

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗІРОК

При вивченні тем «Спектральна класифікація зірок» та «Спектральні паралакси» студенти практично не мають змоги ознайомитися із спектрограмами зірок різних спектральних класів (Sp), а отже вивчати зміну інтенсивності спектральних ліній різних атомів чи іонів в залежності від температури зірки. А саме це дає змогу з'ясувати наскільки чутливими є інтенсивності спектральних ліній до температури атмосфери. Недаремно ж всі спектральні класи зірок розбито на підкласи для кожного з яких визначають свої спектральні особливості.

На лабораторно-практичних заняттях з астрофізики у ЧДПУ імені Т.Г. Шевченка протягом тривалого часу студенти виконують завдання, які зводяться до теоретичного моделювання спектрів зірок різних Sp та їх підкласів. В основу покладено формулу іонізації Саха, яка дає залежність темпу іонізації газів у атмосфері зірки в залежності від її температури, потенціалу іонізації та електронної концентрації.

Запишемо формулу Саха у такому вигляді:

$$n_e \frac{n_1}{n_0} = 2 \frac{g_1}{g_0} \frac{(2\pi m_e kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{\chi}{kT}}, \text{ де}$$

n_e – концентрація електронів ($n_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$),

n_1 – концентрація іонізованих атомів в основному стані,

n_0 – концентрація нейтральних атомів,

g_1 - статистична вага іонізованого стану атому,

g_0 – статистична вага нейтрального стану атома,

k – стала Больцмана,

h – стала Планка,

χ – потенціал першої іонізації.

Введемо позначення:
$$B = \frac{(2\pi m_e \kappa)^3}{n_e h^3}$$

Коефіцієнт $2 \frac{g_1}{g_0}$, як показує практика, можна покласти рівним одиниці.

Тоді
$$\frac{n_1}{n_0} = B \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\chi}{kT}}$$

Як бачимо темп іонізації суттєво залежить від електронної концентрації n_e в атмосфері зірки – збільшення n_e сповільнює темп іонізації. Це означає, що для зірок одного і того ж S_p , темп іонізації буде більш високим у зірок-гігантів (n_e - низька), ніж у зірок, близьких за розміром до Сонця. Очевидно, що інтенсивності спектральних ліній одних і тих же атомів чи іонів з різними χ в першому випадку будуть більшими ніж у другому. Як відомо, на порівнянні інтенсивностей спектральних ліній для зірок різних класів світності і ґрунтується метод спектральних паралаксів.

На заняттях студенти розраховують темп іонізації $\frac{n_1}{n_0}$ для зірок різних

S_p (різних температур) при різних значеннях потенціалу першої іонізації атомів. Як приклад наслідків такої роботи у таблицях 1 - 4 приведені

значення $\frac{n_1}{n_0}$ при чотирьох значеннях концентрації електронів в атмосфері

зірки.

$n_e = 10^8 \text{ см}^{-3}$, $B = 2,41 \cdot 10^7$

Таблиця 1

Спекр. клас	χ $T \cdot 10^3$ К	3	5	7	10	15	20	30
М	3,5	$2,41 \cdot 10^8$	$3,17 \cdot 10^4$	$4,19 \cdot 10^2$	$2,02 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$	0	0
К	4,5	$3,19 \cdot 10^9$	$1,84 \cdot 10^7$	$1,06 \cdot 10^4$	$4,64 \cdot 10$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-10}$	0

G	6	$3,39 \cdot 10^{10}$	$7,10 \cdot 10^8$	$1,49 \cdot 10^7$	$4,50 \cdot 10^4$	2,85	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$7,25 \cdot 10^{-13}$
F	8	$2,23 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{10}$	$6,74 \cdot 10^8$	$8,70 \cdot 10^6$	$6,18 \cdot 10^3$	4,39	$2,21 \cdot 10^{-6}$
A	12	$1,74 \cdot 10^{12}$	$2,52 \cdot 10^{11}$	$3,65 \cdot 10^{10}$	$2,01 \cdot 10^9$	$1,60 \cdot 10^7$	$1,27 \cdot 10^4$	8,06
B	20	$1,20 \cdot 10^{13}$	$3,75 \cdot 10^{12}$	$1,18 \cdot 10^{12}$	$2,06 \cdot 10^{11}$	$1,14 \cdot 10^{10}$	$6,25 \cdot 10^8$	$1,89 \cdot 10^6$
O	35	$5,84 \cdot 10^{13}$	$3,01 \cdot 10^{13}$	$1,55 \cdot 10^{13}$	$5,74 \cdot 10^{12}$	$1,09 \cdot 10^{12}$	$2,09 \cdot 10^{11}$	$7,59 \cdot 10^9$

