

УДК 523.94

Л. М. Янків-Вітковська

Центр космічних досліджень ПАН
00-716, Варшава, вул Бартицька 18а
Львівський національний університет ім. І. Франка
79005, Львів, вул. Кирила і Мефодія 8, кафедра астрофізики

Дослідження постійної загасання фраунгоферових ліній атмосфери Сонця

Зроблено аналіз емпіричних методів дослідження постійної загасання. Знайдено явні вирази для постійної загасання γ лоренцівського профілю коефіцієнта поглинання в спектральній лінії з урахуванням непружних зіткнень та постван-дер-ваальсівських взаємодій випромінюючого атома зі збурюючими частинками. Для величини γ/γ_0 , де γ_0 — ван-дер-ваальсівська постійна загасання в наближенні Вайскопфа—Ліндгольма, представлено розклад за степенями температури. Врахування цих ефектів приводить до збільшення постійної загасання і є достатнім для отримання кількісних результатів для профілів фраунгоферових ліній без неправомірного збільшення величини γ (емпірична постійна загасання), яка використовується при аналізі зоряних спектрів.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯННОЙ ЗАТУХАНИЯ ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ, Янкив-Витковская Л. Н. — Проанализированы основные методы эмпирического исследования постоянной затухания. Найденные явные выражения для постоянной затухания γ лоренцовского профиля коэффициента поглощения в спектральных линиях с учетом неупругих столкновений и постван-дер-ваальсовских взаимодействий излучающего атома с возмущающими частицами. Для величины γ/γ_0 , где γ_0 — ван-дер-ваальсовская постоянная затухания в приближении Вайскопфа—Линдгольма, получено разложение по степеням температуры. Рассчитан вклад сил отталкивания между частицами в постоянную затухания. Учет этих эффектов приводит к увеличению постоянной затухания и является достаточным условием получения количественных результатов для профилей фраунгоферовых линий без неправомерного увеличения величины γ (так называемая эмпирическая затухания), которая используется для анализа звездных спектров. Предложенный метод теоретического исследования постоянной затухания может быть обобщенный для случая звездных атмосфер.

INVESTIGATION OF THE DAMPING CONSTANT OF FRAUNHOFER LINES OF THE SOLAR ATMOSPHERE, by Yankiv-Vitkovska L. M. — Reliable data on spectral line damping are required to determine the chemical content of stellar atmospheres. We propose explicit expressions for the

damping constant which take into account several mechanisms influencing the broadening of spectral lines. We calculate the damping constant for some spectral lines under different temperatures with allowance made for inelastic collisions. Using the most correct and empirically tested method of spectral line investigations, we calculate the damping constant for spectral lines of the iron group in the solar atmosphere.

Добре відомо, що для вивчення вмісту хімічних елементів і дослідження фізичних умов у спокійних атмосферах зірок необхідні надійні дані про величину загасання γ у спектральних лініях [9]. Але при визначенні постійної загасання можуть виникати значні труднощі спостережного, обчислювального та теоретичного характеру, пов'язані з необхідністю отримувати високоточні профілі фраунгоферових ліній різної інтенсивності, що не завжди вдається, з громіздкими обчисленнями тощо. Серед труднощів теоретичного характеру найважливішими є проблеми населеності енергетичних рівнів атомів, потенціалу взаємодії між частинками в зоряній атмосфері, походження поля турбулентних швидкостей і т. д. Малоімовірним є те, що тисячі фраунгоферових ліній мають зовсім «випадкові» півширини чи глибини. На наше переконання, сонячний спектр містить в собі багато закономірностей, пошук яких слід продовжувати. Ми зупинимось на тих результатах, які стосуються досліджень постійної загасання фраунгоферових ліній і встановлені вперше.

