

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ НА КОРИСТЬ ІСНУВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ З ІНДУКЦІЄЮ 10^5 Гс В АКТИВНИХ ОБЛАСТЯХ НА СОНЦІ

В. Г. Лозицький

*Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, вул. Обсерваторна, 3, Київ, 04053, Україна*
(Отримано 19 січня 2009 р.; в остаточному вигляді — 31 серпня 2009 р.)

Виявлено нові спектральні ефекти в $I \pm V$ профілях ліній, які свідчать на користь існування магнітних полів $\sim 10^5$ Гс в активних областях на Сонці. Зокрема знайдено, що лінія FeI 6094.419 з від'ємним фактором Ланде ($g_{\text{Lab}} = -0.218$) розщеплюється в спектрах сонячних плям так, наче в неї позитивний фактор Ланде. Можливі дві причини цього ефекту: а) наявність у плямі сильного магнітного поля ($\sim 10^3$ Гс) протилежної полярності, яке є дуже локальним за висотою (≈ 10 км), і б) дія часткового ефекту Пашена–Бака за наявності гігантських магнітних полів $\approx 5 \times 10^5$ Гс. Крім того, у сонячному спалаху 16.06.1989 р. виявлено, що лінія FeI 5434.527 з дуже низьким фактором Ланде ($g_{\text{Lab}} = -0.014$) має суттєві відмінності $I \pm V$ профілів не тільки в її ядрі, але й у крилах на віддалі від центру $0.13\text{--}0.18$ Å. Імовірно інструментальні ефекти менші за виявлені у спалаху в 3–5 разів, тому можна припустити, що цей ефект укажує на локальні магнітні поля величиною $0.7\text{--}0.9$ МГс.

Ключові слова: сонячні плями, спалахи, субмегагауссові магнітні поля.

PACS number(s): 96.60.Nv, 96.60.Q–, 96.60.Qe

I. ВСТУП

Верхня межа індукцій магнітного поля в сонячній атмосфері на сьогодні невідома. Висловлювалися припущення, що вона може відповідати полям у $50\text{--}100$ кГс [1–4], тобто приблизно на порядок–півтора сильнішим, ніж добре відомі магнітні поля в сонячних плямах. Так, акад. А. Б. Северний писав [1]: “Таким чином, цілком можливо, що магнітне поле в плямах має тонку структуру, усереднення якої при спостереженнях приводить до полів $\sim 10^3$ гаусс, тоді як фактичне поле в окремих елементах плями (можливо, різної полярності й нахилу) становить десятки тисяч гаусс; тобто становище може бути таким же, як і у випадку грануляції, де усереднення окремих полів (~ 100 гаусс) гранул у приладі приводить до полів порядку кількох гаусс. Якщо це припущення підтвердиться (в результаті подальших досліджень) і поля в плямах досягають величин ~ 50000 гаусс, будучи зосередженими в невеликих трубках, то проблема прискорення часток може знайти своє більш чи менш просте розв’язання.”

У роботі [2] зазначено, що значна протяжність крил лінії $\text{H}\alpha$ у спалахах (до 8 Å) може бути зумовлена зееманівським розширенням лінії полями величиною $10\text{--}100$ кГс. Однак певний внесок у розширення лінії повинні робити й немагнітні ефекти, а саме, температура, турбулентні швидкості та електричні струми у плазмі. У цілому, отже, можливі чотири механізми розширення лінії $\text{H}\alpha$, і лише один з них — вплив гіпотетичних дуже сильних магнітних полів. Надійно розділити ці ефекти практично неможливо за профілями інтегральної інтенсивності (параметр Стокса I) — для цього необхідні також профілі поляризації, тобто параметр Стокса Q, U, V . Хоч і в останньому випадку

питання може залишатися відкритим при дуже заплутаній структурі поля: адже сильне магнітне поле змішаної полярності може давати значне розширення профілів I , однак нульову поляризацію за профілем лінії.

Безпосередніші дані про магнітні поля того ж діапазону (до $50\text{--}80$ кГс) у спалахах отримані на основі вивчення $I \pm V$ профілів ліній FeI [3,4]. Однак і тут виникають суттєві методичні проблеми, що видно з такого.

1. Дуже сильним магнітним полям мають відповідати у спектрі дуже великі зееманівські розщеплення $\Delta\lambda_{\text{H}}$, при яких зееманівські σ -компоненти можуть попадати в область сусідніх інтенсивних ліній-бленд, де виявити їх у край важко. Справді, з відомої формули

$$\Delta\lambda_{\text{H}} = 4.67 \times 10^{-13} g^2 B \quad (1)$$

(тут $\Delta\lambda_{\text{H}}$ та λ в Å, а B — в Гс) впливає, що якщо взяти лінію FeI 5250.2 Å ($g = 3.0$), то при $B = 50000$ Гс маємо $\Delta\lambda_{\text{H}} = 1.93$ Å. Це приблизно у 20 разів більше за власну ширину цієї лінії в сонячному спектрі й у 4 рази — за віддалю до найближчої інтенсивної бленди FeI 5250.65. Навіть для лінії з дуже низьким фактором Ланде $g = 0.5$ маємо тоді $\Delta\lambda_{\text{H}} = 0.32$ Å, що відповідає настільки далекому від лінії (типу FeI 5250.2 Å) континууму, що тут спостерігач скоріше може очікувати яку-небудь бленду, а не спектральні прояви тієї ж лінії. Очевидно, лише гранично слабчутливі до магнітного розщеплення лінії, що мають фактори Ланде ще меншої величини (наприклад, 0.1 чи 0.01), даватимуть змогу

спостерігати їх σ -компоненти саме там, де є ядро чи крила відповідної лінії. Це означає, що для більш упевненої діагностики особливо сильних полів ліпше використовувати майже нечутливі до магнітного розщеплення лінії. Якщо таких полів немає, вказані лінії не повинні давати помітних спектральних ефектів. Якщо ж дуже сильні магнітні поля існують, у профілях слабочутливих ліній повинні виникати несподівано сильні ефекти розщеплення й поляризації, що відповідають ефекту Зеємана.

