

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 звездообразованием, 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 H β . 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. Спостережений 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 FeI з довжинами хвиль 6290.97, 6301.51, 6302.50 та 6498.97 Å 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 FeI 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 $I \pm V$ указує на значну відмінність спостереженого поля від однорідного. Зокрема, теоретично при однорідному не подовженому 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 мÅ 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 спостережені 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 поля.

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 зеєманівських π - 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 $f \ll 1$. 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 урахувати 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 $f \ll 1$), 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 знайдено вказівки на близькі напруженості (≈ 8 кГс), однак на підйом плазми зі швидкостями близько 2 км/с [7]. В обох указаних роботах аналізувались спектральні лінії FeI 6301.5 і FeI 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 10488 (рис. 1), яка в день спостережень, 29 жовтня 2003 р., була недалеко від центра диска (косинус її геліографічного кута був $\mu = 0.97$). Найбільша пляма цієї активної області мала діаметр півтини близько 46 Мм і магнітну полярність N, і саме вона була нами вивчена. Зєсман-спектрограма 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 УТ. Характеристики телескопа і спектрографа наведені в роботі [7].

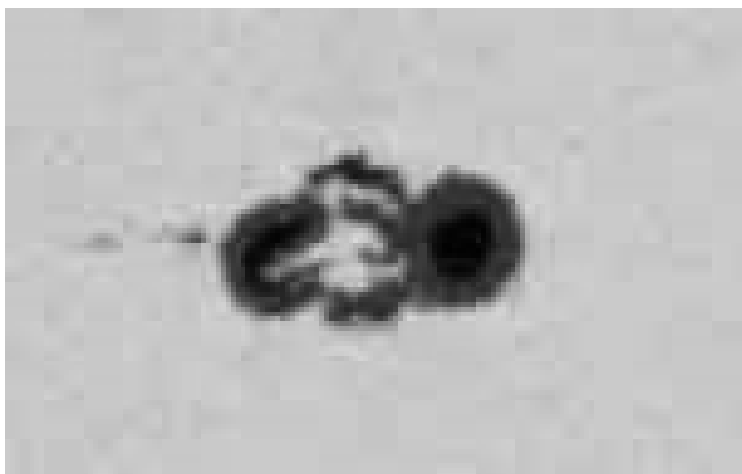


Рис. 1. Активна область NOAA 10488 згідно з даними спостережень SOHO в білому світлі. Досліджена сонячна пляма є найбільшою на цьому рисунку

Були проаналізовані профілі $I \pm V$ 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 (eV) наведені згідно з монографією [9]. Ефективні фактори Ланде g_{eff} усіх ліній відповідають лабораторним величинам згідно із [17].

Таблиця 1

Деякі параметри вибраних спектральних ліній

№ п/п	Елемент і номер мультиплету	Довжина хвилі λ (Å)	Еквівалентна ширина W (mÅ)	Потенціал збудження EP (eV)	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 $I \pm V$ 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 $I \pm V$ досить своєрідно змінюється при переході від ядра лінії в її крила (рис. 3), причому характер цих змін є різним у різних спектральних ліній.

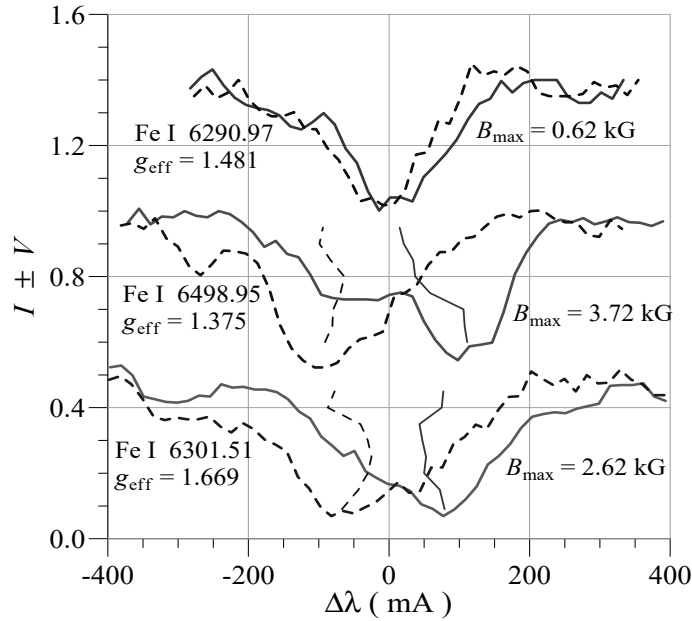


Рис. 2. Порівняння спостережених профілів $I \pm V$ трьох магніточувливих ліній у головній сонячній плямі активної області NOAA 10488. Тонкими ламаними й майже вертикальними лініями показані бісектори профілів

