

щості 77 та 63 %. Цього недостатньо для надійних висновків, але величина та, у першу чергу, знак коефіцієнта C_3 збігаються з аналогічною величиною для вибірки компактних галактик, отриманою зі статистичною ймовірністю 94 % [1]. Коефіцієнт C_3 є додатним, тобто частка теплового випромінювання зростає зі зростанням індексу кольору. Однак через сильну кореляцію між W та показником кольору без застосування багатовимірної регресії на кшталт (1) можна дійти хибного протилежного висновку про знак цієї залежності.

Висновки. Ми ототожили вибірку дифузних галактик з активним зореутворенням із джерелами випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Як і у випадку компактних галактик, лише для незначної частки галактик є дані про потік радіовипромінювання. Ми знайшли частку теплового випромінювання A в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для 30 дифузних галактик. Невеликий обсяг вибірки дозволив отримати лише базові показники та дослідити залежність від $EW(H\beta)$ еквівалентної ширини емісійної лінії $H\beta$ і показника кольору $g-r$. Усі вони якісно добре збігаються з результатами дослідження вибірки компактних галактик *CSFG*, для яких відомі радіопотоки на частоті 1.4 ГГц. Однак частка теплового випромінювання в дифузних галактиках є трохи меншою, ніж у компактних галактиках з активним зореутворенням. Її розподіл можна вважати лог-нормальним.

Список використаних джерел

1. Парновський С. Л. Теплове випромінювання галактик з активним зореутворенням у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц / С. Л. Парновський, І. Ю. Изотова // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2018. – Вип. 57(1). – С. 41-47.
2. 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. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2015. – V. 219, Issue 1. – Id. 12. – 27 pp.
3. 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. Izotova I.Y. Star formation rate in star-forming galaxies / I. Y. Izotova, Y. I. Izotov // *Astrophysics and Space Science.* – 2018. – Vol. 363, Issue 3. – Id. 47, 9 pp.
6. Fisher R. A. Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – London: Oliver and Boyd, 1950. – 80 p.
7. Parnovsky S. L. Radio emission at 1.4 GHz from luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova // *Astronomische Nachrichten / Astronomical Notes.* – 2015. – V. 336, № 3. – P. 276-283.
8. Parnovsky S. L. H α and UV luminosities and star formation rates of large sample of luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova, Y. I. Izotov // *Astrophysics and Space Science*, 2013. – № 343. – P. 361–376.
9. The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey / I. Y. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, C. Henkel // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2016. – V. 462, Issue 4. – P. 4427–4434.
10. The NRAO VLA sky survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // *Astron. J.* – 1998. – V. 115, № 5. – P. 1693–1716.

Надійшла до редколегії 8.10.18

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

ОЦЕНКА ТЕПЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИФУЗНЫХ ГАЛАКТИК С АКТИВНЫМ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ В РАДИОКОНТИНУУМЕ НА ЧАСТОТЕ 1.4 ГГц

Определена доля теплового компонента в общем излучении в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц для 30 диффузных галактик с активным звездообразованием. Это является продолжением предыдущих исследований, в которых аналогичная величина была получена для 193 компактных галактик [1]. Найдена зависимость доли теплового компонента от эквивалентной ширины эмиссионной линии $H\beta$ и показателя цвета $g-r$. Показано, что распределение этой доли, как и в случае с выборкой компактных галактик, близко к лог-нормальному, хотя и с более низкой медианой – около 6 %.

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

DIFFUSE STAR-FORMING GALAXIES: THERMAL EMISSION IN RADIO CONTINUUM AT 1.4 GHz

We determine the fraction of thermal radio emission in the total flux at the frequency of 1.4 GHz in 30 diffuse star-forming galaxies using the approach described in the paper by Parnovsky and Izotova (Astronomische Nachrichten, 2015 Vol.336, Issue 3, p.276). We use the sample of diffuse galaxies with active star formation selected from the Data Release 12 (DR12) of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The SDSS spectroscopic data for diffuse galaxies were supplemented by radio data from the FIRST and NVSS catalogues. From the fluxes in the $H\beta$ emission line corrected for extinction and aperture we estimate the fluxes of thermal component of the radio emission at the 1.4 GHz using the result of the paper by J. Caplan and L. Deharveng (Astron. Astrophys. 1986, V. 155, P.297) and compare them with total fluxes from the FIRST and NVSS.

In the sample of diffuse galaxies with active star formation, the distribution of the fraction of thermal radio emission A is similar to the log-normal one with the median value of 6 %. This is less than the median value which was derived earlier by Parnovsky and Izotova for a sample of compact star-forming galaxies, but both distributions of A are similar.

We study the dependence of A on the W equivalent width of the $H\beta$ emission line and on the I colour index $g-r$. The fraction of thermal component increases with increasing of the equivalent width of the $H\beta$ emission line if a colour index is constant or an increasing of the colour index at a fixed equivalent width W . The regression analysis provides a dependence on both parameters simultaneously in the form $\log(A) = C_1 + C_2(W - W_0) + C_3(I - I_0)$ with $W_0 = 24.6$, $I_0 = 0.389$, $C_1 = -1.24 \pm 0.07$, $C_2 = 0.0048 \pm 0.004$ and $C_3 = 0.40 \pm 0.44$. It is similar to the regression derived for the sample of the compact star forming galaxies.