- Можна очікувати, що особливо сильним магнітним полям повинні відповідати дуже слабкі й малопомітні спектральні особливості. Справді, припускаючи найпростіший випадок нескрученої силової трубки, маємо

$$p + B^2/(8\pi) = p_{\text{ex}}, \quad (2)$$

де p і p_{ex} — газовий тиск усередині й зовні трубки, B — індукція магнітного поля в трубці (тиском магнітного поля за межами трубки нехтуємо). Очевидно, що при фіксованому p_{ex} величина тиску в трубці p буде тим меншою, чим сильніше магнітне поле всередині трубки. Тобто, оскільки $p = nkT$, меншою може бути не тільки температура T , але й концентрація часток n , а значить, і оптична товща τ . Тому можна очікувати, що магнітні трубки з найсильнішими полями є й найбільш розрідженими, тобто “невидимими” спектрально. Інакше кажучи, все те у спектрі, що при неухважному розгляді має вигляд слабких інструментальних флюктуацій, насправді може маскувати ледь помітні прояви, “надсильних” полів.

- Дисперсія значень магнітного поля (тобто неоднакова його величина по перерізу силових трубок) також може маскувати особливо сильні поля, тому що вона створює зеєманівські розщеплення різної величини й тим самим розмиває сумарні (спостережені) зеєманівські компоненти. Це зменшує контраст цих компонент, а отже, і їх помітність у спектрі. Ефект такого розмивання найзначніший для ліній із найбільшими факторами Ланде. Тому для діагностики особливо сильних полів тим більше є корисними лінії з дуже невеликими факторами Ланде.
- Спостереження показують, що профілі спектральних ліній у місцях із дуже сильними полями істотно звужені, що вказує на практично повне пригнічення там турбулентних рухів і суттєве охолодження плазми — можливо, на цілий порядок [5]. Особливо вузькі прояви можуть зовні нагадувати шумові “викиди”, також приховуючи наявність таких полів. Наприклад, для досить широких ліній типу FeI 5233, які мають півширину $\Delta\lambda_{1/2} \approx 300 \text{ м\AA}$ у спокійних областях, дійсна півширина відповідних особливостей

(в області сонячних спалахів) не перевищує 10–20 м\AA, що в 15–30 разів (!) менше за звичайну ширину цієї лінії.

- Діагностика особливо сильних полів може ускладнюватись або полегшуватись залежно від локальних термодинамічних умов і фази процесу. Напевно, у сонячних спалахах відповідні силові трубки є помітнішими завдяки відносному збільшенню в них газового тиску й емісійному обертанню картини ефекту Зеємана. Тому доцільно шукати найконтрастніші прояви існування особливо сильних полів саме в сонячних спалахах.

Метою цієї роботи є короткий виклад нових спостережних даних, які вказують на те, що екстремально сильні магнітні поля $\sim 10^5 \text{ Гс}$ можуть існувати як у сонячних спалахах, так і за їхніми межами.

II. СОНЯЧНІ ПЛЯМИ

У 2005 р. автор виявив загадкове розщеплення в сонячних плямах лінії FeI 6094.419, яка належить до мультиплету заліза №1177. Ця лінія має теоретичний фактор Ланде $g_{\text{LS}} = -0.25$, який близький до її лабораторного значення $g_{\text{Lab}} = -0.218$ [6]. Знак мінус означає, що при цій полярності магнітного поля вона має такий же знак поляризації σ -компонент, як за протилежної полярності магнітного поля. Тобто, при використанні аналізатора кругової поляризації, який пропускає тільки одну σ -компоненту (наприклад, правокругову), в цій лінії має спостерігатись ортогональна компонента (наприклад, лівокругова). Проте в спектрах двох великих сонячних плям, які спостерігали на ГСТ АО КНУ 25 березня 1991р. та 22 липня 2004 р., виявлено, що ця лінія розщеплюється так, наче в неї позитивний фактор Ланде. Пізніше аналогічний ефект було знайдено ще в кількох плямах [7].

Згадані вище спектральні прояви проілюстровано фрагментом зеєман-спектрограми на рис. 1. Спектрограма отримана з аналізатором кругової поляризації, який складається з чвертьхвильової пластинки та мозаїки Скоморовського [8]. На рисунку крайня лінія справа — це лінія FeI-1177 6094.419 з від’ємним (як сказано вище) фактором Ланде, а сусідня з нею лінія зліва — лінія того ж мультиплету FeI-1177 6093.66, яка має позитивний фактор Ланде $g_{\text{Lab}} = 0.33$. Видно, що в одній і тій же смужці мозаїки обидві лінії мають розщеплення одного знака, тобто відхиляються від середнього положення в один бік (це підтверджує також фотометрія спектрограм).

Узагалі кажучи, подібний випадок можливий, якщо полярність магнітного поля у плямах на рівнях формування цих ліній різна. У принципі, можлива й чисто інструментальна причина: наприклад, випадкові зміщення положень спектральних ліній унаслідок турбуленції в спектрографі.

Однак встановлено, що на досліджених спектрограмах зображення багатьох сотень телуричних ліній O_2 та H_2O не мають подібних особливостей. Усі без винятку телуричні лінії виглядають тонкими й рівними ниточками без будь-якої хвилястості при переході від однієї смужки мозаїки до іншої. Це значить, що дуже малоймовірно, щоб турбуленція у спектрографі була причиною вказаного вище ефекту в лінії FeI 6094.419.

Інша ймовірна, вже сонячна, причина — зміна магнітної полярності при переході від рівня формування лінії FeI-1177 6094.419 до лінії FeI-1177 6093.66. Але

проблема тут у тім, що ці лінії мають практично однакову висоту формування: згідно з роботою [9], у незбуреній фотосфері їхні висоти формування відрізняються всього на 10–20 км. Ще менше вони відрізняються в сонячних плямах — усього на кілька кілометрів [10]. Оскільки ефективна товща формування кожної лінії близько 50 км, фактично їхні висоти залягання щільно перекриваються. Тому дуже сумнівно, щоб ці лінії фіксували різну спостережену полярність магнітного поля, навіть якщо вона в плямі справді різко змінюється за висотою (що фізично важко уявити).

