

УДК: 52—32

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ  
СКОРОСТИ И НАКЛОНА ПЛОСКОСТИ ЭКВАТОРА  
АСТРОФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ПРОСТРАНСТВЕ

В. О. ГЛАДЫШЕВ

Поступила 22 мая 1990

Принята к печати 15 января 1991

Обсуждаются зависимости, связывающие экваториальную скорость  $V_e$  и угол наклона  $\varphi$  плоскости экватора астрофизического объекта в пространстве с вариациями  $\Delta\lambda_{\text{пр1}}$  профиля спектральных линий. Результаты анализа обсуждаются с точки зрения возможности применения методов оптической спектрометрии.

Достижения в области спектрометрических измерений оптического диапазона позволяют поставить вопрос о возможности использования известных методов измерения скорости вращения астрофизических объектов по величине уширения спектральных линий с целью определения экваториальной скорости  $V_e$  и наклона оси вращения космических источников излучения в пространстве.

Известно, что метод активной радиолокации для определения скорости вращения планет земной группы использовался уже в 60-х годах [1], в 70-х годах были проведены исследования планет в оптическом диапазоне спектра [2]. Однако, в общем случае, задача выделения информации об уширении спектральных линий вследствие вращения астрофизического объекта достаточно сложна, тем более это относится к измерению вариаций формы профилей линий вследствие параллакса.

Несмотря на это, ценность астрофизической информации о реальных экваториальных скоростях и углах наклона звездных объектов в пространстве по сравнению с усредненными величинами  $\overline{V_e}$  и  $\overline{\sin i}$  приводит к необходимости предварительной оценки требуемой чувствительности и параметров возможного эксперимента по определению  $V_e$  и  $i$ . Целью данной работы является получение зависимостей, которые связывают искомые величины с наблюдаемыми, а также анализ влияния основных факторов, определяющих точность данного метода. Поставленная задача

имеет и другую цель; ее решение позволяет упростить определение  $V_e$  для планет земной группы, в частности, снимается ограничение на необходимость расположения щели спектрографа в плоскости, перпендикулярной оси вращения планеты.

Рассмотрим систему, состоящую из трех спектрометрических приборов, расположенных в плоскости  $X'O'Y'$ , и удаленного вращающегося астрофизического объекта, размерами которого можно пренебречь. Ось вращения  $n$  этого объекта расположена в пространстве произвольным образом так, что экваториальная плоскость  $\alpha$  характеризуется углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в новой системе координат  $X''Y''Z''$ , полученной из  $X'Y'Z'$  путем сдвига (рис. 1). Плоскость  $\alpha$  содержит круг скоростей  $\sigma$  с центром в точке  $O$ , радиус которого соответствует  $V_e$ —экваториальной скорости аст-

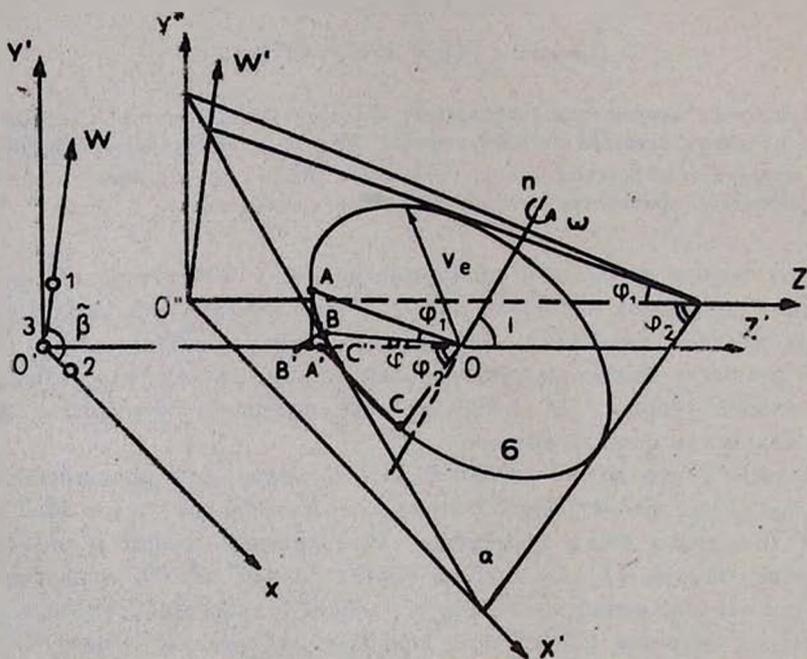


Рис. 1. Спектрометрические приборы, расположенные в плоскости  $X'O'Y'$ , позволяют определять углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , характеризующие наклон удаленного астрофизического объекта в пространстве.

рофизического объекта, совершающего вращательное движение с угловой частотой  $\omega$ . Отрезки  $OA'$ ,  $OC'$  являются проекциями  $V_e$  на  $O'Z'$  в плоскостях  $WO'Z'$  и  $X'O'Z'$  соответственно,  $OB'$ —проекция  $V_e$  на  $O'Z'$  в плоскости, проходящей через  $O'Z'$  и ось вращения  $n$ . Из рис.

