

УДК 523.987

Співставлення магнітних полів в активних протуберанцях, виміряних по лініях $D_3\text{HeI}$ та $H\alpha$

В.Г. Лозицький, О.А. Ботигіна

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

Проаналізовано стоксові профілі $I \pm V$ ліній $D_3\text{HeI}$ і $H\alpha$ в активних протуберанцях 12 липня 2004 року та 24 липня 1999 року. Вимірювання магнітних полів методом “центрів ваги” показали, що магнітне поле в протуберанцях було в межах від -200 до $+580$ Гс (різним для різних висот протуберанця). На висоті 6 Мм виявлені слабкі, вузькі, розщеплені та поляризовані особливості в ядрі лінії $D_3\text{HeI}$, які вказують на субтелескопічне (<1 Мм) магнітне поле величиною 3300 Гс. В обох протуберанцях виявлений цікавий ефект — антикореляцію виміряних індукцій по лініям гелію та водню.

СОПОСТАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНЫХ ПРОТУБЕРАНЦАХ, ИЗМЕРЕННЫХ ПО ЛИНИЯМ $D_3\text{HeI}$ И $H\alpha$, Лозицкий В.Г., Ботыгина О.А. — Проанализированы стоксовы профили $I \pm V$ линий $D_3\text{HeI}$ и $H\alpha$ в активных протуберанцах 12 июля 2004 года и 24 июля 1999 года. Измерения магнитных полей методом “центров тяжести” показали, что магнитное поле в протуберанцах находилось в пределах от -200 до $+580$ Гс (разным для разных высот протуберанца). На высоте 6 Мм обнаружены слабые, узкие, расщепленные и поляризованные особенности в ядре линии $D_3\text{HeI}$, которые указывают на субтелескопическое (<1 Мм) магнитное поле величиной 3300 Гс. В обоих протуберанцах обнаружен интересный эффект — антикорреляция измеренных индукций по линиям гелия и водорода.

COMPARISON OF MAGNETIC FIELDS IN AN ACTIVE PROMINENCE MEASURED IN $D_3\text{HeI}$ AND $H\alpha$ LINES, by Lozitsky V.G., Botygina O.A. — The $I \pm V$ Stokes profiles in 12 July 2004 and 24 July 1999 active prominences are analyzed. Measurements of the magnetic fields by the method of “centers of gravity” shown, that magnetic field in prominence was in range from -200 to $+580$ G (different for various heights of prominence). Weak, narrow, splitted and polarized features were found in $D_3\text{HeI}$ line core for height of 6 Mm, which indicate on subtelescopic (<1 Mm) magnetic field of 3300 G. An interesting effect was found for heights of 2–10 Mm for both prominences — anticorrelation of measured magnetic strengths in helium and hydrogen lines.

Ключевые слова: магнитные поля в протуберанцах.

Key words: magnetic fields in prominences.

1. ВСТУП

Магнітні поля в короні визначають велику кількість явищ — від переносу МГД хвиль до синхротронного випромінювання в радіодіапазоні. Прямих даних про корональні магнітні поля дуже мало (у порівнянні з фотосферними полями). Одночасні виміри в лініях $H\alpha$ і $K\text{CaII}$ в області холодної емісії ($5 \cdot 10^4$ К) на відстані 10^5 км від лімбу дали значення 100–200 Гс [6]. Зі спектрополяриметричних спостережень спікул в лінії HeI 10830 Å на висоті 2000 км отримано значення біля 10 Гс [8]. Значення магнітного поля в корональній петлі, отримане зі спостережень супутника Hinode [10], виявилось 39 ± 8 Гс.

Сонячні протуберанці є корональними об'єктами, але питання про магнітні поля в них досі залишається відкритим. За даними [9] поля протуберанців — від декількох до трьох тисяч гаус. Дуже сильні магнітні поля в протуберанцях (порядку кількох кілогаус) отримані раніше в роботах [1–4, 5]. Існує прямий зв'язок між величиною поля і доплерівською швидкістю, що вказує на рух речовини вздовж силових ліній [7, 9].

