

УДК 524.6-54.

PACS number(s): 97.10.Cv; 97.20.Wt

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧАСУ ПЕРЕБУВАННЯ ЗІР НАСЕЛЕНЬ І ТА ІІ ТИПІВ НА СТАДІЇ ГОЛОВНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ВІД ЇХ МАСИ НУЛЬОВОГО ВІКУ

К. Ганшина, В. Захожай

*Харківський національний університет імені Василя Каразіна
кафедра астрономії
майдан Свободи, 4, 61077 Харків, Україна
e-mail: chrisganshina@yahoo.com, zkh@astron.kharkov.ua*

За компеляційними даними щодо зір різного елементного складу (майже нульового і сонячного вмісту металів) побудовані залежності часу горіння водню від їх мас нульового віку $\tau_{zn} = \tau_{zn}(m)$. Отримані апроксимаційні формули для $\tau_{zn} = \tau_{zn}(m)$ у логарифмічних шкалах для трьох інтервалів мас: $< 0,5 m_{\odot}$, $0,5-30 m_{\odot}$ і $> 30 m_{\odot}$. Залежності для зір найменших та найбільших мас описують за допомогою лінійно-логарифмічної залежності. Для зір, маси яких близькі до сонячної і більші, одержані логарифмічні поліноми другого ступеня.

Ключові слова: зорі населення ІІ типу, стадія головної послідовності, астрофізичні залежності.

Вивчення астрофізичних залежностей між основними характеристиками зір з нульовим вмістом металів є актуальним завданням, оскільки вони дають змогу зрозуміти закономірності перших зір Всесвіту. Однак до останнього часу інформація про моделі зір населення ІІ типу для широкого діапазону початкових мас, які містять систематичні дані про основні астрофізичні параметри була відсутньою. З огляду на це ми звернулися до провідних фахівців, які займаються побудовою еволюційних моделей, проблемою перших зір Всесвіту, еволюцією Галактики Лаури Портинарі, Волкера Бромма, П'єра Лесаффа, Крістофера Тоута, Герберта Лау, з проханням надати нам можливість попрацювати з базами даних щодо моделей зір з нульовим вмістом металів. Нам була рекомендована база даних групи PADOVA, яка не лише розраховує найсучасніші моделі, а й систематизує матеріал з проблеми ІІ-го типу населення, який одержують різні фахівці світу [<http://pleiadi.pd.astro.it/>]. Доступ до такої бази даних дав змогу нам одержати астрофізичні залежності, які подані нижче.

1. Зорі населення ІІ типу в еволюції Всесвіту. Перша згадка про існування таких об'єктів з'явилася наприкінці 70-х років ХХ ст. у працях Вайта і Ріса [20]. Вони висловили гіпотезу багаторівневої еволюції Галактики, яка починається зі скупчування первинної речовини Всесвіту у ділянці високої густини, маси і світності. Маса скупчень, в яких відбувалося формування найстаріших зір, оцінюють як $10^6 m_{\odot}$.

Існування найстарішої стадії зореутворення, тобто населення III типу, було постульовано через наявність великої кількості важких елементів у зорях населення II типу [15], ніж припускається за космологічними теоріями. Уявні об'єкти III типу очікуються настільки масивними зорями, щоб наприкінці своєї еволюції утворювати метали, які надалі будуть викинуті у міжзоряний простір. До масивних зір належать ті, які мали початкову масу більшу за $8 m_{\odot}$ – мінімальну масу, яку повинна мати одинока зоря нульового віку, щоб стати науковою.

Коли зорі починають формуватися, густина і температура у центрі збільшуються. Впродовж еволюції у надрах зір по чергово (але в залежності від загальної маси) відбуваються ядерні перетворення – водню у гелій, вуглець і кисень. Якщо маса зорі велика, у її надрах можуть бути простежені такі перетворення: у неон та кремній, які горять доти, доки не утворяться елементи групи заліза. Унаслідок фотодисоціації ядер заліза відбувається колапс. Час горіння гелію приблизно у десять разів менший, ніж водню. Часова шкала горіння гелію зменшується через втрату нейтрино, які виносять енергію з ядра зорі. Втрати енергії на стадії гігантів збільшуються з температурою приблизно у дев'ять разів. Коли зоря має залізне ядро, яке перевищує за масою межу Чандрасекара, вона колапсує у нейтронну зорю або чорну діру [8, 12]. Результатом може бути вибух наднової або навіть, у деяких випадках, γ -променевої вибух.

