

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.065>

УДК 523.942

І. І. Яковкін, М. А. Громов, В. Г. Лозицький

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
вул. Обсерваторна, 3, м. Київ, Україна, 04053
e-mail: lozitsky_v@ukr.net

Спектральні прояви сильних і особливо сильних магнітних полів у активному протуберанці 24 липня 1999 року

Наведено результати дослідження магнітного поля в активному протуберанці 24 липня 1999 року на момент 07:00 UT за матеріалом спостережень, отриманим на ешелюму спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Наш аналіз базується на вивченні профілів $I \pm V$ лінії H , які стосувались висот в атмосфері в діапазоні 11...20 Мм. Встановлено, що бісектори профілів $I \pm V$ не паралельні між собою у більшості місць цього протуберанця. Це свідчить про неоднорідність магнітного поля, бо у випадку однорідного магнітного поля названі бісектори мали бути паралельними. При цьому максимальне розщеплення бісекторів спостерігається не тільки в ядрі лінії (що було відмічено раніше іншими дослідженнями), але і в її далеких крилах, на відстанях 0.15...0.25 нм від центра лінії. Зазначений максимум розщеплення відповідає магнітному полю близько 3000 Гс, але це значення слід розглядати лише як нижню оцінку справжніх локальних магнітних полів. Зокрема, другий максимум розщеплення бісекторів може свідчити про те, що фактичне значення зєсманівського розщеплення у дрібномасштабних структурах з малим коефіцієнтом заповнення досягає зазначеного вище значення 0.15...0.25 нм, що відповідає напруженості поля приблизно 100 кГс. З нашого дослідження випливає, що поява таких над-

звичайно сильних магнітних полів може бути не рідкісним, а досить поширеним явищем, проте їх можна зафіксувати лише за певних сприятливих умов спостережень.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, протуберанці, магнітні поля, спектрополяриметрія, надсильні поля.

ВСТУП

Сонячні спалахи та активні протуберанці є найбільш швидкозмінними проявами сонячної активності. Активні протуберанці можна вважати кінцевою стадією лімбових сонячних спалахів, і тому фактична межа між ними може бути дещо умовною, тобто є випадки, коли активний протуберанець можна назвати лімбовим спалахом.

Магнітні поля в сонячних спалахах і активних протуберанцях вивчені значно менше, ніж у сонячних плямах, через ряд обставин.

1. Сонячні спалахи та активні протуберанці виникають раптово і живуть відносно короткий час (від кількох хвилин до кількох годин), і тому не завжди можна отримати репрезентативний матеріал спостережень щодо них. Сонячні плями набагато зручніші для спостережень, вони живуть досить довго — від кількох днів до кількох тижнів [19].

2. У сонячних плямах можна виміряти модуль напруженості магнітного поля B на основі спостережень вузьких спектральних ліній (~ 10 пм) з великими факторами Ланде ($g = 2.5 \dots 3$). У сонячних спалахах і протуберанцях доводиться аналізувати спектральні прояви ефекту Зеемана у широких спектральних лініях (50...100 пм), що мають менший фактор Ланде (близько 1.0). У такому випадку вимірюється не модуль напруженості магнітного поля, а скоріше його поздовжня складова B_{Los} [22].

Оцінки величини магнітного поля у сонячних спалахах і активних протуберанцях, отримані різними дослідниками і різними методами, лежать у дуже широкому діапазоні — від 10^2 до 10^5 Гс [1, 2, 4—9, 11—13, 15, 16, 18, 23—27]. Тобто, в деяких випадках виміряне магнітне поле в сонячних спалахах навіть перевищує магнітне поле у сонячних плямах, де воно лежить в діапазоні 2...8 кГс [3, 14, 17]. Особливо цікаво те, що дуже сильні магнітні поля у спалахах реєструються на рівнях хромосфери і навіть нижньої корони, тобто там, де теоретично можна очікувати (при нескручених силових трубках) напруженості на рівні всього у кілька десятків гаусс. Очевидно, є певні специфічні механізми підтримки значно посиленних магнітних полів у дуже розрідженій атмосфері з низьким газовим і динамічним тиском. Можливо, ці механізми пов'язані з певними топологічними особливостями відповідних структур, які можуть бути безсилового типу. Вирішення цієї проблеми вимагає не лише подальших теоретичних досліджень, а й ретельного аналізу нових даних спостережень.

