

ФОТОГРАФИЯ РАДУГИ

Эта фотография сделана ранним вечером сразу после небольшого дождика с дрона (маленького вертолётника) с фотокамерой. На ней видны две радуги, представляющие из себя окружности с общим центром. Почему так получилось?



Фото: А. Подобедов

Обратимся к рисунку из книги «Оптика» Исаака Ньютона (рис. 1).

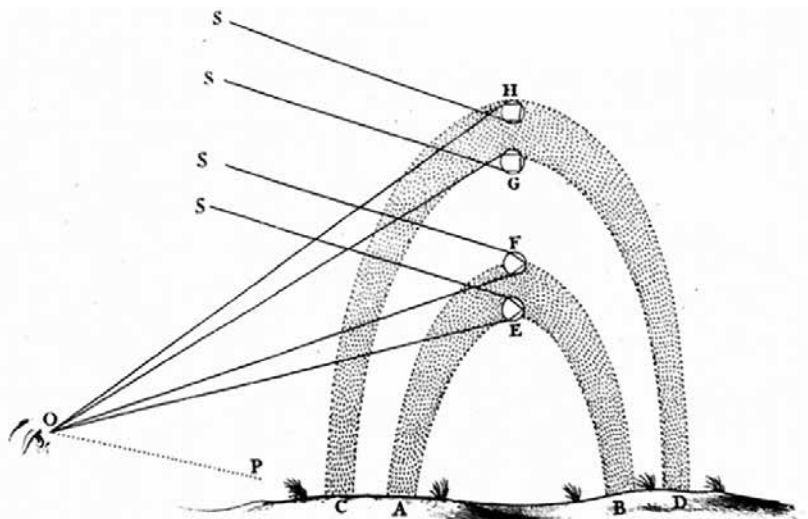


Рис. 1

Обе радуги возникают из-за того, что солнечные лучи отражаются в каплях воды. Причём первая радуга связана с лучами, которые доходят от солнца S

до наблюдателя O , отражаясь внутри каплей один раз (как показано в каплях F и E), а вторая – с лучами, которые отражаются внутри каплей дважды (капли H и G). Понятно, почему на фотографии радуга – не дуга (как мы обычно видим её с земли), а полная окружность, так как капли есть и выше, и ниже дрона.

На фотографии видно, что внутренняя радуга более яркая и имеет привычное чередование цветов, а внешняя имеет обратный порядок. А ещё изображение внутри первой радуги и область снаружи второй радуги более светлые, чем промежуток между радугами. Чтобы объяснить это наблюдение, рассмотрим ход солнечного луча внутри капли, считая её круглой.

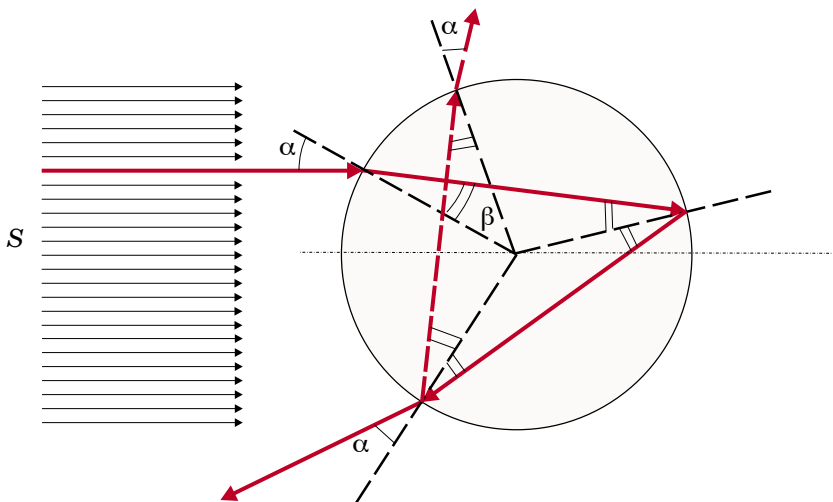


Рис. 2

Каждый раз, сталкиваясь с поверхностью капли (снаружи или изнутри), луч разделяется на два – отражённый и преломлённый (лучи при этом становятся менее яркими). Красной сплошной линией на рисунке 2 изображён луч, который вошёл в каплю, преломившись, затем прошёл внутри капли до её границы, там отразился и, ещё раз пройдя каплю, вышел наружу, снова преломившись. Штриховой красной линией показан луч, который сделал ещё одно «лишнее» отражение внутри капли, прежде чем выйти наружу.

