

УДК 523.982+52-337

Особенности зеемановского расщепления линий с малыми факторами Ланде у спектре солнечной плямы

В.Г. Лозицкий, А.И. Ключева

Астрономічна обсерваторія та кафедра астрономії і фізики космосу фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Вивчається зееманівське розщеплення ліній FeI 6093.66, 6094.419, 5436.3 і 5436.6 Å по профілях Стокса $I \pm V$ у спектрі великої сонячної плями, яка спостерігалась 25 березня 1991 р. на ешеліному спектрографі горизонтального сонячного телескопа АО КНУ. По лініях FeI 5436.3 та 5436.6 з відносно великими факторами Ланде ($g=1.44$ та 1.82 , відповідно) знайдено, що в тіні плями магнітне поле було в межах $1.4\text{--}1.8$ кГс і мало S полярність. Однак виявилось, що лінії FeI 6093.66 та 6094.419 з дуже малими і протилежними по знаку факторами Ланде ($g=0.33$ і -0.22) мають магнітне розщеплення одного знаку, тобто друга з них вказує на протилежну магнітну полярність (тобто N). Аналіз вірогідних причин цього ефекту наводить на думку, що певну роль тут міг грати ефект Пашена–Бака при дуже сильних полях $\sim 10^5$ Гс. При таких “надсильних” полях можна очікувати проявів ефекту Зеемана і у інших лініях з ще меншими факторами Ланде. І дійсно, подібні спектральні прояви (типу слабого магнітного розщеплення) були знайдені в лінії FeI 5434.5 ($g=-0.014$). Виявилось, що це розщеплення найбільше в ядрі лінії (де воно досягає $3\text{--}5$ мÅ) і в цілому зменшується при переході в її крила. Нижня межа відповідного поздовжнього магнітного поля близько $10\text{--}13$ кГс. Ймовірно, такі поля були зосереджені в субтелескопічних магнітних структурах, “вкраплених” у більш слабе фонове поле тіні плями.

ОСОБЕННОСТИ ЗЕЕМАНОВСКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛИНИЙ С МАЛЫМИ ФАКТОРАМИ ЛАНДЕ В СПЕКТРЕ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА, Лозицкий В.Г., Ключева А.И. — Изучается зеемановское расщепление линий FeI 6093.66, 6094.419, 5436.3 и 5436.6 Å по профилям Стокса $I \pm V$ в спектре большого солнечного пятна, наблюдавшегося 25 марта 1991 г. на эшелюном спектрографе горизонтального солнечного телескопа АО КНУ. По линиям FeI 5436.3 и 5436.6 с относительно большими факторами Ланде ($g=1.44$ и 1.82 , соответственно) найдено, что магнитное поле в тени пятна было в пределах $1.4\text{--}1.6$ кГс и имело S полярность. Однако оказалось, что линии FeI 6093.66 и 6094.419 с очень малыми и противоположными по знаку факторами Ланде ($g=0.33$ и -0.22) имеют магнитное расщепление одного знака, то есть вторая из них указывает на противоположную магнитную полярность (т.е. N). Анализ вероятных причин этого эффекта приводит к заключению, что определенную роль здесь мог играть эффект Пашена–Бака при очень сильных полях $\sim 10^5$ Гс. При таких «сверхсильных» полях можно ожидать проявлений эффекта Зеемана и в других линиях с еще меньшими факторами Ланде. И действительно, подобные спектральные проявления (типа слабого магнитного расщепления) были найдены в линии FeI 5434.5 ($g=-0.014$). Оказалось, что это расщепление наибольшее в ядре линии (где оно достигает $3\text{--}5$ мÅ) и в целом уменьшается при переходе в ее крылья. Нижний предел соответствующего продольного магнитного поля около $10\text{--}13$ кГс. Вероятно, такие поля были сосредоточены в субтелескопических магнитных структурах, «вкрапленных» в более слабое фоновое магнитное поле тени пятна.