Важливою характеристикою, яка найповніше визначає лінію в спектрі зорі, є профіль, тобто розподіл енергії за частотою. Розрахунок теоретичних профілів спектральних ліній, який полягає в розв'язку рівняння переносу варто здійснювати традиційними методами [6, 7]. Найбільш послідовним підходом до побудови такого рівняння є розгляд елементарних процесів збудження та іонізації атомів у зоряних атмосферах на основі рівнянь квантової механіки. При такому підході немає потреби вводити в задачу параметри, що спеціально підбираються в феноменологічних теоріях з певних фізичних припущень. Крім того, при такому підході зрозуміло, ціною яких наближень отримуються феноменологічні рівняння, що і визначає область їхнього застосування. Рівняння, виведені на мікроскопічному рівні, застосовують і в тих випадках, коли феноменологічні рівняння не дають результату, наприклад при вивченні тонких деталей спостережуваного спектру зір. В той же час аналіз інформації про фізичні процеси, які відбуваються в областях утворення ліній, вимагає теоретичних розрахунків профілів ліній Сонця, врахування цілого ряду факторів, що впливають на розширення спектральних ліній: ефект Доплера, ефект Штарка, міжчастинкова взаємодія.

Врахування всіх цих факторів наштовхується на значні математичні труднощі. Теоретичний розрахунок профілів шляхом розв'язку рівняння переносу вимагає знання частотної залежності коефіцієнта поглинання для температур і тисків, які неперервно змінюються з глибиною в атмосфері зорі. В зв'язку з цим коефіцієнт поглинання потрібно подати у такому вигляді, який би точніше опишував спільну дію ефектів розширення у всьому частотному інтервалі в межах ліній, і не створював труднощів при обчисленнях.

Для цього розглядається зручна для практичних розрахунків формула коефіцієнта поглинання, який формується сумісною дією різних механізмів загасання [3, 6, 7]. Постійна загасання γ представлена у загальному вигляді і у наближеннях Вайскопфа та Ліндгольма [6—8].

Згідно з результатами теоретичних розрахунків постійної загасання за даними робіт багатьох дослідників можна визначити так званий поправоч-

ний множник E для ліній різних елементів та для ліній одного і того ж елементу з використанням різних потенціалів взаємодії: Ван-дер-Ваальса, Леннарда—Джонса, Смирнова—Роуефф, Смирнова—Роуефф плюс Ван-дер-Ваальса та молекулярного потенціалу Na-H [12—16].

Результати лабораторних вимірювань та теоретичних розрахунків показали, що значення постійної загасання γ більше за значення постійної Ван-дер-ваальса — γ_6 . Згідно з теоретичними дослідженнями значення поправочного множника $E = \gamma/\gamma_6$ для ліній різних елементів та для ліній одного і того ж елементу з використанням вищезгаданих потенціалів невелике і складає 1.1—1.9.

Така ненадійність результатів лабораторних і теоретичних досліджень постійної загасання спонукала нас виконати власні дослідження.

ЕМПІРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ЗАГАСАННЯ

Для перевірки теоретичних і лабораторних значень γ було здійснено багато спроб емпіричного дослідження постійної загасання фраунгоферових ліній [5]. Виділимо основні чотири методи.

1. Контур слабкої лінії подається через функцію Фойгта, і з допомогою відомих таблиць Ельсте розраховуються його доплерівська і лоренцівська складові розширення.

2. Значення γ розраховується методом спроб і помилок по узгодженню розрахованих та спостережуваних контурів ліній.

3. Значення γ розраховується методом спроб і помилок по узгодженню розрахованих та спостережуваних еквівалентних ширин ліній (модифікація цього методу — підбір такого значення γ , при якому розкид вмісту хімічного елементу, що визначається з ліній різної інтенсивності, був би мінімальний).

4. Значення γ визначається за далекими крилами фраунгоферових ліній, які представлені у вигляді функції Фойгта.

Розрахунок постійної загасання за еквівалентними ширинами фраунгоферових ліній сонячного спектру (лінії заліза та нікелю) був виконаний нами раніше [2]. Також було досліджено залежність емпіричної постійної загасання від атомних та спостережуваних характеристик для ліній групи заліза (титану, заліза і нікелю) [1, 10]. Згодом було підібрано найкоректніший, на нашу думку, метод визначення емпіричної постійної загасання. Використання цього методу обґрунтовано попередніми дослідженнями і аналізом розрахунків, виконаних іншими дослідниками [11]. Оскільки добре відомо, що контури та інтенсивності фраунгоферових ліній в спектрі Сонця сильно залежать від поля нетеплових швидкостей — так званої мікро-макروتурбулентності, тому врахування надійніших даних про поле швидкостей дає можливість реальніше відтворити картину динаміки газу в сонячній атмосфері. Основним джерелом спостережуваних даних служив Льезький атлас сонячного спектру. Використання фотосферної моделі Холвегера—Мюллер (HOLMU) обґрунтоване тим, що температура цієї моделі по суті є температурою збудження великої групи різних фраунгоферових ліній, яка зменшує ефекти відхилення від ЛТР. При ЛТР-розрахунках ця модель набагато краще, ніж інші, пояснює поведінку ліній групи металів та іонів.

