ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД

В. Е. Панчук[1], В. Г. Клочкова[1], М. Е. Сачков[2], М. В. Юшкин[1]

© 2009

[1]*Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
367167 Россия, п. Нижний Архыз

[2]*Институт астрономии РАН*
119017 Россия, Москва, ул. Пятницкая, 48
e-mail: panchuk@sao.ru

В работе рассмотрены основные этапы развития техники определения лучевых скоростей звезд.

Положения спектральных линий, а затем и их смещения, являются основными характеристиками (наряду с интенсивностями линий), получаемыми астрономами в результате регистрации звездных спектров. Первые измерения доплеровских смещений выполнены задолго до формирования представлений о строении атома, механизмах возбуждения уровней, процессах ионизации и переноса излучения в звездной атмосфере. Поэтому многочисленные сведения об интенсивностях линий, полученные в результате обзоров с предобъективной призмой, долгое время оставались без физической интерпретации. В отличие от измерения интенсивностей, первые фотографические измерения лучевых скоростей получали однозначную физическую трактовку (например, периодические изменения доплеровских смещений рассматривались как проявление двойственности [16]). Развитие техники измерения лучевых скоростей V_R обозначим следующими этапами.

I. Призменные спектрографы, устанавливаемые на рефракторах [30]. Наилучшая точность определений V_R, достигнутая в работах Белопольского и Киилера, составляла 2–3 км/с и ограничивалась как дифференциальными гнутиями спектрографа, так и недостаточным числом измеряемых линий. Хроматизм объективов большинства крупных рефракторов XIX века был исправлен для визуальных лучей, поэтому для расширения одновременно регистрируемого диапазона длин волн применялась корректирующая оптика [17, 31].

II. Призменные спектрографы, устанавливаемые на рефлекторах [11, 35]. Применение двухточечной системы разгрузки и термостатирование спектрографа позволило сохранить высокую точность (например 2.4 км/с в каталоге [12]), причем уже на длительных экспозициях.

III. Призменные [10] и дифракционные [18] спектрографы, устанавливаемые в неподвижном фокусе (coudé) рефлекторов. При наблюдениях с высоким спектральным разрешением проявился очередной источник ошибок измерения V_R – неоднозначность построения дисперсионной кривой (обусловленная использованием различных источников спектра сравнения, применением полеспрямляющих линз в камерах Шмидта, уровнем математической аппроксимации дисперсионной кривой). Типичные точности определения V_R по фотографическим спектрограммам, получаемым в фокусах кудэ и Кассегрена, в функции проекции скорости осевого вращения ($V \sin i$) и уширения спектрограммы, приведены в [9].

IV. Массовые определения лучевых скоростей с предобъективной призмой. Такая возможность обсуждалась еще в начале XX века, но собственно измерения V_R по бесщелевым спектрам отстали от работ по массовой спектральной классификации почти на полстолетия. Причин тому несколько: необходимость точного учета изменения дисперсии по полю камеры, механические деформации конструкции камеры, проблема формирования реперов в поле камеры, и, как следствие, в целом низкая точность методов (по сравнению со щелевой спектроскопией). Здесь укажем только два способа создания реперов – использование водного раствора NdCl3 в качестве фильтра, формирующего абсорбционную деталь $\lambda = 4273$ Å непосредственно на спектре каждой звезды [8], и построение звездных изображений, получаемых путем компенсации дисперсии для центральной части апертуры призменной камеры [4]. Получаемые при этом ошибки V_R составляли 12 и 7 км/с соответственно. Наиболее эффективным оказался метод оборачиваемой призмы [22], обеспечивающий точность до 4–5 км/с.

V. Следующим продуктивным этапом является внедрение корреляционного одноканального метода измерения, обоснованного в [23] и впервые реализованного в [27]. Эффективность метода возросла после применения схемы скрещенной дисперсии [13]. Точности корреляционного фотометра лучевых скоростей ($\sim$0.5–1 км/с) были такими же, что и при фотографической спектроскопии в фокусе кудэ, но фотоэлектрическим измерениям были доступны более слабые звезды, а обработка результатов наблюдений была принципиально менее трудоемкой. Из-за высокой проницающей способности и технической простоты, метод являлся основным для массовых определений V_R на протяжении конца 70-х – начала 90-х годов.

