

СПЕКТРАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИКА

На Земле

(Документ является дополнением к видео-лекции.

Предварительная версия методической разработки, от 14 марта 2022. По всем вопросам, связанным с деталями экспериментальных установок и литературой – обращаться по адресам kmalyshev08102@mail.ru, elena.krylova@inbox.ru)

Аннотация

В данной работе мы изучаем возможности научного метода под названием “Спектральный анализ”. Этот метод позволяет получать обширную информацию как об объектах микромира – атомах и молекулах, так и макромира, в гигантских масштабах Солнечной системы, Галактики и Вселенной в целом. В основе метода лежит анализ особенностей излучения различных тел и получение информации о физических и химических особенностях изучаемых объектов, как, например, о температуре нагретых тел, их химическом составе, наличии или отсутствия магнитного поля и других характеристиках. Выполнение данной работы состоит из трех этапов:

1. Определение температуры поверхности Солнца с использованием как модельных, так и оригинальных солнечных спектров. Данная часть работы предполагает съемку спектра лампы накаливания (модели солнечного спектра) и с помощью закона смещения Вина определение температуры нагретого тела. Далее – определение температуры поверхности Солнца на основе оригинального спектра.
2. Определение химического состава Солнца. Данная часть работы предполагает наблюдение и съемку модельных спектров – аналогов солнечного излучения с последующей фиксацией в данных спектрах неизвестного химического элемента и, соответственно, определение этого элемента. Далее – с использованием оригинального солнечного спектра определение наличия различных элементов в недрах Солнца.
3. Наблюдение расщепления спектральных линий, излучаемых определенным химическим элементом, в магнитном поле -- Эффект Зеемана. Цель работы – с помощью Эффекта Зеемана убедиться в возможности регистрации магнитного поля в данной точке пространства.

Введение

Спектром называется распределение интенсивности излучения по энергии. В настоящей практической работе используется электромагнитное излучение оптического (видимого) диапазона длин волн, 400-700 нм, от фиолетового до пурпурного. Источниками излучения будут являться атомы и молекулы различных газов, нагретые тела. Зависимость между свойствами этих объектов и их наблюдаемыми спектрами описывается законами квантовой механики.

Абсолютно чёрное тело – модельный объект, находящийся в термодинамическом равновесии с испускаемым им электромагнитным излучением. Этого достаточно для получения полного математического описания спектральных свойств абсолютно чёрного тела, если только допустить, что электромагнитное излучение распространяется в пространстве не непрерывно, а порциями, или «квантами». Энергия каждого кванта электромагнитного излучения с длиной волны λ равна

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda},$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость света в вакууме, $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка. Спектральная плотность энергии излучения абсолютно чёрного тела абсолютной температуры T , выражается формулой Планка (1901) [1], [2], [3], в системе СИ имеющей вид:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

Здесь $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана. Максимум спектральной плотности равновесного электромагнитного излучения температуры T достигается при длине волны, равной (закон смещения Вина, 1893)

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, b \approx 2.989 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Температура T излучения абсолютно чёрного тела может быть определена при помощи этого соотношения: достаточно экспериментально определить длину волны λ_{max} . В настоящей работе этим методом *измеряется температура поверхности Солнца*. Эксперимент исходит из допущений, что Солнце излучает спектр равновесного электромагнитного излучения, искажения которого в земной атмосфере пренебрежимо малы. Выполненные измерения позволяют оценить корректность этих допущений.

Замечание. Распространённое представление «абсолютно чёрное тело то, которое всё поглощает» – неверно, правильнее говорить «всё поглощает и всё переизлучает». Что означают эти слова применительно к наблюдаемому спектру Солнца? Наблюдаемый нами спектр в действительности является спектром одной из газовых оболочек Солнца, которая называется **фотосферой**. Фотосфера получает энергию из недр Солнца, и затем переизлучает её в открытый Космос. С хорошей точностью эту систему можно интерпретировать как абсолютно чёрное тело.