Завдання цієї роботи — перевірити висновок про те, що в активному протуберанці 24 липня 1999 р. не було особливо сильних магнітних полів. Такий висновок був зроблений у нещодавно опублікованій роботі [25] для цього протуберанця на момент 6:49 UT. Однак спектр цього протуберанця був зафіксований також через 11 хв, о 7:00 UT. Ми досліджуємо цей останній спектр, використовуючи ту ж саму техніку та ту ж спектральну лінію H . Відповідні результати коротко представлено у нашій статті.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Спостережний матеріал для цього дослідження отримано за допомогою горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ). Телескоп оснащено ешельним спектрографом, фотогідом і спектрогеліоскопом. Деякі інші особливості цього телескопа наведено у роботі [14].

Основна цінність спостережень за допомогою ешельного спектрографа полягає в тому, що на ньому реєструється одночасно широкий діапазон спектру, від 380 до 660 нм, де можна спостерігати багато тисяч спектральних ліній. Крім того, під час таких спостережень спектри $I + V$ і $I - V$ можна отримати одночасно на окремих суміжних смугах спектрограм. Це реалізується завдяки тому, що аналізатор кругової поляризації складається з фазової пластинки $\lambda/4$ перед вхідною щілиною спектрографа і призми-розщеплювача (аналога призми Волластона) — позаду вхідної щілини. Тому спектри $I + V$ і $I - V$ стосуються одного і того ж моменту часу і тих самих місць на Сонці.

Для того порядку дифракції, де розташована лінія H ($m = 32$), спектральна роздільна здатність становить $FWHM = 5$ пм. Просторова роздільна здатність наших спостережень — близько 1.5...2 Мм. Спосіб реєстрації спектрів — фотографічний, на платівки WP3 ORWO великого розміру — 18 24 або 24 24 см. Відношення сигнал/шум для таких фотоемульсій становить приблизно 100 при умові нормальної експозиції. Завдяки таким великим платівкам можна одночасно реєструвати спектр практично всієї видимої області з досить високою дисперсією 40...80 пм/мм. Якщо ж використовувати для цього типові ПЗЗ-матриці, то можна було б одночасно зареєструвати лише невелику частину (~ 1 %) того спектру, який фіксується фотопластинках. Спектр протуберанця був зафіксований з експозицією 60 с.

ОБРОБКА ДАНИХ

Для отримання кількісних характеристик інтенсивностей у спектрі спектрограми сканувались за допомогою сканера Epson Perfection V

550, який дозволяє отримати двовимірні скани зображень, записаних на прозорі плівки або фотопластинки. Щоб перевести почорніння у інтенсивності, необхідно враховувати як характеристичну криву фотоматеріалу, так і криву самого сканера. Обидві криві є нелінійними і вимагають попереднього визначення спеціальними методами. Для цього використовувалася ступінчастий послаблювач (атенуатор), для якого точно відомі коефіцієнти пропускання. При перерахунку фотометричних почорнінь в інтенсивності розсіяне світло у спектрографі враховувалося шляхом віднімання інтенсивностей, що відповідають проміжкам між зображеннями різних порядків спектру ешельного спектрографа.

У процесі попередньої обробки спостережних даних записи спектрів $I + V$ і $I - V$ в інтенсивностях були взаємно «прив'язані» по довжинах хвиль за допомогою вузьких телуричних ліній; точність такої «прив'язки» становить $0.1 \dots 0.2$ пм. Це забезпечує точність вимірювання магнітного поля по лінії H на рівні 100 Гс.

Для оптимізації прискореної обробки даних І. Яковкін розробив зручну комп'ютерну програму Profile_manipulator_v0.4, яка дозволяє швидко обробляти великі масиви даних спостережень. Зокрема, програма дозволяє згладжувати дані спостережень з довільною шириною інтервалу згладжування, усереднювати дані по багатьох фотометричних ділянках, виправляти інструментальний нахил спектру на реєстрограмах, знаходити не тільки параметри I і V , але й dI/d , і оцінювати похибки вимірювань відповідних величин.

