ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ISSN 1728-273x

— АСТРОНОМІЯ ——

———— 1(59)/2019 Засновано 1958 року

Викладено результати оригінальних досліджень з питань релятивістської астрофізики, фізики Сонця, позагалактичної астрономії, астрофізики високих енергій, астрометрії, небесної механіки, метеорної та кометної астрономії та озону над Антарктидою.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів, які спеціалізуються в галузі астрономії.

Изложены результаты оригинальных исследований по вопросам релятивистской астрофизики, физики Солнца, внегалактической астрономии, астрофизики высоких энергий, астрометрии, небесной механики, метеорной и кометной астрономии и озона над Антарктидой.

Для научных работников, аспирантов, студентов старших курсов, специализирующихся в области астрономии.

The Bulletin includes results of original investigations within relativistic astrophysics, solar physics, extra-galactic astronomy, high energy astrophysics, astrometry, stellar mechanics, meteor and comet astronomy and ozone over the Antarctic.

It is intended for scientists, post-graduate students and student-astronomers.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ РЕДАКТОР	В. М. Івченко, д-р фізмат. наук, проф.
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	В. М. Єфіменко, канд. фізмат. наук (заст. відп. ред.); О. В. Федорова, канд. фізмат. наук (відп. секр.); Б. І. Гнатик, д-р фізмат. наук; М. Ю. Гордовський, канд. фізмат. наук; В. І. Жданов, д-р фізмат. наук; І. Д. Караченцев, д-р фізмат. наук; В. І. Клещонок, канд. фізмат. наук; Р. І. Костик, д-р фізмат. наук; В. Г. Лозицький, д-р фізмат. наук; Г. П. Міліневський, д-р фізмат. наук; С. Л. Парновський, д-р фізмат. наук; О. А. Соловйов, д-р фізмат. наук
Адреса редколегії	04053, Київ-53, вул. Обсерваторна, 3, Астрономічна обсерваторія ☎ (38044) 486 26 91, 486 09 06, e-mail: visnyk@observ.univ.kiev.ua
Затверджено	Вченою радою Астрономічної обсерваторії 05.11.19 (протокол № 6)
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 01-05/5 від 01.07.10
Зареєстровано	Міністерством інформації України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 20329-101129 від 25.07.13
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	ВПЦ "Київський університет" (кімн. 43), б-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01030 ☎ (38 044) 239 31 72, 239 32 22; факс 239 31 28

BULLETIN

OF NATIONAL TARAS SHEVCHENKO UNIVERSITY OF KYIV

ISSN 1728-273x

— ASTRONOMY —

—— 1(59)/2019 Founded in 1958

The Bulletin includes results of original investigations within relativistic astrophysics, solar physics, extra-galactic astronomy, high energy astrophysics, astrometry, stellar mechanics, meteor and comet astronomy and ozone over the Antarctic.

It is intended for scientists, post-graduate students and student-astronomers.

Τ

Викладено результати оригінальних досліджень з питань релятивістської астрофізики, фізики Сонця, позагалактичної астрономії, астрофізики високих енергій, астрометрії, небесної механіки, метеорної та кометної астрономії та озону над Антарктидою.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів, які спеціалізуються в галузі астрономії.

Изложены результаты оригинальных исследований по вопросам релятивистской астрофизики, физики Солнца, внегалактической астрономии, астрофизики высоких энергий, астрометрии, небесной механики, метеорной и кометной астрономии и озона над Антарктидой.

Для научных работников, аспирантов, студентов старших курсов, специализирующихся в области астрономии.

V. M. Ivchenko, Dr.Sci, prof.
V. M. Efimenko, Ph.D. (vice-ed. resp.); O. V. Fedorova, Ph.D. (resp. sec.); M. Yu. Gordovsky, Ph.D.; B. I. Hnatyk, Dr.Sci; I. D. Karachentzev, Dr.Sci; V. I. Kleschonok, Ph.D.; R. I. Kostyk, Dr.Sci; V. G. Lozytsky, Dr.Sci; G. P. Milinevsky, Dr.Sci; S. L. Parnovsky, Dr.Sci; A. del Popolo, Prof.; O. A. Soloviev, Dr.Sci; V. I. Zhdanov, Dr.Sci.
04053, Kiev-53, Observatorna str. 3, Astronomical Observatory 알 (38044) 486 26 91, 486 09 06, e-mail: visnyk@observ.univ.kiev.ua
Scientific Comettee of Astronomical Observatory 05.11.19 (protocol Nº 6)
Higher Attestation Council of Ukraine. Decree of the Presidium of HAC of Ukraine № 01-05/5 from 01.07.10
Ministery of Information of Ukraine. State registration certificate KB № 20329-101129 from 25.07.13
National Taras Shevchenko University of Kyiv, Printing and publishing centre "Kiev University". The certificate is added to registry ДК № 1103 from 31.10.02
Kyiv University Publishing and Printing Center (off. 43), 14, Taras Shevchenka blv., Kiev, 01030, Ukraine, 🖀 (38044) 239 31 72, 239 32 22; fax 239 31 28

Александров О., Сташко О., Жданов В. Скалярне поле на великих відстанях від сферично симетричної статичної конфігурації	6
Парновський С., Ізотова I. Дослідження теплового випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц вибраних компактних галактик з активним зореутворенням	9
Лозицький В. Суттєва неоднорідність магнітного поля в головній сонячній плямі активної області NOAA 10488	12
Александров О., Жданов В., Слюсар В. Перевірка формули Ейнштейна для гравітаційного відхилення світла за кривими блиску мікролінзованих джерел	16
Лозицький В., Стоділка М. Магнітні поля і термодинамічні умови в передмаксимальній фазі сонячного спалаху балу M6.4/3N	20
Криводубський В. Електропровідність плазми в магнітних конфігураціях сонячних плям	29
Парновський С. Деякі проблеми при статистичному опрацюванні астрономічних даних	34
Голубаєв О., Мозгова А. Перші результати спостережень метеорних явищ за допомогою автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля Харківського національного Університету імені В. Н. Каразіна	36
Пономаренко В., Сімон А., Василенко В., Ізвєкова І., Баранський О. Результати фотометричного оптичного моніторингу чотирьох активних ядер галактик у 2018–2019 роках	42
Єфіменко В. Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка у 2018 р	48

Alexandrov A., Stashko O., Zhdanov V. Scalar field at large distances from spherically symmetric static configuration	6
Parnovsky S., Izotova I. Study of the thermal emission in the radio continuum at 1.4 GHz in selected compact galaxies with active star formation	9
Lozitsky V. Significant inhomogeneity of a magnetic field in the greatest sunspot of active region NOAA 10488	12
Alexandrov A., Zhdanov V., Sliusar V. Testing Einstein's formula for gravitational deflection of light based on light curves of microlensed sources	16
Lozitsky V., Stodilka M. Magnetic fields and thermodynamic conditions in the pre-peak phase of M6.4 / 3N solar flare	20
Krivodubskij V. Electrical conductivity of plasma in magnetic configurations of the sunspots	29
Parnovsky S. Some problems in the statistical processing of astronomic data	34
Golubaev A., Mozgova A. The first results of meteor phenomena observations using automated video-spectral meteor patrol of V. N. Karazin Kharkiv National University	
Ponomarenko V., Simon A., Vasylenko V., Izvekova I., Baransky O. The results of the photometric optical monitoring of four active galaxies in 2018–2019	42
Efimenko V. Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv in 2018	48

Александров А., Сташко А., Жданов В. Скалярное поле на больших расстояниях от сферически симметричной статической конфигураци	ии6
Парновский С., Изотова И. Исследование теплового излучения в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц выбранных компактных галактик с активным звездообразованием	9
Лозицкий В. Существенная неоднородность магнитного поля в головном солнечном пятне ктивной области NOAA 10488	12
Александров А., Жданов В., Слюсар В. Проверка формулы Эйнштейна для гравитационного отклонения света по кривым блеска микролинзированных источников	16
Лозицкий В., Стодилка М. Магнитные поля и термодинамические условия в передмаксимальной фазе солнечной вспышки балла M6.4/3N	20
Криводубский В. Электропроводность плазмы в магнитных конфигурациях солнечных пятен	29
Парновский С. Некоторые проблемы при статистической обработке астрономических данных	34
Голубаев А., Мозговая А. Первые результаты наблюдений метеорных явлений с помощью автоматизированного видеоспектрального метеорного патруля Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина	
Пономаренко В., Симон А., Василенко В., Извекова И., Баранский О. Результаты фотометрического оптического мониторинга четырех активных ядер галактик в 2018–2019 годах	42
Ефименко В. Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в 2018 г.	48

УДК 524.7

A. Alexandrov, Ph.D., Seniour researcher, O. Stashko, Post graduate student, V. Zhdanov, Dr.Sci., Prof., Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

SCALAR FIELD AT LARGE DISTANCES FROM SPHERICALLY SYMMETRIC STATIC CONFIGURATION

Stationary spherically symmetric space-time in the quasi-global coordinates is considered in presence of scalar field (SF) minimally coupled to gravity, with a monomial potential $V(\phi) = \phi^n$, n > 4. We prove convergence of an iterative method to solve the joint system of Einstein – SF equations at sufficiently large distances from the center. The result can be used for a numerical solution for the metric and SF by means of backwards integration from large values of the radial variable to smaller ones. Keywords: stationary spherically symmetric space-time, scalar field, monomial potential, numerical solution

1. Introduction

Considerable attention in gravitational physics is paid to general relativistic configurations with various types of scalar field (SF) (see, e.g., [1,2]). In this field, there are a number of models of the spherically symmetric static configurations with non-linear SF that do not admit exact analytic solutions and, therefore, must be studied numerically. The most direct procedure involves a kind of the backwards problem: we use an approximate solution to derive conditions for ordinary initial value problem at sufficiently large distances r from the configuration and extend this solution by some numerical method for lower r. Usually asymptotic solution at spatial infinity is derived "on a physical level of rigor" without necessary justification. We propose such justification that involves a convergent iteration procedure in case of certain SF with monomial potential.

We consider non-linear SF ϕ described by the action

$$S = S_{GR} + \int d^4 x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \phi_{,\mu} \phi_{,\nu} - V(\phi) \right], \qquad (1)$$

where S_{GR} is the standard gravitational action of General Relativity, $V(\phi)$ is the scalar field self-interaction potential: $V(\phi) = \phi^n$, n > 4.

Metric of static spherically symmetric space-time in the quasi-global coordinates is

$$ds^{2} = A(x)dt^{2} - \frac{1}{A(x)}dx^{2} - r^{2}(x)(d\theta^{2} + \sin^{2}(\theta)d\phi^{2}).$$
(2)

The condition n > 4 is essential because in this case we expect that $\phi(x) \approx \chi_0 / x$ on large distances. For $n \le 4$ the asymptotics is different. The case n = 2 (linear massive scalar field has been treated in [3]).

The non-trivial Einstein equations following from (1) are

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{dA}{dx}r^2\right) = -2r^2V(\phi), \quad \frac{d^2r}{dx^2} + \frac{1}{2}r\left(\frac{d\phi}{dx}\right)^2 = 0, \quad A\frac{d^2r^2}{dx^2} - r^2\frac{d^2A}{dx^2} = 2.$$
(3)

The equation for SF (covariant D'Alembert equation with the potential $V(\phi)$ in case of static field)

$$\frac{d}{dx}\left(r^2 A \frac{d\phi}{dx}\right) = r^2 \frac{dV}{d\phi} , \qquad (4)$$

The equations (3, 4) are not independent; further we use the first and the third equations of (3) and equation (4).

2. Asymptotic conditions and transition to the integral equations

We consider asymptotic conditions at spatial infinity as follows

$$A(x) = 1 - \frac{2m}{x} + O\left(\frac{1}{x^2}\right), \tag{5a}$$

where m > 0 is the configuration mass,

$$r^{2}(x) = x^{2} \left(1 + \frac{C_{r}}{x} + \frac{D_{r}}{x^{2}} + \dots \right);$$
 (5b)

$$\phi(x) = \frac{\chi_0}{x} + O\left(\frac{1}{x^2}\right),\tag{5c}$$

where we put $C_r = 0$, which is related to the choice of coordinates. In view of these conditions, we can pass to the system of integral equations that can be solved iteratively. Equations (3) yield

$$r^{2} \frac{dA}{dx} = 2m + 2 \int_{x}^{\infty} dx \ r^{2} V(\phi) ,$$
$$A \frac{dr^{2}}{dx} - r^{2} \frac{dA}{dx} = 2x + C .$$

© Alexandrov A., Stashko O., Zhdanov V., 2019

$$r^{2}(x) = \mathbf{R}(x,\phi,r), \qquad (6a)$$

 $A(x) = \mathbf{A}(x, \phi, r) , \tag{6b}$

$$\phi(X) = \mathbf{\Phi}(X, \phi, r) , \qquad (6C)$$

where

$$\mathbf{A}(x,\phi,r) = 1 - \int_{x}^{\infty} dx' \frac{2m + 2\int dx'' r^2 V(\phi)}{r^2(x')}, \qquad (7a)$$

$$\mathbf{R}^{2}(x,\phi,r) = r^{2}(x_{0}) + \int_{x_{0}}^{x} dx' \frac{1}{\mathbf{A}(x,\phi,r)} \left[2x' - 4m + 2\int_{x'}^{\infty} dx'' r^{2} V(\phi) \right],$$
(7b)

$$\Phi(x,\phi,r) = \int_{x}^{\infty} dx' \frac{\chi_0 + \int_{x'}^{Y} dx'' r^2(x'') \frac{dV}{d\phi}}{R^2(x')A(x',\phi,r)}.$$
(7c)

3. Definition of the class of functions and contraction mapping

We are looking for the solution $\{r(x), A(x), \phi(x)\}$ of integral equations (7) on $[x_0, \infty)$ with given χ_0 , m > 0 and $r^2(x_0)$ satisfying conditions $ax_0^2 < r^2(x_0) < bx_0^2$, $0 < a = 1 - \varepsilon < 1$, b > 1. We fix x_0 (that affects only the choice of the radial variable); x_0 must be sufficiently large.

In view of the asymptotic conditions (5), we consider the set *S* of continuously differentiable functions satisfying for $x \ge x_0$

$$1 - \varepsilon_1 \le A(x) \le 1 + \varepsilon_1, \tag{8a}$$

$$\frac{a}{3}x^2 < r^2(x) \le 3bx^2,$$
 (8b)

$$|\phi(x)| \leq \frac{c|\chi_0|}{x}, \quad c > 1,$$
(8c)

where

$$0 < \varepsilon_1 < 1, \ 1 < b(1 - \varepsilon_1), \ c = 3 + \varepsilon_2.$$
 (8d)

Here $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ will be assumed to be sufficiently small in view of the asymptotic conditions (4).

For integral equations (7a-c) we have to estimate the r.h.s. of (7) for functions satisfying (8). Now denote $\mathcal{A} = \{A, R, \Phi\}$ – operator of the r.h.s. of equations (7). We must show that $\mathcal{A}(S) \subset S$ and the mapping $\mathcal{A} : S \Rightarrow S$ is a contractor.

After some estimates on account of (8), we have ($x \ge x_0 >> m$)

$$\mathbf{R}^{2}(x,\phi,r) < r^{2}(x_{0}) + \frac{x^{2}}{1-\varepsilon_{1}} \left[1 + 6\frac{bc^{n}\chi_{0}^{n}}{(n-3)x_{0}^{n-2}} \right] < bx^{2} + \frac{x^{2}}{1-\varepsilon_{1}} + \frac{x^{2}}{1-\varepsilon_{1}} \left[6\frac{bc^{n}\chi_{0}^{n}}{(n-3)x_{0}^{n-2}} \right],$$
$$\mathbf{R}^{2}(x,\phi,r) > ax_{0}^{2} + \frac{(x-x_{0})^{2}}{(1+\varepsilon_{1})} - (x-x_{0})x_{0} \left[\frac{4m}{x_{0}} + \frac{2}{1-\varepsilon_{1}} \frac{3n-5}{n-1} \frac{1}{x_{0}^{n-2}} (c\chi_{0})^{n} b \right],$$

whence for a sufficiently large x_0 we have $ax^2/3 < \mathbf{R}^2(x,\phi,r) \le 3bx^2$.

Using (8) we have

$$|\mathbf{A}(x,\phi,r)-1| \le \frac{3}{ax_0} \cdot \left[2m + 6 \frac{bc^n \chi_0^n}{(n-3)x_0^{n-3}} \right]$$

which is smaller than any prescribed ε_1 in case of sufficiently large x_0 . Thus A(x) fulfills (8a).

We shall now estimate $|\Phi|$ using (8)

$$\left| \mathbf{\Phi}(x,\phi,r) \right| \leq \frac{3}{x} \left[\left| \chi_0 \right| + \left| \frac{3bn}{(n-4)x_0^{n-4}} \left| c \chi_0 \right|^{n-1} \right| \right]$$

Then, $|\Phi|$ fulfills (8c,d) for $x > x_0$ provided that we choose

$$\left|\frac{9bn}{(n-4)x_0^{n-4}}\left|c\chi_0\right|^{n-1}\right|<\varepsilon_2;$$
(9)

this choice being possible for sufficiently large x_0 .

Thus, the set of functions of $C[x_0,\infty)$ satisfying (8) is invariant with respect to the mapping \mathcal{A} defined by the right hand sides of (7).

Now we estimate the contractive properties of $A: S \Rightarrow S$. We denote $\delta f(x) \equiv f(x) - f'(x)$, where $f(x), f'(x) \in S$. After cumbersome estimations on account of (8), we get

$$\left|\mathbf{A}(x,\phi',r') - \mathbf{A}(x,\phi,r)\right| \le s_1 \left\|x^{-2}\delta r^2(x)\right\| + s_2 \chi_0^{-1} \left\|x\delta\phi(x)\right\|,$$
(10a)

where dimensionless $s_1 = O\left(\frac{m}{x_0}\right) + O\left[\left|\chi_0\right|^2 \left(\frac{\chi_0}{x_0}\right)^{n-2}\right], \quad s_2 = O\left[\left[\left|\chi_0\right|^2 \left(\frac{\chi_0}{x_0}\right)^{n-2}\right]\right]$ tend to zero for $x_0 \to \infty$ (dimensions:

 $\chi_0 \sim x; \quad w \sim x^{-2} \; ; \; \|f(x)\| \equiv \sup\{|f(x)|, \; x \ge x_0\} \; .$

Next, using (8) we get

$$x^{-2} \left| \mathbf{R}^{2}(x, r^{2}, \Phi) - \mathbf{R}^{2}(x, r^{\prime 2}, \Phi^{\prime}) \right| \leq \left\{ s_{3} \left\| x^{-2} \delta r^{2}(x) \right\| + s_{4} \chi_{0}^{-1} \left\| x \delta \phi(x) \right\| \right\},$$
(10b)

 $\mathbf{s}_i = \mathbf{s}_i(\mathbf{x}_0) \rightarrow 0 \text{ for } \mathbf{x}_0 \rightarrow \infty$.

Analogously for $\Phi(x,\phi,r)$, we get

$$\left| \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{r}) - \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\phi}',\boldsymbol{r}') \right| \leq \frac{\chi_0}{x} \left\{ \boldsymbol{s}_5 \left\| \frac{\delta \boldsymbol{r}^2}{\boldsymbol{x}^2} \right\| + \boldsymbol{s}_6 \chi_0^{-1} \| \boldsymbol{x} \delta \boldsymbol{\phi} \| \right\} \leq \\ \leq \frac{\chi_0}{x} \max(\boldsymbol{s}_5, \boldsymbol{s}_6) \left\{ \left\| \frac{\delta \boldsymbol{r}^2}{\boldsymbol{x}^2} \right\| + \chi_0^{-1} \| \boldsymbol{x} \delta \boldsymbol{\phi} \| \right\},$$
(10c)

where $s_i = s_i(x_0) \rightarrow 0$, $x_0 \rightarrow \infty$.

Thus, we see from (10) that the mapping A is contractive in the norm

$$\|A(x)\| + \left\|\frac{r^{2}(x)}{x^{2}}\right\| + \chi_{0}^{-1}\|x\phi(x)\|, \qquad (11)$$

where $x_0 \rightarrow \infty$. This finishes the consideration of convergence of the iteration sequence obtained with operator A.

By the end, we note that consideration with the norm can be expected to work in much wider situation, e.g., in case of a superposition of several SFs.

Список використаних джерел

1. General Relativity Theory: Recognition through Time / A. N. Alexandrov, I. B. Vavilova, V. I. Zhdanov et al. – K. : Naukova dumka, 2015 (in Russian).

2. Dark energy and dark matter of the universe: in three volumes. Vol. 1. Dark matter: Observational evidence and theoretical models / B. Novosyadlyi, V. Pelykh, Yu. Shtanov, A. Zhuk ; ed. V. Shulga. – K. : Akademperiodyka, 2013.

3. Stashko O. S. Spherically symmetric configurations of General Relativity in presence of linear massive scalar field: separation of test body circular orbits distributions / O. S. Stashko, V. I. Zhdanov // Ukr. J. Phys. – 2019. – Vol. 64, № 3 (2019).

Надійшла до редколегії 16.09.19

О. Александров, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,

О. Сташко, аспірант,

В. Жданов, д-р фіз.-мат. наук, проф., Астрономічна обсерваторія

Київського національного університету імені Тараса Шевченка

СКАЛЯРНЕ ПОЛЕ НА ВЕЛИКИХ ВІДСТАНЯХ ВІД СФЕРИЧНО СИМЕТРИЧНОЇ СТАТИЧНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Розглянуто нелінійне скалярне поле з дією

$$S = S_{GR} + \int d^4 x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \phi_{,\mu} \phi_{,\nu} - V(\phi) \right]$$

de S_{GR} – стандартна гравітаційна дія загальної теорії відносності, потенціал самодії скалярного поля є мономним: $V(\phi) = \phi^{2n}$, n > 2. Умова на степінь n пов'язана із асимптотикою поля на великих відстанях.

Розглянуто сферично симетричні розв'язки системи ріенянь Ейнштейна та скалярного поля у просторі-часі у квазіглобальних координатах із метрикою

$$ds^{2} = A(x)dt^{2} - A^{-1}(x)dx^{2} - r^{2}(x)(d\theta^{2} + \sin^{2}(\theta)d\phi^{2}).$$

Система – це три звичайні диференціальні рівняння; її зведено до інтегральних рівнянь, зручних для проведення ітераційної процедури, яка не виводить із множини S неперервно диференційовних функцій, що задовольняють певні обмеження, зокрема $1-\varepsilon_1 \leq A(x) \leq 1+\varepsilon_1$, $ax^2/3 < r^2(x) \leq 3bx^2$, $|\phi(x)| \leq c |\chi_0|/x$, де константи $\varepsilon_1, a, b, c, \chi_0$ задовольняють певні вимоги. На основі принципу стискаючих відображень показано збіжність ітераційної процедури, яка дає розв'язок на достатньо великих відстанях від центра. Результат може бути використано для числового знаходження метрики та скалярного поля шляхом оберненого інтегруван-

ня від великих до менших значень радіальної змінної.

Ключові слова: сферично симетричний простір-час, скалярне поле, мономний потенціал, числове інтегрування

А. Александров, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

А. Сташко, аспирант,

В. Жданов, д-р физ.-мат. наук, проф.

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Рассмотрено сферически симметрическое пространство-время в квазиглобальных координатах в присутствии скалярного поля

(СП), которое минимально связано с гравитацией с мономным потенциалом $V(\phi) = \phi^n$, n > 4. Доказана сходимость итерационной процедуры для решения общей системы уравнений Эйнштейна и скалярного поля на достаточно больших расстояниях от центра. Результат может быть использован для численного нахождения метрики и скалярного поля путём обратного интегрирования от больших до меньших значений радиальной переменной.

Ключевые слова: сферически симметричное пространство-время, скалярное поле, мономный потенциал, численное интегрирование.

УДК 524.7

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф., І. Ізотова, канд. фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В РАДІОКОНТИНУУМІ НА ЧАСТОТІ 1.4 ГГЦ ВИБРАНИХ КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ

Досліджено частки теплового випромінювання у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для підвибірки з 92 компактних галактик з активним зореутворенням, створеної за умови жорсткішого критерію компактності. Як і для повної вибірки зі 193 галактик, отримано, що розподіл частки теплового випромінювання у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц близький до лог-нормального з медіанним значенням близько 15 %; установлено залежність частки від еквівалентної ширини емісійної лінії Нβ. Єдина суттєва відмінність полягає в тому, що частка теплового випромінювання для підвибірки з 92 галактик не корелює з індексом кольору g – r, як це встановлено для галактик повної вибірки. Обговорюються причини такої відмінності.

Ключові слова: галактики з активним зореутворенням, випромінювання в радіоконтинуумі, теплове випромінювання.

Вступ

Ця робота продовжує дослідження, результати яких детально викладено в наших попередніх статтях [1, 8]. Вони пов'язані з вивченням випромінювання різних вибірок галактик, у яких перебігають активні процеси зореутворення, у широкому діапазоні довжин хвиль, зокрема в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Відомо, що це випромінювання переважно має нетеплове походження, але в зонах іонізованого водню його тепловий компонент (free-freeвипромінювання) може бути помітним і розглядатися як опосередкований індикатор процесів зореутворення [5]. Детальний огляд літератури та посилання наведено в роботах [1, 5, 6, 8].

У роботі [8] нами було проаналізовано випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц 52 галактик з активним зореутворенням з вибірки *LCG* (Luminous Compact Galaxies), яким притаманні високі світності та еквівалентні ширини EW(Hβ) емісійної лінії Hβ. Було показано, що незважаючи на високу активність та відносну молодість спалаху зореутворення в *LCG* галактиках, про що свідчили значення EW(Hβ) ≥ 100 Å, випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц залишалося переважно нетепловим, а частка *A* теплового компонента у загальному випромінюванні в радіоконтинуумі становила у середньому 17 %.

Вибірка та її первинне опрацювання

У роботі [1] було оцінено частку *A* теплового випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для 193 компактних галактик з активним зореутворенням із вибірки *CSFG* (compact star-forming galaxies) [11], створеної на основі цифрового огляду неба SDSS DR12 [10]. Детальний опис *CSFG* вибірки та її опрацювання наведено в роботах [6, 11]. Нагадаємо лише принципові позиції критерію відбору галактик до вибірки: наявність у спектрі емісійних ліній Н β з еквівалентною шириною EW(H β) ≥ 10 Å; компактність (розмір ≤ 10″); відсутність спектральних ознак наявності активних галактичних ядер. На діагностичній діаграмі [OIII] λ 5007Å/H β λ 4861Å – [NII] λ 6583Å/H α λ 6563Å [2] галактики *CSFG* вибірки займають позиції, притаманні галактикам з активним зореутворенням, а не з активними галактичними ядрами. Галактики для дослідження випромінювання в радіоконтинуумі було відібрано шляхом перехресного ототожнення списку *CSFG* із переліком радіоджерел каталогів NVSS [12] і FIRST [3] та подальшої візуальної ревізії. Пошук оптичних та радіопартнерів проводився із граничною кутовою відстанню ≤ 15″. Для відібраних 193 галактики отримано, що як нижня, так і верхня межі частки *A* теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі мають лог-нормальні розподіли із середніми значеннями, що відповідають часткам у 5,9 та 14,5 %, відповідно. Частка зростає при збільшенні еквівалентної вирини EW(H β) емісійної лінії H β при постійному індексові кольору *g* – *r* (*g* та *r* – модельні значення зоряної величини у відповідних смугах із бази даних SDSS) або при збільшенні індексу кольору при постійній еквівалентній ширині емісійної лінії H β .

Про нижню й верхню межі, а не про точні значення частки теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі йдеться з такої причини. За даними про радіовипромінювання було визначено повний потік і світність у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Електронна температура та електронна густина, що притаманні галактикам із *CSFG* вибірки, відповідають умовам, декларованим у роботі [4], та дозволяють визначити потік теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі на основі випромінювання галактик у лінії Н β за встановленим там співвідношенням. Усе це разом дозволило оцінити частку *A* теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі. Для проведення розрахунків до світності галактик у лінії Н β було внесено дві належні корекції: за екстинкцією випромінювання та апертурою спостережень (див. докладніше у [6, 9, 11]). В останній корекції використовувався корекційний множник 2.512^{*m*(ар)-*m*}, де *m* та *m*(ар) – це модельна повна видима SDSS зоряна величина у смузі, яка обиралась залежно від червоного зміщення *z* галактики, і відповідна зоряна величина у спектроскопічній апертурі 3 arcsec (для об'єктів класичного SDSS огляду) та 2 arcsec (для об'єктів BOSS огляду). Така корекція базується на припущенні, що розподіл яскравості у щілині та по всій поверхні галактики однаковий. Для неточкових об'єктів, якими згідно з візуальним аналізом виявились галактики вибірки, це припущення є не зовсім коректним. Тому в роботі [1] розрахунки частки *A* теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі проводились у двох варіантах: а) поправку на апертуру враховано, але її обмежено величиною *m(ар) – m* = 1^m (верхня межа частки); б) без урахування апертури спостережень, що веде до недооцінювання величини F(H β) потоку випромінювання в лінії Н β , а отже, і частки теплового компонента (нижня межа частки).