Спектр абсолютно чёрного тела является примером т.н. **непрерывного спектра** – длина волны может принимать любое положительное значение. Спектры отдельных атомов, являющихся квантовыми системами конечных размеров (порядка $10^{-10} \text{ м} = 1 \text{ \AA}$), состоят из изолированных спектральных линий некоторого набора длин волн. Например, длины волн спектральных линий атома водорода

вычисляются по формуле Бальмера (приближение неподвижного ядра, или бесконечной массы ядра):

$$\frac{hc}{\lambda_{n,m}} = \frac{2m_e e^4 \pi^2}{h^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = Ry \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), Ry \approx 13.6 \text{ ЭВ},$$

где m, n – натуральные числа ($n > m$), $e \approx 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $m_e \approx 0.911 \cdot 10^{-27}$ г – масса электрона. Поэтому спектр атомарного водорода – пример т.н. **линейчатого спектра**. Заметим, что атомы способны не только излучать, но и поглощать излучение соответствующих длин волн. Следовательно, линейчатый спектр может наблюдаться как в виде «спектра испускания», так и в виде «спектра поглощения», когда в излучении, прошедшем через пары образца, некоторые длины волн отсутствуют. Это явление наблюдал Фраунгофер, выявивший сотни линий поглощения в спектре Солнца. Поглощение происходит в фотосфере, и его наличие позволяет судить о химическом составе этой оболочки Солнца.

Водород – единственный химический элемент, для которого длины волн спектра вычисляется в виде формулы [2], [3]. Тем не менее, спектры всех известных химических элементов в настоящее время определены экспериментальными и приближёнными методами с высокой точностью [4]. По спектру можно изучить химический состав изучаемого объекта, в том числе далёких звёзд. В настоящей работе при помощи анализа спектра поглощения делается попытка *установить состав неизвестного образца*.

Известно [5], что спектры атомов изменяются, если излучающий образец поместить во внешнее магнитное поле. Вместо одной линии появляется несколько (не менее трёх), близко расположенных. Это происходит в соответствии с квантово-механическими закономерностями [3], о которых мы здесь говорить не будем. Это явление называется эффектом Зеемана. Эффект Зеемана позволяет судить не только о величине магнитного поля, но и о направлении его по отношению к лучу зрения. Наблюдение эффекта Зеемана в спектре солнечных пятен позволило установить факт существования магнитного поля (порядка 10^3 Гс) в этих пятнах [6, 7]. Это исторически первый пример открытия внеземного магнитного поля. Впоследствии были открыты и измерены магнитные поля галактик (10^{-6} Гс, для измерений таких полей эффект Зеемана не подходит, нужны другие методы), и других далёких объектов, таких, как нейтронные звёзды (10^{12} Гс и более, сверхсильные магнитные поля, эффект Зеемана актуален!). Отметим, что магнитное поле Млечного Пути может быть измерено [6, стр. 31] при помощи зеемановского расщепления так называемой **радиолинии водорода** [3, стр. 181], имеющей длину волны 21 см. Возможность таких измерений объясняется в т.ч. большим количеством водорода в галактическом объёме (галактический диск имеет диаметр порядка сотни тысяч световых лет). Наблюдать экспериментально зеемановское расщепление спектральных линий возможно лишь в относительно сильных магнитных полях – например, в магнитном поле Земли (10^{-1} Гс) оно не наблюдается. *Наблюдение*

эффекта Зеемана в искусственно созданном магнитном поле производится в Упражнении 2.

При изучении линейчатых спектров необходимо иметь в виду, что «спектральная линия» - это физическая модель, в реальности получить излучение с одной-единственной длиной волны (**монохроматическое излучение**) невозможно. Любая спектральная линия обязательно «уширяется». **Уширение** линий связано с движением излучающих атомов, с конечным временем нахождения атома в возбуждённом состоянии и другими факторами. Оно может препятствовать разрешению зеемановских компонент в космических спектрах, см. [6].