Сканування дозволило отримати локальні значення інтенсивностей з кроком 0.4 пм. Таку дуже тонку спектральну дискретизацію було використано для того, щоб надійно усунути найвужчі артефакти, пов'язані з дрібними частинками пилу на спектрограмі. Оскільки найвужчі артефакти значно вужчі, ніж значення $FWHM$ інструментального профілю, то вони найкраще виявляються та усуваються саме при тонкій дискретизації. Якби ми використовували спектральну дискретизацію з кроком 5 пм, то деякі артефакти могли б залишитися непоміченими, і це внесло б значні спотворення у дані спостережень.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД ЛІНІЇ H У СПЕКТРІ

Зображення лінії H в спектрі на момент 7:00 UT показано на рис. 1 разом з її зображенням для 6:49 UT згідно з нашою роботою [25]. Довжина хвилі у спектрі збільшується зліва направо, а висота в атмосфері — знизу вгору. Кожна пара зображень є одночасно отриманими спектрами $I + V$ і $I - V$ одного і того самого місця на Сонці. Загальна висота кожного спектру на рисунку відповідає 30 Мм.

З порівняння цих зображень видно, що у перший момент часу емісія в лінії була ширшою і не розшаровувалась по висоті. Навпаки, у другий момент випромінювання було набагато вужчим і стратифіко-

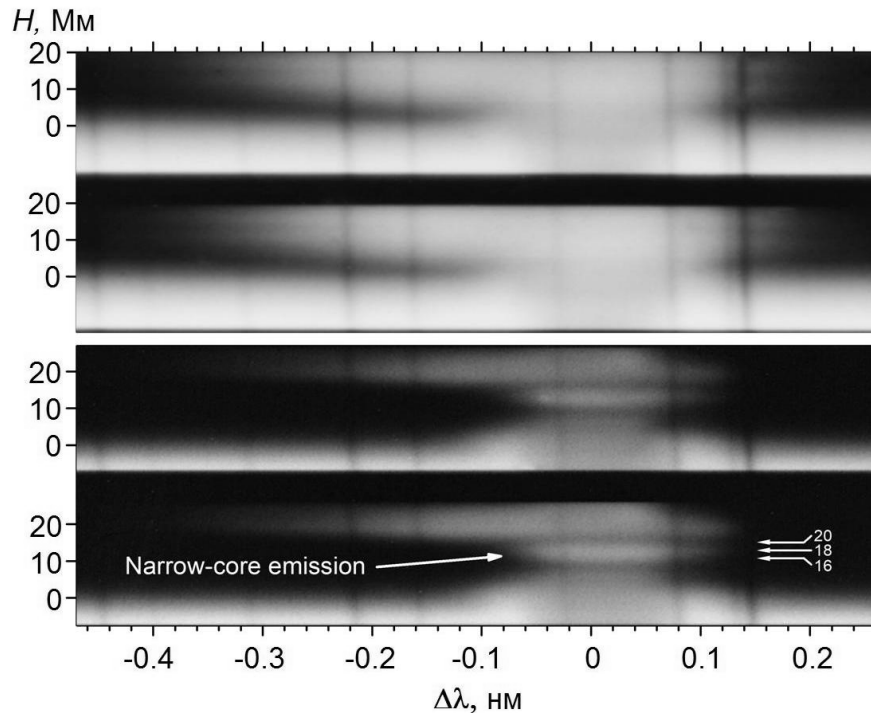


Рис. 1. Загальний вигляд лінії H у спектрі активного протуберанця 7 липня 1999 р. для двох моментів: 6:49 UT (два верхні зображення) і 7:00 UT (два нижні зображення). Числами 16, 18 показано місця фотометричних розрізів, що відповідають вузькому та яскравому ядру випромінювання (висоти над рівнем фотосфери 11 і 13 Мм відповідно), числом 20 — розріз, що відповідає висоті близько 15 Мм над рівнем фотосфери

ваним, зокрема воно мало яскраве і компактне ядро з відносно вузькими профілями. Це компактне ядро мало невелике «червоне» зміщення у спектрі величиною близько 20 пм, що відповідає променевій швидкості 9 км/с. З рис. 1 також видно, що над компактним емісійним ядром спостерігалось набагато ширша емісія, яка мала «блакитну» асиметрію та загалом блакитний зсув по довжинах хвиль. Що стосується висот в атмосфері, то компактне ядро відповідало діапазону висот 11...13 Мм, тоді як широке асиметричне випромінювання почалося на висоті близько 15 Мм.

