

**Автономная некоммерческая образовательная организация
“Физтех - лицей” имени П. Л. Капицы**

**XX Научно-практическая конференция
“Старт в инновации”**

**Изучение спектров излучения различных веществ и создания
спектроскопа для изучения линий перехода в спектре**

**Автор работы:
Сысоева Александра,
9Б класс**

**Руководитель:
Курносков Валерий Михайлович**

**Московская область, г. Долгопрудный
2021 год**

Оглавление

Актуальность работы	2
Цели и задачи	2
Природа излучения	3
Спектры и их разновидности	4
Спектральные приборы	6
Создание спектроскопа	7
Список литературы	9
Приложения	10

Актуальность работы

В настоящее время спектральный анализ является одним из главных способов изучения далеких космических объектов. При помощи спектра излучения можно узнать на каком расстоянии находится объект, какую температуру имеет и с какой скоростью движется. Также, по спектру можно определить состав какого-либо объекта (очевидно, если объект излучает).

Спектральный анализ широко используется в металлургии, машиностроении, атомной физике для контроля состава веществ.

Цели и задачи

Цель работы:

Создание простейшего спектроскопа для изучения спектра излучения

Задачи:

1. Изучить природу и причины появления излучения
2. Изучить виды спектров, а также узнать при каких процессах могут появляться те или иные спектры.
3. Изучить классификацию спектральных приборов и их строение
4. Сделать собственный спектроскоп на основе изученного материала и решении вышеизложенных задач

Природа излучения

Излучением (свободным) называют форму существования материи (электромагнитные волны), распространяющиеся со скоростью света в данной среде, и переносящей энергию.

Различают несколько видов излучения. Данная классификация идет от способа возбуждения атома. Существует тепловое излучение, а также несколько видов люминесценции.

Первый вид люминесценции, который мы рассмотрим, называют катодолюминесценцией. Назван он так потому, что это свечение вызвано бомбардировкой веществ катодными лучами (так раньше называли поток электронов). Удар электронов носит неупругий характер, что и увеличивает энергию атомов вещества, вызывая его свечение.

Следующий вид люминесценции — электролюминесценция — свечение, вызванное возбуждением атомов сильным электрическим полем. Напряженность электрического поля для такого процесса должна достигать $10^{12} \frac{В}{м}$.

Фотолюминесценция встречается практически ежедневно. Это свечение наблюдается, если атомы возбуждаются поглощенными фотонами, и переизлучают их.

Практически все, что мы видим, является фотолюминесценцией.

Тепловое излучение можно назвать самым часто встречающимся в природе (космосе). В данном случае атом возбуждается из-за того, что с повышением температуры амплитуда колебаний становится настолько большой, что при соударении атомов часть кинетической энергии переходит в потенциальную энергию, что переводит атом на более высокий энергетический уровень. В возбужденном состоянии атом может продержаться около 10^{-8} с. После атом возвращается на прежнее состояние, но при этом происходит излучение ранее полученной энергии. Излучается квант света, который имеет энергию $\epsilon = h\nu = \frac{h\epsilon}{\epsilon}$.

Несомненный вклад в атомную физику внес Нильс Бор. Согласно первому постулату Бора, атомная система может находиться в стационарном состоянии или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует ϵ_n . Энергию на данном i -ом уровне можно вычислить по формуле: $\epsilon_n = -\frac{\epsilon_0^2 \epsilon_n^4}{32 \epsilon_0^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 \epsilon_0^2}$. Несложно подсчитать, что для водорода, который является самым распространенным веществом во вселенной, $\epsilon_0 = -13.6$ эВ.

Согласно второму постулату Бора, при переходе из одной системы в другую поглощается или испускается квант света, энергия которого равна разности энергий

данных уровней. $\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Таким образом, можно найти длину волны на которой будет излучаться фотон: $\lambda = \frac{hc}{E_{n_2} - E_{n_1}}$. Таким образом, используя выражение для E_n , можно выразить длину волны иначе: $\frac{1}{\lambda} = \frac{R_H Z^2}{n_1^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$. Данное выражение было получено до Бора в виде: $\frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$, где $R_H = 10,97 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга, Z – заряд ядра атома, выраженный в зарядах электрона.