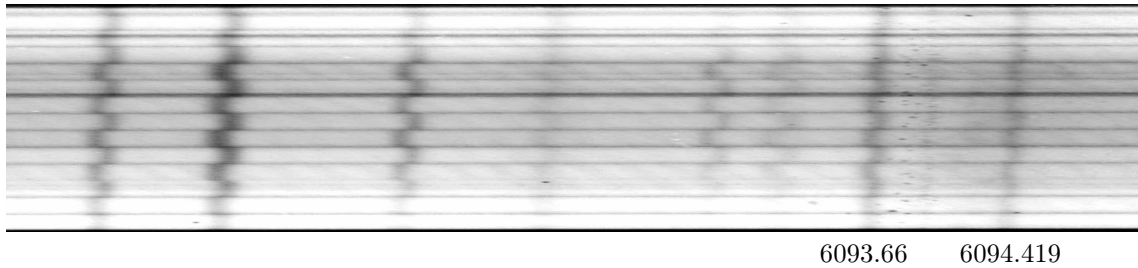


Рис. 1. Фрагмент зееман-спектрограми великої плями 25 березня 1991 р. в області довжин хвиль 6089–6095 А (див. текст).

Наступна можлива причина — частковий ефект Пашена–Бака (pPBe), який для більшості ліній FeI настає при дуже сильних магнітних полях [11]. Лінія FeI-1177 6094.419 відповідає переходу $^3F_2^5P_1$, її фактори Ланде для нижнього й верхнього термів дорівнюють (для LS зв'язку) $g_1 = 0.667$ та $g_2 = 2.500$. Звідси за формулою Ланді Дель'Іннотенті [12]

$$g_{\text{eff}} = \frac{g_1 + g_2}{2} + \frac{g_1 - g_2}{4} \{J_1(J_1 + 1) - J_2(J_2 + 1)\}, \quad (3)$$

де g_1 та g_2 — фактори Ланде, а J_1 і J_2 — відповідні квантові числа, маємо ефективний фактор Ланде $g_{\text{eff}} = -0.25$.

Якщо припустити, що нижній терм лінії FeI-1177 6094.419 обтяжений впливом ефекту Пашена–Бака, то тоді для нього повинно бути не $g_1 = 0.667$, а $g_1 \approx 1.0$, позаяк у цьому випадку має бути поступовий перехід від аномального розщеплення до класичного зееманівського триплету. Цей перехід має двоякі прояви: а) поступове зникнення картини аномального зееманівського розщеплення й утворення простої триплетної картини (внаслідок об'єднання зееманівських підрівнів) і б) наближення фактора Ланде до одиниці, це впливає з того, що тоді об'єднані зееманівські підрівні повинні мати нормальне лоренцове розщеплення [11]. Якщо у формулу (3) підставити $g_1 = 1.0$ і $g_2 = 2.500$, то отримуємо $g_{\text{eff}} = +0.25$ (а не -0.25). Якщо ж маємо частковий ефект Пашена–Бака, то тоді може бути, залежно від міри заглиблення в цей ефект, величина g_1 в межах від 0.67 до 1.0, тоді як g_{eff} — в межах від -0.25 до $+0.25$. Саме в останньому випадку можна очікувати картину розщеплення, яка якісно буде подібною до зображеної на рис. 1.

Оцінити для лінії FeI-1177 6094.419 порогове значення магнітного поля B_p , що приводить до часткового

ефекту Пашена–Бака, можна в такому припущенні: зееманівське розщеплення в лінії приблизно дорівнює різниці енергій між термами мультиплетної структури атома. Тоді [11]

$$B_p \approx |E_i - E_k| / m_J g \mu_B, \quad (4)$$

де m_J — магнітне квантове число, g — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора, B — індукція магнітного поля, $|E_i - E_k|$ — різниця енергій в атомі між термами мультиплетної структури. Приймаючи, на основі таблиць мультиплетів Мур [13], що $|E_i - E_k| \approx 0.01$ еВ, а також ураховуючи, що $\mu_B = 0.58 \times 10^{-8}$ еВ/Гс, маємо для лінії FeI-1177 6094.419 гігантське значення $B_p \approx 5 \times 10^5$ Гс. Зауважимо, що для деяких інших спектральних ліній величина B_p значно менша, але це визначається, в основному, різницею $|E_i - E_k|$. Наприклад, для $D_3\text{HeI}$ ефект Пашена–Бака починається з полів $\sim 10^1$ Гс, але це пов'язано з тим, що там різниця енергій $|E_i - E_k| \approx 10^{-7}$ еВ [14].

Чи значить це, що на Сонці в плямах (навіть поза спалахами) існують поля в сотні тисяч гаусс? Припущення здається фантастичним, хоча альтернативне припущення (про різку зміну полярності поля за висотою) також дуже сумнівне. Розгляньмо тому інші спостережні дані, які базуються на більш надійних значеннях фактора Ланде.

III. СОНЯЧНІ СПАЛАХИ

Передусім відзначимо, що для надійної ідентифікації відповідних спектральних проявів є дуже важливим детальне порівняння магніточутливих та “немагнітних” ліній, тобто ліній, які мають нульові факто-

ри Ланде. У першому випадку профілі ліній змінюються під впливом двох ефектів — як Зеємана, так і Допплера, а в другому — лише Допплера. У сонячному спектрі є дуже обмежена кількість неблендованих ліній металів, які мають (у наближенні LS зв'язку) нульові фактори Ланде. Це, зокрема, лінії FeI $^5F_1^5F_1$ $\lambda = 5123.723 \text{ \AA}$, FeI $^5F_1^5D_0$ $\lambda = 5434.527 \text{ \AA}$ та FeI $^5F_1^5D_0$ $\lambda = 5576.097 \text{ \AA}$, які належать мультиплетам №16, 15 та 686 відповідно [13]. Однак виявилось, що хоча теоретично в них $g_{LS} = 0.000$, згідно з лабораторними вимірюваннями, їх g_{Lab} не точно нульові й дорівнюють -0.013 , -0.014 та -0.012 відповідно [6, 12]. Це значить, що ці лінії, строго кажучи, не є чисто “доплерівськими”, тобто такими, які не розщеплюються в будь-якому за величиною магнітному полі.