Для того, щоб отримати більш надійний результат та зменшити невизначеність обчислень, пов'язану із селекцією неточкових джерел, було створено підвибірку галактик із жорсткішим критерієм компактності. До підвибірки ввійшли 92 галактики, для яких різниця повної зоряної величини та аналогічної у щілині обмежена 1 зоряною величиною. Розрахунки частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для цієї підвибірки проводились аналогічно виконаним у роботах [1, 8].

Результати

Таким чином, ми маємо повну вибірку зі 193 галактик і переглянуту підвибірку з 92 галактик із жорсткішим критерієм компактності, а отже, більш надійною корекцією за апертурою. Результати опрацювання першої описано у статті [1], тому ми зосередимось на результатах, отриманих для підвибірки. Основний результат, такий як розподіл частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц, близький до лог-нормального з медіаною близько 15 % і залишається незмінним. Це можна наочно побачити на рис. 1, де дано розподіл величини Ig(A) для двох вибірок. Залишається також залежність Ig(A) від EW(Hβ) – еквівалентної ширини лінії Hβ у вигляді

$$Ig(A) = C_1 + C_2(EW(H\beta) - EW(H\beta)_0).$$
(1)



Рис. 1. Розподіл логарифма частки теплового компонента А в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц На гістограмах зі штриховкою наведено результати, отримані для повної вибірки зі 193 галактик, темнішим – для підвибірки з 92 галактик

Тут EW(H β)₀= 36.93 є середнім значенням EW(H β). Розрахунок дає таку апроксимацію: C₁ = -0.89 ± 0.029, C₂ = -0.33 ± 0.11. Імовірність того, що залежність від EW(H β) є статистично значущою, дорівнює 92 % за критерієм Фішера [7]. Однак для підвибірки є певна відмінність від статистичних властивостей повної вибірки: залежність lg(A) від індексу кольору *g* - *r* стає статистично незначущою. Це може бути пов'язано з тим, що як індекс кольору, так і корекція за апертурою використовує повну зоряну величину галактики, тому ці величини можуть бути певною мірою зкорельовані. Для повної вибірки зі 193 галактик, яка містить галактики з більшими корекціями випромінювання в емісійній лінії H β за апертурою, цей ефект більше виражений. Він може призводити до виявлення хибної кореляції частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі та індексу кольору *g* - *r*.

Висновки

Дослідження статистичних властивостей ревізованої підвибірки галактик з активним зореутворенням, створеної за більш жорстким критерієм щодо компактності, виявило, що основні результати залишаються такими самими, як отримані в роботі [1], як кількісно, так і якісно. Однак дослідження властивостей підвибірки дозволяє уточнити функціональну залежність частки теплового випромінювання від інших спостережних характеристик галактик. Показано, що статистично значуща залежність частки теплового випромінювання від інших спостережних характеристик галактик. Показано, є хибною й може виникати через взаємні кореляції різних показників для кожної галактики. Це в черговий раз підтверджує, що статистичне опрацювання даних потребує всебічного аналізу вибірок досліджень і ретельного контролю з боку дослідника. При збільшенні віку спалаху зореутворення частка теплового випромінювання від вмісту важких елементів.

Роботу виконано в рамках теми 19БФ023-01 НДЧ Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Під час виконання роботи було використано інформацію з бази даних позагалактичних джерел NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), яка функціонує під керівництвом Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology при контракті з National Aeronautics and Space Administration; огляди Sloan Digital Sky Survey (SDSS) та SDSS-II виконані та функціонують завдяки Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, the U. S. Department of Energy, the National Aeronautics and Space Administration, the Japanese Monbukagakusho, the Max Planck Society та the Higher Education Funding Council for England; огляди NVSS (National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey) та FIRST.

Література

1. Парновський С. Л. Теплове випромінювання галактик з активним зореутворенням у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц / С. Л. Парновський, І. Ю. Ізотова // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2018. – Вип. 57(1). – С. 42–48.

Baldwin J. A. Classification parameters for the emission line spectra of extragalactic objects / J. A. Baldwin, M. M. Phillips, R. Terlevich // PASP. – 1981.
 V. 93, No 551. – P. 5–19.

Becker R. H. The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters / R. H. Becker, R. L. White, D. J. Helfand // Astrophys. J. – 1995.
 V. 450. – P. 559.

4. Caplan J. Extinction and reddening of HII regions in the Large Magellanic Cloud / J. Caplan, L. Deharveng // Astron. Astrophys. - 1986. - V. 155. - P. 297-313.

5. Condon J. J. Radio emission from normal galaxies / J. J. Condon // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. – V. 30. – P. 575 – 611.

6. Izotova I. Y. Star formation rate in star-forming galaxies / I. Y. Izotova, Y. I. Izotov // Astrophys. and Space Sci. - 2018. - V. 363, Issue 3. - Id. 47, P. 9.

7. Fisher R. A. Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – London : Oliver and Boyd, 1950.

8. Parnovsky S. L. Radio emission at 1.4 GHz from luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova // Astron. Nach. / Astron. Notes. – 2015. – V. 336, № 3. – P. 276–283.

9. Parnovsky S. L. Hα and UV luminosities and star formation rates of large sample of luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Yu. Izotova,
 Y. I. Izotov // Astrophys. and Space Sci. – 2013. – N 343. – P. 361–376.
 10. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / S. Alam, F. D. Albareti, P. Allende et al.

10. The Eleventh and Twelth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / S. Alam, F. D. Albareti, P. Allende et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. - 2015. - V. 219, Issue 1.- id. 12. - 27 p.

11. The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, C. Henkel // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – V. 462, Issue 4. – P. 4427–4434.

12. The NRAO VLA sky survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // Astron. J. - 1998. - V. 115, No 5. - P. 1693-1716.

Надійшла до редколегії 15.05.19

S. Parnovsky, Dr.Sci., prof., I. Izotova, Ph.D., Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STUDY OF THE THERMAL EMISSION IN THE RADIO CONTINUUM AT 1.4 GHZ IN SELECTED COMPACT GALAXIES WITH ACTIVE STAR FORMATION

The fraction of thermal (free-free) emission in the radio continuum at the frequency of 1.4 GHz is derived in subsample of 92 compact starforming galaxies (CSFGs). These galaxies with detected radio emission and selected with a more strong compactness criterion represent the subsample of a larger sample of 193 galaxies (Parnovsky, S., & Izotova, L: 2018, BTSNU, 57(1), 41). We use the 1.4 GHz fluxes from the FIRST (Becker R.H.,White R.L., & Helfand D.J.: 1995, ApJ, 450, 559). The fluxes of the thermal component at 1.4 GHz are derived from the extinction- and aperturecorrected fluxes of the H β emission line in the SDSS spectra following to (Caplan, J., & Deharveng, L.: 1986, A&A, 155, 297) and are compared with the total fluxes in radio continuum.

As well as for a complete sample of 193 galaxies, the distribution of the fraction of thermal emission A in the radio continuum at 1.4 GHz in subsample of 92 CSFGs is similar to the log-normal one with a median value of about 15 %. We find that the fraction of thermal emission at 1.4 GHz is lower for the older starbursts. However, the results of the statistical analysis of the dependence of A on various parameters have been changed. For the complete sample, correlations of A with the equivalent width EW(H β) of the H β emission line and the g – r colour index are revealed. For the subsample of 92 galaxies, the statistical significance of the correlation A with the colour index becomes negligible, and it corresponds to a confidence level of 92 % for dependence of A on the equivalent width EW(H β). The reasons for the differences in the properties of these samples are discussed.

Keywords: star-forming galaxies, continuum radio emission, thermal emission.

С. Парновский, д-р физ.-мат. наук, проф., И. Изотова, канд. физ.-мат. наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИОКОНТИНУУМЕ НА ЧАСТОТЕ 1.4 ГГЦ ВЫБРАННЫХ КОМПАКТНЫХ ГАЛАКТИК С АКТИВНЫМ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ

Исследована доля теплового излучения в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц для подвыборки из 92 компактных галактик с активным зевздообразованием, созданной при использовании более жесткого критерия компактности. Как и для полной выборки из 193 галактик, получено близкое к лог-нормальному распределение доли теплового излучения в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц с медианным значением около 15 %; установлена зависимость доли от эквивалентной ширины эмиссионной линии Нβ. Единственное существенное отличие заключается в том, что доля теплового излучения для подвыборки из 92 галактик не коррелирует с индексом цвета g – r, как это установлено для галактик полной выборки. Обсуждаются причины такого отличия.

Ключевые слова: галактики с активным звездообразованием, излучение в радиоконтинууме, тепловое излучение.

УДК 523.982 + 52-337

В. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

СУТТЄВА НЕОДНОРІДНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ГОЛОВНІЙ СОНЯЧНІЙ ПЛЯМІ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ NOAA 10488

Основний висновок роботи полягає в тому, що в головній плямі активної області NOAA 10488 існувала велика дисперсія напруженостей магнітного поля, за якої мінімальні та максимальні напруженості відрізнялись приблизно на порядок. Цей результат стосується центральної частини тіні сонячної плями для квадрата зі сторонами 2×2 Мм² у картинній площині. Спостережний матеріал отримано на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Цей інструмент дозволяє аналізувати ефект Зеємана одночасно в тисячах спектральних ліній майже всієї видимої області спектра. Для нашого аналізу були вибрані чотири лінії нейтрального заліза Fel з довжинами хвиль 6290.97, 6301.51, 6302.50 ma 6498.97 А́ й ефективними факторами Ланде 1.481, 1.669, 2.487 та 1.375, відповідно, які визначені емпірично в лабораторних умовах. У вивченій сонячній плямі з цих ліній лише Fel 6302.51 має повне зеєманівське розщеплення, яке відповідає магнітному полю 3400 Гс. Однак розщеплення інших трьох ліній відповідає магнітним полям у дуже широкому діапазоні, від кількох сотень гаусів до 3700 Гс, що свідчить про суттєву неоднорідність магнітного поля. Також вигляд бісекторів профілів I ± V указує на значну відмінність спостереженого поля від однорідного. Зокрема, теоретично при однорідному не поздовжньому магнітному полі бісектори мають найсильніше розщеплюватись у ядрах указаних ліній, тоді як насправді картина є складнішою. Усі три вказані лінії показують тенденцію до зростання розщеплення в далеких крилах, на відстанях 120–250 мА́ від їхніх центрів. Такий ефект можливий за двокомпонентної структури магнітного поля (фон + просторово нероздільні структури) і за напруженостей у діапазоні 4.5-8 кГс у просторово нероздільних структурах. Магнітна полярність в обох компонентах є однаковою, а саме N. Отримані спостережні дані вказують на те, що в дослідженій сонячній плямі величина магнітного поля суттєво змінювалась не тільки по поверхні, але й по висоті.

Ключові слова: Сонце, сонячні плями, магнітні поля, активна область NOAA 10488, ешельні зеєман-спектрограми, бісектори профілів спектральних ліній, просторово нероздільні структури, неоднорідність магнітного полія.

Вступ

Магнітні поля в сонячних плямах вимірюються зазвичай по лініях із найбільшими факторами Ланде g, у діапазоні g = 2.5–3.0. У спектрах великих сонячних плям такі лінії мають повне спектральне розділення зеєєманівських π і σ -компонент, що дозволяє надійно визначити таку важливу характеристику, як модуль напруженості магнітного поля. Ці вимірювання відображають величину магнітного поля на більшій частині площі тіні сонячних плям, тобто вони відповідають фактору заповнення f, близькому до одиниці ($f \approx 1$). Такі цінні вимірювання, однак, не дають відповіді на запитання, якою є напруженість магнітного поля в маломасштабних (просторово нероздільних) структурах тіні сонячної плями, для яких f << 1. Для областей за межами сонячних плям запропоновано кілька методів оцінювання магнітного поля в таких структурах, зокрема метод відношення ліній (див. [2, 10, 11, 16]). Цей метод передбачає використання кількох ліній з однаковими температурними чутливостями й висотами формування в атмосфері Сонця, але різними факторами Ланде. Аналогічні оцінки можуть бути отримані також на основі детального вивчення розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$ [3, 6].

Незважаючи на те, що метод вимірювань фонового магнітного поля в сонячних плямах по лініях із великими факторами Ланде є досить простим, у ньому є певні методичні особливості, які слід ураховувати при порівнянні даних із різних магнітометричних обсерваторій [5]. Зазвичай напруженість магнітного поля в тіні великих (≥ 20 Мм) сонячних плям перебуває в межах 2–3 кГс і дуже рідко досягає значень 5–6 кГс [4, 8, 12, 13, 15].

Що стосується величини магнітного поля в субтелескопічних елементах тіні сонячної плями (для яких *f* << 1), то тут на сьогодні ще багато неясного. У роботі [14] зроблено висновок, що в півтіні сонячної плями напруженості магнітного поля можуть досягати 7.5 кГс, причому в таких місцях речовина опускається з великими швидкостями, близько 20 км/с. Для тіні сонячної плями знайдені вказівки на близькі напруженості (≈ 8 кГс), однак на підйом плазми зі швидкостями близько 2 км/с [7]. В обох указаних роботах аналізувались спектральні лінії Fel 6301.5 і Fel 6302.5 з факторами Ланде 1.67 і 2.5, відповідно. Важливо перевірити висновки вказаних робіт, використовуючи також спектральні лінії з меншими факторами Ланде. Доцільність використання спектральних ліній з малими факторами Ланде для діагностики екстремально сильних магнітних полів обґрунтована в роботі [6].

У цій роботі ми вивчаємо магнітні поля в головній плямі активної області NOAA 10488, яка попередньо вже вивчалась у роботі [7]. Однак, на відміну від указаної роботи, у даній роботі ми розширюємо кількість досліджених спектральних ліній із двох до чотирьох, щоб перевірити реальність деяких тонких ефектів, які можуть указувати на особливо сильні магнітні поля в цій плямі.

Спостереження і вибрані спектральні лінії

У кінці жовтня – на початку листопада 2003 р. на Сонці був різкий сплеск сонячної активності, коли на ньому виникло кілька спалахів балу X, включаючи спалах балу X28+, який згідно з бортовими детекторами GOES був найпотужнішим за останні 43 роки. Цей спалах виник 4 листопада 2003 р. у активній області NOAA 10486. Наші спостереження стосуються більш спокійної активної області, NOAA 10488 (рис. 1), яка в день спостережень, 29 жовтня 2003 р., була недалік від центра диска (косинус її геліографічного кута був µ = 0.97). Найбільша пляма цієї активної області мала діаметр півтіні близько 46 Мм і магнітну полярність *N*, і саме вона була нами вивчена. Зеєманспектрограма цієї плями була отримана на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка при експозиції 30 с, починаючи із 12:53:50 UT. Характеристики телескопа і спектрографа наведені в роботі [7].



Рис. 1. Активна область_NOAA 10488 згідно з даними спостережень SOHO в білому світлі. Досліджена сонячна пляма є найбільшою на цьому рисунку

Були проаналізовані профілі *I* ± *V* чотирьох спектральних ліній (табл. 1). У таблиці розшифровка хімічного елемента, довжина хвилі λ (Å), еквівалентна ширина лінії в спектрі спокійного Сонця W (mÅ) і потенціал збудження нижнього терму EP (eB) наведені згідно з монографією [9]. Ефективні фактори Ланде g_{eff} усіх ліній відповідають лабораторним величинам згідно із [17].

Деякі параметри вибраних спектральних ліній

Таблиця 1

№ п/п	Елемент і номер мультиплету	Довжина хвилі λ (Å)	Еквівалентна ширина W (mÅ)	Потенціал збудження ЕР (еВ)	Ефективний фактор Ланде g _{eff}
1	Fel – 816	6301.515	127	3.65	1.669
2	Fel – 816	6302.507	83	3.69	2.487
3	Fel – 1258	6290.968	66	4.73	1.481
4	Fel – 13	6498.95	43	0.96	1.375

Лінії № 1 і 2 належать до одного мультиплету, мають приблизно однакові температурні чутливості та близькі глибини формування в атмосфері Сонця, однак суттєво різні фактори Ланде. Ці лінії неодноразово використовувались для діагностики просторово нероздільних магнітних полів методом відношення ліній [1, 2, 16]. Лінії № 3 і 4 мають різні температурні чутливості та висоти формування в атмосфері, але близькі фактори Ланде. Разом із лінією № 1 вони можуть бути використані для діагностики висотної неоднорідності магнітного поля.

Профілі ліній і магнітні поля

Спостережені профілі *I* ± *V* ліній № 1, 3, 4 (рис. 2) мають такі характерні особливості: (а) величина розщеплення профілів є різною в різних ліній, зокрема лінія Fel 6290.968 розщеплюється в цілому значно менше, ніж інші лінії; (б) розщеплення бісекторів профілів *I* ± *V* досить своєрідно змінюється при переході від ядра лінії в її крила (рис. 3), причому характер цих змін є різним у різних спектральних лініях.



Рис. 2. Порівняння спостережених профілів *I* ± *V* трьох магніточутливих ліній у головній сонячній плямі активної області NOAA 10488. Тонкими ламаними й майже вертикальними лініями показані бісектори профілів

Якщо зафіксувати максимальне розщеплення бісекторів у кожній лінії, то воно відповідає таким напруженостям B_{max} : 0.6 кГс для лінії Fel 6290.968, 2.6 кГс для Fel 6301.515 і 3.7 кГс для Fel 6498.95 (похибки вимірювань для всіх ліній близько ± 0.1 кГс). Таким чином, остання лінія дає навіть більше виміряне магнітне поле, ніж лінія Fel 6302.5 (3.7 кГс проти 3.4 кГс). Однак лінія Fel 6302.5, маючи більшу магнітну чутливість (у неї g_{eff} = 2.487), має у спектрі повне розділення π – і σ -компонент, що дає змогу виміряти модуль напруженості магнітного поля *B*. У лінії Fel 6498.95 ефективний фактор Ланде у 1.8 раза менший, π – і σ -компоненти перекриваються у спектрі й у такому випадку теоретично має вимірюватись величина, проміжна між модулем магнітного поля *B* і його поздовжньою компонентою $B_{\parallel} = B\cos\gamma$, де γ – кут між силовою лінією магнітного поля і променем зору. Очевидно, оскільки $B_{\parallel} \leq B$, то при однорідному полі мало б бути B(6302.5) \geq B(6498.95). Оскільки спостереженнями зазначена протилежна нерівність, то це може були лише у випадку, коли магнітне поле змінюється з висотою, тобто є неоднорідним.

З рис. З видно, що не тільки *B*_{max}, але й середнє за профілем лінії магнітне поле також суттєво (до 5 разів) відрізняється для різних спектральних ліній. Оскільки таке поле характеризує середнє значення напруженості по всій площі вхідної апертури, яка для даного матеріалу спостережень еквівалентна квадрату 2×2 Мм² у картинній площині, то звідси також випливає висновок, що величина магнітного поля суттєво змінювалась із висотою в атмосфері.



Рис. 3. Виміряне розщеплення бісекторів трьох ліній, виражене в напруженостях магнітного поля *В* залежно від залишкової інтенсивності *I / I*_c, де *I* – параметр Стокса *I* (інтегральна інтенсивність) у певному місці крила спектральної лінії, *I*_c – цей параметр у найближчому до лінії спектральному континуумі

На суттєву неоднорідність магнітного поля в горизонтальній площині вказує характер розщеплення бісекторів на різних глибинах профілів ліній (рис. 3). За однорідного магнітного поля й неповного розділення зеєманівських ті σ-компонент бісектори профілів I ± V мали б розщеплюватись найсильніше в ядрі ліній, яким відповідають найменші значення залишкової інтенсивності // Ic на рис. 3, де / – параметр Стокса / (інтегральна інтенсивність) у певному місці крила спектральної лінії, Іс – цей параметр у найближчому до лінії спектральному континуумі [7]. Щодо спостережених профілів, то це частково виконується лише для двох ліній, а саме Fel 6301.515 і Fel 6498.95. Однак у далеких крилах цих ліній, а також у крилах лінії Fel 6290.968 намічається ще один максимум розщеплення, який імовірно вказує на двокомпонентну структуру магнітного поля [3, 6, 7]. У такому разі віддаль цих місць у профілях від центрів ліній наближено дорівнює зеєманівському розщепленню Дін у просторово нероздільних (субтелескопічних) структурах, тобто тих, яким відповідає дуже малий фактор заповнення (f << 1). З рис. З випливає, що тоді Δλн = 120÷250 mÅ, що з урахуванням факторів g_{еff} ліній спричиняє напруженості в діапазоні 4.5–8 кГс у просторово нероздільних структурах. Загалом такі значення узгоджуються з висновками робіт [7, 14] і вказують на те, що величина магнітного поля в маломасштабній компоненті також, імовірно, змінювалася з висотою в атмосфері.

Висновки та їхнє обговорення

Основний висновок нашої роботи полягає в тому, що в головній плямі активної області NOAA 10488 існувала велика дисперсія напруженостей магнітного поля, за якої мінімальні й максимальні напруженості відрізнялись приблизно на порядок. Цей результат стосується центральної частини тіні сонячної плями для квадрата зі сторонами 2×2 Мм² у картинній площині й випливає з аналізу зеєманівського розщеплення чотирьох ліній нейтрального заліза Fel з довжинами хвиль 6290.97, 6301.51, 6302.50 і 6498.97 Å та ефективними факторами Ланде 1.481. 1.669. 2.487 і 1.375, відповідно, які визначені емпірично в лабораторних умовах. У вивченій сонячній плямі з цих ліній лише Fel 6302.5 має повне зеєманівське розщеплення, яке відповідає магнітному полю 3400 Гс. Однак розщеплення інших трьох ліній відповідає магнітним полям у дуже широкому діапазоні, від кількох сотень гаусів до 3700 кГс, що свідчить про суттєву неоднорідність магнітного поля. Також вигляд бісекторів профілів I ± V указує на значну відмінність спостереженого поля від однорідного. Усі три вказані лінії показують тенденцію до зростання розщеплення в далеких крилах, на відстанях 120-250 мÅ від їхніх центрів, тоді як теоретично за однорідного непоздовжнього магнітного поля бісектори мають найсильніше розщеплюватись у ядрах указаних ліній. Такий ефект можливий за двокомпонентної структури магнітного поля (фон + просторово нероздільні структури) і за напруженостей у діапазоні 4.5-8 кГс у просторово нероздільних структурах. Магнітна полярність в обох компонентах є однаковою, а саме N. Отримані спостережні дані вказують на те, що в дослідженій сонячній плямі величина магнітного поля суттєво змінювалась не тільки по поверхні, але й по висоті.

Слід зауважити, що подана на рис. З картина розщеплення бісекторів представляє середній результат щодо розщеплення обох крил кожної лінії, "фіолетового" і "червоного". Як можна бачити з рис. 2, між цими крилами є певні відмінності, зокрема "фіолетове" крило кожної лінії має додаткову локальну депресію, яка у випадку лінії Fel 6498.95 проявляється найбільш чітко у вигляді дискретного й вузького компонента основної картини розщеплення. Це, очевидно, є ще одним свідченням того, що у просторово нероздільних структурах переважають негативні променеві швидкості на рівні 2-3 км/с, тобто підйом плазми вгору, а не її опускання, як це знайдено в роботі [14] для півтіні сонячної плями. Таким чином, в основних рисах підтверджуються висновки роботи [7] щодо напруженостей маломасштабного поля в плямі, а також величини та знака в цих місцях променевих швидкостей. Водночас є дещо несподіваним те, що величина магнітного поля у фоновій компоненті (для якої фактор заповнення близький до одиниці) також сильно відрізняється для різних фотосферних ліній. Це питання потребує додаткового вивчення.

Подяка

Це дослідження було профінансоване Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 19БФ023-03.

Список використаних джерел

1. Botygina O. O. Estimation of the fluxtube diameters outside sunspots using Hinode observations. Preliminary results / O. O. Botygina, M. Yu. Gordovskyy, V. G. Lozitsky // Advances in Astronomy and Space Physics. - 2016. - № 6. - P. 20-23.

2. Domínguez Cerdeña I. Inter-network magnetic fields observed with sub-arc sec resolution / I. Cerdeña Domínguez, J. Almeida Sánchez, F. Kneer // Astronomy and Astrophysics. - 2003. - Vol. 407. - P. 741-757.

3. Gordovskyy M. Observations of unresolved photospheric magnetic fields in solar flares using FeI and CrI lines / M. Gordovskyy, V. G. Lozitsky // Solar Physics. - 2014. - Vol. 289, Iss. 10. - P. 3681-3701.

4. Livingston W. Sunspots with the strongest magnetic fields / W. Livingston, J. W. Harvey, O. V. Malanushenko // Solar Phys. - 2006. - Vol. 239. - P. 41-68.

5. Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots / N. I. Lozitska, V. GLozitsky, O. A. Andryeyeva et al. // Advances in Space Research. - 2015. - Vol. 55. Iss. 3. - P. 897-907.

6. Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of I ± V profiles / V. G. Lozitsky // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 958–967

7. Lozitsky V. G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra / V. G. Lozitsky // Advances in Space Research. - 2016. - Vol. 57. - P. 398-407.

8. Problem of super-strong magnetic fields on the Sun: Brief chronology and new observational data / V. G. Lozitsky, V. B. Yurchyshyn, K. Ahn et al. // Odessa Astronomical Publications. - 2018. - Vol. 30. - P. 152-158.

9. Moore C. E. A multiplet table of astrophysical interest. Contribution from the Princeton Uniersity Observatory / C. E. Moore. - Princeton ; New Jersey, 1945. – № 20.

10. Rachkovsky D. N. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods / D. N. Rachkovsky, T. T. Tsap, V. G. Lozitsky // Journal of Astrophysics and Astronomy. - 2005. - Vol. 26. - P. 435-445.

Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network / J. O. Stenflo // Solar Physics. – 1973. – Vol. 32, No 1. – P. 41–63.
 Steshenko N. V. Magnetic fields of small sunspots and pores / N. V. Steshenko // Bull. Crimea. Astrophys. Obs. – 1967. – Vol. 37. – P. 21–28.
 Takenori J. Okamoto and Takashi Sakurai. Super-strong magnetic fields in sunspots / J. Takenori // The Astrophysical Journal Letters. – 2018.

- Vol. 852. Iss. 1. article id. L16.

14. Peripheral downflows in sunspot penumbrae / M. Van Noort, A. Lagg, S. K. Tiwari, S. K. Solanki // Astron. Astrophys. - 2013. - Vol. 557, id. A24.

15. Strong transverse photosphere magnetic fields and twist in light bridge dividing delta sunspot of active region 12673 / Y. Wang, V. Yurchyshyn, C. Lin et al. // Res. Notes of the American Astron. Society. - 2018. - Vol. 2, Iss. 1, article id. 8.

16. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions / E. Wiehr // Astron. and Astrophys. – 1978. – Vol. 69, No 2. – P. 279–284. 17. Zemanek E. N. 1976. Splitting of Some Spectral Lines of FeI in a Magnetic Field / E. N. Zemanek, A. P. Stefanov // Vestnik Kiev University, Seria Astronomii. – 1976. – Vol. 18. – P. 20–36.

Надійшла до редколегії 11.07.19

V. Lozitsky, Dr.Sci.,

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

SIGNIFICANT INHOMOGENEITY OF A MAGNETIC FIELD IN THE GREATEST SUNSPOT OF ACTIVE REGION NOAA 10488

The main conclusion of our work is that in the greatest sunspot of the active region NOAA 10488 there was a large dispersion of magnetic field strengths, at which the minimum and maximum strengths differed by approximately an order of magnitude. This result applies to the central part of the sunspot umbra, for a square with sides $2 \times 2 \text{ Mm}^2$ in the picture plane. Observation material was obtained on the Echelle spectrograph of the horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv. This instrument allows to analyze the Zeeman effect simultaneously in thousands of spectral lines of almost the entire visible region of the spectrum. For our analysis, four iron Fel lines with wavelengths of 6290.97, 6301.51, 6302.50 and 6498.97 Å and effective Lande factors 1.481, 1.669, 2.487 and 1.375, respectively, were used. In the studied sunspot, only Fel 6302.5 from these lines has a complete Zeeman splitting, which corresponds to magnetic field of 3400 G. However, the splitting of the other three lines corresponds to magnetic fields in a very wide range, from several hundred Gauss to 3700 G, which indicates significant inhomogeneity of the magnetic field. Also, the shape of bisectors of $1 \pm V$ profiles does not correspond to a case of homogeneous field. In particular, theoretically, in a homogeneous and non-longitudinal magnetic field, bisectors should be have the maximum splitting in distant wings, at distances of 120-250 mAh from their centers. This effect is possible under the two-component structure of the magnetic field (background field + spatially unresolved structures) having magnetic strengths in the range of 4.5-8 kGs in spatially unresolved structures. Magnetic polarity in both components is the same, namely N. The observational data indicate that the magnetic field value differed significantly not only on the surface, but also in height in the studied sunspot.