VI. Основная идея поляриметрического метода [38] состоит в калибровке по длине волны для каждого элемента разрешения. На входе прибора создается искусственная линейная поляризация, затем следует фазосдвигающий элемент (двулучепреломляющий кристалл, обеспечивающий интерференцию обыкновенного и необыкновенного лучей), затем – четвертьволновая пластинка. На выходе такого устройства плоскость поляризации быстро вращается с длиной волны (поворот на 180° за каждые 3.5 Å). Для каждого угла положения поляризатора измеряются интенсивности в каналах. Калибровка по длинам волн сводится к точному измерению угла поляризации и не зависит от положения звезды на щели (последнее обеспечивает уникальную широкощельность метода). При потерях на поляриметрическом узле калибровки в 20% точность измерения V_R в 1 км/с для звезды $m_V = 10^m$ достигалась на 2-метровом телескопе за 4 минуты (с регистрацией спектра на Digicon'е) [39]. Таким образом, Серковски был первым, кто вынес задачу позиционной калибровки спектра из фокальной плоскости спектрографа (оставив за спектрографом функцию измерения интенсивностей в каналах).

VII. Вторым решением указанной задачи является сочетание интерферометра Фабри–Перо (ИФП) с дифракционным спектрографом [40]. Ширина аппаратной функции ИФП на $\lambda = 4260$ Å составляла $\delta\lambda = 0.06$ Å, а расстояние между соседними порядками $\Delta\lambda = 0.625$ Å. Сканирование спектра осуществлялось наклоном ИФП, установленного перед спектрографом скрещенной дисперсии (внешняя установка ИФП), состояние ИФП контролировалось He–Ne лазером. Была достигнута точность измерений лучевой скорости 10 м/с.

ИФП на внутренней установке применен в баллонном УФ-эксперименте [15]. Сканирование (изменение положения аппаратной функции ИФП) осуществлялось наклонами вторичного зеркала стратосферного телескопа, изображение звезды перемещалось вдоль входной щели спектрографа, обеспечивая изменение угла наклона падения коллимированного пучка на ИФП. Обработка интерферограммы, зарегистрированной на фотопленке, позволяла получить спектральное разрешение $R = 105$ в спектральном интервале длиной 120 Å.

VIII. Успехи гелиосейсмологии стимулировали попытки исследований спектра колебаний давления, аналогичных солнечным. В начале 80-х был разработан метод резонансной ячейки [37]. Для измерения колебаний необходимо изготовить пару фильтров, шириной не более 0.1 Å, центры которых расположены симметрично на крыльях абсорбционной линии. При изменении относительной скорости "звезда – наблюдатель" изменяются потоки в фильтрах. Магнитооптический фильтр представляет собой ячейку, заполненную парами натрия, помещенную в продольное магнитное поле между двумя скрещенными поляризаторами. Таким образом ячейка блокирует весь спектр звезды, пропуская только те длины волн, для которых происходит магнитооптический эффект на атомах натрия. Изменяя величину магнитного поля и температуру паров, можно оптимизировать форму фильтра и пропускание. От звезды $m_V = 0^m$ на 4-метровом телескопе в течение ночи можно было обнаружить одномодовые колебания с амплитудой 50 см/с. Дневные перерывы в наблюдениях приводят к проблемам частотного анализа, которые, как и в случае гелиосейсмологии, предполагалось решить путем согласованных наблюдений на двух больших телескопах, разнесенных по долготе. В работе [26] были обнаружены солнечноподобные осцилляции у Проциона и α Cen с максимальными амплитудами 70 и 150 см/с соответственно.

IX. Развитие многоканальных цифровых методов регистрации позволило внедрить корреляционные методы, где фрагмент спектра звезды сравнивался либо со спектром звезды – стандарта лучевой скорости, либо с теоретическим спектром, рассчитанным по модели атмосферы с фундаментальными параметрами, соответствующими фотометрическим характеристикам исследуемой звезды. Эти методы открывали возможность работать со спектрами, имеющими низкое отношение сигнал/шум (до S/N $\sim$ 5). На телескопах среднего диаметра были выполнены спектроскопические обзоры слабых звезд [32], где V_R измерялась с точностью $\sim$0.5 км/с.

X. Дальнейшее повышение точности измерений V_R было связано с обеспечением идентичности заполнения апертуры спектрографа светом звезды и светом калибровки (лампы с полым катодом). Естественной абсорбционной ячейкой, установленной перед спектрографом, является земная атмосфера. Точность около 30 м/с была получена по фотографическим спектрам самых ярких звезд неба с привязкой к теллурическому спектру [28]. Вследствие вариаций ветра, температуры и давления в земной атмосфере, теллурический спектр не является идеально стабильным. Абсорбционная ячейка, заполненная парами HF, применялась в качестве репера при спектроскопии с использованием линейки Reticon [19]. Распространение получили ячейки, заполненные парами молекулярного йода, что в сочетании с матрицами ПЗС на спектрографах скрещенной дисперсии позволило довести точности до 10 м/с [33]. Точность метода абсорбционной ячейки ограничивается, в основном, изменением аппаратной функции системы "телескоп–спектрограф", возникающим из-за различного заполнения апертуры спектрографа при наблюдениях на различных зенитных расстояниях [6].