Тут важливий такий методичний момент: при можливих надсильних полях $\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ Гс}$ ці лінії мають саме ті фактори Ланде, які визначені в лабораторних умовах, оскільки там в експерименті використовувались магнітні поля саме цього діапазону. Якщо ж при вимірюваннях сонячних полів використовувати лінії з факторами Ланде $g_{LS} = 2\text{--}3$, то для них уже може наступати ефект Пашена-Бака, а з ним — і суттєва невизначеність щодо ефективних факторів Ланде.

Нижче аналізуємо нові спостережні дані, які стосуються лінії FeI 5434.527 у двох сонячних спалахах різної потужності. Перший спалах, 16 червня 1989 р. балу 2В, мав координати 17°S та 04°E , максимум у $5^{\text{h}}30^{\text{m}}$ УТ. Цей спалах досліджували (іншими методами) в низці робіт [3, 4, 15]. У них виявлено кілька цікавих ефектів, зокрема, а) підсилення величини магнітного поля в момент максимуму спалаху; б) немонотонний розподіл магнітного поля з висотою (з локальним максимумом в області верхньої фотосфери — температурного мінімуму), а також в) вказівки на магнітні поля величиною $20\text{--}80 \text{ кГс}$. Зроблено висновок, що такі дуже сильні поля виникають на порівняно нетривалий час ($10\text{--}15 \text{ хв}$) у максимальній фазі потужних спалахів, притому в місцях із багатокомпонентною структурою магнітного поля, яка включає як поля кілогауссового діапазону ($\approx 10^3 \text{ Гс}$), так поля $\sim 10^4 \text{ Гс}$.

Другий спалах, 5 листопада 2004 р., мав бал M4.1/1В і максимум в $11^{\text{h}}35^{\text{m}}$ УТ. Він виник в активній області NOAA 10696. Також і в цьому спалаху виявлено висотний пік магнітного поля, який поступово згладжувався й повністю зник за $\approx 10 \text{ хв}$ у післямаксимальній фазі спалаху [16]. Одночасно з дисипацією магнітного поля відзначено суттєве зростання турбулентних швидкостей на тій же висоті в атмосфері.

При додатковому дослідженні цього матеріалу основну увагу звертали на бісектори профілів $I \pm V$. Бісектором профілю, як відомо, називається серединна його лінія, проведена так, щоб кожна її точка була рівновіддалена (у напрямі, паралельному осі абсцис) як від “фіолетового”, так і “червоного” крила лінії. Форма бісектора несе важливу інформацію про умови формування ліній та про магнітне поле. Зокрема, бісектори профілів $I+V$ і $I-V$ при однорідному по-

лі мають бути взаємно паралельними, якщо магнітне розщеплення $\Delta\lambda_H$ набагато менше за півширину $\Delta\lambda_{1/2}$ спектральної лінії. Для лінії FeI 5434.527 з її мізерно малим фактором Ланде ($g_{Lab} = -0.014$) можна очікувати, що бісектори завжди будуть нерозщепленими (або ж відповідні ефекти будуть чисто “шумовими”).

Саме такий випадок і був зареєстрований для слабого спалаху 5 листопада 2004 р. (рис. 2). Тут профілі $I+V$ та $I-V$ в цілому добре узгоджуються між собою, а розщеплення бісекторів не перевищує 3 м\AA (у межах віддалей від центру $|\Delta\lambda| \leq 200 \text{ м\AA}$).

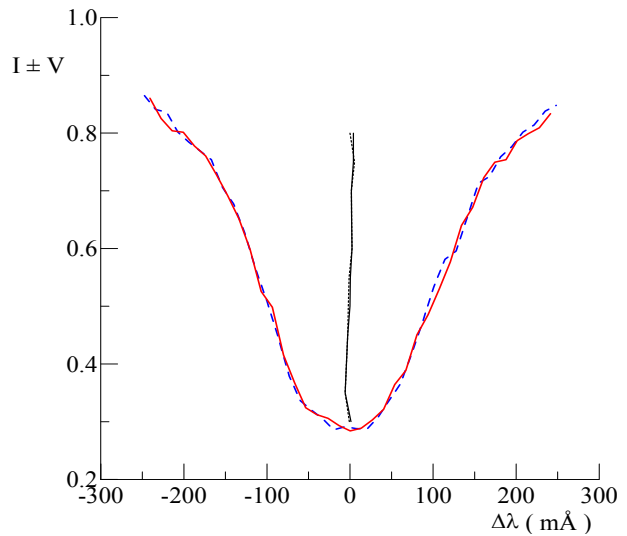


Рис. 2. Профілі $I \pm V$ та бісектори лінії FeI 5434.527 у спалаху 4.11.2004 р.

Для потужнішого спалаху 16.06.1989 маємо іншу картину: тут бісектори в цілому не паралельні, причому їх розщеплення найбільше поблизу ядра лінії (рис. 3). Крім того, в ядрі лінії добре видно емісійні “горби”, які не тільки розщеплені, але й мають характерну асиметрію, що змінюється на протилежну при переході до поляризації іншого знака. Усе це вказує на комбінований ефект Зеємана, який проявляється як в емісії, так і абсорбції. За розщепленням емісійних “горбів” у ядрі лінії можна оцінити магнітне поле в гарячому обсязі спалаху; виявилось, що $B = 78 \pm 5 \text{ кГс}$.

