

УДК 523.94

М. І. Стоділка

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
79005, м. Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8

Роль зіткнень з атомами нейтрального водню в утворенні ліній нейтрального заліза у незбуреній сонячній атмосфері

Досліджено роль зіткнень з атомами нейтрального водню в утворенні ліній нейтрального заліза у незбуреній сонячній атмосфері. Під впливом зіткнень з атомами водню відбувається перерозподіл атомів Fe I по рівнях. Чутливість центральних глибин ліній до зіткнень з атомами водню залежить від глибини утворення центра лінії та потенціалу збудження нижнього рівня; найчутливішими є помірні та сильні лінії, що утворюються у верхній фотосфері і виникають при переходах з метастабільних та напівстабільних рівнів. Зіткнення з воднем слабо впливають на еквівалентні ширини ліній в центрі диску Сонця; вплив збільшується для сильніших фотосферних ліній при наближенні до краю диска. Еквівалентні ширини та центральні глибини хромосферних ліній, що виникають з метастабільних та напівстабільних рівнів, слабо реагують на зіткнення з воднем.

РОЛЬ СТОЛКНОВЕНИЙ С АТОМАМИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА В ОБРАЗОВАНИИ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА В НЕВОЗМУЩЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ, Стоділка М. І. — Исследована роль столкновений с атомами нейтрального водорода в образовании линий нейтрального железа в невозмущенной солнечной атмосфере. Под влиянием столкновений с атомами водорода происходит перераспределение атомов Fe I по уровням. Чувствительность центральных глубин линий к столкновениям с атомами водорода зависит от глубины образования центра линии и потенциала возбуждения нижнего уровня; наиболее чувствительны умеренные и сильные линии, которые образуются в верхней фотосфере и возникают при переходах с метастабильных и полустабильных уровней. Столкновения с водородом слабо влияют на эквивалентные ширини линий в центре диска Солнца; влияние увеличивается для более сильных фотосферных линий при приближении к краю диска. Эквивалентные ширини и центральные глубины хромосферных линий, которые возникают с метастабильных и полустабильных уровней, слабо реагируют на столкновения с водородом.

THE ROLE OF COLLISIONS WITH NEUTRAL HYDROGEN ATOMS IN THE FORMATION OF NEUTRAL IRON LINES IN THE QUIET SOLAR ATMOSPHERE: Fe I LINES, by Stodilka M. I. — A redistribution of atoms on Fe I levels occurs due to collisions with neutral hydrogen. The sensitivity of central line depth to collisions with hydrogen is determined by the depth of formation of the line center and the excitation potential of the lower level; the moderate and strong lines which arise from metastable and semistable levels in the upper photosphere are most sensitive. The collisions with hydrogen have a weak influence on equivalent linewidths at the center of the solar disk; the influence is stronger for stronger photospheric lines closer to the limb. The equivalent widths and central depths of the chromospheric lines which arise from metastable and semistable levels have a faint response to collisions with hydrogen.

ВСТУП

Зіткнення з атомами нейтрального водню є основним термалізуючим механізмом при утворенні ліній поглинання в атмосферах холодних зірок, в зірках з пониженою металічністю та в холодних областях атмосфери Сонця.

В області температурного мінімуму на Сонці концентрація електронів різко зменшується. За рахунок цього число зіткнень з атомами нейтрального водню стає сумірним з числом зіткнень з електронами.

Лінії заліза, на які дуже багатий спектр Сонця, є прекрасним матеріалом для вивчення фізичних умов в його атмосфері та механізмів утворення ліній. Зокрема, лінії нейтрального заліза чутливі до не-ЛТР-ефектів; на їхнє утворення в області температурного мінімуму впливають зіткнення з воднем.

Проблема зіткнень з атомами водню (процеси: $A(i) + H \rightarrow A(j) + H$, $A(i) + H \rightarrow A^+(j) + H + e$) належить до числа нерозв'язаних задач багаторівневого перенесення випромінювання; невідомі значення поперечних перерізів відповідних ударних збуджень. Так, в роботі [19] запропоновано узагальнити співвідношення Дроїна [11], яке описує зіткнення двох однакових частинок, на випадок двох різних частинок (Li, H). Співвідношення Дроїна є модифікацією класичної формули Томсона, що описує непружне зіткнення атома з електроном. В роботі [15] для оцінки поперечних перерізів зроблено детальніші викладки, правда лише для високозбуджених станів. В роботі [9] порівнюються результати обох співвідношень для атома натрію. Виявилось, що формула Дроїна дає майже на три порядки вищі значення. Детальний огляд проблеми не-ЛТР-утворення ліній в атмосферах холодних зірок (де вклад атомів водню у швидкості ударних зіткнень набагато більший, ніж вклад електронів) зроблено в роботі [14].