УДК 523.98 + 52-337

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

ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВО НЕРОЗДІЛЬНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЗМІШАНОЇ ПОЛЯРНОСТІ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЕФЕКТУ ЗЕЄМАНА В СОНЯЧНОМУ ФАКЕЛІ

Показано, що просторово нероздільні магнітні поля змішаної полярності цілком реально виміряти за ефектом Зеємана, якщо їхня напруженість перевищує 150–200 Гс. Це означає, що можна стикувати між собою діапазони реєстрації цих полів на основі ефектів Ханле та Зеємана. Ця теза ілюструється результатами розрахунків півширин сто-

© Лоцицький В., 2018

кового профілю I для ліній Fe I 5247.1 і 5250.2. Параметр I чутливий до присутності магнітних полів незалежно від того, мають вони однакові чи протилежні полярності в межах вхідної апертури інструмента. Згідно з розрахунками, якщо точність вимірювання відношення півширин указаних двох ліній підвищити до 0.5 %, то можна вимірювати знакозмінні магнітні поля, починаючи із 70–100 Гс. На основі використання запропонованого методу оцінено напруженість магнітних полів змішаної полярності в сонячному факелі у хвостовій частині активної області NOAA 1809, яка в день спостережень, 6 серпня 2013 р., перебувала недалеко від центра диска Сонця. Ешельна зєсман-спектрограма цього факела була отримана на ГСТ АО Київського національного університету. Магнітне поле у факелі вимірювалось двоюко: за зміщеннями "центрів ваги" профілів ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å у спектрах $I + V$ та $I - V$, а також за співвідношенням півширин профілів цих ліній. Першим методом було виміряно ефективне поле V_{eff} , яке дорівнює 280 Гс по лінії Fe I 5250.2 та 360 Гс по лінії Fe I 5247.1. Відповідне співвідношення $V_{\text{eff}}(5247.1) / V_{\text{eff}}(5250.2) \approx 1.3$ указує на існування в дослідженому місці субтелескопічних силових трубок з кілогауссовими полями. Однак відношення півширин профілів Стокса вказаних двох ліній дорівнює 1.08, що відповідає магнітному полю ± 650 Гс, якщо вважати магнітне поле суто поздовжнім. На основі аналізу цих даних, а також результатів інших досліджень можна дійти висновку, що в дослідженому факелі, імовірно, існували магнітні поля трьох типів: кілогауссові поля V_{fluxtube} у субтелескопічних силових трубках, ділянки фонового поля V_{backgr} регулярної полярності й ділянки субтелескопічних полів V_{mixpol} змішаної полярності. Магнітний потік заплутаних знакозмінних полів за абсолютною величиною перевищує потік усього регулярного поля з напруженостями V_{fluxtube} та V_{backgr} не менш ніж у 2 рази.

Ключові слова: Сонце, сонячні магнітні поля, сонячні факели, ешельні зєсман-спектрограми, просторово нероздільні магнітні поля змішаної полярності, трикомпонентна структура магнітних полів.

Вступ. Ефект Зєсмана є основним інструментом для прямих вимірювань магнітних полів Сонця та інших зірок. При однорідному магнітному полі цей ефект має двоякі спектральні прояви: а) розщеплення спектральної лінії на кілька компонент і б) поляризація цих компонент розщеплення. За величиною розщеплення компонент можна виміряти напруженість магнітного поля, а за поляризацією компонент – його полярність, а також орієнтацію вектора напруженості магнітного поля. Певна поляризація компонент розщеплення може бути вагомим (іноді – вирішальним) аргументом на користь того, що спостережувані зміни в профілях ліній обумовлені саме магнітним полем, а не, наприклад, ефектом Допплера.

Однак в окремих випадках ефект Зєсмана може спостерігатись і без наявності поляризації в профілі спектральної магніточутливої лінії. Наприклад, це може бути тоді, коли на вхідну щілину спектрографа проєктуються просторово нероздільні (субтелескопічні) ділянки, що мають протилежні магнітні полярності, але однакові напруженості й фактори заповнення компонент із протилежною полярністю. Тоді стоковий профіль I цієї лінії буде дещо розширеним або й розщепленим (залежно від напруженості магнітного поля), тоді як стокові профілі Q , U та V будуть близькі до нуля скрізь у сфері довжин хвиль спектральної лінії.

На даний час переважає погляд, що такі неоднорідні магнітні поля змішаної полярності можна вимірювати лише на основі спостережень ефекту Ханле. Це дійсно так, але лише для напруженостей не вище 100–200 Гс [16]. При сильніших полях ефект Ханле незастосовний, однак саме в цьому діапазоні напруженостей, як буде показано нижче, можна використовувати ефект Зєсмана для оцінювання величини таких різнополярних магнітних полів.