Keywords: Sun, sunspots, magnetic fields, active region NOAA 10488, Echelle Zeeman-spectrographs, bisectors of profiles of spectral lines, spatially unresolved structures, magnetic field inhomogeneity.

В. Лозицкий, д-р физ.-мат. наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

СУЩЕСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ГОЛОВНОМ СОЛНЕЧНОМ ПЯТНЕ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 10488

Основной вывод работы состоит в том, что в головном пятне активной области NOAA 10488 существовала большая дисперсия напряженностей магнитного поля, при которой минимальные и максимальные напряженности отличались примерно на порядок. Этот результат соответствует центральной части тени солнечного пятна для квадрата со сторонами 2×2 Мм² в картинной плоскости. Наблюдательный материал получен на эшельном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Этот инструмент позволяет анализировать эффект Зеемана одновременно в тысячах спектральных линий почти всей видимой области спектра. Для анализа были отобраны четыре линии нейтрального железа Fel с длинами волн 6290.97, 6301.51, 6302.50 и 6498.97 А и эффективными факторами Ланде 1.481, 1.669, 2.487 и 1.375, соответственно, определенными эмпирически в лабораторных условиях. В изученном солнечном пятне из этих линий лишь линия Fel 6302.5 имеет полное зеемановское расщепление, которое соответствует магнитному полю 3400 Гс. Однако расщепление других трех линий соответствует магнитным полям в очень широком диапазоне, от нескольких сотен до 3700 Гс, что свидетельствует о значительной неоднородности магнитного поля. Также вид бисекторов профилей I ± V указывает на значительное отличие наблюдаемого поля от однородного. В частности, теоретически при однородном непродольном магнитном поле бисекторы должны наибольше расщепляться в ядрах указанных линий, между тем как на самом деле картина более сложная. Все три указанные линии имеют тенденцию к возрастанию расщепления в далеких крыльях, на расстояниях 120–250 мА от их центров. Такой эффект возможен при двухкомпонентной структуре магнитного поля (фон + пространственно неразрешимые структуры) и при напряженностях в диапазоне 4.5—8 кГс в пространственно неразрешимых структурах. Магнитная полярность в обеих компонентах одинакова, а именно N. Полученные наблюдательные данные указывают на то, что в изученном пятне величина магнитного поля существенно изменялась не только по поверхности, но и с высотой в атмосфере.

Ключевые слова: Солнце, солнечные пятна, магнитные поля, активная область NOAA 10488, эшельные зееман-спектрограммы, бисекторы профилей спектральных линий, пространственно неразрешимые структуры, неоднородность магнитного поля.

УДК 524.7

О. Александров, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., В. Жданов, д-р фіз.-мат. наук, проф., В. Слюсар, канд. фіз.-мат. наук, мол. наук. співроб., Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ПЕРЕВІРКА ФОРМУЛИ ЕЙНШТЕЙНА ДЛЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ВІДХИЛЕННЯ СВІТЛА ЗА КРИВИМИ БЛИСКУ МІКРОЛІНЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Запропоновано варіант перевірки формули Ейнштейна на базі даних про мікролінзування на зорях Галактики. Із цією метою модифіковано рівняння гравітаційного лінзування, куди введено параметр збурення є, що характеризує відхилення від формули загальної теорії відносності. У лінійному наближенні за є отримані відповідно збурені координати мікрозображень і коефіцієнт підсилення потоку випромінювання. Ці формули застосовано до припасування кривих блиску мікролінзованих джерел.

Ключові слова: гравітаційне відхилення світла, формула Ейнштейна, гравітаційне мікролінзування, криві блиску.

1. Формула Ейнштейна і гравітаційне лінзування

Формула для кута заломлення θ світлового променя при його проходженні поблизу сферично симетричного тіла з масою *M* була отримана Ейнштейном у 1915 р.:

$$\theta(p) = 4 \frac{GM}{c^2 p} \,. \tag{1}$$

Тут *G* – гравітаційна стала, *с* – швидкість світла; *р* – прицільний параметр, тобто відстань від центра тіла до прямої, уздовж якої поширювався світловий промінь до його викривлення гравітаційним полем. Величину 2*GM*/*c*²

називають гравітаційним радіусом тіла r_g , отже, формула (1) також може бути подана як $\theta = 2 \frac{r_g}{p}$. На поверхні Сон-

ця, коли *p* дорівнює його радіусу *R*, $r_q/R \approx 4 \cdot 10^{-6}$.

Згідно з формулою (1) кут відхилення світла гравітаційним полем у два рази перевищує той, що очікувався за теорією Ньютона. Після вимірювань цього ефекту під час сонячного затемнення у 1919 р. це стало першим перевіреним завбаченням загальної теорії відносності (ЗТВ) [1-3]. Однак треба зауважити, що точність тих вимірювань була дуже низькою.

Щоб перевірити окрему формулу або цілу теорію, а точніше, визначити межі, у яких цю формулу або теорію можна вважати експериментально підтвердженими, до них вводять додаткові параметри й за експериментальними даними оцінюють їхні гранично можливі значення. У випадку теорії тяжіння серед інших підходів розроблено так званий параметризований пост-ньютонівський формалізм (ППН-формалізм), який охоплює, окрім ЗТВ, цілий клас метричних теорій гравітації [4, 5]. У рамках цього ППН-формалізму формула для кута відхилення світла, що замінює (1), має такий вигляд:

$$\theta_{\gamma} = 2(1+\gamma)\frac{GM}{c^2\rho} \,. \tag{2}$$

Тут γ – один із ППН-параметрів. При цьому можлива відмінність від формули Ейнштейна характеризується параметром γ−1, для якого за даними радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ) отримана оцінка |γ−1|≤3·10⁻⁴ [5, 3]. Отже, можна вважати, що це та точність, з якою формула Ейнштейна підтверджена експериментально у гравітаційному полі Сонця.

Формула Ейнштейна утворює основу сучасної теорії гравітаційного лінзування, і в цьому розумінні підтверджується її здобутками. Можливість залучення гравітаційного лінзування до перевірки ЗТВ уже не раз привертала увагу (див., напр., [6-12]), зокрема щодо аналізу відмінностей гравітаційного лінзування у ЗТВ та альтернативних теорій тяжіння, а також аналізу розподілів темної матерії. Із цією метою можна залучити існуючий значний масив даних із галактичного мікролінзування зорями нашої Галактики (див., зокрема, [13, 14]).

Зауважимо, що точність вимірювання ефектів лінзування у кращому разі становить порядку відсотка. Природно, що точність перевірки ЗТВ тут буде значно нижчою. Сенс такої перевірки полягає в тому, що, порівняно з відхиленням променів у полі Сонця, вона є цілком незалежною, оскільки базується на іншому підході та іншому спостережному матеріалі, який стосується зір Галактики.

Уведення параметра збурення до рівнянь гравітаційного лінзування

Рівняння гравітаційного лінзування сферично симетричною (або точковою) масою М має вигляд [1–3]

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} - 4 \frac{GM}{c^2} \frac{D_{LS} D_L}{D_S} \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|^2}.$$
 (3)

Тут **у** та **х** – координатні вектори в площинах джерела і лінзи (початки координат обрано в центрі тіла та у відповідній точці на площині джерел); D_S і D_L – відстані від спостерігача до джерела і до лінзи, відповідно; D_{LS} – відстань між лінзою та джерелом. Величина $R_0 = \sqrt{4 \frac{GM}{c^2} \frac{D_{LS} D_L}{D_S}}$ – це так званий радіус кільця Ейнштейна. У термінах цієї

величини рівняння (3) набуває вигляду

 $\mathbf{y} = \mathbf{x} \left(1 - \frac{R_0^2}{\left| \mathbf{x} \right|^2} \right). \tag{4}$

За даними з гравітаційного лінзування неможливо безпосередньо оцінити параметр у формулі (2), оскільки в нас недостатньо інформації стосовно мас лінз. У цій роботі ми обговорюємо визначеність показника степеня у формулах (1) та (3). Із цією метою у формулі (1) додаємо до показника малий параметр є:

$$\theta_{\varepsilon}(p) = 4 \frac{GM}{c^2 p^{1+\varepsilon}}.$$
(5)

Порівнюючи з формулою (2), зауважимо, що в лінійному за є наближенні

$$\theta_{\varepsilon}(p) = 4(1 - \varepsilon \ln p) \frac{GM}{c^2 p}$$

Відповідно до (5) модифікуємо рівняння (4):

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} \left(1 - \frac{R_{\varepsilon}^a}{\left| \mathbf{x} \right|^a} \right), \tag{6}$$

де $a = 2 + \varepsilon$ за визначенням $R_{\varepsilon} = R_0^{2/a}$.

У рівнянні (4) можна перейти до нових координат, розділивши **х** та **у** на R_0 . Отже, надалі покладаємо $R_0 = 1$. Аналогічно в рівнянні (6) покладаємо $R_c = 1$.

Рівняння (4) має два розв'язки, які відповідають променям, що огинають гравітатор із двох боків. Нехай **у** = *y* · **e** , де *y* = |**y**| та **e** – одиничний вектор. У рівняннях (4) і (6) вектор **x** паралельний до **e** . Покладемо **x** = *X* · **e** . Після підставлення цього виразу в (4) отримуємо рівняння

$$X^2 - yX - 1 = 0. (7)$$

Воно має два корені: додатний $X_{p0} = \frac{1}{2} \left(y + \sqrt{y^2 + 4} \right)$ та від'ємний $X_{n0} = \frac{1}{2} \left(y - \sqrt{y^2 + 4} \right)$.

Ураховуючи мализну ε, розв'язки рівняння (6) достатньо отримати в лінійному наближенні. Покладаючи X_p = X_{0p} +ε·X_{1p} та X_n = X_{0n} +ε·X_{1n}, із рівняння (6) знаходимо

$$X_{p1} = \frac{-1}{\sqrt{y^2 + 4}} \ln(X_{p0}) \quad i \quad X_{n1} = \frac{1}{\sqrt{y^2 + 4}} \ln(-X_{n0}).$$
(8)

Зазначимо, що $-\ln(X_{\rho 0}) = \ln(-X_{n0})$, і отже, $X_{\rho 1} = X_{n1} \equiv X_1$.

При гравітаційному мікролінзуванні спостережуваними є зміни з часом блиску зорі-джерела при його проходженні поблизу зорі-лінзи. При цьому вимірюваним є лише сумарний блиск двох розглядуваних (мікро)зображень. Коефіцієнт підсилення $\mu(X)$ зображення в точці $\mathbf{x} = X \cdot \mathbf{e}$ визначається якобіаном лінзового відображення

$$\mu(X) = 1/|D(X)|, \ D(X) = \left|\frac{D(y_1, y_2)}{D(x_1, x_2)}\right|.$$
У випадку рівняння (6)
$$D_{\varepsilon}(X) = \left[1 - \left(\frac{1}{X}\right)^a\right] \left[1 + (1 + \varepsilon)\left(\frac{1}{X}\right)^a\right]$$
(9)

У випадку (4) у цій формулі треба покласти $\epsilon = 0$.

Вважаємо, що джерело рухається зі сталою швидкістю *v* по прямій, яка проходить крізь центр на відстані *p* при *t* = *t*₀. При цьому

$$y = \sqrt{p^2 + v^2 \left(t - t_0\right)^2} .$$
 (10)

Далі маємо $y > 0 \Rightarrow X_{\rho 0}(y) > 1 \Rightarrow D(X_{\rho 0}) > 0$ та $y > 0 \Rightarrow |X_{n0}(y)| < 1 \Rightarrow D(X_{n0}) < 0$, тому сумарний коефіцієнт підсилення двох зображень при $\varepsilon = 0$ подається такими виразами [1, 2]:

$$\mu_{0}(y) = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{X_{\rho 0}(y)}\right)^{4}} - \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{X_{n0}(y)}\right)^{4}} = \frac{y^{2} + 2}{y\sqrt{y^{2} + 4}}$$
(11)

За малих є характер зображень не змінюється, і в лінійному наближенні знаходимо:

$$\mu_{\varepsilon}(y) = \mu_{0}(y) + \varepsilon \mu_{1}(y), \qquad (12)$$

$$\mu_{1} = \frac{4(s+y)^{3} \left[(s+y) \left(8 \ln \frac{2}{s+y} + 4 \right) - (s+y)^{3} - 32x_{p1} \right]}{\left[(s+y)^{4} - 16 \right]^{2}} - \frac{4(s-y)^{3} \left[(s-y) \left(8 \ln \frac{2}{s-y} + 4 \right) - (s-y)^{3} + 32x_{n1} \right]}{\left[(s-y)^{4} - 16 \right]^{2}},$$
(13)

де введено позначення $s = \sqrt{y^2 + 4}$.

Зауважимо, що при $|y| \to \infty$ маємо $\mu_0 \to 1$, $\mu_1 \to 0$. На рис. 1, 2 показані сім'ї модельних кривих $\mu_0(t-t_0)$ і $\mu_1(t-t_0)$ при v = 1 і різних p. Крім того, що $|\mu_1(0)| < \mu_0(0) - 1$, привертає увагу повільніше зменшення $|\mu_1|$ при збільшенні |y|.



Рис. 1. Модельні криві підсилення при $\varepsilon = 0$

Рис. 2. Криві, що характеризують поправковий доданок

Нами проведено статистичне моделювання, у якому точність визначення зоряної величини на кривих блиску становила 0.01–0.02. Попередні результати показали, що реалістично обмежити оцінку |a-2|, яка характеризує відхилення від ЗТВ, величиною порядку 0.02 на довірчому рівні 1σ. Наявна точність перевірки ефекту відхилення світла іншими методами значно краща. Утім, прямо порівняти наші результати зі стандартним ППН-підходом неможливо, оскільки, як було зазначено вище, параметр γ із формули (2) прямо не визначається зі спостережень мікролінзованих кривих блиску. Однак слід зазначити, що існування значного і достатньо однорідного масиву спостережень [14], який утворюють дані експерименту OGLE з мікролінзування зорями Галактики, відкриває можливість суттєвого підвищення точності запропонованої незалежної перевірки формули (1) за допомогою статистичного аналізу.

Докладний опис результатів обробки даних OGLE [13, 14] у рамках викладеного підходу автори сподіваються надати в іншій публікації.

Список використаних джерел

1. Zaharov A. F. Gravitational lenses and microlenses / A. F. Zaharov (in rus. : Гравитационные линзы и микролинзы). – Moscow : Janus, 1997.

2. Schneider P. Gravitational Lenses / P. Schneider, J. Ehlers, E. E. Falco. - Berlin : Springer, 1992.

3. General Relativity Theory: Recognition through Time / А. N. Alexandrov, I. B. Vavilova, V. I. Zhdanov et al. (in rus. : Общая теория относительности: признание временем). - Kyiv : Naukova Dumka, 2015.

Misner C. W. Gravitation / C. W. Misner, K. S. Thorn, J. A. Wheeler. – San Francisco : W. H. Freeman and Company, 1973.
 Will C. M. The Confrontation between General Relativity and Experiment / C. M. Will // Liv. Rev. Relat. – 2001. – 4, N 4 (arXiv:gr-qc/0103036).

6. Keeton C.R. Formalism for Testing Theories of Gravity Using Lensing by Compact Objects. I: Static, Spherically Symmetric Case / C. R. Keeton, A. O. Petters // Phys.Rev. – 2005. – D72. – 104006.

7. Keeton C. R. Formalism for testing theories of gravity using lensing by compact objects. II: Probing Post-Post-Newtonian metrics / C. R. Keeton, A. O. Petters // Phys. ev. - 2006. - D3. - 044024.

8. Bekenstein J. D. Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm / J. D. Bekenstein // Phys. Rev. – D70. – 083509; Erratum-ibid. – 2005. – D71. – 069901. 9. Probing the dark matter issue in f(R)-gravity via gravitational lensing / M. Lubini, C. Tortora, J. Näf et al. // European Physical Journal C. - Particles and Fields. - 2011. - 71(12). - 1834.

10. Milgrom M. Testing the MOND Paradigm of Modified Dynamics with Galaxy-Galaxy Gravitational Lensing / M. Milgrom // Phys. Rev. Lett. – 2013. – 111. – 041105.

11. Distinguishing f(R) theories from general relativity by gravitational lensing effect / H. Liu, X. Wang, H. Li, Y. Ma // Eur. Phys. J. C. - 2017 - 77. - 723.

12. Gravitational microlensing as a probe for dark matter clumps/ E. Fedorova, V. M. Sliusar, V.I. Zhdanov et al. // MNRAS. - 2016. - 457. - 4147-4159. 13. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Discovery of the First Candidate Microlensing Event in the Direction of the Galactic Bulge / M. Szymanski, J. Kaluzny, M. Kubiak et al. // Acta Astron. - 1993. - 43. - 289-294

14. Udalski A. OGLE-IV: Fourth Phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment / A. Udalski, M. K. Szymański, G. Szymański // Acta Astron. - 2015. - 65. - 1-38.

Надійшла до редколегії 23.09.19

A. Alexandrov, Ph.D., Seniour Researcher,

V. Zhdanov, Dr.Sci., Prof.,

V. Sliusar, Ph.D., Junior Researcher,

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

TESTING EINSTEIN'S FORMULA FOR GRAVITATIONAL DEFLECTION OF LIGHT BASED ON LIGHT CURVES OF MICROLENSED SOURCES

We propose a new test of the Einstein's formula for the gravitational light deflection using the Galactic microlensing. In this classical formula, the deflection angle $\Delta \phi$ is inversely proportional to the impact parameter ρ of incoming photons travelling from infinity. We modify this formula

as $\Delta \phi = (R_0 / p)^{1+\epsilon}$, where the perturbation parameter ϵ is introduced that characterizes deviation from the General Relativity. We propose to study how the observational data allow to limit ϵ thus constraining small deviations from the Einstein's formula. The fundamental difference between such a test and the standard PPN formalism is that the PPN parameter γ cannot be estimated from the Galactic microlensing, because masses of the lensing objects are unknown; on the other hand, this parameter does not describe a non-analytic corrections dealing with ε . Moreover, here we propose to use an independent material obtained from observations of the extrasolar objects. We modify the equations of the gravitational lensing yielding lens equation $\mathbf{y} = \mathbf{x} \left[1 - \left(R_0 / |\mathbf{x}| \right)^{2+\varepsilon} \right]$ assuming that ε is small. The perturbed coordinates of the micro-images and the magnification of the radiation flux in the linear approximation in ε are obtained. The total magnification of two images is $\mu_{\varepsilon}(y) = \mu_0(y) + \varepsilon \mu_1(y)$, where $\mu_0(y)$ is the unperturbed magnification, and

$$\mu_{1} = \frac{4(s+y)^{3} \left[(s+y) \left(8\ln\frac{2}{s+y} + 4 \right) - (s+y)^{3} - 32x_{p1} \right]}{\left[(s+y)^{4} - 16 \right]^{2}} - \frac{4(s-y)^{3} \left[(s-y) \left(8\ln\frac{2}{s-y} + 4 \right) - (s-y)^{3} + 32x_{p1} \right]}{\left[(s-y)^{4} - 16 \right]^{2}}$$

where $S = \sqrt{y^2 + 4}$. We used these formulas to fit the simulated light curves of microlensed sources. We have carried out a statistical simulations of the microlensing light curves assuming that the initial general relativistic formula with $\varepsilon = 0$ is correct and the apparent magnitude errors are determined with an accuracy 0.01–0.02. Preliminary results show that it is realistic to obtain some estimate of ε of the order 0.02 (1 σ confidence level). Of course, the present accuracy of the General Relativity tests is much better, however, the direct comparison with PPN-approach is difficult due to the abovementioned circumstances. Also, the existence of a considerable observational data array on Galactic microlensing, such as accumulated by the OGLE group, as well as future monitoring campaigns open possibility of better constraining ε .

Keywords: gravitational deflection of light, Einstein formula, gravitational microlensing, light curves.

А. Александров, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

В. Жданов, д-р физ.-мат. наук, проф.,

В. Слюсар, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

> ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОТКЛОНЕНИЯ СВЕТА ПО КРИВЫМ БЛЕСКА МИКРОЛИНЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Предлагается вариант проверки формулы Эйнштейна на основе данных про микролинзирование на звездах Галактики. С этой целью модифицировано уравнение гравитационного линзирования, куда введен параметр возмущения ε , который характеризует отклонение от формулы общей теории относительности. В линейном приближении по ε получены соответственно возмущенные координаты микроизображений и коэффициент усиления потока излучения. Эти формулы были применены для подгонки кривых блеска микролинзированных источников.

Ключевые слова: гравитационное отклонение света, формула Эйнштейна, гравитационное микролинзирование, кривые блеска.

УДК 523.985 + 52-337

В. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, М. Стоділка, д-р фіз.-мат. наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів

МАГНІТНІ ПОЛЯ І ТЕРМОДИНАМІЧНІ УМОВИ В ПЕРЕДМАКСИМАЛЬНІЙ ФАЗІ Сонячного спалаху балу M6.4/3N

Досліджено передмаксимальну фазу сонячного спалаху 19 липня 2000 р. балу М6.4/3N, який виник в активній області NOAA 9087. Ешельні зеєман-спектрограми цього спалаху були отримані на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Ефективне магнітне поле В_{еff} було виміряне по лініях Fel 6301.5 Å, Fel 6302.5 Å, Нα і Нβ. Виявилось, що в найяскравішому місці спалаху, яке проектувалось на невелику сонячну пляму N полярності, В_{ел}по всіх чотирьох лініях були близькими між собою і відповідали 1.0–1.2 кГс. Водночас модуль напруженості магнітного поля на рівні формування Fel 6302.5, визначений за розщепленням піків V параметра Стокса і локалізацією о-компонент у профілях I ± V, був у межах 1.6–2.6 кГс. Бісектори профілів I + V та I – V лінії Fel 6301.5 є паралельними між собою, що вказує на просту однокомпонентну структуру магнітного поля на рівні середньої фотосфери під спалахом. Бальмерівський декремент І_{тах}(На)/І_{тах}(Нβ) по лініях На і Нβ дорівнював 1.16. Напівемпірична модель фотосферних шарів спалаху будувалась за спостережними профілями Стокса І немагніточутливих ліній Fel 5123.7 і 5434.5 шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного перенесення випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова. Виявилось, що для розподілу температури з висотою ефекти відхилення від ЛТР є суттєвими вже для шарів нижньої фотосфери, що відповідають висотам h ≥0 (тобто t₅ ≤ 1). У всій товщі фотосфери (h = 0–500 км) температура у спалаху понижена порівняно із незбуреною атмосферою, тоді як для h > 500 км вона є дещо підвищеною. Мікротурбулентна швидкість підвищена на висотах h > 200–500 км, тоді як на висотах h < 200 км вона понижена. Отримані результати вказують на те, що верхня фотосфера і нижня хромосфера суттєво збурюються під час сонячних спалахів навіть тоді, коли в нижчих шарах (середня фотосфера) магнітне поле є квазіоднорідним

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячні спалахи, спалах 19 липня 2000 р. балу M6.4/3N, сонячні магнітні поля, напівемпірична модель.

Вступ

Сонячні спалахи є найбільш інтенсивним проявом сонячної активності. Вони виникають у місцях суттєвої неоднорідності магнітного поля в активних областях, де реалізуються умови для магнітного перетинання силових ліній. На сьогодні вважається доведеним, що основне енерговиділення сонячного спалаху відбувається у хромосфері та короні Сонця [28], тобто в такому діапазоні висот атмосфери, де прямі вимірювання магнітного поля з методичних причин є значно складнішими, ніж на фотосферному рівні. Щодо фотосферного рівня, то тут також є багато неясних питань, зокрема щодо висотних змін магнітного поля в області спалаху.

Дійсно, у незбуреній атмосфері напруженість магнітного поля має монотонно спадати з висотою внаслідок спадання газового тиску. Якщо силова трубка магнітного поля є однорідною і нескрученою, то верхня межа напруженості B_{max} у трубці знаходиться із простої умови рівності магнітного тиску В²/8π всередині трубки і газового тиску P = nkT ззовні трубки. Для незбуреної атмосфери P ~ 10⁴ дин/см² у верхній фотосфері – там, де формуються емісійні піки ліній Fel у спалахах. Однак при такому тиску має бути В_{тах} ≈ 500 Гс. Насправді ж, як неодноразово зазначалось прямими вимірюваннями, тут іноді буває як мінімум B_{max} = 1–3 кГс [23, 24]. Це означає, що в області спалаху виникають якісь особливі топологічні особливості магнітного поля і термодинамічні умови, які дозволяють утримувати тут значно сильніші магнітні поля. Раніше було показано, що висотний розподіл магнітного поля у спалахах може бути немонотонним – з локальним по висоті піком в області верхньої фотосфери і в зоні температурного мінімуму [18, 19]. В інших спалахах такої немонотонності не зазначено [1, 2, 5]. Можливою причиною розбіжності цих результатів є те, що характер висотного розподілу магнітного поля в області спалаху залежить від фази спалаху. Так, авторами роботи [19] знайдено немонотонний розподіл магнітного поля в максимумі спалаху, який поступово згладжувався і через 10 хв змінився звичайним монотонним розподілом. Очевидно, для більшої ясності тут необхідні нові спостережні дані, а також опрацювання цих даних різними програмними кодами для виключення можливих артефактів при моделюванні профілів ліній. Слід зауважити, що подібна немонотонність зазначається й у спокійних областях [15, 32], однак там локальні напруженості принаймні на порядок менші, ніж у сонячних спалахах.

У цьому сенсі слід зазначити, що автори робіт [18, 19] отримали немонотонний розподіл магнітного поля й температури з висотою у спалаху, використовуючи незалежну імплементацію програмного коду PANDORA [4]. Однак Барановський і співавтори [5], користуючись тим самим кодом для інтерпретації спостережень винятково потужного сонячного спалаху 28 жовтня 2003 р. балу X17.2/4В, знайшли у ньому лише монотонне ослаблення магнітного поля в діапазоні фотосферних висот. Аналогічну картину виявили також автори роботи [2] у спалаху 18 липня 2000 р. балу M2/2N, користуючись програмним кодом SIR [31]. Цей сучасний код дозволяє підбирати оптимальне узгодження спостережних і модельних профілів у автоматичному режимі, що підвищує точність інтерпретації даних.

Інверсні підходи, які базуються на функціях вкладу в емісію (напр. [3, 31, 34, 41]), використовують для побудови напівемпіричних моделей спокійної атмосфери, плям, факелів тощо. Залежно від використовуваних даних спостережень отримують суто фотосферні моделі або ж моделі, які охоплюють фотосферні та хромосферні шари атмосфери Сонця (напр. [4, 9, 10, 34]). Однак при відтворенні висотних залежностей із використанням навіть невеликої кількості вузлів (більше 10) виникають фізично нереальні осциляції висотних залежностей відтворюваних параметрів [34]. Щоб позбутись таких осциляцій, кількість вузлів зменшують. Але обмеження на кількість вузлів не дозволяє відтворювати різкі зміни параметрів області типу плато, а також дрібномасштабні особливості. Крім того, при такому підході має місце суттєва деградація самої моделі [10].

Указані недоліки відсутні при використанні стабілізаторів Тихонова для розв'язування оберненої задачі перенесення випромінювання [38]. При такому підході названих проблем узагалі не існує, не існує і проблеми залежності розв'язків від початкових значень відтворюваних параметрів.

У цій роботі ми досліджуємо магнітні поля і термодинамічні параметри в сонячному спалаху 19 липня 2000 р. балу M6.4/3N – тому самому, який раніше досліджували [18]. Однак, на відміну від указаної роботи, ми вивчаємо більш ранній його момент (7^h13^m UT), що відповідає передмаксимальній фазі, а також використовуємо інший програмний код для побудови напівемпіричних моделей. Відповідний код, опублікований у роботі [38], дозволяє аналізувати області спокійної фотосфери, плям, спалахів тощо.

Спостереження і вибрані спектральні лінії

Спостережний матеріал був отриманий на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ). Основні характеристики інструмента наведені в роботі [22]. Одночасне спостереження на ньому майже всієї видимої області спектра (від 3800 до 6600 Å) забезпечується тим, що порядки дифракції від дифракційної ґратки розводяться скляною призмою. Спектральне розділення у зеленій області спектра 30 мÅ, тобто близьке до спектрального розділення на орбітальній обсерваторії Hinode [40]. Хоча просторове розділення на ГСТ майже на порядок гірше (до 1-2 Мм), ніж на Ніпоde, спостереження на ГСТ забезпечують на три порядки більшу широту одночасної реєстрації спектра, ніж на вказаній орбітальній обсерваторії. Завдяки цьому на ешельних спектрограмах реєструються одночасно багато тисяч спектральних ліній, що особливо важливо для вивчення процесів сонячної активності на різних висотах у атмосфері Сонця.