Как было сказано ранее, водород является самым распространенным веществом во вселенной. Также, водород имеет довольно простое строение, в его атоме содержится всего один протон и один электрон. В частности, поэтому и он довольно хорошо изучен и на его примере изучались многие физические процессы. При изучении спектров водорода выделили серии перехода водорода или спектральные серии. Названия серий идут от фамилий ученых, которые впервые изучили и нашли данные серии. Серии различают по конечному энергетическому уровню, на которых переходит электрон. Наиболее интересной является серия Бальмера, так как 5 линий из данной серии находятся в видимом диапазоне ($\lambda_{H\alpha} = 6563 \text{ \AA}$, $\lambda_{H\beta} = 4861 \text{ \AA}$, $\lambda_{H\gamma} = 4341 \text{ \AA}$, $\lambda_{H\delta} = 4102 \text{ \AA}$, $\lambda_{H\epsilon} = 3970 \text{ \AA}$). Данные линии можно увидеть при изучении спектра водорода при помощи спектрометра, например, если посмотреть на газоразрядную лампу через спектроскоп.

Схему перехода водорода и образования спектральных линий можно найти на изображении в приложении 1.

Спектры и их разновидности

Спектром называют распределение интенсивности излучения по длинам волн или частотам. Иногда вместо термина интенсивности излучения используют плотность светового потока.

Существуют различные виды спектров.

Первой можно рассмотреть классификацию спектров по их непосредственному виду. Таким образом различают 3 вида спектров: линейчатый, полосатый и сплошной.

Линейчатый спектр возможно наблюдать, когда излучает разреженный возбужденный газ (атомарный водород, аргон, ксенон, неон и другие инертные газы). В спектрах такого вида возможно наблюдать отдельные линии перехода, длины волн которых можно рассчитать согласно формуле Бальмера - Ридберга, описанной в параграфе про природу излучения. Однако нельзя сказать, что излучаются отдельные частоты. Частота излучения фотона не может быть строго единственной для фотона: фотон представляет собой набор нескольких близких частот. Хотя и мало это отличие ($\Delta\nu \ll \nu$) между частотами, но оно наблюдается как уширение отдельной линии в очень узкую полоску.

Благодаря тому, что атомы при излучении движутся в разные стороны (хаотичное тепловое движение), то частота, а вместе с ней и длина волны, будет изменяться в зависимости от величины скорости вдоль луча зрения в соответствии с эффектом Доплера: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$.

Скорость атомов или молекул в газовом облаке имеют различные скорости в соответствии с распределением Максвелла. Значит спектральные линии, при детальном рассмотрении, представляют собой совокупность большого числа близких между собой частот излучения, и, строго говоря, изображать их на диаграмме следует иначе. Пример уширения линий за счет эффекта Доплера можно увидеть на изображении в приложении 2.

Итак: уширение спектральной линии зависит не только от лучевых скоростей атомов, но и от "устройства" самого фотона, а также от того обстоятельства, что стационарные уровни нельзя считать строго стационарными, раз с них происходят самопроизвольные спонтанные переходы. Этот факт требует для уровня энергии иметь некоторую ширину (как следствие принципа неопределенностей Гейзенберга), а значит, и энергии фотонов будут иметь некоторый разброс, что вносит вклад в ширину спектральной линии. Т.к. время свободной жизни возбужденного состояния различно для различных энергий, то и ширина этих уровней будет различна. Значит, ширина спектральной линии зависит от расположения энергетического уровня. (На диаграмме спектральные линии должны иметь различную ширину.)

Исследования показали, что при малых концентрациях излучающего газа центральная часть спектральной линии (ядро линии) уширяется за счет эффекта Доплера, а края линии (крылья линии) уширяются за счет процессов затухания излучения, что определяет "устройство" фотона, и за счет соотношения неопределенностей Гейзенберга-Бора. И чем больше концентрация, тем менее прослеживается эта закономерность.

