

УДК 523.987

В. Лоцицький, д-р фіз.-мат. наук, О. Ботигіна, інж. I кат.,
В. Маслюх, канд. фіз.-мат. наук
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

ЯКОЮ Є МАКСИМАЛЬНА НАПРУЖЕНІСТЬ ЛОКАЛЬНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В АКТИВНИХ ПРОТУБЕРАНЦЯХ?

Для оцінки локальних магнітних полів у трьох активних протуберанцях, які спостерігались на ГСТ АО КНУ 4.07.1981, 24.07.1999 та 12.07.2004, проаналізовано бісектори профілів $I \pm V$ лінії $H\alpha$. Виявлено три основні форми бісекторів, які вказують на суттєву неоднорідність магнітного поля. Розрахунки в рамках двокомпонентної моделі показали, що величина локальних магнітних полів в просторово нероздільних структурах може у 4-5 разів перевищувати параметр $B_{0.9}$, який використовувався раніше для простої емпіричної оцінки нижньої межі локального поля. Найсильніші магнітні поля виявлені у протуберанці 24.07.1999, де величина $B_{0.9}$ досягала 6 кГс, тоді як локальне поле згідно з модельними розрахунками – близько 25-30 кГс. В місцях присутності таких особливо сильних полів профілі лінії $H\alpha$ у 5 разів вужчі, ніж знайдені з прямих спостережень.

Ключові слова: сонячні протуберанці, локальні магнітні поля.

Вступ. Сонячні протуберанці є корональними об'єктами, які спостерігаються на лімбі не менш часто, ніж плями – на диску Сонця. Однак величина локальних магнітних полів в них відома наразі набагато гірше, ніж у сонячних плямах. Це пов'язано з методичними особливостями вимірювань магнітного поля у плямах і протуберанцях. У плямах для вимірювань магнітного поля можна використовувати вузькі (з шириною біля 0.1 Å) спектральні лінії металів (найчастіше – FeI) з великими факторами Ланде (2.5–3.0), які при типових для плям магнітних полях (2200–2900 Гс) дають повне спектральне розділення зєсманівських π - та σ -компонент. У такому випадку, з спостережень надійно визначається модуль напруженості магнітного поля незалежно від орієнтації його силових ліній і незалежно від припущень про структуру магнітного поля.

Щодо ж протуберанців, то там вимірювати магнітне поле доводиться по широких спектральних лініях (з шириною 0.5–1 Å) і з невисокими факторами Ланде. Такі лінії навіть при кілогауссових магнітних полях мають неповне спектральне розщеплення зєсманівських компонент, виміряти по якому дійсну величину локального магнітного поля можна лише дуже наближено. Фактично, при однорідному магнітному полі таке розщеплення відображатиме як величину магнітного поля, так і нахил силових ліній до променя зору. Якщо ж поле є неоднорідним, то виміряне розщеплення залежатиме також від факторів заповнення різних компонент неоднорідності, термодинамічних умов у цих компонентах і т.д.

Результати вимірювань магнітних полів у протуберанцях, отримані різними авторами і різними методами, суттєво відрізняються між собою (див. напр. [1,3-5, 7,8]). Як правило, дані вимірювань на основі аналізу ефекту Ханле відповідають слабшим полям (типово декілька десятків гаусс), ніж на основі ефекту Зєсмана (у деяких випадках – 10^2 – 10^3 Гс). Очевидно, тут грає роль також тип протуберанця. В активних протуберанцях, часто пов'язаних з сонячними спалахами, ймовіріше існування сильніших полів, ніж у спокійних [1].

У цій роботі ставиться метою оцінити максимальну напруженість магнітного поля в активних протуберанцях, використовуючи спектрально-поляризаційні спостереження в лінії $H\alpha$.

Матеріал спостережень. Досліджувались три активні протуберанці, які виникли на лімбі Сонця 4.07.1981, 24.07.1999 та 12.07.2004 р. Спектри протуберанців сфотографовані з експозицією 1 хв. на ешеліному спектрографі горизонтального сонячного телескопу Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ) [2]. Інструмент дозволяє спостерігати одночасно область від 3800 до 6600 Å зі спектральним розділенням 30 мÅ в області лінії FeI 5250 і 50 мÅ в області лінії $H\alpha$. Моменти початку експозицій були такими: 6:49, 7:00 та 8:48 UT, відповідно. При фотографуванні спектрів використовувався аналізатор кругової поляризації (пластинка $\lambda/4$ та призма-розщеплювач з ісландського шпату).