$$n_e = 10^{12} \text{см}^{-3}, \quad B = 2,41 \cdot 10^3$$

Таблица 2

Спектр. клас	χ $T \cdot 10^3$ К	3	5	7	10	15	20	30
		M	3,5	$2,41 \cdot 10^4$	$3,17 \cdot 10$	$4,19 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$	0
K	4,5	$3,19 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10$	$4,64 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-8}$	0	0
G	6	$3,39 \cdot 10^6$	$7,10 \cdot 10^4$	$1,49 \cdot 10^3$	4,50	$2,85 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$	0
F	8	$2,23 \cdot 10^7$	$1,22 \cdot 10^6$	$6,74 \cdot 10^4$	$8,70 \cdot 10^2$	$6,18 \cdot 10^{-1}$	$4,39 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-10}$
A	12	$1,74 \cdot 10^8$	$2,52 \cdot 10^7$	$3,65 \cdot 10^6$	$2,01 \cdot 10^5$	$1,60 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10$	$8,06 \cdot 10^{-4}$
B	20	$1,20 \cdot 10^9$	$3,75 \cdot 10^8$	$1,18 \cdot 10^8$	$2,06 \cdot 10^7$	$1,14 \cdot 10^6$	$6,25 \cdot 10^4$	$1,89 \cdot 10^2$
O	35	$5,84 \cdot 10^9$	$3,01 \cdot 10^9$	$1,55 \cdot 10^9$	$5,74 \cdot 10^8$	$1,09 \cdot 10^8$	$2,09 \cdot 10^7$	$7,59 \cdot 10^5$

$$n_e = 10^{16} \text{см}^{-3}, \quad B = 2,41 \cdot 10^{-1}$$

Таблица 3

Спектр клас	χ $T \cdot 10^3$ К	3	5	7	10	15	20	30
		M	3,5	2,41	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-6}$	0	0
K	4,5	$3,19 \cdot 10$	$1,84 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$4,64 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
G	6	$3,39 \cdot 10^2$	7,10	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	0	0
F	8	$2,23 \cdot 10^3$	$1,22 \cdot 10^2$	6,74	$8,70 \cdot 10^{-2}$	$6,18 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-8}$	0
A	12	$1,74 \cdot 10^4$	$2,52 \cdot 10^3$	$3,65 \cdot 10^2$	$2,01 \cdot 10$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$8,06 \cdot 10^{-8}$
B	20	$1,20 \cdot 10^5$	$3,75 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$2,06 \cdot 10^3$	$1,14 \cdot 10^2$	6,25	$1,89 \cdot 10^{-2}$
O	35	$5,84 \cdot 10^5$	$3,01 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$	$5,74 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$2,09 \cdot 10^3$	$7,59 \cdot 10$

$$n_e = 10^{20} \text{см}^{-3}, \quad B = 2,41 \cdot 10^{-5}$$

Таблица 4

Спектр. клас	χ $T \cdot 10^3$ К	3	5	7	10	15	20	30
М	3,5	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0	0
К	4,5	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0
G	6	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
F	8	$2,23 \cdot 10^{-1}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$6,74 \cdot 10^{-4}$	$8,70 \cdot 10^{-6}$	$6,18 \cdot 10^{-9}$	0	0
A	12	1,74	$2,52 \cdot 10^{-1}$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	0
B	20	$1,20 \cdot 10$	3,75	1,18	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-6}$
O	35	$5,84 \cdot 10$	$3,01 \cdot 10$	$1,55 \cdot 10$	5,74	1,09	$2,09 \cdot 10^{-1}$	$7,59 \cdot 10^{-3}$

Як бачимо значення n_e суттєво впливає на темп іонізацій, а от же і на інтенсивність спектральної лінії того чи іншого іона. Дані таблиць дозволяють порівнювати інтенсивності спектральних ліній для зірок різних класів світності. Так наприклад, для зірок-гігантів (таблиця 1) темп іонізації на 12 порядків вищий ніж для зірок-карликів (таблиця 4). На цій підставі можна теоретично “прочитати” спектрограму зірки та віднести цю зірку до того чи іншого класу світності.

За критерії наявності чи відсутності спектральної лінії у спектрі зірки можна прийняти таке:

1. Повна іонізація – лінії дуже інтенсивні $\left(\frac{n_1}{n_0} \geq 10^3 \right)$.

2. Значна іонізація – лінії інтенсивні $\left(10^2 \leq \frac{n_1}{n_0} < 10^3 \right)$.

3. Помітна іонізація – інтенсивність ліній слабка $\left(1 \leq \frac{n_1}{n_0} < 10^2 \right)$.

4. Майже відсутня іонізація – інтенсивність ліній на межі видимості $\left(10^{-1} \leq \frac{n_1}{n_0} < 1 \right)$.

5. Лінії непомітні $\left(\frac{n_1}{n_0} < 10^{-1} \right)$.

Робота розрахована на одне лабораторно-практичне заняття. Практика показує, що студенти встигають за цей час усвідомити суть завдання, виконати потрібні розрахунки та провести аналіз одержаних даних.

Література:

1. Бакулин П.Н., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. 5-е изд. – М.: Наука, 1983 – 560 с.
2. Мартинов Д.Я. Курс общей астрофизики. 3-е изд. М.: Наука, 1979 – 650 с.
3. Климишин І.А. Астрономія. Львів: Світ. 1994.– 328 с.
4. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. 2-е изд. М.: Наука. 1975. – 513 с.

Анотація

Викладено ідею та зміст лабораторно-практичного заняття з астрономії для студентів фізичних спеціальностей педвузів по темі “Спектральна класифікація зірок та спектральний паралакс”.