Зная эти закономерности при излучении спектров отдельных звезд, удастся определить скорость их вращения, т.к. за счет вращения будет уширяться центральная часть (ядро) спектральной линии (эффект Доплера), а боковые части (крылья) будут оставаться неизменными. Но т.к. общая энергия излучения остается неизменной (определяется светимостью звезды), то интенсивность линии в центре будет меньше. Данное изменение можно увидеть в иллюстрации в приложении 3.

Если излучающая среда будет достаточно плотная, то уширение линии происходит главным образом за счет эффектов затухания, т.к. при больших плотностях время жизни возбужденных уровней меньше. Так, например ширина одной и той же спектральной линии при одной и той же температуре (лучевые скорости одинаковы) из двух звезд - гиганта и карлика, будет шире у карлика, т.к. концентрация газа в звездной атмосфере

этой звезды больше. И наоборот: у гиганта линия будет тоньше, т.к. на высоте равных температур (где и появляется эта линия) плотность вещества у гиганта меньше.

Эффект этот достаточно тонкий, однако некоторые химические элементы (их спектры) более чувствительны к изменению плотности, чем к изменению температуры, и, значит, изучая уширения линий этих элементов можно довольно точно определить плотность вещества, а значит узнать класс звезды, что может рассказать очень многое о данном объекте. Однако, чтобы заметить данный эффект требуется довольно точный прибор, например трехпризменный спектрограф, чтобы был достаточно высокий показатель дисперсии для всей системы.

Следующими рассмотрим полосатые спектры. Данные спектры относятся уже не к атомарным веществам, а к молекулам. По большей части, изменения связаны с количеством степеней свободы у объекта, спектр которого изучается. В то время как у одноатомных веществ 3 степени свободы, у молекул по меньшей мере 5 степеней свободы (при $T > 1000 \text{ K}$ появляется 6-ая — колебательная). Оказалось, что величина энергии, приходящейся на новые степени свободы, тоже меняется, и меняется не монотонно, а скачками. Более того, было обнаружено, что изменение вращательной энергии приводит к изменению колебательной. Теперь каждый главный уровень будет разбит на несколько очень близко расположенных подуровней. И переходы в большой системе молекулярного газа теперь будут отличаться большим количеством близких частот. Пример полосатого спектра можно увидеть в приложении 4.

Подобные спектры могут образоваться в холодных звездах (классы К и М). Итак, благодаря взаимодействию между атомами энергетические уровни молекул расщепляются, что и приводит к появлению полос в спектрах. С помощью очень точных спектральных аппаратов удастся различать отдельные линии в полосатом спектре, но эти аппараты применяются только в научных целях.

Последними в данной классификации являются сплошные спектры. Сплошные спектры появляются как следствие излучения твердых тел или плотных газов. В данном случае, в спектре представлены линии излучения на всех длинах волн (см. приложение 4).

Спектральные приборы

Спектральными приборами называют приборы для наблюдения и изучения спектров. Задачей спектрального прибора является разложение излучения на монохроматические составляющие.

Спектрограф — прибор, позволяющий фиксировать протяженные участки спектра одновременно на фотопластинке или ином носителе. Также существуют монохроматоры — приборы, способные регистрировать излучение в пределах заданного очень узкого интервала. Далее в работе монохроматоры рассматриваться не будут.

Рассмотрим различные виды спектрографов. Основными можно назвать спектрометр, спектрограф и спектроскоп. Спектроскоп — прибор для визуального наблюдения спектра излучения. Спектрограф в свою очередь накапливает спектр на фотопластинке или ПЗС матрице.

Так как спектральный прибор должен создавать четкое изображение, спектрографы состоят из систем линз и прибора, обеспечивающего дисперсию. Таким прибором может быть призма с достаточным показателем дисперсии или дифракционная решетка. Действие призмы основано на том, что показатель преломления света зависит от длины волны, следовательно, лучи с разными длинами волн будут преломляться по-разному и будут приходить в разные точки фотопластины или глаза.

В случае с дифракционной решеткой, свет проходит сквозь небольшие щели. На каждой щели решетки происходит рефракция. Выходящие из данных щелей лучи далее будут интерферировать, следовательно, будет наблюдаться ряд максимумов в тех направлениях, где разность хода составляет целое число волн. Соответственно, угол, для которого будет наблюдаться максимум зависит от длины волны: $m\lambda = d \sin(\varphi - \psi)$, где m — порядок дифракции, φ — угол, под которым падает свет на решетку, ψ — угол максимума данной длины волны. Таким образом, свет будет раскладываться в спектр.