PECULIARITIES OF THE ZEEMAN SPLITTING IN LINES WITH SMALL LANDE FACTORS IN A SUNSPOT SPECTRUM, by Lozitsky V.G., Klyueva A.I. — The Zeeman splitting of FeI 6093.66, 6094.419, 5436.3 and 5436.6 Å lines is studied using $I \pm V$ Stokes profiles related to a big sunspot observed of 25 March 1991 on Echelle spectrograph of horizontal solar telescope of Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko University. Measurements in lines FeI 5436.3 and 5436.6 with relatively large Lande factors ($g=1.44$ and 1.82 , respectively) shown, that magnetic field in sunspot umbra was in range $1.4\text{--}1.6$ kG and had S polarity. However, it was found that lines FeI 6093.66 and 6094.419 with small and opposite Lande factors ($g=0.33$ and -0.22) have magnetic splitting of the same sign, i.e. second line indicates opposite magnetic polarity, namely N . An analysis of probable causes of this effect allows to conclude the possible influence of the Paschen–Back effect in presence of very strong fields of $\sim 10^5$ G. In case of such “superstrong” fields, one can expect the Zeeman effect manifestations in other lines with smallest Lande factors. In fact, similar spectral perturbations (like very small Zeeman splitting) were found in FeI 5434.5 line ($g=-0.014$). It was shown, that this splitting is maximum in line core (where it reaches $3\text{--}5$ mÅ) and decreases, in general, from line core to wings. Corresponding low magnetic strength limit of longitudinal field is about $10\text{--}13$ kG. Perhaps, such fields were placed in subtelescopic magnetic structures embedded in more weak background field of sunspot umbra.

Ключевые слова: зеемановское расщепление спектральных линий; солнечные магнитные поля.

Key words: Zeeman splitting in spectral lines; solar magnetic fields.

1. ВСТУП

При вимірюваннях магнітних полів Сонця і інших зірок використовують, як правило, спектральні лінії з максимально великими факторами Ланде. Це виправдано з точки зору чутливості і точності вимірювань. Однак це неминуче обрізає верхню межу доступного для вимірювань діапазону індукцій

магнітного поля. Лінії з великими факторами Ланде при тих магнітних полях, які зустрічаються у сонячних плямах (до 6000 Гс) мають зеєманівське розщеплення $\approx 0.2 \text{ \AA}$ — приблизно таке ж, як типова віддаль до найближчих ліній-сусідів у сонячному спектрі (тобто бленд). Якщо у плямах чи інших утвореннях існують сильніші поля, їх спектральні прояви (зеєманівські σ -компоненти) попадають в область бленд, де їх виявити вкрай важко і де їх взагалі ніхто ніколи не шукає. Саме тому важливо і цікаво дослідити розщеплення спектральних ліній з малими факторами Ланде [6–10].

У випадку багатокомпонентної структури магнітного поля з суттєво відмінними напруженостями у різних компонентах, спектральні лінії з найбільшими факторами Ланде g відображають в своїх профілях вплив лише найслабшої компоненти магнітного поля. Лінії з проміжними по величині факторами Ланде чутливі як до найслабших магнітних полів, так і до компоненти з більш сильним полем. Нарешті, лінії з найменшими факторами g мають сумувати в своїх профілях вклади від Зеєман-ефекту, що виникає від широкого діапазону напруженостей магнітного поля — від найслабших полів до найсильніших.

Поскільки параметри багатокомпонентної моделі (з кількома просторово нероздільними компонентами поля) визначити з спостережень дуже важко [20], найчастіше при інтерпретації спостережних даних користуються простою однокомпонентною моделлю поля, в якій є лише одне значення магнітного поля B . При цьому вважається, що величина зеєманівського розщеплення $\Delta\lambda_H$ пропорційна добутку фактора Ланде на індукцію магнітного поля, тобто $\Delta\lambda_H \sim gB$. Очевидно, що визначаючи величину поля як $B \sim \Delta\lambda_H/g$, можна очікувати, що виміряні значення B не повинні залежати від фактора Ланде g . Хоча лінії з більшим фактором Ланде розщеплюються на більшу величину, а лінії з меншим фактором — на меншу, це автоматично враховується при калібровці вимірювань. У випадку однорідного поля виміряні магнітні поля мають бути однаковими по лініях з різними факторами Ланде.

Однак може виникнути інша ситуація, коли при такій простій калібровці вимірювань лінії з малими факторами Ланде дають з спостережень систематично більші (або менші) значення напруженостей чи індукцій. Тоді це вказує на неприйнятність простої однокомпонентної моделі, тобто на випадок, коли має місце непомітне занесення в профіль лінії спектральних вкладів від все більш сильних полів, що й призводить до різних виміряних значень магнітного поля.

Вперше подібний ефект виявлено при спостереженнях на магнітографі КрАО [17]. Виявилось, що в діапазоні значень $g\lambda^2 \approx 50 \div 80$ (з точністю до множника 10^6) поздовжні магнітні поля B_{\parallel} приблизно однакові, однак для $g\lambda^2 < 50$ вони швидко зростають при зменшенні $g\lambda^2$. Аналогічна залежність отримана і по фотографічних (тобто спектральних) даних [6]. В останній роботі показано, що саме така залежність має бути при двохкомпонентній структурі магнітного поля, що містить ділянки з дуже сильним полем $B \approx 10 \text{ кГс}$, а також ділянки зі значно слабшими полями. Незважаючи на те, що в роботі [6] довелося використовувати припущення про незвичайно сильні субтелескопічні магнітні поля (у 2–3 рази сильніші, ніж добре відомі магнітні поля у сонячних плямах) на сьогодні не запропоновано ніякої іншої інтерпретації знайденого в роботах [6] ефекту.

