

ЛІТІЙ У ЗОРЯХ ІЗ ДЕФІЦИТОМ МЕТАЛІВ

Т. В. Мішеніна

*Одеський національний університет, Астрономічна обсерваторія
парк Шевченка, Одеса, 65014, Україна*

(Отримано 5 серпня 2002 р.; в остаточному вигляді — 4 листопада 2002 р.)

Методом синтетичного спектра визначено вміст літію в атмосферах 100 зір різної металевості. Спектри досліджуваних зір отримано на 1.93 м телескопі Обсерваторії Верхнього Провансу (Франція), оснащеному ешелє-спектрометром ELODIE. Уперше показана зміна поведінки вмісту літію з T_{eff} у широкому діапазоні металевостей. Значення $\log A(\text{Li}) = 2.30 \pm 0.05$ отримано для зір літєвого плато ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$, $T_{\text{eff}} > 5700$ К). Наявність плато простежується аж до $-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$. Поведінка вмісту літію в зірках з $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$ і $T_{\text{eff}} > 5800$ К не виключає наявності дифузії як механізму, що приводить до виснаження літію. Хід залежності вмісту літію від T_{eff} для груп зір різної металевості свідчить про ріст ефективності фізичних процесів, що змінюють уміст літію з ростом металевості. Наші результати для гігантів з $T_{\text{eff}} < 5600$ К і $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ не суперечать наявним уявленням про два епізоди перемішування.

Ключові слова: еволюція зір, зорі з дефіцитом металів, зоряні атмосфери, хемічний уміст.

PACS number(s): 97.10.Tk

I. ВСТУП

Зміна вмісту будь-якого елемента з віком чи з відстанню в Галактиці становить безсумнівний інтерес для теорій хемічної еволюції Галактики й нуклеосинтезу. Але особливе місце займає літій завдяки тій ролі, що він відіграє в побудові адекватної картини світу. Відомо, що він — один з небагатьох елементів, які утворилися в результаті Великого Вибуху, і його космологічний уміст може характеризувати баріон-протонне співвідношення та баріонний внесок у щільність Всесвіту. Уміст літію визначає також фізичні та ядерні процеси, що відбуваються всередині зір. Літій руйнується при досить низьких температурах (близько 2.5×10^6 К), і його вміст у зоряних атмосферах змінюється не тільки на стадії Головної Послідовності, але й до неї [1]. Узагалі ступінь літєвого виснаження залежить від маси зорі, віку та металевості, а також від ефективності фізичних процесів, таких, як обертання, конвекція, зоряний вітер та ін., що приводять до зміни його вмісту.

Характерною рисою поведінки вмісту Li в металево-бідних зорях є те, що на металевостях $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$ зорі з $T_{\text{eff}} > 5600$ К демонструють однаковий уміст — $\log(\text{Li})$ близько 2.1 dex [2]. Першовідкривачі цього явища [2], названого згодом літєвим плато, чи плато Спітів, припустили, що отримане значення і є первинним (космологічним) умістом ${}^7\text{Li}$. Відповідно до однорідної моделі Великого Вибуху первинний уміст літію за масою дорівнює 3×10^{-8} % [3], і це — близько до того, що спостерігаємо в карликах та субкарликах. Наступні роботи, присвячені вивченню літію в зорях з дефіцитом металів ([4–11]), підтвердили існування плато і провели докладний аналіз цього феномену. Мова йшла про величину вмісту літію в зорях плато та про величину диспер-

сії вмісту Li і наявність трендів умісту Li з $[\text{Fe}/\text{H}]$ і T_{eff} . Мінімальна дисперсія й відсутність трендів свідчать на користь космологічного походження літію в зорях плато. У результаті ретельного аналізу зір плато отримано досить низьке значення дисперсії, яке дорівнює $+0.04$ [10], однак деякі зорі в зоні плато виявляють більше літєве виснаження [7] порівняно з величиною $\log A(\text{Li}) \sim 2.1$. Питання про можливість виснаження літію в зорях плато давно є дискусійним, і багато праць присвячено вивченню фізичних процесів переносу і (чи) виснаження літію, що могли б діяти в зорях плато [12–15]. Хоча помітний прогрес у розумінні поведінки літію для металево-бідних зір був досягнутий, однак і прості еволюційні моделі, і моделі, що враховують широкий спектр процесів виснаження Li, дають неповну картину поведінки вмісту Li [10].