Отражение устроено просто: угол между лучом и радиусом, проведённым в точку отражения, равен



углу между радиусом и отражённым лучом (радиусы отмечены штриховой тонкой линией).

При входе или выходе из капли ход луча меняется по закону преломления. Этот закон можно представить геометрически: построим два прямоугольных треугольника с равными гипотенузами, как на рисунке 3. Тогда отношение отмеченных катетов не зависит от угла падения и равно показателю преломления, который для воды примерно равен 1,33.

Направление, в котором луч выйдет из капли, зависит от того, в какое место капли он приходит от солнца. Мы вычислили и построили ход всех солнечных лучей, изображённых на рисунке 2 слева (чёрные стрелки). Выходящие из капли лучи, получившиеся в результате построения, изображены на рисунке 4. Сплошными линиями показаны лучи, отразившиеся внутри капли один раз, а штриховыми – лучи, отразившиеся дважды; капля находится в центре рисунка.

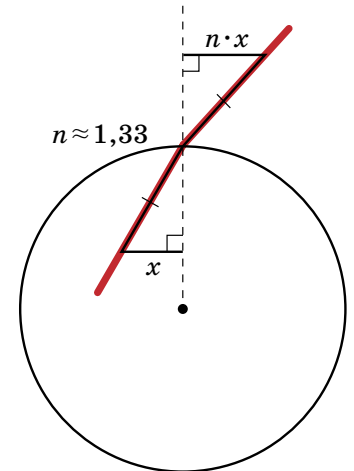


Рис. 3

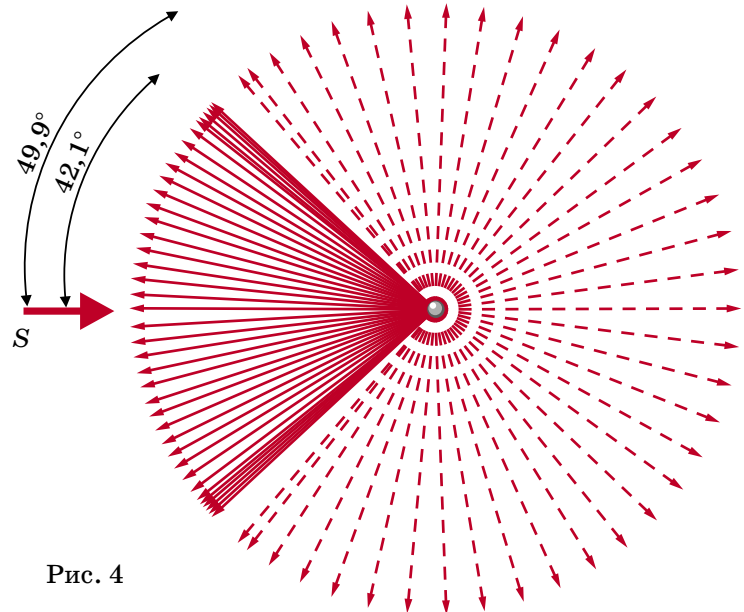


Рис. 4

Получается, что каждая капля работает как маленький хитрый фонарик. Сплошные лучи «замегают» угол, биссектриса которого направлена на солнце. Как видно, больше всего сплошных лучей направлено дальше всего от солнца, под углом $42,1^\circ$. Штриховые лучи замечают угол, биссектриса которого направлена от солнца. Больше всего штриховых лучей направлено ближе всего к солнцу: под углом $49,9^\circ$. Важно, что есть интервал углов, куда фонарик не светит вовсе! Теперь нам осталось только рассмотреть множество таких капель-фонариков и наблюдателя, как нас учит рисунок из работы И. Ньютона.

