

**Победитель грантового конкурса З.А.Субботиной,  
народного учителя СССР**

**Кировское областное государственное общеобразовательное автономное учреждение  
«Кировский физико-математический лицей»**



**Элективный курс  
«Фотометрический метод физико-химического  
(инструментального) анализа»**

**для обучающихся 10-11 классов естественно-научного и технологического профилей**

**Команда:**

**Воробьева Наталья Александровна,**  
учитель физики;

**Исупов Михаил Васильевич,**  
кандидат педагогических наук,  
директор лицея, учитель физики;

**Кострова Александра Анатольевна,**  
заместитель директора  
по учебно-воспитательной работе;

**Навалихина Ольга Викторовна,**  
учитель химии.

**Киров, 2023**

# Теория цветности

Цвет - свойство света вызывать определённое зрительное ощущение в соответствии со спектральным составом отражаемого или испускаемого излучения.

Участки спектра видимого излучения (~400-760 нм) дают цветовое ощущение семи основных цветов и множества оттенков между ними.



Цвет вещества – это результат избирательного поглощения веществом части лучей видимого спектра.

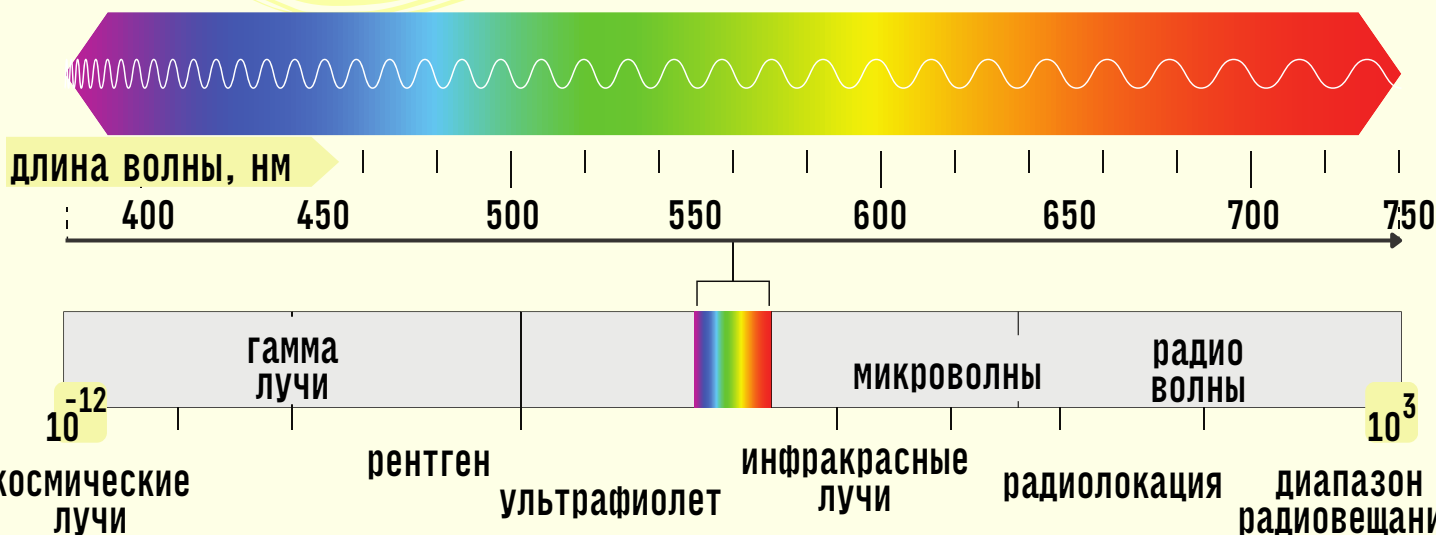
Свет не монохромен, он состоит из лучей всего видимого спектра

Восприятие цвета зависит от

спектрального состава излучения  
чувствительности глаза к излучению с различной длиной волны



цвета видимого спектра



Спектральный состав излучения, прошедшего через прозрачную поглощающую среду, изменяется вследствие того, что часть световой энергии с той или иной длиной волны поглощается средой.

Различные вещества избирательно поглощают свет только определённых длин волн.