Оскільки точніших викладок немає, і в роботі не розглядаються високозбуджені рівні Fe I, ми, як і інші дослідники [12, 13, 21], будемо використовувати узагальнене співвідношення Дроїна [19]. Для зв'язано-зв'язаних переходів формула поперечного перерізу, усередненого по швидкостях, має вигляд

$$\langle\sigma v\rangle = 16\pi a_0^2 \left(\frac{2kT}{\pi\mu}\right)^{0.5} \left(\frac{I_H}{E_i - E_j}\right)^2 \frac{f_j m_A m_e}{m_H(m_H + m_e)} \Psi(w),$$

$$\Psi(w) = \left(1 + \frac{2}{w}\right) \frac{\exp(-w)}{1 + \{2m_e / [(m_H + m_e)w]\}^2} \cdot S_H,$$

де μ — приведена маса двох важких частинок, $w = |E_i - E_j|/kT$. Для зв'язано-вільних переходів вираз подібний.

Приведене співвідношення дає для заліза лише порядок величини і придатне для радіативно дозволених зв'язано-зв'язаних та іонізаційних переходів.

В роботі [13] отримано простіші вирази для ударних зіткнень частинок з електронами та атомами водню. Виявляється, що зіткнення з атомами водню домінують при $n_H > 500n_e$. Для заліза згадані співвідношення Дроїна дають у тридцять разів нижчі значення (таку оцінку отримано при узгодженні хімічного вмісту заліза по лініях Fe I та Fe II в спектрі зірок типу RR Lyr). В роботі [12] при узгодженні профілів сильних ліній Fe I показано, що співвідношення Дроїна описують ударні зіткнення з точністю до множника $0 \leq S_H \leq 5$.

Вплив зіткнень з атомами водню на електронні рівні заліза в значній мірі залежить від зв'язку термів з основним рівнем Fe II та між собою. Зіткнення з атомами водню впливають на терми з низькими потенціалами збудження: вони ефективно термалізують функцію джерела в лінії, але не обов'язково заселеності нижніх рівнів, що визначають оптичну глибину. Заселеності цих рівнів стають рівноважними, якщо сильно завищити швидкості ударних переходів, верхні ж рівні значно менш чутливі до зіткнень з воднем [12]. Герен та ін. [12] показали, що ударні переходи слабо впливають на більшість ліній Fe I, для фотосферних ліній зіткненнями з атомами водню можна знехтувати. Найбільше впливають вони на сильні лінії з малим потенціалом збудження нижнього рівня: ядра сильних ліній Fe I краще відтворюються при врахуванні зіткнень з атомами водню. Для досліджень в роботах [12, 13, 21] вибрано фотосферні моделі атмосфери Сонця, частково виправлені за не-ЛТР-ефекти.

В роботі [21] показано, що еквівалентні ширини Fe I слабо залежать від зіткнень з воднем. Це стосується еквівалентних ширин більшості ліній заліза [12] (в рамках фотосферних моделей).

Закономірності утворення ліній заліза в рамках 1D- та 3D-моделей для різних значень EPL , висоти та ударних швидкостей досліджувались в роботах Н. Г. Щукіної [5, 6, 17].

Ударні зіткнення мають вплив на емісію слабких ліній, які лежать в крилах сильних ліній [23]; в згаданому дослідженні при підгонці до спостережуваних профілів перерізи зіткнень з воднем було зменшено в п'ять разів.

ОСНОВИ МЕТОДУ

Ми розглядатимемо роль ударних зіткнень з нейтральними атомами водню при нерівноважному утворенні ліній нейтрального заліза в рамках моделі атмосфери з хромосферою VAL80C [22]. Атом заліза представлено 19 рівнями Fe I, двома рівнями Fe II та одним рівнем Fe III; рівні кожного терма об'єднувались в один еквівалентний рівень. В моделі атома потенціали збудження термів лежать в інтервалі від 0 до 5.56 еВ. Вони включають метастабільні (a^5D , a^5F , a^3F , a^5P , a^3P + a^3H , b^3F), напівстабільні (z^7D^0 , z^7F^0 + z^7P^0) та частину високозбуджених рівнів (z^5D^0 , z^5F^0 , z^5P^0 , z^3F^0 + z^3D^0 , y^5D^0 + y^5F^0 , z^5G^0 , z^3G^0 , y^3F^0 , y^5P^0 , y^3D^0 , e^5D). Не-ЛТР-коефіцієнти заселеностей решти верхніх рівнів вважали такими ж, як і для останнього модельного рівня Fe I, що дозволяє легко включати їх в рівняння статистичної рівноваги. Наша модель атома охоплює 58 зв'язано-зв'язаних переходів між еквівалентними рівнями. Атомні дані брались з робіт [2, 16]. Для розрахунку коефіцієнта поглинання в неперервному спектрі використовували пакет програм OPACITY, складений Н. Г. Щукіною.

