

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 φ плоскости экватора астрофизического объекта в пространстве с вариациями $\Delta\lambda_{\text{пр}}$ 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 α характеризуется углами φ_1 и φ_2 в новой системе координат $X''Y''Z''$, полученной из $X'Y'Z'$ путем сдвига (рис. 1). Плоскость α содержит круг скоростей σ с центром в точке O , радиус которого соответствует V_e —экваториальной скорости аст-

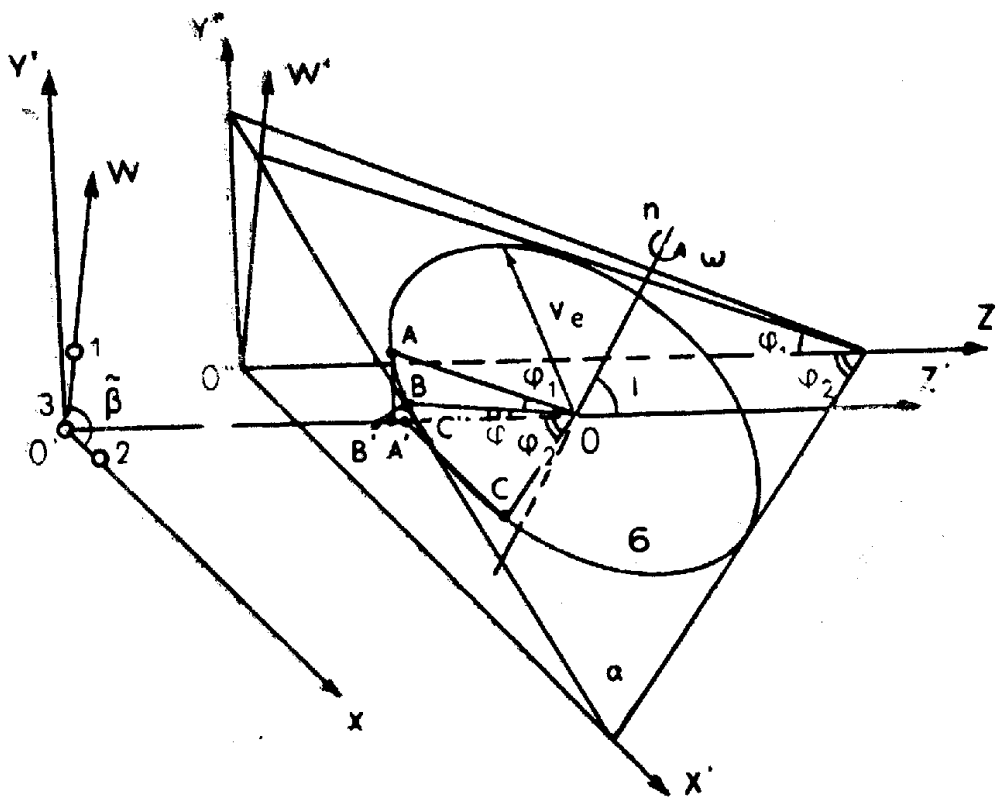


Рис. 1. Спектрометрические приборы, расположенные в плоскости $X'O'Y'$, позволяют определить углы φ_1 и φ_2 , характеризующие наклон удаленного астрофизического объекта в пространстве.

рофизического объекта, совершающего вращательное движение с угловой частотой ω . 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 $A'O = \widehat{V}_{R1}$, $C'O = \widehat{V}_{R2}$, $B'O = V_R$, учитывая, что $\widehat{AOA'} = \varphi_1$, $\widehat{COC'} = \varphi_2$ и $\widehat{BOB'} = \varphi = 90^\circ - i$ (в дальнейших рассуждениях используется угол φ , т. к. он более естественно характеризует физический смысл описываемого явления), можно получить следующие соотношения:

$$V_R = V_e \cos \varphi, \quad (1)$$

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

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

Соотношение, связывающее угол φ , введенные φ_i и $\tilde{\beta}$, характеризующий взаимное расположение спектрометрических датчиков, может быть представлено в виде

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

Далее, для малых приращений V_R и φ_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, ΔV_{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 φ через V_R , ΔV_{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 φ необходимо выразить вариации скорости ΔV_{Ri} через вариации длины волны принимаемого излучения $\Delta \lambda_{\text{при}}$, однако