Досліджений сонячний спалах виник в активній області NOAA 9087, в околиці точки з координатами 14°S, 15°E. Його бал був *M*6.4/3*N*, момент максимуму за спостереженнями в *H*α – близько 7^h21^m UT. У цій роботі вивчається більш ранній момент, 7^h13^m UT, тобто передмаксимальна фаза спалаху. Спектри спалаху були отримані з аналізатором колової поляризації, що дозволило одночасно зафіксувати спектри *I* + *V* та *I* – *V*, де *I* та *V* – відповідні параметри Стокса. Слід зауважити, що одночасність реєстрації вказаних спектрів є ще однією перевагою ГСТ АО КНУ; у деяких сучасних інструментах ці спектри реєструються неодночасно.

При спостереженнях вхідна щілина спектрографа ГСТ перетинала невелику пляму, де інтенсивність у континуумі I_c була знижена до 2 разів. Приблизно у цьому ж місці був яскравий вузлик емісії в $H\alpha$, де інтенсивність у лінії $H\alpha$ була майже у 2 рази вищою, ніж у прилягаючому спектральному континуумі (рис. 1). На цьому рисунку по осі абсцис наведено відносні горизонтальні координати L відповідних точок поверхні Сонця, виражені в мегаметрах (Мм). Нижче більш детально буде досліджено місце, що відповідає L = 14 Мм, тобто близьке до найяскравішого в $H\alpha$. На рис. 1 нуль-пункт горизонтальної осі є довільним і відповідає крайній точці на дослідженій спектрограмі в напрямку, перпендикулярному до напрямку дисперсії.



Рис. 1. Розподіл уздовж напрямку вхідної щілини *L* ефективного магнітного поля *B*_{eff}, виміряного в лініях Fel 6301.5 (суцільна лінія) і 6302.5 (штрихова лінія), у дослідженому спалаху для моменту 7^h13^m UT. Для наочності показано також розподіл центральної інтенсивності в лінії *H*α, віднесеної до інтенсивності прилягаючого спектрального континууму (параметр *I*(*H*α)/*I*_c)

Наше вивчення фізичних умов у спалаху базується на аналізі профілів шести спектральних ліній (табл. 1). У цій таблиці еквівалентна ширина лінії *W* у спектрі спокійного Сонця і потенціал збудження нижнього терму *EP* наведені згідно з монографією [26], а ефективні фактори Ланде *g*_{eff} для всіх ліній Fel, визначені в лабораторних умовах, – згідно з роботами [20, 43].

Зауважимо, що лінії № 1 і 2 теоретично мають нульовий фактор Ланде (для *LS* зв'язку), хоча їхні емпіричні фактори Ланде, визначені в лабораторних умовах, є все-таки не строго нульовими, а близькими до 0.01 за абсолютною величиною. Унаслідок таких малих факторів Ланде ці лінії можна вважати магніточутливими лише тоді, коли напруженість магнітного поля перевищує 5 кГс. Як буде показано нижче, у нашому випадку це не так, і тому вказані дві лінії можна розглядати як немагніточутливі.

№ п/п	Елемент і номер мультиплету	Довжина хвилі λ (Å)	Еквівалентна ширина <i>W</i> (mÅ)	Потенціал збудження <i>EP</i> (eV)	Ефективний фактор Ланде <i>g</i> _{eff}
1	Fel-16	5123.72	101	1.01	-0.013
2	Fel– 15	5434.52	184	1.01	-0.014
3	Fel – 816	6301.51	127	3.65	1.669
4	Fel – 816	6302.50	83	3.69	2.487
5	HI-1 (<i>H</i> α)	6562.82	4020	10.15	1.05
6	HI-1 (<i>H</i> β)	4861.33	3680	10.15	1.05

Список вибраних спектральних ліній

Таблиця 1

Лінії № 3 і 4 традиційно використовуються в методі "відношення ліній" для діагностики просторово нероздільної (субтелескопічної) структури магнітного поля [29, 37]. Згідно з монографією Гуртовенка й Костика [12], ефективна висота формування цих ліній, визначена за еквівалентною шириною, відповідає середній фотосфері (*h*w = 286 км і 264 км, відповідно), хоча згідно з роботою Хоменко та ін. [14] ефективна висота формування першої лінії – 250 км, тоді як другої – 95 км. Отже, фактично ці лінії менш придатні в методі "відношення ліній", ніж, наприклад, лінії Fel 5247.1 і 5250.2. Однак слід урахувати, що останні дві лінії, маючи дуже низький потенціал збудження нижнього терму (0.09 і 0.12 еВ, відповідно), більше температурно чутливі. Для вимірювання магнітних полів у сонячному спалаху краще використовувати лінії з меншою температурною чутливістю, і саме тому були використані лінії Fel 6301.5 і 6302.5. Щодо бальмерівських ліній Нα і Нβ, то вони формуються в середній хромосфері. Порівняння магнітних полів за цима чотирма лініями дозволяє оцінити ефекти неоднорідності магнітного поля як по поверхні Сонця, так і у вертикальному напрямку.

Профілі ліній і магнітні поля

Спектрофотометрія дослідженої спектрограми за допомогою мікрофотометра МФ-4 показала, що лінії Fel 5123.7 і Fel 5434.5 мають у спалаху суто фраунгоферові профілі, без емісійних піків у їхніх ядрах. Такі піки у цій лінії спостерігаються у більш потужних спалахах балу X (див., напр., [23]). У зв'язку з цим має смисл аналізувати для обох ліній лише стоксовий профіль *I*. Саме для аналізу цього профілю адаптований програмний код, який описаний нижче у розділі "Напівемпірична модель".

Лінії Fel 6301.5 і 6302.5 навіть по центру сонячної плями (*L* = 14–16 Мм) мають відносно слабке зеєманівське розщеплення, без чіткого розділення π- і σ-компонент. У такому випадку за зміщеннями "центрів ваги" профілів *I* + *V* та *I* − *V* може бути виміряний не модуль магнітного поля *B*, а скоріше його поздовжня компонента *B*_{||}. Однак це справедливо лише для однорідних магнітних полів, які мають у межах вхідної апертури лише одну компоненту магнітного поля. Якщо ж структура магнітного поля є двокомпонентною (магнітні силові трубки з високою напруженістю і фактором заповнення *f* + фон зі слабким полем), то вимірюється величина, близька до *fB*_{||}, яку прийнято називати ефективним магнітним полем *B*_{eff}. Саме ця величина показана на рис. 1 для різних місць дослідженого спалаху.

Видно, що максимальна величина *B*_{eff} в області спалаху досягала 1.0–1.1 кГс, причому результати по лініях Fel 6301.5 і 6302.5 добре узгоджуються між собою. Точніше, для *L* = 16–20 Мм зазначається *B*_{eff} (6302.5) > *B*_{eff} (6302.5), що може мати дві причини: (а) лінія Fel 6302.5, маючи у 1.5 раза більший фактор Ланде, ніж лінія Fel 6301.5, теоретично може відображати величину, проміжну між модулем поля *B* і його поздовжньою компонентою *B*_{||}, тоді як лінія Fel 6301.5 – величину, більш близьку до *B*_{||}; (б) таке співвідношення вже зазначалось у сонячних спалахах при помірних полях, коли *B*_{eff} < 1 кГс [24], хоча за межами сонячних спалахів звичайним є обернене співвідношення *B*_{eff} (6302.5) < *B*_{eff} (6302.5) (див., напр., [11]). Останнє співвідношення вказує на наявність маломасштабних силових трубок із кілогауссовими полями, магнітна полярність у яких є однаковою з фоновим полем. Щодо зворотного співвідношення *B*_{eff} (6302.5) > *B*_{eff} (6302.5), то воно можливе тоді, коли магнітна полярність у маломасштабних силових трубках протилежна полярності фонового поля [24].

Додатковим критерієм тут може бути вигляд бісекторів профілів $I \pm V$ у лінії Fel 6301.5 [21, 22]. За субтелескопічної структури магнітного поля з кілогауссовими полями вказані бісектори у спостережених профілях стають непаралельними, указуючи на підсумовування двох картин ефекту Зеємана з різними розщепленнями σ -компонент. Оскільки в нашому випадку (рис. 2) бісектори профілів $I \pm V$ у лінії Fel 6301.5 практично паралельні, то це вказує на майже однорідне (однокомпонентне) магнітне поле на рівні середньої фотосфери, де формується лінія Fel 6301.5. У такому випадку можна оцінити модуль його напруженості двояко: (1) за спостереженою відстанню між σ -компонентами в профілях $I \pm V$ і (2) за розщепленням піків параметра Стокса V. За неповного спектрального розділення п-і σ -компонент і при непоздовжньому магнітному полі (коли кут γ між силовою лінією магнітного поля і променем зору не дорівнює 0° або 180°) метод (1) дає занижену величину модуля напруженості, тоді як метод (2) – завищену.



Рис. 2. Спостережені профілі *I* ± *V* ліній Fel 6301.5 та 6302.5 у спалаху для *L* = 14 Мм і моменту 7^h13^m UT. Для лінії Fel 6301.5 майже вертикальними суцільними і штриховими лініями показані бісектори профілів

На основі аналізу спостережених профілів лінії Fel 6302.5 для *L* = 14 Мм було знайдено, що метод (1) дає напруженість 1.6 кГс, тоді як метод (2) – 2.6 кГс. Таким чином, можна зробити висновок, що дійсна величина модуля магнітного поля в області даного спалаху на рівні середньої фотосфери була близькою до 2 кГс.

Лінії $H\alpha$ і $H\beta$ мали у спалаху емісійні піки, які перевищували рівень найближчого спектрального континууму в 1.6–1.8 раза (рис. 3, 4). Бальмерівський декремент $I_{max}(H\alpha)/I_{max}(H\beta)$ по цих лініях дорівнював 1.16. Величина магнітного поля, знайдена по розщепленню емісійних "вершин" у профілях $I \pm V$ ліній $H\alpha$ і $H\beta$, є однаковою і відповідає 1.2 ± 0.1 кГс. У методичному сенсі ця величина еквівалентна ефективному магнітному полю B_{eff} , яке по фотосферних лініях було знайдено в межах 1.0–1.1 кГс. Оскільки лінія $H\beta$ формується в середній хромосфері, то можна зробити висновок, що в області спалаху магнітне поле на відповідних рівнях фотосфери і хромосфери було практично однаковим за величиною. Таким чином, також і в дослідженому спалаху ми спостерігаємо досить цікавий випадок відсутності значного послаблення магнітного поля з висотою, який є очікуваним для спокійної атмосфери (див. вище). Це є непрямим свідченням того, що в області сонячного спалаху діють специфічні механізми локального підсилення магнітного поля, які діють паралельно із загальною дисипацією магнітної енергії в об'ємі інтенсивного енерговиділення.



Рис. 3. Спостережені профілі *I* ± *V* лінії Нα у спалаху для *L* = 14 Мм і моменту 7^h13^m UT



Рис. 4. Спостережені профілі *I* ± *V* лінії Нβ у спалаху для *L* = 14 Мм і моменту 7^h13^m UT

Напівемпірична модель

Модель підспалахових шарів фотосфери Сонця була відтворена шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного перенесення випромінювання [32, 35]. Обернена задача належить до некоректних задач, оскільки існує безліч розв'язків, які задовольняють вибраний критерій, за яким знаходять розв'язок. У роботі Стоділки [38] було запропоновано використати так звані тихонівські стабілізатори, які модифікують цільову функцію для забезпечення гладкості та стійкості розв'язків оберненої задачі. Нижче наведено результати застосування цього підходу для інтерпретації спостережень дослідженого спалаху.

У нашому дослідженні поле швидкостей представлене висотною стратифікацією турбулентної швидкості (*V*_{micro}), макротурбулентними швидкостями (одне значення для кожної лінії) і висотною стратифікацією променевої швидкості руху газової речовини (*V*_{los}). Стратифікація газового тиску перераховувалася за будь-якої зміни температури чи поля швидкостей.

Як початкове наближення для моделі ми використали модель атмосфери спокійного Сонця [42]. Для кожного наступного наближення моделі ми розв'язували пряму задачу нерівноважного перенесення випромінювання для 22-рівневої моделі атома заліза. При цьому ми враховували непружні зіткнення атомів заліза як з електронами, так і з атомами нейтрального водню. Отримані коефіцієнти відхилення від локальної термодинамічної рівноваги *β* = *n*/*n**, де *n* – реальна населеність, *n** – рівноважна населеність рівня (не-ЛТР параметри), були використані потім як параметри в оберненій задачі, розв'язок якої дає уточнену модель атмосфери. Обчислювальний процес ітераційно поваторювався до досягнення критерію збіжності розв'язку.

Для вивчення фізичних умов у сонячному спалаху ми вибрали температурно чутливі лінії нейтрального заліза (λ 5434.534 Å, λ 5123.73 Å) з фактором Ланде, рівним 0 для *LS* зв'язку. Звичайно, такі лінії не дозволяють відтворювати магнітні поля. Однак, з іншого боку, це приводить до зменшення кількості вільних параметрів, якими визначається поведінка лінії.

Відомо [6], що відхилення від ЛТР спричинюють зміну коефіцієнта поглинання та функції джерела лінії. Але в умовах сонячної плями механізм ультрафіолетової надіонізації зумовлює відносно незначні зміни населеностей рівнів Fel. За рахунок цього для ліній з низьким потенціалом збудження нижнього рівня (EPL < 2 eB) виконується наближення ЛТР [7], тобто не-ЛТР параметри нижнього і верхнього рівнів для ліній, які ми розглядаємо, є приблизно рівними, що веде до S ≈ B. Ця обставина забезпечує високу чутливість ліній до температурної стратифікації.

В умовах спокійної атмосфери Сонця діапазони глибин утворення ліній є такими: 580 ÷ 11 км для λ 5434.534 Å i 430 ÷ 7 км для λ 5123.73 Å (від центра лінії до континууму). Отже, ці лінії придатні для вивчення температури й поля швидкостей у сонячній грануляції, плямах, спалахах, тому що можна сканувати різні шари атмосфери: від нижньої фотосфери до нижньої хромосфери. Зазначимо, що використовувані дані спостережень є даними з низьким просторовим розділенням. Тому ми можемо говорити виключно про усереднені характеристики явища.

Спостережені й теоретичні профілі двох спостережуваних термочутливих ліній показані на рис. 5 і 6. Як ми бачимо, спостережувані й теоретичні профілі практично збігаються, окрім деяких спостережуваних особливостей у крилах лінії, зумовлених блендуванням лінії. Отже, можна вважати, що відтворені фізичні умови є близькими до реальних.

За даними спостережень магнітне поле, усереднене за площею вхідної щілини спектрографа, ≈ 2000 Гс. Маючи магнітний, газовий та турбулентний тиск на нижній основі моделі, ми з умови горизонтального балансу повного тиску визначили величину вільсонівської депресії. Згідно з розрахунками, досліджувана область зміщена відносно моделі спокійної атмосфери вниз на ≈ 125 км, тобто отримані стратифікації всіх параметрів моделі плями зміщені на цю величину в бік глибоких шарів.

Висотні стратифікації температури, отримані як у наближенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР), так і з урахуванням не-ЛТР ефектів (НЛТР), показані на рис. 7. На цьому рисунку ми додатково представили температурну стратифікацію для моделі спокійної атмосфери МАСККІ [25] для порівняння.

У нижній фотосфері під спалахом ми спостерігаємо фізичні умови в тіні плями: на глибині (*h* ≈ –200 км) температура *T* ≈ 5500 К – це зумовлено тим, що магнітне поле плями частково пригнічує конвекцію, яка є основним механізмом перенесення теплової енергії у фотосфері Сонця [30, 33]. З висотою температура спадає і досягає на *h* ≈ 200–300 км широкого мінімуму, після чого різко зростає. Температурний мінімум зміщений відносно мінімуму спокійної атмосфери на 250 км, причому його температура понижена на ≈ 500 К, тоді як у верхніх шарах відбувається нагрів фотосферних підспалахових шарів. Унаслідок цього на висотах *h* > 500 км речовина в тіні плями на кілька сотень градусів гарячіша за плазму зовні (спокійна атмосфера). На рівні утворення континууму температура тіні плями більше ніж на 1500 К понижена відносно незбуреної атмосфери.



(змодельованих) профілів лінії Fel 5434.5

Температурна стратифікація, отримана у ЛТР наближенні, суттєво відрізняється від випадку не-ЛТР. Мінімум відносно вузький і зміщений угору на 125 км, а різниця температур між цими двома стратифікаціями сягає 600 К. Нижче мінімуму є температурне плато протяжністю 200 км. У нижніх шарах плями температури моделей збігаються. Такі відмінності між двома стратифікаціями зумовлені ефектами відхилення від ЛТР. Зокрема, на висотах від –25 км до 500 км населеності рівнів, переходи між якими породжують обидві лінії, збіднені, а на висотах вище 500 км – перенаселені порівняно з рівноважними значеннями їхніх населеностей.

Зазначимо, що отримана нами стратифікація температури якісно узгоджується із напівемпіричною моделлю тіні плями з частковим урахуванням не-ЛТР ефектів: не-ЛТР для ліній Са II, ЛТР для ліній Fe I [35]. ЛТР наближення (рис. 7), як і в роботах [25, 33], дає температурне плато. У роботі [10] побудована модель тіні спокійної плями за лініями MgII *h* і *k*, УФ триплетом Mg II та лінією Fe I у не-ЛТР наближенні. Для отриманої моделі температурний хід залежності має мінімум без плато.

У нашому дослідженні поле швидкостей включає променеву, мікро- і макротурбулентну швидкість та відображає процеси, які відбуваються в атмосфері Сонця. Променева швидкість дає інформацію про стратифікацію висхідних і низхідних рухів речовини вздовж променя зору для кожного пікселя спостережуваної області. Однак за низької просторової роздільної здатності доводиться додатково вводити такі емпіричні характеристики рухів у атмосфері, як макротурбулентна швидкість. Макротурбулентність використовують для опису руху оптично товстих структур атмосфери зорі, співрозмірних із гранулами. Макротурбулентна швидкість ураховує висхідні та низхідні рухи таких нероздільної в [8]. Вплив макротурбулентності на профілі ліній зводиться до збільшення центральної залишкової інтенсивності та опускання вниз перехідної області ядро-крило профілю спектральної лінії. Еквівалентна ширина лінії при цьому не міняється.

Мікротурбулентна швидкість характеризує поле швидкостей на значно менших просторово нерозділених масштабах. Мікротурбулентність розширює ядро лінії, а отже, збільшує еквівалентну ширину лінії. Результати дослідження мікро- та макротурбулентності в незбуреній атмосфері Сонця наведені в монографії [12].

Висотні стратифікації променевої та мікротурбулентної швидкості, отримані в наближенні ЛТР та з урахуванням не-ЛТР ефектів, показані на рис. 8 і 9. Для мікротурбулентної швидкості показана також висотна залежність у рамках моделі спокійної атмосфери МАСККL [25].

Згідно з рис. 8 на рівні шарів нижньої фотосфери (*h* < 0 км) речовина в тіні плями рухається вниз, причому швидкість сягає 2 км/с. У нижніх шарах тінь плями можна розглядати як велику фрагментовану трубку [7, 27, 36], при цьому підйом магнітного потоку вгору зумовлює низхідний рух незамагніченої плазми, яка межує із фрагментованими магнітними трубками, тоді як у вищих шарах (середня фотосфера) речовина рухається вгору. Очевидно, під час спалаху внаслідок зменшення магнітного потоку фрагментована область змістилась у верхні шари атмосфери, що викликало горизонтальні рухи гарячої оточуючої плазми з подальшим її рухом угору під дією сил плавучості в холоднішій немагнітній плазмі тіні плями. У вищих шарах (*h* > 500 км) швидкість висхідного руху речовини на момент спостереження спадає до нуля. Висхідний рух речовини може бути також зумовлений підігрівом вищих підспалахових шарів. Крім цього, зміна знака швидкості в шарах, що прилягають до вузької області (*h* ~ 0 км), указує на існування вже згаданих горизонтальних потоків у бік плями. Променеві швидкості, отримані в ЛТР та не-ЛТР наближенні, якісно збігаються (рис. 8).

Поле променевих швидкостей у тіні плями за даними спостережень вивчали в роботі [33]. Згідно з результатами цього дослідження, речовина в нижніх шарах фотосфери рухається вниз, а в шарах середньої фотосфери – угору. За даними спостережень великої спокійної плями [10] суттєвих променевих швидкостей у тіні не було виявлено, тоді як на фазі розвитку в тіні плями на фотосферних висотах переважають слабкі низхідні потоки [13].



На рис. 9 показано стратифікацію отриманих мікротурбулентних швидкостей. Стратифікації мікротурбулентної швидкості виявляють шари h < -50 км та 200 км < h < 500 км із підвищеною турбулентністю, де V_{micro} більше 1 км/с. У глибоких шарах V_{micro} зростає до 2 км/с, таке зростання характерне також для спокійної атмосфери. Для вищих шарів, на відміну від спокійної атмосфери, характерне зменшення турбулентності плазми внаслідок дії на неї магнітного поля. Підвищена турбулентність у шарах середньої та верхньої фотосфери, очевидно, зумовлена відгуком фотосфери на спалах. На висотах –50 км/с < h < 100 км/с мікротурбулентність значно пригнічена, що додатково вказує на існування горизонтальних потоків у бік тіні плями на цих висотах. Такі горизонтальні потоки в околі плями в підспалаховій області були виявлені в роботі [9].



Рис. 9. Відтворені висотні залежності мікротурбулентної швидкості: наближення ЛТР із врахуванням не-ЛТР ефектів та для спокійної атмосфери Сонця

Напівемпіричну модель тіні плями з урахуванням мікротурбулентної швидкості отримано в роботі [10]. У ній мікротурбулентна швидкість поступово спадає до logт = –5, а потім різко зростає.

Макротурбулентна швидкість для лінії для λ 5123.73 Å становить 3.5км/с, для лінії λ 5434.534 Å – 4.5 км/с. Як бачимо, спалах спричинив інтенсивні хаотичні висхідні та низхідні рухи в тіні плями, що зумовило значне розширення спостережуваних ліній. Ураховуючи глибини утворення цих ліній, бачимо, що інтенсивність цих хаотичних рухів з висотою зростає.

Обговорення і висновки

Під час спалахів відбуваються зміни структури магнітного поля та фізичних умов переважно у хромосферних та корональних шарах атмосфери Сонця. У той же час стосовно змін у підспалахових шарах на рівні фотосфери немає однозначної відповіді. У роботі [9] виявлено існування стійких висхідних та низхідних потоків (до 3 км/с) уздовж лінії розділення полярності поля для δ-плями.

З іншого боку, отримані в [16, 17, 39] дані вказують на зміни магнітного поля в підспалахових фотосферних шарах та підвищення температури фотосфери. Крім цього, у роботі [17] виявили зростання інтенсивності профілів ліній нейтрального кремнію під час спалаху, що також указує на прогрів фотосферних шарів. Проведене в цій роботі дослідження променевих швидкостей у підспалаховій області показало, зокрема, переважання під час спалаху висхідних потоків. При цьому усереднена по спалаховій площадці швидкість становить 0.1 км/с. Автори роблять висновок, що такий висхідний рух речовини зумовлений випаровуванням унаслідок прогрівання підспалахових фотосферних шарів, тоді як після спалаху, як стверджують автори, відбувається конденсація, що зумовлює низхідний рух плазми.

Зауважимо, що у наведених вище дослідженнях було використано дані спостережень із високим просторовим розділенням, причому променеву швидкість та магнітне поле вважали постійними з висотою. Таке обмеження зумовлене, скоріш за все, особливостями розв'язків оберненої задачі перенесення випромінювання, оскільки збільшення кількості вузлів спричинює осцилюючі висотні стратифікації відтворюваних параметрів (напр. [35]).

У даному ж дослідженні ми використовуємо власні дані спостережень, але з низьким просторовим розділенням. А використовуваний нами підхід до розв'язання оберненої задачі не накладає ніяких обмежень на кількість вузлів для відтворюваних параметрів. Представлені вище висотні залежності параметрів моделі атмосфери є фактично результатом усереднення спостережуваної області спалаху. Проте ми можемо однозначно стверджувати, що внаслідок спалаху відбулось збурення фотосферних шарів атмосфери, зокрема прогрів фотосферних шарів, оскільки в області температурного мінімуму та вище тінь плями гарячіша (див. рис. 7) за оточуюче середовище. Унаслідок прогрівання зростає тиск відповідних шарів і речовина розширюється, тобто відбувається випаровування нагрітої речовини Такий процес зумовлює на висотах 0 км < h < 400 км висхідні рухи із усередненою по спостережуваній площадці швидкістю до 1 км/с (рис. 8). У [34] для тіні неактивної плями отримано швидкості висхідних-низхідних рухів такого самого порядку, але наведені швидкості стосуються окремо взятих пікселів, тобто у випадку даних із високим просторовим розділенням ми б отримали значно більші значення швидкостей.

Як бачимо, під час спалаху в підспалахових шарах поряд із конвективними (висхідними й низхідними) рухами відбувається збурення поля швидкостей. Така складна структура потоків речовини спричинює розширення профілів спектральних ліній при спостереженнях із низькою просторовою роздільною здатністю. І справді, за результатами інверсії ми отримали досить високі значення макротурбулентної швидкості у фотосферних підспалахових шарах (порядку 4 км/с), що свідчить про сильне збурення фотосферних шарів на грануляційних масштабах.

За результатами нашого дослідження збурення підспалахових шарів охоплює не тільки грануляційні, але і значно менші, тобто нерозділені просторові масштаби. Справді, оскільки процес випаровування відбувається в неоднорідному замагніченому середовищі, то в підспалахових шарах можуть виникати хаотичні дрібномасштабні рухи. А отже, зростає турбулентність середовища, яку ми описуємо таким емпіричним параметром, як мікротурбулентна швидкість. Згідно з отриманими результатами інверсії для даного спалаху мікротурбулентна швидкість зростає в бік нижніх шарів (h < 0 км) та в шарах h > 100 км з відносно вузьким мінімумом на 0 км < h < 100 км, тоді як для спокійної атмосфери мінімум мікротурбулентної швидкості значно ширший і зміщений угору на 350 км. Таке зміщення перевищує величину вільсонівської депресії (125 км), а отже, може бути зумовлене спалаховим збуренням, яке і на нерозділених просторових масштабах проникає у фотосферні шари.

У підсумку загальна картина магнітних полів і термодинамічних умов у сонячному спалаху 19 липня 2000 р. балу M6.4/3N є такою. Незважаючи на те, що цей спалах був доволі потужним, у ньому не виявлено (у межах використаних методів) особливо сильних магнітних полів. Виявилось, що в найяскравішому місці спалаху, яке проектувалось на невелику сонячну пляму N полярності, ефективне магнітне поле Beff по фотосферних лініях Fel 6301.5 Å і Fel 6302.5 Á, а також по хромосферних лініях *Η*α і *Н*β було практично однаковим і близьким до 1.0-1.2 кГс. Водночас модуль напруженості магнітного поля на рівні формування середньої фотосфери (лінія Fel 6302.5), визначений за розщепленням піків V параметра Стокса і локалізацією σ-компонент у профілях I ± V, був у межах 1.6–2.6 кГс. Бісектори профілів I + V та I – V лінії Fel 6301.5 є паралельними між собою, що вказує на просту однокомпонентну структуру магнітного поля на рівні середньої фотосфери під спалахом. Аналогічна особливість виявлена також для бісекторів емісійних піків хромосферних ліній *H*α і *H*β. Бальмерівський декремент *I*_{max}(*H*α)/*I*_{max}(*H*β) у цих лініях дорівнював 1.16. Напівемпірична модель фотосферних шарів спалаху будувалась за спостережними профілями Стокса / немагніточутливих ліній Fel 5123.7 і 5434.5 шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного перенесення випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова. Виявилось, що для розподілу температури з висотою ефекти відхилення від ЛТР є суттєвими вже для шарів нижньої фотосфери, що відповідають висотам $h \ge 0$ (тобто $\tau_5 \le 1$). У всій товщі фотосфери (h = 0–500 км) температура у спалаху понижена порівняно із незбуреною атмосферою, тоді як для h > 500 км вона є дещо підвищеною. Мікротурбулентна швидкість підвищена на висотах h > 200–500 км, тоді як на висотах h < 200 км вона понижена. Отримані результати вказують на те, що верхня фотосфера і нижня хромосфера суттєво збурюються під час сонячних спалахів навіть тоді, коли у нижчих шарах (середня фотосфера) магнітне поле є квазіоднорідним.