Відсутність металів у реліктових зорях значно зменшує темп втрати маси, доводячи його до надзвичайно малого. Для простоти вважається, що зорі населення III типу зберігають майже всю свою первинну масу до кінця горіння гелію. Дослідження засвідчили, що перша генерація зір мала бути досить масивною, і такі зорі повинні зберігати більшу частину своєї первинної маси до кінця їх еволюції.

Маломасивні зорі формують білі карлики. Масивні зорі формують нейтронні зорі, або чорні діри. Маса гелієвого ядра збільшується під час ядерного колапсу, тому вибух наднової не може набути потрібного збільшення мас кисневого та кремнієвого ядер. Чорна діра з наймасивніших зір формується безпосередньо без вибуху наднової [8].

Сучасні теоретичні дослідження еволюції зір, які не містять металів, свідчать, що вони можуть бути класифіковані так [15]:

1. Зорі з масами, вищими за $250 m_{\odot}$ після згоряння водню та утворення наступних металів, стискаються повністю у чорну діру, не викидаючи важких елементів.
2. Зорі з масами $100\text{--}250 m_{\odot}$ частково або повністю руйнуються через нестабільність електрон-позитронної пари. У зір з масами, більшими від $150 m_{\odot}$, ядро повністю руйнується, і важкі елементи оболонки викидаються у міжзоряне середовище. Можливий спалах γ -випромінювання у випадку стрімкого енергетичного викидання (варіант гіпернової).
3. Зорі з масами у межах $35\text{--}100 m_{\odot}$ наприкінці стадії наднових II типу залишають після себе "ядра" у вигляді чорних дір.

Тільки за умов дуже низьких металічностей наймасивніші зорі зберігають свої маси аж до руйнування. Під час збільшення металічності зростає, відповідно, темп втрати маси.

2. Залежність часу життя зір на головній послідовності від маси зір нульового віку. Стадію зір головної послідовності характеризують часом горіння водню, який залежить від маси зір нульового віку та їх елементного складу. Стадія головної послідовності закінчується гелієвим спалахом, після якої починається стадія гігантів, яка характеризується часом горіння гелію.

Для різних діапазонів мас, переважно для зір сонячної металічності, згідно із моделями та апроксимаційними формулами, які наводять А. Масевич і А. Тутуков [1], В. Сурдін [2], Ф. Адамс і Г. Лайфлін [5], можна розрахувати час горіння водню у надрах зір залежно від їх маси.

Дані про горіння водню (стадія головної послідовності) та гелію (стадія гігантів) для низькометалічних зір наведені у статтях П. Маріго [13, 14], Д. Шайрера [16], Ч. Тоута [18], Л. Сісса [17].

Для найнижчих зоряних мас час життя на головній послідовності може бути обчислений за формулою Ф. Адамса і Г. Лафліна [5]:

$$\tau_{zn} = 10^{10} (m/m_{\odot})^{\varepsilon}, \quad (1)$$

де $\varepsilon = 3-4$.

Для зір з масами, близькими до сонячних, А. Масевич і А. Тутуков [1] наводять вираз для часу горіння водню, який залежить від елементного складу:

$$\tau_{zn} = 7,6 \cdot 10^9 (1 + 30Z) (m/m_{\odot})^{-3,7} (0,23/Y)^{1,6}, \quad (2)$$

Y, Z – масова частка ядер гелію і важких елементів, відповідно.