Перші спостережні свідчення того, що у фотосфері за межами сонячних плям можуть існувати субтелескопічні магнітні поля з різними полярностями й напруженостями вище 100–200 Гс, отримані в роботі [3]. При цьому були використані спостереження зі стокс-метром – новим тоді типом магнітометра, який, на відміну від сонячного магнітографа, дає інформацію про зєсманівське розщеплення не у двох точках спектральної лінії, а по всьому її фактичному профілю. Це дає змогу, зокрема, оцінити ширину стокового профілю I , що неможливо при спостереженнях із магнітографом. Автори роботи [3] виявили, що ширина цього профілю в лінії Fe I 5250.2 помітно більша, ніж це може бути теоретично у випадку помірних за силою ($\sim 10^2$ Гс) магнітних полів однакової полярності. Щоб пояснити це додаткове розширення, було зроблено припущення, що за межами сонячних плям існують субтелескопічні ділянки з протилежною магнітною полярністю і дисперсією напруженостей у середньому близько 1100 Гс. Це означає, що якщо в цих місцях на Сонці магнітне поле суто поздовжнє (з орієнтацією силових ліній точно до спостерігача або ж від нього), то тоді напруженості в цих ділянках дорівнюють ± 550 Гс.

Подібний висновок на основі ефекту Зєсмана був зроблений пізніше в роботі [6]. Досліджувалась фотосфера активної області поблизу сонячних плям, при цьому аналізувались особливості розщеплення, півширини й центральні глибини профілів $I \pm V$ близько десяти спектральних ліній. Було показано, що спостережені деформації профілів при переході від слабких розщеплень до сильніших (які також відповідали полям діапазону 10^2 Гс) можна пояснити лише в припущенні, що в дослідженому місці існували як мінімум дві компоненти магнітного поля: квазіоднорідна і поздовжня (вертикальна до поверхні Сонця) з магнітними полями до 10 кГс і мультиполярна з полями ≤ 1 кГс. Загальні магнітні потоки цих двох компонент приблизно однакові.

Наведені вище результати потребували уточнення, оскільки вони були отримані на основі аналізу даних у спектральних лініях із різною загалом висотою формування і температурною чутливістю. У такому разі ефекти висотної та поверхневої неоднорідності магнітного поля змішуються між собою, що ускладнює інтерпретацію спостережень. Простіше при цьому використовувати лише ті спектральні лінії, які мають однакові висоти формування в атмосфері й температурні чутливості. Точне виконання цього критерію неможливе для ліній сонячного спектра: незважаючи на наявність у ньому багатьох тисяч спектральних ліній лише у видимій області, фактично немає навіть однієї пари неблендованих ліній одного хімічного елемента, які мають точно однакові висоти формування і температурні чутливості. Тому доводиться використовувати ті спектральні лінії, які мають максимально близькі параметри за вказаним критерієм.

Однією з найкращих у цьому сенсі є пара ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å з факторами Ланде $g = 2.0$ та 3.0 , відповідно. Ця пара ліній запропонована Стенфлю [15] для оцінювання локальних магнітних полів у субтелескопічних магнітних структурах. За межами сонячних плям такі структури (магнітні силові трубки) мають напруженості 1-2 кГс у спокійних областях і, можливо, кілька кілогауссів у ділянках фотосфери активних областей, які прилягають до сонячних плям [5, 11, 15]. Діаметри найтонших силових трубок близько 15-20 км [2], тому при спостереженнях навіть із найсучаснішими сонячними телескопами типу GREGOR або GST BBSO, які мають дифракційну межу просторового

розділення близько 60 км, такі силові трубки просторово не розділяються та їм відповідає за межами сонячних плям дуже малий фактор заповнення f ($f \ll 1$).

У роботах [7, 8] порівнювались півшини стоксового профілю I , $\Delta\lambda_{1/2,1}$ у лініях Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å в областях сонячних спалахів. Було виявлено, що друга лінія помітно розширена (на $\approx 20\%$) порівняно з першою. Якщо це трактувати ефектом Зеємана і наявністю поздовжніх магнітних полів змішаної полярності, то відповідні напруженості мають бути ± 900 Гс і ± 1050 Гс.

Метою даної роботи є аналогічне оцінювання напруженостей магнітних полів змішаної полярності в області сонячного факела, притому в таких місцях на Сонці, де не було поблизу сонячних плям і спалахів.

Метод. При двокомпонентній структурі магнітного поля (силові трубки + фон) спостережений профіль лінії $I_{obs}(\lambda)$ можна подати у вигляді

$$I_{obs}(\lambda) = f I_{str}(\lambda) + (1 - f) I_{amb}(\lambda), \quad (1)$$

де $I_{str}(\lambda)$ та $I_{amb}(\lambda)$ – профіль Стокса I у компоненті із сильним полем (тобто в субтелескопічних силових трубках) і у фоновому полі, відповідно. З формули (1) видно, що при $f \ll 1$ маємо $I_{obs}(\lambda) \approx I_{amb}(\lambda)$, тобто спостережений профіль – переважно профіль фонового поля. Таким чином, півширина спостереженого стоксового профілю I , $\Delta\lambda_{1/2,1}$ відображає фізичні умови саме у фоновому полі.

