звезд. Эта проблема стимулирует развитие спектроскопической техники на протяжении целого столетия. Приведены избранные параметры типичных дифракционных спектрографов. Указано, что в классических спектроскопических методах основные затруднения возникают на рубеже 100 м/с, причинами тому являются нестабильность освещенности щели, температурное изменение постоянной дифракционной решетки и нежесткость модуля светоприемника. Область точностей лучше 100 м/с принадлежит приборам, где осуществляется периодическая (между научными экспозициями), квазиодновременная (двухволоконный метод), или одновременная (абсорбционная ячейка, ЭФП в отраженном свете) позиционная калибровка. Размещение современных эшелле-спектрографов непосредственно на крупных телескопах (Keck, VLT) существенно повышает световую эффективность спектрографов, что компенсирует незначительные потери в точности определения лучевых скоростей, связанные с локализацией приборов на подвижных нэсмитовских платформах. Внедрение высокоэффективных многоэлементных светоприемников и быстродействующих ЭВМ значительно снизило остроту задачи позиционной стабилизации спектрографа для большинства исследований и привело к формулировке новых проблем, требующих точностей в несколько м/с. Перечислены астрофизические ограничения процедуры определения лучевой скорости звезд. Обсуждаются перспективные методы определения лучевых скоростей.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 01-02-16093а), федеральной программы “Астрономия” (проект 2.1.5.5), программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной”.

Список литературы

Аббас и др. (Abbas M., Mumma M., Kostiuk T., Buhl D.), 1976, *Appl. Opt.*, **15**, 427
Афанасьев В.Л., 1990, "Структура и эволюция активных галактик". Дисс. д.ф.-м.н., Бюракан
Балега И.И., Верещагина Р.Г., Маркелов С.В. и др., 1979, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **11**, 248
Баранн и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.), 1979, *Vistas in Astronomy*, **23**, 279
Бем-Витензе Э., 1964, в сб. Космическая газодинамика, М., Мир, с.462

Бодра и Бем (J.Baudrand, T.Böhm), 1992, *Astron. Astrophys.*, **259** 711

Боксенберг и Барджесс (A.Boksenberg, D.E.Burgess), 1973, Proc. Symp. on Television Type Sensors, p.21, eds. J.W.Glaspey & G.A.H.Walker, held in University of Columbia, Vancouver

Борисенко и др. (Borisenko A.N., Markelov S.V., Ryadchenko V.P.), 1991, *Preprint SAO*, **76**

Браун и др. (Brown T.M., Noyes R.W., Nisenson P., Korzennik S.G., Horner S.), 1994, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **106**, 1285

Брукс и др. (Brookes et al.),1978, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **185**, 1

Брунинг (Bruning D.H.), 1984, *Bull. AAS,*, **16**, 577

Бэбкок (H.W.Babcock), 1953, *Astrophys. J.*, **118**, 387

Бэйтс и др. (Bates B., McCartney D.J., McKeith C.D., McQuoid A., Sproule O.E.), 1978, *Appl. Opt.*, **17**, 2119

Варшалович Д.А., Панчук В.Е., Иванчик А.В., 1996, *Письма Астрон. ж.*, **22**, 8

Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В., Пейсахсон И.В., 1977, *Оптико-механическая промышленность*, **2**, 31

Вет (Wyatt W.F.), 1985, in IAU Colloq., No.88, Stellar Radial Velocities, ed. A.G.Davis Phillip and D.W.Latham (Schenectady, Davis), p.123

Вишневский Г.И., Булгаков А.Г., Выдревич М.Г., Зинчик Ю.С., Коссов В.Г., Лазовский Л.Ю., 1992, *Электронная промышленность*, **2**, 37

Воган и др. (Vaughan A.H., Baliunas S.L., Middelkoop F., Hartmann L.W., Mihalas D., Noyes R.W., Preston G.W.), 1981, *Astrophys. J.*, **250**, 276

Ге и др. (Ge J., Angel J.R.P., Jacobsen B., Woolf N., Fugate R.Q., Black J.H.), 2002a, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **114**, 879

Ге и др. (Ge J., Erskine D., Rushford M.), 2002б, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **114**, 1016

Грей Д.Ф., 1980, "Наблюдения и анализ звездных фотосфер", М: “Мир”

Грец и др. (Grec G., Fossat E., Vernin J.), 1976, *Astron. Astrophys.*, **50**, 221

Грец и др. (Grec G., Fossat E., Pomerantz M.), 1980, *Nature*, **288**, 541

Гриффин (Griffin R.F.), 1967, *Astrophys. J.*, **148**, 465

Гриффин и Ганн (Griffin R., Gunn J.E.), 1974, *Astrophys. J.*, **191**, 545

Гриффин и Гриффин (Griffin R., Griffin R.) 1973a, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **162**, 143

Гриффин и Гриффин (Griffin R., Griffin R.) 1973б, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **162**, 255