Там же [1] наведено апроксимаційні формули для тривалості стадії головної послідовності для зір сонячного складу з великими масами

$$2,3 \leq m/m_{\odot} \leq 8 \quad \tau_{zn} \approx 5 \cdot 10^9 (m/m_{\odot})^{-2,5}, \quad (3)$$

$$8 \leq m/m_{\odot} \leq \max m \quad \tau_{zn} \approx 1,6 \cdot 10^8 (m/m_{\odot})^{-1}. \quad (4)$$

На інтервалі мас $0,2-6 m_{\odot}$ з цими формулами добре корелює апроксимаційна формула, яку наводить Сурдін [2]

$$\lg \tau_{zn} = \lg^2(m/m_{\odot}) - 3,6(m/m_{\odot}) + 10. \quad (5)$$

Для діапазону мас $6-40 m_{\odot}$ з цієї формули одержуємо більший час життя зірки на стадії головної послідовності.

Апроксимаційна формула має мінімум на $m = 63 m_{\odot}$, а далі гілка параболи йде вгору (час горіння водню повинен збільшуватися необмежено), тобто для великих мас цією формулою користуватися не можна.

Для зір з масою, більшою від $100 m_{\odot}$, В. Сурдін [2] наводить формулу

$$\lg \tau_{zn} = 6,3, \quad (6)$$

яка дає тривалість життя на головній послідовності і відрізняється від результатів А. Масевич і А. Тутукова [1].

Використання таблиць, наведених в електронній базі даних групи PADOVA [<http://pleiadi.pd.astro.it/>], дозволило знайти апроксимаційні формули для залежності тривалості горіння водню від маси зір нульового віку зір населення Галактики III типу на інтервалі мас від $0,7 m_{\odot}$ до $1\,000 m_{\odot}$:

$$0,7 \leq m/m_{\odot} \leq 80 \quad \lg \tau_{zn} = 0,86 \lg^2(m/m_{\odot}) - 3,37 \lg(m/m_{\odot}) + 9,77, \quad (7)$$

$$\pm 0,01 \quad \pm 0,03 \quad \pm 0,01$$

$$80 \leq m/m_{\odot} \leq 1\,000 \quad \lg \tau_{zn} = -0,14 \lg(m/m_{\odot}) + 6,80. \quad (8)$$

$$\pm 0,06 \quad \pm 0,15$$

Із рис. 1 робимо висновок, що апроксимаційні залежності, які навели А. Масевич і А. Тутуков [1], В. Сурдін [2], Ф. Адамс і Г. Лайфлін [5] практично збігаються на інтервалі мас від $0,3 m_{\odot}$ до $6 m_{\odot}$. З іншого боку, поліноміальна

залежність, яку запропонував В. Сурдін [2] для зір сонячного складу і отриманий поліном (7) для зір III населення “розміщені” паралельно в інтервалі мас $0,7-30 m_{\odot}$ та знаходяться систематично вище від залежності А. Масевич і А. Тутукова [1] для масивних зір.