Поэтому спектральный состав света, прошедшего через прозрачные вещества, оказывается неодинаковым.

Глаз человека воспринимает это как различие в цвете светопоглощающих веществ.

Выбор света определенной длины волны для фотометрирования растворов различной окраски

Фотометрирование окрашенных растворов необходимо проводить, пропуская через раствор свет определенной длины волны, такой, при которой светопоглощение происходит наиболее полно.

Окраска раствора	Длина волны света, нм	Цвет светофильтра
зелёный	380-425	розовый
жёлто-зелёный	425-470	фиолетовый
жёлтый	470-475	синий
оранжевый	475-480	голубой
красный	480-495	зелёный
пурпурный	495-535	жёлтый
синий	535-580	оранжевый
зелёно-синий	580-585	красный
сине-зелёный	585-770	красный

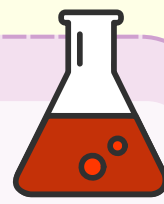
Светофильтр – окрашенная пластинка, пропускающая лучи определенной области спектра.

значение оптической плотности исследуемого раствора должно попадать в интервал рекомендуемых величин (0,2 - 0,8).

Для бесцветных растворов, (не поглощают видимый свет), или растворов с окраской малой интенсивности проводят фотометрическую реакцию, в результате которой получают окрашенные продукты реакции



+ щёлочь



водный раствор фурацилина

щелочной раствор фурацилина

На теории цветности основан метод спектрометрии

**Спектрофотометрия** – физико-химический метод исследования растворов и твёрдых веществ, основанный на изучении спектров поглощения в ультрафиолетовой (200–400 нм), видимой (400–760 нм) и инфракрасной (0,75-100 мкм) областях спектра.

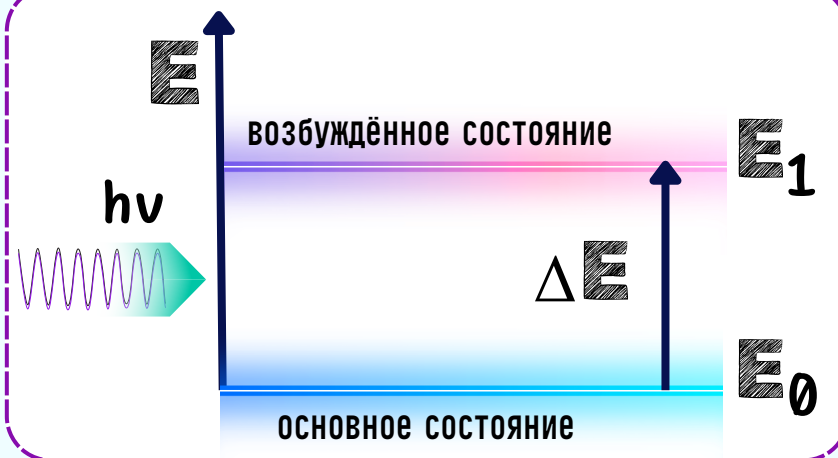
# Взаимодействие вещества с излучением

В основе метода спектрофотометрии

процесс поглощения молекулами вещества фотонов ультрафиолетового, видимого и инфракрасного спектрального диапазона, который сопровождается увеличением (возбуждением) их валентных электронов.

## Поглощение энергии излучения

атомы или молекулы переходят из основного состояния на более высокое по энергии возбужденное состояние.