В атмосфері Сонця ван-дер-ваальсівське загасання є основним ме-

ханізмом розширення ліній Fe I. Для постійної загасання ми використовува-вали класичне співвідношення Унзольда (азимутальні терми не враховува-ли). При «підгонці» результатів виникає необхідність штучно завищувати постійну загасання; для переходів s-p, p-s ми використали вдосконалені співвідношення [7], для решти розраховували емпіричний множник E . При розв'язуванні задачі переносу випромінювання для емпіричного множника постійної загасання лінії, що утворюється при переходах між еквівалентними рівнями, ми використали його залежність від потенціалу збуджен-ня нижнього рівня [13, 18].

Для електронних зіткнень, що відповідають радіативно дозволеним зв'язано-зв'язаним переходам, ми використовували співвідношення Реже-мортера, модифіковане фактором Гаунта: $g = 0.2$ для переходів із зміною головного квантового числа і $g = 0.7$ в протилежному випадку [12]. Для заборонених переходів швидкості ударних переходів визначались за допомо-гою напівкласичного визначення перерізів через силу електронного удару ($\Omega = 1$) [3]. Іонізаційні переходи внаслідок електронних зіткнень описува-лись співвідношенням Сітона [1] з $g = 0.1$ для Fe I і $g = 0.2$ для Fe II.

При розрахунку швидкостей зіткнень з атомами водню було використа-но модифіковане співвідношення Дроїна [19] для дозволених та іонізованих переходів. Для заборонених переходів зіткнення з нейтральним воднем враховували методом, застосованим в роботі [20]. Перерізи фотоіоні-заційних переходів взяті з роботи [8].

Заселеності рівнів атома заліза визначались шляхом спільного розв'язку рівнянь переносу та статистичної рівноваги методом прискореної Λ -ітерації з використанням вкладених сіток та прискоренням збіжності [4]. При відомих заселеностях рівнів шляхом формального розв'язку рівняння пере-носу легко отримати профілі ліній. Глибини утворення ліній визначались за функціями вкладу в емісію.

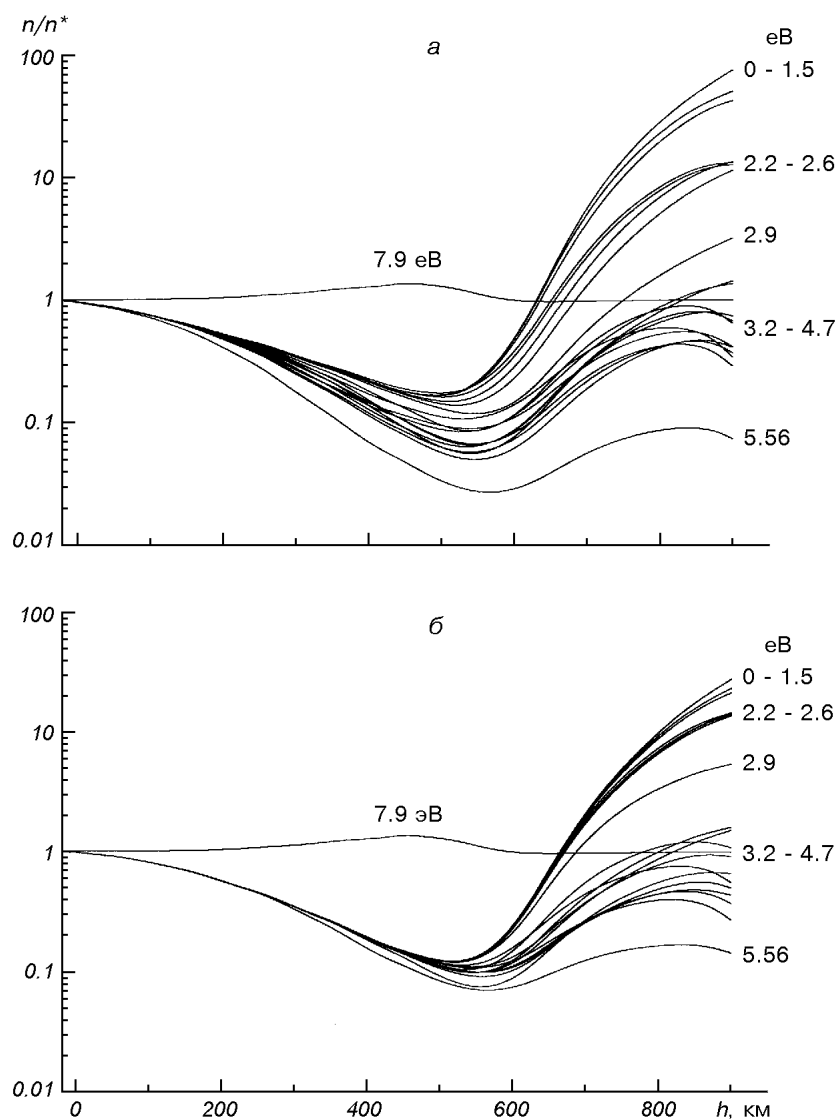
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В умовах атмосфери Сонця, як показують розрахунки, зіткнення з воднем переважають над зіткненнями з електронами у верхній фотосфері та нижній хромосфері ($0 < h < 800$ км). Вони впливатимуть на лінії, що утворюються тут; звичайно, це не стосується ліній, умови утворення яких близькі до рівноважних.