Допуск к выполнению работы

Задания:

1. Определить температуру поверхности Сириуса В, см. рис. 1.
2. Получить у сотрудника лаборатории график спектра Солнца и две таблицы №1 и №2. Определить длины волн линий, обозначенных символикаой Фраунгофера. По таблице №1 определить элементы, встречающиеся в спектре Солнца. Проверить полученные результаты по Таблице №2. Соотнести систематику Фраунгофера и соответствующие элементы.

Специфика астрономических спектров Специфика, связанная с атмосферной оптикой

Регистрация оптического излучения, приходящего из далёкого Космоса – трудная экспериментальная задача. Не менее трудна задача интерпретации результатов. Спектральные линии испытывают доплеровское смещение, связанное с движением источников излучения. Сильное гравитационное поле в окрестности источника излучения также вызывает смещение спектра. На спектр оказывают влияние и расширение Вселенной, и соответствующее смещение спектров наблюдается у объектов, удалённых от нас на расстояния мегапарсеков ($1\text{пк} \approx 3.26$ световых года $\approx 3.08 \cdot 10^{16}\text{м}$). Не стоит сбрасывать со счетов и процессы рассеяния излучения как на различных мелких компонентах межзвёздной среды (например, космическая пыль), и его поглощение в межзвёздном газе и в земной атмосфере [8]. При регистрации оптических спектров нужно бороться с городским «спектральным загрязнением», например от уличного освещения, содержащего спектральные линии *Na* (фонари – лампы ДНаТ), *Hg*, *He*, *Ne*

Общая схема спектрального эксперимента

Почти любой эксперимент спектрального анализа выполняется по следующей схеме. 1. Исследуемое излучение коллимируется (с помощью т.н. «входной щели» спектрального прибора), направляется на дифракционную решётку или призму или любой другой **диспергирующий** элемент, индивидуально взаимодействующий с различными длинами волн. 2. В результате дифракции, преломления или многолучевой интерференции излучение оказывается разложенным в спектр. 3. Результат спектрального разложения подаётся на выходную щель, где регистрируется. 4. Регистрация обычно проводится с помощью ПЗС-линеек (ПЗС – **прибор с зарядовой связью**) или АЦП. При невозможности использовать ПЗС – применяются аналоговые методы регистрации, например фотографирование на пластинку. Во многих случаях возможно наблюдение спектра невооружённым глазом. 5. После регистрации спектра необходимо его расшифровать, для чего нужно использовать известные спектры «эталонных» источников, или воспользоваться заводской калибровкой установки.

Упражнение 1. Определение температуры нагретого тела. Определение температуры поверхности Солнца

1. Используется дифракционный монохроматор МУМ-1, сопряжённый с ПК. С помощью монохроматора записывается непрерывный спектр Солнца, в ясную погоду. Если день пасмурный, рекомендовано использовать лампу накаливания.
2. (*) Отснятый спектр необходимо откалибровать, следуя инструкциям на установке «Спектр Гелия», задача №19 атомного практикума для студентов физического факультета [9].
3. (*) Подготовить таблицу, используя программы ORIGIN или EXCEL, доступные на любом компьютере практикума, содержащую спектр в виде зависимости интенсивности излучения от длины волны.
4. По графику определить длину волны, соответствующую глобальному максимуму интенсивности. По формуле Вина рассчитать температуру. Сравнить с известными значениями.
5. Сопоставить спектр, полученный в лаборатории практикума, с данными Атласа Солнечного Спектра Парижской обсерватории и другими данными, см. Справочные сведения. Выяснить, удаётся ли пронаблюдать линии Фраунгофера.

Результаты выполнения Упражнения 1.

Представить температуру абсолютно чёрного тела, эквивалентную спектру светового дня, оценить корректность метода определения температуры Солнца.

Если не удаётся получить спектр солнечного излучения – результатом работы является температура нити лампы накаливания.

