

## Анализ солнечного спектра

Цель работы: ознакомиться с методами исследования химического состава звезд.

В оптике под спектром обычно понимают распределение энергии электромагнитного излучения по частотам или длинам волн.

*Сплошной спектр* - это спектр электромагнитного излучения, распределение энергии в котором характеризуется непрерывной функцией длины волны излучения  $f(\lambda)$  (или его частоты  $\nu$ ).

Для сплошного спектра функция  $f(\lambda)$  слабо изменяется в достаточно широком диапазоне длин волн, в отличие от линейчатых и полосатых спектров, когда  $f(\lambda)$  имеет при дискретных значениях длины волны  $\lambda$  выраженные максимумы, очень узкие для спектральных линий и более широкие для спектральных полос.

В видимой области при разложении света спектральными приборами, сплошной спектр получается в виде непрерывной цветной полосы (при визуальном наблюдении) или плавной кривой (при фотоэлектрической регистрации). Примером сплошного спектра, охватывающего весь диапазон частот и характеризуемого вполне определённым спектральным распределением энергии, является спектр равновесного излучения. Он характеризуется законом излучения Планка.

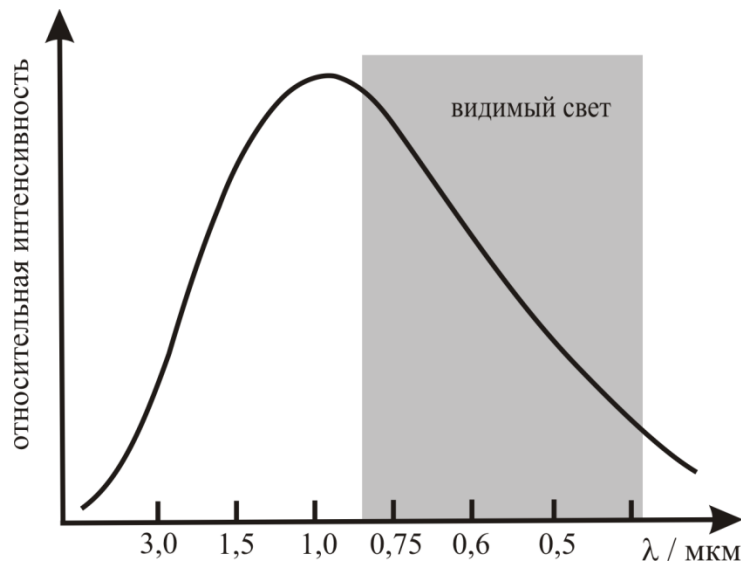


Рис. 1. Примерный вид спектра излучения абсолютно черного тела при температуре 3500К.

*Линейчатый спектр* испускания излучения дают пары и разряженные газы при сильном нагревании. Каждый газ излучает свет определенной длины волны и дает линейчатый спектр характерный только для данного элемента (рис.2). Изменение состояния газа или условий его свечения отражаются в спектре.

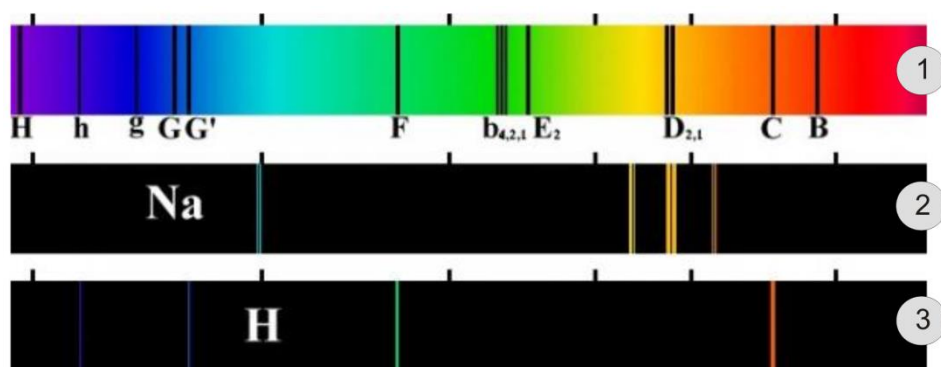


Рис.2. Спектры излучения водорода (3), паров натрия (2) и Солнца (1).

Линейчатый спектр *поглощения* дают газы и пары, если за ними находится источник света, дающий непрерывный спектр. В этом случае на фоне непрерывного спектра наблюдаются темные полосы поглощения, расположенные в тех местах, где должны находиться линии излучения какого либо газа (рис.2).