Вплив зіткнень з воднем на заселеності рівнів заліза. Відхилення заселеностей рівнів від рівноважних значень будемо характеризувати пара-метрами $\beta_i = n_i/n_i^*$, де n_i та n_i^* — реальна та рівноважна заселеність i -го рівня відповідно. В нижніх шарах атмосфери заселеності рівнів визначають-ся переважно ударними переходами, за рахунок чого умови утворення ліній близькі до рівноважних: $\beta_i \approx 1$. У верхніх шарах, де переважають радіативні переходи, відчутні радіативні втрати; тут коефіцієнти β_i сильно відріз-няються від одиниці.

На рисунку показана залежність коефіцієнтів β_i від висоти для рівнів нейтрального заліза та основного рівня іону. Розглянуто два випадки: a — враховуються лише електронні зіткнення, b — враховані зіткнення з електронами та атомами водню.

В умовах сонячної атмосфери метастабільні та напівстабільні рівні ($EP < 3$ eV) збіднені у фотосфері та області температурного мінімуму, в нижній хромосфері вони перенаселені. Високозбуджені ж рівні ($EP > 3$ eV) збіднені по всій атмосфері (рисунк a). Це обумовлено тим, що між нижніми та високозбудженими рівнями відбуваються сильні радіативні



Коефіцієнти відхилення від ЛТР для Fe I: *а* — без зіткнень з воднем, *б* — враховано зіткнення з воднем

переходи. У фотосфері не-ЛТР-коефіцієнти для напівстабільних та метастабільних рівнів майже однакові (між метастабільними та напівстабільними рівнями існують слабкі радіативні переходи), внаслідок чого функція джерела приблизно рівна функції Планка. Отже, у фотосфері збудження метастабільних та напівстабільних рівнів практично термалізоване. У вищих шарах (нижня хромосфера) коефіцієнти β_1 суттєво відрізняються від рівноважних через зменшення ролі ударних переходів. Високозбуджені рівні зв'язані сильними УФ-лініями, які в області фотосфери та температурного мінімуму непрозорі і підтримують збудження близьким до теплового [10]. В результаті цього не-ЛТР-коефіцієнти цих рівнів групуються в окрему залежність. Високозбуджений рівень e^5D ($EP = 5.56$ eV) не входить у вказану групу рівнів: він не зв'язаний з нижніми рівнями сильними радіативними переходами.

Основний механізм заселення рівнів Fe I — фотоіонізація та радіативні зв'язано-зв'язані переходи. В області температурного мінімуму має місце незначна переіонізація заліза, що відображається на заселеностях нижніх рівнів; найбільший вклад в переіонізацію дають рівні, потенціал збудження яких лежить в межах $2 < EP < 3$ еВ [8]. Зазначимо, що крім УФ-іонізації, заселеності рівнів Fe I визначаються ІЧ-рекомбінацією, яка впливає на високозбуджені, близькі до континууму рівні [17, 21]. Але рівнів, що дають ІЧ-лінії, в нашій моделі атома заліза немає.

Зіткнення з нейтральним воднем сильно впливають на заселеності рівнів у верхній фотосфері. Вище, в нижній хромосфері, їхній вплив послаблюється (рисунок б). Так, в області $h < 500$ км коефіцієнти β_1 (за винятком двох високозбуджених рівнів) практично однакові: зіткнення з атомами водню ефективно зменшують дефіцит функції джерела ліній, що виникають при переходах між рівнями. На заселеність основного рівня Fe II ударні зіткнення з воднем практично не впливають. Водночас під їхнім впливом відбувається перерозподіл атомів Fe I по рівнях. Заселеності метастабільних та напівстабільних рівнів по всій атмосфері зменшуються: в околі температурного мінімуму на 20—30 %, а у вищих шарах — в декілька разів. Поведінка високозбуджених рівнів дещо інша. У верхній фотосфері їхні заселеності збільшуються (майже удвічі в околі температурного мінімуму для рівнів з $EP \approx 5$ еВ), а в нижній хромосфері вплив зіткнень з воднем помітно зменшується. Крім цього, у проміжку $2.4 < EP < 4.6$ еВ чутливість рівнів до зіткнень з воднем зменшується, особливо z^7D^0 , b^3F , z^5D^0 , z^5F^0 та рівня $y^5D^0 + y^5F^0$, який сильно зв'язаний з континуумом.