Подяки

Автори вдячні невідомому рецензенту за дуже багато слушних зауважень, які були враховані при доопрацюванні роботи. Це дослідження було профінансоване Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 19БФ023-03, і Львівським національним університетом імені Івана Франка, тема №. АО91-Ф.

Список використаних джерел

1. Abramenko V. I. Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines / V. I. Abramenko, E. A. Baranovsky // Solar Physics. - 2004. – Vol. 220, Iss. 1. – P. 81–91

2. Photosphere model of 2N/2M solar flare: July 18, 2000 / E. S. Andriets, N. N. Kondrashova, E. V. Kurochka, V. G. Lozitsky // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory. - 2012. - Vol. 108, Iss. 1. - P. 1-3.

3. Line formation in solar granulation. I. Fe line shapes, shifts and asymmetries / M. Asplund, A. Nordlund, R. Trampedach et al. // Astron. and Astrophys. - 2000. - Vol. 359. - P. 729-742.

4. Avrett E. H. SAO, Special Report 303 / E. H. Avrett, R. Loeser.- 1969.

5. Baranovsky E. A. Modelling of photosphere and chromosphere of two powerful flares (28 October 2003 and 1 September 1990) (in Russian : Моделирование фотосферы и хромосферы двух мощных вспышек (28 октября 2003 г. и 1 сентября 1990 г.)) / Е. А. Baranovsky, V. G. Lozitsky, V. P. Tarashchuk // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2009. – Vol. 25, № 5. – P. 373–384.
 6. The non-LTE formation of Li I lines in cool stars / M. Carlsson, R. J. Rutten, J. H. M. J. Bruls, N. G. Shchukina // Astron. Astrophys. – 1994. – Vol. 288.

- P. 860-882

7. Choudhuri A. R. The cluster model of sunspots / A. R. Choudhuri // In: NATO ASIC Proc. 375: Sunspots. Theory and Observations ; eds. J. H. Thomas, N. O. Weiss. - 1992. - P. 243.

8. Cowley Ch. The theory of stellar spectra / Ch. Cowley. – New York ; London ; Paris : Gordon and Breach Science Publishers, 1970. – 255 p.

9. Cristaldi A. 1D Atmosphere Models from Inversion of Fe I 630 nm. Observations with an Application to Solar Irradiance Studies / A. Cristaldi, I. Ermolli // Astrophys. J. - 2017. - Vol. 841. - P. 115-129.

10. De la Cruz Rodríguez Jaime. Non-LTE Inversions of the Mg II h & k and UV Triplet Lines / Jaime Rodríguez de la Cruz, Jorrit Leenaarts, Andrés Asensio Ramos // Astrophys. J. Let. – 2016. – Vol. 830. – P. 30–36.

11. Dominguez Cerdena I. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution / Cerdena I. Dominguez, Almeida J. Sanches, F. Kneer // Astron. Astrophys. – 2003. – Vol. 407. – P. 741–757.

12. Gurtovenko E. A. Fraunhofer's spectrum and system of solar oscillator powers / Е. A. Gurtovenko, R. I. Kostik (in Russian : Гуртовенко Э. А., Костик Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов). – Kiev : Naukova Dumka, 1989.

 Joshi J. Magnetic and Velocity Field of Sunspots in the Photosphere and Upper Chromosphere / J. Joshi // PhD Thesis, Technische Universität Braunschweig. – 2014. ISBN 978-3- 944072-01-2.
 Quiet-Sun inter-network magnetic fields observed in the infrared / E. V. Khomenko, M. Collados, S. K. Solanki et al. // Astronomy and Astrophysics.

2003. – Vol. 408. – P. 1115–1135.
 15. Three-dimensional simulations of solar magneto-convection including effects of partial ionization / E. Khomenko, N. Vitas, M. Collados et al. // Astronomy

& Astrophysics. – 2018. – Vol. 618, id. A87. 16. Kondrashova N. N. Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare / N. N. Kondrashova // Monthly Notices of the Royal

Astronomical Society. – 2013. – Vol. 431. – P. 1417–1424. 17. Kuckein C. Magnetic and dynamical photospheric disturbances observed during an M3.2 solar flare / C. Kuckein, M. Collados, Sainz R. Manso // The

Astrophysical Journal Letters. – 2015. – Vol. 799, Iss. 2, article id. L25. – 5 p. 18. Kurochka E. V. Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000 / E. V. Kurochka, V. G. Lozitsky // Kinematics

and Physics of Celestial Bodies, Suppl. – 2005. – № 5. – Р. 143–145. 19. Kurochka E. V. Temporary changes of physical conditions in photospheric layers of a solar flare / E. V. Kurochka, V. G. Lozitsky, O. B. Osyka // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2008. – Vol. 24, № 4. – Р. 308–320.

20. Landi Degl'Innocenti E. On the effective Lande factor of magnetic lines / Degl'Innocenti E. Landi // Solar Phys. - 1982. - Vol. 77, № 1/2. - P. 285-289.

21. Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots / N. I. Lozitska, V. G. Lozitsky, O. A. Andryeyeva et al. // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55. P. 897–907.

22. Lozitsky V. G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra / V. G. Lozitsky // Adv. Space Res. – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407. 23. Profiles of spectral lines, magnetic fields, and thermodynamical conditions in the X17.2/4B solar flare of 2003 October 28 / V. G. Lozitsky,

E. A. Baranovsky, N. I. Lozitska, V. P. Tarashchuk // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2018. - Vol. 477, Iss. 2. - P. 2796-2803.

24. Lozitsky V. G. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares / V. G. Lozitsky, J. Staude // Journal of Astrophysics and Astronomy. – 2009. – Vol. 29. – P. 387–404.

25. A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle / P. Maltby, E. H. Avrett, M. Carlsson et al. // Astrophys. J. - 1986. - Vol. 306. - P. 284-303.

26. Moore Ch. E. The spectrum 2935 Å to 8770 Å. Second revision of Rowland's Table of solar spectrum wave lengths, National Bureau of Standards

/ Ch. E. Moore, M. G. J. Minnaert, J. Houtgast. – Washington, DC, 1966. – 349 p.
 27. Parker E. N. Sunspots and the physics of magnetic flux tubes. IX – Umbral dots and longitudinal overstability / E. N. Parker // Astrophys. J. – 1979.
 – Vol. 234. – P. 333–347.

28. Parker E. N. Solar activity and classical physics / E. N. Parker // Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics. – 2001. – Vol. 1, № 2. – P. 99–124. 29. Rachkovsky D. N. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods / D. N. Rachkovsky, T. T. Tsap, V. G. Lozitsky // Journal of Astrophysics and Astronomy. – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.

Rempel M. Radiative Magnetohydrodynamic Simulation of Sunspot Structure / M. Rempel, M. Schüssler, M. Knölker // Astrophys. J. – 2009. – Vol. 691. – P. 640–649.
 Ruiz Cobo B. Inversion of Stokes profiles / Cobo B. Ruiz, J. C. Iniesta del Toro // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 398. – P. 375–385.

31. Shchukina N. G. A Si I atomic model for NLTE spectropolarimetric diagnostics of the 10 827 Å line / N. G. Shchukina, A. V. Sukhorukov, Bueno J. Trujillo // Astronomy & Astrophysics. – 2017. – Vol. 603, id.A98. – 16 p.

32. Schüssler M. Magnetoconvection in a sunspot umbra / M. Schüssler, A. Vögler // Astrophys. J. - 2006. - Vol. 641. - P. 73-76.

33. Socas-Navarro H. Semiempirical models of solar magnetic structures / H. Socas-Navarro // Astrophys. J. Sup. Ser. - 2006. - Vol. 169. - P. 439-457.

34. Socas-Navarro H. Non-LTE inversion of line profiles / H. Socas-Navarro, Cobo B. Ruiz, Bueno J. Trujillo // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 507. – P. 470-481.

35. Spruit H. C. A cluster model for sunspots. The Physics of Sunspots / H. C. Spruit // Proc. of the Conference, Sunspot, NM, July 14-17. – 1981. – P. 98–103.

36. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network / J. O. Stenflo // Solar Physics. - 1973. - Vol. 32. - P. 41-63.

37. Stodilka M. I. Tikhonov stabilizers in inverse problems of spectral studies / M. I. Stodilka // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. - 2003. - Vol. 19. - P. 334-343.

38. Sudol J. J. Longitudinal magnetic field changes accompanying solar flares / J. J. Sudol, J. W. Harvey // The Astrophysical Journal. – 2005. – Vol. 635, Iss. 1. – P. 647–658.

39. The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview / S. Tsuneta, K. Ichimoto, Y. Tatsukawa et al. // Solar Phys. – 2008. – Vol. 249. – P. 167–196.

40. Time dependent flare model with non-LTE radiative transfer. Solar variability: from core to outer frontiers. The 10th European Solar Physics Meeting, 9–14 September 2002, Prague / M. Varady, M. Karlicky', J. Kasparova', P. Heinzel. – P. 521–524.

41. Vernazza J. E. Structure of the solar chromosphere. III – Models of the EUV brightness components of the quiet sun / J. E. Vernazza, E. H. Avrett, R. Loeser // Astrophys. J. Sup. Ser. – 1981. – P. 45, 635–725.

42. Zemanek E. N. Splitting of some spectral lines of FeI in magnetic field / E. N. Zemanek, A. P. Stefanov // Vestnik Kiev Univ. Seria Astronomii. – 1976. – № 18. – P. 20–36.

Надійшла до редколегії 06.11.19

V. Lozitsky, Dr.Sci., Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, M. Stodilka, Dr.Sci., Ivan Franko National University of L'viv, Lviv

MAGNETIC FIELDS AND THERMODYNAMIC CONDITIONS IN THE PRE-PEAK PHASE OF M6.4 / 3N SOLAR FLARE

We present a study of the pre-peak phase of the solar flare of M6.4 / 3N class which arose on July 19, 2000 in the NOAA 9087 active region. The effective magnetic field Beff was measured using the Fel 6301.5 Å, Fel 6302.5 Å, Ha and H β spectral lines. It was found that at the brightest place of the flare, which was projected onto a small sunspot of N polarity, Beff was close to each other on all four lines and corresponded to 1.0–1.2 kG. At the same time, the modulus of the magnetic field at the level of Fel 6302.5 formation, determined by the splitting of peaks V of the Stokes parameter and the localization of the σ -components in the I \pm V profiles, was in the range 1.6–2.6 kG. The bisectors of the I + V and I – V profiles of the Fel 6301.5 line are parallel to each other, indicating a simple one-component structure of the magnetic field at the level of the hotosphere under the flare. The Balmer decrement of Imax (H β) by Ha and H β lines was 1.16. The semi-empirical model of the photospheric layers of the flare was constructed using Stokes I observations of non-magnetic-sensitive Fel 5123.7 and 5434.5 lines by solving the inverse equilibrium transfer problem using Tikhonov stabilizers. For the distribution of temperature with height, the effects of deviation from the LTE were found to be significant for the layers of the lower photosphere corresponding to the non-perturbed atmosphere, while it is slightly higher for h> 500 km. The micro-turbulent velocity is increased at altitudes h> 200–500 km, while at altitudes h < 200 km it is reduced. The obtained results indicate that the upper formation solar flares, even when the magnetic field is quasi-homogeneous in the lower layers (middle photosphere).

Keywords: Sun, solar activity, solar flares, flare on July 19, 2000 of M6.4 / 3N class, solar magnetic fields, semi-empirical model.

В. Лозицкий, д-р физ.-мат. наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, М. Стодилка, д-р физ.-мат. наук, Львовский национальный университет имени Ивана Франко, Львов

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ПРЕДМАКСИМАЛЬНОЙ ФАЗЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ БАЛЛА M6.4/3N

Исследована предмаксимальная фаза солнечной вспышки 19 июля 2000 г. балла M6.4/3N, которая возникла в активной области NOAA 9087. Ешельные зееман-спектрограммы этой вспышки были получены на горизонтальном солнечном телескопе Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Эффективное магнитное поле Вен было измерено по линиям Fel 6301.5 Å, Fel 6302.5 Å, На и Нβ. Оказалось, что в самом ярком месте вспышки, которое проектировалось на небольшое солнечное пятно N полярності, В_{еff} по всем четырем линиям были близки между собой и отвечали 1.0–1.2 кГс. В то же время модуль напряженности магнитного поля на уровне формирования Fel 6302.5, определенный по расщеплению пиков V параметра Стокса и ло-кализации σ-компонент в профилях I ± V, был в границах 1.6–2.6 кГс. Бисекторы профилей I + V и I – V линии Fel 6301.5 параллельны между собой, что указывает на простую однокомпонентную структуру магнитного поля на уровне средней фотосферы под вспышкой. Бальмеровский декремент Imax(Ha)/Imax(Hβ) по линиям Нα и Hβ был равен 1.16. Полуэмпирическая модель фотосферных слоев вспышки строилась по наблюдаемым профилям Стокса I немагниточувствительных линий Fel 5123.7 и 5434.5 путем решения обратной задачи неравновесного переноса излучения с использованием стабилизаторов Тихонова. Оказалось, что для распределения температуры с высотой эффекты отклонения от ЛТР являются существенными уже для слоев нижней фотосферы, которые отвечают высотам h ≥ 0 (т. е. 🕫 ≤ 1). Во всей толще фотосферы (h = 0–500 км) температура во вспышке понижена по сравнению с невозмущенной атмосферой, тогда как для h > 500 км она несколько повышена. Микротурбулентная скорость повышена на высотах h > 200–500 км, тогда как на высотах h < 200 км она понижена. Полученные результаты указывают на то, что верхняя фотосфера и нижняя хромосфера существенно возмущаются во время солнечных вспышек даже тогда, когда в нижних слоях (средняя фотосфера) магнитное поле является квазиоднородным.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, солнечные вспышки, вспышка 19 июля 2000 г. балла M6.4/3N, солнечные магнитные поля, полуэмпирическая модель.

УДК 523.98

В. Криводубський, д-р. фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПЛАЗМИ В МАГНІТНИХ КОНФІГУРАЦІЯХ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ

Основна проблема електромагнітних моделей спалахів на Сонці полягає в тому, що в умовах високої електропровідності сонячної плазми важко забезпечити ефективне енерговиділення внаслідок джоулевої дисипації струмів у "ядрі спалаху". Для пояснення швидкої дисипації електричних струмів ми розглянули ефект зменшення величини електропровідності в турбулентному середовищі. У місцях нульового магнітного поля у фотосфері (які відповідають "ядру спалаху"), де немає пригнічення турбулентності магнетизмом, провідність є турбулентною за своєю природою. Водночас в околі плям зовні "ядра спалаху" турбулентні рухи значною мірою пригнічені сильними магнітними полями (В \approx 3000 Гс), що майже нівелює ефект впливу турбулентності на провідність плазми. Тому тут електропровідність буде газокінетичною, а її величина значно перевищуватиме турбулентну провідність. Розрахована нами турбулентна провідність у фотосфері $\sigma_{T} \approx 5 \cdot 10^8$ CGSE виявилась на 2-3 порядки менше газокінетичної провідності $\sigma \approx 10^{11}$ CGSE (у місцях сильних магнітних полів). Виявлені ділянки аномально низької турбулентної провідності в місцях нульових магнітних ліній складних конфігурацій груп сонячних плям можуть сприяти прискореній дисипації струмів, яка забезпечує ефективне теплове енерговиділення спалахів.

Коротко розглядається проблема циркуляції двох струмів у електричному ланцюзі корона – фотосфера. Згідно з моделлю фотосферного динамо конвективні рухи на фотосферному рівні збуджують електричне поле величиною $E_0 \approx 10^4$ CGSE. У такому випадку в зовнішніх ділянках (відносно області "ядра спалаху") електричного кола фотосфера – корона в місцях сильних магнітних полів, де турбулентність майже пригнічена, величина струму буде становити $j_a = \sigma E_0 \approx 10^7$ CGSE. Водночас у ділянці "ядра спалаху", де нейтральні магнітні поля не впливають на турбулентність, величина струму буде значно меншою: $j_T \approx \sigma_T E_0 \approx 5 \cdot 10^4$ CGSE. Існування в електричному колі корона – фотосфера двох діляно з різними величинами струмів може сприяти просторовому розділенню зарядів, що, у свою чергу, може бути корисним при подальшій розробці електромагнітних моделей спалаху.

Ключові слова: сонячні спалахи, магнітні поля, сонячні плями, турбулентна електропровідність, електроструми.

Вступ. Після піонерської роботи Джіованеллі [1] про електромагнітну природу сонячного спалаху впродовж уже більше ніж півстоліття обговорюються не менше десятка моделей спалахів (див., напр., монографії [1–5] і огляди [6–9]). Згідно зі спостереженими даними сонячні спалахи вельми різноманітні за своїми проявами, властивостями й, імовірніше за все, фізичними механізмами. Як зауважив у свій час Корнеліус де Ягер, "flares are different" (див. цитування в роботі [9]). Зважаючи на це, усі спроби пояснення природи сонячних спалахів на основі єдиного універсального механізму залишаються безуспішними. Єдине, що не підлягає сумніву, це те, що джерелом енергії спалаху служить магнітне поле, а основним механізмом вивільнення енергії – магнітне перез'єднання протилежно спрямованих магнітних полів у розвинених активних областях груп сонячних плям. З огляду на це нині існуючі моделі спалахів діляться на два класи: динамічні моделі спалахів (моделі взаємодіючих спалахових магнітних петель) і моделі "статистичних спалахів".

У рамках першого класу моделей два близько розміщені магнітні джгути активної області притягуються один до одного, у результаті при їхньому контакті формуються ділянки перез'єднання протилежно спрямованих магнітних силових ліній, у яких частина енергії магнітних полів у результаті їх анігіляції переходить у тепло (див. першу роботу в цьому напрямі Світа [10]). У роботі Хейвартса [11] висловлено припущення, що спалах виникає при взаємодії магнітної силової трубки, що піднімається, з магнітним полем корональної арки, спрямування поля якої протилежне напрямку висхід-

© Криводубський В., 2019

ного магнітного потоку. У ділянці взаємодії магнітних петель формується струмовий шар, у якому відбувається дисипація магнітних полів, що супроводжується нагріванням плазми і прискоренням заряджених часток. Зазначені моделі першого класу припускають формування одного або кількох нейтральних магнітних струмових шарів.

Що стосується моделей класу "статистичних спалахів", запропонованих Паркером [12] і Влахосом [13], то підфотосферна і фотосферна турбулентність неперервно розщеплюють великомасштабні магнітні структури на мільйони закручених магнітних трубок (так званих фібріл). Взаємодія великої кількості таких трубок шляхом їхнього злиття або розвинення згинальних і тірінг-нестійкостей дає спорадичну нестійкість у вигляді слабких, кількістью до 10⁹, спалахів (наноспалахів). Зазначені спонтанні процеси роблять внесок у нагрівання плазми. Основною проблемою цього підходу залишається опис процесу колективної взаємодії (самоорганізації) великої кількості спонтанно виникаючих струмових шарів, тобто пошук природи єдиного тригера для мільйонів (мільярдів) струмових шарів.

3 огляду на це ми залишаємося на позиціях першого класу моделей сонячного спалаху, зокрема електромагнітної моделі. У свій час Альфвен і Карлквіст [14] запропонували модель сонячного спалаху, у якій вивільнення енергії пов'язане з розмиканням електричного струму в ланцюгові "корональна магнітна арка – фотосфера". Модель базувалась на магнітографічних вимірюваннях Сєвєрного [15], який показав, що спалахи виникають по обидва боки лінії розділу полярностей поздовжнього магнітного поля в околі складних конфігурацій сонячних плям, де існують сильні струми (≈ 10⁴ CGSE), і на аналогії з електричним контуром, що містить ртутний газотрон (який за певних умов може здійснювати різкий перехід від високої провідності до стану з великим електричним опором). Ідучи за Альфвеном і Карлквістом [14], у більшості електромагнітних моделей спалаху для пояснення енерговиділення автори використовують ефект джоулевої дисипації сильних електричних струмів. Однак ефективна омічна дисипація струмів ускладнена через високу газокінетичну електропровідність сонячної плазми. З огляду на це виникла проблема пошуку причин суттєвого зниження провідності плазми в певних ділянках сонячної атмосфери. Зазвичай для розв'язання цієї проблеми дослідники залучають до розгляду аномально високу резистивність турбулізованої плазми (див. огляд [9]), оскільки сильно нестаціонарні процеси в астрофізичних умовах часто супроводжуються плазмовою турбулентністю. Однак умови виникнення струмової нестійкості маломасштабних іонно-звукових хвиль (яка викликає аномально високу турбулентну резистивність) на Сонці досить жорсткі [16], що веде до численних труднощів у теорії сонячних спалахів. Разом з тим у космосі часто трапляється магнітогідродинамічна (МГД) турбулентність, для якої характерні просто рухи плазми в магнітному полі. Саме МГД-турбулентність відіграє вирішальну роль у збудженні та перебудові космічного магнетизму [17]. У межах макроскопічної МГД було відкрито кілька нових турбулентних ефектів [18], суть одного із яких полягає у значному зниженні провідності турбулентного середовища. Мета даної роботи – дослідити перерозподіл величини провідності плазми в ділянках із різною інтенсивністю турбулентних пульсацій, зумовленою складною магнітною конфігурацією в активній області, при залученні до розгляду зазначеного ефекту макроскопічної МГД. Ми очікуємо виявити суттєве зменшення параметра турбулентної провідності, що може сприяти перетворенню магнітної енергії на теплову енергію спалаху внаслідок джоулевої дисипації електричних струмів поблизу нейтральних магнітних ліній груп сонячних плям.

Неоднорідність магнітного поля в активних областях і параметри електропровідності плазми. Згідно з Вайнштейном, Зельдовичем і Рузмайкіним [17] величина коефіцієнта турбулентної електропровідності от визначається виразом

$$\sigma_T = \sigma / (1 + v_T / v_m)^{1/2},$$
 (1)

де σ – газокінетична електропровідність, яку у випадку частково іонізованої плазми можна розрахувати за формулою Копецького і Кукліна [19]

$$\lg \sigma = 15,00 + 0,93 \lg (P_e/P), \tag{2}$$

де *P*_e і *P* – електронний і повний тиск плазми, v_T ≈ (1/3)*ul* і v_m = *c*²/4πσ – відповідно турбулентна в'язкість і газокінетична магнітна в'язкість, *u* і *I* – ефективна швидкість і характерний розмір турбулентних пульсацій, *c* – швидкість світла. Згідно з нашими розрахунками [20–23] газокінетичні параметри сонячної плазми σ і v_m на фотосферному рівні мають такі значення:

$$\sigma \approx 10^{11} \text{ CGSE}, v_m \approx 7.10^8 \text{ cm}^2/\text{c}.$$
(3)

Зазвичай в умовах розвинених турбулентних рухів виконується співвідношення (vт/vm)^{1/2} >> 1, що для турбулентного середовища зумовлює те, що розрахована турбулентна провідність виявляється значно меншою від величини газокінетичної електропровідності (наші розрахунки для фотосфери див. нижче).

Як відомо, спалахи найчастіше виникають у активних областях із сильно розвиненими магнітними структурами [24, 25]. Спільне одночасне існування тут перемежованих ділянок сильних магнітних полів різної полярності та нейтральних магнітних конфігурацій створює сприятливі умови для утворення ділянок з різною інтенсивністю турбулентності на фотосферному рівні. Зважаючи на це, в місцях сильних магнітних полів турбулентні рухи значною мірою будуть пригнічені цими полями. Як наслідок турбулентна в'язкість vт≈ (1/3)*ul* стає знехтуваною, що **майже нівелює ефект** впливу турбулентності на провідність плазми. Тому тут електропровідні властивості плазми можна описати величиною, близькою до газокінетичної провідності середовища σ. Разом з тим у місцях із нульовим магнітним полем турбулентність не пригнічена. У результаті тут ефект впливу турбулентності на електропровідність має проявитися повною мірою. Зважаючи на це електропровідність плазми в цих ділянках буде мати турбулентний характер і описуватися величиною σ_т, суттєво меншою від величини газокінетичної провідності σ.

Нами запропоновано концепцію перерозподілу параметрів електропровідності, яка базується на таких фізичних ефектах і відомих зі спостережень умовах у сонячній атмосфері: 1) зменшення параметра електропровідності (збільшення резистивності) у турбулентному середовищі; 2) пригнічення турбулентності під впливом сильних магнітних полів; 3) збудження великомасштабного електричного поля макроскопічними рухами плазми у фотосфері в присутності загального магнітного поля Сонця (фотосферне динамо); 4) спостережена просторова неоднорідна структура магнітних конфігурацій в околі груп сонячних плям спричинює формування струмових шарів із нульовими (нейтральними) магнітними полями.

Сприятливі умови в сонячній плазмі для турбулентного зниження електропровідності мають проявлятися в місцях слабких магнітних полів, насамперед поблизу нейтральних ліній магнітного поля. Зазвичай формування ділянок з нульовими магнітними полями описують як процес перез'єднання магнітних силових ліній [5]. У зв'язку з цим зазначимо, що в результаті анігіляції полів поблизу нейтральних ліній магнітна енергія перетворюється на теплову, за рахунок якої тут може підтримуватися режим турбулентних рухів або навіть зростати їхня інтенсивність. Це може додатково сприяти ефекту зменшення провідності плазми.

Отже, неоднорідні магнітні поля у фотосфері, які спричиняють утворення неоднорідної інтенсивності турбулентності, урешті-решт можуть сприяти формуванню ділянок з різними значеннями зазначених вище параметрів провідності плазми. Саме ця обставина буде використовуватися нами далі при розрахунках електропровідностей і фотосферних струмів.

Фотосферне динамо і електричні струми в розвинених групах сонячних плям. Сен і Уайт [26] для пояснення необхідного для сонячного спалаху електричного поля запропонували механізм так званого фотосферного динамо. Слід зазначити, що Сен і Уайт розробили не класичну модель самоузгодженого динамо, а спрощений механізм динамо, заснований на простому правилі елементарної електрики, коли провідник, що рухається поперек магнітних силових ліній, створює електричне поле

$E_0 = U \times B/c$,

(4)

перпендикулярне як до магнітного поля **B**, так і до вектора швидкості **U**. Саме з цим полем пов'язана система фотосферних струмів у електромагнітних моделях спалаху. Сен і Уайт брали до уваги конвективні рухи, хоча не виключали інші можливості (напр. обертальні та вихрові рухи). Для ефективної роботи цього механізму він має діяти в області, де може бути велика відносна швидкість між електропровідним середовищем і магнітними силовими лініями. Така область підсилених механічних рухів знаходиться в ділянках слабоіонізованої плазми фотосфери і нижньої хромосфери. Поза цією областю магнітні поля вморожені в плазму і рухаються разом з нею. Отже, схоже на те, що умови для збудження необхідного для спалаху електричного поля будуть оптимальними на фотосферному рівні поблизу сонячних плям. Саме тому запропонований механізм отримав назву *фотосферного динамо* [26]. Причиною розмикання струмів у динамо-моделях спалаху вважається зазвичай різке збільшення опору досліджуваних електричних ланцюгів у сонячній атмосфері. Проте механізми необхідного локального збільшення електричного опору (резистивності) у сонячних шарах досі потребують удосконалення.

Акасофу [27] припустив, що сприятливі умови для ефективної дії фотосферного динамо створюються в околі нової виникаючої магнітної біполярної пари сонячних плям, локалізованої між біполярною парою раніше існуючих старих плям (рис. 1).



Рис. 1. Конфігурація магнітних полів складної розвиненої групи сонячних плям. Знаки "+" і "--" відображають протилежні магнітні полярності. Рисунок взято з роботи [27]

Відомо, що в околі плям завжди існують ускладнені фотосферні рухи [28]. Акософу розглянув просту ситуацію рухів сусідніх конвективних елементів плазми догори-донизу між біполярними парами сонячних плям (рис. 2).



Рис. 2. Поле конвективних швидкостей (світлі стрілки) у розвиненій групі сонячних плям, які викликають збудження електричного поля Е₀ = V×B/с. Рисунок взято з роботи [27]

Такі рухи спричиняють збудження електричного поля **E**₀ = **U**×**B**/*c*, з яким пов'язана розвинена система електричних струмів у групі сонячних плям зі складною конфігурацією магнітного поля (рис. 3).



Рис. 3. Схема електричних струмів (чорні стрілки), що збуджуються конвективними рухами плазми у групі сонячних плям зі складною конфігурацією магнітного поля. Заштриховані ділянки поблизу нульових (нейтральних) магнітних силових ліній – місця виникнення спалахів. Рисунок взято з роботи [27]

Якщо для загального магнітного поля і швидкості фотосферних рухів узяти типові характеристики: В₀ ≈ 10 Гс, U ≈ 3·10⁵ см/с, то величина розрахованого нами згідно з виразом (4) електричного поля становитиме

$$E_0 = UB_0 / c \approx 10^{-4} \text{ CGSE}.$$
 (5)

Перерозподіл коефіцієнтів електропровідності плазми у складних магнітних конфігураціях груп сонячних плям. Для розрахунків величин електропровідностей ми приймаємо схему електричного кола корона – фотосфера (рис. 4) за Хейвартсом [11].