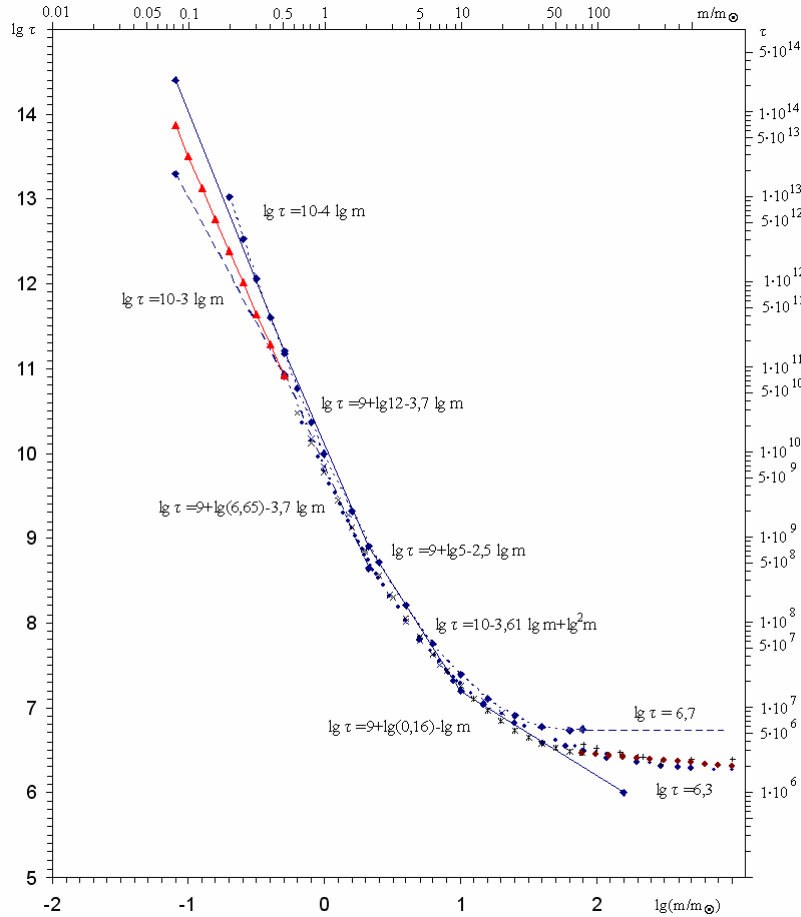


Рис. 1. Залежність часу життя зір Галактики I і III типів населень.

Вживані позначення:

- ◆— — залежність Масевич, Тутукова [1]; - -◆- - залежність Адамса, Лайфліна [5];
- -◆- - залежність Сурдіна [2]; + — залежність, побудована за даними Шейрера [16];
- — дані, наведені Маріго [13];
- ▲— — отримана крива для діапазону низьких мас; * — дані Маріго [14];
- ◆ — залежність Сурдіна для великих мас [2]. Час життя наведено в роках, маса зірок нульового віку — в масах Сонця

Результати чисельного моделювання масивних та надмасивних зір з масами $m/m_{\odot} > 80$, які ми одержали, теж лежить вище залежностей А. Масевич і А. Тутукова [1], а також і В. Сурдіна [2]. Оскільки систематичний хід залежності

для зір сонячного складу розміщений вище на значному логарифмічному інтервалі мас, викликає сумнів правильність отриманої у середині 80-х років залежності (4), яку розповсюджували на усі масивні та надмасивні зорі. Викликає сумнів також тривалість часу життя надмасивних зір ($m/m_{\odot} > 100$), залежність (6), наведена В. Сурдіним [2], яка теж лежить суттєво нижче не тільки від його залежності для менш масивних зір, а й для залежності тривалості життя зір III типу населення.

Одержані астрофізичні залежності за даними групи PADOVA між часом горіння водню та масою зір нульового віку, які належать до населення III, узгоджуються з одержаною раніше відповідною залежністю Ф. Адамса і Г. Лафліна [5] (при $\varepsilon = 3,7$, див. рис. 1), і знаходиться систематично нижче від залежності $\tau_{zn} = \tau_{zn}(m)$ для зір сонячного елементного складу. Наші апроксимаційні залежності дають змогу уточнити відповідну залежність для масивних зір сонячного елементного складу, а саме: можна очікувати, що залежність $\tau_{zn} = \tau_{zn}(m)$ на інтервалі мас $> 100 m_{\odot}$ має бути розміщена на $\Delta \lg \tau \approx 0,4$ вище (тобто $\lg \tau_{zn} = 6,7$), що запропонував В. Сурдін [2]. Одержані залежності можуть бути корисними для оцінок віку зір гало, оскільки їх елементний склад є проміжним між зорями населень I та III типів.

1. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения. М.: Наука, 1988.
2. *Сурдин В. Г.* Рождение звезд. М.: УРСС, 2001.
3. *Захожай В. А.* Космичні тіла Галактики: класифікація та еволюція // Вісник Астрон. школи. 2002. Т. 3. № 2. С. 81–99.
4. *Abel T., Bryan G. L., Norman M.L.* The Formation and Fragmentation of Primordial Molecular Clouds // ApJ. 2000. Vol. 540. P. 39–44.
5. *Adams F. C., Laughlin Gr.* A Dying Universe: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects // Rev. Mod. Phys. 1997. Vol. 69. N 2. P. 337–372.
6. *Bromm V., Coppi P. S., Larson R. B.* The Formation of the First Stars. I. The Primordial Star-Forming Cloud // ApJ. 2002. Vol. 564. P. 23–51.
7. *Bromm V., Larson R. B.* The First Stars // ARA&A. 2004. Vol. 42. P. 79–118.
8. *Heger A., Woosley S. E., Fryer C. L., Langer N.* Massive Star Evolution Through the Ages // arXiv: astro-ph/0211062v1, 2002.
9. *Karlsson T., Gustafsson B.* Chemical abundance patterns- fingerprints of nucleosynthesis in the first stars // A&A. 2001. Vol. 379. P. 461–481.
10. *Kudritzki R. P.* Line-Driven Winds, Ionizing Fluxes, and Ultraviolet Spectra of Hot Stars at Extremely Low Metallicity. I. Very Massive O Stars // ApJ. 2002. Vol. 577. P. 389–408.
11. *Loewenstein M.* The Contribution of Population III to the Enrichment and Preheating of the Intracluster Medium // ApJ. 2001. Vol. 557. P. 573–577.
12. *Mackey J., Bromm V., Hernquist L.* Three Epochs of Star Formation in the High Redshifts Universe // arXiv:astro-ph/0208447 v2, 2003.
13. *Marigo P., Girardi L., Chiosi C., Wood P. R.* Zero-metallicity stars. I. Evolution at constant mass // A&A. 2001. Vol. 371. P. 152–173.
14. *Marigo P., Chiosi C., Kudritzki R. P.* Zero-metallicity stars. II. Evolution of very massive objects with mass loss // A&A. 2003. Vol. 399. P. 617–632.

15. *Nakamura F., Umemura M.* On the Initial Mass Function of Population III Stars // *ApJ*. 2000. Vol. 548. P.19–32.
16. *Schaerer D.* On the properties of massive Population III stars and metal-free stellar populations // *A&A*. 2002. Vol. 382. P. 28–45.
17. *Siess L., Livio M., Lattanzio J.* Structure, evolution, and nucleosynthesis of primordial stars // *ApJ*. 2002. Vol. 570. P. 329–343.
18. *Tout Ch. A.* The Formation of Massive Population-III Stars and their Ionizing Potential // *MNRAS*. 2000. Vol. 000. P. 1–4.
19. *Tumlinson J., Shull J. M.* Zero-Metallicity Stars and the Effects of the First Stars on Reionization // *ApJ*. 2000. Vol. 528. L65–L68.
20. *White S. D. M., Rees M. J.* Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering // *MNRAS*. 1978. Vol. 183. P. 341–358.

THE LIFE TIME (ON THE MAIN SEQUENCE STAGE) DEPENDENCE ON THE INITIAL MASSES OF POPULATION I AND III STARS

Ch. Ganshina, V. Zakhozhay

*V.N. Karazin Kharkiv National University, Astronomy Department
Svoboda Sq. 4, UA–61077 Kharkiv, Ukraine
e-mail: chrisganshina@yahoo.com, zkh@astron.kharkov.ua*

Dependences of the stars life time on their initial masses are built by means of compiling data for stars of different element composition (almost zero and solar metallicity), which are on the main sequence stage $\tau_{ms} = \tau_{ms}(m)$. The approximation expressions are got for $\tau_{ms} = \tau_{ms}(m)$ in the logarithmic scales on three mass intervals: $< 0,5 m_{\odot}$, $0,5-30 m_{\odot}$ and $> 30 m_{\odot}$. The small and very massive stars are described by the linear dependence in the logarithmic scale. We have got the second-degree polynomial for the massive stars and ones as the Sun.

Key words: population III stars, the main sequence stage, the astrophysical dependences.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006

Прийнята до друку 09.06.2008