

### 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 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 атома,
- $g_0$  – статистична вага нейтрального стану атома,
- $k$  – стала Больцмана,
- $h$  – стала Планка,
- $\chi$  – потенціал першої іонізації.

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

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 Sp 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  $\chi$  в першому випадку будуть більшими ніж у другому. Як відомо, на порівнянні інтенсивностей спектральних ліній для зірок різних класів світності і грунтується метод спектральних паралаксів.

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

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

Таблица 1

Спектр. класс	$\chi$ Т·10 <sup>3</sup> , К	3	5	7	10	15	20	30
		М	3,5	2,41·10 <sup>8</sup>	3,17·10 <sup>4</sup>	4,19·10 <sup>2</sup>	2,02·10 <sup>-2</sup>	1,00·10 <sup>-9</sup>
К	4,5	3,19·10 <sup>9</sup>	1,84·10 <sup>7</sup>	1,06·10 <sup>4</sup>	4,64·10	1,17·10 <sup>-4</sup>	2,96·10 <sup>-10</sup>	0
Г	6	3,39·10 <sup>10</sup>	7,10·10 <sup>8</sup>	1,49·10 <sup>7</sup>	4,50·10 <sup>4</sup>	2,85	1,81·10 <sup>-4</sup>	7,25·10 <sup>-13</sup>
Ф	8	2,23·10 <sup>11</sup>	1,22·10 <sup>10</sup>	6,74·10 <sup>8</sup>	8,70·10 <sup>6</sup>	6,18·10 <sup>3</sup>	4,39	2,21·10 <sup>-6</sup>
А	12	1,74·10 <sup>12</sup>	2,52·10 <sup>11</sup>	3,65·10 <sup>10</sup>	2,01·10 <sup>9</sup>	1,60·10 <sup>7</sup>	1,27·10 <sup>4</sup>	8,06
В	20	1,20·10 <sup>13</sup>	3,75·10 <sup>12</sup>	1,18·10 <sup>12</sup>	2,06·10 <sup>11</sup>	1,14·10 <sup>10</sup>	6,25·10 <sup>8</sup>	1,89·10 <sup>6</sup>
О	35	5,84·10 <sup>13</sup>	3,01·10 <sup>13</sup>	1,55·10 <sup>13</sup>	5,74·10 <sup>12</sup>	1,09·10 <sup>12</sup>	2,09·10 <sup>11</sup>	7,59·10 <sup>9</sup>

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

Таблица 2

Спектр. класс	$\chi$ Т·10 <sup>3</sup> , К	3	5	7	10	15	20	30
		М	3,5	2,41·10 <sup>4</sup>	3,17·10	4,19·10 <sup>-</sup>	2,02·10 <sup>-</sup>	0
К	4,5	3,19·10 <sup>5</sup>	1,84·10 <sup>3</sup>	1,06·10	4,64·10 <sup>-</sup>	1,17·10 <sup>-</sup>	0	0
Г	6	3,39·10 <sup>6</sup>	7,10·10 <sup>4</sup>	1,49·10 <sup>3</sup>	4,50	2,85·10 <sup>-</sup>	1,81·10 <sup>-</sup>	0
Ф	8	2,23·10 <sup>7</sup>	1,22	6,74·10 <sup>4</sup>	8,70·10 <sup>2</sup>	6,18·10 <sup>-</sup>	4,39·10 <sup>-</sup>	2,21·10 <sup>-</sup>
А	12	1,74·10 <sup>8</sup>	2,52·10 <sup>7</sup>	3,65·10 <sup>6</sup>	2,01·10 <sup>5</sup>	1,60·10 <sup>3</sup>	1,27·10	8,06·10 <sup>-4</sup>
В	20	1,20·10 <sup>9</sup>	3,75·10 <sup>8</sup>	1,18·10 <sup>8</sup>	2,06·10 <sup>-</sup>	1,14·10 <sup>6</sup>	6,25·10 <sup>4</sup>	1,89·10 <sup>2</sup>
О	35	5,84·10 <sup>9</sup>	3,01·10 <sup>9</sup>	1,55·10 <sup>9</sup>	5,74·10 <sup>5</sup>	1,09·10 <sup>5</sup>	2,09·10 <sup>7</sup>	7,59·10 <sup>5</sup>

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

Таблица 3

Спектр. класс	$\chi$ Т·10 <sup>3</sup> , К	3	5	7	10	15	20	30
		М	3,5	2,41	3,17·10 <sup>-3</sup>	4,19·10 <sup>-6</sup>	0	0
К	4,5	3,19·10	1,84·10 <sup>-1</sup>	1,06·10 <sup>-3</sup>	4,64·10 <sup>-7</sup>	0	0	0
Г	6	3,39·10 <sup>2</sup>	7,10	1,49·10 <sup>-1</sup>	4,50·10 <sup>-4</sup>	2,85·10 <sup>-8</sup>	0	0
Ф	8	2,23·10 <sup>3</sup>	1,22	6,74·	8,70·10 <sup>-</sup>	6,18·10 <sup>-</sup>	4,39·10 <sup>-</sup>	0
А	12	1,74·10 <sup>4</sup>	2,52·10 <sup>3</sup>	3,65·10 <sup>2</sup>	2,01·10	1,60·10 <sup>-</sup>	1,27·10 <sup>-</sup>	8,06·10 <sup>-8</sup>
В	20	1,20·10 <sup>5</sup>	3,75·10 <sup>4</sup>	1,18·10 <sup>4</sup>	2,06·10 <sup>3</sup>	1,14·10 <sup>2</sup>	6,25	1,89·10 <sup>-2</sup>
О	35	5,84·10 <sup>5</sup>	3,01·10 <sup>5</sup>	1,55·10 <sup>5</sup>	5,74·10 <sup>4</sup>	1,09·10 <sup>4</sup>	2,09·10 <sup>3</sup>	7,59·10

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

Таблиця 4

Клас зорки	$\chi$	Темп іонізації						
		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
Г	6	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
Е	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
А	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
В	20	1,20	3,75	1,18	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-6}$
О	35	5,84	3,01	1,55	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, отже, 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" електрограму 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.

- 1. *Мартинов Д.Я. Курс общей астрофизики. 3-е изд. - М.: Наука, 1979 – 650 с.*
- 2. *Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. 2-е изд. - М.: Наука, 1975. – 513с.*