Таким чином, в цілому лінія H в обидва моменти часу має помітно збурений вигляд зі значним її розширенням у порівнянні з фраунгоферовими профілями, для яких ширина цієї лінії є близькою до 0.1 нм. Становить інтерес таке питання: у якому місці протуберанця — у компактному ядрі з вузькими профілями чи у місцях широкої емісії — можуть бути більш суттєвими ознаки неоднорідності магнітного поля? Відповідь на це запитання було отримано під час детального вивчення профілів.

СПОСТЕРЕЖЕНІ ПРОФІЛІ $I \pm V$ ТА ЇХНІ БІСЕКТОРИ

Для пошуку тонких спектральних ефектів були знайдені згладжені значення інтенсивностей шляхом усереднення даних за 100 кроків, тобто 40 пм, що приблизно учетверо менше від спостережуваної ширини емісії в лінії Н навіть в компактному емісійному ядрі протуберанця. Ефект такого згладжування представлено на рис. 2а, де порівнюються профілі лінії до і після згладжування. На рис. 2а незгладжені профілі штучно зсунуто по осі ординат вгору на +0.3 відносно згладжених для можливості їхнього порівняння. Для згладжених профілів показано також відповідні бісектори.

З рис. 2а видно, що вказане згладжування суттєво прояснює локальні відмінності між профілями $I + V$ і $I - V$. Якби всі локальні вимірювання були статистично незалежними, то об'єднання даних по 100 точках у спектрі збільшило б співвідношення сигнал/шум приблизно в 10 разів. Насправді ж, оскільки ширина інструментального профілю спектрографа становить 5 пм, що відповідає приблизно 12 точкам на реєстрограмі, лише ті значення інтенсивності, які перевищують $FWHM$ інструментального профілю приладу, можна вважати статистично незалежними. При цьому реальне відношення сигнал/шум збільшується лише у 2.8 раза.

За результатами сканування профілі лінії Н в області компактного ядра виявилися досить симетричними, а їхня півширина тут становила 0.12...0.13 нм (рис. 2а і 2б). Також встановлено, що бісектори профілів $I \pm V$ мають достовірне розщеплення, яке збільшується при переході до вершин профілів. Подібний ефект був виявлений раніше в інших роботах, наприклад [4, 15, 16]. Для калібрування цього розщеплення у величинах напруженості магнітного поля було використано формулу [25]

$$\lambda_n = 2.01 \cdot 10^{-6} B$$

де λ_n виражено у нанометрах, а B — у гауссах.

З порівняння профілів на рис. 2а і 2б видно, що розщеплення бісекторів спостерігається в обох випадках, причому величина цього розщеплення більша в ядрі лінії, ніж у крилах, і досягає 5.04 і 12.33 пм для висот 11 і 13 Мм відповідно. Якщо припустити, що магнітне поле є чисто поздовжнім, то тоді зеєманівське розщеплення λ_n має бути удвічі меншим, тобто 2.52 і 6.164 пм відповідно. Підставляючи ці значення у формулу (1), отримуємо напруженості 1250 і 3070 Гс при похибках вимірювань ± 100 Гс. Якщо ж припустити, що магнітне поле не є чисто поздовжнім, тобто має ненульове відхилення силових ліній від променя зору, то тоді величина магнітного поля має бути ще більшою.

З отриманих даних можна зробити висновок, що магнітне поле у дослідженому протуберанці було суттєво неоднорідним, і його величина збільшуватись з висотою: в інтервалі висот 2 Мм напруженість магнітного поля різко збільшилось на 1820 Гс. Отже, висотний