Для числових оцінок були розраховані профілі ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å за теорію Унно [17] при доплерівському профілі коефіцієнта поглинання і таких параметрах: $\eta_0 = 2.5$, $\Delta\lambda_D = 40$ мÅ. За вказаних параметрів теоретична півширина цих ліній близька до спостереженої в спокійних областях на Сонці.

На рис. 1 подано теоретичне відношення півширин стоксового профілю I , $\Delta\lambda_{1/2,1}$ для ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å за різних напруженостей магнітного поля, а також різних кутів γ нахилу силових ліній відносно променя зору.

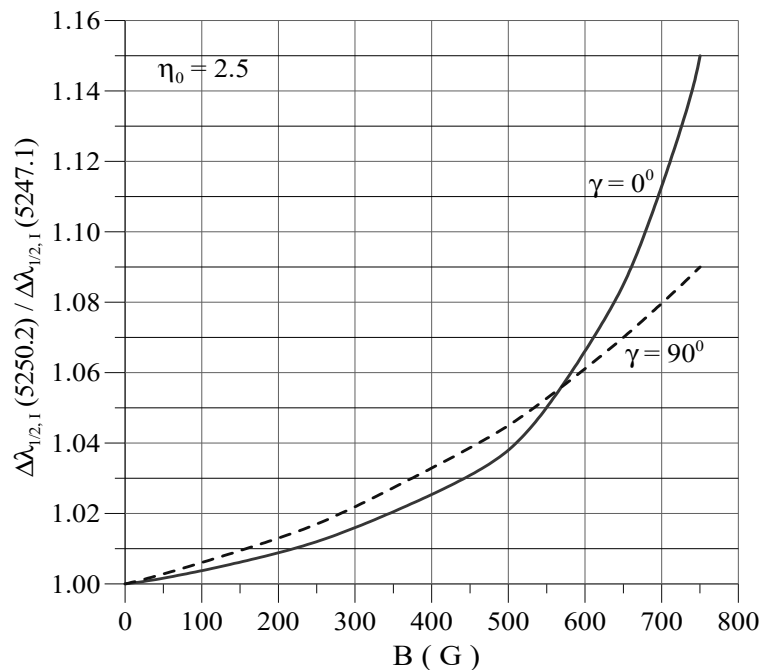


Рис. 1. Теоретичне відношення півширин стоксового профілю I для ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å за різних напруженостей магнітного поля згідно з теорією Унно [17]

З рис. 1 видно, що відношення $\Delta\lambda_{1/2,1}(5250.2) / \Delta\lambda_{1/2,1}(5247.1)$ спершу зростає майже лінійно зі збільшенням магнітного поля B , проте при полях вище 500-600 Гс є суттєвою не лише нелінійність цього збільшення, але й значна відмінність кривих для поздовжнього ($\gamma = 0^\circ$) і поперечного ($\gamma = 90^\circ$) поля: при поперечному (трансверсальному) полі подальше збільшення відношення $\Delta\lambda_{1/2,1}(5250.2) / \Delta\lambda_{1/2,1}(5247.1)$ не таке швидке, як при поздовжньому.

З рисунка видно також, що якщо точність вимірювань відношення $\Delta\lambda_{1/2,1}(5250.2) / \Delta\lambda_{1/2,1}(5247.1)$ перебуває на рівні 1%, то найслабші магнітні поля змішаної полярності, які можна зареєструвати за ефектом Зеємана в лініях Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å, близькі до 150–200 Гс. Однак це саме ті напруженості, на яких закінчується застосовність вимірювань за ефектом Ханле [16]. Таким чином, навіть за точності вимірювань 1% (а вона може бути й вищою при сучасній техніці фотоелектричної реєстрації спектрів) можна "стикувати" діапазони вимірювань полів змішаної полярності на основі ефектів Ханле і Зеємана.

Табл. 1 підсумовує порівняльні характеристики класичного методу відношення ліній [15] і методу відношення півширин стоксового профілю I .

Слід зауважити, що у випадку методу відношення ліній фактично зі спостережень визначаються локальні характеристики субтелескопічних силових трубок з точністю до деякого коефіцієнта (від 1 до 2-3), який залежить від форми бокового профілю напруженості в силових трубках [4]. Також і в методі відношення півширин стоксового профілю I фактично визначається модуль магнітного поля, усереднений по всій площі вхідної щілини інструмента. Якщо на Сонці насправді існують три компоненти поля [14], а саме: (1) маломасштабні силові трубки з регулярним полем $B_{fluxtube}$ високої напруженості, (2) ділянки фонового поля регулярної полярності B_{backgr} і (3) ділянки фонового поля

змішаної полярності V_{mixpol} , то зі спостережень за методом півширин стоксового профілю I може бути знайдена величина, середня для двох останніх компонент. Очевидно, що вона має залежати не тільки від напруженості в цих компонентах, але також від співвідношення їх факторів заповнення.