Задля справедливості слід зазначити, що ще у 1957 р. акад. А.Б.Северний висловлював припущення [13], що у сонячних плямах можуть існувати тонкоструктурні елементи з фактичним магнітним полем близько 50 кГс (5 Тл), які при усередненні даних по вхідній щілині інструмента дають добре відомі значення на рівні $\sim 10^3$ Гс. Подібні припущення висловлювались і пізніше, однак ще ніким не було отримано прямих спостережних даних щодо таких гігантських полів у сонячних плямах. Лише для сонячних спалахів були знайдені спектральні ефекти, які вказують на короткочасну (до 10 хв.) появу в них локальних магнітних полів зазначеного діапазону [7, 8].

Ще одна можлива причина суттєвої розбіжності даних по різних лініях — неточні значення їх факторів Ланде. Ці фактори розраховуються в припущенні LS-взаємодії в атомі, хоча в окремих випадках можливі значні відхилення від цього типу взаємодії [21]. Зокрема, у сонячному спектрі є досить обмежена кількість ліній (<1%), які мають нульові фактори Ланде g_{LS} в припущенні LS-зв'язку. Це, зокрема, лінії FeI 5123.723, FeI 5434.527 та FeI 5576.097 \AA , які належать мультиплетам № 16, 15 і 686, відповідно [5]. Однак виявилось, що хоча у них $g_{LS} = 0$, згідно з лабораторними вимірюваннями їх фактичні значення g_{lab} дорівнюють відповідно -0.013 , -0.014 та -0.012 [3, 18]. Це означає, що строго кажучи, ці лінії не можна вважати чисто “доплерівськими”, тобто такими, які не розщеплюються у будь-якому по величині магнітному полі: при достатньо сильних полях вони повинні мати помітне магнітне розщеплення, тоді як при слабших полях (наприклад таких, як у плямах, $B = 2 - 6 \text{ кГс}$) достовірного (по відношенню до шумових ефектів) розщеплення не повинно бути.

Значний інтерес викликає також лінія FeI 6094.419, яка належить до мультиплету заліза № 1177. Ця лінія має теоретичний фактор Ланде $g_{LS} = -0.25$, який є близьким до її лабораторного значення $g_{\text{Lab}} = -0.218$ [3]. Знак мінус означає, що при даній полярності магнітного поля вона має такий же знак поляризації σ -компонент, як при протилежній 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). Тем не менше, в

спектрах двох великих сонячних плям, які спостерігались на ГСТ АО КНУ 25 березня 1991 р. та 22 липня 2004 р., виявлено, що ця лінія розщеплюється так, наче у неї позитивний фактор Ланде. Пізніше аналогічний ефект було знайдено ще в кількох сонячних плямах [9, 19]. Отримані на сьогодні дані щодо цього ефекту є дуже попередніми: неясно, як часто він зустрічається, чим обумовлений, як все-таки узгодити між собою вимірювання по різних лініях, тощо.

У даній роботі представлені результати спектрофотометричного дослідження п'яти магніточутливих ліній, що мають фактори Ланде в діапазоні від -0.014 до 1.82 . Мета дослідження — з'ясування дійсного діапазону напруженостей магнітного поля в тіні сонячної плями і перевірка гіпотези А.Б.Северного про те, що в сонячних плямах можуть існувати тонкоструктурні елементи з магнітним полем $\sim 10^4$ Гс.

2. МАТЕРІАЛ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І МЕТОДИКА ЙОГО ОПРАЦЮВАННЯ

Вивчався спектр великої сонячної плями 25 березня 1991 р. Він був сфотографований о $12^h 11^m$ UT з аналізатором кругової поляризації на ешеліному спектрографі горизонтального сонячного телескопа (ГСТ) Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Сонячний телескоп і спектрограф створено співробітниками обсерваторії у 1954 р. [12], а потім неодноразово модернізовано [4, 5]. Установку призначено для отримання спектрів активних утворень на Сонці в інтервалі довжин хвиль $\lambda\lambda = 3500 - 6600$ Å. Практична просторова роздільна здатність інструмента залежить від атмосферного дрижання зображення, і становить, як правило $3 - 5''$. Зрідка (приблизно раз на тиждень) у перші годину-півтори після сходу Сонця дрижання може бути $i \leq 2''$. Весь досліджуваний спектр отримують за одну експозицію ($1 - 30$ с) на пластинках розміром 240×180 мм або 240×240 мм. Практична спектральна роздільна здатність ешеліного спектрографа близька до теоретичної й дорівнює 30 мÅ у зеленій області спектра і 50 мÅ — у червоній.