Да Коста и др. (Da Costa G.C., Freeman K.C., Kalnajs A.J., Rodgers A.W., Stapinski T.E.), 1977, *Astron. J.*, **82**, 810

Деккер и др. (Dekker H., Delabre B., Hess G., Kotzlowski H.), 1992, ESO Techn. Prepr. **47**

Д’Одорико (S. D’Odorico), 2000, *ESO Messenger*, **99**, 1

Дуглас и др. (Douglas N., Maaswinkel F., Butcher H., Frandsen S.), 1991, *ESO Techn. Rep.*, **15**

Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И., 1972, Техника и практика спектроскопии., “Наука”, Москва

Иоаннисиани Б.К., 1970, *Оптико-механич. промышл.*, **4**, 37

Исаак (Isaak G.R.), 1961, *Nature*, **189**, 373

Кауфер и Паскуини (Kaufer A., Pasquini L.), 1998, *Proc. SPIE*, **3355**, 844

Кауфер и др. (Kaufer A., Stahl O., Tubbesing S., Norregaard P., Avila G., Francois P., Pasquini L., Pizzella A.), 1999, ESO Messenger,**95**, 8

Келоз (Queloz D.), 1995, In “New Development in Array Technology and Applications”, A.G.Davis Phillip et al. (eds.) p.221.

Килер (Keeler J.E.), 1894, *Publ. Lick Obs.*, **3**, 195

Клочкова В.Г. и Панчук В.Е., 1991, *Препринт САО*, **70**

Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Рядченко В.П., 1991, *Письма Астрон. ж.*, **17**, 645

Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., 1999, *Препринт САО*, **137**

Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., 2001, *Препринт САО*, **152**

Клочкова В.Г., Ченцов Е.Л., Таволжанская Н.С., Проскурова Г.А., 2003, *Препринт САО*, **183**

Конн (Connes P.), 1984, In Proceedings of the workshop on “Space research prospects in stellar activity and variability”, held at Observatoire de Paris, Meudon, Feb.29 - March 1 and 2

Конн (Connes P.), 1985, *Astrophys. and Space Sci.*, **110** 211

Конн (Connes P.), 1994, *Astrophys. and Space Sci.*, **212**, 357

Конн и др. (Connes P., Martic M., Schmitt J.), 1996 *Astrophys. and Space Sci.*, **241**, 61
Копылов И.М., Стешенко Н.В., 1965, *Изв. КрАО*, **33**, 308
Кохран и Янг (Cochran, Young B.W.), 1985, in IAU Colloq., No.88, Stellar Radial Velocities, ed. A.G.Davis Phillip and D.W.Latham (Schenectady, Davis) p.109
Крафт (Kraft R.), 1978, *Observatory*, **98**, 248
Кэмпбелл (Campbell B.), 1983 *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **95**, 577
Кэмпбелл и Уокер (Campbell B., Walker G.A.H.), 1979, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **91**, 540
Лэтэм (Latham D.W.), 1985, in IAU Colloq., **88**, Stellar Radial Velocities, ed. A.G.Davis Phillip and D.W.Latham (Schenectady, Davis) p.21
Ливингстон (Livingston W.C.), 1982, *Nature*, **297**, 208
Линник В.П., 1961, в сб. "Новая техника в астрономии"Изд. АН СССР, вып.1 с.176
МакМиллан и др. (McMillan R.S., Smith P.H., Frecker J.E., Merline W.J., Perry M.L.), 1985, in IAU Colloq., **88**, Stellar Radial Velocities, ed. A.G.Davis Phillip and D.W.Latham (Schenectady, Davis) p.63
МакМиллан и др. (McMillan R.S., Moore T., Perry M.L., Smith P.H.), 1993, *Astrophys. J.*, **403**, 801
Марси и Батлер (Marcy G.W., Butler R.P.), 1992, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **104**, 270
Мерлин (Merline W.J.), 1985, in IAU Colloq., **88**, Stellar Radial Velocities, ed. A.G.Davis Phillip and D.W.Latham (Schenectady, Davis) p.87
Миберн Дж., 1979, "Обнаружение и спектрометрия слабых источников света". М., Мир
Моисеев А.В., 2002, *Препринт САО*, **166**
Мэтью и др. (Mathieu R.D., Latham D.W., Griffin R.F., Gunn J.E.), 1986, *Astron. J.*, **92**, 1100
Найденов И.Д., Чунтонов Г.А., 1976, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **8** 139
Найденов И.Д., 2003, "Приборы и методы для спектрополяриметрических исследований на 6-метровом телескопе". Дисс. д.т.н., С-Петербург
Никулин Н.С., Северный А.Б., Степанов В.Е., 1958, *Изв.КрАО*, **19**, 3
Ногучи и др. (Noguchi K., Aoki W., Kawanomoto S., Ando H., Honda S., Izumiura H., Kambe E., Okita K., Sadakane K., Sato B., Tajitsu A., Takada-Hidai M., Tanaka W., Watanabe E., Yoshida M.), 2002, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **54**, 855
Оук (J.B.Oke), 1969, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **81**, 11
Оук и Ганн (J.B.Oke, J.B.Gunn), 1982, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **94**, 586
Панчук и др. (Panchuk V.E., Yermakov S.V., Bondarenko Yu.N.), 1998, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, **44**, 132
Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., 1999а, *Препринт САО*, **135**
Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., Витриченко Э.А., Викульев Н.А., Романенко В.П., 1999б, *Препринт САО*, **139**
Панчук В.Е., 2000, *Препринт САО*, **144**
Панчук В.Е., 2001, *Препринт САО*, **154**
Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В., 2002а, *Препринт САО*, **169**
Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Пискунов Н.Е., Монин Д.Н., Юшкин М.В., Ермаков С.В., Найденов И.Д., 2002б, *Препринт САО*, **170**
Пепе и др. (Pepe F., Mayor M., Delabre B., Kohler D., Lacroix D., Queloz D., Udry S., Benz W., Bertaux J.-L., Sivan J.-P.), 2000, *Proc. of SPIE*, **4008**, 582
Петри и Гирлинг (Petrie R.M., Girling S.S.), 1948, *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, **42**, 226
Родди (Roddier F.), 1965, *Annales d'Astrophys.*, **28**, 463
Рядченко В.П., 1992, "Разработка ПЗС-систем и их применение в фотометрических и спектральных исследованиях на 6-м телескопе". Дисс. к.ф.-м.н., Нижний Архыз
Северный А.Б., 1966, *Астрон. ж.*, **43**, 465
Северный А.Б., Стешенко Н.В., Хохлова В.Л., 1960, *Астрон. ж.*, **37**, 23
Северный и др. (Severny A., Kotov A., Tsap T.), 1976, *Nature*, **259**, 87
Серковски (Serkowski K.), 1972, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **84**, 649
Серковски (Serkowski K.), 1976, *Icarus*, **27**, 13
Серковски (Serkowski K.), 1979, *Proc. of SPIE*, **172**, 130
Смит (Smith M.), 1982, *Astrophys. J.*, **253**, 727
Смит (Smith M.), 1983, *Astrophys. J.*, **265**, 325
Счентгиорги и др. (Szentgyorgyi A.H., Cheimets P., Eng R., Fabricant D.C., Geary J.C., Hartmann L., Pieri M.R., Roll J.B.), 1998, *Proc. SPIE*, **3355**, 242
Талл и др. (Tull R.G., MacQueen P.J., Sneden C., Lambert D.L.), 1995, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **107**, 251