1 после введения обозначений  $A'O = \widehat{V}_{R1}$ ,  $C'O = \widehat{V}_R$ ,  $B'O = V_R$ , учитывая, что  $\widehat{AOA'} = \varphi_1$ ,  $\widehat{COC'} = \varphi_2$  и  $\widehat{BOB'} = \varphi = 90^\circ - i$  (в дальнейших рассуждениях используется угол  $\varphi$ , т. к. он более естественно характеризует физический смысл описываемого явления), можно получить следующие соотношения:

$$V_R = V_i \cos \varphi. \quad (1)$$

$$V_R \cos \varphi_i = \widehat{V}_{Ri} \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $i=1, 2$  соответствует величинам, относящимся к датчикам 1, 3; 2, 3.

Соотношение, связывающее угол  $\varphi$ , введенные  $\psi_i$  и  $\beta$ , характеризующий взаимное расположение спектрометрических датчиков, может быть представлено в виде

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2 \sin \tilde{\beta}}{[\operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 - 2 \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2 \cos \tilde{\beta}]^{1/2}}. \quad (3)$$

Далее, для малых приращений  $V_R$  и  $\varphi_i$ , что реализуется при наблюдении за достаточно удаленными астрофизическими объектами, из (2) получим

$$\cos^2 \varphi_i = \frac{\Delta \varphi_i^2 V_R^2}{\Delta V_{Ri}^2 + \Delta \varphi_i^2 V_R^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta \varphi_i = a_i/r$ ,  $a_i$  — расстояние между спектрометрическими датчиками 1, 3 и 2, 3 при  $i=1, 2$ ;  $r$  — расстояние до астрофизического объекта,  $\Delta V_{Ri}$  — разности значений лучевой скорости  $V_R$ , измеренной датчиками 1, 3 и 2, 3 для  $i=1$  и  $i=2$  соответственно. Подставляя данное соотношение в (3) можно выразить  $\varphi$  через  $V_R$ ,  $\Delta V_{Ri}$ ,  $\Delta \varphi_i$  и записать

$$\cos \varphi = \left[ 1 + \frac{\Delta V_{R1}^2 \Delta V_{R2}^2 \sin^2 \tilde{\beta}}{V_R^2 (\Delta V_{R1}^2 \Delta \varphi_2^2 + \Delta V_{R2}^2 \Delta \varphi_1^2 - 2 \Delta \varphi_1 \Delta \varphi_2 \Delta V_{R1} \Delta V_{R2} \cos \tilde{\beta})} \right]^{-1/2}. \quad (5)$$

Для определения  $\varphi$  необходимо выразить вариации скорости  $\Delta V_{Ri}$  через вариации длины волны принимаемого излучения  $\Delta \lambda_{\text{пр}i}$ , однако

релятивистская запись эффекта Доплера также является функцией  $\varphi$ , что приводит к зависимости

$$\Delta V_{Ri} = \frac{\Delta \lambda_{\text{пр}i}}{\lambda_{\text{исп}}} \frac{c}{(1 + V_R/c \cos^2 \varphi)}, \quad (6)$$

где  $\Delta \lambda_{\text{пр}i}$  — разности значений уширения спектральной линии для спектрометрических приборов 1, 3 и 2, 3,  $\lambda_{\text{исп}}$  — длина волны излучения, испускаемого астрофизическим объектом. Таким образом, искомое соотношение, связывающее угол наклона  $\varphi$  плоскости экватора вращающегося астрофизического объекта к лучу наблюдения  $O'Z'$  с измеряемыми спектральными приборами 1, 3 и 2, 3 вариациями профиля  $\Delta \lambda_{\text{пр}i}$ , наблюдаемой в точке  $O'$  лучевой скоростью  $V_R$  и известными значениями  $\Delta \varphi_i$ , может быть записано следующим образом:

$$\cos \varphi = \left[ 1 + \frac{c^2 \sin^2 \tilde{\beta}}{\lambda_{\text{исп}}^2 \beta^2 (1 + V_R/c \cos^2 \varphi)^2} \right]^{-1/2}, \quad (7)$$

где

$$\beta^2 = V_R^2 \left( \frac{\Delta \varphi_1^2}{\Delta i_{\text{пр}1}^2} - \frac{\Delta \varphi_2^2}{\Delta i_{\text{пр}2}^2} - 2 \frac{\Delta \varphi_1 \Delta \varphi_2 \cos \tilde{\beta}}{\Delta i_{\text{пр}1} \Delta i_{\text{пр}2}} \right).$$

Уравнение (7), имея приближенную релятивистскую запись, является достаточно точным; при скорости вращения на экваторе  $V_e = (2-4) \times 10^4$  км/с, соответствующей ширине профиля спектральных линий ряда пульсаров, например, PSR 1937+21 [3], погрешность вычислений не превышает нескольких процентов. В случае определения  $\Delta \lambda_{\text{пр}i}$  для сравнительно быстро вращающихся звезд главной последовательности из спектральных классов O5—F2, обладающих  $V_e \sin i$  в интервале 150—400 км/с, приближение  $1 \pm V_R/c \cos^2 \varphi = 1$  на точность вычислений практически не влияет.