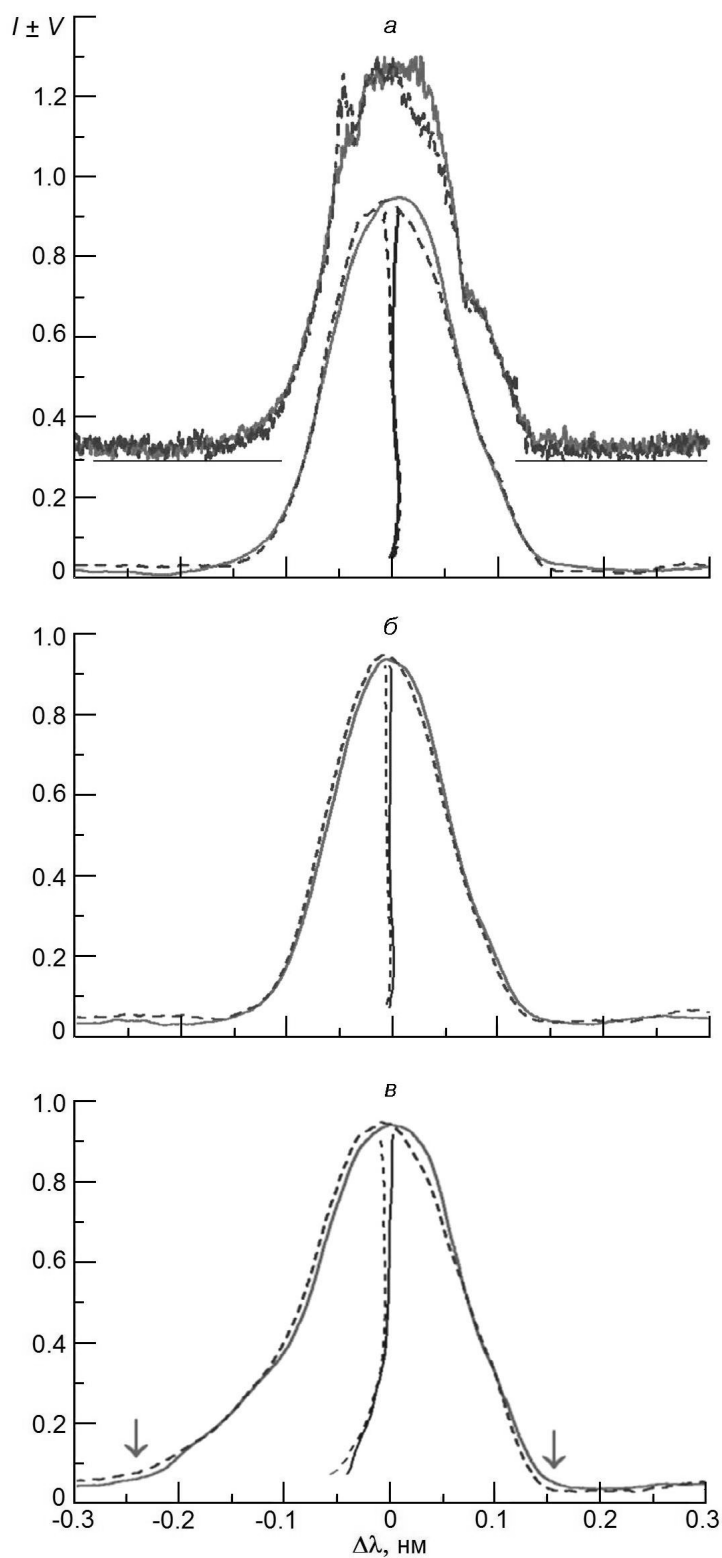


Рис. 2. Згладжені профілі $I \pm V$ лінії H у трьох фотометричних розрізах (див. рис. 1): *a* — у розрізі № 18 (для порівняння приведено також незгладжені профілі, зміщені на 0.3 вгору), *б* — у розрізі № 16, *в* — у розрізі № 20 (стрілки показують місця, де зафіксовано протилежний знак кругової поляризації)

градієнт магнітного поля дорівнював 0.9 Гс/км, тобто був типовим для місць сонячних спалахів.

Проте наведені оцінки відображають лише поздовжню складову магнітного поля у припущенні коефіцієнта заповнення, близького до одиниці. У роботі Лозицького та ін. [16] показано, що подібну непаралельність бісекторів з найбільшим розщепленням біля вершини емісії можна пояснити в рамках двокомпонентної моделі магнітного поля з дуже сильними локальними магнітними полями у маломасштабних (просторово нероздільних) компонентах. У деяких випадках необхідно припустити негауссову форму профілів ліній, яка може відображати значну оптичну товщину субтелескопічних емісійних елементів протуберанця. Згідно з розрахунками для цього випадку прямі вимірювання максимального спостережуваного розщеплення на рівні інтенсивності 0.9 (параметр $B_{0.9}$) занижують реальні локальні магнітні поля у протуберанці у 3...6 разів. Тобто, це означає, що розщеплення бісекторів на рівні 3070 Гс, представлене на рис. 2а, може свідчити про значно сильніші локальні магнітні поля, які можуть навіть перевищувати 10 кГс.