Таблиця 1

Порівняння класичного методу відношення ліній [15] і методу відношення півширин стоксового профілю I

Метод і його характеристика	Метод відношення ліній	Метод відношення півширин стоксового профілю I
Що вимірюється	Модуль магнітного поля	Модуль магнітного поля
Де вимірюється	У маломасштабних силових трубках ($f \ll 1$)	У фоновому полі ($f \approx 1$)
Нижня межа застосовності	≈ 1 кГс	$\leq 100\text{--}200$ Гс (залежить від точності вимірювань)
Міра однозначності висновків	Багато вільних параметрів, метод неоднозначний	Метод більш однозначний і слабо залежить від кута γ для $B \leq 500$ Гс

Результати та їх обговорення. Був досліджений сонячний факел у хвостовій частині активної області NOAA 1809. У день спостережень, 6 серпня 2013 р., ця область була недалеко від центра диска Сонця, $\mu = 0.95$ (μ – косинус геліоцентричного кута θ). Ешельна зєсман-спектрограма факела, яка зафіксувала спектри $I + V$ та $I - V$, була отримана на горизонтальному сонячному телескопі АО Київського національного університету [10] при експозиції 15 с, починаючи із $7^{\text{h}}53^{\text{m}}45^{\text{s}}$ UT. Спектри експонувались на фотопластинку WP3 ORWO, яка проявлялась у проявнику Д-23.

Магнітне поле в сонячному факелі AR 1809 вимірювалось двоюко: за зміщеннями центрів ваги профілів ліній Fe I 5247.1 та Fe I 5250.2 Å у спектрах $I + V$ та $I - V$, а також за співвідношенням півширин профілів I цих ліній. Першим методом було виміряне деяке ефективне регулярне поле B_{eff} , яке дорівнювало 280 Гс по лінії Fe I 5250.2 і 360 Гс по лінії Fe I 5247.1. Таке співвідношення $B_{\text{eff}}(5247.1) / B_{\text{eff}}(5250.2) \approx 1.3 > 1$, згідно з критерієм Стенфлю [15], указує на існування в дослідженому місці субтелескопічних силових трубок із кілогауссовими полями, тобто магнітне поле в цьому місці було, як мінімум, двокомпонентним (силові трубки + фон).

З рис. 1 видно, що якби дійсна величина магнітного поля у факелі була ≈ 300 Гс, то відношення $\Delta\lambda_{1/2,1}(5250.2) / \Delta\lambda_{1/2,1}(5247.1)$ було б близьким до 1.02 як при поздовжньому, так і при поперечному полі. Насправді ж, згідно зі спостереженнями, це відношення дорівнює 1.08, що не можна пояснити в рамках двокомпонентної моделі з регулярним фоновим полем (тобто полем однієї магнітної полярності). Альтернативою є припущення, що там магнітне поле було двокомпонентним і містило силові трубки з високою напруженістю (що давало $B_{\text{eff}}(5247.1) > B_{\text{eff}}(5250.2)$) і фонове поле, яке не зміщувало центри ваги профілів $I + V$ відносно $I - V$ тільки тому, що в ньому був тісний контакт протилежних магнітних полярностей. Величині $\Delta\lambda_{1/2,1}(5250.2) / \Delta\lambda_{1/2,1}(5247.1) = 1.08$ відповідає (див. рис. 1) магнітне поле у 650–700 Гс, тобто приблизно вдвічі сильніше, ніж спостережене магнітне поле B_{eff} регулярної полярності. Якщо фонове магнітне поле є суто поздовжнім ($\gamma = 0^\circ$ або 180°), то його величина має бути ± 650 Гс.

У табл. 2 для більшої наочності наведено порівняння отриманих оцінок знакозмінних фонових магнітних полів V_{mixpol} у різних об'єктах на Сонці. Як видно з таблиці, величина магнітного поля змішаної полярності загалом зростає при переході від спокійних областей до активних і є максимальною, напевне, у сонячних спалахах.

Дані табл. 2 потребують уточнення з двох причин. По-перше, вони отримані на основі вимірювань різних спектральних ефектів: Ханле – у роботі [16], Зєсмана – в інших роботах. Ураховуючи, що ефект Ханле має верхню межу застосовності в області 100–200 Гс, наведена оцінка 130 Гс має бути перевірена на основі ефекту Зєсмана. По-друге, в оцінках на основі ефекту Зєсмана припускалось, що фактор заповнення для компоненти поля V_{mixpol} близький до одиниці. Напевне, це не так, і ось чому. У роботі [9] було показано, що магнітографічні вимірювання методом відношення ліній краще узгоджуються з модельними розрахунками, якщо припустити, що між силовими трубками з кілогауссовими полями існує слабше фонове поле регулярної полярності V_{backgr} , яке тим сильніше, чим більший фактор заповнення f силових трубок. Співвідношення цих параметрів є дуже простим: $V_{\text{backgr}} / f \approx 1$ кГс. Звідси випливає логічно несуперечливий висновок: якщо силові трубки змикаються своїми стінками й маємо $f = 1$, то повинно бути $V_{\text{backgr}} \approx 1$ кГс. Цей висновок отриманий для двокомпонентної моделі, у якій обидві компоненти містили магнітне поле регулярної полярності. Тому, ураховуючи результати роботи [9], а також даного дослідження, можна дійти висновку, що магнітне поле дослідженого факела, імовірно, мало не дві, а три компоненти з напруженостями V_{fluxtube} , V_{backgr} і V_{mixpol} .