Ще суттєвіші відмінності $I+V$ та $I-V$ профілів знайдено в цьому ж спалаху, але в іншому його місці, яке було за 4 Мм від попереднього місця (рис. 4). Тут видно цікавий ефект у ядрі лінії: в одній із поляризацій (суцільна лінія) видно один емісійний “горб”, а в протилежній (штрихи) — два, причому вони розташовані симетрично щодо центру одиночного “горба” в іншій поляризації. Раніше в роботі [4] вже звертали увагу на подібні особливості в ядрі лінії FeI 5434.527. Було зазначено, що існують їх три типи:

- а) перший тип (NE) характерний відносним зміщенням уздовж дисперсії емісійних „горбів” у ядрі лінії при оптимально суміщених фраунгоферових крилах ліній; це саме той випадок, який подано на рис. 3;

- б) другий тип (*CE*) особливий тим, що в одному зі спектрів, наприклад $I+V$, спостерігаємо двовершинну емісію, тоді як у протилежному спектрі, наприклад, $I-V$, — одновіршинну; очевидно, що поданий на рис. 4 випадок відповідає саме цьому типу;
- в) третій тип (*A*) іноді спостерігаємо в абсорбційних (фраунгоферових) профілях, і він характеризується відносним зсувом щодо крил тих ділянок профілів, які безпосередньо прилягають до ядра лінії ($\Delta\lambda \leq 100 \text{ m\AA}$); очевидно, в цьому випадку бісектори профілів $I \pm V$ матимуть у ядрі лінії найбільше розщеплення і практично нульове — у крилах.

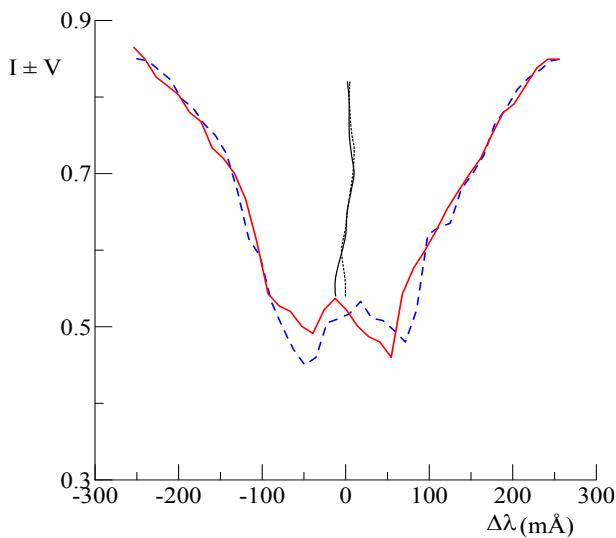


Рис. 3. Профілі $I \pm V$ та бісектори лінії FeI 5434.527 у спалаху 16 червня 1989 р.

Однак із рис. 4 впливає існування ще одного, четвертого, типу відмінностей профілів $I \pm V$, при якому спостерігаємо суттєве розщеплення бісекторів не тільки в ядрі лінії, але й на значніших віддальях від її центру; в цьому випадку на віддальях до $\approx 200 \text{ m\AA}$.

Щоб з'ясувати, чи не є цей ефект чисто інструментальним, зумовленим, наприклад, зернистістю фотоемульсії на спектрограмі, було вивчено розщеплення бісекторів у лінії FeI 5434.527 за межами плям та спалахів, а також у телуричній лінії молекулярної води H_2O 5919.644 Å, сфотографованій при дуже великій повітряній масі. Для цього профотометровано спектрограму за 21.04.1993 р., отриману на ГСТ АО КНУ (у межах програми екологічного моніторингу земної атмосфери методами сонячної спектроскопії) при повітряній масі $M = 21.2$. При такій повітряній масі ця телурична лінія дуже підсилюється, її еквівалентна ширина зростає з 41 m\AA до $\approx 210 \text{ m\AA}$ (у FeI 5434.527 вона дорівнює 184 m\AA в спокійній фотосфері), а крила стають досить інтенсивними і схожими на крила лінії FeI 5434.527. Можна сподіватися, що вивчення поведінки бісекторів у такій телуричній лінії (яка вже точно “немагнітна”!) дає змогу коректно оцінити можливі

немагнітні ефекти в FeI 5434.527.

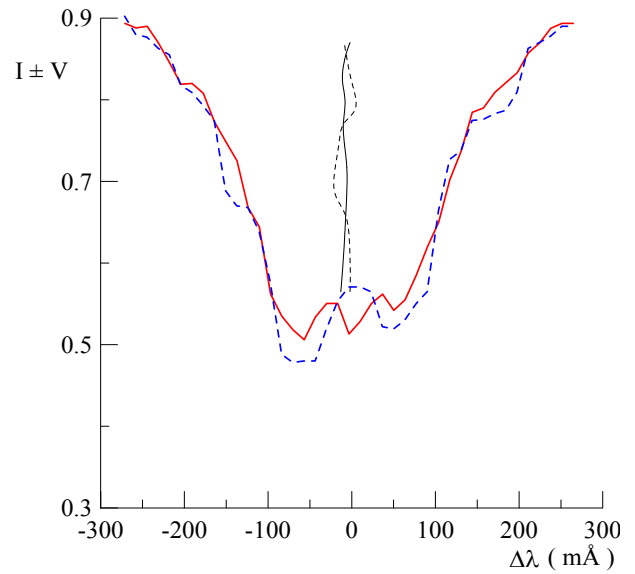


Рис. 4. Профілі $I \pm V$ та бісектори лінії FeI 5434.527 також у спалаху 16 червня 1989 р., але в іншому його місці — яке було в картинній площині за 4 Мм від того місця, для якого на рис. 3 наведено аналогічні дані.

Виявилось, що реальна величина похибки вимірювань розщеплення бісекторів не перевищує $2\text{--}3 \text{ m\AA}$, якщо аналізувати досить круті ділянки крил лінії FeI 5434.527, точніше, розташовані не далі ніж за $\pm 0.2 \text{ \AA}$ від центру лінії. Це ілюструє рис. 5, на якому з'явлено виміряні розщеплення бісекторів для таких випадків: 1a — емісійні “горби” лінії FeI 5434.527 у спалаху 16.06.1989 р. (які видно на рис. 3), 1b — фраунгоферові ділянки крил лінії в тому ж спалаху (також подані на рис. 3), 2 — бісектори, що відповідають іншому місцю цього ж спалаху (рис. 4), 3 — ділянка активної області за межами інтенсивної емісії спалаху 16.06.1989 р., 4 — виміряні ефекти в телуричній лінії H_2O 5919.644 Å.