Решение (7) представлено на рис. 2, где поверхности I, II, III получены при  $\tilde{\beta} = 90^\circ$ ,  $\Delta \varphi_1 = \Delta \varphi_2$  и  $\Delta i_{\text{пр}1} = \Delta i_{\text{пр}2}$  для отношения  $c/V_R$ , равного  $10^3$ ,  $10^2$  и  $10$  соответственно. Как следует из рис. 2, для одного спектрометрического датчика, расположенного на земной поверхности и производящего измерения последовательно в точках 1, 2, 3 при движении по орбите, требуемая чувствительность может находиться на уровне  $\Delta \lambda_{\text{пр}}/\lambda_{\text{исп}} \sim 10^{-7}$  при  $V_R = 0.1$  с,  $10^{-8}$  при  $V_R = 0.01$  с и  $10^{-9}$  при  $V_R = 0.001$  с для объектов, расположенных на расстоянии порядка нескольких парсек.

Наклон плоскости экватора астрофизического объекта в пространстве, характеризующийся углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в системе  $X''Y''Z''$ , можно определить подставляя измеренные  $\Delta\lambda_{\text{пр}}$ ,  $V_R$ , найденное из (7) значение  $\varphi$  и известные  $\Delta\varphi_i$  и  $\lambda_{\text{исп}}$  в выражение (6) для  $\Delta V_{Ri}$ , а затем подставляя  $\Delta V_{Ri}$  в (4). Соответствующее реальное значение  $V_e$  находится из (1), как  $V_e = V_R / \cos \varphi$ .

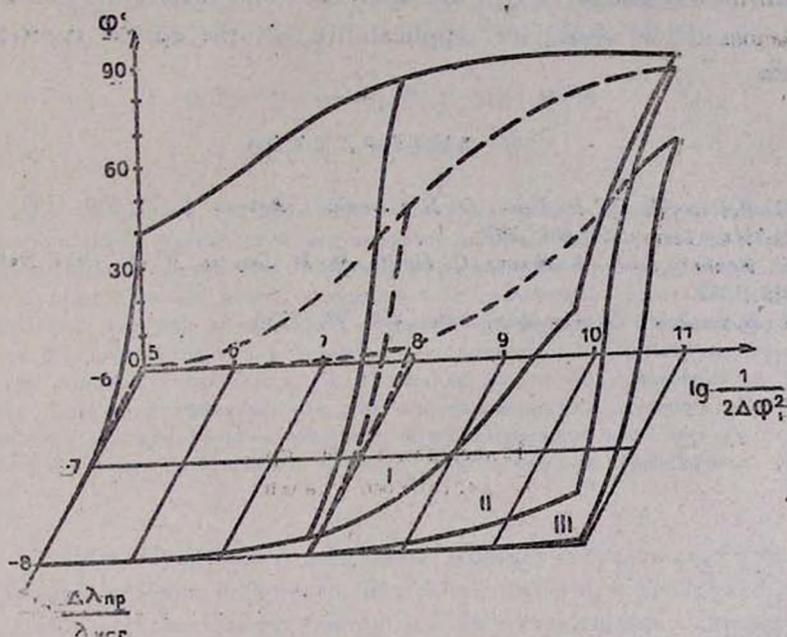


Рис. 2. Численное решение (7) для  $V_R \cong 0.001$  с (пов. I),  $V_R \cong 0.01$  с (пов. II),  $V_R \cong 0.1$  с (пов. III).

Следует отметить, что неточность определения расстояния  $r$  до астрофизического объекта приводит к погрешности в определении  $\Delta\varphi_i$  и, следовательно, в  $V_e$  и  $\varphi$ , однако главным ограничивающим чувствительность параметром является  $\Delta\lambda_{\text{пр}}$ , при этом необходимая чувствительность  $\sim 10^{-8} \lambda_{\text{исп}}$  может быть достигнута при использовании современных гетеродинных спектрометров с лазерной накачкой.

Более высокую точность можно обеспечить, используя результаты спектроскопии высокого разрешения и методы квантовых невозмущающих измерений [4].

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINATION OF THE  
EQUATORIAL SPEED AND EQUATORIAL PLANE INCLINATION  
OF AN ASTROPHYSICAL OBJECT IN SPACE

V. O. GLADYSHEV

Interdependence of the equatorial speed  $V_e$  and equatorial plane inclination angle  $\varphi$  of an astrophysical object in space with the spectral line profile variations  $\Delta\lambda_{DPI}$  are analyzed. The results of this analysis are discussed in terms of applicability of the optical spectrometry methods.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. H. Pettengill, R. B. Dyce, D. B. Campbell, *Astron. J.*, 72, 350, 1967.
2. A. Dollfus, *Icarus*, 28, 601, 1976.
3. D. C. Backer, S. R. Kulkarni, C. Heiles, M. M. Davies, W. M. Goss, *Nature*, 300 615, 1982.
4. В. Б. Бразинский, *Успехи физ. наук.* 156, 93, 1988.