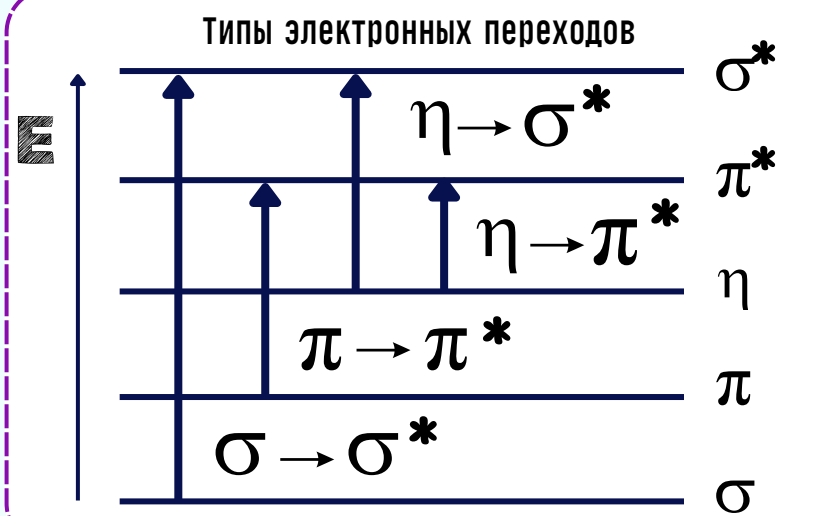


## Испускание энергии излучения

процесс перехода с более высокого энергетического уровня на более низкий с испусканием энергии ИЗЛУЧЕНИЯ.

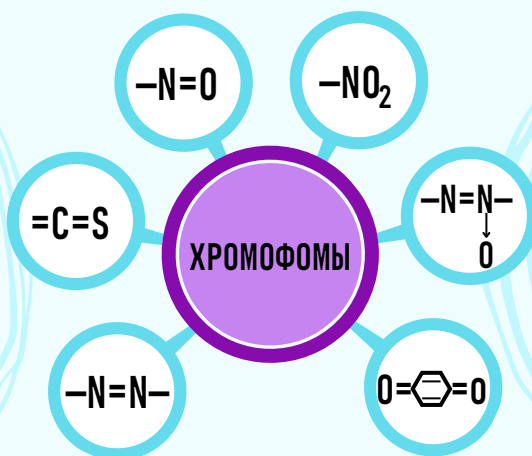
## Типы перехода в молекулах зависят от ее строения и различаются по энергии.

Когда молекула поглощает энергию, электрон со своей орбитали переходит на свободную с более высокой потенциальной энергией. Наиболее вероятными являются переходы с высшей на низшую свободную молекулярную орбиталь (излучение энергии).

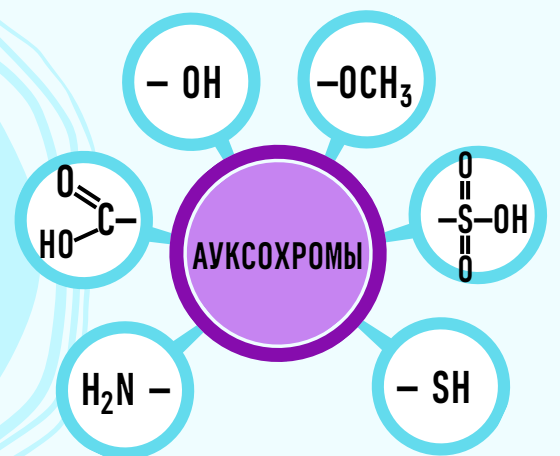


Наименьшей энергией обладают связывающие молекулярные переходы. В зависимости от симметрии их называют  $\sigma$  или  $\pi$ . Более высокой энергией обладают несвязывающие орбитали  $\eta$ . Наибольшая энергия у разрыхляющих орбиталей  $\sigma^*$  и  $\pi^*$ .

Поглощение излучения - свойство не самих электронов, а групп атомов. Такие группы называют хромофорами.

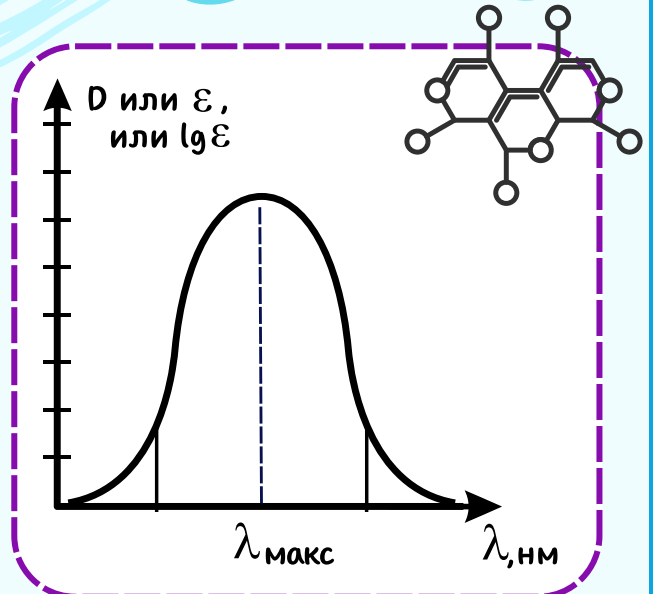


Группы атомов, которые не поглощают излучение сами по себе, но при этом увеличивают интенсивность поглощения или длину волны хромофорных групп называются ауксохромами.



