

ДО ПИТАННЯ МАГНЕТНИХ ПОЛІВ І ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ У СУПЕРГРАНУЛАХ

І. Лаба

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
Астрономічна обсерваторія,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна
(Отримано 31 липня 2002 р.)*

Вивчено магнетні поля H_{\parallel} і поля швидкостей V_{\parallel} у спокійних ділянках Сонця за спостереженнями, виконаними в Кримській астрофізичній обсерваторії на новому БСТ і подвійному магнетографі й лініях FeI $\lambda 4808 \text{ \AA}$, FeI $\lambda 5233 \text{ \AA}$, CaI $\lambda 6103 \text{ \AA}$, MgI $\lambda 5184 \text{ \AA}$, $D_1 \text{ NaI}$.

Одержано незначні зсуви в частотному розподілі променевих швидкостей як у ділянку опускання (для $H_{\parallel} > \text{шум}$), так і в ділянку руху газу вгору ($H_{\parallel} = 0$). Така тенденція проявлялась систематично для всіх ліній. Величини зміщень приблизно дорівнюють 2σ (σ — середнє квадратичне відхилення). Максимальний зсув відповідає 30 м/с. Максимальні середні швидкості належать до найглибшої ($\lambda 4808 \text{ \AA}$) і найвищої ($D_1 \text{ NaI}$) ліній, що вказує на зростання швидкості як у глибину, так і вгору у хромосфері.

Ключові слова: Сонце, супергрануляція, магнетне поле, коливання, швидкість, рух.

PACS number(s): 96.60.Mz

І. ВСТУП

Проблемі магнетних полів і вертикальних рухів у супергранулах присвячено немало праць. Однак немає достатньої ясності щодо руху плазми в супергранулах (СГ), межі яких збігаються з хромосферною сіткою [1]. Це насамперед належить до вертикальних рухів газу як у центральних частинах СГ комірок, так і на їх межах. Дані різних авторів значно відрізняються, а іноді — суперечливі. Так, на опускання газу в місцях концентрації магнетного поля на межах сітки вказано в [2–7]. На основі виміряних променевих швидкостей V_{\parallel} на різних рівнях атмосфери Сонця автори [8] одержали опускання газу на межах СГ лише в лінії FeI $\lambda 5233 \text{ \AA}$. Ця лінія утворюється в нижній фотосфері, й отримані результати вказують на те, що середня фотосфера — верхня межа проникаючої конвекції [9–10]. В інших дослідженнях [11–13] поряд з опусканням газу в місцях концентрації магнетного поля виявлено підняття газу. Наступні роботи [14–16] не розв'язали проблеми.

Повільно змінну (конвективну) вертикальну швидкість вивчали С. І. Гопасюк і Т. Т. Цап [17–20]. Вони одержали величину швидкості опускання на межах СГ комірок, що не виходила за межі 3σ . Автори фактично знехтували малою величиною одержаної швидкості й дійшли висновку, що максимуми напруженості магнетного поля й максимальні яскравості у вузлах хромосферної сітки локалізуються там, де променева швидкість приблизно дорівнює нулеві.

Автори [21] повторили згадані вище дослідження не лише для місць концентрації магнетного поля, але й для центральних частин СГ комірок, де магнетне поле відсутнє ($H_{\parallel} = 0$). Вони отримали зміщення частотного розподілу за швидкостями, що при-

близно дорівнював 2σ . Причому одержано систематичну тенденцію появи зсувів у ділянку опускання газу для частотних розподілів швидкостей, побудованих згідно з вимірами в місцях, де магнетне поле перевищувало шуми магнетографа, і в ділянку підняття газу — в місцях з $H_{\parallel} = 0$ (центральні частини СГ комірок).

Фон Уекскіль [22] вивчав характер руху у верхній хромосфері, використовуючи спектрограми. Він знайшов, що в центральних частинах СГ комірок рух переважно коливний, тоді як на межах комірок — стохастичний. Стохастичність автори пояснюють початком упорядкування магнетних силових ліній, виштовхнутих із-під фотосфери ґрануляційним рухом.

Автор праці [23], взявши до уваги результати [17–21], дійшов висновку, що вертикальний рух газу вгору у центральних частинах СГ комірок супроводжується постійним осіданням деякої його частини на різних рівнях атмосфери; решта газу, йонізувавшись, продовжує свій рух у корону. Так поводить себе не тільки газ, а й окремі елементи плазми з магнетним полем, виштовхнуті із-під фотосфери конвективним рухом.