На ГСТ передбачено можливість візуальних і фотографічних спостережень сонячних магнітних полів. При цьому використовують поляризаційну мозаїку В.Скоморовського [15] з шириною смужок 0.4 мм і чвертьхвильову пластинку з кварцу, розраховану на зелену область спектру (лінія $\lambda = 5250$ Å).

Дослідження такої пластинки показало, що її фазові властивості є досить добрими (з глибиною модуляції поляризації не менше 95%) не тільки для $\lambda = 5250$ Å, але й для всієї області $4000 - 6600$ Å [1]. Мозаїку й пластинку встановлюють під час спостережень перед вхідною щілиною спектрографа.

В роботі проводилась фотометрія на мікрофотометрі МФ-4 тих ділянок спектрограми, де знаходились досліджувані нами лінії: FeI 5434.5, FeI 5436.3, 5436.6, FeI 6093.66 та 6094.419.

Фотометрія кожної з 5 ліній проводилась у 10 фотометричних розрізах, які включали тінь плями, її півтінь і прилягаючу фотосферу. Розрізи були вибрані з дикретністю $6''$ на Сонці, ширина кожного розрізу відповідала $1.5''$. Файли з даними почорнінь вводились в комп'ютер і потім опрацьовувались по спеціальних програмах, які дозволяли перевести почорніння в інтенсивності, врахувати розсіяне світло, взаємно "прив'язати" по довжинах хвиль $I + V$ та $I - V$, профілі, знайти величину параметра V , тощо.

3. РОЗЩЕПЛЕННЯ ЛІНІЙ FeI 5436.3 І 5436.6

Для вимірювання магнітного поля по лініях FeI 5436.3 і 5436.6 ($g = 1.44$ та 1.82 , відповідно) як реперна лінія використовувалась FeI 5434.5. Як сказано вище, фактично вона також магніточутлива, але має дуже малий фактор Ланде, $g = -0.014$, і тому при тих магнітних полях, які існують в сонячних плямах (типово 3000 Гс), її розщеплення настільки мале, що не може бути зареєстроване фотографічним методом, що має чутливість на рівні $1 - 2$ мÅ [2]. Дійсно, використовуючи відому формулу

$$\Delta\lambda_H = 4.67 \cdot 10^{-13} g \lambda^2 B, \quad (1)$$

де $\Delta\lambda_H$ і λ дано в Å, а B в Гс, при $g = -0.014$ маємо

$$\Delta\lambda_H = 1.93 \cdot 10^{-7} B, \quad (2)$$

З формули (2) при $B = 3000$ Гс маємо $\Delta\lambda_H \approx 0.58$ мÅ, тобто менше ніж $1 - 2$ мÅ — чутливість наших вимірювань.

Опрацювання спектрофотометричних вимірювань показало, що якщо профілі $I + V$ та $I - V$ лінії FeI 5434.5 оптимально сумістити, то в сусідніх лініях FeI 5436.3 і 5436.6 виникає значне розщеплення (рис. 1). Це розщеплення для тіні плями відповідає магнітним полям у $1400 - 1800$ Гс; полярність поля — S (або $-$). Похибки вимірювань (у Гс) можна оцінити, вважаючи, що чутливість методу $\delta\lambda \approx 1.5$ мÅ, а такому рівню чутливості відповідає $\Delta\lambda_H = 0.5\delta\lambda \approx 0.75$ мÅ. Тоді згідно з формулою (1) для лінії з $g = 1.82$ маємо похибку $\delta B \approx 30$ Гс, для лінії з $g = 1.44$ — $\delta B \approx 38$ Гс, а для лінії FeI 5434.5 — $\delta B \approx 3880$ Гс. Тобто, для перших двох ліній величина магнітного поля у плямі виміряна з досить невеликими відносними похибками (2–3%).

4. РОЗЩЕПЛЕННЯ В ЯДРІ ЛІНІЙ FeI 5434.5

Детальний аналіз лінії FeI 5434.5 виявив цікаву особливість: в окремих місцях плями в профілях лінії виявляються ефекти типу слабого магнітного розщеплення (рис. 2). З цього рисунка видно, що

$I+V$ та $I-V$ профілі лінії зведені досить добре: “центри ваги” їх співпадають, на половинній глибині лінії співпадають і бісектори.