Особенности строения каждого вещества обуславливают его индивидуальный электронный спектр поглощения, который обычно представляет собой график зависимости поглощения от длины волны.

Большинство электронных переходов в молекулах проявляются в диапазоне 200-750 нм, который подразделяется на два поддиапазона: 200-400 нм – ближняя ультрафиолетовая область; 400-750 нм – область видимого света.



Наиболее важные зависимости:

- ✓ чем больше число молекул, способных поглощать свет с заданной длиной волны, тем интенсивнее поглощение;
- ✓ чем эффективнее молекула способна поглощать свет заданной длины волны, тем интенсивнее поглощение

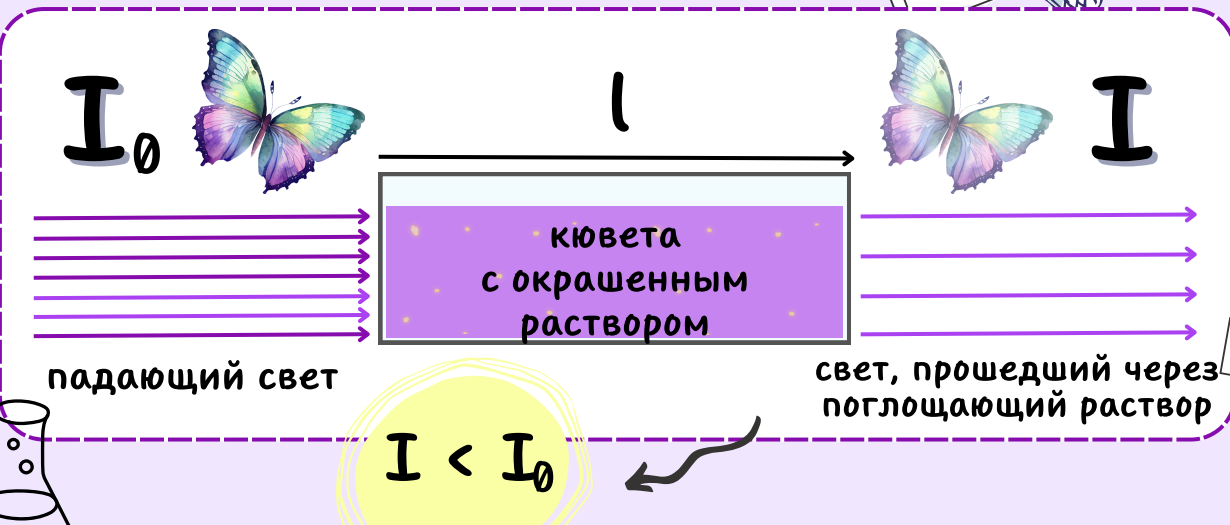
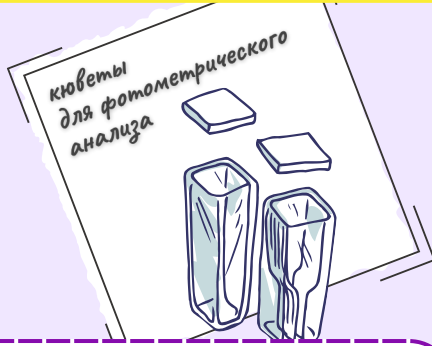
Закон Бугера-Ламберта-Бера

# Закон светопоглощения Бугера-Ламберта-Бера

Растворы одного и того же окрашенного вещества при одинаковой концентрации этого вещества и толщине слоя раствора поглощают равное количество световой энергии, то есть светопоглощение таких растворов одинаковое.