Фізичні умови в протуберанцях визначені давно: ці утворення світяться в результаті перевипромінювання радіації від нижніх шарів атмосфери Сонця з невеликою часткою переходів під дією електронних ударів. Цим визначається їх температура ≈ 7000 К і електронна густина — від 10^9 до 10^{11} см $^{-3}$ [11].

2. МАТЕРІАЛ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Спектр активного протуберанця 12 липня 2004 року був сфотографований з експозицією 1 хв. (починаючи з 8:48:50 UT) на ешеліному спектрографі горизонтального сонячного телескопу Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ). Інструмент дозволяє спостерігати одночасно область від 3800 до 6600 Å зі спектральним розділенням 40 мÅ в області лінії $D_3\text{HeI}$ і 50 мÅ в області лінії $H\alpha$.

Протуберанець 12 липня 2004 року виник після лімбового сонячного спалаху балу M1.6, який по даним GOES мав пік рентгенівського випромінювання о 8:10 UT. Після проявлення та фіксування фотопластинки виявилось, що нормальні почорніння фотоемульсії мають лише лінії $H\alpha$ і D_3HeI , а інші лінії сильно недоекспоновані. Тому вивчались лише дві вказані лінії, які мають ефективні фактори Ланде $g = 1.05$ і 1.06 , відповідно.

Спектр протуберанця 24 липня 1999 року був також сфотографований на ГСТ АО КНУ, початок експозиції тривалістю 1 хв. був о 6:49 UT. Також і в цьому протуберанці лише лінії $H\alpha$ і D_3HeI мали нормальні почорніння, достатні для спектрофотометричного аналізу.

3. СПІВСТАВЛЕННЯ ВИМІРІВ В ЛІНІЯХ D_3HeI ТА $H\alpha$

Виміри магнітних полів методом “центрів ваги” показали, що магнітне поле в протуберанці 12 липня 2004 року було в межах від -200 до $+300$ Гс (різним для різних висот протуберанця). Протуберанець 24 липня 1999 року мав межі магнітного поля від -12 до $+580$ Гс. Типові похибки вимірювань ± 100 Гс для обох ліній. Дані “центра ваги” відображають усереднене поле, знайдене в наближенні його однорідності в межах площі вхідної щілини. Щоб знайти величину поля, близьку до його амплітудних (локальних) значень, доцільно виміряти розщеплення не “центрів ваги”, а вершин емісії. Це пов’язано з тим, що в профілях як емісійних, так і абсорбційних ліній часто спостерігається своєрідний “V-ефект”, коли ядро лінії розщеплюється більше, ніж крила, а взаємне розміщення бісекторів $I+V$ та $I-V$ профілів нагадує латинську літеру V.

Для цього після побудови профілів ліній в інтенсивностях знаходились їх бісектори. Розщеплення бісекторів калібрувалось у напруженостях магнітного поля. Оскільки в центрі лінії завжди є деякі особливості типу плато або подвійної-потрійної вершини, то краще вимірювати максимальне розщеплення не в самому центрі лінії, а дещо нижче по рівню інтенсивності — наприклад, на рівні 0.9 від максимальної інтенсивності, де хід інтенсивності вже достатньо крутий, а величина розщеплення менше залежить від “шумових” спотворень інтенсивності. Таке поле, позначене як $B_{0.9}$, представлено на рис.1 для висот 2–10 Мм в обох протуберанцях.

Видно, що тут діапазон величин поля суттєво ширше, від -700 Гс до $+3100$ Гс для протуберанця 12 липня 2004 року та від -120 до $+2030$ Гс для протуберанця 24 липня 1999 року, що набагато більше похибок вимірів (± 100 Гс). З рисунка 1 видно, що має місце цікавий ефект: антикореляція магнітних полів в лініях D_3 та $H\alpha$, причому ця антикореляція поширюється навіть на зміну полярності поля.

Виникає питання про можливу випадковість такого співвідношення величин поля. Можливо, що ця тенденція при більш широкому співставленні даних (включаючи інші висоти) буде порушена?

Все-таки, на наш погляд, навіть якщо ця антикореляція проявляється в обмеженому діапазоні висот (однак її величина значно перевищує похибки вимірювань), вона варта уваги, зважаючи на ймовірну неоднорідність магнітного поля в протуберанці. Адже ті особливості неоднорідного поля, які проявляються в обмеженому діапазоні висот, необов’язково мають проявлятися на інших висотах.