Вплив зіткнень з нейтральним воднем на профілі ліній. Термалізація збудження рівнів Fe I та перерозподіл їхніх заселеностей внаслідок зіткнень з атомами водню не може не відобразитись на профілях відповідних ліній. Так, зменшення заселеностей метастабільних та напівстабільних рівнів (нижній рівень переходу) призводить до зменшення висоти утворення лінії; якщо ж нижній рівень переходу є високозбудженим — то навпаки. Крім цього, внаслідок зменшення різниці між коефіцієнтами β функція джерела лінії наближається до функції Планка. Це не означає, що функція джерела стає тепловою, оскільки механізм заселення рівнів далеко не тепловий. Через те що високозбуджені рівні більш збіднені, ніж нижні (метастабільні і напівстабільні), то $S_L < B$, а зіткнення з воднем зменшують цей дефіцит функції джерела в лінії (це стосується більшості ліній).

Таким чином, якщо лінії утворюються у фотосфері ($h < 550$ км), то внаслідок зіткнень з воднем область їхнього утворення зміщується (якщо нижній рівень переходу метастабільний чи напівстабільний) у глибші шари, функція джерела збільшується, наближаючись до B , а отже, збільшується центральна інтенсивність і зменшується еквівалентна ширина лінії. Якщо ж лінія утворюється вище температурного мінімуму, то маємо збільшення S_L та зміщення висоти утворення ліній (нижній рівень переходу метастабільний чи напівстабільний) в область холодніших шарів. Ці два фактори частково компенсують один одного, внаслідок чого чутливість таких ліній до зіткнень з воднем зменшується. Для ліній з $EPL > 3$ еВ глибини утворення зміщуються у верхні шари.

Отже, чутливість хромосферних ліній до зіткнень з атомами водню послаблена, а найчутливішими будуть помірні та сильні фотосферні лінії. Слабкі ж лінії, що утворюються в умовах, близьких до ЛТР, до зіткнень з атомами водню слабо чутливі.

Результати досліджень ми демонструємо для слабкої лінії λ 670.36 нм, помірної лінії λ 617.33 нм та чотирьох сильних ліній $\lambda\lambda$ 525.06, 649.49,

532.42, 388.63 нм. Лінії впорядковано за зростанням еквівалентних ширин: перші п'ять — фотосферні, остання — хромосферна. Центральні глибини (не-ЛТР) утворення цих ліній становлять 95, 266, 342, 467, 449 та 874 км відповідно. Поведінка решти ліній, що виникають в рамках нашої моделі атома ($0 \leq EP \leq 5.56$ eV), аналогічна.

На іонізаційну рівновагу, а вона визначає крила ліній, вплив зіткнень з воднем, як було показано вище, незначний; а отже, їхній вклад буде проявлятися найбільше на центральних залишкових інтенсивностях r_0 ліній. В табл. 1 приведено значення r_0 вибраних ліній для двох положень на диску Сонця: ЛТР та не-ЛТР (Н(-) — без врахування, Н(+)) — із врахуванням зіткнень з воднем), а також потенціал збудження нижнього рівня і терми, між якими виникають досліджувані лінії. Для слабкої лінії № 1 зіткнення з атомами водню проявляються тільки на краю диска Сонця, де глибина утворення центра лінії близька до 200 км. Для ліній №№ 2, 3, 4 маємо збільшення залишкової інтенсивності на 2, 5, 8 % в центрі і на 7, 10, 12 % на краю диска відповідно. Як бачимо найчутливішою до зіткнень з воднем є лінія № 4, яка утворюється у верхній фотосфері. В міру зменшення глибини утворення ліній чутливість послаблюється.

Зсув глибин утворення цих ліній незначний: для ліній №№ 2, 3 — кілька кілометрів, для лінії № 4 (центр) — 5 км, для лінії № 4 (край) — 12 км. Зсув незначний, тому що у верхній фотосфері β_1 — параметри метастабільних рівнів слабо змінюються під впливом зіткнень з воднем (рисунок).

Вплив зіткнень з воднем на центральну залишкову інтенсивність лінії № 5 дещо менший порівняно з лінією № 4: збільшення залишкової інтенсивності становить 4 % в центрі та 6 % на краю диска Сонця. Таке зменшення впливу викликано: по-перше, зменшенням дефіциту функції джерела: значення β_1 нижнього та верхнього рівнів переходу збільшуються; по-друге, збільшення заселеності рівня z^5D^0 (нижній рівень переходу) приводить до зміщення (≈ 25 км) глибин утворення центру лінії вгору, тобто в область менших температур, що частково компенсує зменшення дефіциту S_1 . Через те що поведінка верхніх рівнів під впливом ударних зіткнень ідентична (рисунок б), то сказане вище стосується ліній, що виникають при переходах між високозбудженими рівнями ($z^5D^0 - e^5D$, $z^5F^0 - e^5D$, $z^5P^0 - e^5D$, $(z^3F^0 + z^3D^0) - e^5D$, $(y^5D^0 + y^5F^0) - e^5D$). Отже, чутливість ліній до зіткнень з атомами водню визначається ще й потенціалом збудження нижнього рівня; для ліній з $5.56 \geq EP > 3$ eV вона послаблена.