Однако, если попытаться пронаблюдать спектр, смотря через призму или дифракционную решетку, то ничего хорошего не получится, так как картинка будет нечеткой. Поэтому, помимо части, которая непосредственно раскладывает свет в спектр, в спектроскопе также есть система линз, которая фокусирует свет для наиболее четкой картины. В коллиматоре находится одна плосковыпуклая линза на одном фокусном расстоянии от линзы, далее располагается линза или дифракционная решетка, а после стоит еще одна плосковыпуклая линза. Из законов геометрической оптики несложно понять, что изображение спектра будет на расстоянии фокусного расстояния от второй линзы. Строение спектроскопа с призмой можно найти в приложении 6, а с дифракционной решеткой — в приложении 7.

Зачастую одного дисперсионного прибора не хватает, поэтому используют несколько призм или дифракционных решеток. Пример такого устройства можно увидеть в приложении 8.

Создание спектроскопа

После изучения материалов по спектральному анализу и спектральным приборам было решено попробовать сконструировать спектральный прибор из линз и дисперсионного прибора. Из доступных материалов подходили только дифракционные решетки. Также

была одна призма, однако ее показателя преломления не было достаточно для данного опыта.

При попытках сделать собственную конструкцию, раскладывающую свет в спектр, не удалось найти хороший материал, который позволит создать четкую картинку, поэтому разложить получилось только луч лазера при помощи дифракционной решетки. Разложить свет в спектр не удалось

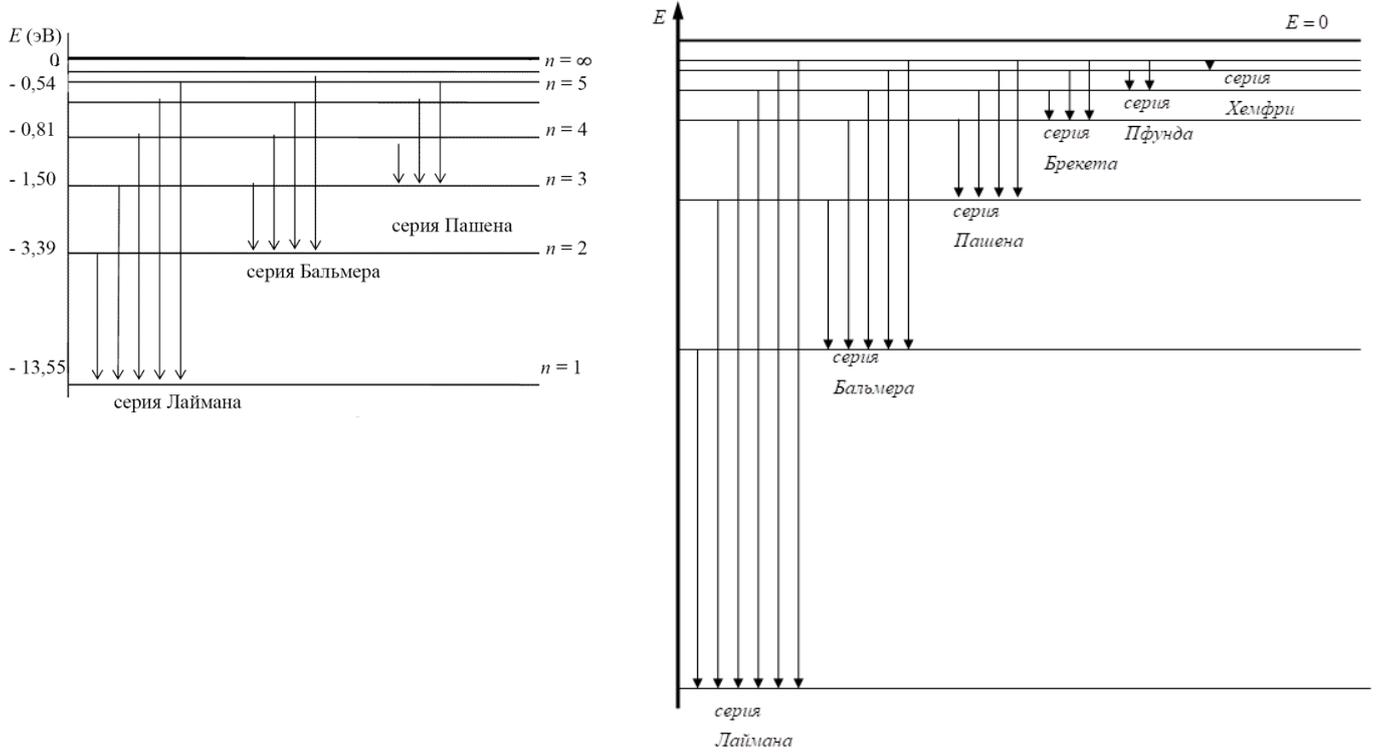
Таким образом, можно прийти к выводу, что самостоятельно собрать спектроскоп хорошего качества из линз и призмы или дифракционной решетки, доступных в условиях школьной лаборатории весьма сложно. При рассмотрении фабричных спектроскопов становится понятно, что для создания подробной конструкции нужны линзы с весьма точными характеристиками, а также призма с высоким показателем дисперсии, что найти довольно сложно.