Ґонтітакіс [24] застосував метод гістограм до меж СГ комірок і їх внутрішніх частин у спокійних ділянках перехідного регіону. Він одержав червонозміщені розподіли на межах СГ комірок (опускання плазми) і синьозміщені — у внутрішніх частинах комірок (рух плазми вгору). Зміщення систематичні, але малі — в межах похибок.

Слід зауважити, що вертикальні рухи в СГ відіграють вирішальну роль у балансі маси та енергії у хромосфері, перехідній ділянці й короні; тому їх слід вивчати.

II. СПОСТЕРЕЖЕННЯ Й ОБРОБКА ДАНИХ

Спостерігали магнетні поля $H_{||}$ і променеві швидкості $V_{||}$ на новому БСТ і подвійному магнетографі Кримської астрофізичної обсерваторії. Вимірювали магнетні поля й променеві швидкості в лініях FeI $\lambda 4808 \text{ \AA}$, FeI $\lambda 5233 \text{ \AA}$, CaI $\lambda 6103 \text{ \AA}$, MgI $\lambda 5184 \text{ \AA}$, D_1 NaI. Сканували ділянки в центрі диска Сонця з розділенням $1'' \times 4''$, їхні розміри становили $\sim 160'' \times 180''$. Магнетні поля калібрували шляхом реєстрації променевих швидкостей біля E і W — країв Сонця за допомогою насадки, що складалася з поляроїда й фазової пластинки $\lambda/4$.

Використано метод обробки даних спостережень, який запропонували С. І. Гонасюк і Т. Т. Цап [17–19]. Його суть полягає в тому, що за одночасними вимірами магнетних полів і променевих швидкостей ми визначили для кожного скану в місцях максимальної напруженості магнетного поля величину і знак променевої швидкості (межі СГ комірок). Крім того, визначили величину і знак променевої швидкості в місцях, де напруженість магнетного поля дорівнювала нулеві (центральні частини СГ комірок). Потім, використовуючи всі виміри в певній лінії, будували для неї загальну гістограму частотного розподілу за швидкостями: окремо для максимальних напруженостей магнетного поля і для місць, де поле було відсутнє ($H_{||} = 0$).

Записи (скани) $H_{||}$ і $V_{||}$ з однаковою ймовірністю включають коливні швидкості з усіма можливими фазами й амплітудами. Тому при достатньо великій кількості вимірів середнє значення коливних швидкостей дорівнюватиме нулеві (гістограма симетрична щодо нульового значення променевої швидкості). Коливні швидкості більш ніж на порядок перевищують реальні швидкості поступального переміщення газу в сонячній атмосфері. Тому в нашому випадку швидкості поступального руху, якщо вони існують, повинні приводити до асиметрії або зсувів (залежно від величини швидкості поступального руху) в гістограмі.

III. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 1–2 кільцями нанесено частотні розподіли швидкостей, побудовані згідно з вимірами лише для ліній $\lambda 6103 \text{ \AA}$, $\lambda 5233 \text{ \AA}$. Решта побудованих гістограм повторюють гістограми, подані в [20]. По осі абсцис відкладено значення швидкостей у місцях максимальної напруженості елементів магнетного поля (рис. 2) або в місцях, де поле відсутнє (рис. 1), а по осі ординат — кількість випадків у процентах. На гістограмах швидкості опускання по осі абсцис відкладено справа від нульового значення, а швидкості підняття — зліва. З рис. 1–2 видно, що розподіл за швидкостями незначно зсунутий щодо нульового значення променевої швидкості. На рис. 1 подано зсув у бік підняття газу, тоді як на рис. 2 — у бік опускання газу.

Як і в [17–21], спостережувані частотні розподіли швидкостей описуються експонентою

$$\varphi(V) = b \cdot e^{-\frac{|V-V_1|}{V_0}}, \quad (1)$$

де b — нормуючий множник, V_1 характеризує зсув розподілу за швидкостями, а параметр V_0 визначає швидкість зменшення кількості випадків з ростом величин швидкості і є характеристикою середньої швидкості. Обчислені методом найменших квадратів за спостережуваним розподілом, апроксимуючі криві на рис. 1–2 нанесені суцільними лініями. Максимальне зміщення частотного розподілу в ділянку опускання газу отримано згідно з вимірами в лінії D_1 NaI (30 м/с), але воно менше від 3σ . Підтверджено результати, одержані в [20]: систематична для всіх ліній тенденція зміщення частотного розподілу в бік опускання газу за наявності максимальних напруженостей магнетного поля (межі СГ комірок) і в бік руху газу вгору — при відсутності поля (центральні частини СГ комірок).