Например, в спектрах Солнца и звёзд на сплошной спектр излучения накладывается дискретный спектр поглощения. Возникают темные линии, которые называются Фраунгоферовыми линиями (они названы в честь немецкого физика Й.Фраунгофера, см. портрет), который впервые их обнаружил в 1814 г.). В видимой области спектра Солнца наиболее интенсивны линии ионизованного кальция и линии водорода.



Вы должны были заметить, что звезды различны по цветам. Цвет звезды тесно связан с ее температурой. У холодных звезд цвет красный. С повышением температуры цвет переходит в оранжевый, желтый, голубой, белый. К тому же наличие металлов увеличивается с уменьшением температуры звезды. Таким образом, по спектру можно определить температуру звезды, ее химический состав.

*Звезды делятся на восемь основных спектральных классов:*

1. Класс О. Температура фотосферы звезд данного класса порядка 50000 – 25000 К. Для этого класса характерны линии однократно ионизированного гелия, дважды ионизированного калия. Металлов нет. Непрерывный фон распространяется далеко в ультрафиолетовую область.
2. Класс В. Температура порядка 25000 – 15000 К. Выражены линии гелия в спектре. Линии водорода слабые.
3. Класс А. Температура 11000 – 8500 К. Линии водорода в этом классе достигают наибольшей интенсивности. Линии металлов слабые.
4. Класс F. Температура порядка 8000 – 6500 К. В спектре усиливаются линии металлов. Появляется линия углерода.
5. Класс G. Температуру этого класса 6500 – 5500 К. В спектре наблюдается полное развитие линий металлов. Наиболее интенсивны линии кальция.
6. Класс К. 5500 – 4000 К. Спектр определяется линиями металлов. Линии

углерода интенсивны. Фиолетовая область спектра слабее красной. От класса К существует ответвление – класс RNC. К этому классу относятся холодные звезды температура фотосферы, которых порядка 3000 К. Для их спектров характерны полосы поглощения молекул углерода, циана, окиси титана.

7. Класс М. Температура звезд этого класса лежит в пределах 4000 – 2500К. Линии металлов заметны, но довольно слабые. Интенсивны линии поглощения окиси титана и других молекулярных соединений.

Наше Солнце относится к классу G.

Поскольку спектральные линии однозначно характеризуют химические элементы их излучающие, то фраунгоферов спектр позволяет судить о химическом составе звёздных атмосфер. Так было показано, что в атмосфере Солнца присутствуют такие элементы, как водород, железо, хром, кальций, натрий и др. в разных стадиях ионизации. Именно на Солнце впервые спектроскопическими методами был открыт гелий.

В таблице 1 приведены значения длин волн спектральных линий поглощения, обнаруженных в фотосфере Солнца, и их отнесение к химическим элементам.

Таблица 1. Наиболее интенсивные фраунгоферовы линии в спектре Солнца

| Обозначение спектральной линии | Элемент        | Длина волны/нм | Обозначение спектральной линии | Элемент | Длина волны/нм |
|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|---------|----------------|
| y                              | O <sub>2</sub> | 898,8          | b <sub>4</sub>                 | Mg      | 516,7          |
| Z                              | O <sub>2</sub> | 822,7          | c                              | Fe      | 495,8          |
| A                              | O <sub>2</sub> | 759,4          | F                              | H       | 486,1          |
| B                              | O <sub>2</sub> | 686,7          | d                              | Fe      | 466,8          |
| C                              | H              | 656,3          | e                              | Fe      | 438,4          |
| a                              | O <sub>2</sub> | 627,7          | G'                             | H       | 434,0          |
| D <sub>1</sub>                 | Na             | 589,6          | G                              | Fe      | 430,8          |
| D <sub>2</sub>                 | Na             | 589,0          | G                              | Ca      | 430,8          |
| D <sub>3</sub>                 | He             | 587,6          | h                              | H       | 410,2          |
| e                              | Hg             | 546,1          | H                              | Ca      | 396,8          |
| E <sub>2</sub>                 | Fe             | 527,0          | K                              | Ca      | 393,4          |
| b <sub>1</sub>                 | Mg             | 518,4          | L                              | Fe      | 382,0          |
| b <sub>2</sub>                 | Mg             | 517,3          | N                              | Fe      | 358,1          |
| b <sub>3</sub>                 | Fe             | 516,9          | P                              | Ti      | 336,1          |
| b <sub>4</sub>                 | Fe             | 516,8          | T                              | Fe      | 302,1          |

#### Решаемые задачи:

- зарегистрировать спектр излучения Солнца;
- доказать наличие в фотосфере Солнца химических элементов Na, H и Ca;
- пронаблюдать спектр излучения Na. Убедиться, что фраунгоферова линия вблизи 589 нм совпадает с линией излучения Na.

