



Сергеев Александр Михайлович

Президент РАН

Академик РАН

Доктор физико-математических наук

<http://www.ras.ru/about/president/currentinfo.aspx>

https://ru.wikipedia.org/wiki/Сергеев_Александр_Михайлович

Вопрос для 8-9 классов:

Во время майских дождей можно часто видеть радугу. В этом году несколько раз наблюдалось очень красивое явление - двойная радуга (многие даже смогли её сфотографировать). Опишите процесс появления обеих радуг. Чем они отличаются друг от друга? Свой ответ необходимо объяснить.



Ответ:

Радуга — оптическое явление, которое может наблюдаться во время или после дождя в солнечную погоду (т.е. при освещении ярким удаленным источником света множества водяных капель дождя или тумана). Первая радуга образуется в результате однократного отражения внутри каждой капли водяного пара (поэтому, радугу можно видеть не только после дождя, но и при других условиях, например, около фонтанов в солнечный день). Луч солнечного света, где есть компоненты разных длин волн (от ультрафиолетового до инфракрасного), попав на поверхность капли частично отразится, и частично войдет внутрь капли, испытав при этом преломление, описываемое известным законом Снеллиуса. Угол, под которым пойдет внутри капли преломленный луч, зависит от показателя преломления воды, который, вследствие дисперсии несколько отличается для разных длин волн (1,330 для красного цвета, 1,337 для фиолетового цвета). Таким образом, разные по цвету компоненты белого светового пучка внутри капли после преломления пойдут под несколько отличающимися углами. Далее, дойдя до границы раздела вода-воздух, световые пучки снова испытают отражение и преломление. Отраженный свет, вышедший из капель, наблюдатель увидит в виде радуги. Важное условие образования радуги – положение Солнца над уровнем горизонта не должно быть более 42 градуса (см. рисунок 1). Под таким углом из капли будет выходить наибольшее количество отраженных лучей, которые окажутся параллельными друг другу, таким образом, радуга будет иметь максимальную яркость. Этот угол, по сути, является углом, под которым реализуется максимальное внутреннее отражение параллельных лучей света от солнца на границе раздела двух сред вода-воздух внутри каждой капли. Иногда этот угол называют углом, при котором реализуется полное (или максимальное) отражение внутри капли, однако этот угол не является углом полного внутреннего отражения (для воды – примерно 48 градусов). Для более подробного анализа механизма образования радуги, где показано, как можно найти величину оптимального угла максимального внутреннего отражения, рекомендуем обратиться к статье Е.Д. Трифонова ([ссылка](#)).

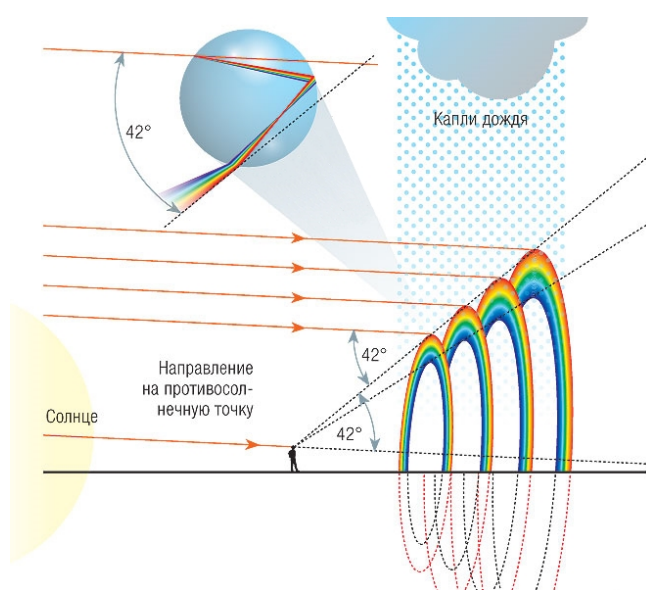


Рисунок 1. Условие формирования радуги. Изображение взято из [источника](#).