Всі протуберанці виникли після проявів активності у пов'язаних з ними активних областях. Зокрема, протуберанець 12 липня 2004 року виник після лімбового сонячного спалаху балу M1.6, який по даних GOES мав пік рентгенівського випромінювання о 8:10 UT. Після проявлення та фіксування фотопластинок виявилось, що нормальні почорніння фотоемульсії мають лише лінії $H\alpha$ і D_3HeI , а інші лінії сильно недоекспоновані. З цих двох ліній у даній роботі аналізується лише лінія $H\alpha$; її ефективний фактор Ланде $g=1.05$. Лінії фотометровались на мікрофотометрі МФ-4; після переведення почорнінь у інтенсивності були отримані профілі $I \pm V$. Взаємна прив'язка цих профілів по довжинах хвиль здійснювалась по телуричних лініях. Неузгодженість положень телуричних ліній а також шумові ефекти на регістрограмах дозволяла оцінити похибки вимірювань; вони виявились, в середньому, на рівні ± 100 Гс.

Спостережені типи розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$. Для вказаних вище трьох протуберанців було проаналізовано близько 40 картин розщеплення лінії $H\alpha$, які стосувались висот від 3 до 20 Мм над рівнем фотосфери. Виявилось, що загалом лише у 30% профілів спостерігаються сильні ефекти розщеплення, що відповідають полям вище 1000 Гс. Причому в протуберанці 4.07.1981 не було виявлено ні одного такого місця, тоді як у протуберанці 24.07.1999 таких місць було досить багато.

Основні особливості розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$ у тих випадках, де ефекти є найсильнішими і безсумнівними (щодо рівня шумів), можна підсумувати таким чином. Не виявлено жодного випадку спектральних проявів однорідного магнітного поля, коли розщеплення бісекторів є однаковим на різних віддальх від вершини емісії в лінії. Неоднорова величина розщеплення бісекторів зустрічається у трьох формах:

а) "V-ефект" [7], коли ядро лінії розщеплюється більше, ніж крила, а взаємне розміщення бісекторів $I + V$ та $I - V$ профілів нагадує латинську літеру V. Приклад такого розщеплення наведено на рис. 1, де суцільними і штриховими лініями показані профілі $I + V$ та $I - V$, відповідно. Такими ж лініями показано тут (і на інших рисунках) бісектори відповідних профілів;

б) "колбоподібна" (чи петлеподібна) форма, при якій максимальне розщеплення досягається не в вершині емісії, а на певній віддалі від цієї вершини (Рис. 2).

в) певна комбінація випадків а) і б).

Моделювання профілів. Було виконано моделювання профілів лінії для двохкомпонентного магнітного поля, що складається з слабкої фонові компоненти і сильної маломасштабної, яка просторово не розділяється. Профілі ліній у фоновій компоненті завжди гауссові, тоді як у маломасштабній вони припускались як гауссовими (що відповідає малій оптичній товщі), так і не гауссовими, деформованими великою оптичною товщею, а також мікро- і макротурбулентними швидкостями.

Один з прикладів модельних розрахунків для скрізь гауссових профілів подано на рис. 3. У даному випадку фактор заповнення сильної компоненти 15%, ширина її профілів – 20% від ширини профілів фонові компоненти, а магнітне поле – у 500 раз сильніше, ніж у фоновій компоненті.

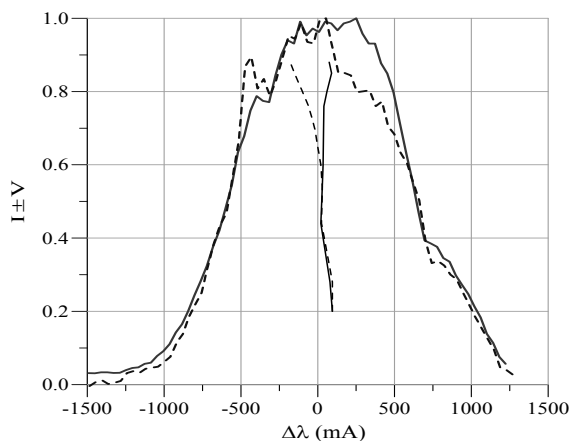


Рис. 1. Лінія $H\alpha$ в активному протуберанці 24.07.1999. Розщеплення бісекторів в вершині емісії досягає тут 256 мÅ

