

ЗЕЕМАНОВСКОЕ УШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД

В. С. Лебедев

Предложен метод измерения магнитных полей звезд, основанный на квадратичности зависимости зеемановского уширения линий от длины волны. Описана структура программы для ЭВМ, реализующая метод. Приведены результаты тестирования программы для магнитной звезды HD 71866.

The method of stellar magnetic field measurement is suggested which is based on the dependence of Zeeman line broadening on the wavelength being square. The structure of the computer program realizing the method is described. The results of the program testing for the magnetic star HD 71866 are presented.

Измерения магнитных полей звезд обычно основаны на эффекте Зеемана. Для полей сильнее ~ 10 кГс величина расщепления линии на компоненты составляет $\sim 0.2 \text{ \AA}$ и становится заметной на высокодисперсионных спектрограммах для звезд, имеющих малые значения скоростей вращения. Более слабые поля обнаруживаются с использованием того обстоятельства, что зеемановские компоненты по-разному поляризованы. Поэтому измерения производятся по спектрограммам, полученным с анализатором круговой поляризации [1]. Кроме такого способа обнаружения магнитных полей Колев [2] предложил метод, основанный на явлении магнитного усиления линий, образующихся в присутствии магнитного поля. В настоящей заметке мы обсудим еще один косвенный способ обнаружения и измерения магнитного поля по обычным спектрограммам, который основан на том, что зеемановское расщепление квадратично зависит от длины волны.

С введением в практику обработки спектрограмм автоматических микроденситометров [3], связанных с ЭВМ, появилась возможность включать в обработку все то огромное число линий, которое обычно регистрируется на звездных спектрограммах. Рассмотрим основные факторы, определяющие ширину спектральных линий. Невращающиеся звезды имеют ширины линий $\Delta\lambda_0 \approx 0.1 \div 0.3 \text{ \AA}$. Вращение звезды со скоростью $v \sin i = 50 \text{ км/с}$ приводит к доплеровскому уширению в 0.6 и 1.2 \AA для линий с длинами волн 3500 и 7000 \AA соответственно и к линейному ходу этого уширения с длиной волны. Зеемановское расщепление при значении фактора Ланде $g=1$ и напряженности поля $B=1 \text{ кГс}$ дает вклад в уширение 0.01 и 0.05 \AA для тех же самых значений длин волн и квадратичный ход его с длиной волны. Таким образом, суммарная ширина линий будет составлять величину $0.70\text{--}1.5 \text{ \AA}$. Типичная ошибка измерения ширины линии σ_λ составляет $\sim 0.1 \text{ \AA}$ при обратной дисперсии 10 \AA/мм .

Пусть имеются измерения длин волн λ_i , ширин $\Delta\lambda_i$ и глубин r_i для n спектральных линий в некотором интервале длин волн. Для того чтобы ослабить влияние зависимости ширины линий от их интенсивности, преобразуем измеренные значения $\Delta\lambda_i$ к их величинам для линии некоторой постоянной глубины. В первом приближении это можно сделать по следующему простому алгоритму:

$$\Delta\lambda_i^0 = \Delta\lambda_i r_0 / r_i,$$

где v_0 — величина некоторой стандартной глубины линии, например 0.5 .

Пренебрегая индивидуальным характером уширения линий, ищем зависимость их приведенной ширины от длины волны в форме полинома второй степени:

$$\Delta\lambda^{\circ} = a + b\lambda + c\lambda^2.$$

Смысл коэффициентов очевиден: $a = \Delta\lambda_0 \approx 0.1$; $b = v/c_0 \approx 1_{10} - 4$; $c \approx 1_{10} - 12gB \approx 1_{10} - 9$. Величина скорости v включает не только скорость вращения, но и другие составляющие (тепловую, микро- и макротурбулентную скорости), \bar{g} — среднее значение фактора Ланде. Линии, ширины которых значительно отличаются от типичных их значений для данной длины волны, следует исключить из последующего анализа.

Значения коэффициентов a , b и c находятся методом наименьших квадратов. При этом среднеквадратическое отклонение для коэффициента c приблизительно равно

$$\sigma_c = k\sigma_0/(\lambda_0^2\sqrt{n}),$$

где λ_0 — средняя длина волны исследуемого участка, а k — числовой множитель порядка 1. При значениях $\sigma_0 = 0.1 \text{ \AA}$, $\lambda_0 = 4000 \text{ \AA}$ и $\sigma_c = 3_{10} - 10$, получим, что достаточно измерить ~ 300 линий для достижения точности измерения поля $B/\sigma_B \approx 3$, где σ_B — среднеквадратическая ошибка измерения магнитного поля.