Бісектором профіля, як відомо, називається серединна його лінія, проведена так, щоб кожна її точка була рівновіддаленою як від “фіолетового” так і від “червоного” крила лінії на тому ж рівні інтенсивності. Вигляд бісектора несе важливу інформацію про умови формування спектральних ліній. Так, бісектори профілів $I+V$ та $I-V$ при однорідному полі повинні бути взаємно паралельними, якщо магнітне розщеплення $\Delta\lambda_H$ набагато менше півширини спектральної лінії $\Delta\lambda_{1/2}$.

Однак на рис. 2 подана зовсім інша картина: бісектори в цілому не паралельні, причому їх розщеплення найбільше поблизу ядра; в окремих випадках воно досягає 5 мÅ.

Вважаючи, що $\Delta\lambda_H = 0.5\Delta\lambda = 2.5$ мÅ, згідно з формулою (2) маємо тоді $B \approx 12900$ Гс, тобто 12.9 кГс. Це значення принаймні в 3 рази більше, ніж ймовірні похибки вимірювань (див. вище), так що його слід вважати реальним.

З рис. 3 видно, що лінія FeI 5434.5 виявляє значні знакозмінні коливання поля від -13 до $+10$ кГс, тоді як лінії FeI 5436.3 та FeI 5436.6 показують вздовж плями скрізь однакову полярність і майже однакове по величині поле. Очевидно також, що горизонтальний масштаб особливо потужних (~ 10 кГс) полів дрібніший, ніж помірних по силі полів плями: він менший 10 Мм, тоді як регулярне поле плями займало ділянку понад 35 Мм.

5. ПОРІВНЯННЯ ЛІНІЙ FeI 6093.66 І 6094.419

Поблизу ліній FeI 6093.66 та 6094.419 немає немагніточутливих або телуричних ліній, які можна було б використати як спектральні репери для взаємної привязки профілів $I+V$ та $I-V$. Поскілки нас цікавить передусім лінія 6094.419, можна для неї використати як репер близьку до неї лінію FeI 6093.66, “нав’язавши” їй таке поле (≈ 1.5 кГс), яке було виміряно по лініях FeI 5436.3 та FeI 5436.6. У такому разі, лінії FeI 6093.66 та 6094.419 слід фотометрувати підряд, без зупинки столика мікрофотометра, і потім лінії FeI 6093.66 штучно створити таке розщеплення, яке має бути при $B \approx 1.5$ кГс. Те розщеплення, яке при цьому з’явиться в лінії FeI 6094.419, і буде певним наближенням до дійсного розщеплення.

Відповідний аналіз показав, що у всіх фотометричних розрізах лінії FeI 6093.66 і 6094.419 мають *однаковий* тип магнітного розщеплення, тобто друга лінія, незважаючи на її *від’ємний* фактор Ланде, розщеплюється так, ніби у неї позитивний фактор Ланде або ж (як альтернатива), магнітна полярність по ній є протилежною (тобто N).

Слід відмітити, що вперше цей ефект в лінії FeI 6094.419 виявили Соланкі і Стенфло [21], але для сонячних факелів. Щодо ж сонячних плям, то крім публікацій [9, 19], авторам невідомі інші роботи на цю тему.

6. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На основі аналізу профілів $I \pm V$ ліній FeI 6093.66 та 6094.419 з дуже малими і протилежними по знаку факторами Ланде ($g = 0.33$ і -0.22) знайдено, що в спектрі сонячної плями S полярності з магнітним полем $1.4-1.8$ кГс ці лінії мають магнітне розщеплення одного знаку, тобто друга з них вказує на протилежну магнітну полярність (N). Виявлено слабе магнітного розщеплення також в

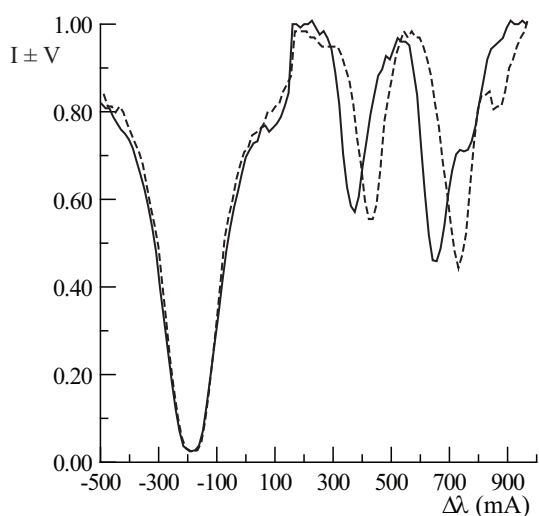


Рис. 1. Спостережувані профілі Стокса $I+V$ в плямі: FeI 5434.5 (ліворуч), FeI 5436.3 (у центрі) та FeI 5436.6 (праворуч). На цьому графіку, $I+V$ та $I-V$ профілі представлені суцільною та пунктирною лініями.