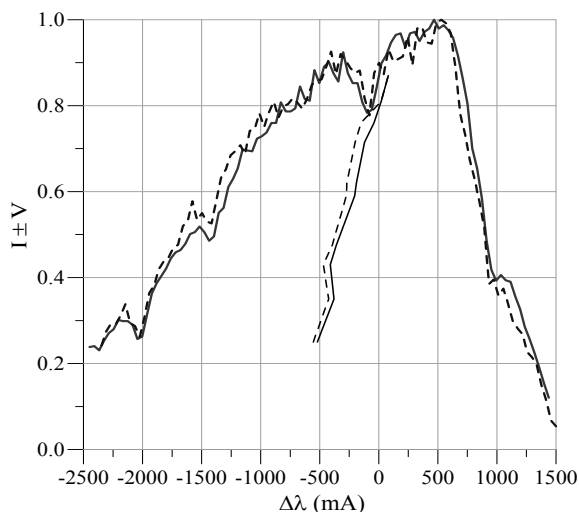


Рис. 2. Лінія $H\alpha$ у тому ж протуберанці (24.07.1999), але в іншому його місці – яке віддалено на 5 Мм в картинній площині від попереднього місця, якого стосується рис. 1.

Тут максимальне розщеплення бісекторів дорівнює 105 мÅ і досягається воно не в вершині емісії, а на рівні інтенсивності 0.75

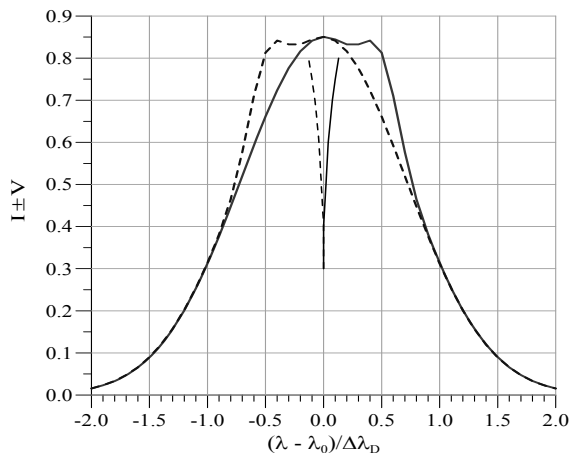


Рис. 3. Теоретичні профілі лінії типу $H\alpha$ при двохкомпонентній структурі магнітного поля: $A = 0.15$, $v_H = 0.001$, $k = 0.2$, $R = 500$

Порівнюючи профілі на рис. 1 і 3, бачимо, що при таких припущеннях досягається цілком задовільне узгодження спостережень і модельних розрахунків. На рис. 3 параметр A є фактором заповнення сильної (маломасштабної) компоненти, v_H – відношення зееманівського розщеплення $\Delta\lambda_H$ до доплерівської ширини $\Delta\lambda_D$ у "фоновій" компоненті, k – відношення доплерівських півширин у маломасштабній і фоновій компонентах і R – відношення напруженостей магнітного поля у цих компонентах. Важливо відмітити, що у випадку, зображеному на рис. 3, дійсне локальне магнітне поле у сильній компоненті у 4.8 раза перевищує магнітне поле $B_{0.9}$, виміряне по розщепленню бісекторів на рівні інтенсивності 0.9. Таким чином, параметр $B_{0.9}$ [7] може недооцінювати дійсні локальні поля в протуберанцях на фактор 4–5.

Якщо, з цієї точки зору, спробувати оцінити локальне магнітне поле у субтелескопічній компоненті по профілях, представлених на рис. 1, то маємо наступне. Параметр $B_{0.9}$ тут дорівнює 6100 Гс, а це значить, що дійсна величина локальних магнітних полів може бути у 4-5 разів вища, тобто ≈ 25 –30 кГс. Раніше подібного рівня магнітні поля припускались у сонячних спалахах на рівні верхньої фотосфери і зони температурного мінімуму (див. напр. [6]). Що ж стосується протуберанців, то такі локальні поля, як відомо авторам, припускаються тут вперше і це припущення, звичайно, потребує подальшої перевірки. До цього слід додати, що дуже сильні фотометричні ефекти, подібні до наведених на рис. 1, зафіксовані в активному протуберанці 24.07.1999 не в одному його місці, а в кількох – на протязі принаймні 3 Мм по висоті. Навіть на віддалі 5 Мм від місця з полем $B_{0.9} = 6100$ Гс маємо максимальне розщеплення бісекторів 105 мА (рис. 2), що також вказує на досить сильні поля принаймні "кілогауссового" діапазону.