релятивистская запись эффекта Доплера также является функцией φ , 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 φ 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

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

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 $1 \pm V_R^2/c^2 \cos^2 \varphi = 1$ 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 $\Delta \lambda_{\text{пр}1} = \Delta \lambda_{\text{пр}2}$ 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 φ_1 и φ_2 в системе $X''Y''Z''$, можно определить подставляя измеренные $\Delta\lambda_{пр}$, V_R , найденное из (7) значение φ и известные $\Delta\varphi_i$ и $\lambda_{исп}$ в выражение (6) для ΔV_{Ri} , а затем подставляя ΔV_{Ri} в (4). Соответствующее реальное значение V_e находится из (1), как $V_e = V_R / \cos \varphi$.

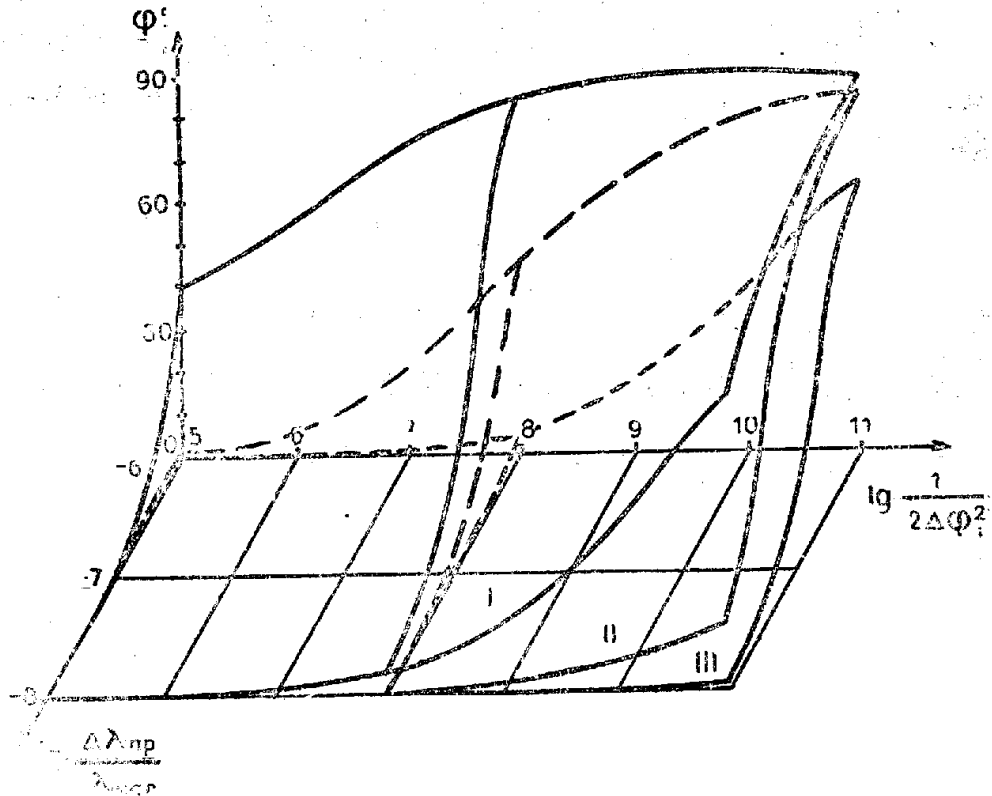


Рис. 2. Численное решение (7) для $V_R \cong 0.001$ с (пов. I), $V_R \cong 0.01$ с (пов. II), $V_R \cong 0.1$ с (пов. III).

Следует отметить, что неточность определения расстояния r до астрофизического объекта приводит к погрешности в определении $\Delta\varphi_i$ и, следовательно, в V_e и φ_i , однако главным ограничивающим чувствительность параметром является $\Delta\lambda_{пр}$, при этом необходимая чувствительность $\sim 10^{-8} \lambda_{исп}$ 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 φ of an astrophysical object in space with the spectral line profile variations $\Delta\lambda_{np}$ 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, 330, 1967.
 2. A. Dollfus, *Icarus*, 28, 601, 1976.
 3. D. C. Backer, S. R. Kulkarni, C. Heilts, M. M. Davies, W. M. Goss, *Nature*, 300, 615, 1982.
 4. В. Б. Брагинский, *Успехи физ. наук*, 156, 93, 1988.
-