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon \cdot C \cdot l}$$

- I** → интенсивность светового потока, прошедшего через раствор
- I<sub>0</sub>** → интенсивность падающего на раствор светового потока
- ε** → молярный коэффициент поглощения света
- C** → молярная концентрация окрашенного вещества, моль/л
- l** → толщина слоя раствора, см

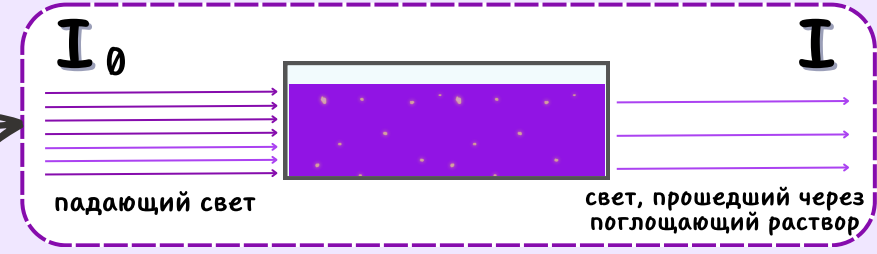


причины ослабления интенсивности света:

- отражение на границах фаз «воздух-стекло», «стекло-раствор»;
- рассеивание от присутствующих в растворе взвешенных частиц;
- поглощение лучистой энергии частицами окрашенного вещества

Чем > концентрация окрашенного вещества и толщина его слоя, тем < интенсивность потока света, прошедшего через поглощающий раствор, по сравнению с интенсивностью падающего света.

ослабление интенсивности света из-за увеличения концентрации

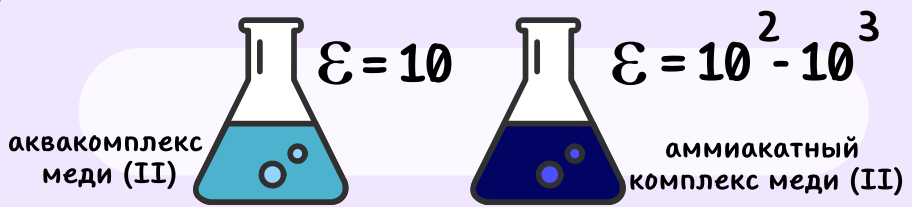


Оптическая плотность **D** (или абсорбция **A**) раствора – величина, характеризующая интенсивность окраски раствора в фотометрии

$$D = \lg \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot C \cdot l = A$$

Коэффициент **ε** представляет собой постоянную для данного окрашенного соединения величину (например, 10<sup>5</sup>)

также называют погашением, или экстинкцией раствора.



Величина, обратная **D**, называется **прозрачностью**.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Прозрачность (или пропускание) раствора **T** – это отношение интенсивности света, прошедшего через раствор, к интенсивности падающего света

Закон Бугера-Ламберта-Бера применим лишь для достаточно разбавленных растворов.

Факторы, вызывающие несоблюдение закона

- ✓ влияние колебаний температуры
- ✓ эффекты вследствие сильного разбавления растворов
- ✓ наличие посторонних электролитов в растворе
- ✓ колебания pH
- ✓ другие

# Визуальная колориметрия

Это методы анализа, позволяющие количественно определять содержание компонента в пробе на основании измерения поглощения света окрашенными растворами в видимой части спектра.

«color» (лат) – цвет  
+  
«μέτρειν» (греч) – измеряю  
= «КОЛОРИМЕТРИЯ»

## Метод стандартных серий

готовят серию стандартных окрашенных растворов с возрастающей известной концентрацией компонента X и визуально сравнивают интенсивности окраски

## Метод уравнивания окраски

изменяя толщину исследуемого и стандартного растворов, добиваются равной интенсивности их окраски

## Метод разбавления

выравнивают интенсивность окраски исследуемого и стандартного растворов путем разбавления растворителем того и другого раствора

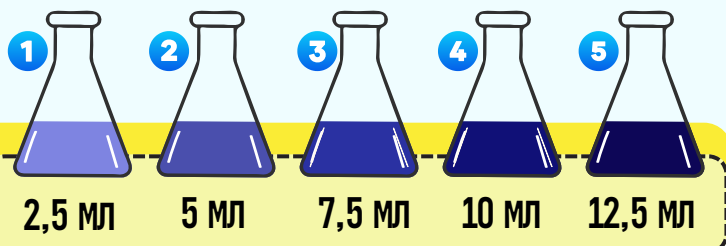
если вещество не имеет окраски, проводят фотометрическую реакцию, которая сопровождается образованием окрашенного соединения