Рис. 4. Схема струмів у електричному ланцюзі корона – фотосфера. Світлі стрілки відображають корональні струми, чорні стрілки – фотосферні струми. Заштриховані овали на фотосферних ділянках ланцюга ("ядро спалаху") – місця поблизу нульових (нейтральних) магнітних силових ліній, у яких, як буде показано нижче, унаслідок інтенсивних турбулентних рухів може відбуватися значне падіння величини електропровідності сонячної плазми

У місцях нульового магнітного поля (заштриховані овали на рис. 4, які відповідають "ядру спалаху"), де немає пригнічення турбулентності магнетизмом, електропровідність матиме турбулентний характер. Водночас в околі плям зовні "ядра спалаху" в областях сильних магнітних полів *B*≈ 3000 Гс (чорні стрілки поза межами заштрихованих овалів на рис. 4), які пригнічують інтенсивність турбулентних рухів, електропровідність мусить бути газокінетичною (і тому значно перевищувати турбулентну провідність). Проведемо оцінювання. Якщо для фотосферних і неглибоких підфотосферних шарів узяти значення фізичних параметрів із моделі сонячної конвективної зони Стікса [29] (*u* ≈ 3,3·10⁵ см/с, *I*≈ 2·10⁸ см), то в результаті розрахунків отримуємо [20–23], що величина турбулентної в'язкості v_т значно перевищує величину газокінетичної магнітної в'язкості v_m:

$$v_{\rm T} \approx (1/3) u l \approx 7.10^{13} \, {\rm cm}^2/{\rm c}, \, v_{\rm m} \approx 7.10^8 \, {\rm cm}^2/{\rm c}.$$
 (6)

Оскільки (v_T/v_m)^{1/2}>>1, то згідно з виразом (1) це має викликати істотне зниження турбулентної провідності відносно газокінетичної електропровідності (σ_T << σ). Дійсно, у такому випадку розрахована турбулентна провідність у фотосфері буде на 2-3 порядки менше звичайної газокінетичної провідності:

$$\sigma_{\rm T} \approx 5 \cdot 10^8 \, \rm CGSE, \, \sigma \approx 10^{11} \, \rm CGSE. \tag{7}$$

Виявлені ділянки аномально зниженої турбулентної електропровідності в місцях нейтральних магнітних ліній складних конфігурацій груп сонячних плям можуть сприяти ефективній дисипації електричних струмів, яка забезпечує швидке енерговиділення в електромагнітних моделях спалахів. У такому разі в ділянці нульового магнітного поля циркулюватиме "турбулентний" струм:

$$j_{\rm T} \approx \sigma_{\rm T} E_0 \approx 5.10^4 \,\rm CGSE. \tag{8}$$

Якщо протяжність фотосферної ділянки *R* зниженої турбулентної провідності взяти рівною ≈ 10⁸ см (приблизний розмір "ядра спалаху" у фотосфері [24]), то характерний час омічної дисипації *t*₀ цього струму становитиме

$$t_0 = 4\pi\sigma_T R^2/c^2 \approx 4.10^4 \,\mathrm{c} \approx 10$$
 год, (9)

що за порядком величини узгоджується із тривалістю так званих теплових спалахів, під час яких відбувається лише незначне прискорення заряджених частинок, а основна частина виділеної енергії йде на нагрівання плазми [24]. Оцінимо енергію джоулевої дисипації в ділянці фотосферного динамо. Згідно з методикою [26] приймаємо об'єм ділянки динамо V рівним ≈ 1,4·10²⁵ см³. У такому разі величина енергії омічної дисипації "турбулентного струму" *ј*т упродовж часу to становить

$$\varepsilon = (j_{\rm T}^2/\sigma_{\rm T})Vt_0 \approx 2.10^{30} \, {\rm epr},\tag{10}$$

що узгоджується з енерговиділенням згаданих теплових спалахів [24].

Водночас поза межами "ядра спалаху" величина струму активної області може досягати значно вищих значень:

$$j_a \approx \sigma E_0 \approx 10^7 \,\mathrm{CGSE}.\tag{11}$$

Виявлення нами в досліджуваному електричному колі двох ділянок з різними величинами струмів може сприяти просторовому розділенню зарядів (гіпотетичний електричний конденсатор), яке, у свою чергу, може бути корисним при подальшій розробці електромагнітних моделей спалаху.

Висновок. Для пояснення швидкої дисипації струмів у електромагнітних моделях спалаху ми розглянули ефект зменшення величини параметра електропровідності в турбулентному середовищі. Висунуто ідею перерозподілу величини електропровідності в групах сонячних плям зі складною конфігурацією магнітного поля. Запропонована концепція перерозподілу електропровідностей базується на таких фізичних ефектах і відомих зі спостережень умовах у сонячній атмосфері. 1) зменшення параметра електропровідності (збільшення резистивності) у турбулентному середовищі; 2) пригнічення турбулентності під впливом сильних магнітних полів; 3) збудження великомасштабного електричного поля макроскопічними рухами плазми у фотосфері в присутності слабкого загального магнітного поля Сонця (фотосферне динамо); 4) спостережена просторова неоднорідна структура магнітних конфігурацій в околі груп сонячних плям спричинює формування струмових шарів із нульовими (нейтральними) магнітними полями. У результаті проведених розрахунків знайдено, що величина параметра МГД-турбулентної провідності на фотосферній ділянці електричного кола корона – фотосфера поблизу нульових ліній магнітних конфігурацій груп сонячних плям виявляється на 2-3 порядки менше значення коефіцієнта звичайної газокінетичної провідності частково іонізованої плазми в місцях сильних магнітних полів в околі сонячних плям. Виявлені ділянки аномально низької турбулентної провідності можуть сприяти прискореній дисипації струмів, яка забезпечує ефективне теплове енерговиділення спалахів. Зокрема, отриманий результат може становити інтерес для моделі спалаху на основі перез'єднання електричних струмів [30], оскільки в цій моделі для топологічного переривання електричних струмів досить локального збільшення опору в ділянці магнітного перез'єднання.

Це дослідження було профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 19БФ023-03.

Список використаних джерел

1. Giovanelli R. G. A theory of chromospheric flares / R. G. Giovanelli // Nature. - 1946. - 158. - P. 81-82.

Solar Flare Magnetohydrodynamics / ed. E. R. Priest. – London : Gordon and Breach, 1981. – 574 p.
 Солнечные вспышки / А. Т. Алтынцев, В. Г. Банин, Г. В. Куклин, В. М. Томозов. – М. : Наука, 1982. – 220 с.

4. Somov B. V. Physical Processes in Solar Flares / B. V. Somov. - Dordrecht : Kluwer Academic, 1992.

5. Priest E. Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications / E. Priest, T. Forbes. - Cambridge : Cambridge University Press, 2000.

6. Сомов Б. В. Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками / Б. В. Сомов, С. И. Сыроватский // Успехи физ. наук. - 1976. - 120. - C. 217-257.

7. Sakai J. Solar flares and collisions between current-carrying loops types and mechanisms of solar flares and coronal loop heating / J. Sakai, C. de Jager // Space Sci. Rev. - 1996. - 77. - P. 1-192.

8. Лившиц М. А. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы / М. А. Лившиц // Плазменная гелиогеофизика. Т. 1; ред. Л. М. Зеленый, И. С. Веселовский. – М. : Физматлит, 2008. – 672 с.

9. Степанов А. В. Основные модели вспышек / А. В. Степанов // Плазменная гелиогеофизика. Т.1; ред. Л. М. Зеленый, И. С. Веселовский. – М. :

Физматлит, 2008. – 672 с. 10. Sweet P. A. The neutral point theory of solar flares / P. A. Sweet // Electromagnetic Phenomena in Cosmical Plasma; ed. D. Lehnert. – Cambridge :

11. *Heyvaerts J.* Coronal electric currents produced by photospheric motions / *J. Heyvaerts* // Solar Phys. –1974. – 38. – P. 419–437. 12. *Parker E. N.* Nanoflares and solar X-ray corona / *E. N. Parker* // Astrophys. J. – 1988. – 330. – P. 474–479.

13. Vlahos L. Particle accelatirion in solar flare / L. Vlahos // Solar Phys. - 1989. - 121. - P. 431-437

14. Alfvén H. Currents in the solar atmosphere and a theory of solar flares / H. Alfvén, P. Carlqvist // Solar Phys. – 1967. – 1, № 2. – P. 220–228.

15. Severny A. B. Solar magnetic fields / A. B. Severny // Space Sci. Rev. - 1964. - 3. - P. 451-486.

16. Zaitsev V. V. The dynamo theory of solar flares / V. V. Zaitsev, A. V. Stepanov // Astron. Zhurnal. - 1991. - 68. - P. 384- 393.

17. Вайнштейн С. И. Турбулентное динамо в астрофизике / С. И. Вайнштейн, Я. Б. Зельдович, А. А. Рузмайкин. – М. : Наука, 1980. – 352 с.

18. Krause F. Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory / F. Krause, K.-H. Rädler. - Oxford : Pergamon Press, Ltd., 1980. - 271 p.

19. Kopecky M. On a more precise calculation of the electric conductivity in the photosphere and in sunspot / M. Kopecky, G. V. Kuklin // Solar Phys. - 1969. - 6, № 2. - P. 241- 250.

20. Криводубский В. Н. Электропроводность вещества в подфотосферных слоях Солнца / В. Н. Криводубский // Проблемы космической физики. - 1973. - 8. - C. 3-15.

21. Криводубский В. Н. О турбулентной проводимости и магнитной проницаемости солнечной плазмы / В. Н. Криводубский // Солн. данные. – 1982. – № 7. – C. 99–109.

22. Krivodubskij V. N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone / V. N. Krivodubskij // Astron. Nachrichten. - 2005. - 326, № 1. - P. 61-74.

23. Krivodubskij V. N. Turbulent effects of sunspot magnetic field reconstruction / V. N. Krivodubskij // Kinematics and Phys. Celestial Bodies. - 2012. - 28, № 5. – P. 232–238

24. Priest E. R. Solar Magnetohydrodynamics / E. R. Priest. - Dordrecht : D. Raidel Company, 1982. - 471 p.

25. Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности / В. Н. Обридко. – М. : Наука, 1985. – 255 с

- 26. Sen H. K. Physical mechanism for the production of solar flares / H. K. Sen, M. L. A. White // Solar Phys. –1972. 23, № 1. P. 146–154.
- 27. Akasofu S.-I. Magnetospheric substorms and solar flares / S.-I. Akasofu // Solar Phys. 1979. 64. P. 333-348. Harvey K. Observations of moving magnetic features near sunspots / K. Harvey, J. Harvey // Solar Phys. -1973. - 28. - P. 61-71.
 Stix M. The Sun / M. Stix. - 2nd edition. - Berlin : Springer-Verlag, 2002. - 490 p.

30. Somov B. V. On the magnetic reconnection of electric currents in solar flares / B. V. Somov // Astron. Letters. – 2012. – 38, № 2. – P. 128–138.

Надійшла до редколегії 31.03.19

В. Криводубский, д-р физ.-мат. наук,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Основная проблема электромагнитных моделей вспышек на Солнце состоит в том, что в условиях высокой электропроводности солнечной плазмы трудно обеспечить эффективное энерговыделение в результате джоулевой диссипации токов в "ядре вспышки". Для объяснения скорой диссипации электрических токов мы рассмотрели эффект уменьшения величины электропроводности в турбулентной среде. В местах нулевого магнитного поля в фотосфере (соответствующих "ядру вспышки"), где нет подавления турбулентности магнетизмом, проводимость будет турбулентной по своей природе. В то же время в окрестности пятен ене "ядра вспышки" турбулентные движения в значительной степени подавлены сильными магнитными полями (В≈3000 Гс), что почти нивелирует эффект влияния турбулентности на проводимость плазмы. Поэтому здесь электропроводность будет газокинетической, а ее величина значительно превысит турбулентную проводимость. Рассчитанная нами турбулентная проводимость в фотосфере σ_т≈ 5·10⁸ CGSE оказалась на 2-3 порядка меньше газокинетической проводимости в местах нулевых магнитных линий сложных конфигураций групп солнечных пятен могут способствовать ускоренной диссипации токов, которая обеспечивает эффективное тепловое энерговыделение вспышех.

Кратко рассматривается проблема циркуляции двух токов в электрической цепи корона – фотосфера. Согласно модели фотосферного динамо конвективные движения на фотосферном уровне возбуждают электрическое поле величиной $E_0 \approx 10^4$ CGSE. В таком случае во внешних участках (по отношению к области "ядра вспышки") электрической цепи фотосфера – корона в местах сильных магнитных полей, где турбулентность почти подавлена, величина тока будет составлять $j_a = \sigma E_0 \approx 10^7$ CGSE. Вместе с тем в области "ядра вспышки", где нейтральные магнитные поля не влияют на турбулентность, величина тока будет значительно меньше: $j_T \approx \sigma_T E_0 \approx 5 \cdot 10^4$ CGSE. Существование в электрической цепи корона – фотосфера двух участков с различными величинами токов может способствовать постранственному разделению зарядов, что, в свою очередь, может быть полезным при дальнейшей разработке электромагнитных моделей вспышки.

Ключевые слова: солнечные вспышки, магнитные поля, солнечные пятна, турбулентная электропроводность, электротоки.

V. Krivodubskij, Dr.Sci., Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF PLASMA IN MAGNETIC CONFIGURATIONS OF THE SUNSPOTS

The main problem of electromagnetic models of flares on the Sun is that in conditions of high electrical conductivity of the solar plasma it is difficult to provide an effective energy release as a result of Joule dissipation of currents in the "kernel of the flare". In order to explain the rapid dissipation of electric currents in the "kernel of the flare", we, within the framework of macroscopic magnetohydrodynamics, have considered the effect of reducing the electrical conductivity in a turbulent environment. The idea of redistribution of the electrical conductivity in groups of sunspots with complex magnetic field configuration is proposed. The proposed concept for the redistribution of electrical conductivity is based on the following physical effects and well-known observational conditions in the solar atmosphere. 1. Decreasing of the electrical conductivity (increase in the resistivity) in a turbulent environment. 2. Magnetic inhibition of the turbulence under the influence of magnetic fields. 3. Excitation of a large-scale electric field by macroscopic movements of the plasma in the photosphere in the presence of a weak general magnetic field of the Sun (photosphere dynamo). 4. Observed spatial heterogeneous structure of magnetic configurations in the vicinity of groups of sunspots, which leads to the formation of the current layers with the zero (neutral) magnetic fields.

In the places of the zero magnetic field in the photosphere (which correspond to the "kernel of the flare"), where there is no suppression of turbulence by magnetism, the conductivity is turbulent in the nature. At the same time, in the vicinity of the sunspots outside the "kernel of the flare", turbulent motions are largely suppressed by strong magnetic fields ($B \approx 3000$ G), which almost alleviates the effect of the influence of turbulence on the conductivity of the plasma. Therefore, the electrical conductivity here will be gas-kinetic in the nature, the value of which greatly exceeds the turbulent conductivity. The turbulent conductivity calculated by us in the photosphere $\sigma_T \approx 5.10^8$ CGSE turned out to be 2-3 orders of magnitude smaller than the gas-kinetic conductivity $\sigma \approx 10^{11}$ CGSE (in the places of strong magnetic fields). The discovered areas of the abnormal reduced turbulent conductivity in the places of the zero magnetic lines of complex configurations of the sunspot groups can contribute to the efficient dissipation of the electric currents, which provides efficient thermal energy release of the flares. The problem of circulation of two currents in the electric circuit of the corona-photosphere is briefly considered. According to the model of the

The problem of circulation of two currents in the electric circuit of the corona-photosphere is briefly considered. According to the model of the photosphere dynamo, the convective movements on the photosphere level excite an electric field of magnitude $E_0 \approx 10^{-4}$ CGSE. In this case, in external areas (in relation to the region of the "kernel of the flare") of the electric circuit of the corona-photosphere in the places of strong magnetic fields, where the turbulence is almost suppressed, the value of the current will be $j_a = \sigma E_0 \approx 10^{-4}$ CGSE. At the same time, in the area of the "kernel of the flare", where neutral magnetic fields do not affect turbulence, the current value will be much smaller. $j_T \approx \sigma_T E_0 \approx 5.10^4$ CGSE. The existence of two sections with different currents in the electric circle of the corona-photosphere may contribute to the spatial division of charges, which in turn may be useful in the further development of the electromagnetic models of the flare.

Keywords: solar flares, magnetic fields, sunspots, turbulent electrical conductivity, electric currents.

УДК 51-71

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ПРИ СТАТИСТИЧНОМУ ОПРАЦЮВАННІ АСТРОНОМІЧНИХ ДАНИХ

Аналізуються проблеми, що виникають при коректному статистичному опрацюванні астрономічних даних та пошуку лінійних статистичних залежностей. Показано, що застосування стандартних статистичних програм може дати хибні результати. Із залученням багаторічного досвіду запропоновано процедуру опрацювання, що охоплює всі етапи: створення вибірки, відкидання промахів, пошук статистично значущих регресорів, установлення багатопараметричних залежностей.

Вступ. Ця стаття є методологічною і присвячена переліку потенційних пасток, які підстерігають науковця при статистичному опрацюванні даних спостережень. Конкретніше, ми обговорюємо проблему встановлення кількісної залежності деякої величини Y від чинників X_i, які можуть потенційно впливати на неї, тобто маємо певний набір значень величини Y, які ми позначимо Y_k, у N точках *k* = 1,2,...,N та набори величин X_i, які ми позначимо як X_{i,k}, що їм відповідають. Усі вони отримані зі спостережень та належним чином скоректовані. Треба вирішити, які саме чинники

Xi є статистично значущими та як саме залежить від них величина Y. Для наочності ми обмежимося випадком пошуку лінійної залежності типу

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^{M} C_k Y_k , \qquad (1)$$

оминувши нелінійні залежності, які слід опрацьовувати за методом максимальної правдоподібності чи більш складними способами.

Є велика кількість стандартних програм та пакетів програм, які мають робити це автоматично і якими користуються багато астрономів. Але слід пам'ятати, що результати роботи таких універсальних програм статистичного опрацювання можуть потерпати від певних проблем, пов'язаних із їхніми особливостями. При цьому науковець може бути впевнений, що все виконано коректно, зроблено правильно. Тому зробимо короткий огляд цих проблем.

Процедура. Перші з них починаються ще до етапу статистичної обробки. Перед цим є сенс обміркувати отриману вибірку. Чи є вона повною? Що саме її обмежує? Часто це світність або відстань до об'єктів. Варто поміркувати, чи вплине селекція на результат обробки. Інколи має сенс опрацьовувати не повну вибірку, а її підвибірку, що має більшу повноту, або кілька таких підвибірок, обмежених різними значеннями якогось параметра, тобто зробити оптимальний вибір між обсягом та мірою повноти вибірки.

Після визначення, яку саме вибірку будемо опрацьовувати, слід обговорити відбір даних. Часто серед масиву даних є такі, які при стандартних значеннях Хі, к дуже відхиляються за величиною Үк. Це можуть бути просто промахи або значні похибки та відхилення при спостереженні. Чи можна відкидати такі дані? Як вирішити, це елементарна помилка чи результат статистичного розкиду? Інколи доцільно за можливості ще раз подивитися на об'єкт спостереження або навіть переміряти дані. Але інколи це вже неможливо, особливо якщо ми говоримо про дуже велику вибірку. Тоді треба вирішувати на етапі уточнення вибірки для опрацювання.

Зрозуміло, що якщо, наприклад, 2 % вибірки мають відхилення на рівні не менше 5*σ*, то це неможливо пояснити розкидом. Зазвичай такі дані з великими відхиленнями відкидають. Припустимо, що ми викинули всі спостереження, які відхиляються більше ніж на *рσ*, де *p* – деяка стала величина, а *σ* – довірчий інтервал. Тоді постають два питання: відхиляють від чого саме та як вибрати величину *p*?

Відхилення від середнього слід розглядати тільки тоді, коли є підстави вважати, що У має бути сталою. У загальному випадку треба розглядати відхилення від апроксимації, тобто спочатку після відкидання явних промахів ми будуємо регресійну криву, отриману за допомогою статистичного аналізу решти вибірки, та її довірчий інтервал, а потім дивимось на те, у скільки разів відхилення перевищує цей інтервал для кожного даного. Тільки тепер можна відкидати точки із занадто великим відхиленням. Не рекомендується брати величину *p* менше за 2.5, інакше це може призвести до замивання слабких залежностей. Це підтверджується результатами математичного моделювання та застосування методу Монте-Карло, наведеними в роботі [1]. Ще краще зробити відкидання у два етапи. Спочатку відкинути дані, використовуючи попереднє значення *p*₁ > *p*, потім для тих даних, що залишились, знайти нову регресію та вже остаточно відкинути дані, застосувавши остаточну величину *p*. Чи має сенс ще раз повторити відкидання, оскільки величина σ після відкидання зменшилась? Не раджу це робити і зовсім не раджу повторювати цю процедуру до збіжності.

Тепер ми маємо вибірку для опрацювання. Час вирішити, що саме ми будемо апроксимувати у вигляді (1) – У чи якусь функцію від У? Регресійний аналіз зазвичай базується на припущенні про гауссів розподіл відхилень та похибок. Але деякі величини в астрономії мають інший розподіл, наприклад лог-нормальний. Для них природним вибором буде апроксимація величини In(Y) або Ig(Y).

Ми дійшли до багатовимірного лінійного регресійного аналізу [2, 3]. За його допомогою ми знайдемо величини, похибки (точніше матрицю похибок та кореляцій) і статистичну значущість за Фішером для кожного регресора у залежності (1). Деталі див. у [4]. Регресори зі значущістю, меншею за деяку порогову, можна відкинути і повторювати відкидання до отримання остаточної залежності. Але тут теж є підводні камені. Наприклад, якщо як незалежні регресори використовують дві величини, що мають велику лінійну кореляцію, то тест Фішера дає низьку значущість для обох і їх можуть відкинути одночасно. Деякі методи та програми, що використовуються для обернення матриці Фішера, наприклад за методом singular-value decomposition (SVD) [5], дають можливість це відстежувати, але інші, наприклад метод Гаусса – Жордана, потребують ретельного контролю з боку користувача. Загалом метод SVD допомагає виявити групи регресорів, близьких до пов'язаних лінійною залежністю. Інші методи вимагають відкидати несуттєві регресори поодинці або маленькими групами.

Крім того, зазвичай одним із регресорів є константа. З огляду на те, що краще мати справу з регресорами, що є ортогональними між собою на множині точок, корисно шукати залежності не від деякої величини *f*, а від величини *f* – *f* , де риска зверху позначає середнє значення для даної вибірки.

Після цього етапу ми маємо перелік значущих регресорів, їхніх коефіцієнтів та їхніх похибок. Але справу ще не завершено. Слід поміркувати, чи на отриманий результат не мала впливу селекція даних або ефект Малмквіста. Приклад суттєвого впливу ефекту, спорідненого Malmquist bias, див. у статті [6]. Варто вирішити, чи не могли корекція або інші деталі первинного опрацювання призвести до помилкової залежності від деяких регресорів. У роботі [7] для компактних галактик з активним зореутворенням було виявлено статистично значущу залежність частки теплового компонента у радіоконтинуумі від їхнього індексу кольору. Але цю значущість не виявлено для більш рафінованої підвибірки, з якої вилучено галактики з великою поправкою за апертурою. Причина в тому, що як поправка на апертуру, так і індекс кольору застосовують сильно зкорельовані величини, що й зумовлює виявлену статистичну залежність. Обмеження області відхилення цих величин значно зменшує вплив цього ефекту.

Чого не можна робити в жодному разі, так це шукати статистично значущі регресори за залежністю У від одного регресора ра X_i. Регресори зазвичай сильно зкорельовані між собою, тому залежність тільки від одного регресора нічого не доводить.

Ці рекомендації базуються на багаторічному досвіді застосування статистичних методів у астрономії.

Висновок. Ми розглянули процедуру пошуку залежностей вигляду (1) астрономічних спостережних величин від різних факторів. Вона базується на багатовимірному статистичному аналізі. На кожному етапі (відбір даних, пошук значущих регресорів, аналіз результатів) вона передбачає певну ітераційну процедуру та контроль із боку користувача. Застосування стандартних статистичних програм може натомість інколи ввести в оману.

Список літератури

1. Parnovsky S. L. Yet another sample of RFGC galaxies / S. L. Parnovsky, A. S. Parnovsky // Astrophysics and Space Science. - 2013. - V. 343. - P. 747-754.

2. Fisher R. A. Statistical Methods for Research Workers / R. A. Fisher. – London : Oliver and Boyd, 1954.

3. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер // М. : Мир, 1980. – 456 с.

4. Худсон Д. Статистика для физиков / Д. Худсон // М.: Мир, 1970; Hudson D. J. Statistics Lectures on Elementary Statistics and Probability / D. J. Hudson. – Geneva : CERN, 1964.

5. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. – 1st edition. – Cambridge University Press, 1986.

6. Parnovsky S. L. Influence of measurement errors on the cosmological deceleration parameter obtained from the semirelativistic model of collective galactic motion / S. L. Parnovsky, A. S. Parnovsky // Journal of Physical Studies. – 2010. – V. 14, № 3. – 3901.

7. Parnovsky S. Compact star-forming galaxies: the fraction of thermal emission in the radio continuum at 1.4 GHz / S. Parnovsky, I. Izotova // Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2018. – V. 57(1). – Р. 41–46.

Надійшла до редколегії 18.10.19

С. Парновский, д-р физ.-мат. наук, Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Анализируются проблемы, возникающие при корректной статистической обработке астрономических данных и поиске линейных статистических зависимостей. Показано, что применение стандартных статистических программ может дать неверные результаты. Предложена процедура обработки, охватывающая все этапы: создание выборки, отбрасывание промахов, поиск статистически значимых регрессоров, установление многопараметрических зависимостей, основанная на многолетнем опыте.

S. Parnovsky, Dr.Sci., Astronomical Observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv

SOME PROBLEMS IN THE STATISTICAL PROCESSING OF ASTRONOMIC DATA

The problems that could arise with a correct statistical processing of astronomical data and a search for linear statistical dependences are analyzed. It has been shown that the use of standard statistical software can yield incorrect results. The iterative procedure of processing based on multi-year experience is proposed. It covers all stages: creation of sampling, discarding of outliers, search for statistically significant regressors, excluding insignificant regressors, finding out multiparametric dependencies and their analysis, etc. This paper is a methodological one and is it describes some potential traps in the statistical processing of observational data.

We forewarn against some actions that may lead to data selection or to incorrect conclusions about the influence of some factors on the quantity being studied. Some examples of problems associated with data selection, correlation between regressors, Malmquist bias and correction are given.

УДК 523.682.2, 523.683, 523.68-36, 681.785.55

О. Голубаєв, канд. фіз.-мат. наук, Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Харків, А. Мозгова, канд. фіз.-мат. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРНИХ ЯВИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДЕОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТЕОРНОГО ПАТРУЛЯ ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

У 2018 році було розроблено і сконструйовано спостережний комплекс (автоматизований відеоспектральний метеорний патруль (АВСМП)) у НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна для отримання кінематичних і фізичних характеристик метеорних тіл та їхніх спектрів. Проведено тестування камер у режимі астрономічних спостережень із метою виявити технічні можливості пристрою. У даній роботі представлено деякі перші результати спостережень, виконаних за допомогою АВСМП. Створений спостережний комплекс призначений розширити матеріальну, наукову, а також навчально-наукову бази НДІ астрономії. Він використовуватиметься у навчальному процесі на кафедрі астрономії та космічної інформатики ХНУ імені В. Н. Каразіна під час проведення практичних і лабораторних занять, виконання бакалаврських і магістерських робіт та розробки новітніх методик дистанційного дослідження астрономічних об'єктів Сонячної системи.

У серпні 2019 року виконано перші базисні спостереження метеорного потоку Персеїди за допомогою АВСМП. На Чугуївській спостережній станції НДІ астрономії, де розташовано комплекс, зафіксовано 225 відео фрагментів з ме теорами в інтегральному світлі та 98 відео зі спектрами метеорів. У Харкові на допоміжну відеокамеру отримано 132 відео з метеорами в інтегральному світлі. Серед отриманого спостережного відеоматеріалу 98 метеорів, зафіксованих у інтегральному світлі, є базисними, ще 40 відео фрагментів зі спектрами метеорів мають відповідні базисні спостереження в інтегральному світлі.

Ключові слова: метеорний патруль, метеор, метеороїд, спектр метеора, хімічний склад метеороїдів.