Поставлені питання дуже важливі для розуміння природи магнітних полів в протуберанцях, тому для більш впевнених міркувань по даному питанню потрібні додаткові ретельні дослідження.

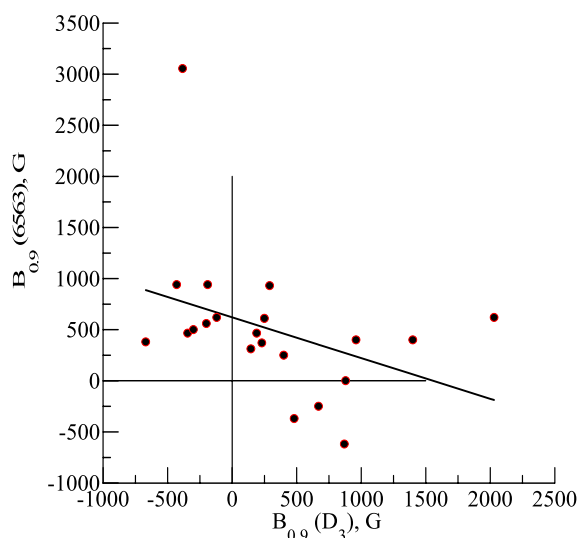


Рис. 1. Співставлення вимірювань $B_{0.9}$ по лініях D_3 і $H\alpha$ для висот 2–10 Мм. Тут представлені дані для обох протуберанців

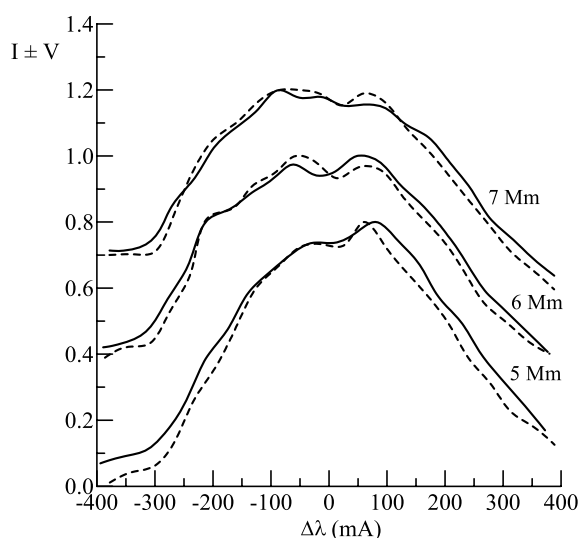


Рис. 2. Співставлення профілів $I \pm V$ лінії D_3HeI для трьох різних висот протуберанця 12 липня 2004 року, які вказані в правій частині рисунка.

4. ВУЗЬКІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ІНТЕНСИВНОСТІ В ЦЕНТРІ ЛІНІЇ D₃HeI

Ще один цікавий ефект був знайдений при вивченні розподілу інтенсивності в центрі лінії (рис. 2). На цьому рисунку всі розподіли інтенсивностей нормовані на найбільшу інтенсивність у відповідному фотометричному розрізі. Для зручності при порівнянні профілів їх було зсунуто на -0.2 та $+0.2$ одиниці вздовж осі ординат для висот 5 та 7 Мм по відношенню до профілів для висоти 6 Мм.

Видно, що в ядрі лінії, на відстанях $|\Delta\lambda| < 150$ мÅ від центру, спостерігається в цілому хаотичний хід профілів $I + V$ (суцільні лінії) по відношенню до профілів $I - V$ (штриховані лінії). Але в одному фотометричному розрізі, а саме для висоти 6 Мм, картина прояснюється — тут добре помітна двохвершинність емісії та зміна знаку стоксового параметра V при переході через центр лінії. Такий розподіл інтенсивності можна отримати тоді, коли на високий емісійний пік в цілому неполяризованої емісії накладається ще одна вузька емісійна картина, яка має значне розщеплення ($\Delta\lambda_H \approx 56$ мÅ), типову для ефекту Зеємана кругову поляризацію з її інверсією в центрі лінії і дуже вузькі профілі інтенсивності — біля 100 мÅ (тоді як ширина основних профілів емісії набагато більше — приблизно 600 мÅ). Величина магнітного поля у вузькій компоненті виявляється тоді рівною 3300 Гс, тобто досить високою — як у плямах на рівні фотосфери.

5. ВИСНОВКИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати свідчать про те, що в протуберанцях навіть на висотах до 10 Мм можливі досить сильні поля “кілогаусового” діапазону. Хоча усереднене магнітне поле, виміряне методом “центрів ваги”, було в межах від -200 до $+580$ Гс (різне для різних висот протуберанця), локальні поля, ймовірно, були на порядок сильнішими. На користь цього свідчать два ефекти: а) значне розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$ в ядрах ліній на висоті 0.9 від рівня центральної інтенсивності і б) прямі спостереження вузьких, поляризованих і розщеплених особливостей на одній з висот протуберанця (6 Мм). У першому випадку маємо поля від -700 до $+3100$ Гс, у другому 3300 Гс.

Цілком несподівано виявлено ефект антикореляції виміряних значень магнітного поля по лініях водню і гелію (рис. 1). Як відомо авторам, цей ефект зафіксовано вперше. Принаймні, для вимірювань магнітного поля на рівні фотосфери завжди відмічається позитивна кореляція даних по різних спектральних лініях.

Ймовірною причиною вказаного ефекту є те, що лінії водню і гелію світяться в областях з різною температурою: водень світиться при нижчій температурі, а гелій — при вищій. Якщо в неоднорідному протуберанці існують маломасштабні магнітні волокна, в яких температура поступово спадає з наближенням до їх внутрішніх областей, тоді як магнітне поле — навпаки зростає, то якісно можлива ситуація, подана на рис. 1.

1. Башкирцев В.С., Смольков Г.Я., Шмелевский В.Н. Об измерениях магнитного поля в солнечных активных протуберанцах // В сб.: Исслед. по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. — Вып. 20. — М.: Наука, 1971. — С. 212–221.
2. Лозицкий В.Г. Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце: Дисс. ... д-ра ф.-м. наук: 01.03.03 — Киев, 2003. — 299 с.
3. Лозицкий В.Г., Пасечник М.Н. О магнитных полях в активном протуберанце, измеренных по линиям различных элементов // Вестник Киевского университета, Астрономия. — 1986. — Вып. 28. — С. 40–43.
4. Лозицкий В.Г., Стаценко М.М. Исследование магнитного поля в лимбовой солнечной вспышке // Известия Крым. Астрофиз. обсерватории. — 2008. — **104**, № 2. — С. 28–28.
5. Шпитальная А.А., Вяльшин Г.Ф. О магнитных полях в протуберанцах // Солнечные данные. — 1970. — № 4. — С. 100–107.
6. Casini R., Lopez Ariste A., Tomczyk S., Lites W.B. Magnetic maps of prominences from full Stokes analysis of the HeI D3 line // Ap. J. Let. — 2003. — **598**. — P. L67–L70.
7. Klepikov V.Yu. Magnetic field and Doppler velocity correlation in quiescent solar prominences // Radiophysics and quantum electronics. — 1996. — **39**, № 10. — P. 857–861.
8. Paletou F., Lopez Ariste A., Bommier V., Semel M. Full-Stokes spectropolarimetry of solar prominences // Astron. Astroph. — 2001. — **375**. — P. L39–L42.
9. Smolkov G.Ya., Bashkirtsev V.S. Magnetic fields in solar prominences // Contribution of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso. — 1976. — **6**. — P. 175–194. (Proceedings of the 7th Regional Consultation on Solar Physics “Solar Activity and Solar-Terrestrial Relations”, September 24–28, 1973).
10. Trujillo Bueno J., Merenda L., Centeno R., Collados M., Landi Degl’Innocenti E. The Hanle and Zeeman effects in solar spicules: a novel diagnostic window on chromospheric magnetism // Ap.J. Let. — 2005. — **619**. — P. L191–L194.
11. Yakovkin N.A., Zeldina M.Yu. The helium radiation in prominences // Sol. Phys. — 1971. — **19**. — P. 414–430.

Надійшла до редакції 28.07.2010