Экспериментальная установка (рис.3):

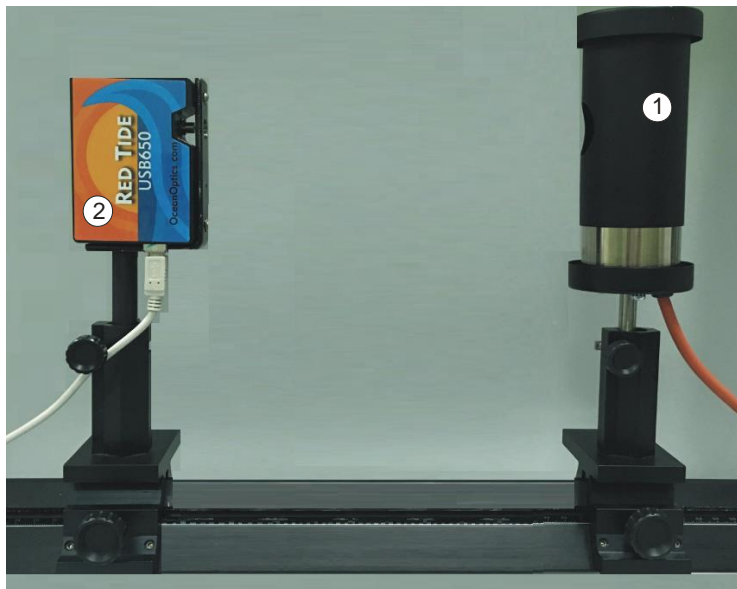


Рис.3 Внешний вид экспериментальной установки

- ✓ Источник излучения, натриевая лампа (1), с блоком питания;
- ✓ спектрометр «Red Tide USB-650» (2);
- ✓ компьютер с установленной программой Spectra Suit.

Принцип работы спектрометра Red Tide USB-650.

Ниже схематично показан путь света через оптический модуль спектрометра.

Свет поступает на входную щель 1 (рис.4). Она представляет собой узкую прорезь, сделанную в непрозрачной пластине, и имеет фиксированную ширину 25 мкм.

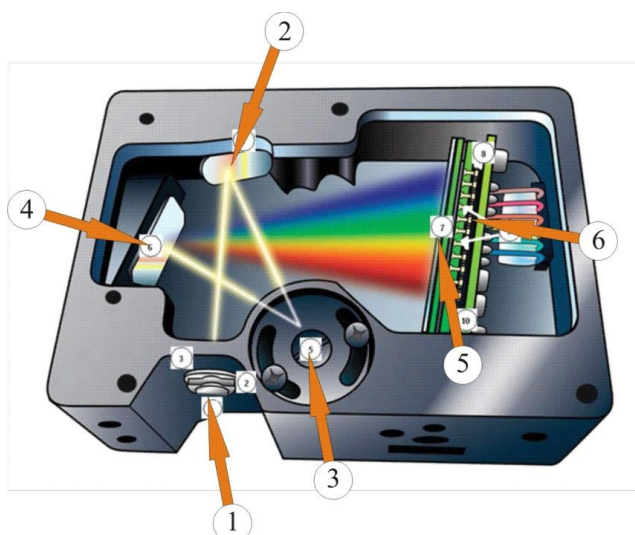



Рис.4. Схема спектрометра

Коллимирующее сферическое зеркало 2 преобразует расходящийся световой пучок в параллельный и направляет его на отражательную дифракционную решетку 3. Разложенный в спектр свет с помощью фокусирующего зеркала 4 и собирающей линзы 5 фокусируется на

поверхности детектора 6 (кремниевый линейный ПЗС - детектор). Этот детектор содержит 650 светочувствительных элементов (пикселей), размер которых 14×200 мкм. Один отсчет элемента соответствует регистрации 75 фотонов. Все элементы выстроены вдоль одной прямой таким образом, что каждый светочувствительный пиксель соответствует определенной длине волны света. После аналого-цифрового преобразования электрических сигналов с пикселей спектр в цифровом виде передается программе SpectraSuite.

