

Урок 5. Почему небо голубое, а закат красный

Физика вокруг нас · ~35 минут

Спроси кого угодно, почему небо голубое, и услышишь «ну, оно отражает океан» или «это цвет воздуха». И то, и другое неверно. Настоящая причина тоньше и красивее: она в том, как крохотные молекулы воздуха играют со светом разной длины волны. Один и тот же механизм красит небо в голубой днём и в багровый на закате. Сегодня разберёмся — и увидим это в стакане с молоком.

Что ты узнаешь

- Что такое рассеяние света и почему оно зависит от цвета.
- Закон Рэлея: короткие волны рассеиваются в разы сильнее ($\propto 1/\lambda^4$).
- Почему днём небо голубое, а на закате Солнце краснеет.
- Как воспроизвести и голубое небо, и красный закат в одном стакане.

Разбираемся в теме


Свет — это волна

Начнём с самого начала: что такое свет? Свет — это **электромагнитная волна**. Слово «волна» здесь не метафора. Представь волны на воде: поверхность то поднимается, то опускается, и эти «горбы» и «впадины» бегут вперёд. У световой волны колеблется не вода, а электрическое и магнитное поле, но картинка та же — что-то периодически меняется и бежит в пространстве.

Волну удобно рисовать как змейку — синусоиду. У неё есть высота горбов (это яркость) и есть расстояние между двумя соседними горбами. Вот это расстояние — самое важное для нас.

Длина волны λ

Длина волны λ (греческая буква «лямбда») — это расстояние от одного гребня волны до следующего.

 **Откуда взялось λ :** это просто общепринятое обозначение. Как радиус часто обозначают буквой r , а скорость — v , так длину волны договорились обозначать λ . Никакой магии, просто ярлык.

Свет летит с огромной, но постоянной скоростью (около 300 000 км/с). А вот длина волны у разных лучей разная — и именно она определяет цвет, который мы видим. Наш глаз устроен так, что разную длину волны он читает как разный цвет.

Белый свет — это смесь цветов

Солнечный свет кажется белым, но на самом деле это **смесь всех цветов радуги** сразу. Откуда мы это знаем? Из простого опыта: если пропустить белый луч через стеклянную призму (или через капельки дождя), он разложится в радугу — от фиолетового до красного. Значит, все эти цвета были «спрятаны» внутри белого, а призма их просто рассортировала по длинам волн.

У каждого цвета своя длина волны λ :

- фиолетовый / синий — **короткие** волны, $\lambda \approx 400\text{--}450$ нм;
- зелёный — $\lambda \approx 550$ нм;
- красный — **длинные** волны, $\lambda \approx 650\text{--}700$ нм.

(1 нанометр = 10^{-9} м, то есть одна миллиардная доля метра — волны света крошечные.)

Обрати внимание на главное: **красная волна почти вдвое длиннее синей.**

Прикинь: 700 нм против 400 нм — это почти в два раза. Запомни этот факт, он решает всё, что будет дальше.

Рассеяние: свет натывается на молекулы

Теперь разберёмся, что происходит, когда свет летит сквозь воздух.

Воздух — это молекулы азота и кислорода. Они очень маленькие: намного меньше длины волны света. Когда световая волна пролетает мимо молекулы, её колеблющееся электрическое поле «раскачивает» электроны внутри молекулы. А раскачанные электроны сами становятся источником света — молекула начинает **переизлучать** свет заново, но уже **во все стороны**.

Вот это и есть **рассеяние**: часть света уходит с прямого пути и разлетается в разные стороны. Представь, что луч летел прямо, наткнулся на молекулу — и кусочек его «брызнул» вбок, как капли от камня, брошенного в лужу.

Ключевой вопрос: одинаково ли рассеиваются разные цвета (разные длины волн)? Оказывается — **нет!** И вот здесь начинается самое интересное.

Закон Рэля: $\propto 1/\lambda^4$

Английский физик лорд Рэлей исследовал, как рассеиваются волны на частицах, которые намного меньше длины волны (а молекулы воздуха — как раз такие). Он получил результат:

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Интенсивность рассеяния обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны.

Разберём эту запись по частям, чтобы было понятно, что откуда:

- **I_рассеяния** — интенсивность рассеянного света, то есть насколько сильно данный цвет разбрасывается в стороны.
- значок \propto читается «пропорционально». Это не «равно», а «меняется так же, как». Он говорит, что I ведёт себя как выражение справа, но с каким-то постоянным множителем, который для нас сейчас не важен.
- $1 / \lambda^4$ — единица, делённая на λ в **четвёртой** степени.

Что значит «в четвёртой степени» и почему это важно? Возведение в четвёртую степень — это очень «резкая» операция: даже небольшая разница в λ превращается в большую разницу в рассеянии. Смотри: у синего λ меньше, чем у красного. А раз λ стоит **в знаменателе**, то чем меньше λ , тем **больше** дробь $1/\lambda^4$, тем сильнее рассеяние. Значит, короткие волны (синий) рассеиваются сильнее длинных (красный). А четвёртая степень делает эту разницу огромной. Давай посчитаем, насколько огромной.