Із рис. 5 видно, що максимальна величина деформацій четвертого типу перевищує вірогідний інструментальний рівень принаймні в $3\text{--}5$ раз, так що є всі підстави вважати ці деформації реальними. Також важливо відзначити, що це є саме *магнітні деформації*. Ефект Доплера або ж температурні зміни профілів не дають поляризації випромінювання, тому, наприклад, при деякому складному полі швидкостей або ж при температурній неоднорідності (по площі вхідної апертури) розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$ було б скрізь нульовим.

На користь реальності ефекту свідчить і те, що хоча криві 1 та 2 стосуються різних місць спалаху (відмінних за положенням на 4 Мм), загальні особливості ходу залежностей $\Delta\lambda_B = f(\Delta\lambda)$ все-таки зберігаються. Так, обидві криві різко йдуть вгору зі зменшенням $\Delta\lambda$ для значень $\Delta\lambda < 110 \text{ m\AA}$, в інтервалі $\Delta\lambda = 110 \div 140 \text{ m\AA}$ вони відповідають мінімальним значенням $\Delta\lambda_B$, а в інтервалі $\Delta\lambda = 140 \div 200 \text{ m\AA}$ — максимальним.

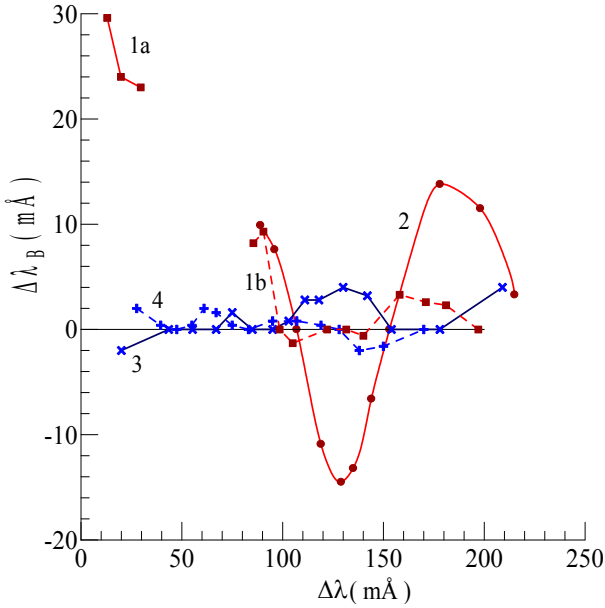


Рис. 5. Розщеплення бісекторів $\Delta\lambda_B$ спостережених профілів залежно від віддалі $\Delta\lambda$ від центру лінії: 1a та 1b — лінія FeI 5434.527 у спалаху 16.06.1989 р. (див. текст), 2 — ця ж лінія в іншому місці цього ж спалаху, 3 — активна область за межами спалаху, 4 — телурична лінія 5919.644 Å.

Також і інструментальна поляризація, вірогідно, не могла зумовити такі сильні ефекти в розщепленні бісекторів. Теоретично, ця поляризація при чисто поздовжньому полі не змінює центру ваги зеєманівських σ -компонент і не впливає на форму відповідних бісекторів [17]. Якщо ж магнітне поле близьке до поперечного, то певну частину лінійної поляризації (параметри Стокса Q , U) можна трансформувати у кругову поляризацію (параметр Стокса V); до того при неповному розділенні зеєманівських π - і σ -компонент сумарний спостережений профіль лінії матиме різну глибину у спектрах $I+V$ та $I-V$. Це так званий *LCT* ефект (linear-to-circular transformation). Однак центри ваги профілів лінії у спектрах $I+V$ та $I-V$ при цьому не змінюються, що дає змогу, як відомо, правильно вимірювати магнітне поле магнітографічним методом, але при центральному положенні лінії на вихідних щілинах магнітографа [17]. Зрозуміло, що якщо й у цьому випадку не змінюється положення “центрів ваги” об’єднаних профілів π - і σ -компонент, то не має змінюватись і розщеплення бісекторів спостережених профілів. Крім того, інструментальна поляризація давала б внесок зі спектральною шириною, близькою до ширини самої лінії (≈ 0.2 Å). Насправді ж, як видно з рис. 3–5, флукутації в розщепленні бісекторів є дрібнішими — вони мають характерний масштаб ≈ 50 mÅ.

Оскільки, отже, ефект розщеплення бісекторів у лінії FeI 5434.527 є магнітним за своєю природою, можна припустити таке. Можливо, екстремуми на рис. 5 відображають багатокомпонентну структуру магнітного поля в картинній площині. Кожна компонента має свої профілі інтенсивності й поляризації, які при

спостереженнях сумуються. Якщо в першому наближенні там є відносно слабке фонове поле і значно сильніше поле маломасштабних елементів, то тоді на накладатись дуже слабкі, сильно розщеплені й поляризовані профілі, що відповідають ділянкам із сильним полем. Ті місця в крилах лінії, куди накладаються зеєманівські σ -компоненти із сильним полем, повинні давати найбільшу відмінність інтенсивностей у профілях $I+V$ та $I-V$, а отже, й найбільше розщеплення бісекторів. Якщо віддаль $\Delta\lambda_{\text{extr}}$ цих ділянок від центру лінії значно більша за спектральну ширину $\Delta\lambda_{1/2}$ екстремумів на залежності $\Delta\lambda_B = f(\Delta\lambda)$, то можна вважати, що ми маємо *повне розділення* зеєманівських σ -компонент. Тоді для оцінки магнітного розщеплення $\Delta\lambda_H$ у маломасштабній компоненті достатньо припустити, що

$$\Delta\lambda_H = \Delta\lambda_{\text{extr}}. \quad (5)$$

Із рис 5 видно, що характерна ширина екстремумів $\Delta\lambda_{1/2} \approx 50$ mÅ, тоді як віддаль цих екстремумів від центру лінії дорівнює $\Delta\lambda_{\text{extr}} = 130\text{--}180$ mÅ, тобто справді виконується умова $\Delta\lambda_{\text{extr}} \gg \Delta\lambda_{1/2}$.