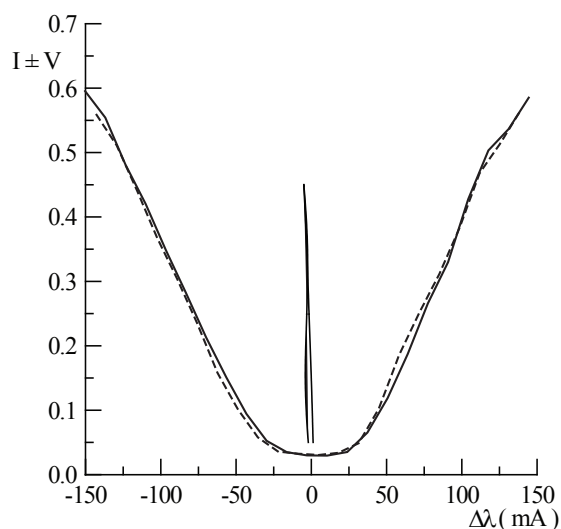


Рис. 2. Спостережувані профілі Стокса $I \pm V$ і їх бісектори для лінії FeI 5434.5

“немагніточутливий” лінії FeI 5434.5 ($g = -0.014$). Виявилось, що це розщеплення найбільше в ядрі лінії (де воно досягає 3–5 мÅ) і в цілому зменшується при переході в її крила. Нижня межа відповідного поздовжнього магнітного поля близько 10–13 Гс. Ймовірно, такі дуже сильні поля були зосереджені в субтелескопічних магнітних структурах, “вкраплених” у більш слабе фонове поле тіні плями.

Для більшої обґрунтованості наведених висновків, спробуємо співставити вплив всіх ефектів, які могли б дати виявлені спектральні прояви.

1. *Інструментальні похибки (випадкові зміщення ліній), викликані турбулентністю у спектрографі.* Вплив цього ефекту було перевірено вивченням телуричних ліній як в нашій роботі, так і в роботі [2]. Знайдено, що зображення телуричних ліній на спектрограмах не мають значних (> 2 мÅ) зміщень, якими можна було б пояснити особливий тип розщеплення в лінії FeI 6094.419. Отже, турбулентність в спектрографі ГСТ не зіграла тут основної ролі.

2. *Ефект Евершеда.* Можливий вплив цього ефекту пов’язаний з тим, що аналізатором кругової поляризації була мозаїка В.Й.Скоморовського [15] і пластинка $\lambda/4$. Спектри $I+V$ та $I-V$ стосувалися різних місць на Сонці, де, в принципі, могли бути різні променеві швидкості. Для сонячних плям такі швидкості могли бути внаслідок ефекту Евершеда [11, 14]. Цей ефект найсильніше проявляється по спектру плям поблизу лімба; в центрі диска Сонця він незначний. Оскільки досліджена пляма знаходилась біля центру диска, вплив цього ефекту, скоріш за все, був незначним.

3. *Інверсія полярності магнітного поля в плямі на висотах формування ліній FeI 6093.66, FeI 6094.419.* Труднощі такої інтерпретації пов’язані з тим, що глибини формування цих ліній відрізняються лише на 10–20 км для спокійної фотосфери і лише на кілька кілометрів — у плямі. Більш того, оскільки кожна лінія формується в діапазоні висот порядку 50 км, фактично висоти їх формування щільно перекриваються. Тому неймовірно, щоб ці дві лінії показували різну магнітну полярність, навіть якщо вона дійсно виникала при зміщенні по висоті на 10–20 км (що фізично важко уявити).

4. *Порушення LS-зв’язку.* Таку причину можна було б розглядати, якби використовувались теоретичні фактори Ланде. Але, оскільки для ліній FeI 6093.66, FeI 6094.419 відомі і використані в даній роботі лабораторні фактори Ланде, така можливість виключається.

5. *Ефект Пашена–Бака в “надсильних” магнітних полях $\sim 10^4 - 10^5$ Гс.*

Лінія FeI 6094.419 відповідає переходу $^3F_2^5P_1$, її фактори Ланде для нижнього і верхнього термів дорівнюють (для LS-зв’язку) $g_1 = 0.667$, $g_2 = 2.500$, звідки по формулі Ланді Дегль’Іннотенті можна отримати ефективний фактор Ланде $g_{\text{eff}} = -0.25$ (це саме той фактор, який проявляється при спостереженнях). Ефективний фактор Ланде обчислюється за формулою [18]

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

де g_1 та g_2 — фактори Ланде, а J_1 і J_2 — відповідні квантові числа.