У статті [6] знайдено, що субгіганти з $5500 > T_{\text{eff}} > 4900$ К показують стійке зниження вмісту Li із просуванням уздовж цієї гілки. Ця тенденція якісно узгоджується з теоретичними моделями ділюції літію, включаючи стадію Головної Послідовності. У [14] також підтвердили гіпотезу про ділюцію літію стандартними моделями до 5000 К. Оцінки фактора ділюції були отримані в [6] та [11], вони дорівнюють 16 і 20 відповідно.

У зорях з $T_{\text{eff}} < 4900$ К вміст Li продовжує зменшуватися при нижчих температурах, і це є наслідком конвективного перемішування на гілці гігантів. У [11] вивчали вміст Li в металево-бідних гігантах. Вони знайшли, що поверхневий уміст Li стабілізується в зорях, що знаходяться в нижній частині гілки гігантів ($\log(\text{Li}) = 1.15 \pm 0.12$). Однак у верхній частині RGB у зорях майже весь літій зруйнований через проникнення конвективної оболонки всередину.

Метою цієї статті є визначення єдиною методикою вмісту літію за спектрами високої якості й роздільної

здатності для 100 зір у широкому діапазоні металевості та аналіз поведінки вмісту літію від T_{eff} для декількох груп зір, що відрізняються металевістю.

II. МАТЕРІЯЛ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Спектри досліджуваних зір отримані на 1.93 м телескопі Обсерваторії Верхнього Провансу (Франція), оснащеному ешелє-спектрометром ELODIE [16]. Роздільна здатність спектрометра — 42000, ділянка довжин хвиль — $\lambda\lambda$ 4400–6800 Å, відношення сигналу до шуму — 130–230. Первинна обробка спектрів (екстракція зображень, облік космічних часток, поділ на плоске поле та ін.) була зроблена раніше [17]. Подальшу обробку спектрів (проведення рівня неперервного спектра, вимір еквівалентних ширин ліній EW та ін.) ми виконали за допомогою пакета програм DECH20 [18].

III. ПАРАМЕТРИ АТМОСФЕР І ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЛІТІЮ

Параметри атмосфер (ефективна температура T_{eff} , прискорення сили тяжіння на поверхні зорі $\log g$, металевість $[\text{Fe}/\text{H}]$ і мікротурбулентна швидкість V_t) для всіх досліджуваних зір визначено єдиною методикою. T_{eff} встановлено методом підгонки розрахункового профілю H_α до спостереженого; розрахунок синтетичних профілів був проведений за допомогою програми STARSP [19]; $\log g$ обчислено з умови йонізаційної рівноваги для заліза, V_t — з умови незалежності вмісту заліза, визначеного по цій лінії від її еквівалентної ширини. Для більшості зір параметри атмосфер установлено раніше [20], там же наведено їх порівняння з працями інших авторів. Вибір моделі для конкретної зорі здійснено стандартною інтерполяцією за T_{eff} і $\log g$ із сітки моделей Куруца [21].

Уміст літію для досліджуваних зір отримано шляхом підгонки синтетичних спектрів до профілів, що спостерігаються. Синтетичні профілі обчислено за допомогою програми STARSP [19] у наближенні локальної термодинамічної рівноваги, бо вміст літію незначно залежить від ефектів у наближенні без локальної термодинамічної рівноваги [22]. Оскільки в нашому випадку зорі знаходяться у великому діапазоні температур і металевостей, ми використали детальну інформацію про найважливіші лінії в ділянці ліній ${}^7\text{Li}$ на 6707 Å, включаючи атомні й молекулярні лінії у розглянутій ділянці [23].

Розходження наших визначень $\log(\text{Li})$ з літературними даними такі: $\Delta \log(\text{Li})$ ([5] – наше) = -0.16 ± 0.08 (14 зір); $\Delta \log(\text{Li})$ ([6] – наше) = -0.24 ± 0.18 (18 зір); $\Delta \log(\text{Li})$ ([11] – наше) = 0.00 ± 0.14 (10 зір). У цілому наші дані задовільно узгоджуються з іншими визначеннями Li, деяка розбіжність викликана різними шкалами T_{eff} , використовуваними в наведених працях. Уміст Li більшою мірою залежить від вибору T_{eff} : так, ± 100 K відповідає розкидові $+0.15$ dex у

вмісті Li, але непевності в $\log g$ і V_t спричиняють незначні помилки вмісту Li (-0.02 і 0.02).