Оскільки для FeI 5434.527 співвідношення між величиною магнітного поля і зеєманівським розщепленням $\Delta\lambda_H$ є таким:

$$B = 5.18 \times 10^6 \Delta\lambda_H, \quad (6)$$

(де B — в Гс, а $\Delta\lambda_H$ — в Å), то при $\Delta\lambda_H = 0.13$ Å (це перший глибокий екстремум для кривої 2 на рис. 5) маємо $B = 6.7 \times 10^5$ Гс, а при $\Delta\lambda_H = 0.18$ Å (це другий позитивний екстремум для цієї ж кривої) — $B = 9.3 \times 10^5$ Гс. Тобто порядок величини магнітного поля виявляється таким же, як по лінії FeI 6094.419 у спектрі плям у припущенні впливу на неї часткового ефекту Пашена–Бака. Це вже, по суті, субмегагауссові поля.

Слід зауважити також, що в межах запропонованої інтерпретації магнітні компоненти з полями $\approx 6.7 \times 10^5$ та $\approx 9.3 \times 10^5$ Гс повинні мати *різну магнітну полярність*. Це впливає з того, що знак розщеплення бісекторів для цих компонент є різним (рис. 4 та 5). Відзначимо, що сильні різнополярні магнітні поля були виявлені раніше і в інших спалахах [18, 19].

IV. ВИСНОВКИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Наведені вище спостережні дані свідчать, що в сонячних спалахах і плямах можливе існування магнітних полів з індукцією 500–900 кГс (0.5–0.9 МГс). Зокрема при вивченні $I \pm V$ профілів лінії FeI 6094.419 з від’ємним фактором Ланде ($g_{\text{Lab}} = -0.218$) знайдено, що вона розщеплюється в спектрах сонячних плям так, ніби в неї позитивний фактор Ланде. Можна вказати дві ймовірні причини цього ефекту: а) наявність у плямі сильного магнітного поля ($\sim 10^3$ Гс)

протилежної полярності, яке є дуже локальним за висотою (≈ 10 км), і б) дія часткового ефекту Пашена–Бака (pPBe) за наявності гігантських магнітних полів $\approx 5 \times 10^5$ Гс. Крім того, у сонячному спалаху 16.06.1989 р. виявлено ще один (четвертий) тип магнітних деформацій лінії FeI 5434.527 з дуже низьким фактором Ланде ($g_{\text{Lab}} = -0.014$), який полягає в тому, що суттєві відмінності $I \pm V$ профілів цієї лінії простягаються аж до віддалей від центру ≈ 0.2 Å. Оскільки інструментальні ефекти менші за виявлений у 3–5 разів, можна припустити, що і цей ефект указує на локальні магнітні поля того ж порядку.

Таким дуже сильним магнітним полям мають відповідати дуже великі зееманівські розщеплення, тому слід оцінити вірогідність іншого прозаїчнішого ефекту: вплив сусідніх інтенсивних ліній-бленд. При цьому передусім слід мати на увазі сильні й відносно близькі у спектрі лінії того ж мультиплету FeI №15, а саме, лінії з довжинами хвиль 5429.699 та 5446.920 Å та факторами Ланде 1.375 та 1.25. Ці лінії в дослідженому спалаху мали інтенсивні й розщеплені емісійні піки в їхніх ядрах, які вказували на магнітні поля величиною 2–3 кГс. Якщо у спалаху існували й сильніші поля і вони давали настільки сильно розщеплені σ -компоненти, що ті попадали аж на лінію FeI 5434.527, то для них зееманівське розщеплення повинно бути близьким до різниць відповідних довжин хвиль цих ліній, тобто бути в межах 5–12 Å. Легко знайти, що тоді відповідне поле $B \approx 3 \times 10^5$ Гс для лінії 5429.699 і $\approx 7 \times 10^5$ Гс для лінії 5446.920. Тобто і в цьому припущенні порядок магнітного поля залишається тим же.

Правда, у спектрі є і ближчі лінії, зокрема лінія NiI-70 5435.871 Å з фактором Ланде 0.5. Однак вона (а також інші близькі лінії) мають у 3–5 раз менші еквівалентні ширини, ніж лінія FeI 5434.527. Ці лінії у спалаху мали чисто фраунгоферові профілі, без емісійних піків. Тому мало ймовірно, щоб вони давали суттєві фотометричні ефекти у сфері лінії FeI 5434.527. Стосовно ж лінії NiI 5435.871 Å, то вона, в принципі, може “закинути” свої σ -компоненти в крила лінії FeI 5434.527 лише полем в $\sim 2 \times 10^5$ Гс.

До того ж сусідні лінії “закидали” б у досліджувану лінію лише особливості *одного знака поляризації* (тільки одну зееманівську σ -компоненту), тоді як детальний розгляд картин розщеплення бісекторів лінії FeI 5434.527 переконує в тому, що *найсильніші ефекти виникають саме з парних (стосовно центру лінії) особливостей* у профілях $I \pm V$. Там же, де ці особливості здаються сильнішими в одному крилі лінії й майже непомітними — в іншому, не можна виключити дії вже згаданого *LCT* ефекту. При цьому

дещо підсилюється інтенсивність і ядра, і крил лінії в одній з поляризацій. Тоді певна ділянка “червоного” або “синього” крила лінії зміщується вздовж шкали інтенсивностей і може “ховати” характерну відмінність (локальну різницю) в профілях $I+V$ та $I-V$.

Нарешті, зееманівські σ -компоненти від сусідніх ліній були б чітко видні у сфері лінії FeI 5434.527 лише тоді, коли б вони відповідали ділянкам абсолютно однакового поля — однорідного, з нульовою дисперсією напруженостей. Фізично це важко уявити; спостереження показують, що в маломасштабних структурах все-таки має бути певний непрямокутний профіль бокового розподілу поля [20]. Крім того, області з особливо сильним полем у спалахах є дуже локальними за висотою [15, 16]. Можливо, вони виникають в МГД-структурах типу магнітного вихора [21], а в цих (кулястої форми) утвореннях магнітне поле має дуже великі вертикальні градієнти. При усередненні таких полів у межах товщини функції внеску спектральної лінії (≈ 100 км) неминуче виникатимуть спектральні прояви дисперсності (неоднаковості) величини поля. Тоді зееманівські σ -компоненти були б широкими, розмитими, що не узгоджується з спостереженнями. Саме тому ймовірніше, що виявлені спектральні ефекти справді належать лінії FeI 5434.527 і вказують на магнітні поля $\sim 10^5$ Гс.