Ядро хромосферної лінії ще в меншій мірі підлягає впливу зіткнень з атомами водню. Так, в області утворення ядра лінії ($h \approx 800$ км) внаслідок цих зіткнень відбувається зменшення заселеності тільки нижнього (основного) рівня переходу; рівень z^5D^0 (верхній рівень переходу) в нижній хромосфері слабо чутливий до зіткнень. Далі, через зменшення заселеності нижнього рівня під впливом зіткнень з воднем має місце зсув глибин утворення в сторону температурного мінімуму (≈ 65 км). Внаслідок компенсації впливу згаданих чинників центральна залишкова інтенсивність лінії збільшується лише на 2 % в центрі та на 3 % на краю диска Сонця. Для інших хромосферних ліній, що виникають при переходах між метастабільними, напівстабільними — верхніми рівнями Fe I ($a^5D - (z^5D^0, z^5F^0, z^5P^0, y^5D^0, y^5F^0)$, $a^5F - (y^5D^0, y^5F^0, z^5G^0, z^3G^0)$, $a^3F - (z^5G^0, y^3F^0, y^3D^0)$), картина аналогічна.

Як бачимо, зіткнення з атомами водню мають найбільший вплив на центральні глибини помірних та сильних фотосферних ліній, що виникають

Таблиця 1. Центральні залишкові інтенсивності r_0 ліній Fe I

Номер лінії	λ , нм	i - j	i	j	EP, еВ	H(-)	H(+)	ЛТР	H(-)	H(+)	ЛТР
						$\mu = 1.0$			$\mu = 0.3$		
1	670.36	7—16	b^3F	y^3F^0	2.62	0.575	0.58	0.52	0.56	0.59	0.51
2	617.33	4—13	a^5P	y^5D^0	2.19	0.31	0.33	0.24	0.34	0.41	0.31
3	525.06	4—17	a^5P	y^5P^0	2.19	0.13	0.18	0.13	0.15	0.25	0.21
4	649.49	5—14	a^3H	z^5G^0	2.40	0.11	0.19	0.20	0.13	0.25	0.35
5	532.42	9—19	z^5D0	e^5D	3.23	0.06	0.10	0.14	0.9	0.15	0.28
6	388.63	1—9	a^5D	z^5D^0	0.05	0.01	0.03	0.20	0.02	0.05	0.59

Таблиця 2. Еквівалентні ширини вибраних ліній Fe I

Наближення	W_λ , пм					
	670.36 нм	617.33 нм	525.06 нм	649.49 нм	532.42 нм	388.63 нм
	$\mu = 1.0$					
$S_H = 0$	3.25	7.16	9.72	15.76	31.20	90.47
$S_H = 0.1$	3.17	6.98	9.46	15.20	30.21	90.04
$S_H = 1.0$	3.26	7.06	9.51	15.14	30.30	91.99
$S_H = 5$	3.51	7.35	9.77	15.49	31.26	96.50
ЛТР	4.03	8.33	10.57	16.62	33.30	107.0
експ. [2]	3.69	7.64	10.36	16.20	33.4	92.00
	$\mu = 0.3$					
$S_H = 0$	4.49	8.73	11.85	18.45	32.19	107.8
$S_H = 0.1$	4.14	8.18	11.05	17.11	29.80	106.1
$S_H = 1.0$	4.20	8.13	10.92	16.53	29.17	108.4
$S_H = 5$	4.53	8.47	11.22	16.71	30.15	114.5
ЛТР	5.50	10.22	12.65	18.04	33.01	130.3

при переходах між метастабільними і напівстабільними та високозбудженими рівнями нейтрального заліза; хромосферні лінії слабо реагують на зіткнення з воднем (тут йде мова про лінії, що виникають в рамках нашої моделі атома).

Центральні залишкові інтенсивності слабкої (№ 1) та помірної (№ 2) ліній через переіонізацію більші за їхні ЛТР-значення; а зіткнення з воднем приводить до збільшення цієї різниці (табл. 1). В той же час для сильніших фотосферних ліній за рахунок збіднення верхніх рівнів відповідних переходів залишкові не-ЛТР-інтенсивності менші за ЛТР-значення, внаслідок чого для таких ліній має місце протилежна тенденція — зіткнення з воднем зменшують відмінності між центральними залишковими ЛТР- та не-ЛТР-інтенсивностями.