Таблиця 2

Порівняння напруженостей просторово нероздільних магнітних полів змішаної полярності в різних об'єктах на Сонці

Об'єкт на Сонці	Оцінка абсолютної величини магнітного поля змішаної полярності V_{mixpol} , Гс	Посилання
Спокійні області	130	[16]
Окремі ділянки спокійних областей	550	[3]
Сонячний факел	650–700	Представлена робота
Фотосфера поблизу сонячних плям	≤ 1000 Гс	[6]
Сонячні спалахи	900–1050	[7, 8]

У відносно недавній роботі Стенфлю [14] обґрунтовується, що в спокійних областях на Сонці існують три популяції магнітного потоку: сколапсований (у вигляді силових трубок із сильними полями), несколапсований (більш слабкі та протяжні магнітні поля) і прихований потік, який зосереджений у субтелескопічних ділянках із заплутаними магнітними полями. У якісному відношенні така картина цілком аналогічна наведеній вище для сонячного факела. Щодо теоретичних моделей, то, можливо, магнітні поля змішаної полярності B_{mixpol} відображають існування екранованих без силових структур, МГД модель яких запропонована в роботі [13]. Такі структури мають високу напруженість магнітного поля на осі симетрії та багатозарову структуру периферійних областей з поперемінним чергуванням магнітних полярностей у сусідніх концентричних шарах.

На даний час більш упевнений висновок полягає в тому, що магнітографічні вимірювання з класичним магнітографом Бєбкока [1] або ж бортовими фільтровими магнітографами типу того, що діє на SOHO [12], суттєво недооцінюють фактичну величину магнітного поля і магнітної енергії в сонячній атмосфері.

Дійсно, фактор заповнення f силових трубок у сонячній атмосфері в рамках двокомпонентної моделі (з полями B_{fluxtube} і B_{backgr}) наближено можна оцінити за формулою [2]:

$$f = B_{\text{eff}} / (B_{\text{backgr}} / f + B_{\text{fluxtube}}). \quad (2)$$

Тут B_{eff} – ефективне магнітне поле, $B_{\text{backgr}} / f \approx 1$ кГс [9], B_{fluxtube} – магнітне поле в силових трубках. Вважаючи, що $B_{\text{eff}} = 300$ Гс, $B_{\text{fluxtube}} = 1500$ Гс, згідно з (2) маємо $f = 0.12$. Слід зауважити, що формула (2) урахує внесок регулярної компоненти фонового поля, що часто ігнорується при оцінюванні фактора заповнення. У спрощеному варіанті, якщо цей внесок не враховувати ($B_{\text{backgr}} = 0$), то вираз для оцінки f є дуже простим: $f = B_{\text{eff}} / B_{\text{fluxtube}}$, тоді $f \approx 300 / 1500 = 0.2$. Крім того, легко показати, що співвідношення між B_{backgr} і B_{eff} наближено має бути таким:

$$B_{\text{backgr}} \approx (2/5)B_{\text{eff}}. \quad (3)$$

При $B_{\text{eff}} = 300$ Гс матимемо $B_{\text{backgr}} = 120$ Гс. З рис. 1 видно, що магнітне поле такої напруженості (займаючи майже всю площу вхідної апертури) дало б розширення профілю лінії Fe I 5250.2 лише на $\approx 0.5\%$ відносно лінії Fe I 5247.1, що набагато менше спостережених 8%. Альтернативою є припущення, що тоді основну частину площі вхідної апертури займає знакозмінне магнітне поле B_{mixpol} .

Згідно з роботою [9], магнітний потік силових трубок у 1.56 раза більший, ніж потік фонового регулярного поля B_{backgr} . Ураховуючи це, а також вважаючи, що знакозмінне магнітне поле займає більшу частину площі вхідної апертури інструмента, знаходимо, що магнітний потік заплутаних знакозмінних полів за абсолютною величиною перевищує потік усього регулярного поля з напруженостями B_{fluxtube} та B_{backgr} не менш ніж у 2 рази.