### Настройка спектрометра и программной оболочки.

Откройте программу Spectra Suit, используя пиктограмму  на рабочем столе компьютера. Подсоедините спектрометр к компьютеру через USB порт.

Закройте в рабочем окне программы (рис.5) вспомогательные окна 1 и 2. Регистрируемый спектр будет выводиться в окне 3.

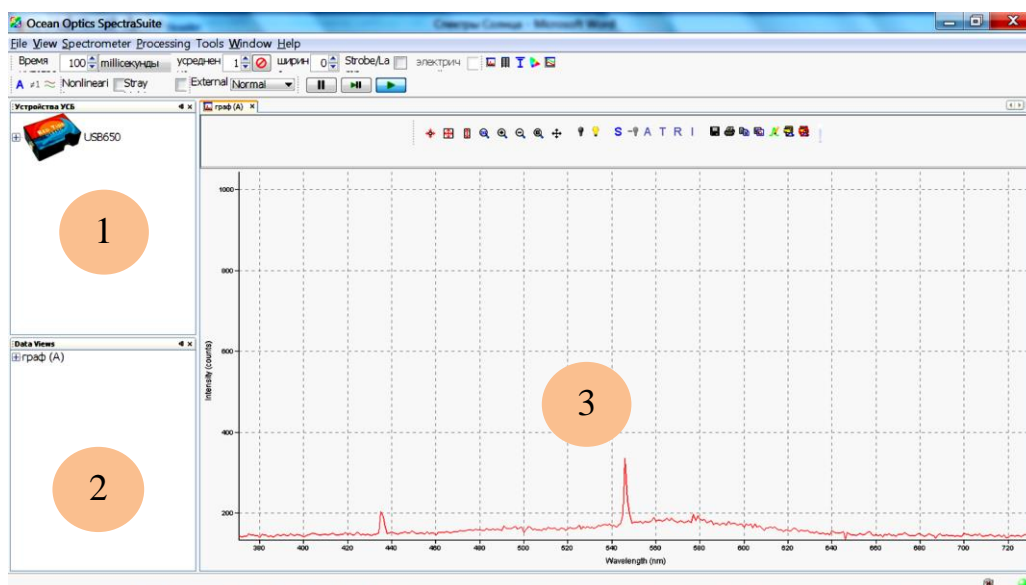


Рис.5. Рабочее окно программы

Кнопки работы со спектрами находятся на панели, показанной на рис.6:













Рис.6. Кнопки работы со спектрами



- вывод на дисплей всего спектрального диапазона (от 350 до 1000 нм).








- масштабирование спектра по осям X и Y на весь экран.

-  - масштабирование спектра по оси Y на весь экран.
-  - ручная установка масштабов по осям X и Y.
-  и  - кнопки увеличения и уменьшения размеров спектра (можно также воспользоваться прокруткой колеса мыши)
-  - увеличение масштаба выбранной области. Нажав левую клавишу мыши выделите прямоугольную область на экране, которую Вы хотите увеличить.
-  - кнопка просмотра нескольких спектров на одном слое.
-  - кнопка сохранения темнового спектра.
-  - кнопка сохранения эталонного спектра.
-  - выбор режима регистрации.
-  - вычитание темнового спектра.

В зависимости от выбора режима возможна регистрация спектров оптической плотности  $A$ , пропускания  $T = I/I_0$ , коэффициента отражения  $R$  и относительной освещенности  $I$ .

Группа кнопок позволяет осуществить ввод/вывод спектров:

-  - сохранение спектра в различных форматах (Grams SPC, JCAMP, binary (only SpectraSuite can read) or tab-delimited (can be opened in an Excel spreadsheet)).
-  - распечатка спектра.
-  - копирование спектра в буфер.
-  - сохранение текущего спектра в качестве верхнего слоя.
-  - удаление спектров верхнего слоя.

При регистрации спектра важно, чтобы регистрируемый сигнал не превышал 4000 отсчетов (один отсчет соответствует попаданию на светочувствительную матрицу 75 фотонов). Для этого необходимо правильно выбрать время накопления сигнала, которое задается с помощью кнопок «Время», расположенных в верхней левой части экрана (рис.7). Диапазон изменения этого параметра составляет от 3 мс до 65 с. Чем больше время накопления сигнала, тем больше сигнал. Рекомендуется подбирать этот параметр таким, чтобы сигнал не превышал 3500 отсчетов.