Список литературы

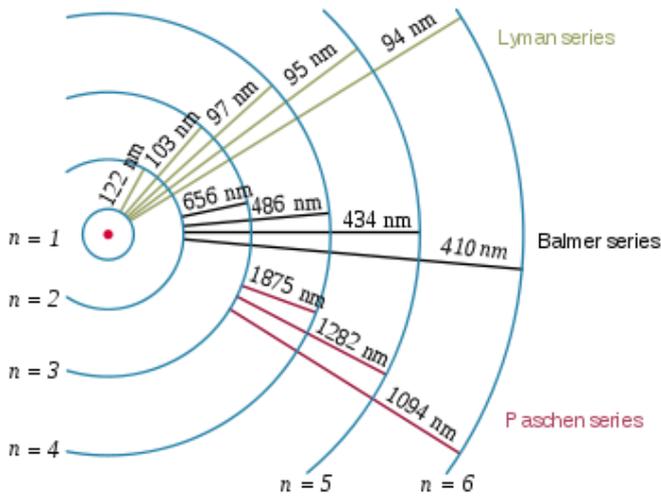
1. Основы спектрального анализа — Зайдель А.Н.
2. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика — ред. Ландсберг Д.С.
3. Оптика. Квантовая физика — Мякишев Г.Я.
4. Общий курс физики. Том 4. Оптика — Сивухин Д.В.
5. Большая российская энциклопедия

Приложения

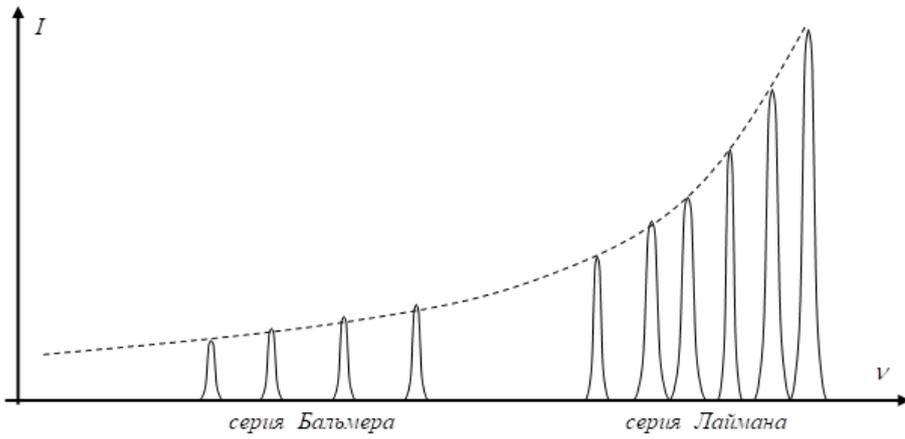
Приложение 1. Схема перехода водорода и образования спектральных линий.