XI. Большое влияние на развитие методов, альтернативных дифракционной спектроскопии, оказала работа [1], где был обоснован интерференционно-фазовый метод исследования спектров. Для измерения доплеровских сдвигов предлагалось использовать интерферометр постоянного сдвига. При картировании солнечной атмосферы была получена точность 3 м/с [2]. Для измерения четырех интегральных параметров спектральной линии (центр тяжести, ширина, асимметрия, площадь) использовались два интерферометра с различной величиной сдвига.

XII. Вторым (после метода резонансной натриевой ячейки) методом, позволяющим преодолеть рубеж точности измерения V_R в 1 м/с, явился метод абсолютной астрономической акселерометрии (AAA), предложенный в [20]. Идея метода состоит в замене измерений некогерентного излучения измерениями когерентного излучения. Как и в методах Серковского (пп. VI и VII), спектрограф используется только для измерения интенсивностей в каналах. В спектрограф попеременно (посредством оптоволоконного коммутатора) подается излучение звезды или (пропущенное через перестраиваемый ИФП) излучение лампы непрерывного спектра. Относительный сдвиг звездных спектров содержит изменение лучевой скорости между экспозициями и смещения вследствие нестабильности спектрографа. Относительный сдвиг спектров ИФП отражает только нестабильности спектрографа. Рассогласование между сдвигами в звездном и интерферометрическом каналах не измеряется, а компенсируется перенастройкой ИФП, т. е. изменения лучевой скорости звезды переносятся в измененное состояние ИФП. Это состояние отражается в изменении частоты перестраиваемого лазера, контролирующего интерферометрический канал. Частота перестраиваемого лазера смешивается с частотой стандартного (стабилизированного) лазера, частоту биений можно измерить. Т. о. изменения лучевой скорости между соседними экспозициями спектра звезды измеряются посредством частотометра.

XIII. С середины 80-х появляются спектрографы скрещенной дисперсии, соединяемые с телескопом посредством оптического волокна [36]. Применение оптического волокна более чем на порядок снижает ошибки V_R, связанные с положением изображения звезды на входе спектрографа. Дальнейшее увеличение точности оптоволоконных спектрографов было связано с: а) дополнительным перемешиванием лучей, распространяющихся по оптоволокну, б) созданием спектрографов с неподвижными элементами оптической схемы, в) стабилизацией условий в объеме спектрографа, г) частой или непрерывной калибровкой спектрографа по второму оптоволоконному каналу [14, 34]. На спектрографах с оптоволоконным сочетанием, точность измерения V_R для ярких звезд составляет 1–3 м/с.

XIV. Переход к многоканальным приемникам кардинально изменил принцип работы не только дифракционных, но и интерференционных приборов: различные частоты регистрируются одновременно, в разных участках многоканального приемника. Здесь отметим три типа интерференционных приборов: SHS – пространственный гетеродинный спектрометр [29], HHS – гетеродинный голографический спектрометр [24] и EDI – интерферометр с постдисперсией [25]. Недостатком гетеродинной голографической спектроскопии является ограничение по длине одновременно регистрируемого спектрального диапазона. Дифракционная решетка находится внутри интерферометра, различные длины волн комбинируются в диапазоне углов, образуя на выходе интерферометра системы полос с резко изменяющимся периодом. Поэтому как метод HHS, так и метод SHS являются эффективными в узком спектральном интервале. В методе EDI постдисперсия обеспечена спектрографом низкого разрешения, размещенным после двухлучевого интерферометра с фиксированной разностью хода, т. е. для каждой длины волны интерференция происходит под одним и тем же углом. Метод EDI уже применяется в спектральных обзорах, возможности метода (измерение на 2.5-метровом телескопе около 500 звезд за ночь, в интервале $7.6^m < V < 12^m$, с точностью около 50 м/с) в десятки раз превосходят возможности дифракционной спектроскопии.