С помощью кнопок «Усреднение» можно выводить на экран усредненный спектр. Число спектров, которые Вы хотите усреднить, задается в соответствующем окошке (рис.7).

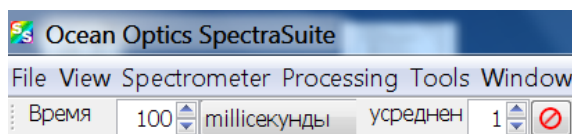


Рис.7. Строка выбора времени регистрации и числа усредняемых спектров.


#### Порядок выполнения работы:


#### Упражнение 1. Регистрация спектра излучения Солнца и отнесение фраунгоферовых линий к химическим элементам.

1. Направьте входную щель спектрометра на освещенное окно лаборатории. Вы должны быть уверены, что кроме дневного света в спектрометр не попадает свет от других источников (ламп освещения и др.).

2. С помощью кнопки «Время» (рис.6) установите время регистрации такое, чтобы максимальное значение в спектре не превышало 3500 отсчетов. На экране появится спектр излучения Солнца, дошедшего до поверхности Земли. Поэтому кроме линий поглощения, возникающих в фотосфере Солнца, в наблюдаемом спектре появляются сильные линии поглощения воды и озона, находящиеся в атмосфере Земли. Для уменьшения уровня шума с помощью кнопки «Усреднение» установите число усредняемых спектров (6 - 10 спектров).

3. Наведите курсор мыши на поле спектра и щелкните правой кнопкой мыши. В появившемся окне выберите опцию «Graph Layer Options», затем в верхней строке - «Visible Spectrum» и далее «Show visible spectrum layer» - «Clip visible spectrum to trendline».

4. Сохраните копию графика на USB-флеш-накопителе. Для этого нажмите кнопку . Зайдите в проводник и создайте папку на флеш-накопителе. Зайдите в эту папку, щёлкните правой клавишей мыши и в открывшемся меню щёлкните последовательно на команды «Создать» - «Точечный рисунок». Откройте созданный файл и вставьте в него сохранённую копию спектра (CTRL+v).

5. Сохраните также спектр в качестве верхнего слоя, нажав кнопку .

6. Дважды кликните мышью на спектре. Появится линия-курсор. Ее положение по длинам волн (в нм) показывается внизу экрана. Линию-курсор можно перемещать по экрану двумя способами: (1) подвести курсор мыши в заданную точку спектра и щелкнуть мышью или (2), набрав интересующую длину волны, нажать «Enter». Шаг перемещения линии-курсора 1 нм.

7. Найдите в спектре:


- линии натрия  $D_1$  и  $D_2$ ,
- линии водорода F и C,
- линии кальция K и H.

## Упражнение 2. Сопоставление спектра Солнца со спектром излучения Na.

1. Установите на одном конце оптической скамьи натриевую лампу 1, а на другом - спектрометр 2 (рис.3).

2. Включите лампу и дайте ей разогреться 1 - 2 минуты.

3. С помощью кнопки «Время» (рис.6) установите время регистрации такое, чтобы максимальное значение в спектре не превышало 3500 отсчетов. На экране появится спектр излучения паров натрия. Для уменьшения уровня шума с помощью кнопки «Усреднение» установите число усредняемых спектров (6 - 10 спектров). На экране дисплея Вы должны наблюдать спектр натрия и спектр Солнца, который Вы сохранили в качестве верхнего слоя.

3. Сохраните копию графика на USB-флеш-накопителе. Для этого нажмите кнопку . Зайдите в проводник и создайте папку на флеш-накопителе. Зайдите в эту папку, щёлкните правой клавишей мыши и в открывшемся меню щёлкните последовательно на команды «Создать» - «Точечный рисунок». Откройте созданный файл и вставьте в него сохранённую копию спектра (CTRL+v).

4. Обратите внимание, что линия излучения натрия в области 589 нм совпадает с одной из линий поглощения в спектре Солнца.

Оформите отчет, в котором должны быть представлены на одном графике спектр Солнца, с надписанными отнесениями изученных линий к химическим элементам, а также спектр паров натрия.

### Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Спектры излучения и поглощения. Сплошной спектр. Линейчатый спектр.
2. Причина возникновения фраунгоферовых линий.
3. Как по спектрам звезд можно установить их химический состав?
4. Как по спектрам звезд установили их скорость относительно Земли?
5. Ход выполнения эксперимента. Объяснить полученные результаты.

### Рекомендуемая литература

Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. §157.