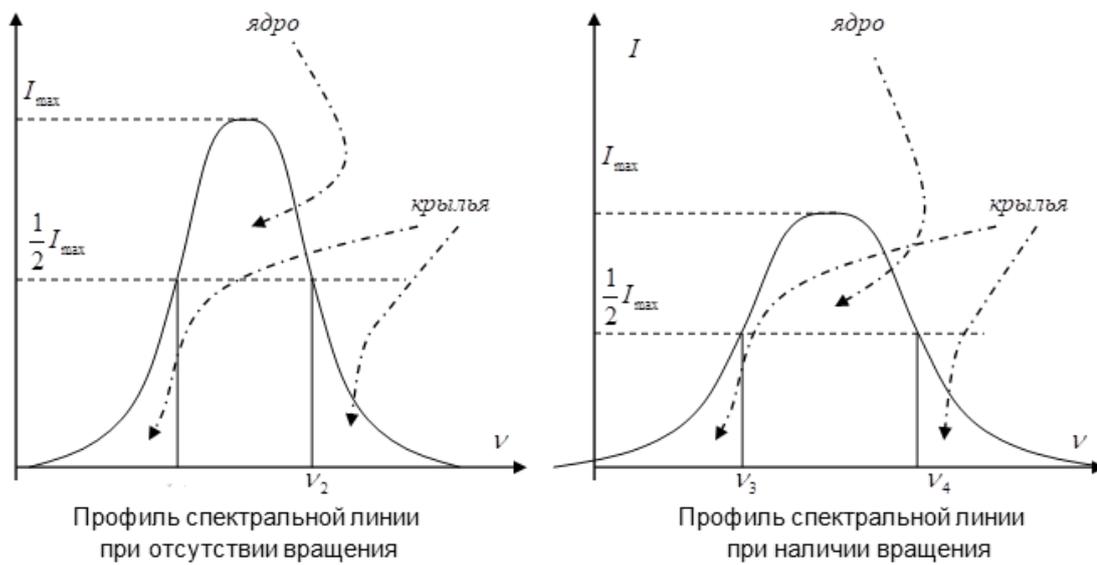
Переход электрона с уровня с большим радиусом на меньший.



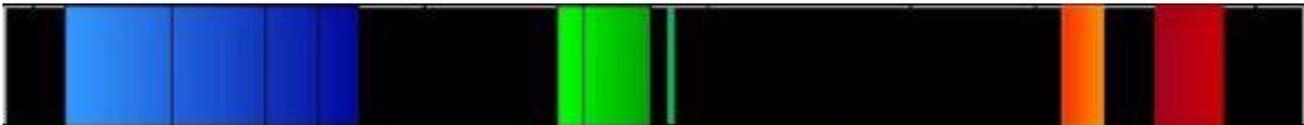
Приложение 2. Уширение линий перехода из-за эффекта Доплера и различной концентрации веществ.



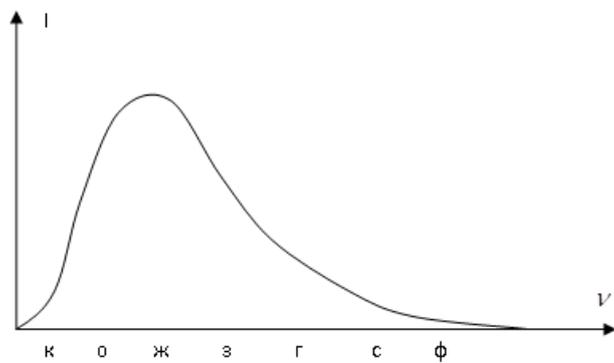
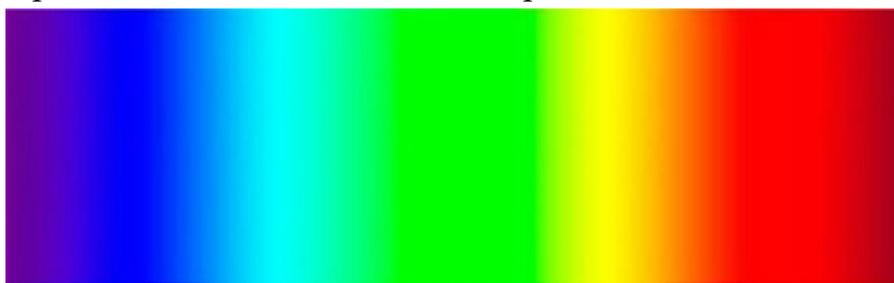
Приложение 3. Ядра линии при одинаковой концентрации вещества.