Висновки. У роботі наголошується, що в окремих випадках ефект Зеємана може спостерігатись і без наявності поляризації в профілі спектральної магніточутливої лінії. Наприклад, це може бути тоді, коли на вхідну щілину спектрографа проєктуються просторово нероздільні (субтелескопічні) ділянки, що мають протилежні магнітні полярності, але однакові напруженості й фактори заповнення компонент із протилежною полярністю. Тоді стоксовий профіль / цієї лінії буде дещо розширеним або й розщепленим (залежно від напруженості магнітного поля), тоді як стоксові профілі Q , U та V будуть близькі до нуля скрізь у сфері довжин хвиль спектральної лінії. Виявити магнітні поля протилежних полярностей можна, якщо зіставити спостережені півширини стоксових профілів / для ліній з різною магнітною чутливістю. Показано, що, використовуючи лінії Fe I 5247.1 і 5250.2 з високими факторами Ланде (2.0 і 3.0, відповідно), майже однаковою глибиною формування і температурною чутливістю, можна вимірювати знакозмінні заплутані поля з напруженостями вище 150-200 Гс, якщо точність вимірювання відношення півширин стоксових профілів / цих ліній – на рівні 1%. Якщо ж точність вимірювання цього відношення підвищити до 0.5%, то таким чином можна вимірювати знакозмінні магнітні поля, починаючи з 70-100 Гс. Це означає, що можна стикувати між собою діапазони реєстрації цих полів на основі ефектів Ханле і Зеємана. На основі використання запропонованого методу встановлено, що в сонячному факелі, який спостерігався 6 серпня 2013 р. у хвостовій частині активної області NOAA 1809, напруженість знакозмінних магнітних полів була ± 650 Гс, якщо вважати магнітне поле суто поздовжнім. На основі аналізу цих даних, а також результатів інших досліджень можна зробити висновок, що в дослідженому факелі, імовірно, існували магнітні поля трьох типів: кілогауссові поля B_{fluxtube} в субтелескопічних силових трубках, ділянки фонового поля B_{backgr} регулярної полярності та ділянки субтелескопічних полів B_{mixpol} змішаної полярності. Магнітний потік заплутаних знакозмінних полів за абсолютною величиною перевищував потік усього регулярного поля з напруженостями B_{fluxtube} та B_{backgr} не менш ніж у 2 рази.

Подяка. Це дослідження було профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 16БФ023-01.

Список використаних джерел

1. Babcock H. W. The solar magnetograph / H. W. Babcock // *Astrophys. J.* – 1953. – Vol. 118. – P. 387-396.
2. 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. – С. 20-23.
3. Harvey J. A line-profile Stokesmeter: preliminary results on non-sunspots fields / J. Harvey, W. Livingston, C. Slaughter // *Line formation in magnetic field.* – Boulder : NCAR. – 1972. – P. 227.
4. Lozitsky V. G. Calibration of the magnetographical measurements taken into account the spatially unresolved inhomogeneities / V. G. Lozitsky // *Physica Solariterrestris, Potsdam.* – 1980. – № 14. – P. 88-94.
5. Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of $I \pm V$ profiles / V. G. Lozitsky // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 958-967.
6. Lozitsky V. G. Small-scale structure of solar magnetic fields / V. G. Lozitsky // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1986. – Vol. 2, № 1. – P. 28-35.
7. Observations of magnetic field evolution in a solar flare / V. G. Lozitsky, E. A. Baranovsky, N. I. Lozitska, U. M. Leiko // *Solar Phys.* – 2000. – Vol. 191, № 1. – P. 171-183.
8. Lozitsky V. G. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares / V. G. Lozitsky, J. Staude // *J. Astrophys. Astron.* – 2008. – Vol. 29. – P. 387-404.
9. Lozitsky V. G. An empirical model of the small-scale magnetic element of the solar quiet region / V. G. Lozitsky, T. T. Tsap // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1989. – Vol. 5, № 1. – P. 50-58.
10. 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.

11. Rachkovsky D. N. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods / D. N. Rachkovsky, T. T. Tsap, V. G. Lozitsky // J. Astrophys. Astron. – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
12. The Solar Oscillations Investigation – Michelson Doppler Imager / P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bushet et al. // Solar Physics. – Vol. 162, Issue 1-2. – P. 129–188.
13. Solovov A. A. Force-free model of fine-structure magnetic elements / A. A. Solovov, V. G. Lozitskii // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. – 1986. – Vol. 2. – P. 80–84.
14. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun / J. O. Stenflo // Astronomy and Astrophysics. – 2011. – Vol. 529, id. A42. – 20 pp.
15. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network / J. O. Stenflo // Solar Physics. – 1973. – Vol. 32, № 1. – P. 41–63.
16. Trujillo Bueno J. A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun / J. Trujillo Bueno, N. Shchukina, A. Ramos Asensio // Nature. – 2004. – 404, 326; Astrophys. J. – 2011, 731, L21.
17. Unno W. Line formation of a normal Zeeman triplet / W. Unno // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1956. – Vol. 8. – P. 108–125.