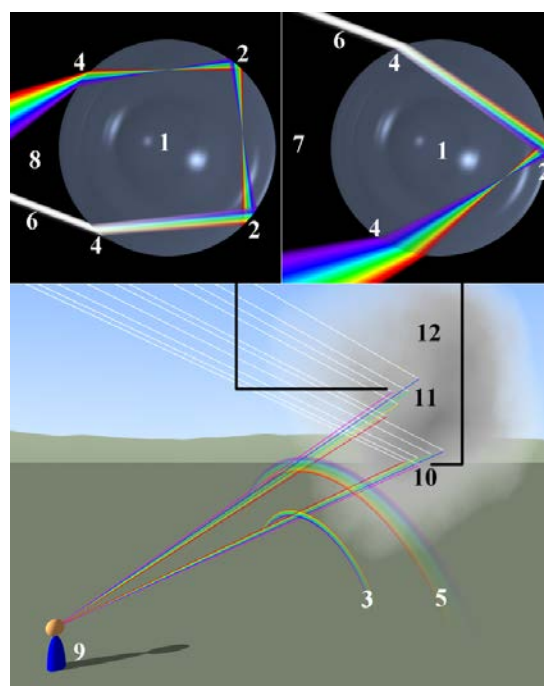


Рисунок 2. Схема образования двойной радуги: 1) сферическая капля; 2) внутреннее отражение; 3) первичная радуга; 4) преломление; 5) вторичная радуга; 6) входящий луч света; 7) ход лучей при формировании первичной радуги; 8) ход лучей при формировании вторичной радуги; 9) наблюдатель; 10) область формирования первичной радуги; 11) область формирования вторичной радуги; 12) облако капелек. Изображение взято из [источника](#).

Двойная радуга образуется вследствие точно такого же физического явления – максимального отражения света внутри капли воды. Отличие от первичной радуги состоит в том, что отражение поверхности капли реализуется не однократно, а два раза. Поскольку при каждом отражении значительная часть света теряется, интенсивность вторичной радуги значительно меньше, чем у первичной. Поскольку в этом случае реализуется обратный ход лучей, меняется и порядок цветов во вторичной радуге по сравнению с первичной (см. рисунок 2).

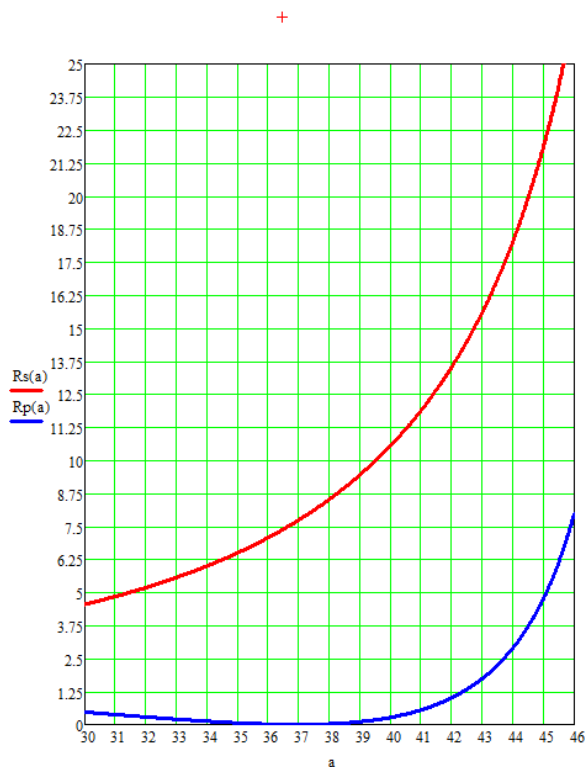
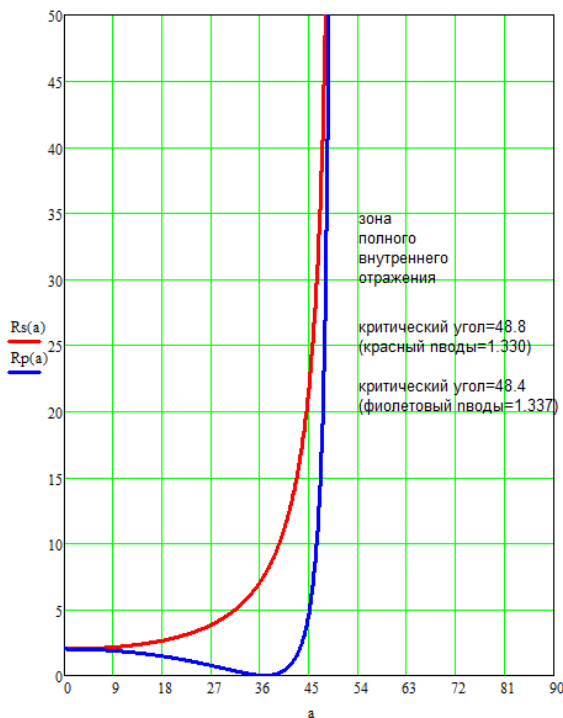
Интересно рассмотреть поляризационные характеристики обеих радуг. У первичной и вторичной радуги они отличаются. Нехитрый опыт, доказывающий это свойство, можно провести, если у вас есть т.н. поляризационные солнцезащитные очки. Попробуйте вращать такие очки, рассматривая двойную радугу. Вы будете видеть то одну, то другую радугу, в зависимости от угла поворота. Данное наблюдение может быть воспринято как ортогональная поляризация, но точный количественный учет требует рассмотрения формул Френеля (для справки), которые покажут, что первая радуга почти полностью поляризована в горизонтальном направлении, тогда как во второй радуге лучи поляризованы и в горизонтальном и в вертикальном направлении.