Для заборонених ліній, що виникають при переходах між метастабільними та напівстабільними рівнями нейтрального заліза, вплив зіткнень з атомами водню незначний і проявляється лише на краю диску.

Еквівалентні ширини ліній. Розглянемо вплив зіткнень з атомами водню на еквівалентні ширини ліній. Оскільки зіткнення з воднем найбільше впливають на заселеності рівнів у верхній фотосфері, то внаслідок їхньої дії змінюються лише ядра ліній. Ударні зіткнення зменшують дефіцит S_L , а отже збільшують інтенсивність випромінювання в ядрі; еквівалентна ширина ліній при цьому зменшується. З іншого боку, еквівалентні ширини

сильних ліній визначаються їх протяжними крилами; це в свою чергу зменшує чутливість еквівалентних ширин цих ліній до зіткнень з атомами водню.

В табл. 2 приведено еквівалентні ширини вибраних ліній в центрі та на краю диска Сонця для ЛТР та не-ЛТР-випадків при різних значеннях множника S_H , на який домножуються теоретичні поперечні перерізи ударних збуджень атомами водню; це дозволяє змінювати в заданих межах швидкості зіткнень. Підгонку еквівалентних ширин до спостережуваних ми не проводили. Як видно з табл. 2, вплив зіткнень з воднем на еквівалентні ширини в центрі диску Сонця незначний. Так, внаслідок зменшення дефіциту функції джерела та відповідних зсувів глибин утворення еквівалентні ширини вибраних ліній зменшуються порівняно з не-ЛТР-значеннями на 2, 2, 2, 4, 3, 1 % відповідно. Ефект підсилюється на краю диску Сонця, де лінії утворюються у вищих шарах; зменшення еквівалентних ширин вибраних ліній там становить 8, 7, 8, 10, 9, 2 % відповідно. Як бачимо, зіткнення з атомами водню, як і не-ЛТР-ефекти, зменшують еквівалентні ширини ліній; тобто, вони ніби «підсилюють» вплив не-ЛТР-ефектів на еквівалентні ширини ліній нейтрального заліза.

Зіткнення з нейтральними атомами водню слабо впливають на еквівалентні ширини ліній Fe I в центрі диска Сонця, тоді як на краю диска їхній вплив посилюється. Це особливо стосується помірних та сильних фотосферних ліній. Дуже слабкі лінії утворюються переважно в рівноважних умовах, а отже до зіткнень не чутливі. Зіткнення з воднем практично не впливають на еквівалентну ширину сильної лінії λ 388.63 нм як у центрі, так і на краю диска Сонця. Це стосується решти сильних хромосферних ліній, що виникають при переходах з метастабільних та напівстабільних рівнів на високозбуджені рівні.

Поперечні перерізи зіткнень з атомами водню відомі наближено, тому для дослідження їхнього впливу на утворення ліній ми провели обчислення для різних значень множника S_H ($0 \leq S_H \leq 5$). З табл. 2 видно, що еквівалентні ширини вибраних ліній слабко змінюються при зміні вкладу зіткнень ($S_H = 0.1, 1, 5$). При певному значенні S_H має місце максимальний вплив зіткнень на еквівалентні ширини вибраних ліній. Згідно з нашими розрахунками мінімум еквівалентних ширин досягається при $0.1 \leq S_H \leq 1$. При збільшенні S_H починається термалізація рівнів, внаслідок чого еквівалентні ширини збільшуються в сторону рівноважних значень.

ВИСНОВКИ

Основні висновки наших досліджень ролі зіткнень з атомами нейтрального водню на утворення ліній Fe I в рамках незбуреної сонячної атмосфери такі.

1. Під впливом зіткнень з атомами нейтрального водню відбувається перерозподіл атомів на рівнях Fe I таким чином, що: а) заселеності метастабільних та напівстабільних рівнів зменшуються по всій атмосфері; б) заселеності верхніх рівнів збільшуються, в основному у верхній фотосфері.

2. Під впливом зіткнень з атомами водню у верхній фотосфері відбувається суттєве зменшення дефіциту функції джерела ліній, що утворюються при переходах між метастабільним чи напівстабільним та високозбудженими рівнями; в нижній хромосфері зменшення дефіциту відбувається менш ефективно.

3. Чутливість центральних глибин ліній до зіткнень з воднем визначається глибиною утворення центру лінії та потенціалом збудження нижнього рівня: найчутливіші помірні та сильні лінії, що утворюються у верхній

фотосфері і виникають при переходах з метастабільних та напівстабільних рівнів. Чутливість фотосферних ліній, що виникають з верхніх рівнів ($5.56 \geq EP > 3$ eV) — послаблена. Центральні глибини сильних хромосферних ліній, що виникають з метастабільних та напівстабільних рівнів, слабо реагують на зіткнення з воднем.