Висновки. У трьох досліджених активних протуберанцях величина $B_{0.9}$ перевищувала рівень 1000 Гс в 30% випадків. Найсильніші локальні магнітні поля виявлені у протуберанці 24.07.1999, де параметр $B_{0.9}$ досягав величини 6100 Гс. Модельні розрахунки в рамках двохкомпонентної моделі магнітного поля показали, що дійсна величина максимального локального магнітного поля у цьому протуберанці могла досягати рівня 25-30 кГс. В місцях присутності таких особливо сильних полів профілі лінії $H\alpha$ у 5 разів вужчі, ніж знайдені з прямих спостережень.

Список використаних джерел

1. Ботигіна О.О., Лоцицкий В.Г. Співставлення магнітних полів в спокійних протуберанцях, виміряних по лініях D_3 $H\alpha$ // Вісник Астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1–2. – С. 159–162.
2. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лоцицкий В.Г. и др. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. – 1980. – Вып. 22. – С.48–56.
3. Шпитальная А.А., Вьяшин Г.Ф. О магнитных полях в протуберанцах // Солнечные данные. – 1970, № 4. – С. 100-107.
4. Casini R., Lopez Ariste A., Tomczyk S., Lites W.B. Magnetic maps of prominences from full Stokes analysis of the $H\alpha$ D3 line // Ap. J. Let. – 2003. – V. 598. – P.L67–L70.
5. Kuckein C., Centeno R., Martinez Pillet V., Casini R., Manso Sainz R., Shimizu T. On the magnetic field strength of active region filaments // Astronomy and Astrophysics. – 2009. – V. 501, Iss. 3. – P. 1113–1121.
6. Lozitsky V.G. Observational evidences for extremely strong magnetic fields in solar flares // International Journal of Astronomy and Astrophys. – 2011. – Vol. 1, No. 3. – P. 147–154.
7. Lozitsky V.G., Botygina O.A. Comparison of the magnetic fields in active prominences measured from $H\alpha$ D3 and H lines // Astronomy Letters. – 2012. – V. 38, No. 6. – P. 380–387.
8. Trujillo Bueno J., Merenda L., Centeno R., Collados M., Landi Degl'Innocenti E. The Hanle and Zeeman effects in solar spicules: a novel diagnostic window on chromospheric magnetism // Ap. J. Let. – 2005. – V.619. – P.L191–L194.

Надійшла до редколегії 08.07.14

В. Лоцицкий, д-р физ.-мат. наук, О. Ботыгина, инж. I кат.,
В. Маслюх, канд. физ.-мат. наук
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев

КАКОВА МАКСИМАЛЬНАЯ НАПРЯЖЕННОСТЬ ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНЫХ ПРОТУБЕРАНЦАХ?

Для оценки локальных магнитных полей в трех активных протуберанцах, которые наблюдались на ГСТ АО КНУ 4.07.1981, 24.07.1999 и 12.07.2004, проанализированы бисекторы профилей $I \pm V$ линии $H\alpha$. Обнаружены три основные формы бисекторов, указывающих на существенную неоднородность магнитного поля. Расчетами в рамках двухкомпонентной модели показано, что величина локальных магнитных полей в пространственно неразрешимых структурах может в 4-5 раз превышать параметр $B_{0.9}$, который использовался ранее для простой эмпирической оценки нижнего предела локального магнитного поля. Наиболее сильные поля обнаружены в протуберанце 24.07.1999, где величина $B_{0.9}$ достигала 6 кГс, тогда как локальное поле согласно модельным расчетам – примерно 25-30 кГс. В местах присутствия таких особо сильных полей профили линии $H\alpha$ в 5 раз уже найденных из прямых наблюдений.

Ключевые слова: солнечные протуберанцы, локальные магнитные поля.

V. Lozitsky, Dr. Phys. and Math. Sciences, O. Botygina, eng,
V. Masliukh, Ph.D.
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

WHICH IS MAXIMUM OF LOCAL MAGNETIC FIELD STRENGTH IN ACTIVE PROMINENCES?

The bisectors of $I \pm V$ Stokes profiles are analyzed for measurements of local magnetic field strengths in three active prominences of 4 July 1981, 24 July 1999 and 12 July 2004 observed on Echelle spectrograph of horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University. Three main types of bisectors were observed which indicate the essential magnetic field inhomogeneity. The calculations in frame of two-component model shown that true local magnetic field strengths in spatially unresolved structures can be 4-5 times more than parameter $B_{0.9}$ which was proposed earlier for a simple low empirical estimation of local magnetic field in prominences. The strongest magnetic fields were found in prominence of 24 July 2004 where parameter $B_{0.9}$ reaches 6 kG, and local field according to modelling – nearly 25-30 kG. In places of presence of such extremely strong fields, the $H\alpha$ line profiles are 5 times narrower than obtained from direct observations.

Key words: solar prominences, local magnetic fields.