IV. АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ЛІТІЮ

Для вивчення поведінки Li від T_{eff} ми виділили 5 груп зір у таких діапазонах металевості: зорі з $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$ (рис. 1), $-1.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ (рис. 2), $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$ (рис. 3), $-0.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$ (рис. 4) і з $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.3$ (рис. 5), хрест указує місце Сонця. Як видно з рис. 1,2,3, хід умісту Li з T_{eff} у різних малометалевих групах зір є неоднаковим. У зорях з $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$ спостерігаємо досить вузьке плато, розкид $+0.05$; у зорях в інтервалах $-1.7 > [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ і $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$ плато помітне також, але розкид значень трохи більший ($+0.17$ і $+0.18$), середнє значення $\log A(\text{Li})$ незначно вище (2.30 і 2.31), а в зорях з $T_{\text{eff}} < 5600$ K бачимо різкіше, порівняно з зорями з $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$, зменшення вмісту Li. На металевостях $-0.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$ є зорі зі значним надлишком умісту літію; також спостерігаємо зорі в ділянці плато ($T_{\text{eff}} > 5600$ K). У ділянці температур, нижчих від 5300 K, ми не виявляємо помітної відмінності в поведінці літію для різних металевостей. З одного боку, це може свідчити про меншу точність визначення літію зі зниженням T_{eff} у зорях, що приводить до замивання картини. А з іншого — про схожість, швидше за все, конвективних процесів, що приводять до руйнування літію в зорях різної металевості, на відміну від інших процесів, які виснажують літій на вищих температурах і більшою мірою залежні від металевості. І, нарешті, зорі з $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.3$ (рис. 5) на температурах у ділянці плато показують помітно різні значення $\log A(\text{Li})$ — від 1 до 3; явно простежується бімодальність у розподілі вмісту Li. Вищі значення вмісту літію свідчать про його збільшення (зростання) у Галактиці і про появу нових джерел збагачення літієм міжзоряного середовища, а поділ на зорі з високим умістом літію і з низьким, можливо, зумовлений їхніми масами [24] — зорі сонячної металевості низьких мас показують більше виснаження вмісту літію порівняно із зорями вищих мас. Таким чином, для груп зір різної металевості ми простежуємо особливості поведінки вмісту літію, які помітно розрізняються. Це може вказувати на зростання ролі фізичних процесів (обертання, поширення, зоряний вітер і т.д.), що змінюють уміст літію і посилюються зі збільшенням металевості. На жаль, наразі не маємо детальних розрахунків зміни вмісту Li в широких межах металевості для того чи іншого конкретного механізму виснаження і тому не можемо їх порівняти. Однак для зір із металевістю, нижчою від 1.5, ми можемо провести подібне порівняння, яке наводимо нижче.

Оцінимо на основі наших даних середню величину вмісту літію в групах зір, що перебувають на різних еволюційних стадіях. Для зір Головної Послідовності і Точки повороту (рис. 1, $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$, $T_{\text{eff}} > 5700$ K) ця величина дорівнює 2.30 ± 0.05 . Ці зорі також є і зорями літійового плато.

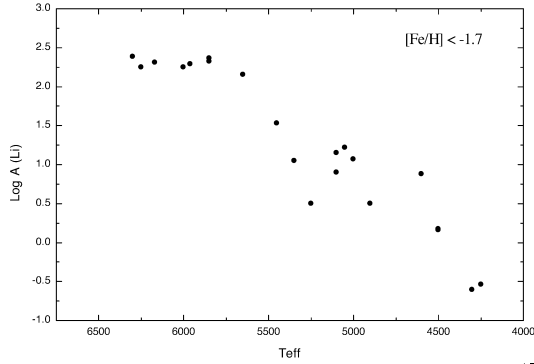


Рис. 1. Хід залежності вмісту Li від T_{eff} ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$).

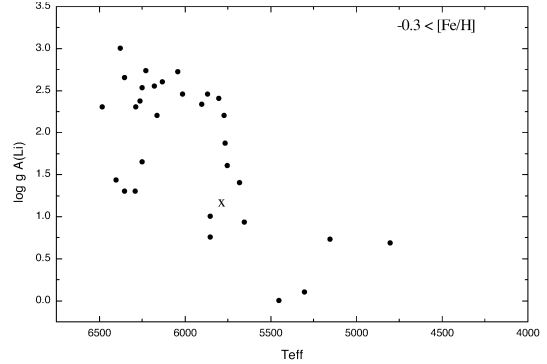


Рис. 5. Хід залежності вмісту Li від T_{eff} ($[\text{Fe}/\text{H}] > -0.3$).