Надійшла до редколегії 31.10.18

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

MEASUREMENTS OF SPATIALLY UNRESOLVED MAGNETIC FIELDS OF MIXED POLARITY USING OBSERVATIONS OF THE ZEEMAN EFFECT IN THE SOLAR FACULAE

It is shown that it is quite possible to measure spatially unresolved magnetic fields of mixed polarity by the Zeeman effect if their intensity exceeds 150–200 G. This means that one can interconnect the ranges of the registration of these fields based on the Hanle and Zeeman effects. This thesis is illustrated by the results of calculations of the half-width of the Stokes profile I for the Fe I 5247.1 and 5250.2 lines. Parameter I is sensitive to the presence of magnetic fields, regardless of whether they have the same magnetic polarity within the input aperture of the instrument, or the opposite one. According to the calculations, if the accuracy of the measurement of the half-width ratio of these two lines is increased to 0.5 %, then it is possible to measure the magnetic fields from 70–100 G. On the basis of the proposed method, an estimate of the intensity of the magnetic fields of mixed polarity in a solar faculae in the tail part of the active region NOAA 1809 was made, which on the day of observations, August 6, 2013, was located not far from the Sun's disc center. The Echelle Zeeman-spectrogram of this region was obtained on the Horizontal Solar Telescope of Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv. The magnetic field in the faculae was measured in two ways: by shift of the "center of gravity" of the profiles of the Fe I 5247.1 and Fe I 5250.2 Å lines in the $I + V$ / $I - V$ spectra and also by the half-width ratio of the profiles I of these lines. The first method allows to measure the effective magnetic field B_{eff} , which turned out to be 280 G by Fe I 5250.2 and 360 G by Fe I 5247.1. The corresponding ratio $B_{\text{eff}}(5247.1) / B_{\text{eff}}(5250.2) \approx 1.3$ indicates the existence of the sub-telescopic flux tubes with kilogauss fields. However, the ratio of the half-width of the Stokes I profiles of these two lines is 1.08, which corresponds to the magnetic field ± 650 G, if magnetic field is purely longitudinal. Based on the analysis of these data as well as the results of other studies, one can conclude that in the investigated faculae there were probably three magnetic field components: the fluxtubes with kG field B_{fluxtube} , the areas of background field B_{backgr} of regular magnetic polarity, and the areas of subtelescopic fields B_{mixpol} of mixed magnetic polarity. In absolute value the magnetic flux of tangled mixed-polarity field exceeds the flux of entire regular field with the intensities of B_{fluxtube} and B_{backgr} at least 2-fold.

Keywords: Sun, solar magnetic fields, solar faculae, Echelle Zeeman spectrograms, spatially unresolved magnetic fields of mixed polarity, three-component structure of magnetic fields.

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

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕРАЗДЕЛИМЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СМЕШАННОЙ ПОЛЯРНОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА В СОЛНЕЧНОМ ФАКЕЛЕ

Показано, что пространственно неразделимые магнитные поля смешанной полярности целиком реально измерить по эффекту Зеемана, если их напряженность выше 150–200 Гс. Это значит, что возможно состыковать между собой диапазоны регистрации этих полей на основе эффектов Ханле и Зеемана. Этот тезис иллюстрируется результатами расчетов полуширин стоксового профиля I для линий Fe I 5247.1 и 5250.2. Параметр I чувствителен к присутствию магнитных полей независимо от того, имеют ли они одинаковые или же противоположные полярности в границах входной апертуры инструмента. Согласно расчетам, если точность измерения отношения полуширин указанных двух линий повысить до 0.5 %, то можно будет измерить знакопеременные магнитные поля, начиная с 70–100 Гс. На основе использования предлагаемого метода оценена напряженность магнитных полей смешанной полярности в солнечном факеле в хвостовой части активной области NOAA 1809, которая в день наблюдений, 6 августа 2013 г., находилась недалеко от центра диска Солнца. Эшельная зееман-спектрограмма этого факела была получена на ГСТ АО Киевского национального университета. Магнитное поле в факеле измерялось двояко: по смещениям "центров масс" профилей линий Fe I 5247.1 и Fe I 5250.2 Å в спектрах $I + V$ и $I - V$, а также по соотношениям полуширин профилей этих линий. Первым методом было измерено эффективное поле B_{eff} , которое составляет 280 Гс по линии Fe I 5250.2 и 360 Гс по линии Fe I 5247.1. Соответствующее соотношение $B_{\text{eff}}(5247.1) / B_{\text{eff}}(5250.2) \approx 1.3$ указывает на существование в исследуемом месте субтелескопических силовых трубок с килогауссовыми полями. Однако отношения полуширин профилей Стокса указанных двух линий составляет 1.08, что соответствует магнитному полю ± 650 Гс, если считать магнитное поле строго продольным. На основе анализа этих данных, а также результатов других исследований можно прийти к выводу, что в исследуемом факеле, существовали магнитные поля трех типов: килогауссовые поля B_{fluxtube} в субтелескопических силовых трубках, участки фонового поля B_{backgr} регулярной полярности и участки субтелескопических полей B_{mixpol} смешанной полярности. Магнитный поток запутанных знакопеременных полей по абсолютной величине превышает поток всего регулярного поля с напряженностями B_{fluxtube} и B_{backgr} не менее чем в 2 раза.

Ключевые слова: Солнце, солнечные магнитные поля, солнечные факелы, эшельные зееман-спектрограммы, пространственно неразделимые магнитные поля смешанной полярности, трехкомпонентная структура магнитных полей.