

Моделирование эффекта Комптона методом Монте-Карло

Иванов Андрей 775

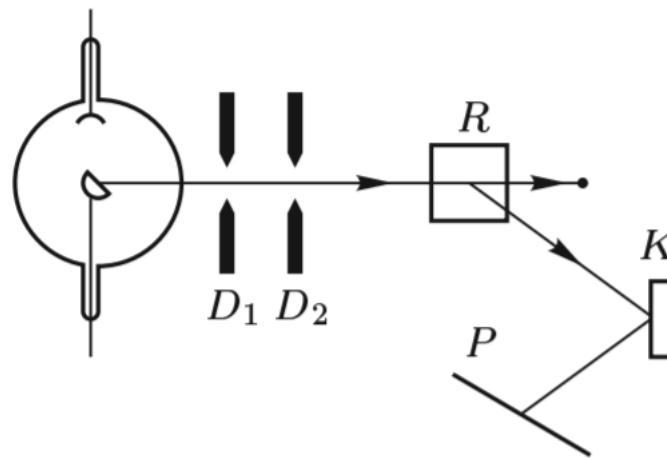
23 января 2020 г.

1 Описание эффекта

Эффект Комптона - явление изменения длины волны рассеянного излучения в длинноволновую сторону спектра

Эффект открыт в 1922 году Артуром Комптоном. Он облучал некоторое тело R рентгеновскими лучами, рассеянные лучи сначала попадали на кристалл K рентгеновского спектрографа, затем в ионизационную камеру или на фотопластинку. Оказалось, что в рассеянном излучении, наряду с исходной длиной волны, имела место смещённая линия с большей длиной волны. Классическая механика такой расклад не предполагает.

Схема установки Комптона:



1.1 Рассеяние фотона на свободном электроне

Законы сохранения энергии и импульса:

$$mc^2 + h\nu_1 = \gamma mc^2 + h\nu_2$$

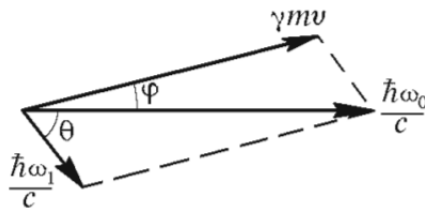
$$\frac{h\nu_1}{c} = \gamma mv \cos \phi + \frac{h\nu_2}{c} \cos \theta$$

$$\gamma mv \sin \phi = \frac{h\nu_2}{c} \sin \theta$$

Отсюда получаем:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = \Lambda_c(1 - \cos \theta)$$

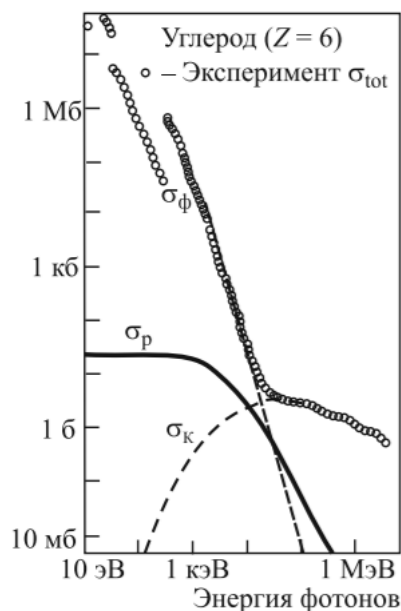
Векторная диаграмма рассеяния:



1.2 Рассеяние γ -кванта на связанном электроне

В этом случае изменение импульса электрона воспринимается атомом в целом, а поскольку его масса очень велика, передача импульса не сопровождается достаточно заметной передачей энергии, так что можем считать соударение фотонов упругим. В классической физике рассматривается процесс, в котором электроны атома начинают колебаться с частотой падающего света, затем сами излучают γ -кванты этой же частоты. Такое рассеяние называют рэлеевским, и оно имеет место наравне с комптоновским при рассеянии γ -квантов энергии ~ 5 кэВ.

Сечение комптоновского рассеяния на атоме растёт как Z^2 , рэлеевского - Z . Причина: в первом случае каждый электрон ведёт себя независимо от других, поскольку рассеяние происходит на каком-то конкретном электроне в атоме, а во втором - фотоны испускаются всеми электронами атомной оболочки, которые колеблются синфазно, излучение когерентно, поэтому складываются амплитуды, а не интенсивности волн. Кроме того, сечения этих рассеяний зависят и от энергии фотонов, хотя в случае Комптона сечение рассеяния уменьшается незначительно. Иллюстрация:

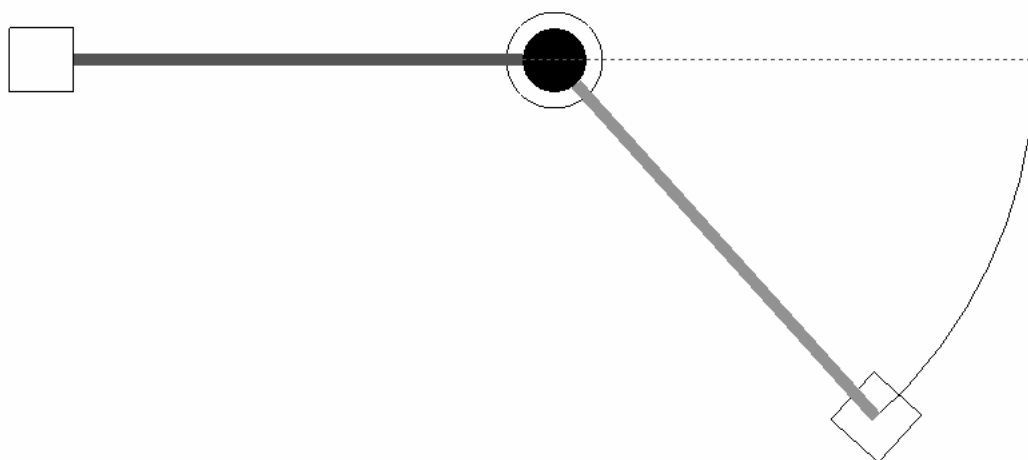


2 Компьютерное моделирование

1. Цель работы

Пронаблюдать изменение длины волны фотона при его рассеянии на некотором теле.

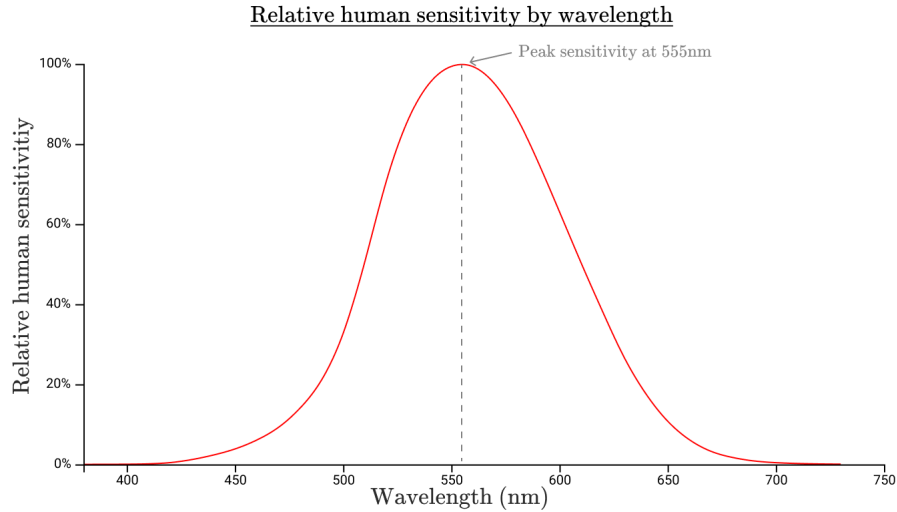
2. Схема установки



Слева находится источник, по центру - обстреливаемая мишень, справа - подвижный детектор
3. Принцип работы Методом Монте-карло через некоторый (регулируемый) интервал времени разыгрывается угол отклонения. По формуле Комптона вычисляется длина волны рассеянного фотона, на картинке это отрисовывается соответствующим цветом. В силу крайне малой комптоновской длины волны электрона невооружённым глазом изменение цвета не наблюдается, так что в работе используется величина примерно одного порядка с падающей волной, причём обе пользователь может регулировать.

2.1 Перевод длины волны в формат rgb

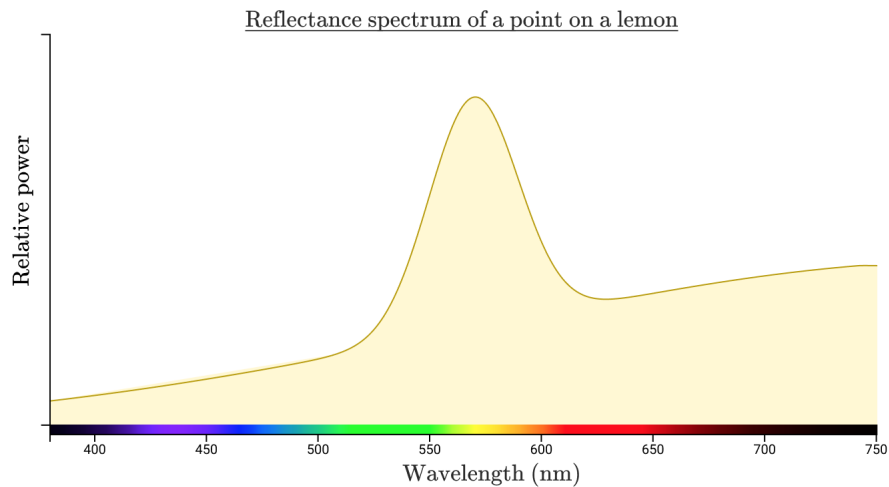
Человек, как известно, воспринимает свет с длиной волны от 380 до 750 нм. Но наши глаза не одинаково чувствительны к излучению во всех диапазонах. Если измерить чувствительность человеческого глаза к каждой длине волны, то мы получим функцию относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения. Стандартная функция спектральной световой эффективности $\bar{y}(\lambda)$ выглядит так:



Данная кривая также показывает что наши глаза намного более чувствительны к излучению на 550 нм, чем к излучению на 650 нм или 450 нм.

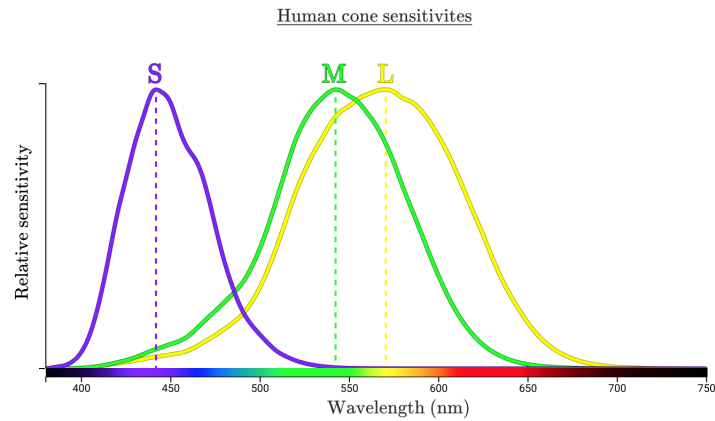
2.2 Количественное определение цвета

Цвет — это интерпретация человеком электромагнитного излучения. Определим цвет через спектральную плотность излучения. Для любого данного объекта можно измерить спектр излучения (или отражения) — и использовать его для точного определения цвета. Если можно воспроизвести спектр, то мы точно воспроизведём цвет. Возьмём, к примеру, лимон:

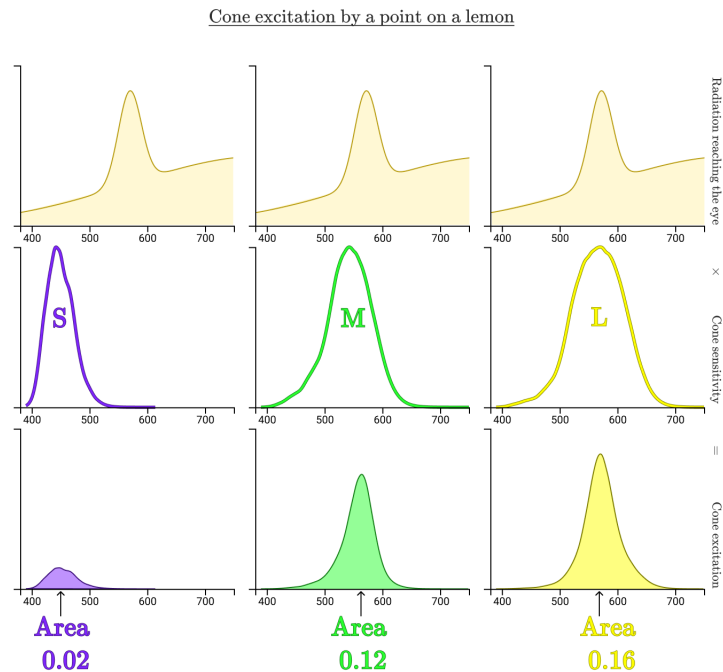


Однако, если открыть изображение точно такого же лимона на компьютере, у него будет совершенно другой спектр, хотя человек оба лимона воспринимает одинаково. Здесь нужно

обратиться к анатомии глаза. За восприятие цвета отвечают особые клетки сетчатки - колбочки. Их обычно три типа, и они отвечают реагируют на три типа волн: короткие (S), средние (M) и длинные (L). Их чувствительность видим на диаграмме:



А вот так колбочки обрабатывают лимон:

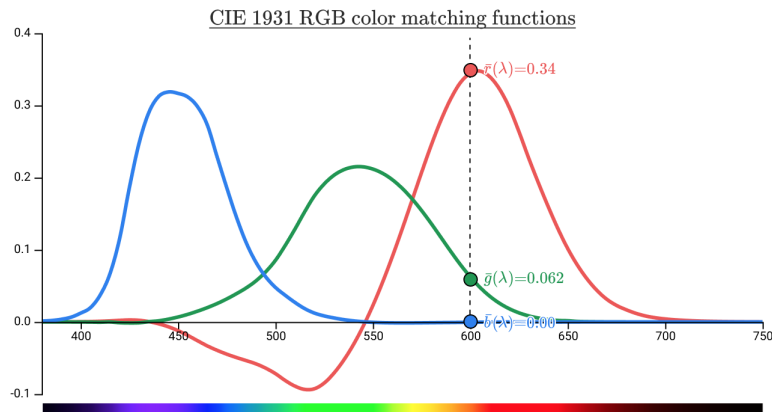


Наши три набора колбочек сводят любую кривую спектральной плотности потока к триплету чисел, а каждый отдельный триплет будет отдельным цветом. Это довольно удобно, потому что с отдельными цифрами (0,02, 0,12, 0,16) гораздо проще работать, чем со сложной непрерывной функцией. Таким образом, мы получили пример цветового пространства - LMS.

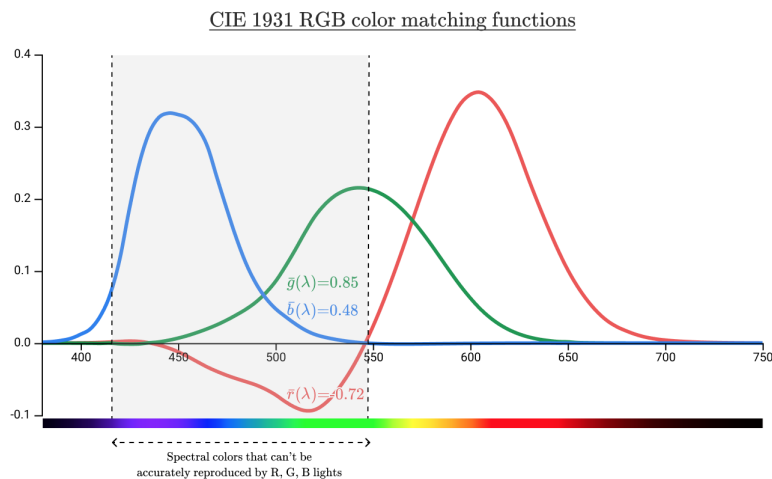
К сожалению, это цветовое пространство имеет некоторые бесполезные свойства. Например, невозможность реализации триплета (0, 1, 0). Чтобы выйти на такой триплет, нужно как-то стимулировать колбочки М, при этом вообще не стимулируя колбочки L и S. Но это невозможно, потому что кривая чувствительности колбочек М значительно перекрывает L или S на всех длинах волн. Из-за такого побочного эффекта, в частности, данная цветовая модель не очень совместима с производством дисплеев. Поэтому переходим к другой цветовой модели.

2.3 Красный - зелёный - синий

В конце 1920-х годов Уильям Дэвид Райт и Джон Гилд провели эксперименты. Они точно определили отдельные цвета по вкладу трёх конкретных длин волн. Вот их результаты:



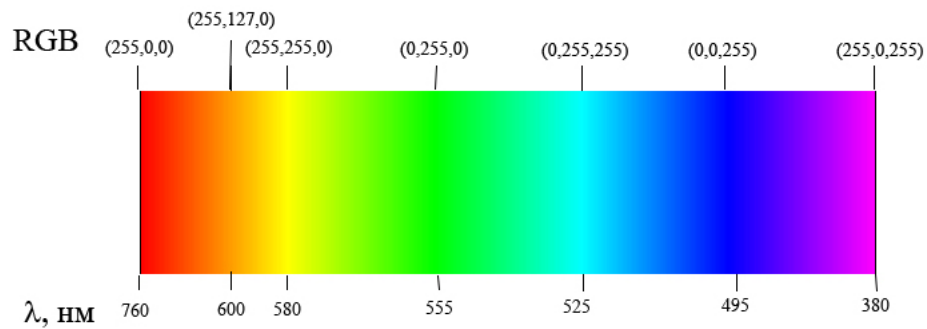
Оказалось, что определённый участок спектра не может быть точно представлен этой цветовой моделью:



После нескольких заседаний комиссий по стандартизации цветовых систем на основе RGB были созданы ещё несколько, незначительно друг от друга отличающиеся, но они всё ещё не могут нормально "отрисовывать" некоторые цвета. Так что изображение этих цветов на экране монитора несколько некорректно. Но в определённом приближении человеческий глаз вполне удовлетворён.

2.4 Практический способ

Можно взять видимый спектр, выделить в нём ключевые цвета (а с ними и диапазоны длин волн), затем подмешивать к ним компоненты других цветов.



Например, в диапазоне длин волн от 550 до 580 нм можно брать триплет *RGB* с компонентой синего - 0, зелёного - 1, а красный определённым образом вычислять через длину волны и γ -коррекцию:

$$\left(\frac{\lambda - 550}{580 - 530} \right)^{0.8}$$

3 Результат работы программы