Токовинин А.А., 1987, *Астрон. ж.*, **64**, 196
Толанский С., 1955, "Спектроскопия высокой разрешающей силы". М. ИЛ.
Трауб и др. (Traub W., Mariska J., Carleton N.), 1978, *Astrophys. J.*, **223**, 583
Феленбок и Гьерин (P.Felenbok, J.Gue'rin), 1988, in The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics. G.Caurel de Strobel and M.Spite (eds.), p.31.
Фелжетт (Felget P. B.), 1955, *Optica Acta*, **2**, 9
Фогт (Fogt S.S.), 1992, in Proceedings of the "High resolution spectroscopy with the VLT", ed. M.-H. Ulrich, ESO Conf. and Workshop Proc. **40**, 223
Фосса и Родди (Fossat E., Roddier F.), 1971, *Sol. Phys.*, **12**, 352
Фосса и др. (Fossat E., Gelly B., Grec G., Decanini Y.), 1984, *Compt. Rend. Acad. Sci.*, **297**, 17
Франдсен и др. (Frandsen S., Douglas N., Butcher H.), 1993, *Astron. Astrophys.*, **279**, 310
Хатцес и Кохран (Hatzes A.P., Cochran W.D.), 1992, in Proceedings of the "High resolution spectroscopy with the VLT", ed. M.-H. Ulrich, ESO Conf. and Workshop Proc. **40**, 279
Ченцов Е.Л., 1980, "Спектроскопические проявления нестационарности белых сверхгигантов". Дисс. к.ф.-м.н., ЭССР, Тарту
Ченцов и др. (Chentsov E.L., Klochkova V.G., Tavolganskaya N.S.), 1999, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, **48**, 25
Ченцов Е.Л., Ермаков С.В., Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Бьеркман К., Мирошниченко А.С., 2001, *Препринт САО*, **161**
Шарбонье и др. (Charbonneau D., Jha S., Noyes R.W.), 1998, *Astrophys. J.*, **507**, 153
Шредер (Schroeder D.J.), 1967, *Appl. Opt.*, **6**, 1976
Шредер и Андерсон (Schroeder D.J., Anderson C.M.), 1971, *Publ. Astr. Soc. Pacific.* **83**, 438
Щеглов П.В., 1963, "Электронная телескопия". М.: Физматгиз
Эрскин (Erskine D.J.), 2003, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **115**, 255