4. Зіткнення з воднем приводять до зменшення різниці центральних глибин ЛТР- та не-ЛТР-профілів помірних та сильних ліній Fe I; для слабких ліній ця різниця збільшується.

5. Зіткнення з воднем слабо впливають на еквівалентні ширини ліній в центрі диску Сонця; вплив посилюється для сильніших фотосферних ліній при наближенні до краю диска. Еквівалентні ширини хромосферних ліній, що виникають з метастабільних та напівстабільних рівнів, слабо чутливі до зіткнень з воднем як в центрі, так і на краю диска Сонця.

6. Максимальний вплив зіткнень з атомами водню на профілі ліній Fe I досягається при $0.1 \leq S_H \leq 1$.

1. *Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А.* Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. — М.: Наука, 1979.—320 с.
2. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989—198 с.
3. *Ленг К.* Астрофизические формулы: В 3 ч. — М.: Мир, 1978.—Ч. I.—448 с.
4. *Стоділка М. І., Рикалюк Р. Є.* Задача двовимірного переносу випромінювання для багаторівневих атомів // Журн. фіз. досліджень.—1998.—2, № 3.—С. 427—432.
5. *Щукина Н. Г.* Линии Fe I в спектрах холодных звезд: температурная диагностика атмосферы солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 415—428.
6. *Щукина Н. Г., Трухильо Буэно Х.* Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР-эффекты в атмосферах солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 4.—С. 315—329.
7. *Anstee S. D., O'Mara B. J.* Width cross-sections for collisional broadening of s-p and p-s transitions by atomic hydrogen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—276, N 3.—P. 859—866.
8. *Athay R. G., Lites B. W.* Fe I ionisation and excitation equilibrium in the solar atmosphere // Astrophys. J.—1972.—176, N 3.—P. 809—831.
9. *Caccin B., Gomez M. T., Severino G.* The formation of the alkali resonance lines in cool atmospheres I. Na I and K I in a sunspot umbra // Astron. and Astrophys.—1993.—276, N 1.—P. 219—226.
10. *Carlsson M., Rutten R. J., Bruls J. H. M. J., Shchukina N. G.* The non-LTE formation of Li I lines in cool stars // Astron. and Astrophys.—1994.—288, N 3.—P. 860—882.
11. *Drawin H. W.* Influence of atom-atom collisions on the collisional-radiative ionization and recombination coefficients of hydrogen plasmas // Z. Phys.—1969.—225, N T-38.—P. 483—493.
12. *Gehren T., Butler K., Mashonkina L., et al.* Kinetic equilibrium of iron in the atmospheres of cool dwarf stars I. The solar strong line spectrum // Astron. and Astrophys.—2001.—366, N 3.—P. 981—1002.
13. *Gratton R. G., Carretta E., Eriksson K., Gustafsson B.* Abundances of light elements in metal-poor stars II. Non-LTE abundance corrections // Astron. and Astrophys.—1999.—350, N 3.—P. 955—969.
14. *Holweger H.* Solar element abundances, non-LTE line formation in cool stars, and atomic data // Phys. scr.—1996.—T65.—P. 151—171.
15. *Kaulakys B.* Analytical expressions for cross sections of Rydberg-neutral inelastic collisions // J. Phys. B: Atom. and Mol. Phys.—1985.—18, N 6.—P. L167—L170.
16. *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1995.—112, N 3.—P. 525—535.
17. *Shchukina N., Trujillo Bueno J.* The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres // Astrophys. J.—2001.—550, N 2.—P. 970—990.
18. *Simmons G. J., Blackwell D. E.* Analysis of Fe I lines (between 0.00 eV and 2.6 eV) in the solar spectrum using improved damping constants and accurate oscillator strengths—Test of a solar model atmosphere // Astron. and Astrophys.—1982.—112, N 2.—P. 209—214.
19. *Steenbock W., Holweger H.* Statistical equilibrium of lithium in cool stars of different metallicity

- // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**130**, № 2.—P. 319—323.
20. *Takeda Y.* Study on the non-LTE effects of Fe in stellar atmospheres: application to Arcturus // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**242**, № 2.—P. 455—473.
21. *Thévenin F., Idiart T. P.* Stellar iron abundances: non-LTE effects // *Astrophys. J.*—1999.—**521**, N 2.—P. 753—763.
22. *Vernazza J., Avrett E., Loezer R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—**45**, N 4.—P. 635—725.
23. *Watanabe T., Steenbock W.* Fe II emission lines in the wings of Ca II H and K. I. Solar Fe II 3969.4 Å line // *Astron. and Astrophys.*—1986.—**165**, N 1.—P. 163—169.

Надійшла до редакції 28.11.01