Упражнение 2. Определение неизвестного вещества по спектру поглощения

1. Используется призмный спектрограф ИСП-30 [10].
2. Установка состоит из источников излучения, лампы ДРГС-12 (линейчатый спектр, элементы Hg , He) и ДВС-25 (непрерывный спектр, водород H, H_2), кюветы с неизвестным веществом, снабжённой высокоточным регулятором температуры.
3. Спектр поглощения получается при нагреве неизвестного вещества до состояния паров и пропускания через него излучения с непрерывным спектром. Перед нагреванием следует откачать кювету до давления 10^{-3} мм Hg . **Нагрев кюветы осуществляет сотрудник лаборатории!**
4. Исследуемое вещество имеет линию поглощения в видимом диапазоне длин волн. Нужно научиться наблюдать спектр визуально при помощи лупы. Затем сопоставить спектр лампы ДВС-25, получаемый *без* поглощающего вещества на отдельном приборе, со спектром, в котором наблюдается линия поглощения.
5. Ознакомиться с устройством компаратора ИЗА-2 и инструкцией к нему, осмотреть фотопластинку с изучаемой линией.
6. Определить по известным координатам калибровочных линий ртути границы спектрального интервала, поглощённого в кювете.
7. С помощью таблицы линий Фраунгофера определить вещество, находящееся в кювете.

Результат выполнения Упражнения 2.

Спектральный интервал поглощения в неизвестном веществе. Варианты вещества.

Упражнение 3. Эффект Зеемана

1. Используется спектральный прибор ИСП-51 [11], снабжённый ПЗС-линейкой. В ИСП-51 в качестве диспергирующего элемента установлен интерферометр Фабри-Перо [12]. Интерферометр Фабри-Перо представляет собой две плоскопараллельные пластинки, с полупрозрачным напылением, расположенные на достаточно малом расстоянии параллельно друг другу. Получаемый при этом спектр имеет вид интерференционных колец. При этом кольца, относящиеся к длинам волн разных спектральных диапазонов, наложены друг на друга. Для выделения кольца, относящегося к нужной длине волны, необходимо использовать систему призм [11]. Оптическое излучение регистрируется при помощи ПЗС-линейки – прибора с зарядовой связью, и результат регистрации выводится на экран компьютера.
2. Источником магнитного поля является электромагнит, с возможностью регулировки силы постоянного тока.
3. Источником излучения является цинковая лампа ДЦнС-20, с блоком питания.

4. (*) Наблюдать визуально интерференционную картину Фабри-Перо на красной линии цинка, $\lambda = 6362.34 \text{ \AA}$. При необходимости использовать видеокамеру смартфона.
5. С помощью инструкций на установке – получить интерферограмму Фабри-Перо на экране компьютера. **Оптические элементы настроены сотрудником лаборатории!**
6. Изменять силу тока через катушки. Найти минимальное значение тока, при котором наблюдается расщепление спектральных линий.
7. Выяснить, наблюдается ли аналогичная спектральная картина в спектре Солнца, с помощью атласа солнечного спектра Парижской обсерватории. Предложить объяснение.

Результаты выполнения Упражнения 3.

Зная силу тока через катушки и параметры магнита – число витков в катушках и их радиус, см. на установке - сделать оценку порядка магнитного поля, при котором возникает Зеемановское расщепление.

Справочные сведения

Примечание. В случае отсутствия доступа к Интернету необходимые материалы можно получить у сотрудников лаборатории.

0. Интерактивные иллюстрации по курсу атомной физики, кафедра атомной физики физического факультета МГУ:

<http://affp.phys.msu.ru/index.php/black-body-radiation>

1. Атлас Спектра Солнца Парижской обсерватории:

https://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php

2. База спектров, полученных в земной атмосфере:

<http://atlas.obs-hp.fr/elodie/>

информация об инструменте:

<http://www.obs-hp.fr/www/guide/elodie/elodie-eng.html>

3. Оптические схемы телескопов, в том числе солнечных, используемых в Крымской Астрофизической Обсерватории:

<https://crao.ru/ru/telescopes>

4. Некоторые сведения о звёздах:

Название	Радиус, R_{\odot}	Расстояние до Земли, св. лет	Температура, К	Астрономические коды
Солнце	1	$1.58 \cdot 10^{-5}$		SUN
Бетельгейзе	62	642.50	3500	HD 39801
Альдебаран	44.2	65.23	4000	HD 29139
Полярная	47	447	6000	HD 8890
Сириус	1.7	8.6	9940	HD 48915 (Сириус А) HD 48915B (Сириус В)