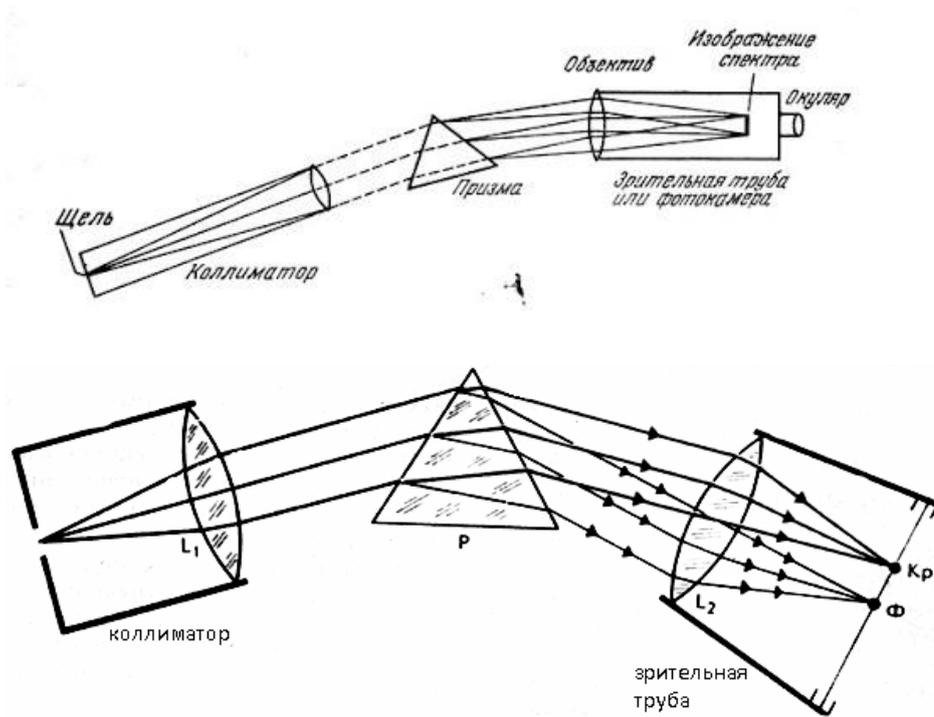
Приложение 4. Полосатый спектр \square_2



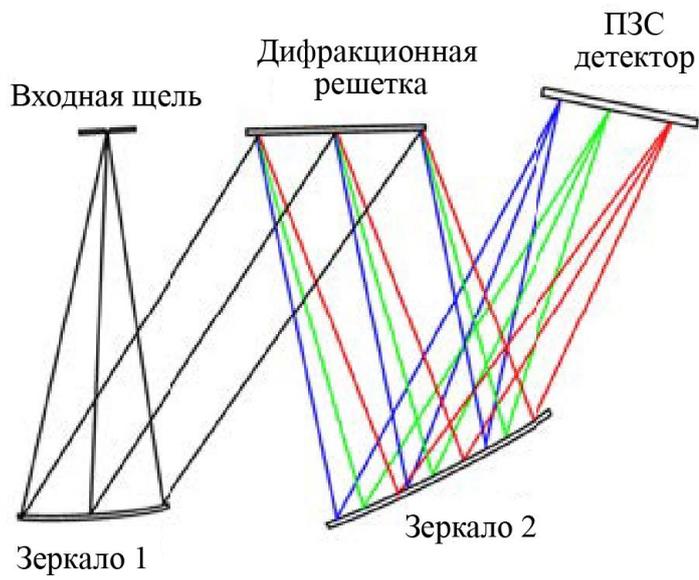
Приложение 5. Сплошной спектр



Приложение 6. Строение спектроскопа



Приложение 7. Спектроскоп с дифракционной решеткой.



Приложение 8. Трехпризменный спектрограф.