За допомогою цього методу отримано параметри E для спектральних ліній Ni I, Ti I, Ti II, Cr I та Cr II [11], значення яких не перевищує 1.5 для нейтральних атомів, що досить добре узгоджується із нашими теоретичними дослідженнями, наведеними нижче. Для іонів нам не вдалось зробити узагальнюючого висновку. Однак значення параметра E для Cr II цілком

узгоджується з нашими теоретичними дослідженнями. Можливо, для інших груп спектральних ліній ми зможемо дістати таке ж узгодження. Розрахунки проведено за допомогою програми, розробленої у відділі фізики Сонця в ГАО НАН України.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ЗАГАСАННЯ

Як відомо, аналіз випромінювання зірки вимагає вивчення механізмів взаємодії випромінювання з атомними системами. Атмосфери більшості зірок складаються в основному з водню та гелію. Атомів інших елементів на декілька порядків менше. Певні кількості атомів і молекул внаслідок взаємодії з випромінюванням і між собою знаходяться на різних ступенях іонізації. Повний опис атмосфери зірки вимагає спільного розв'язку рівняння переносу випромінювання та рівнянь, які визначають заселеність квантових станів атомів. Центральну роль в цьому описі в наближенні однофотонних переходів відіграє така величина, як коефіцієнт поглинання світла.

Профіль так званого коефіцієнта поглинання в лінії, тобто його залежність від частоти світла, як і профіль спектральної лінії атома, формується цілим рядом механізмів. Повний профіль є згортокою дії різних механізмів. Серед цих механізмів визначальним для крила спектральної лінії є ударний механізм, який приводить до утворення лоренцівського профіля [8].

Основною величиною, що характеризує контур Лоренца, є постійна загасання γ , яка визначає його ширину. Її величина та температурна залежність є дуже важливими для аналізу зоряних спектрів. Зокрема, добре відомо, що для узгодження спостережених профілів фраунгоферових ліній з теоретично розрахованими, постійну загасання, що дається теорією Вайскопфа—Ліндгольма, збільшують «руками». В деяких випадках це штучне збільшення є неприродно великим. Тому ми вирішили детальніше дослідити отримані з перших принципів величини, що характеризують профілі спектральних ліній атомів.

Постійна загасання γ та зсув частоти Δ випромінювання атома для лоренцівської складової профілю

$$I(\omega) = \frac{\gamma}{2\pi} \frac{1}{(\omega - \omega_0 - \Delta)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (1)$$

зв'язана з перерізом розсіяння σ :

$$\frac{\gamma}{2} - i\Delta = \frac{N}{V} \langle v\sigma \rangle. \quad (2)$$

Тут

$$\sigma = \int_0^{\infty} (1 - e^{i\delta}) 2\pi\rho d\rho, \quad (3)$$

ρ — прицільна відстань,

$$\delta = \eta + i\Gamma, \quad (4)$$

— комплексна фаза, де η дорівнює різниці зсувів фаз атомів, між якими відбуваються переходи на частоті ω_0 . Цей зсув фаз обумовлений зсувом енергетичних рівнів атомів внаслідок його взаємодії зі збурюючими частинками, число яких в об'ємі V дорівнює N . Для простоти записів розглядаємо один сорт збурюючих частинок. Для зоряних атмосфер саме такий випадок і має місце — збурюючими частинками виступають атоми водню. Величина 2Γ дорівнює повній імовірності переходу атома зі станів, між якими відбувається перехід на частоті ω_0 , на усі інші стани. Величина Γ приводить

до додаткового розширення спектральних ліній — розширення внаслідок непружних зіткнень. Не приймаємо до уваги природню або радіаційну ширину спектральної лінії атома. Величина v — це швидкість атома відносно збурюючої частинки; кутові дужки в (2) означають усереднення за швидкостями.