Этот вопрос выходит за пределы школьной программы, однако, поскольку ряд школьников рассмотрел это вопрос, мы приводим чуть более подробные рассуждения.

Естественный солнечный свет деполаризован, однако, при отражении его от границы раздела двух сред вода-воздух, s- (перпендикулярная плоскости падения луча) и p- (в плоскости падения) поляризованные компоненты будут отражаться с различной эффективностью, к тому же зависящей от угла падения на границу раздела. Зависимости интенсивности отраженного света для обеих поляризаций от угла падения (которые можно вывести из формул Френеля) приведены на рисунке ниже.

$$n_1 = 1.33 \quad n_2 = 1 \quad b(a) = a \sin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\left(a \frac{3.14}{180}\right)\right)$$

$$R_s(a) = 100 \left(\frac{\sin\left(a \frac{3.14}{180} - b(a)\right)}{\sin\left(a \frac{3.14}{180} + b(a)\right)} \right)^2 \quad R_p(a) = 100 \left(\frac{\tan\left(a \frac{3.14}{180} - b(a)\right)}{\tan\left(a \frac{3.14}{180} + b(a)\right)} \right)^2$$



Из рисунка видно, что, например, для р-поляризованного излучения при угле максимально внутреннего отражения 42 градуса отражается всего лишь чуть больше 1%, тогда как для s-компоненты отражается почти 14%

Строгое рассмотрение двух преломлений и одного отражения для первичной радуги с учетом формул Френеля дает степень поляризации почти 94%, т.е. первичная радуга почти полностью поляризована по касательной к ее дуге.

Для вторичной радуги необходимо учесть два преломления и два отражения, кроме того, лучи падают на границы раздела под несколько большими углами, в связи с чем итоговая степень поляризации достигает величины примерно 88 % (подробное рассмотрение дано в статье [1]). Таким образом вторичная радуга тоже поляризована по направлению касательной к ее дуге, но в меньшей степени. Так, в статье [2] рассмотрены первые 20 порядков радуги и вычислены интенсивности s- и p- поляризованных компонент. Было получено отношение I_s/I_p 0.08778:0.00425 для первого порядка и 0.03516:0.00371 для радуги второго порядка. В целом, чем более высокий порядок радуги, тем меньше у нее степень поляризации.

Отличие в степени поляризации приводит к тому самому любопытному экспериментальному наблюдению, который был описан в начале решения.

Если ориентация поляризатора такова, что полностью проходит s-компонента, то первичная (яркая) радуга практически не меняет своей яркости, тогда как вторичная (более тусклая) радуга становится несколько менее яркой по причине подавления p-поляризованной компоненты, что на контрасте может выглядеть как исчезновение вторичной радуги на фоне первичной.

Когда мы поворачиваем поляризатор на 90 градусов, первичная радуга почти полностью гасится, т.к. ее степень поляризации очень высока. Вторичная же радуга тоже ослабляется, но поскольку в ее составе имеется заметная доля p-поляризованного излучения, она подавляется не полностью, и становится более заметной на фоне почти полностью подавленной первичной.

Интересно, что, несмотря на многолетние исследования свойств радуги, физики продолжают заниматься описанием ее свойств. Например, в недавней работе [3] ученых из Университета Нью-Йорка (США), приведено подробное теоретическое исследование оптических свойств этого интересного явления.

1. Graham G.R. – **Polarization of rainbows** Physics Education (1975) Vol. 10 issue 1 pp: 012

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/10/1/012>

2. Rösch S. – **Der Regenbogen in Wissenschaft und Kunst** Applied Optics (1968) Vol. 7, Issue 2, pp. 233

<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-7-2-233>

3. Masatsugu Suzuki, Itsuko Suzuki – **Physics of rainbow** (2010)

https://www.researchgate.net/publication/269929976_Physics_of_rainbow