## Методика визуальной колориметрии

(на примере определения содержания  $\text{Cu}^{2+}$  в аммиачном комплексе)

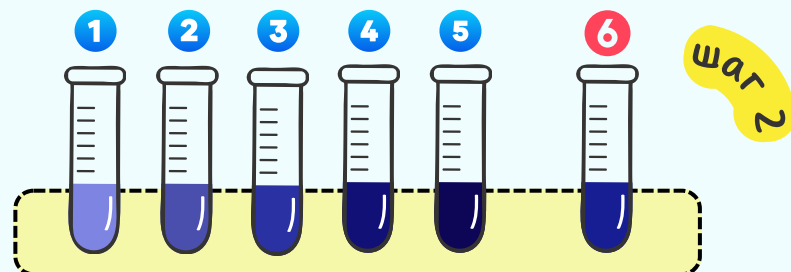
шаг 1

стандартный раствор  $\text{Cu}^{2+}$

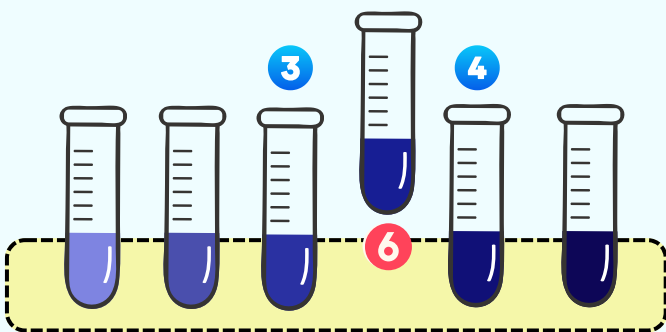


- ✓ приготовить 5 растворов с известным содержанием в них  $\text{Cu}^{2+}$ ,
- ✓ в 5 пронумерованных пробирок налить по 5 мл калибровочных растворов,
- ✓ а в 6 пробирку – 5 мл раствора с определяемой концентрацией меди.

- ✓ в 5 пронумерованных пробирок налить по 5 мл калибровочных растворов,
- ✓ а в 6 пробирку – 5 мл исследуемого раствора

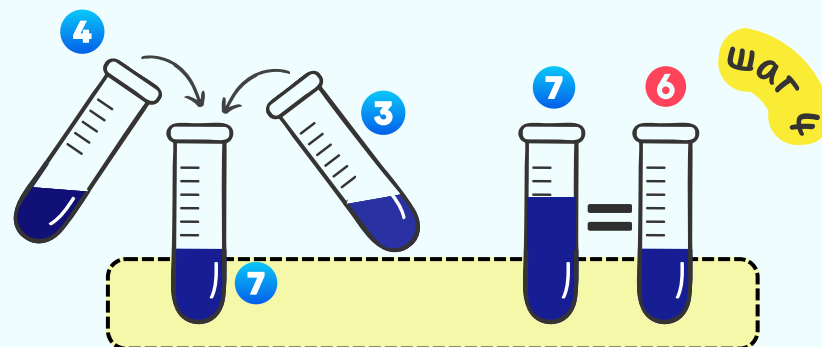


шаг 3



- ✓ путем сравнения окрасок выбираем два калибровочных раствора, на которые больше всего похожа окраска раствора 6

- ✓ 5 мл наиболее схожего по окраске раствора налить в пробирку 7,
- ✓ к раствору в пробирке 7 добавлять по 0,1 мл другого наиболее близкого по цвету раствора до выравнивания цвета в пробирках 6 и 7.



шаг 6

$$C_6 = \frac{C_{\text{рас-ра } 3} * 5\text{мл} + C_{\text{рас-ра } 4} * V_{\text{рас-ра } 4}}{5\text{мл} + V_{\text{рас-ра } 4}}$$

Рассчитать концентрацию исследуемого раствора  $\text{Cu}^{2+}$  по формуле

Недостатки метода визуальной колориметрии

- ✓ результат определений сильно зависит от визуальных особенностей аналитика;
- ✓ обладает невысокой точностью и является приблизительным;
- ✓ часто нужно возобновлять шкалу стандартных растворов из-за неустойчивости окраски некоторых из них.