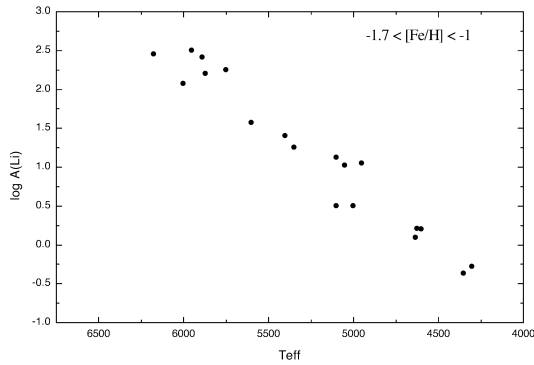


Рис. 2. Хід залежності вмісту Li від T_{eff} ($-1.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$).

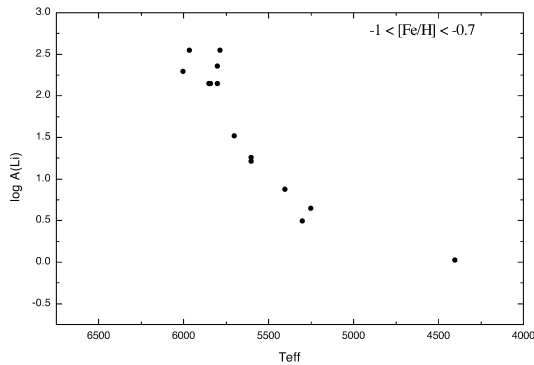


Рис. 3. Хід залежності вмісту Li від T_{eff} ($-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$).

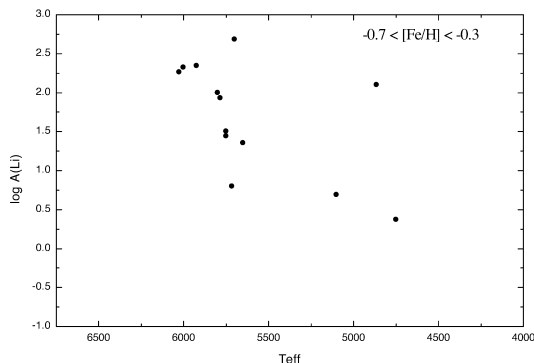


Рис. 4. Хід залежності вмісту Li від T_{eff} ($-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$).

Цікаво перевірити можливість наявності механізмів, що приводять до виснаження літію в зорях плато, наприклад, дифузії. З цією метою ми порівняли отримані дані для зір ГП і субгігантів з металічністю < -1.8 з теоретичною ізохроною для $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ з праці [15] (рис. 6). Поведінка Li в ділянці температур $5100 < T_{\text{eff}} < 6250$ К дуже добре збігається з теоретичними розрахунками. При цьому залишається деяка невизначеність у високотемпературній частині Li-плато, як і у попередніх дифузійних моделях (див. [8]). Отриману невідповідність можна частково усунути в межах розглянутої теорії, тому що поведінка літію тут — функція металевості. Як показано в праці [15], теоретичний трек для субгіганта на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.8$ розташований лівіше і вище, ніж на $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.6$, у високотемпературній частині літійового плато (див. рис. 11 цієї роботи). Таким чином, не можна цілком виключати вплив дифузії на руйнування літію у зорях плато.

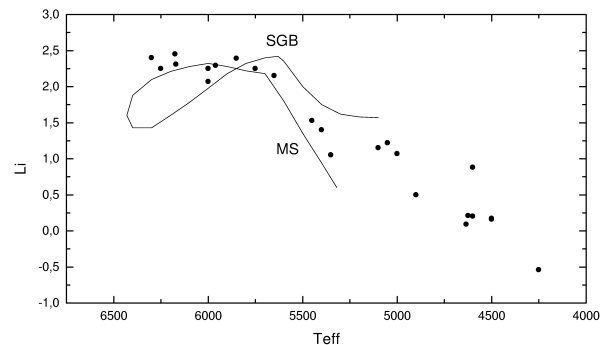


Рис. 6. Порівняння отриманих даних для Li з теоретичною ізохроною [15].

Наступний спад вмісту Li зі зменшенням T_{eff} зумовлений появою процесів перемішування, як це було сказано вище. Для малометалевих гігантів середнє значення вмісту Li дорівнює 1.08 ± 0.05 для 5 зір, що перебувають у нижній частині гілки гігантів RGB, і $\langle \log(Li) \rangle < 0$ для гігантів, розташованих у верхніх частинах гілки RGB (тільки 3 зорі). Ці зна-

чення добре узгоджуються з результатами [15] і можуть бути свідченням двох епізодів перемішування, що спостерігаються у зорях після сходу з ГП.

V. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Методом синтетичного спектра визначено вміст літію в атмосферах 100 зір різної металевості.