Якщо припустити, що нижній терм лінії FeI 6094.419 обтяжений впливом ефекту Пашена–Бака [16]

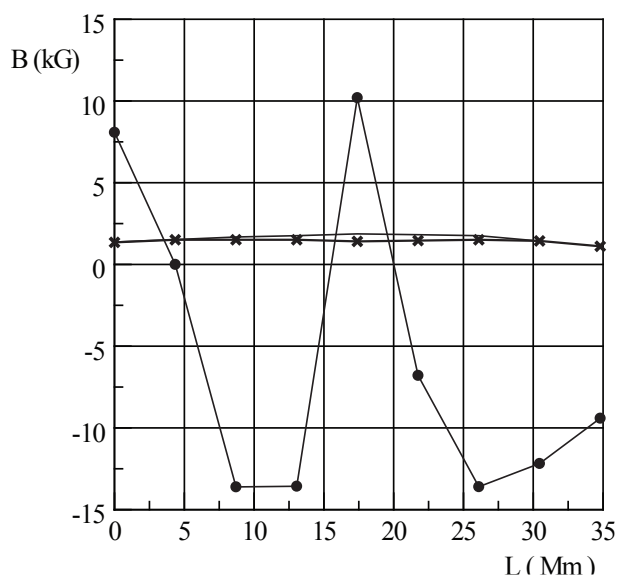


Рис. 3. Співставлення магнітних полів (у кГс, вісь ординат), виміряних вздовж проекції вхідної щілини спектрографа на Сонце (вісь абсцис, де дані наведені в мегаметрах, Мм) по різних спектральних лініях: дві тонкі лінії на рівні 1.4–1.8 кГс — лінії FeI 5436.3 та FeI 5436.6, крива з великим розмахом і заповненими кружечками — лінія FeI 5434.5

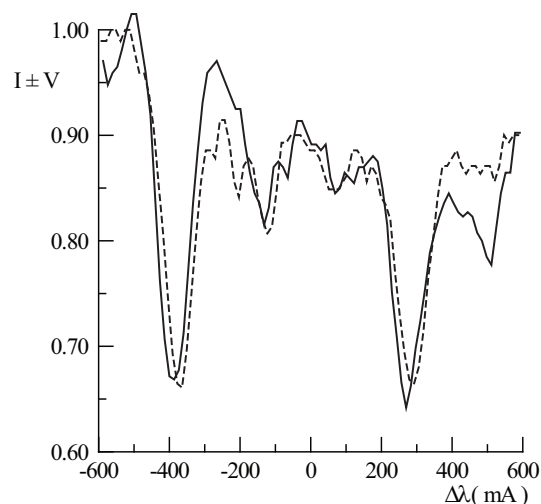


Рис. 4. Розщеплення у дослідженій плямі ліній FeI 6093.66 (ліворуч) і 6094.419 (праворуч)

і для нього $g_1 \approx 1.0$, то тоді $g_{\text{eff}} = +0.25$. Якщо ж має місце частковий ефект Пашена–Бака, то може бути, наприклад, $g_{\text{eff}} = +0.01$ або $+0.02$. В останньому випадку буде приблизно таке ж розщеплення, яке відзначено спостереженнями.

Можна оцінити для цієї лінії порогове значення магнітного поля B_p , яке призводить до часткового ефекту Пашена–Бака:

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

де m_j — магнітне квантове число, g — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора, B_p — індукція магнітного поля, $|E_i - E_k|$ — різниця енергій в атомі між термами мультиплетної структури.

Приймаючи, відповідно до таблиць мультиплетів [22], що $|E_i - E_k| \approx 0.01$ еВ, а також враховуючи, що $\mu_B = 0.58 \cdot 10^{-8}$ еВ/Гс, маємо для лінії FeI 6094.419 величезне значення $B_p \approx 500\,000$ Гс = 500 кГс.

На перший погляд, такі фантастично сильні можуть бути хіба що на білих карликах. Є, однак, спостережні дані на користь того, що такого ж порядку поля можуть короткочасно (≈ 10 хв) виникати й на Сонці — в потужних сонячних спалахах [10]. На них вказують характерні поляризаційні ефекти в лінії FeI 5434.5, зафіксовані на значних відстанях від її центру (≈ 0.2 Å). Поза спалахами таких ефектів не помічено.

Для спалахів гіпотеза про поля ~ 500 кГс здається хоча й надекзотичною, але такою, яку можна розглядати. Адже спалах — це гігантський вибух, який суттєво розігріває й іонізує плазму, підсилює можливі струми, стискає гарячою плазмою маломасштабні силові трубки. Саме шляхом вибуху акад. А.Д.Сахаров досяг в лабораторних умовах полів у 25 МГс, підірвавши кільцевою вибухівкою соленоїд, що створював поле у 30 кГс.