# Спектрофотометрия

**Спектрофотометрия** – физико-химический метод исследования вещества, основанный на изучении спектров поглощения в ультрафиолетовой (200 – 400 нм), видимой (400 – 760 нм) и инфракрасной (760 нм - 10 мкм) областях спектра.

«spectrum» (лат) – видение  
+  
«μετρέω» (греч) – измеряю



ЭКОТЕСТ 2020

Прибор для проведения спектрофотометрического анализа – **СПЕКТРОФОТОМЕТР**

Спектрофотометры измеряют оптическую плотность вещества  $D$  связанную с концентрацией светопоглощающих частиц вещества в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера



Спектрофотометр определяет оптическую плотность цветного раствора с помощью фотоэлемента.

Фотоэлемент – слой полупроводника (сульфид серебра, селен и др.) – прибор, в котором световая энергия преобразуется в электрическую.

Преобразование световой энергии в электрическую в фотоэлементе связано с явлением фотоэффекта.

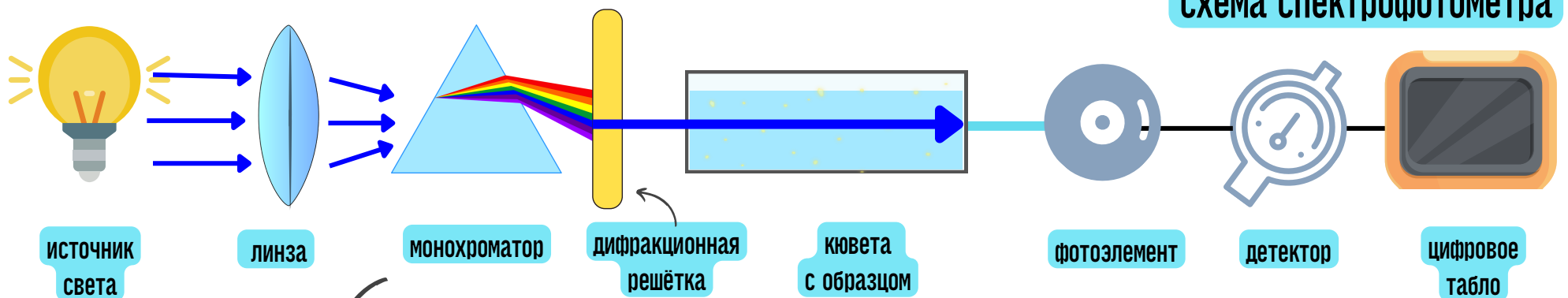
Фотоэффект – это отрыв электронов от атомов различных веществ под влиянием световой энергии.

При фотометрических определениях оптическую плотность окрашенных сред измеряют при длине волны, отвечающей максимальному поглощению.

Фотоэлементы позволяют проводить измерения не только в видимой, но и в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра.

В результате фотоэффекта возникает фотоэлектрический ток, величина которого прямопропорциональна падающему лучистому потоку.

## Схема спектрофотометра



UV100-Star2

В спектрофотоскопии существенное значение имеют:

Монохроматор – оптический прибор, разлагающий свет на компоненты при помощи призм и дифракционных решеток, пропускающих лишь узкий пучок света и позволяющий производить измерения в широкой спектральной области и в очень узком интервале длин волн.

Область применения фотометрического анализа очень широка

- ✓ правильно выбранные условия выполнения химических реакций по переводению компонента в окрашенное соединение;
- ✓ знание оптических свойств окрашенных растворов;
- ✓ умение выбрать способ измерения интенсивности окраски;
- ✓ умение правильно выбрать нужную длину волны;
- ✓ умение правильно выбрать нужную кювету.

- ✓ фармакология;
- ✓ клинические анализы;
- ✓ экология;
- ✓ охрана здоровья;
- ✓ определение качества промышленных выбросов;
- ✓ контроль качества питьевой воды;
- ✓ определение качества вод;
- ✓ контроль содержания веществ в почве;
- ✓ контроль качества продуктов питания;
- ✓ другие сферы.

# Метод калибровочных (градуировочных) графиков

При массовых фотоколориметрических определениях предварительно строят калибровочный (градуировочный) график.