2. Уперше показано зміну поведінки вмісту літію з T_{eff} у широкому діапазоні металевостей. Наявність плато простежується аж до $-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$. Вміст літію в зорях з $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.7$ і $T_{\text{eff}} > 5700$ К не

виключає наявності дифузії як механізму, що приводить до виснаження літію. Хід залежності вмісту літію від T_{eff} для груп зір різної металевості свідчить про зростання ефективності фізичних процесів, що змінюють вміст літію зі збільшенням металевості. Підтверджено наявність бімодальності розподілу літію для зір з $[\text{Fe}/\text{H}]$ близько 0 і $T_{\text{eff}} > 5600$ К.

3. Наші результати для гігантів з $T_{\text{eff}} < 5600$ К і $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ не суперечать уявленням про два епізоди перемішування.

4. Щоб визначити, які фізичні процеси і якою мірою відіграють визначальну роль на різних металевостях, необхідні нові зусилля для спостережень і теоретичних розрахунків.

-
- [1] I. Jr. Iben, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **76**, 55 (1991).
 [2] F. Spite, M. Spite, *Astron. Astrophys.* **163**, 140 (1986).
 [3] T. P. Walker, G. Steigman, D. N. Schramm, K. A. Olive, H. Kang, *Astrophys. J.* **376**, 51 (1991).
 [4] M. Spite, P. Francois, P. E. Nissen, F. Spite, *Astron. Astrophys.* **307**, 172 (1996).
 [5] R. Rebolo, P. Molaro, J. E. Beckman, *Astron. Astrophys.* **192**, 192 (1988).
 [6] C. A. Pilachowski, C. Sneden, J. Booth, *Astrophys. J.* **407**, 699 (1993).
 [7] J. A. Thorburn, *Astrophys. J.* **421**, 318 (1994).
 [8] S. G. Ryan, T. G. Beers, C. P. Deliyannis, J. A. Thorburn, *Astrophys. J.* **458**, 543 (1996).
 [9] P. Bonifacio, P. Molaro, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **285**, 847 (1997).
 [10] S. G. Ryan, J. E. Norris, T. G. Beers, *Astrophys. J.* **523**, 654 (1999).
 [11] R. G. Gratton, C. Sneden, E. Carretta, A. Bragaglia, *Astron. Astrophys.* **354**, 169 (2000).
 [12] C. P. Deliyannis, P. Demarque, S. D. Kawaler, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **73**, 21 (1990).
 [13] S. Vauclair, C. Charbonnel, *Astron. Astrophys.* **295**, 715 (1995).
 [14] S. G. Ryan, C. P. Deliyannis, *Astrophys. J.* **500**, 398 (1998).
 [15] M. Salaris, A. Weiss, astro-ph/0104406, (2001).
 [16] C. Soubiran, D. Katz, R. Cayrel, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **133**, 221 (1998).
 [17] D. Katz, C. Soubiran, R. Cayrel R., *et. al.*, *Astron. Astrophys.* **338**, 151 (1998).
 [18] G. A. Galazutdinov, preprint SAO RAS, 92 (1992).
 [19] V. V. Tsymbal, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
 [20] T. V. Mishenina, V. V. Kovtykh, *Astron. Astrophys.* **370**, 951 (2001).
 [21] R. L. Kurucz, CD ROM n13, (1993).
 [22] M. Carlsson, R. J. Rutten, J. H. Bruls, N. G. Shchukina, *Astron. Astrophys.* **138**, 860 (1994).
 [23] T. V. Mishenina, V. V. Tsymbal, *Pis'ma Astron. Zhurn.* **23**, 693 (1997).
 [24] Y. Q. Chen, P. E. Nissen, G. Zhao, *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 491 (2000).

LITHIUM IN METAL-POOR STARS

T. V. Mishenina

*Astronomical observatory of Odessa National University,
Shevchenko Park, Odessa, 65014, Ukraine*

The Li abundance in 100 stars of different metallicity has been derived by synthetic spectrum method. The stellar spectra were obtained with echelle-spectrometer of the 1.93 m telescope of the Haute Provence Observatory (France). The change of the Li abundance with T_{eff} was shown for different metallicity. The average value of $\log A(\text{Li})$ is 2.30 ± 0.05 for the lithium plateau stars. The plateau is observed to $-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$. The Li abundance behaviour does not exclude the diffusion as the Li dilution mechanism. The trend Li with T_{eff} for different metallicity stars shows the growth of the physical process efficiency with $[\text{Fe}/\text{H}]$ increasing. The two episodes of the mixing were confirmed for giants with $T_{\text{eff}} < 5600$ K and $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$.