Інша річ — сонячна пляма чи факел. Це відносно стаціонарні утворення. Якщо незрозумілий ефект зі знаком розщеплення в лінії FeI 6094.419 виникає і в плямах (як свідчать наші дані), і в факелах (як знайдено авторами [21]), то тут ідея кумулятивної дії вибуху вже не проходить. Неймовірно, щоб маломасштабними магнітними полями величиною ~ 500 кГс були буквально нашпиговані всі активні області на Сонці — і плями, і факели...

В майбутньому планується перевірити висловлені вище припущення на основі ґрунтового вивчення нового спектрального матеріалу.

1. Барановский Э.А., Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г. Магнитные поля и термодинамические условия в солнечной вспышке 8 июня 1989 года // Кинематика и физика небес. тел. — 1991. — 7. — № 3. — С. 52–58.
2. Венглі́нський Є., Лози́цкий В., Сліпченко О. Вимірювання сонячних магнітних полів методом комп'ютерного сканування зееман-спектрограм // Вісник Київського національного університету ім. Т.Шевченка. Астрономія. — 2006. — Вип. 43. — С. 3–7.
3. Зема́нec Е.Н., Сте́фанов А.П. Расщепление некоторых спектральных линий FeI в магнитном поле // Вестник Киевского ун-та, сер. астрономии. — 1976. — Вып. 18. — С. 20–36.
4. Курочка Л.Н., Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г., Нагулин Ю.С. Одновременные наблюдения солнечного спектра в инфракрасной и видимой областях с помощью нового эшелюного спектрографа горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. — 1988. — вып. 30. — С. 46–50.
5. Лози́цкая Н.И., Лози́цкий В.Г. Об инструментальном контуре эшелюного спектрографа горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. — 1982. — Вып. 24. — С. 41–44.
6. Лози́цкий В.Г. О калибровке магнитографических измерений с учетом пространственно неразрешимых неоднородностей // Physica Solariter., Potsdam. — 1980. — № 14. — Р. 88–94.
7. Лози́цкий В.Г. Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце: Дис... доктора ф.-м. наук: 01.03.03 — Киев, 2003. — 299 с.
8. Лози́цкий В.Г. Проблема надпотужних магнітних полів в атмосфері Сонця // Кинематика и физика небес. тел. — 1993. — 9, № 3. — С. 23–32.
9. Лози́цкий В.Г. Солнечные магнитные поля и эффект Пашена–Бака // Изв. Крымской Астрофиз. obs. — 2009. — 104, № 6. — С. 132–137.
10. Лози́цкий В.Г. Спостережні дані на користь існування магнітних полів з індукцією 105 Гс в активних областях на Сонці // Журнал фізичних досліджень. — 2009. — 13, № 2. — С. 2903–1-2903-8.
11. Обри́дко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука, 1985. — 256 с.
12. Полу́пан П.Н. Солнечная установка // Публ. Киев. Астрон. obs. — 1962. — № 10. — С. 59–64.
13. Северный А.Б. Некоторые результаты исследований нестационарных процессов на Солнце // Астрон. ж.-л. — 1957. — 34. — № 5. — С. 684–693.
14. Северный Ф.Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М., 1988. — 224 с.
15. Скоморо́вский В.И. Мозаика для измерения магнитных полей // В сб.: Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца, Вып. 26. — М.: Наука, 1974. — С. 220–221.
16. Фриш И.Е. Оптические спектры атомов. — М.-Л.: Физматгиз, 1963. — 640 с.

17. *Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.* The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // *Solar Phys.* — 1973. — **31**, № 2. — P. 307–316.
18. *Landi Degl'Innocenti E.* On the effective Lande factor of magnetic lines // *Solar Phys.* — 1982. — **77**, № 1/2. — C. 285–289.
19. *Lozitsky V.G., Staude J., Gordovskyy, M.Yu.* Problem of interpretation of solar magnetic field observations // Всероссийская ежегодн. конф. по физике Солнца, Тезисы докл., Санкт-Петербург, Пулково, ГАО РАН, 2009. — P.85.
20. *Rachkovsky D.N., Tsap T.T., Lozitsky V.G.* Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods // *Journ. of Astrophys. and Astronomy.* — 2005. — **26**, № 4. — C. 435–445.
21. *Solanki S.K., Stenflo J.O.* Properties of solar magnetic fluxtubes as revealed by FeI lines // *Astron. and Astrophys.* — 1984. — **140**, № 1. — P. 185–198.
22. *Moore C.E.* A multiplet table of astrophysical interest, revised edition. p.1 — table of multiplet // *Contr. Princeton Univ. Observ.*, № 20. — Princeton. — New Jersey, 1945. — 110 P.

Надійшла до редакції 14.07.2010