XV. Следует упомянуть и об астрометрических методах определения лучевых скоростей [21]. В сочетании с доплеровскими измерениями, астрометрия позволяет определить не только истинную скорость звезды в пространстве, но также измерить гравитационное красное смещение, исследовать роль конвективных и других движений в атмосфере.

В первое техническое задание на спектральную аппаратуру для 6-метрового БТА были включены, в частности, автоколлимационный спектрометр для измерения лучевых скоростей, бесщелевой спектрограф Линника с интерференционными реперами, спектрометр с интерферометром Фабри–Перо. [5]. Ни один из этих приборов так и не был построен, не удалось оснастить БТА и корреляционным фотометром лучевых скоростей. В итоге измерения лучевых скоростей долгое время были ограничены дифракционными методами [3].

Подобно тому, как в технике измерения доплеровских смещений призменные приборы полвека назад были вытеснены дифракционными, основная роль на телескопах большого диаметра перейдет к интерференционным методам определения лучевых скоростей [7].

Работы по развитию методов спектроскопических наблюдений с высоким спектральным разрешением на БТА поддержаны: проектами РФФИ 07-02-00247, 09-07-00492-а, программой Президиума РАН "Происхождение, строение и эволюция объектов во Вселенной", программой Отделения физических наук РАН "Активные процессы и стохастические структуры во Вселенной".

[1] *Горский С. М., Лебедев В. П.* Интерференционно-фазовый метод измерения лучевых скоростей в атмосфере Солнца // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1977. – **57**. – С. 228–236.

[2] *Дидковский Л. В., Кожеватов И. Е., Степанян Н. Н.* Опыт использования интегрального спектрометра на башенном солнечном телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1986. – **74**. – С. 142–158.

[3] *Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Юшкин М. В., Насонов Д. С.* Измерения лучевых скоростей на звездных спектрографах БТА // Астрофизический бюллетень. – 2008. – **63**, № 4. – С. 410–418.

[4] *Панаиотов Л. А.* Определение лучевых скоростей звезд объективной призмой прямого зрения // Известия ГАО в Пулкове. – 1954. – **19**, Вып. 5, № 152. – С. 86–99.

[5] *Панчук В. Е., Клочкова В. Г.* 30 лет работы БТА: спектроскопия высокого разрешения // В сб. "Специальная астрофизическая обсерватория Российской Академии наук. 40 лет". – Нижний Архыз, 2006. – С. 32–67.

[6] *Панчук В. Е., Насонов Д. С., Юшкин М. В.* Измерения лучевых скоростей с применением абсорбционной ячейки // Астрофизический бюллетень. – 2009. – **64**, № 3. – С. 297–307.

[7] *Панчук В. Е., Сачков М. Е., Юшкин М. В., Якопов М. В.* Интегральные методы измерения астрономических спектров // Астрофизический бюллетень. – 2009. – **64**, № 4.

[8] *Шайн Г. А., Шайн П. Ф.* Определение радиальных скоростей звезд с помощью призматической камеры // Доклады АН СССР. – 1944. – **45**, № 8. – С. 338–342.

[9] *Abt H. A., Smith G. H.* Accuracies of radial velocity measurements // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1969. – **81**, N 481. – P. 332–338.

[10] *Adams W. S.* Some results of a study of the spectra of Sirius, Procyon, and Arcturus with high dispersion // Astrophys. J. – 1911. – **33**, N 1. – P. 64–71.

[11] *Adams W. S.* The three-prism stellar spectrograph of the Mount Wilson observatory // Astrophys. J. – 1912. – **35**, N 2. – P. 163–182.

[12] *Albitzky V. A., Shajn G. A.* Radial velocities of 343 stars // Publ. de l'Observatoire central a Poulkovo. Serie II. – 1933. – **34**. – P. 1–68.

[13] *Baranne A., Mayor M., Poncet J. L.* CORAVEL – a new tool for radial velocity measurements // Vistas in Astron. – 1979. – **23**, Part 4. – P. 279–316.

[14] *Baranne A., Queloz D., Mayor M., et al.* ELODIE: a spectrograph for accurate radial velocity measurements // Astron. and Astrophys. Suppl. – 1996. – **119**, N 2. – P. 373–390.

[15] *Bates B., McCartney, McKeith C.D., et al.* Interferometer-grating spectrograph for high resolution astronomical spectroscopy in the middle UV // Appl. Opt. – 1978. – **17**, N 13. – P. 2119–2124.

[16] *Belopolsky A.* The spectrum of δ Cephei // Astrophys. J. – 1895. – **1**, N 2. – P. 160–161.