Вступ. У практиці Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна до цього часу майже не використовувались методи метеорної астрономії для вивчення речовини Сонячної системи. Проте ці методи дають додатково багато нових та унікальних наукових можливостей. Так, метеоро-

~ 36 ~

їди, що створюють метеори під час руху в земній атмосфері, знаходяться в інтервалі мас 10⁻³ < m < 10⁶ кг і є фрагментами комет та астероїдів. Такі тіла зазвичай знищуються при взаємодії з атмосферою. Такі процеси та явища, породжені ними, важко зафіксувати. Для виконання такого завдання важливими є наукові та технічні методи, що застосовуються в метеорній астрономії. Завдяки їм можна отримати дані про міжпланетну речовину, яка потрапляє в атмосферу Землі, що дозволять краще зрозуміти її природу. Наприклад, спектри метеорів дають нам інформацію про умови збудження, світіння та іонізацію метеорної плазми, температуру, процеси абляції (тобто руйнування метеорного тіла), фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі, маси метеороїдів, причини і характер перебігу спалахів, якісний та кількісний хімічний склад метеорного тіла і концентрацію еле-

ментів у метеороїдах, а отже, і про тугоплавку складову ядер комет і астероїдів [1]. Особливість астрономічних спостережень метеорів полягає в тому, що ніколи не відомі наперед час і місце появи метеора на небесній сфері. Крім того, метеори в атмосфері спостерігаються протягом секунд і менше (яскраві метеори – боліди – спостерігаються протягом десятків секунд). Це висуває до апаратури та методики спостережень особливі вимоги, яких намагалися дотримувати в практиці метеорних досліджень. З появою нових технологій апаратура та методи спостережень модифікувалися. Ще на перших кроках становлення спостережних методів метеорної астрономії стали практикувати метеорне патрулювання, яке полягає в тому, що панорамна апаратура постійно готова до приймання сигналу з деякої області небесної сфери для фіксації метеора. Фіксація метеорного спектра є складнішим завданням із технічного погляду. Потрібні високочутливі камери, якісні дисперсійні елементи та тривалий час спостережень за якомога більшими ділянками неба, тому кожен метеорний спектр становить велику наукову цінність. Нові можливості у метеорній астрономії відкриває застосування сучасних світлочутливих приймачів на основі КМОН-технологій (англ. CMOS, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). В останні роки широке застосування відеосистем і радіолокації спричинило створення великих баз даних метеорів, зокрема за рівнями активності, абсолютної яскравості й орбітальної інформації. Застосування фотографічних емульсій (у 1897 році Пікерінгом у Гарвардській обсерваторії) зумовило революційний прогрес у всіх аспектах дослідження метеорів, включаючи метеорні спектральні дослідження. Але з того часу, незважаючи на фіксацію багатьох мільйонів метеорних явищ, усе-таки дуже мало було зібрано спектральних даних для метеорів різноманітних потоків і спорадичного фону. У сучасній Україні спектральні спостереження метеорів у наукових установах взагалі не проводяться [2].

У НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна у 2018 році створений автоматизований відеоспектральний метеорний патруль (рис. 1) із застосуванням ССТV-відеокамер, що працюють на основі КМОН технологій. До створення АВСМП спонукав аналіз стану розвитку в сучасній Україні такої області астрономії як метеорна астрономія. Цей аналіз показав, на жаль, низьку популярність метеорної астрономії в Україні, хоча в науковому середовищі інших країн даний напрям астрономії активно розвивається. Однією із причин такого стану є відсутність спостережних приладів для комплексного вивчення метеорних явищ.



Рис. 1. Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль, установлений на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Апаратна та програмна складові метеорного патруля. З метою комплексного вивчення метеорних явищ були організовані два пункти спостережень. Перший пункт розташований у Харкові на території НДІ астрономії, другий – на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії. Одночасні спостереження того самого метеорного явища із двох або більше пунктів дають змогу визначити всі основні кінематичні параметри метеороїда (лінійну висоту, швидкість, елементи геліоцентричної орбіти та ін.) [3]. Геодезичні координати пунктів спостережень визначалися за допомогою GPS-навігаторів "Харків" (50°0'9.94" N, 36°13'48.67" E), висота місця над рівнем моря 141 м; "Чугуївська спостережна станція" (49°38'28.61" N, 36°56'8.62" E), висота місця над рівнем моря 154 м. Відстань між пунктами спостережень становить 64.76 км (рис. 2). Цього достатньо для надійного отримання кінематичних параметрів та елементів геліоцентричної орбіти метеорних частинок.



Рис. 2. Розташування базисних пунктів спостережень метеорів на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії та в Харкові на території НДІ астрономії. Відтінками кольору показане світлове забруднення

На Чугуївській спостережній станції метеорний патруль обладнаний двома CCTV-камерами, одна з яких оснащена дифракційною ґраткою 500 ліній/мм для спектральних спостережень. Як приймачі випромінення використовуються CCTV-камери фірми Watec (Японія): WAT-902H2 ULTIMATE із часовою роздільною здатністю 20 мс. Час формування одного повного кадру становить 40 мс з точністю не гірше 0.1 мс. За паспортними даними у таких камерах застосовується CMOS-матриця, яка має розмір 1/2", фізичний розмір одного пікселя становить 8.6 × 8.3 мкм, чутливість відеокамери 0.0001 Лк (при відносному отворі F/1.4). Роздільна здатність відеокамери більше 570 телевізійних ліній, відношення сигнал/шум більше 46 дБ. Під час спостережень автоматичне регулювання підсилення яскравості було вимкнене. Для перетворення аналогового сигналу з камери на цифровий застосовується телевізійний тюнер із восьмирозрядним аналого-цифровим перетворювачем.

Як програмне забезпечення для захоплення відеозображення використовується автоматичний реєстратор метеорів UFOCapture (SonotaCo, [4]). Часова прив'язка метеорних патрулів здійснюється за допомогою GPS-приймачів. Усі астрокамери оснащені варіфокальними об'єктивами Tamron 12VM1040 ASIR (F=10 мм, відносний отвір F/1.4), які забезпечують поля зору 34.4° × 25.8° кожен. Розмір одиничного пікселя повного кадру в кутовій мірі становить 2.65′. Оптичні прилади встановлені на екваторіальному монтуванні Sky-Watcher EQ6-R і працюють у автоматичному режимі. Запис зображення під час спостережень може проводитись із увімкненим або вимкнутим приводом екваторіального монтування. Телевізійне зображення має розмір 576 × 768 пікселів і складається із двох послідовних півкадрів (полів): парних рядків (парний півкадр) і непарних рядків (непарний півкадр). Парний і непарний півкадри зображення формуються за кожні 20 мс. Оскільки перша частина зображення метеорного штриха отримана в парних рядках, то друга в непарних, а разом з тим за час зчитування метеор зміщується, тому зображення має смугастий вигляд. Таким чином, відокремивши парні й непарні півкадри за допомогою програмного забезпечення, можна одержати зображення метеора й післясвітіння з часовою роздільною здатністю 20 мс.

Для кожного інструмента створена динамічна база даних, що безупинно поповнюється під час первинної обробки нових спостережень. Після ночі метеорного патрулювання в базу даних надходять відеофільми, що складаються із 50 кадрів до і після метеора та кадрів із зображенням самого метеора. Для обробки спостережного матеріалу створений пакет програмного забезпечення. Методика позиційних вимірювань телевізійних зображень метеорів детально описана в [3].

Результати тестування спостережного комплексу. Метеорний патруль призначено для фіксування метеорів, які перебувають у полі зору частки секунди. Визначення кінематичних, динамічних, фотометричних і спектральних характеристик таких короткотривалих астрономічних явищ висуває до приймальної апаратури особливі вимоги. Ці вимоги потребують низки експериментів для детального вивчення характеристик приймальної апаратури. Тому проведено тестування створеного пристрою в режимі астрономічних спостережень протягом 7 ночей (із 6 вересня по 7 жовтня 2018 року). У результаті таких спостережень зафіксовано 119 метеорів та 44 метеорних явищ на камеру, оснащену дифракційною ґраткою 500 ліній/мм (небазисні спостереження). Визначено, що гранична зоряна величина для спостережного комплексу (для камери без дифракційної ґратки) становить +5.4^m. Для камери з дифракційною ґраткою гранична зоряна величина становить +4.0^m.

АСТРОНОМІЯ. 59/2019

Для визначення оберненої лінійної дисперсії у спектрі, отриманому камерою, оснащеною дифракційною ґраткою, використовувалась неонова (Ne) лампа. У результаті отримано зображення перших двох порядків спектра Ne. Після перетворення зображення отриманого сигналу на цифрове було проведено ототожнення спектральних ліній відповідно до каталогів [5–8]. Деякі з цих ліній були прийняті як опорні для визначення оберненої лінійної дисперсії у кожному порядку спектра. Обробка отриманого зображення спектра Ne показала, що обернена лінійна дисперсія у першому порядку спектра становить 16 Å/піксель, у другому – 7.6 Å/піксель. Спектральна чутливість відеоспектрального комплексу лежить у діапазоні довжин хвиль від 3500 до 8000 Å, а максимальне значення спектральної чутливості оптичної системи припадає на ~7000 Å.

Для обробки метеорних спектрів необхідно заздалегідь провести калібрування спостережної апаратури. Важливим етапом обробки зображень спектрів метеорів є віднімання фону. Відеоапаратура реєструє не лише метеорний спектр, але й інші джерела світла, такі як фон неба, випромінення зір і світлове забруднення від різних джерел. Більшість із перерахованого не змінюється швидко і може бути обчислено перед подальшою обробкою спектрів. Фонове зображення отримується шляхом усереднення деякої кількості зображень без метеора. Для цього можуть бути використані перші зображення відео до появи метеора. У нашому випадку це становить приблизно 50 перших кадрів (при частоті 25 кадрів за секунду) перед появою метеора. Усереднення такої кількості зображень зменшує статистичний шум. Далі фонове зображення віднімається від інших зображень, що містять спектри метеорів.

Як зазначалося раніше, у конструкції метеорного патруля використовується об'єктив із широким полем зору, що призводить до виникнення значної дисторсії (ортографічного спотворення) у межах поля зору, особливо на краях зображення. Лінеаризацію зображення можна здійснити, застосовуючи математичний апарат, визначаючи коефіцієнти дисторсії. Під час визначення інтенсивності ліній спектра необхідно враховувати він'єтування та нерівномірність чутливості відеокамери в межах поля зору. Для цього під час астрономічних спостережень отримують зображення рівномірно засвіченого поля (флет-зображення, англ. Flat). Калібрування такого фотометричного спотворення здійсноється шляхом отримання коефіцієнтів під час попіксельного ділення вихідного зображення з метеором чи його спектром на флет-зображення.

Відеоспектральна апаратура характеризується відносною спектральною чутливістю, яку треба врахувати при визначенні відносної та абсолютної інтенсивності спектральних ліній. Для цього необхідно отримати спектр еталонного джерела випромінювання, у якого відомий розподіл енергії у спектрі. Такими стандартами можуть бути астрономічні об'єкти, такі як Сонце або яскраві планети (Юпітер, Венера), і деякі яскраві зорі (напр. Вега). Нормування метеорного спектра здійснюється шляхом ділення спектра метеора на спектр порівняння. Далі знайдену функцію спектральної чутливості використовують для калібрування інтенсивностей емісійних ліній у спектрі метеора. У метеорній спектроскопії абсолютна інтенсивність спектральних ліній зазвичай виражається в ерг·с⁻¹.Å⁻¹·ср⁻¹.

Після отримання скану метеорного спектра та його калібрування за переліченими спотвореннями здійснюється детальна ідентифікація спектральних ліній, виконується пошук нових емісійних ліній, визначаються їхні інтенсивності, розраховуються фізичні параметри метеорних тіл та ін. Для ототожнення хімічного складу метеороїдів у спектрах спостережених метеорів було розроблено програмне забезпечення "*Video Meteor Spectr*", яке автоматизує цей процес і дає змогу обробляти великі обсяги даних. На рис. 3 показано один із кадрів, що містить зображення першого порядку метеорного спектра, отриманого у ніч із 6 на 7 жовтня 2018 року. За допомогою програмного забезпечення "*Video Meteor Spectr*" проведено ототожнення деяких найбільш яскравих емісійних ліній у спектрі метеора. Вони належать атомам та іонам магнію (Mg I, Mg II), заліза (Fe I), натрію (Na I), кальцію (Ca I), кремнію (Si II) та ін. У червоній ділянці спектра (більше 700 нм) спостерігаються емісійні лінії азоту (N I) та кисню (O I), що належать земній атмосфері. Такий результат якісно збігається із результатами спектральних досліджень метеорів інших провідних спеціалістів [1]. Це свідчить про можливість застосування розробленої методики вимірювань і обчислень та створеного на її основі програмного забезпечення для відносної спектрофотометрії й ототожнення емісійних ліній у відеоспектрах метеорів, спостережених за допомогою відеоспектрального метеорного патруля. Надалі програмне забезпечення буде вдосконалюватись із метою проведення абсолютної спектрофотометрії ототожнених емісійних ліній для подальшого кількісного аналізу (визначення концентрації хімічних елементів, температури метеорної плазми та ін.).

Результати спостережень метеорного потоку Персеїди у серпні 2019 року. Перші базисні спостереження метеорних явищ за допомогою нового відеоспектрального комплексу були проведені під час метеорного потоку Персеїди у серпні 2019 року. На Чугуївській спостережній станції НДІ астрономії, де розташовано комплекс, зафіксовано 225 відео фрагментів із метеорами в інтегральному світлі та 98 відео зі спектрами метеорів. У Харкові на допоміжну відеокамеру отримано 132 відео з метеорами в інтегральному світлі. Серед отриманого спостережного відеоматеріалу 98 метеорів, зафіксованих в інтегральному світлі, є базисними, ще 40 відео фрагментів зі спектрами метеорів мають відповідні базисні спостереження в інтегральному світлі. Деякі з отриманих метеорних спектрів є яскравими (рис. 4).

Під час спостережень Місяць був близький до повної фази, що є причиною дещо вищого фону на зображеннях із метеорами та їхніми спектрами. У Харкові, крім цього, несприятливим є світлове забруднення, але, як показує статистика, це майже не вплинуло на фіксування базисних метеорів. Погодні умови сприяли спостереженням.

На рис. 4 як приклад показано спектр метеора, що належав до потоку Персеїди, зафіксованого автоматизованим відеоспектральним метеорним патрулем 14 серпня 2019 року. Візуально метеор був яскравий, зі спалахом, а після явища спостерігався (протягом кількох секунд) білий слід. Нижче наведена спектрограма даного метеорного спектра без калібрування інтенсивностей спектральних ліній. На спектрограмі спостерігаються спектральні лінії атомів натрію, магнію, заліза, кальцію, атмосферного кисню, азоту та інших хімічних елементів.

Позиційна та спектрометрична обробка спостереженого матеріалу триває.



Рис. 3. Обернене зображення метеорного спектра (зверху показано 1 кадр відео), отриманого в ніч із 6 на 7 жовтня 2018 року, та спектрограма метеора з деякими ототожненими емісіями без калібрування інтенсивностей спектральних ліній. Знизу показаний синтетичний спектр



Рис. 4. Приклад спектра метеора під час спалаху блиску, що належав до потоку Персеїди, зафіксованого автоматизованим відеоспектральним метеорним патрулем 14 серпня 2019 року. Зверху показано інтегральне зображення кадрів зі спектром. На спектрограмі спостерігаються спектральні лінії атомів натрію, магнію, заліза, кальцію, атмосферного кисню, азоту та інших хімічних елементів під час спалаху блиску

7000

Довжина хвиль, Å

8000

9000

6000

5000

4000

Висновки

У 2018 році було розроблено і сконструйовано спостережний комплекс (автоматизований відеоспектральний метеорний патруль), що належить НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, для отримання кінематичних і фізичних характеристик метеорних тіл та визначення їхнього хімічного складу. Проведено тестування в режимі астрономічних спостережень із метою виявити технічні можливості пристрою.

У серпні 2019 року було проведено перші базисні спостереження метеорного потоку Персеїди за допомогою нового відеоспектрального комплексу. На Чугуївській спостережній станції НДІ астрономії, де розташовано комплекс, зафіксовано 225 відео фрагментів із метеорами в інтегральному світлі та 98 відео зі спектрами метеорів. У Харкові на допоміжну відеокамеру отримано 132 відео з метеорами в інтегральному світлі. Серед отриманого спостережного відеоматеріалу 98 метеорів, зафіксованих в інтегральному світлі, є базисними, ще 40 відео фрагментів зі спектрами метеорів мають відповідні базисні спостереження в інтегральному світлі.

Таким чином, результати перших тестових спостережень, виконаних за допомогою створеного автоматичного відеоспектрального метеорного комплексу, підтверджують можливість використання даного приладу для проведення подальших базисних позиційних і спектральних спостережень метеорів. Надалі авторами планується вдосконалення метеорного патруля та розширення на його основі метеорної мережі в Україні.

Список використаних джерел

1. Mozgova A. M. "Rechovynnyi sklad vybranykh meteoriv za dystantsiinymy spektralnymy sposterezhenniamy" / A. M. Mozgova // Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia kand. fiz.-mat. nauk za spetsialnistiu 05.07.12 "Dystantsiini aerokosmichni doslidzhennia" (104 – Fizyka ta astronomiia). Natsionalnyi aviatsiinyi universytet, Kyiv, 2018 (opublikovano na saiti http://svrada.nau.edu.ua/2018.12.07_Mozgova/).
 Ukraynskaia meteornaia optycheskaia set / Yu. M. Gorbanev, E. F. Kniazkova, A. V. Shulga et al. // Radyotekhnyka. – 2016. – № 185. – P. 5–8.
 Golubaev O. V. "Kinematychni ta fizychni kharakterystyky meteornykh til z radiantamy poblyzu Sontsia za danymy nazemnykh televiziinykh

sposterezhen" / O. V. Golubaev // Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia kand. fiz.-mat. nauk za spetsialnistiu 05.07.12 "Dystantsiini aerokosmichni doslidzhennia" (104 -Fizyka ta astronomiia). - Natsionalnyi aviatsiinyi universytet, Kyiv, 2017 (opublikovano na saiti http://svrada.nau.edu.ua/ 2017.06.27_Golubaev/).

4. Elektronnyi resurs // SonotaCo. Available: http://sonotaco.jp

 Liektronnyl resurs // SonotaCo. Available: http://sonotaco.jp
 Moore C. E. Atomic Energy Levels / C. E. Moore. – NBS Circ.U.S. Governmont Printing Office, Washington, 1958. – № 467.
 Wise W. L. Atomic Transition Probabilities / W. L. Wise, M. W. Smich, B. A. Milas. – Washington : NSRDS – NBS, 1966, 1969.
 Tablytsy spektralnykh lynyi / A. N. Zaidel, V. K. Prokofev, S. M. Raiskyi et al. – 4-e yzd. – M. : Nauka, 1977. – 803 c.
 Elektronnyi resurs // Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.2). Available: https://physics.nist.gov/asd [2018, March 14]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD

Надійшла до редколегії 01.11.19

А. Голубаев, канд. физ.-мат. наук,

НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Харьков, А. Мозговая, канд. физ.-мат. наук. Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТЕОРНОГО ПАТРУЛЯ ХАРЬКОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА

В 2018 году был разработан и сконструирован наблюдательный комплекс (автоматизированный видеоспектральный метеорный патруль (АВСМП)) в НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина для получения кинематических и физических характеристик метеорных тел и их спектров. Проведено тестирование камер в режиме астрономических наблюдений с целью определить технические возможности устройства. В данной работе представлены некоторые первые результаты наблюдений, выполненных с помощью АВСМП. Созданный наблюдательный комплекс предназначен расширить материальную, научную, а также учебно-научную базы НИИ астрономии. Он будет использоваться в учебном процессе на кафедре астрономии и космической информатики ХНУ имени В. Н. Каразина во время проведения практических и лабораторных занятий, выполнения бакалаврских и магистерских работ и разработки новых методик дистанционного исследования астрономических объектов Солнечной системы.

В августе 2019 года выполнены первые базисные наблюдения метеорного потока Персеиды с помощью АВСМП. На Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии, где расположен комплекс, зафиксировано 225 видео фрагментов с метеорами в интеграль-ном свете и 98 видео со спектрами метеоров. В Харькове на вспомогательную видеокамеру получено 132 видео с метеорами в интегральном свете. Среди полученного наблюдательного видеоматериала 98 метеоров, зафиксированных в интегральном свете, являются базисными, еще 40 видео фрагментов со спектрами метеоров имеют соответствующие базисные наблюдения в интегральном свете

Ключевые слова: метеорный патруль, метеор, метеороид, спектр метеора, химический состав метеороидов

A. Golubaev, Ph.D. in Phys. and Math. Sci., Institute of Astronomy, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, A. Mozgova, Ph.D. in Phys. and Math. Sci. Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

THE FIRST RESULTS OF METEOR PHENOMENA OBSERVATIONS USING AUTOMATED VIDEO-SPECTRAL METEOR PATROL OF V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY

In 2018, an observation complex (automatic video-spectral meteor patrol (AVSMP)) was designed and constructed at the Institute of Astronomy, V.N. Karazin Kharkiv National University, for obtaining kinematic and physical characteristics of meteor bodies and their spectra. Cameras were tested in astronomical observations mode with the aim to identify the technical capabilities of the device. This paper presents some of the first results of observations conducted with the help of AVSMP. The created observation complex is intended to expand the material, scientific, as well as educational and scientific base of the Institute of Astronomy. It will be used in the educational process at the Department of Astronomy and Space Informatics of V.N. Karazin KhNU, during practical and laboratory classes, performing bachelor's and master's works and developing the newest methods of remote sensing of astronomical objects of the Solar system. In August 2019, the first baseline observations of Perseid's meteor shower were conducted using AVSMP. At Chuguev observational station of

the Institute of Astronomy, where the complex is located, 225 video fragments with meteors in integral light and 98 videos with spectra of meteors were recorded. In Kharkiv, 132 video fragments with meteors in integral light were recorded by the secondary video camera. Of the obtained observation footage, 98 meteors recorded in the integral light are basic, and another 40 video fragments with spectra of meteors have corresponding basic observations in the integral light.

Keywords: meteor patrol, meteor, meteoroid, meteor spectrum, chemical composition of meteoroids.

УДК 52-75, 52-14

В. Пономаренко, канд. фіз.-мат. наук, А. Сімон, В. Василенко, І. Ізвєкова, О. Баранський, канд. біолог. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

РЕЗУЛЬТАТИ ФОТОМЕТРИЧНОГО ОПТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЧОТИРЬОХ АКТИВНИХ ЯДЕР ГАЛАКТИК У 2018–2019 РОКАХ

Представлено результати систематичного оптичного моніторингу вибраних об'єктів (активних ядер галактик – АЯГ) із контрольного списку СТА (Cherenkov Telescope Array). Спостереження АЯГ було розпочато в січні 2018 року на спостережній станції Київського національного університету імені Тараса Шевченка в с. Лісники за допомогою телескопа-рефлектора АЗТ-8 (D = 70 см, F = 2.8 м). Телескоп АЗТ-8 оснащений ПЗЗ-камерою PL4710-1-BB-E2V та блоком UBVRI фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Для об'єктів 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 було побудовано криві зміни блиску з часом. Також досліджено змінність із часом показників кольору. У низці випадків спостережний матеріал дозволив дослідити для АЯГ змінність протягом доби (IDV), короткотривалу змінність (STV) та довготривалу змінність (LTV).

Ключові слова: активні ядра галактик, фотометрія, оптичний моніторинг.

Вступ

Природа космічних променів гранично високих енергій (КПГВЕ) з енергіями *E* > 10²⁰ еВ залишається невідомою. Їхні потенційні джерела – активні ядра галактик (АЯГ), космологічні гамма-спалахи, припливні руйнування зір в околі надмасивних чорних дір, новонароджені мілісекундні пульсари/магнетари та магнетарні спалахи – мали б розташовуватися в нашій галактиці чи на її близьких околицях на характерних відстанях до 50 ÷ 100 Мпк. Залишки Наднових вважаються одними із основних джерел галактичних КП з енергіями до 10¹⁷ еВ. Експериментальним підтвердженням наявності ядерного компонента КП у залишках є їхнє гамма-випромінювання дуже високих енергій (понад 100 ГеВ), зумовлене непружними зіткненнями КП із мішенями-атомами міжзоряного середовища всередині та в околі залишків.

Ше одним імовірним джерелом КПГВЕ є блазари – підклас активних галактичних ядер (АЯГ), релятивістські струмені яких спрямовані в бік спостерігача (< 20° від променя зору). Розрізняють два типи блазарів: BL Lacertae (BL Lac) об'єкти, що характеризуються наявністю беземісійних оптичних спектрів, та об'єкти з окремими лініями випромінювання, так звані радіоквазари із плоским спектром (FSRQ). Блазари показують змінність практично на всіх довжинах хвиль від радіодіапазону до гамма-променів із часом коливань від кількох секунд до років і навіть десятків років. Усі ці варіації можна розділити на три групи залежно від їхньої тривалості: змінність протягом доби (IDV), що також іноді називають внутрішньодобовою змінністю, або мікрозмінністю (коливання блиску протягом секунд); короткотривала змінність (STV) із тривалістю в діапазоні від днів до кількох місяців; довготривала змінність (LTV) – від кількох місяців до років [1]. Властивості блазарів, які спостерігаємо в гамма-діапазоні (вони продукують спалахи гамма-частинок), роблять їх хорошими кандидатами для різних досліджень із використанням інструментів високої енергії (ВЕ) і дуже високої енергії (ДВЕ). Найбільш амбітним проектом у вивченні ДВЕ є Масив черенковських телескопів (від англ. Cherenkov Telescope Array (СТА)) з робочим діапазоном енергій від 20 ГеВ до 300 ТеВ. Одним із ключових наукових напрямів СТА є моніторинг позагалактичних об'єктів, а об'єкти типу BL Lac належать до найчисленнішого класу в цьому науковому напрямі [2]. Мультихвильові спостереження є ефективним енергетичним інструментом для вивчення фізичних властивостей астрофізичних об'єктів. З метою забезпечення оптичного спостереження за проектом СТА з початку 2018 р. ми розпочали фотометричний моніторинг вибраних блазарів BL Lac.

Обладнання

A3T-8. Телескоп АЗТ-8 (*D* = 0.7 м) знаходиться на спостережній станції "Лісники" Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Модернізований для роботи в прямому фокусі. У цій конфігурації його фокусна відстань *F* = 2.83 м, світлосила *D/F* = 1/4. Телескоп обладнано сучасною ПЗЗ-камерою FLI PL4710MB 1027x1056 пікселів розміром 13x13 мкм із набором UBVRI-фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Масштаб 0.98"/піксель, поле зору 16.2 кутових мінут. Однією з головних наукових програм, що виконують за допомогою цього телескопа, є спостереження активних ядер галактик (АЯГ). Із квітня 2018 р. телескоп входить до списку приладів, що працюють за програмою підтримки в оптичному спектральному діапазоні СТА. На сьогодні за допомогою цього телескопа проведено чимало астрономічних фотометричних (UBVRI) спостережень АЯГ (упродовж понад 60 ночей).

A3T-14. Телескоп знаходиться на спостережній станції "Лісники" Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Діаметр дзеркала D = 0.48 м. Має дві робочі конфігурації. Перша конфігурація призначена для роботи в прямому фокусі, фокусна відстань $F_1 = 2.24$ м, D/F = 1/4.6. У кассегренівському фокусі (друга конфігурація, $F_2 = 7.7$ м, D/F = 1/16) використовуємо як для роботи із ПЗЗ-камерою Starlight Xpress SXVR-H35 (4008x2672 пікселів, розміром 9x9 мкм) безпосередньо, так і для спектрографа АСП-9. Для реєстрації спектра також використовуємо камеру Starlight Xpress SXVR-H35. На гіді телескопа (D = 0.13 м) установлено камеру для утримання об'єктів на щілині спектрографа. У другій конфігурації було проведено пробні фотометричні спостереження АЯГ із СТА-списку. Із квітня 2018 р. телескоп АЗТ-14 входить до списку телескопів, що працюють за програмою підтримки в оптичному спектральному діапазоні СТА.

Таблиця 1

Методика спостережень та базової обробки матеріалу

Моніторинг АЯГ із СТА-списку було розпочато в січні 2018 р. за допомогою телескопа АЗТ-8 та повного набору (UBVRI) фільтрів системи Джонсона/Бесселя, характеристики яких наведено на рис. 1 і в табл. 1. Серед основних об'єктів спостереження: 1ES 1011+496 (z = 0.212), PKS 1222+216 (z = 0.432), 1ES 1426+428 (z = 0.129), PKS 1510-089 (z = 0.361). У статті представлено результати оптичного моніторингу цих об'єктів і дослідження їхньої короткотривалої змінності (LTV) і змінності впродовж доби (IDV).