Ще цікавіший випадок було виявлено на висоті 15 Мм, де спостерігалось ширше та асиметричне випромінювання в лінії H (рис. 2в). Тут було два максимуми розщеплення бісекторів — в ядрі лінії та її далеких крилах. У цих місцях максимальне розщеплення бісекторів відповідає напруженостям 2950 і 3700 Гс відповідно. У рамках модельних розрахунків, зроблених у роботі [16], такий випадок не можна пояснити двокомпонентною структурою магнітного поля: для цього слід додати ще третій компонент, який дає спектральні внески (тобто, відповідні зеєманівські сигма-компоненти), локалізовані на досить великій відстані від центра лінії, в діапазоні 0.15...0.25 нм. Підставляючи ці значення у формулу (1), тобто припускаючи, що саме таким має бути відповідне зеєманівське розщеплення, отримуємо напруженість поля $B = (0.75...1.25)10^5$ Гс. Це значення по порядку величини добре узгоджується з оцінками напруженості магнітного поля у лімбовому спалаху згідно з даними [25].

З вивчення інших профілів $I \pm V$ випливає, що подібні особливості, показані стрілками на рис. 2в, наявні з різними амплітудами і в інших фотометричних розрізах, але не у всіх. Зокрема, у фотометричному розрізі № 22 (тобто на висоті 17 Мм) їх уже немає. Це може свідчити про те, що такі ознаки можна спостерігати у протуберанцях не лише на певній фазі їхнього розвитку, а й у певних місцях.

ДИСКУСІЯ

Випадки, коли бісектори профілів $I \pm V$ мають кілька максимумів розщеплення, були відмічені і раніше, причому за межами сонячних спалахів і протуберанців. Ймовірно, перший результат такого роду спос-

терігався у фотосфері активної області за межами сонячних плям [10, 13]. У цих роботах, щоб зменшити вплив шумових ефектів внаслідок зернистості фотоемульсії WP1 ORWO, були усереднені дані по значній ділянці на Сонці — близько $35''$, тобто 25 Мм. При цьому розраховувалась середня величина розщеплення бісекторів у залежності від параметра Δ/g_{ef} де Δ — відстань від центра магніточутливої лінії, g_{ef} — її ефективний коефіцієнт Ланде, λ_0 — її довжина хвилі. При усередненні спостережних даних по багатьох спектральних лініях (точніше, по дев'яти лініях типу Fe I 525.02 нм з $\Delta_{1/2} = 10$ пм і по семи лініях типу Fe I 5233 з $\Delta_{1/2} = 20 \dots 30$ нм), було виявлено три максимуми розщеплення при значеннях параметра Δ/g_{ef} , що відповідає напруженостям приблизно 4, 7 і 13 кГс. На основі цих результатів було вперше припущено дискретність (свого роду «квантування») напруженостей магнітного поля у просторово нероздільних структурах активних областей на Сонці. Пізніше цей ефект було пояснено в рамках теоретичної МГД-моделі безсилового екранованого магнітного елемента [21].

При вивченні магнітних полів в активному протуберанці 24 липня 1999 р. дані спостережень також усереднювались, але по меншій ділянці — 1 Мм для кожного фотометричного розрізу. Однак внаслідок дрижання зображення на вхідній щілині ешельного спектрографа ефективний лінійний розмір усереднюваної області був приблизно удвічі більшим. Цілком ймовірно, що на такій великій площі могли розташовуватись дрібномасштабні магнітні структури з дуже різними магнітними полями і значно відмінними променевими швидкостями. З огляду на це величина магнітного поля на рівні 10^5 Гс видається набагато більш дискусійною. Відповідний магнітний тиск на кілька порядків перевищує газовий і динамічний тиск у нижній сонячній короні, і тому такі надзвичайно сильні магнітні поля теоретично не можуть виникати у простих нескручених силових трубках [21]. Можливо, такі надсильні магнітні поля виникають у певних безсилових конфігураціях [20], але це питання наразі потребує подальшого вивчення.