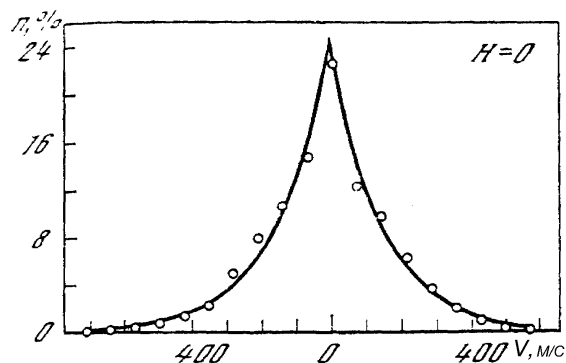


Рис. 1. Частотний розподіл за швидкостями, побудований згідно з вимірами в лінії $\lambda 6103 \text{ \AA}$

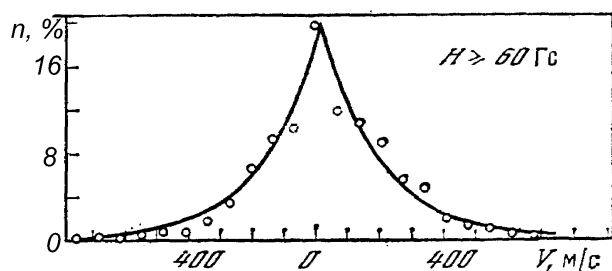


Рис. 2. Частотний розподіл за швидкостями, побудований згідно з вимірами в лінії $\lambda 5233 \text{ \AA}$

Максимальні значення (V_0) середньої швидкості руху газу одержано для $\lambda 4808 \text{ \AA}$ (найглибшої) і D_1 NaI (найвищої), що вказує на зростання спостережуваної за променем зору швидкості як у глибину, так і у висоту.

IV. ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згідно з існуючими поглядами, спостережувані на поверхні Сонця розподіли магнетних полів і швидкостей є результатом конвективних рухів у підфотосферних шарах [1]. Відомо, що при стаціонарній конвекції типу Бенара в центральній частині конвективної комірки газ піднімається, потім розтікається до периферії і там опускається. Завдяки вмороженості горизонтальні рухи виноситимуть (згрібатимуть) силові лінії магнетного поля до краю комірок, де зіткнення зустрічних потоків приводить до зростання напруженості поля, тоді як у центральних частинах комірок напруженість буде мінімальною (або дорівнюватиме нулеві), що насправді і спостерігаємо. Конвекція фактично переносить речовину, енергію, магнетне поле з дна конвективної зони на поверхню Сонця, виконуючи роль конвективного динамо, і розв'язує проблему нагромадження магнетного потоку.

Для трьох рівнів сонячної атмосфери (фотосфера, хромосфера, перехідна ділянка) експериментально підтверджено існування малих вертикальних швидкостей, швидкостей опускання плазми на межах СГ комірок і швидкостей руху плазми вгору у її центральних частинах. Цей факт також підтверджується вимірюваннями асиметрії фраунгоферових ліній у центрі сонячного диска для ділянок з магнетним полем і без поля. Лінії зміщені в синій бік у ділянках без магнетного поля (центральні частини СГ комірок — рух плазми вгору до спостерігача), причому ця асиметрія набагато більша, ніж червонозміщена в ділянках із магнетним полем (межі СГ комірок — рух плазми від спостерігача).

Дані спостережень з високим просторовим і часовим розділенням як наземних, так і космічних апаратів (SOHO, Yohkoh, TRACE, Ulyss і ін.) підтверджують тісний зв'язок між фотосферою та короною: фотосферні структури й магнетні поля продовжують

тися в корону як для активних, так і для спокійних ділянок. Підігрів корони пов'язаний з наявністю магнетного поля. Уздовж температурного перепаду (обл. $T_{\text{мін}}$ — хромосфера — перехідний регіон — корона) співіснують структури подібних просторових масштабів, і всі зміни у верхній атмосфері — це відгук на зміни у фотосфері. Існує постійне перенесення магнетної енергії від фотосфери в корону. Виявлені в перехідній ділянці малі вибухові події (мікро-, нано-спалахи, мерехтіння), які є результатом магнетних перез'єднань, а також хромосферне випаровування — це механізм постачання маси та енергії в корону.