Якщо зафіксувати максимальне розщеплення бісекторів у кожній лінії, то воно відповідає таким напруженостям B_{\max} : 0.6 кГс для лінії Fe I 6290.968, 2.6 кГс для Fe I 6301.515 і 3.7 кГс для Fe I 6498.95 (похибки вимірювань для всіх ліній близько ± 0.1 кГс). Таким чином, остання лінія дає навіть більше виміряне магнітне поле, ніж лінія Fe I 6302.5 (3.7 кГс проти 3.4 кГс). Однак лінія Fe I 6302.5, маючи більшу магнітну чутливість (у неї $g_{\text{eff}} = 2.487$), має у спектрі повне розділення π - і σ -компонент, що дає змогу виміряти модуль напруженості магнітного поля B . У лінії Fe I 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 бути лише у випадку, коли магнітне поле змінюється з висотою, тобто є неоднорідним.

З рис. 3 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.

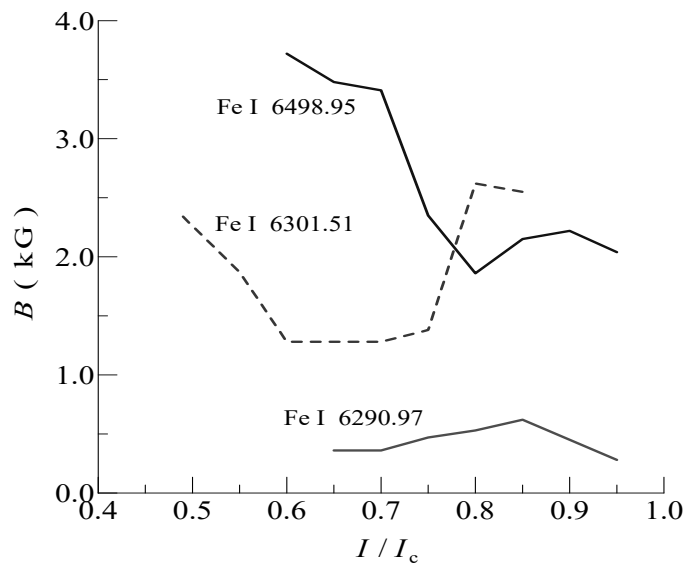


Рис. 3. Виміряне розщеплення бісекторів трьох ліній, виражене в напруженостях магнітного поля B залежно від залишкової інтенсивності I / I_c , де I – параметр Стокса I (інтегральна інтенсивність) у певному місці крила спектральної лінії, I_c – цей параметр у найближчому до лінії спектральному континуумі

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 зееманівських π - і σ -компонент бісектори профілів $I \pm V$ мали б розщеплюватись найсильніше в ядрі ліній, яким відповідають найменші значення залишкової інтенсивності I/I_c на рис. 3, де I – параметр Стокса I (інтегральна інтенсивність) у певному місці крила спектральної лінії, I_c – цей параметр у найближчому до лінії спектральному континуумі [7]. Щодо спостережених профілів, то це частково виконується лише для двох ліній, а саме FeI 6301.515 і FeI 6498.95. Однак у далеких крилах цих ліній, а також у крилах лінії FeI 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 зееманівському розщепленню $\Delta\lambda_n$ у просторово нероздільних (субтелескопічних) структурах, тобто тих, яким відповідає дуже малий фактор заповнення ($f \ll 1$). З рис. 3 випливає, що тоді $\Delta\lambda_n = 120 \div 250$ мÅ, що з урахуванням факторів g_{eff} 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 впливає з аналізу зееманівського розщеплення чотирьох ліній нейтрального заліза FeI 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 FeI 6302.5 має повне зееманівське 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 $I \pm V$ вказує 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 несповздовжнього магнітного поля бісектори мають найсильніше розщеплюватись у ядрах вказаних 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 спостережені 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. 3 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 FeI 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 північної 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 $I \pm V$ 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 University 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.
11. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network / J. O. Stenflo // *Solar Physics*. – 1973. – Vol. 32, No 1. – P. 41–63.
12. Steshenko N. V. Magnetic fields of small sunspots and pores / N. V. Steshenko // *Bull. Crimea. Astrophys. Obs.* – 1967. – Vol. 37. – P. 21–28.
13. 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.