На завершення дискусії наведемо основні аргументи на користь запропонованої інтерпретації. Такі фактори, як неоднорідна структура протуберанців, зокрема тиск газу, поле швидкостей і температури, є чисто немагнітними. Вони не дають поляризації у профіль лінії, отже, не повинні призводити до розщеплення бісекторів. Значне просторове усереднення даних може лише зменшити ефект розщеплення бісектора, але не збільшити його. Що стосується ефекту зростання шуму в дальніх крилах лінії, то це питання детально вивчене в роботах [25, 26]. Крім того, як показано на рис. 2в, різниця профілю в місцях, позначених стрілками, наближається до 2%. Однак при усередненні даних по 100 точках рівень шумових ефектів повинен бути принаймні утричі меншим, а це означає, що другий максимум розбиття бісектриси є реальним. Нарешті, при побудові спостережуваних профілів ретельно

враховувалися спектральні бленди — телуричні лінії H_2O . Це не складало труднощів, оскільки ці бленди дуже вузькі (принаймні у 10 разів вужчі за досліджувану емісію H) і набагато менші по інтенсивності.

ВИСНОВОК

Основний висновок нашої роботи полягає в тому, що в дослідженому активному протуберанці, ймовірно, спостерігався широкий діапазон напруженостей магнітного поля — від 10^3 до 10^5 Гс. Ці особливості були виявлені на момент 7:00 UT і для висот в діапазоні 11...15 Мм над рівнем фотосфери, тобто в нижній короні. Порівнюючи цей висновок з результатами роботи [25], де досліджувався той самий протуберанець, але для іншого моменту часу, 6:49 UT, можна припустити, що спектральні прояви особливо сильних магнітних полів рівня 10^5 Гс можуть бути досить поширеним явищем, яке, однак, можна спостерігати лише у певний час і у певному місці активних процесів на Сонці. Звичайно, для підтвердження існування надзвичайно сильних магнітних полів або пошуку можливих альтернативних інтерпретацій необхідні подальші дослідження щодо розширеного моделювання різноманітних термодинамічних і магнітних властивостей у сонячних протуберанцях у поєднанні з даними спостережень високої роздільної здатності.

ПОДЯКИ

Автори вдячні невідомим рецензентам за низку слушних зауважень, які були враховані при доопрацюванні статті. Представлене дослідження профінансовано Міністерством освіти і науки в Україні, проєкт № 22БФ023-03.

REFERENCES

1. Brosius J. W., White S. M. (2006) Radio measurements of the height of strong coronal magnetic fields above sunspots at the solar limb. *Astrophys. J.* 641, L69—L72.
2. Chen B., Shen C., Gary D. E. Reeves K. K., et al. (2020) Measurement of magnetic field and relativistic electrons along a solar flare current sheet. *Nature Astron.* 4, 1140—1147.
3. Durán C. J. S., Andreas Lagg A., Solanki S. K., Van Noort M. (2020) Detection of the strongest magnetic field in a sunspot light bridge. *Astrophys. J.* 895(129), 18. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab83f1>
4. Harvey J. W. (2012) Chromospheric magnetic field measurements in a flare and an active region filament. *Solar Phys.* 280(1), 69—81.
5. Kleint L. (2017) First detection of chromospheric magnetic field changes during an X1-Flare. *Astrophys. J.* 834, id. 26, 10.