[17] *Belopolsky A.* On the performance of an auxiliary lens for spectroscopic investigations with the thirty-inch refractor of the Pulkowo observatory // Astrophys. J. – 1896. – **3**, N 2. – P. 147–149.

[18] *Bowen I. S.* The spectrographic equipment of the 200-inch Hale telescope // Astrophys. J. – 1952. – **116**, N 1. – P. 1–7.

[19] *Campbell B., Walker G. A. H.* Precision radial velocities with an absorption cell // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1979. – **91**, N 542. – P. 540–545.

[20] *Connes P.* Absolute astronomical accelerometry // Astrophys. and Space Sci. – 1985. – **110.** – P. 211–255.

[21] *Dravins D., Gullberg D., Lindegren L., Madsen S.* Astrometric versus spectroscopic radial velocities // Precise stellar radial velocities / Eds J. B. Hearnshaw and C. D. Scarfe. – IAU Coll. N. 170. – Sheridan Books, 1999. – P. 41–47.

[22] *Fehrenbach Ch.* Recherches sur la mesure des vitesses radials au prisme objectif // Ann. d'Astrophys. – 1947. – **10**, N 3. – P. 257–281.

[23] *Fellgett P. B.* A proposal for radial velocity photometer // Optica Acta. – 1955. – **2**. – P. 9–16.

[24] *Frandsen S. S., Douglas N. G., Butcher H. R.* An astronomical seismometer // Astron. and Astrophys. – 1993. – **279**, N 1. – P. 310–321.

[25] *Ge J., Erskine D. J., Rushford M.* An externally dispersed interferometer for sensitive Doppler extrasolar planet searches // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2002. – **114**, N 799. – P. 1016–1028.

[26] *Gelly B., Grec G., Fossat E.* Evidence for global oscillations in Procyon and α Centauri // Astron. and Astrophys. – 1986. – **164**, N 2. – P. 383–394.

[27] *Griffin R. F.* A photoelectric radial-velocity spectrometer // Astrophys. J. – 1967. – **148**, N 2. – P. 465–476.

[28] *Griffin R., Griffin R.* On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km/s // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1973. – **162**, N 3. – P. 243–253.

[29] *Harlander J., Roesler F. L.* Spatial geterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for ground-based and space astronomy // Proc. SPIE. – 1990. – **1235**. – P. 622–633.

[30] *Keeler J. E.* The modern spectroscope // Astron. and Astrophys. – 1893. – **12**, N 1. – P. 40–50.

[31] *Keeler J. E.* On a lens for adapting a visually corrected refracting telescope to photographic observations with the spectroscope // Astrophys. J. – 1895. – **1**, N 2. – P. 101–111.

[32] *Latham D. W.* Digital stellar speedometry // Stellar radial velocities: IAU Coll. N 88 / Eds A. G. Davis Philip and D. W. Latham. – Davis Press, 1985. – P. 21–34.

[33] *Marcy G. W., Butler R. P.* Precision radial velocities with an iodine absorption cell // Publs. Astron. Soc. Pacif. – 1992. – **104**, N 674. – P. 270–277.

[34] *Pepe F., Mayor V., Delabre B., et al.* HARPS: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets // Proc. SPIE. – 2000. – **4008**. – P. 582–592.

[35] *Plaskett J. S.* Description of building and equipment. Chapter VII. Description of the spectrograph // Publ. of the Dominion Astrophys. Observ. Victoria. – 1920. – **1**, N 1. – P. 81–95.

[36] *Ramsey L. W., Huenemoerder D. P.* A versatile fiber coupled CCD/echelle spectrograph system // Proc. SPIE. – 1986. – **627**. – P. 282–290.

[37] *Schmider F. X., Fossat E., Grec G., Gelly B.* Sodium cell spectrophotometer for detection of stellar oscillations // Advances in Helio- and Asteroseismology: IAU Coll. N. 123 / Eds J. Christiensen-Dalsgaard and S. Fransden. – Dordrecht: Reidel, 1988. – P. 513–516.

[38] *Serkowski K.* A polarimetric method of measuring radial velocities // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1972. – **84**, N 501. – P. 649–651.

[39] *Serkowski K.* Feasibility of a search for planets around solar-type stars with a polarimetric radial velocity meter // Icarus. – 1976. – **27**. – P. 13–24.

[40] *Serkowski K., Frecker J. E., Heacox W. D., et al.* Retrograde rotation of the stratosphere of Venus measured with a Fabry-Perot radial velocity spectrometer // Astrophys. J. – 1979. – **228**, N 2. – P. 630–634.