5. Спектр Сириуса В

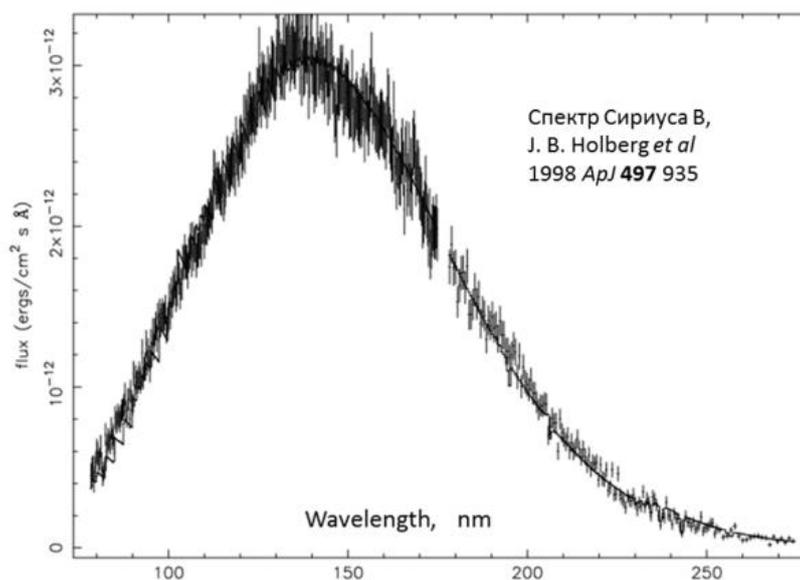


Рис. 1 Спектр Сириуса В.

6. Магнитное поле

Единицы измерения магнитного поля – Тесла (СИ), Гаусс и Эрстед:

$$1 \text{ Тл} = \text{Н} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} = 10^4 \text{ Гс}$$

$$1 \text{ эрстед} = \frac{1000}{4\pi} \text{ м}^{-1} \cdot \text{А} \approx 79.6 \text{ м}^{-1} \cdot \text{А}$$

В астрофизике принято использовать Гауссы.

Магнитное поле системы n витков радиуса R с током I :

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{nI}{R}, \mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}.$$

Шкала космических магнитных полей:

Земля: ~ 0.1 Гс

Солнечные пятна: $\sim 10^3$ Гс

Нейтронная звезда: $\sim 10^{12}$ Гс

Галактика: $\sim 10^{-6}$ Гс

Литература

При необходимости, для личного пользования, источники в электронном виде можно получить у сотрудников Лаборатории Общего и Специального Практикума НИИЯФ МГУ

- [1] Plank M. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, *Annalen der physic, Annalen der Physik*, vol. 309, Issue 3, pp.553-563. <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>
- [2] Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы. М. 2007.
- [3] Попов А.М., Тихонова О.В. Лекции по атомной физике,
- [4] <http://grotrian.nsu.ru/ru>
- [5] Zeeman P. The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance. *Nature* **55**, 347 (1897). <https://doi.org/10.1038/055347a0>
- [6] Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д., Магнитные поля в астрофизике, Москва-Ижевск, 2006
- [7] Соколов Д.Д., Небесные магниты. Природа и принципы космического магнетизма, М., 2021.
- [8] Засов А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. 2-е изд. испр. и дополн. — Фрязино: Век 2. 2011.
- [9] Белавин В.А., Квливидзе В.А., Принцип тождественности элементарных частиц и его проявление в спектре гелия, НИИЯФ МГУ, 2011.
- [10] Спектрограф кварцевый ИСП-30. Техническое описание.
- [11] Спектрограф стеклянный трёхпризменный ИСП-51. Описание и руководство к пользованию. Ленсовнархоз, 1961.
- [12] Ландсберг Г.С., Оптика. – М. Наука, 1976, Гл. VII, §25, §27, §30.