V. ВИСНОВКИ

Висхідний рух фотосферної речовини автор сприймає як вимушене транспортування маси (й енергії) вздовж наявних магнетних структур атмосфери Сонця, маси холодної (але з більшою густиною) в ділянки гарячіші (але з меншою густиною). Вимушуючою силою тут, насамперед, виступає градієнт газового тиску, зумовлений температурним градієнтом. Процес руйнування ґранул (в т.ч. “вибухаючих”) при наявності внутрішніх і зовнішніх факторів супроводжується створенням нових форм, маломасштабних “плазмових елементів”, зорганізованих у своєрідні згустки (типу “бульбашок”, “плазмоїдів”, трубок). Повільне магнетне перез'єднання у фотосфері, структурні вихори магнетного поля, постійне витікання магнетного потоку — це чинники, які підсилюють процес утворення плазмових згустків з магнетним полем. Елементи, що містять у собі магнетний тиск, можуть рухатися вгору у стратифікованому середовищі з прискоренням і досягти перехідної ділянки й корони, а також частково осідають на відповідних рівнях атмосфери.

Автор щиро дякує Василю Лабі за допомогу в опрацюванні літератури й оформленні статті.

-
- [1] R. B. Leighton, R. W. Noes, G. W. Simon, *Astrophys. J.* **135**, 474 (1962).
 [2] S. Elliot, *Sol. Phys.* **6**, 28 (1969).
 [3] A. S. Tanenbaum, J. M. Wilcox, E. N. Frazier, R. Howard, *Sol. Phys.* **9**, 328 (1969).
 [4] E. N. Frazier, *Sol. Phys.* **14**, 89 (1970).
 [5] S. Musman, D. M. Rust, *Sol. Phys.* **13**, 261 (1970).
 [6] F. L. Deubner, *Sol. Phys.* **17**, 6 (1971).
 [7] A. Skumanich, C. Smythe, E. N. Frazier, *Astrophys. J.* **200**, 747 (1975).
 [8] S. P. Worden, G. W. Simon, *Sol. Phys.* **46**, 73 (1976).
 [9] A. Nesis, *Mitt. Astron. Ges.* **67**, 289 (1986).
 [10] A. Nesis, *Astron. Astrophys.* **182**, L5–L7 (1987).
 [11] I. Appenzeller, E. H. Schroter, *Sol. Phys.* **4**, 131 (1968).
 [12] R. Howard, *Sol. Phys.* **16**, 21 (1971).
 [13] Э. Е. Дубов, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **39**, 279 (1969).
 [14] R. G. Giovanelli, *Sol. Phys.* **67**, 211 (1980).
 [15] L. J. November, J. Toomre, K. B. Gebbie, *Astrophys. J.* **245**, L123–L126 (1981).
 [16] G. Kuveler, *Sol. Phys.* **88**, 13 (1983).
 [17] С. И. Гопасюк, Т. Т. Цап, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **45**, 3 (1972).
 [18] С. И. Гопасюк, Т. Т. Цап, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **47**, 26 (1973).
 [19] Т. Т. Цап, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **58**, 13 (1978).
 [20] Т. Т. Цап, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **82**, 124 (1990).
 [21] Т. Т. Цап, И. С. Лаба, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **73**, 62 (1985).
 [22] M. Von Uexküll, *Astron. Astrophys.* **208**, 290 (1989).
 [23] I. С. Лаба, *Информ. бюл. УАА.* **7**, 85 (1995).
 [24] C. Gontidakis, *Astron. Astrophys.* **378**, 257 (2001).

SUPERGRANULAR PROBLEMS OF MAGNETIC FIELDS AND VERTICAL MOTIONS

I. Laba

Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv

8 Kyryla i Mefodiya Str., Lviv, UA-79005, Ukraine

e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

According to the observations carried out at the Crimean Astrophysical Observatory, new BST and double magnetograph inside lines: FeI $\lambda 4808 \text{ \AA}$, FeI $\lambda 5233 \text{ \AA}$, CaI $\lambda 6103 \text{ \AA}$, MgI $\lambda 5184 \text{ \AA}$, D_1 NaI at quiet Solar regions magnetic H_{\parallel} and velocity V_{\parallel} fields are investigated.

Insignificant frequency distribution shifts of radial velocities for both falling (when $H_{\parallel} > \text{noise}$) and rising ($H_{\parallel} = 0$) gas motion regions are obtained. This tendency was regular for all lines. Shift magnitudes roughly equal 2σ (where σ means rms deviation). The maximum shift corresponds to $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The maximum average velocities correspond to the deepest ($\lambda 4808 \text{ \AA}$) and highest (D_1 NaI) lines, indicating velocity growths to the depth and up to the chromosphere.