Таким образом, для спектрограмм, полученных на спектрографах с шириной аппаратной функции $\Delta\lambda_a$, не дающей основного вклада в наблюдаемые ширины линий ($\Delta\lambda_a \approx 0.1 \div 0.3 \text{ \AA}$), можно надеяться на уверенное измерение магнитного поля величиной ~ 1 кГс по участку в несколько тысяч ангстрем, содержащему несколько сот спектральных линий. Измерения таким способом можно проводить по обычным высокодисперсионным спектрограммам, большие количества которых уже получены в различных обсерваториях. Но, как и для метода, описанного Колевым, измеряется только абсолютная величина магнитного поля. На спектрограммах, полученных на второй камере Основного звездного спектрографа 6-м телескопа, регистрируется участок в $\sim 1000 \text{ \AA}$, поэтому следует ориентироваться на использование всей спектрограммы. Наиболее же эффективно будет применение подобной методики для спектров, полученных в максимально широком диапазоне длин волн, например, с помощью эшелльного спектрографа.

Нами была создана вычислительная программа, реализующая описанный выше алгоритм. Входной информацией для нее служат массивы, полученные путем оцифрования спектрограммы с помощью автоматического микроденситометра АМД-1, выходной — аппроксимация зависимости ширин выделенных спектральных линий от длины волны полиномом второй степени. Программа отлажена на ЭВМ ЕС-1035 и содержит следующие блоки: перевод в интенсивности, цифровую фильтрацию, проведение непрерывного спектра, разделение бленд, приведение линий к одной глубине, отбраковку линий и аппроксимацию методом наименьших квадратов. По возможности использовались стандартные программы из библиотек научных подпрограмм на ФОРТРАНе и ПЛ/1.

Записи с микроденситометра переносились в среду ОС ЕС через магнитную ленту. Для перевода в интенсивности предварительно строилась характеристическая кривая традиционным способом. Цифровая фильтрация производилась с помощью фильтра Кайзера и Рида [4]. Непрерывный спектр искался методом, основанным на алгоритме Щербановского [5], а разделение бленд — на алгоритме, описанном в работе [6]. Отбраковка линий осуществлялась с помощью процедуры винзорирования — отбрасывания определенного процента (1—5 %) самых узких широких линий в диапазонах спектра по $\sim 100 \text{ \AA}$.

Тестирование программы производилось по спектрограммам магнитной звезды HD 71866, полученным В. Д. Бычковым, Ю. В. Глаголевским и И. И. Романюком на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа с обратной дисперсией 9 \AA/мм . Результаты тестирования приведены в таблице, в которой даны: юлианская дата JD получения спектрограммы, фаза на кривой изменения

JD (2 440 000+)	Φ	B_0 , кГс	n	B , кГс	σ_B , кГс
5303.620	0.54	-1.0	243	0.80	0.40
5690.547	0.44	1.2	216	1.85	0.60
5691.523	0.59	-1.8	231	1.25	0.45
5716.397	0.25	2.5	275	3.25	0.50

магнитного поля, ожидаемое значение магнитного поля B_0 [7], число выделенных на спектре линий n , оцененное значение магнитного поля B и среднеквадратическая ошибка величины поля σ_B . Последняя величина получена путем многократного (~ 20) повторения процедуры обработки несколько различающихся по длинам волн участков спектрограмм, т. е. является только внутренней ошибкой метода.

Из приведенных данных видно, что описанной методикой можно измерять абсолютные значения магнитных полей звезд по спектрограммам без зеемановского анализатора, полученным на Основном звездном спектрографе БТА. Автор благодарен В. Д. Бычкову за предоставление спектрограмм и сотрудникам лаборатории информатики САО АН СССР за помощь в освоении АМД и консультации по математическому обеспечению ЕС ЭВМ.

Л и т е р а т у р а

1. Браилко Л. А., Гришин М. Л., Земляной В. И. и др. // Автометрия. 1978. № 2. С. 85—87.
2. Бэбкок Г. В. Методы астрономии / Под ред. В. А. Хилтнера. М.: Мир, 1967. С. 100—116.
3. Кайзер, Рид // Приборы для научн. исслед. 1977. № 11. С. 82—93.
4. Cassatella A. // Astron. and Astrophys. 1976. Vol. 48. P. 281—286.
5. Колев Д. З. // Письма в Астрон. журн. 1977. Т. 3. С. 363—367.
6. Preston G. M., Purer D. M. // Astrophys. J. 1965. Vol. 142. P. 983—989.
7. Шаповалова А. И., Щербановский А. Л. // Сообщ. САО. 1979. № 25. С. 55—56.

Поступила в редакцию
30 мая 1988 г.