6. Koza J., Kuridze D., Heinzel P., et al. (2019) Spectral diagnostics of cool flare loops observed by the SST. I. Inversion of the Ca II 8542 Å and H lines. *Astrophys. J.* 885, id. 154. 13.
7. Kuckein C., Centeno R., Martínez Pillet V., et al. (2009) Magnetic field strength of active region filaments. *Astron. and Astrophys.* 501. 1113—1121.
8. Kuridze D., Mathioudakis M., Morgan H., Oliver R., et al. (2019) Mapping the magnetic field of flare coronal loops. *Astrophys. J.* 874. id. 126, 12.
9. Libbrecht T., de la Cruz Rodriguez J., Danilovic S., Leenaarts J., et al. (2019) Chromospheric condensations and magnetic field in a C3.6-class flare studied via He I D3 spectro-polarimetry. *Astron. and Astrophys.* 621, id. A35, 21.
10. Lozitsky V. G. (1980). On the calibration of magnetograph measurements taking into account the spatially unresolved inhomogeneties. *Physica Solariterris*, Potsdam. 14. 88—94.
11. Lozitsky V. G. (1993) Superstrong magnetic fields in the solar atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 9. 18—25.
12. Lozitsky V. G. (2009) Observational evidences to the 10^5 G magnetic fields in active regions on the Sun. *J. Phys. Studies.* 13(2), 2903-1—2903-8.
13. Lozitsky V. G. (2015) Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of I V profiles. *Adv. Space Res.* 55. 958—967.
14. Lozitsky V. G. (2016) Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra. *Adv. Space Res.* 57. 398—407.
15. Lozitsky V. G., Botygina O. A. (2012) Comparison of the magnetic fields in active prominences measured from HeI D₃ and H lines. *Astron. Lett.* 38(6). 380—387.
16. Lozitsky V., Maslyukh V., Botygina O. (2015) Estimates of local magnetic fields in prominences with a large optical thickness in emissive elements. *Bull. Kyiv Nat. Univ. Astron.* 52. 7—11.
17. Lozitsky V., Yurchyshyn V., Ahn K., Wang H. (2022) Observations of extremely strong magnetic fields in active region NOAA 12673 using GST magnetic field measurement. *Astrophys. J.* 928(1), id.41, 7. DOI: 10.3847/1538-4357/ac5518
18. Sasikumar Raja K., Venkata Suresh, Singh Jagdev B. Raghavendra Prasad. (2022) Solar coronal magnetic fields and sensitivity requirements for spectropolarimetry channel of VELC onboard Aditya-L1. *Adv. Space Res.* 69. 814—822. DOI: 10.1016/j.asr.2021.10.053
19. Solanki S. K. (2003) Sunspots: An overview. *Astron. and Astrophys. Rev.* 11. 153—286.
20. Solov'ev A. A. (2022) Force-free magnetic flux ropes: string confinement of super-strong magnetic fields and flare energy release. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 515. 4981—4989.
21. Solov'ev A. A., Lozitskii V. G. (1986) Force-free model of fine-structure magnetic elements. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* 2. 80—84.
22. Stenflo J. O. (2011) Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 529, id. A42, 20.
23. Wei Yudian, Chen Bin, Yu Sijie, Wang Haimin, Jing Ju, Gary Dale E. (2021) Coronal magnetic field measurements along a partially erupting filament in a solar flare. *Astrophys. J.* 923(213). 11. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2f99>.
24. Xu Z., Lagg A., Solanki S., Liu Y. (2012) Magnetic fields of an active region filament from full stokes analysis of Si I 1082.7 nm and He I 1083.0 nm. *Astrophys. J.* 749(2), 138. 11.
25. Yakovkin I. I., Lozitsky V. G. (2022) Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H line. *Adv. Space Res.* 69(12).

4408—4418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>.

26. Yakovkin I. I., Lozitsky V. G. (2023) Search for superstrong magnetic fields in active processes on the Sun using spectro-polarimetry within 15 angstroms around the D_3 line. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* (June 20). 11 p.
DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1816>
27. Yakovkin I. I., Veronig A. M., Lozitsky V. G. (2021) Magnetic field measurements in a limb solar flare by hydrogen, helium and ionized calcium lines. *Adv. Space Res.* 68. 1507—1518.

I. I. Yakovkin, M. A. Hromov, V. G. Lozitsky

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine

SPECTRAL MANIFESTATIONS OF STRONG AND SUPER-STRONG MAGNETIC FIELDS IN AN ACTIVE PROMINENCE ON JULY 24, 1999

We present the results of the study of the magnetic field in the active prominence on July 24, 1999 for the moment 07:00 UT, using the observational material obtained on the Echelle spectrograph of the horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kyiv National University. Our analysis is based on the study of $I \pm V$ profiles of the H line, which were related to heights in the range of 11...20 Mm. It was found that the bisectors of the $I \pm V$ profiles are non-parallel to each other in majority of places of this prominence. This indicates the inhomogeneity of the magnetic field: with a uniform magnetic field, the named bisectors should be parallel. Moreover, the maximum splitting of bisectors is observed not only in the core of the line (which was noted earlier by other authors), but also in its far wings, at distances of 0.15...0.25 nm from the line center. The specified maximum of splitting corresponds to magnetic field of about 3000 G, but this value should be considered only as a lower estimate of the true local magnetic fields. In particular, the second maximum of bisector splitting may indicate that the actual value of Zeeman splitting in small-scale structures with a small filling factor reaches the above value of 0.15...0.25 nm which corresponds to the field strength of almost 100 kG. From our study it follows that evidences on such extremely magnetic fields may not actually be a rare phenomenon, but a rather common one, which, however, can be recorded only under certain favorable observational conditions.

Key words: Sun, solar activity, prominences, magnetic fields, spectro-polarimetry, super-strong fields.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2023

Після доопрацювання 09.06.2023

Прийнята до друку 15.06.2023