Наприкінці спробуймо відповісти на таке питання (яке запропонував автору рецензент): а чому переважна більшість інших фахівців не підтримує ідею надсильних магнітних полів? Тут слід уточнити: досі не було ні спростувань, ні досі підтверджень результатів автора. Відповідь така: тому, що інші фахівці не аналізували ешельні спектри деяких особливо потужних спалахів (включаючи бал *X*) і не вивчали в них $I \pm V$ профілі FeI 5434.527 та інших ліній тими методами, які використовував автор. Чому не вивчали — питання неясне. Можливо тому, що в кожного дослідника — свої матеріальні засоби, методи й ідеї, які він вважає цілком достатніми у своїй науковій діяльності. Відносно ж нових ідей і результатів, то більшість у науці — консерватори і скептики, які не поспішають підтвердити чийсь висновок, якщо він не вкладається в наявну парадигму і не виходить від достатньо авторитетної особи. Адже це загрожує втратою якщо не репутації, то, принаймні, дорожнього часу досліджень. Саме тому, напевно, часто буває так, що над новою науковою проблемою б’ються лише одиниці, а решта — тільки спостерігають, як вони це роблять. . .

Автор щиро вдячний рецензенту за низку слухних і доброзичливих зауважень.

- [1] А. Б. Северный, Астрон. журн. **34**, 684 (1957).
 [2] С. Е. R. Bruce, Observatory **86**, №951, 82 (1966).
 [3] В. Г. Лозицкий, Кинем. физ. небес. тел **9**, 23 (1993).
 [4] В. Г. Лозицкий, Кинем. физ. небес. тел **14**, 401 (1998).
 [5] В. Г. Лозицкий, Н. Й. Лозицька, М. Ю. Гордовський,

- Вісн. Київ. ун-ту, сер. астрон. **35**, 17 (1999).
 [6] Е. Н. Земанек, А. П. Стефанов, Вест. Киев. ун-та, сер. астрон. **18**, 20 (1976).
 [7] V. G. Lozitsky, J. Staude, M. Yu. Gordovskyy, *Всероссийская ежегодн. конф. по физике Солнца, Тезисы*

- докл. (ГАО РАН, Санкт-Петербург, Пулково, 2009), с. 85.
- [8] В. И. Скоморовский, *В сб.: Исслед. по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца*, **26** (Наука, Москва, 1974) с. 220.
- [9] Э. А. Гуртовенко, Р. И. Костык, *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов* (Наук. думка, Киев, 1989).
- [10] В. Г. Лозицкий, В. А. Шеминова, *Всероссийская ежегодн. конф. по физике Солнца, Тезисы докл.* (ГАО РАН, Санкт-Петербург, Пулково, 2009).
- [11] И. Е. Фриш, *Оптические спектры атомов* (Физматгиз, Москва, 1963).
- [12] E. Landi Degl'Innocenti, *Sol. Phys.* **77**, 285 (1982).
- [13] С. Е. Moore, *A Multiplet Table of Astrophysical Interest. Revised Edition. Part I – Table of Multiplets: Contributions from the Princeton University Observatory, vol. 20* (Princeton, New Jersey, 1945), p. 96.
- [14] V. Bommier, *Astron. Astrophys.* **87**, №1–2, 109 (1980).
- [15] V. G. Lozitsky, E. A. Baranovsky, N. I. Lozitska, U. M. Leiko, *Sol. Phys.* **191**, 171 (2000).
- [16] Е. Н. Курочка, В. Г. Лозицкий, О. Б. Осыка, *Кинем. физ. небес. тел* **24**, 308 (2008).
- [17] А. Б. Северный, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **56**, 142 (1977).
- [18] В. Г. Лозицкий, В. В. Лозицкий, Ю. А. Чеснок, *Кинем. физ. небес. тел* **18**, 149 (2002).
- [19] В. Г. Лозицкий, *Письма астроном. журн.* **35**, №2, 154 (2009).
- [20] В. Г. Лозицкий, доктор. дисерт., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ (2003).
- [21] А. А. Соловьев, *Астроном. журн.* **75**, 783 (1998).

OBSERVATIONAL EVIDENCES TO THE 10^5 G MAGNETIC FIELDS IN ACTIVE REGIONS ON THE SUN

V. G. Lozitsky

Astronomical Observatory of the Kyiv Taras Shevchenko National University,

Observatorna St., 3, Kyiv, 04053, Ukraine

e-mail: lozitsky@observ.univ.kiev.ua

New spectral effects in $I \pm V$ line profiles were found indicating the presence of $\sim 10^5$ G magnetic fields in active regions on the Sun. In particular, it was revealed that the FeI 6094.419 line with the negative Lande factor ($g_{\text{Lab}} = -0.218$) displays in sunspots the positive Zeeman splitting, i.e. as in the case of positive Lande factor. Two possible reasons for this effect are following: a) presence in sunspot of a strong ($\sim 10^3$ G) magnetic field of opposite polarity but very local in vertical direction (≈ 10 km), and b) influence of the partial Paschen–Back effect (pPBe) due to superstrong magnetic field of about $\approx 5 \times 10^5$ G. Similar conclusion follows from observations of FeI 5434.527 line with very low Lande factor ($g_{\text{Lab}} = -0.014$). In solar flare of June 16, 1989, this line has reliable differences between $I+V$ and $I-V$ profiles not only at its core, but also at middle line wings on distances of 0.13–0.18 Å from line center. Because probable instrumental effects are about 3–5 times less than observed ones, we can suppose the presence of local magnetic field of 0.7–0.9 MG.