Для этого пользуются серией эталонных растворов различной концентрации.

## Шаг 1

Готовят серию стандартных растворов (обычно 5 – 8 растворов) с известным содержанием определяемого компонента, переводят их в окрашенное соединение действием соответствующих реагентов-проявителей.



## Шаг 2

При помощи спектрофотометра определяются оптические плотности всех стандартных растворов в порядке увеличения их концентраций.

Содержание хрома в растворах

концентрация хрома, мг/л	оптическая плотность
0,04	0,025
0,08	0,051
1,00	0,066
2,00	0,137
3,00	0,203
4,00	0,273
5,00	0,366
проба	?

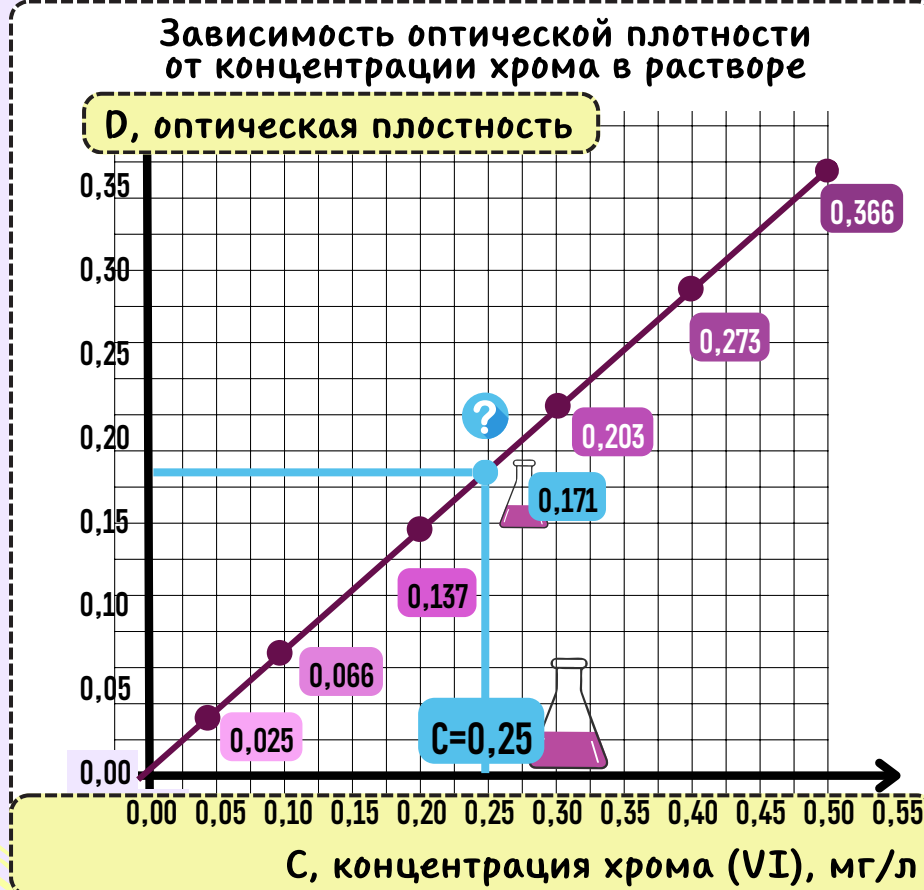
## Шаг 3

Строится градуировочный график зависимости оптической плотности  $D$  (ось ординат) от концентрации определяемого компонента (ось абсцисс). Желательно, чтобы график был линейным, поскольку нелинейность значительно снижает точность результатов анализа.



## Шаг 4

Для определения неизвестной концентрации испытуемого раствора с помощью спектрофотометра измеряется его оптическая плотность.



## Шаг 5

По калибровочному графику устанавливается концентрация определяемого компонента в анализируемой пробе, соответствующая найденной оптической плотности.

Необходимо, чтобы выбранный интервал концентраций соответствовал области возможных изменений концентраций анализируемых растворов

Ограничения метода градуировочных графиков

- ✓ трудности с приготовлением эталонных растворов
- ✓ влияние третьих компонентов, которые находятся в пробе и не определяются, но оказывают влияние на конечный результат.