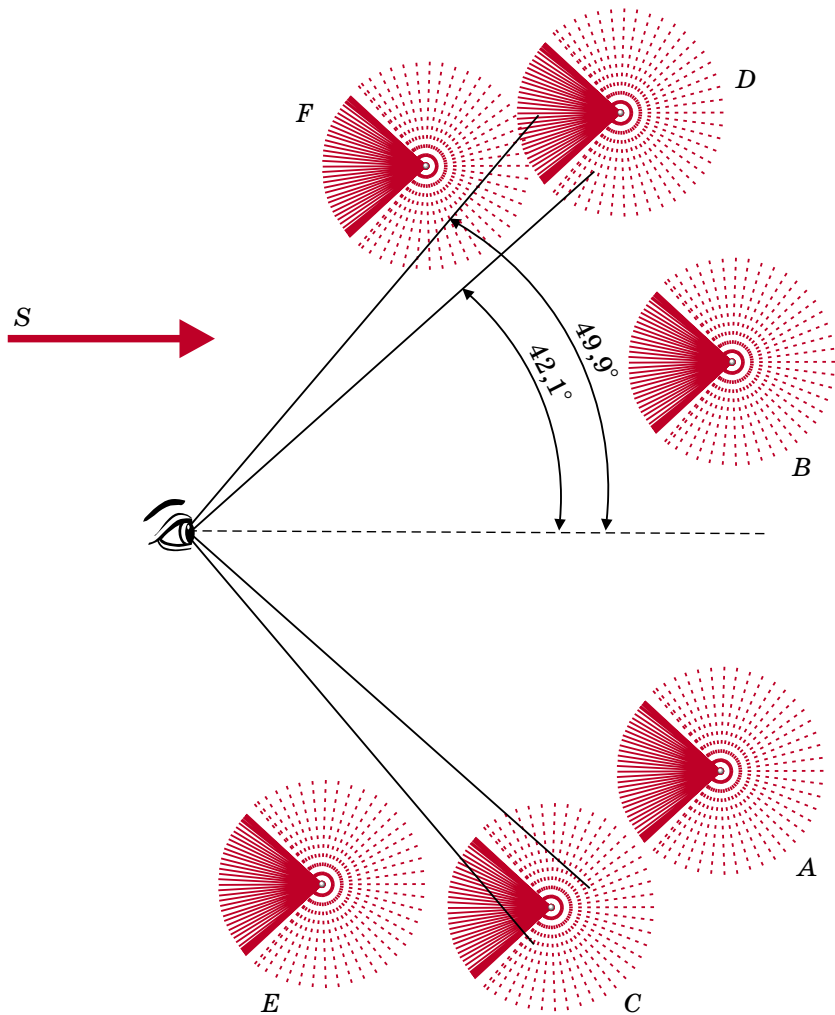


Рис. 5





Капли, которые находятся внутри конуса с углом $42,1^\circ$ (например, капли A , B), будут освещать наблюдателя лучами, которые отразились один раз: наблюдатель будет видеть светлый круг. Среди отражённых лучей нет тех, которые бы дошли до наблюдателя под углом от $42,1^\circ$ до $49,9^\circ$, поэтому наблюдатель увидит тёмное кольцо (капли C , D не освещают наблюдателя). Под большими углами наблюдатель увидит свет от лучей, которые отразились два раза (капли E , F).

Светлый центральный круг на фотографии на с. 8 гораздо ярче вблизи его краёв. Это связано с тем, что плотность лучей вблизи максимального угла самая большая. Можно ожидать, что светлое внешнее кольцо будет самым ярким вблизи тёмного кольца, однако этого на нашей фотографии, к сожалению, не заметно.

Теперь мы должны вспомнить, что белый свет состоит из лучей разных цветов, а показатель преломления воды n немного зависит от цвета луча. Так, для красного цвета он примерно равен $1,33$, а для фиолетового $1,34$. Поэтому радиус светлого центрального круга красного цвета будет самым большим. Светлый круг оранжевого цвета будет иметь радиус поменьше, круг жёлтого цвета – ещё меньше и т. д. до фиолетового цвета, который светит в круге самого маленького радиуса. Наблюдатель будет видеть смешение светлых кругов разного цвета и радиуса. В результате граница светлого круга имеет красный цвет, а при уменьшении радиуса к нему постепенно примешиваются другие цвета, что и является причиной появления разноцветной радуги. Центральная часть круга подсвечена лучами всех цветов, то есть имеет белый цвет солнечного света.

По аналогии можно объяснить радужную окраску и порядок цветов второй радуги. Красный цвет также дальше всего заходит в тёмную зону, поэтому порядок цветов внешней радуги оказывается обратным.