Розрахунки проводимо у припущенні, що виконуються умови для квазікласичного наближення, коли:

$$\eta = -\frac{1}{h} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta E(t) dt, \quad (5)$$

де ΔE — поправка до енергії атома, обумовлена його взаємодією зі збурюючою частинкою, h — постійна Планка, t — час.

Зоряна атмосфера є розрідженою системою частинок. При цьому внесок в η буде визначатись головним чином взаємодіями між частинками на великих відстанях, коли потенціальна енергія $V(R)$ складається із взаємодій між їхніми мультипольними моментами і зменшується з відстанню R за степеневим законом:

$$V(R) = -h \sum_{l \geq 0} \frac{C_{n+2l}}{R^{n+2l}}, \quad (6)$$

де n визначає тип взаємодії.

Вважаючи розподіл за швидкостями максвеллівським, отримуємо певний вигляд залежності постійної загасання від температури [4]

$$\begin{aligned} \gamma_0 = \frac{N}{V} 4\sqrt{\pi} \left(\frac{2T}{M}\right)^{\frac{n-3}{2(n-1)}} \Gamma\left(\frac{2n-3}{n-1}\right) \Gamma\left(\frac{n-3}{n-1}\right) \left[\frac{\Gamma(1/2)\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma(n/2)} C_n\right]^{\frac{2}{n-1}} \times \\ \times (1+p^2)^{\frac{1}{n-1}} \cos\left(\frac{2}{n-1} \arctg \frac{1}{p}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

де M — зведена маса атома, T — температура в атомних одиницях, $\Gamma(x)$ — гамма-функція.

У випадку $n = 6$, $p = 0$, отримуємо ван-дер-ваальсівську постійну загасання в наближенні Вайскопфа—Лідхольма:

$$\gamma_{\text{WL}} = 7.901 \frac{N}{V} C_8^2 \left(\frac{8T}{\pi M}\right)^{\frac{3}{10}}, \quad (8)$$

де p — параметр непружних зіткнень, причому $0 \leq p \leq 1$. Зробимо зауваження щодо величини γ_0 при $p \neq 0$ та $p = 0$:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{WL}}} = (1+p^2)^{\frac{1}{n-1}} \frac{\cos\left(\frac{2}{n-1} \arctg \frac{1}{p}\right)}{\cos \frac{\pi}{n-1}}. \quad (9)$$

Це відношення є більшим за одиницю. Отже, врахування непружних зіткнень збільшує постійну загасання. Причому це збільшення є значним.

Для оцінки внеску від постван-дер-ваальсівських взаємодій запишемо розклад за степенями температури:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = 1 + \sum_{k \geq 1} A_k \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{k}{n-1}}, \quad (10)$$

де коефіцієнти A_k визначаються постійними постван-дер-ваальсівських взаємодій.

Досліджено, що сили відштовхування також дають внесок у постійну загасання. Цей внесок приблизно оцінюється величиною $\gamma > N\pi a_0^2 \langle v \rangle / V = N2\pi a_0^2 (8T/\pi M)^{1/2} / V$, де a_0 — довжина розсіяння, величина порядку атомного діаметра.

ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ

На підставі отриманих виразів постійної загасання зробимо чисельну оцінку внеску непружних зіткнень у величину γ у випадку ван-дер-ваальсівських взаємодій ($n = 6$) при максимальному внеску непружних зіткнень ($p = 1$). Елементарні обчислення дають

$$\gamma_0(p = 1)/\gamma_{\text{WL}} = 1.3504.$$

Така оцінка внеску непружних зіткнень може частково виправдати вже згадане нами збільшення «руками» постійної загасання, яке практикується при аналізі зоряних спектрів.