Параметри використаних UBVRI-фільтрів системи Джонсона/Бесселя

Назва фільтра	Ефективна центральна λ, нм	FWHM (півширина) ∆λ, нм	
U	365.6	34.0	
В	435.3	78.1	
V	547.7	99.1	
R	634.9	106.6	
	879.7	289.2	



Johnson/Bessell UBVRI Filters

Методику виконання базових редукцій можна назвати стандартною для кожного використаного інструмента. Найбільше спостережень проведено за допомогою телескопа A3T-8. Камера (FLI PL4710MB) на A3T-8 має повітряне охолодження, що забезпечує температурний режим роботи від -20 до -40°C. Для врахування залишкового теплового заряду щоночі виконували знімання із закритими шторками камери (dark) з експозиціями широкосмугових фільтрів кількістю 9–15 кадрів. У межах такої самої кількості кадрів виконували знімання з нульовою експозицією (bias). Для врахування особливостей накопичення світлової енергії поверхнею ПЗЗ-камери знімали 5–9 кадрів вранішнього або вечірнього неба (flat-field) для кожного з фільтрів. Урахування bias, dark та flat-field, як і подальше оброблення матеріалу, виконано в програмному середовищі "MaxIm DL".

З метою пошуку короткотривалої змінності (STV) для об'єкта в кожному з фільтрів знімали 9–15 кадрів з експозиціями 30–120 с. Для збільшення відношення сигнал/шум (S/N) із кадрів розраховували середнє медіанне. На момент спостережень об'єкт розташовували максимально близько до геометричного центра камери. Також у центральній ділянці поля обирали 5–9 зір-стандартів, за якими оцінювали зміну блиску об'єкта спостережень.

Для пошуку змінності впродовж доби (IDV) здійснювався моніторинг об'єкта спостережень протягом кількох годин у обраних фільтрах з експозиціями 60–180 с.

Обрана методика оцінювання похибки при побудові кривої зміни блиску між ночами (одна ніч – одна точка в одному фільтрі) та в межах однієї ночі (напр. 100 кадрів) відрізняється. Між ночами похибкою прийнято σ – середнє квадратичне відхилення, поділене на \sqrt{n} – кількість отриманих кадрів (тобто середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного). Довірчим інтервалом є (σ/\sqrt{n}), помножене на коефіцієнт Стьюдента (коефіцієнт було взято для точності 95 % – 2,26). Теоретичні викладки були перевірені шляхом неодноразового фотометрування однієї зорі-стандарту за допомогою інших зір. У межах однієї ночі (напр. для 100 кадрів) знаходили суму або медіану кадрів (напр. по 10). Похибка кожної із 10 отриманих точок дорівнювала $\sigma/(\sqrt{10})$ (де σ – те саме середнє квадратичне відхилення). Оскільки ми шукаємо змінність АЯГ, то довірчий інтервал знаходили по зорі-стандарту співрозмірного блиску. Довірчий інтервал – $\sigma/(\sqrt{10})^*$ 2,26 (коеф. Стьюдента для точності 95 %). Для різних ночей наша загальна (апаратна та методична) похибка для спостережуваних АЯГ після виконання всіх редукцій коливається в межах $\Delta \varepsilon \approx 0.06$ -0.1 зоряної величини.

Рис. 1. Криві пропускання використаних UBVRI-фільтрів (по ОУ – пропускна здатність фільтрів у %, по ОХ – довжина хвилі у нм)

Побудова системи локальних фотометричних стандартів

Як було зазначено вище, для знімків кожного з об'єктів було виконано всі базові редукції. Щоб перейти від рівня накопиченого сигналу до зоряних величин, ми обрали зорі в центральній ділянці кадру і скористалися досвідом закордонних колег [3]. На жаль, не для всіх обраних зір-стандартів удалося встановити чітко визначені видимі зоряні величини в кожному з фільтрів (UBVRI) системи Джонсона/Бесселя. З огляду на це нам довелося створити систему локальних фотометричних стандартів. Для цього було отримано потоки енергії та інструментальні зоряні величини для кожної зорі-стандарту. Потім завдяки зорям із відомими видимими величинами, із врахуванням коефіцієнта екстинкції, визначено видимі зоряні величини для інших використаних зір-стандартів. Приклад отриманої залежності між інструментальною та видимою зоряними величинами для фільтра В наведено на рис. 2.



Рис. 2. Приклад графіка залежності видимої та інструментальної зоряних величин для нашої фотометричної системи

Особливості об'єктів дослідження

Найбільше отримано, оброблено та проаналізовано фотометричних (UBVRI) спостережень таких об'єктів: 1ES 1011+496, 1ES 1426+428, PKS 1222+216, PKS 1510-089. Основну інформацію за цими АЯГ наведено у табл. 2. Усі представлені об'єкти відкриті не так давно (табл. 2). Сьогодні їх активно досліджують спектрально та фотометрично. Для АЯГ 1ES 1011+496, PKS 1222+216, PKS 1510-089 наявні також результати досліджень в оптичному спектральному діапазоні [4, 5].

Об'єкти спостереження і дослідження

Таблиця 2

Об'єкт	1ES 1011+496	1ES 1426+428	PKS 1510-089	PKS 1222+216
R.A. (год, хв, с)	10 15 04.1	14 28 32.6	15 12 52.2	12 24 54.5
Dec. (градус, хв, c)	+49 26 01	+42 40 21	-09 06 21.6	+21 22 46
Червоне зміщення	z=0.212	z=0.129	z=0.361	z=0.435 1612 Мпк
Граничні енергії	150 ГеВ	2500 ГеВ	150 ГеВ	100 ГеВ
Спектральний індекс	3.66	3.5	5.4	3.75
Дата відкриття	2007-09	2002-02	2010-03	
Блиск (V _{mag})	≈16.15 [™]	≈16.45 ^m	≈16.54 ^m	≈17.50 ^m

Побудова та аналіз кривих блиску

1ES 1011+496. Для об'єкта побудовано криві блиску з метою пошуку змінності впродовж доби (IDV) та короткочасної змінності (STV) для UVRI-фільтрів. Змінність (STV) було зафіксовано, результати наведено на рис. 3. Також удалося зафіксувати змінність кольорових індексів (рис. 4) для STV, які особливо чітко видно у фільтрах B-V. Отримані результати за змінністю незалежно підтверджено за допомогою математичних тестів (F-тест та x²-тест).

1ES 1426+428. На жаль, не вдалося чітко зафіксувати зміни блиску для об'єкта, оскільки вони співрозмірні з похибкою вимірювань та обчислень. На сьогодні спостереження тривають, основні результати оптичного моніторингу у VRI-фільтрах та кольорові індекси відображено на рис. 5







Рис. 4. Заповненими квадратиками показано змінність кольорових індексів В-V та V-R для АЯГ 1ES 1011+496; порожніми колами відображено B-V та V-R для зорі-стандарту

PKS 1510-089. Для об'єкта зафіксовано короткотривалу змінність (STV). Для кожного з використаних широкосмугових фільтрів (UBVRI) результати представлено на рис. 6. Також на рис. 6 наведено зафіксовану змінність кольорових індексів. Для наочності та деталізації на рис. 7 окремо показано зміну блиску для PKS 1510-089 у використаних фільтрах (UVRI). Отримані результати для змінності незалежно підтверджено за допомогою математичних тестів (F-тест и х²-тест).



Рис. 5. Ліворуч – криві блиску для АЯГ 1ES 1426+428 у фільтрах V, R, I; праворуч – кольорові індекси R-I та V-R для 1ES 1426+428



Рис. 6. Ліворуч – криві блиску для АЯГ РКЅ 1510-089 у фільтрах U, B, V, R, I; праворуч – кольорові індекси R-I та V-R

PKS 1222+216. На даний момент для цього АЯГ також не вдалося підтвердити зміни блиску. Деякі результати оптичного моніторингу та кольорові індекси відображені на рис. 8.



Рис. 8. Ліворуч – видима зоряна величина для АЯГ PKS 1222+216 у фільтрах B, V, R; праворуч – кольорові індекси R-V та B-V для PKS 1222+216

Висновки

Виконано моніторингові фотометричні спостереження активних ядер галактик із СТА-списку в оптичному діапазоні за допомогою телескопів АЗТ-8, АЗТ-14 і UBVRI-фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Для об'єктів 1ES 1426+428, 1ES1011+496, PKS 1510-089, PKS 1222-216 побудовано та проаналізовано криві блиску.

Для об'єктів 1ES 1011+496, PKS 1510-089 зафіксовано короткотривалу змінність (STV) з амплітудою від 0.5 до 1 зоряної величини в усіх фільтрах системи Джонсона/Бесселя (UBVRI) за загальної похибки (інструментальної та методичної) ∆_Σ ≈ 0.06-0.1 зоряної величини.

Перелік посилань

1. Gupta, Alok C. et al. Characterizing optical variability of OJ 287 in 2016 - 2017. eprint arXiv:1803.03964. 03/2018.

Cherenkov Telescope Array. Consortium. Science with the Cherenkov Telescope Array. eprint arXiv:1709.07997. 09/2017.
 Tuorla Observatory. [Electronic resource]. – URL : http://users.utu.fi/kani/1m/index.html.

4. Castignani G. et al. Multiwavelength variability study and search for periodicity of PKS 1510-089. Astronomy and Astrophisics. - 2017. - V. 601, A30. 5. Ahnen M. L. et al. Multi-Wavelength Observations of the Blazar 1ES 1011+496 in Spring 2008. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

- 2016. - V. 459. 2286.

Надійшла до редколегії 07.11.19

В. Пономаренко, канд. физ.-мат. наук,

А. Симон.

В. Василенко,

И. Извекова,

О. Баранский, канд. биол. наук,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧЕТЫРЕХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК В 2018-2019 ГОДАХ

Представлены результаты систематического оптического мониторинга избранных объектов (активных ядер галактик – АЯГ) из контрольного списка СТА (Cherenkov Telescope Array). Наблюдения АЯГ были начаты в январе 2018 года на наблюдательной станции Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в с. Лесники с помощью телескопа-рефлектора АЗТ-8 (D = 70 см, F = 2.8 м). Телескоп АЗТ-8 оснащен ПЗЗ-камерой PL4710-1-BB-E2V и блоком UBVRI фильтров системы Джонсона/Бесселя. Для объектов 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 были построены кривые изменений блеска со временем. Также исследована переменность со временем показателей цвета. В ряде случаев наблюдательный материал позволил исследовать для АЯГ переменность в течение суток (IDV), быструю переменность (STV) и медленную переменность (LTV).

Ключевые слова: активные ядра галактик, фотометрия, оптический мониторинг.

V. Ponomarenko, Ph.D., A. Simon, V. Vasylenko, I. Izvekova. O. Baransky, Ph.D., Taras Shevchenko National University of Kyiv

THE RESULTS OF THE PHOTOMETRIC OPTICAL MONITORING OF FOUR ACTIVE GALAXIES IN 2018–2019

Active galactic nuclei (AGN) are a source of very high energies. Blazars are a subclass of active galactic nuclei that can be observed in the optical spectral range. The aim of the study is some BL Lacertae type blazars, which are characterized by a non-emission optical spectrum and exhibit brightness variations at all wavelengths. The results of systematical monitoring of selected objects from the CTA (Cherenkov Telescope Array) optical follow up list, started in January 2018 are presented. The observations are carried out with the AZT-8 (D = 70 cm, F = 2.8 m) telescope of the observation station Lisnyky of Taras Shevchenko National University of Kyiv. In 2018 the telescope AZT-8 was included in the list of supporting instruments in the CTA consortium. The AZT-8 equipped with the PL4710-1-BB-E2V CCD (1027x1048 pixels, 13x13 µm/pixel, scale is 0.95 "/pixel, field of view is 16.2 angular minutes) and broadband Johnson/Bessel UBVRI filters. For processing the software Maxim DL was used. During processing accounting of substrate (bias), dark current, flat-field were taken into account. The fluxes of energy from objects of research with the help of standard stars has been turned into visible stellar magnitudes. Light curves for four objects: 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 were plotted. Variability of color indexes with time was investigated. In addition, we determined the variability amplitude and tested all these objects for Intraday Variations (IDV), Short (STV) and Long term variability (LTV) where it was possible. A short-term brightness change (STV) with an amplitude of 0.5 to 1 in all filters (UBVRI) of the Johnson/Bessel system for AGN 1ES 1011+496, PKS 1510-089 was determined. For objects 1ES 1426+428 and PKS 1222+216, the brightness variations do not exceed the total error (instrumental and methodical). The total error is $\Delta z \approx 0.06$ -0.1 magnitude.

Keywords: active galactic nuclei, photometry, optical monitoring.

В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА У 2018 р.

На початок 2018 р. у Астрономічній обсерваторії працював 51 штатний працівник, зокрема 28 науковців (6 докторів наук і 17 кандидатів наук) і 10 сумісників. До складу обсерваторії входять відділ астрофізики (зав. відділу д-р фіз.-мат. наук, проф. Жданов В. І.), сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи (зав. сектору канд. фіз.мат. наук Клещонок В. В.), та 2 спостережні станції (с. Лісники та с. Пилиповичі). Упродовж року виконувались три бюджетні теми.

Ключові слова: сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи, відділ астрофізики, бюджетна тема.

Основні наукові результати

Розроблено нові механізми прискорення космічних променів високих енергій, які ґрунтуються на формуванні релятивістських струменів плазми при руйнуванні зір в околі надмасивних чорних дір в активних ядрах галактик та на прискоренні космічних променів до найвищих енергій новонародженими мілісекундними пульсарами.

За даними Центру малих планет (Minor Planet Center) ст. Лісники (спостережна станція Астрономічної обсерваторії) п'ятий рік поспіль займає перше місце серед 413 обсерваторій світу за кількістю позиційних спостережень комет. Отримано 5116 спостережень 85 комет (3860 зображень), 55 – астероїдів з відомими номерами (547 зображень) і 55 – нових астероїдів (709 зображень). Виконана первинна обробка зображень комет і надіслано до міжнародної бази 183 зображення комети 41Р та 87 – комети 45Р.

У 2018 р. опубліковано 4 монографії, 81 наукова стаття, з них 36 – у закордонних виданнях; зроблено 102 доповіді на наукових конференціях.

Інформація про роботу Астрономічної обсерваторії за 2017 р. була подана у "Віснику Київського університету" [1]. Тут висвітлено результати наукових досліджень та найважливіші події в житті обсерваторії за 2018 рік.

Структура та склад

На початок 2018 р. у Астрономічній обсерваторії працював 51 штатний працівник і 10 сумісників, з них співробітників, які беруть участь у виконанні НДР – 28, у тому числі докторів – 6, кандидатів наук – 17; обслуговуючий персонал – 23; штат музею – 1. В науковій роботі брали участь викладачі, аспіранти та студенти кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету університету. У кінці 2017 р., у зв'язку із закінченням теми, були звільнені канд. фіз.-мат. наук Кудря Ю. М. та канд. фіз.-мат. наук Коваленко Н. С. Зарахована штатним працівником канд. фіз.-мат. наук Сергієнко О. М., сумісниками – Сташко О., Войцехівський В., Іванова О., Сімон А., Василенко В.

Захистила кандидатську дисертацію "Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями" Мозгова А. М. (наук. кер. Чурюмов К. І.).

У 2018 р. змін у структурі Обсерваторії не було: до її складу входили відділ астрофізики (зав. відділу д-р фіз.мат. наук, проф. Жданов В. І.), сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи (зав. сектору канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. Клещонок В. В.), а також 2 спостережні станції (с. Лісники Києво-Святошинського р-ну і с. Пилиповичі Бородянського р-ну Київської обл.). Відновлено в повному обсязі роботу наукової бібліотеки Обсерваторії після покладення обов'язків зав. бібліотеки на ст. бібліотекаря Наукової бібліотеки імені Михайла Максимовича Кравченко Г. О.

Обсяг бюджетного фінансування у 2018 р. становив 5788.8 тис. грн, договірного – 116.7 тис. грн.

Співробітниками обсерваторії у 2018 р. опубліковано 4 монографії, 81 наукова стаття, з них 36 – у закордонних виданнях; зроблено 102 наукові доповіді на конференціях. Проведено міжнародну наукову конференцію "Астрономія і фізика космосу в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка". Надруковано 57-й і 58-й випуски "Вісника Київського національного університету", також видано тези доповідей зазначеної наукової конференції.

Тематика наукових досліджень

Упродовж року виконувались бюджетні теми: "Фундаментальна фізика та моделі високоенергетичних астрофізичних явищ", наук. кер. Жданов В. І., д-р фіз.-мат. наук, проф., зав. відділу (обсяг фінансування – 2838.8 тис. грн); "Космічні чинники земних катаклізмів. Спостереження, аналіз, інформатизація", наук. кер. Розенбуш В. К., д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (1733.9 тис. грн). Договірні теми: "Просторово-часовий розподіл забруднення атмосфери дрібнодисперсним аерозолем у Східноєвропейському регіоні за даними одночасних фотометричних і лідарних вимірювань та моделювання" з Державним фондом фундаментальних досліджень, наук. кер. Міліневський Г. П., д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., відп. виконавець Данилевський В. О., канд. фіз.-мат. наук; проект відділення цільової підготовки Київського національного університету імені Тараса Шевченка при Національній академії наук України "Прояви темної енергії і темної матерії в модифікаціях стандартної космологічної моделі", н/к Жданов В.І. відділ астрофізики (об'єм фінансування 63,9 тис. грн.); Договір №17ДФ023-01 "Розрахунок розміщення площини скульптури "Єднання" у відповідності до видимості Сонця з точки розміщення в дні сонцестоянь та рівнодень", наук. кер. Казанцева Л. В., сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи (обсяг фінансування – 2.5 тис. грн).

Молоді науковці обсерваторії виграли конкурс на фінансування молодіжної теми "Мультихвильові дослідження космічних джерел гамма-випромінювання в рамках СТА-проекту", наук. кер. Пономаренко В. О., канд. фіз.-мат. наук. Початок фінансування теми – 2018 р.

Результати наукових досліджень.

Астрофізика. Розроблено нові механізми прискорення космічних променів високих енергій, які ґрунтуються на формуванні релятивістських струменів плазми при руйнуванні зір в околі надмасивних чорних дір в активних ядрах галактик та на прискоренні космічних променів до найвищих енергій новонародженими мілісекундними пульсарами. Показано, що навіть на відносно малих космологічних відстанях міжгалактичні та галактичні магнітні поля суттєво викривлюють траєкторії космічних променів найвищих енергій, затрудняючи ототожнення їхніх джерел (Гнатик Б. І.).

Проведено спостереження, побудовано та проаналізовано криві блиску для 9 активних ядер галактик зі списку СТА. Для об'єктів 1ES 1011+496, PKS 1510-089 зафіксовано короткотривалу змінність (STV) з амплітудою від 0.5 до 1 зоряної величини в усіх фільтрах системи Джонсона/Безеля (UBVRI) за загальної похибки Δ_Σ ≈ 0.06-0.1 зоряної величини. Метою програми є дослідження активності ядра (спалахів), джетових структур, визначення періоду обертання, властивостей газу і пилу в комі, а саме: хімічний склад, швидкість вильоту з ядра (Пономаренко В. О., Сімон А. О., Василенко В. В.).

~ 50 ~

Розраховано очікувані потоки гамма-випромінювання від залишку Наднової Вітрила. Проаналізована можливість реєстрації локалізованих джерел гамма-випромінювання всередині залишку. Показано, що такі джерела можуть бути зареєстровані експериментом СТА (Гнатик Р. Б.).

Побудовано модель фону баріонних джерел у ТеВ-му діапазоні енергій в області 20х20 градусів навколо центра близької (55 кпк) карликової галактики ВМХ. Вона містить 19 точкових та 3 протяжні джерела. Модель використовується колаборацією СТА для пошуку гамма-фотонів від розпадів темної матерії у ВМХ (Сергієнко О. М.).

Астрометрія та малі тіла Сонячної системи. За даними Центра малих планет (Minor Planet Center) ст. Лісники (спостережна станція Астрономічної обсерваторії) п'ятий рік поспіль займає перше місце серед 413 обсерваторій світу за кількістю позиційних спостережень комет. Отримано 5116 спостережень 85 комет (3860 зображень), 55 – астероїдів з відомими номерами (547 зображень) і 55 – нових астероїдів (709 зображень).

У рамках міжнародної програми 4*Р Coma Morphology Campaign для вибору наступної комети для дослідження за допомогою КА проведено фотометричні й астрометричні спостереження комет 41Р/Tuttle-Giacobini-Kresak i 45Р/Honda-Mrkos-Pajdusakova на різних телескопах. Метою програми є дослідження активності ядра (спалахів), джетових структур, визначення періоду обертання, властивостей газу і пилу в комі (хімічний склад, швидкість вильоту з ядра). Виконана первинна обробка зображень комет і надіслано до міжнародної бази 183 зображення комети 41Р та 87 – комети 45Р (Клещонок В. В., Баранський О. Р.).

Проведено дослідження комети 2P/Encke, зокрема:

i) Ідентифіковано у спектрах, отриманих 23 січня 2017 р., більше 60 емісій, що належать різним переходам молекул CN, C2, C3, NH2, CH та CO+. Темпи продукування газових молекул CN, C2, C3 і NH2 на r=1.052 а.о. становили 3.19×10²⁵, 3.26×10²⁵, 0.17×10²⁵ і 0.82×10²⁵ мол/с, відповідно.

іі) Величина лінійної поляризації в навколоядерній області коми комети 2P/Encke становила залежно від фільтра ~6–8 %, потім різко знизилася до ~ 3–5 % на відстані ~2000–3000 км, а на більших відстанях поступово збільшувалася із хвилеподібними коливаннями, досягаючи знову ~6–8 % на ~12000–16000 км. Після корекції за деполяризацію випромінювання в континуумі емісіями, використовуючи відношення газ/пил зі спектроскопії, ступінь збільшився на 3–5 %. Подібна поведінка кольору та поляризації також спостерігалася нами в кометі 67P/Churyumova-Gerasimenko, хоча комети дуже різні: 67P/C-G – багата на пил, а Encke – дуже бідна на пил комета. Однак обидві комети відомі як багаті на великі пилові частинки.

ііі) Цілком імовірно, що "точка повороту", де поляризація змінюється від зменшення до збільшення, може бути діагностичною для деяких властивостей пилу, наприклад швидкості сублімації та фрагментації пилу, початкового розміру частинок, хімічного складу. Наше моделювання, використовуючи Sh-матричний метод для гауссових частинок, показує, що спостережені радіальні тренди в кольорі та поляризації можна пояснити зменшенням розміру частинок пилу з відстанню від ядра (Розенбуш В. К., Іванова О.).

Фотометрична обробка двох метеорів з потоку Персеїди показала, що одна із кривих блиску має мультимодальний характер, що може бути пояснено дробленням тіла, а інша – явно виражений бімодальний тип, який не має на сьогодні остаточного пояснення. Запропоновано якісні моделі для інтерпретації метеора з бімодальною кривою блиску: (і) метеороїдне тіло складається із двох різних за складом частинок; (іі) однорідний монолітний метеороїд зі специфічною геометричною формою та параметрами можливого обертання тіла (Козак П. М.).

За результатами числового моделювання еволюції орбіт різних тіл Сонячної системи виявлено, що за динамічним часом життя Дамоклоїди поділяються на дві підпопуляції: з коротким, 2.68±0.04 мілн років (85.75 % об'єктів), і довгим, 126±6 млн років (14.25 % об'єктів), часом життя. Дамоклоїди з часом можуть поповнювати простір поблизу орбіти Землі, швидкість переходу на орбіти АЗЗ становить 0.11 % популяції за 10 млн років. Виявлено також, що за час інтегрування 7 тис. років 19 із 76 нових комет (тобто 25 %) принаймні деякий термін перебували на відстані 0.3 а.о. від орбіти Землі та мали перигелійні відстані <=1.3 а.о., що робить їх потенційними батьківськими тілами для майбутніх метеорних потоків чи спорадичних метеороїдів (Клещонок В. В., Коваленко Н. С., Гулієв Р. А.).

Фізика Сонця, сонячно-земні зв'язки. На горизонтальному сонячному телескопі обсерваторії велись спектрополяриметричні спостереження для дослідження магнітних полів у спорадичних сонячних утвореннях. Також вимірювались напруженості магнітного поля в тіні великих сонячних плям і виконувались спостереження спектрів активних процесів на Сонці. Проаналізовано дані за потужними сонячними спалахами, під час яких було зареєстровано високі потоки рентгенівського випромінювання; визначено параметри напівемпіричних моделей для областей інтенсивного енерговиділення (Лозицький В. Г., Лозицька Н. Й.).

Досліджено відхилення від тренда (середньозгладжені місячні значення площ груп плям) місячних значень площ груп плям за 12–24 цикли сонячної активности окремо для кожного циклу. Знайдено, що значення відхилень змінюються з певним періодом, середнє значення якого близько 13 місяців (Єфіменко В. М.).

Запропоновано сценарій пояснення спостереженого явища подвійних максимумів 11-річних циклів сонячних плям, у якому беруть участь п'ять процесів перебудови магнетизму в сонячній конвективній зоні (СКЗ): Ω-ефект, магнітна плавучість, макроскопічний турбулентний діамагнетизм, ротаційний ∇ρ-ефект і меридіональна циркуляція. Установлено, що перебудова магнетизму у високоширотному і приекваторіальному доменах СКЗ відбувається у відмінних режимах. Ключову роль у розробленому механізмові відіграють дві зсунуті в часі хвилі тороїдального поля до сонячної поверхні в приекваторіальному домені (Криводубський В. Н.).

Список посиланы:

^{1.} Єфіменко В. М. Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка у 2017 р. / В. М. Єфіменко // Bull. Kyiv National Taras Shevchenko University. Astronomy. – 2018. – Вип. 1(57). – С. 52-55.

V. Efimenko, Ph.D.,

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV IN 2018

At the beginning of 2017, 53 workers worked in the State Astronomical Observatory, of which 28 were scientists, including 6 doctors of sciences and 17 candidates of sciences. The structure of the observatory includes the sector astrometry and the small bodies of the solar system (the head of the sector is Kleshchonok V.V., Ph.D.), the department of astrophysics (the head of the department is professor Zhdanov V.I., doctor of Science) and 2 observation stations (Lisnyky, Pylypovychi).

During the year budget topics were carried out: "Fundamental physics and models of high-energy astrophysical phenomena", scientific leader professor Zhdanov V.I., doctor of Science; "Cosmic factors of terrestrial cataclysms: observation, analysis, informatization", scientific leader Rosenbush V.K., doctor of Science. Young scientists of the Observatory won the competition for financing the youth theme "Multi-wave research of cosmic sources of gamma radiation in the framework of the STA project", scientific leader Ponomarenko V.O., Ph.D.

Main scientific results. The potential source of the triplet of cosmic rays with energies above 10²⁰.

eV – magnetar SGR 1900 + 14 is found. The possible manifestations of the acceleration of the cosmic rays by the remnant of the Nebula, in which the magnetar SGR 1900 + 14 was born, was investigated. In order to monitor potentially dangerous bodies of the solar system at the observatory station (Lisnyky) 3323 observations were received from 70 comets and 103 asteroids, 3 new asteroids (2017 ST39, 2017 SV39, 2017 TS7) were officially confirmed by the International Center for Small Planets.

In 2017, the staff of the Observatory published 4 monographs, 81 scientific articles, 36 of them in foreign publications; 78 reports have been made at 12 conferences.

Keywords: sector of astrometry and small bodies of the solar system, department of astrophysics, budget topic.

В. Ефименко, канд. физ.-мат. наук, Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ КИЕВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО В 2018 г.

В начале 2018 г. в Астрономической обсерватории работал 51 штатный сотрудник, в частности 28 научных (6 докторов наук и 17 кандидатов наук) и 10 смежников. В состав обсерватории входят отдел астрофизики (зав. отделом д-р физ.-мат. наук, проф. Жданов В. И.), сектор астрометрии и малых тел Солнечной системы (зав. сектором канд. физ.-мат. наук Клещонок В. В.) и 2 наблюдательные станции (с. Лесники и с. Пилиповичи). В течение года выполнялись 3 бюджетные темы.

Ключевые слова: сектор астрометрии и малых тел Солнечной системы, отдел астрофизики, бюджетная тема.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

АСТРОНОМІЯ

Випуск 1(59)

Оригінал-макет виготовлено ВПЦ "Київський університет"

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали. Рукописи та дискети не повертаються.



Формат 60х84^{1/8}. Ум. друк. арк. 6,0. Наклад 300. Зам. № 219-9558. Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № А1. Підписано до друку 10.01.20

Видавець і виготовлювач ВПЦ "Київський університет" Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28 e-mail:vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua http: vpc.univ.kiev.ua Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02