Зробимо чисельну оцінку величини A_k . Для прикладу взято атом натрію в сонячній атмосфері, де збурюючими частинками виступають атоми водню при температурі $T = 1000$ К. Отже, для системи Na-H знайдено:

$$A_1 = 0.452, \quad A_2 = 0.295, \quad \gamma/\gamma_0 > 1.2.$$

Вже при цій не дуже високій як для зоряних атмосфер температурі збільшення γ є суттєвим:

$$\gamma/\gamma_0 > 1.32 \quad \text{при } T = 6420 \text{ К.}$$

Оцінимо внесок сил відштовхування для розглянутої вище системи Na-H. При $a > 0.26$ нм $\Delta A_1 > 0.595$, що дає

$$\gamma/\gamma_{\text{WL}} > 1.92 \quad \text{при } T = 1000 \text{ К}$$

і

$$\gamma/\gamma_{\text{WL}} = 2.206 \quad \text{при } T = 6420 \text{ К.}$$

ВИСНОВКИ

Отримані явні вирази для постійної загасання γ можуть бути використані для інтерпретації досліджень температурної залежності постійної загасання. Розраховані внески непружних зіткнень, постван-дер-ваальсівських мультипольних взаємодій та врахування сил відштовхування у постійну загасання дають можливість чисельно оцінити величину постійної загасання, не вдаючись до феноменологічних методів. Розрахунки, зроблені за допомогою емпіричного методу дослідження постійної загасання, досить добре узгоджуються із теоретичними розрахунками. Можна стверджувати, що отримані нами нові результати узгоджуються з результатами інших дослідників і можуть бути використані для пояснення експериментальних досліджень фраунгоферових ліній атмосфери Сонця. Запропонований метод теоретичного дослідження постійної загасання може бути узагальнений і для випадку зоряних атмосфер.

Автор висловлює подяку Р. Костику за поради та надану можливість скористатись програмою, розробленою в відділі фізики Сонця в ГАО НАН України, Н. Щукіній за коректні зауваження та поради, І. Вакарчуку за допомогу при теоретичних дослідженнях.

1. Бабій Б. Т., Рикалюк Р. Є., Янків-Вітковська Л. М. Про залежність сталої затухання від атомних та спостережуваних характеристик фраунгоферових ліній заліза в сонячному спектрі // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.—1995.—Вип. 27.—С. 15—17.
2. Бабій Б. Т., Янків-Вітковська Л. М. Про емпіричне визначення постійної затухання за еквівалентними ширинами фраунгоферових ліній сонячного спектра // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.—1991.—Вип. 24.—С. 19—24.
3. Вакарчук І. О. Лекції з квантової теорії переносу випромінювання в зоряних атмосферах. — Львів, 1985.—36 с.
4. Вакарчук І. О., Рикалюк Р. Є., Янків-Вітковська Л. М. Температурна залежність ширин спектральних ліній атомів у зоряних атмосферах // Журн. фіз. досл.—1998.—2, № 1.—С. 16—22.
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
6. Каули Ч. Теория звездных спектров. — М.: Мир, 1974.—256 с.
7. Михалас Д. Звездные атмосферы: В 2 ч. / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.—Ч. 1.—352 с.; Ч. 2.—422 с.
8. Собельман И. И. Введение в теорию атомных спектров. — М.: Физматгиз, 1963.—640 с.
9. Щукина Н. Г. Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР-коррекция содержания железа на Солнце // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 6.—С. 523—535.
10. Янків-Вітковська Л. Н. Исследование затухания фраунгоферовых линий Ni I спектра солнечной фотосферы // Матер. 3 конф. мол. ученых физ. фак. Львов. ун-та, Львов 29-30 марта, 1988. — Киев, 1988.—С. 235.—(Рукопись деп. в УкрНИИНТИ 05.12.88; № 2945-Ук88).
11. Янків-Вітковська Л. Дослідження постійної загасання фраунгоферових ліній сонячної атмосфери: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 1999.—102 с.—Машинопис.
12. Blackwell D. E., Kirby J. H., Smith G. The damping of NaD lines in the solar spectrum by atomic hydrogen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1972.—160, N 1.—P. 189—196.
13. Derrider G., van Rensbergen W. Table of damping constant of spectral lines broadening by H and He // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1976.—23, N 2.—P. 147—172.
14. Lewis E. L., Mc Namara L. F., Michels H. H. The broadening of the sodium d-lines // Solar Phys.—1972.—23.—P. 287—288.
15. Roueff E. Determination of dispersion of forces from the collision broadening of spectral lines // J. Phys. B.—1974.—7.—P. 185—198.
16. Van Rensbergen, de Doncer E., Deridder J. On the broadening and shift of spectral lines // Solar Phys.—1975.—40.—P. 303—315.

Надійшла до редакції 03.05.01