Считаем: во сколько раз синий рассеивается сильнее красного

Возьмём синий ($\lambda \approx 450$ нм) и красный ($\lambda \approx 650$ нм). Мы хотим найти, во сколько раз рассеяние синего сильнее рассеяния красного. Это отношение:

$$I_{\text{син}} / I_{\text{красн}} = (1/\lambda_{\text{син}}^4) / (1/\lambda_{\text{красн}}^4).$$

Деление на дробь — это умножение на перевернутую дробь, поэтому $\lambda_{\text{красн}}$ переезжает наверх, а $\lambda_{\text{син}}$ — вниз:

$$I_{\text{син}} / I_{\text{красн}} = (\lambda_{\text{красн}} / \lambda_{\text{син}})^4 = (650 / 450)^4.$$

Теперь считаем по шагам, не торопясь:


Шаг 1. Делим длины волн: $650 / 450 \approx 1,44$. (Проверь: $450 \times 1,44 = 648 \approx 650$, сходится.)

Шаг 2. Возводим в квадрат: $1,44^2 = 1,44 \times 1,44 \approx 2,08$.

Шаг 3. Четвёртая степень — это квадрат от квадрата. Мы уже знаем квадрат ($\approx 2,08$), возведём его ещё раз в квадрат: $2,08^2 = 2,08 \times 2,08 \approx 4,3$.

Итого: $(650/450)^4 \approx 4,3$.

Вывод: синий свет рассеивается примерно в **4–5 раз сильнее** красного! А если сравнить крайности — фиолетовый (400 нм) с красным (700 нм): $(700/400)^4 = (1,75)^4$. Считаем так же: $1,75^2 \approx 3,06$; затем $3,06^2 \approx 9,4$ — почти в десять раз сильнее.

 **Запомни:** небо голубое, потому что синие лучи рассеиваются по всему небосводу в разы сильнее красных. Ты видишь этот рассеянный синий свет, приходящий со всех сторон неба, а не напрямую от Солнца.

Почему днём небо голубое

Соберём всё вместе — по шагам, что откуда берётся:

1. Солнце светит белым светом (смесь всех цветов) — луч летит сквозь атмосферу.
2. По дороге свет рассеивается на молекулах воздуха. Но синий рассеивается в 4–5 раз сильнее красного (мы это посчитали).
3. Значит, по всему небу «размазан» в основном **синий** рассеянный свет.
4. Когда ты днём смотришь **не на само Солнце**, а на любой участок неба, в глаз тебе прилетает именно этот рассеянный свет — а он преимущественно синий.

Поэтому небо голубое во все стороны, а не только там, где Солнце.

Почему само Солнце белёсое или желтоватое

А что с прямым лучом от Солнца? Из него рассеяние **выбивает вбок часть синего**. Значит, в прямом луче синего становится чуть меньше, чем было, и он смещается к тёплым тонам — Солнце кажется белёсым или слегка жёлтым. Днём путь луча сквозь воздух не очень длинный, поэтому синего теряется немного, и Солнце ещё почти белое. (На закате путь длиннее — и вот тогда начинается настоящее покраснение, об этом ниже.)


Почему тогда небо не фиолетовое?

Хороший вопрос — ведь фиолетовый рассеивается ещё сильнее синего (мы посчитали: почти в 10 раз сильнее красного против 4–5 у синего)! По логике $1/\lambda^4$

небо «должно» быть фиолетовым. Почему же оно голубое? Причин две, и обе простые:

1. **Фиолетового изначально мало.** В солнечном спектре фиолетового света меньше, чем синего — Солнце его излучает не так много. Рассеивать в разы сильнее можно, но если рассеивать почти нечего, вклад маленький.
2. **Глаз плохо видит фиолетовый.** В сетчатке нет отдельных «фиолетовых» рецепторов, зато есть «синие». К синему глаз гораздо чувствительнее.

В итоге смесь сильно рассеянных синего и фиолетового наш глаз читает как **голубой**.

 **А знаешь ли ты?** На Марсе днём небо желтовато-бурое, а закат — **голубой!** Там в атмосфере много пыли размером порядка длины волны, и работает другой механизм рассеяния (не рэлеевский), который «раскрашивает» небо наоборот. Физика та же, частицы другие.

Почему закат красный

На закате Солнце у горизонта, и его лучи идут к тебе через атмосферу **по касательной** — почти вдоль поверхности Земли. Из-за этого путь сквозь воздух становится в разы длиннее, чем когда Солнце в зените (грубо в 10–40 раз длиннее). Почему длиннее — легко представить: когда Солнце над головой, луч пронзает слой воздуха «напрямик», по кратчайшему пути; а у горизонта он идёт наискось и проходит гораздо больше воздуха.

Теперь применим наш закон по шагам:

1. Путь длинный → рассеяния очень много.
2. Синий и зелёный рассеиваются сильнее всего → на таком длинном пути они **почти полностью уходят вбок** и до твоих глаз не долетают.
3. Остаётся то, что рассеивается слабее всего — **красный и оранжевый**. Именно они «пробиваются» сквозь толщу воздуха прямо к тебе.

Поэтому у горизонта Солнце и подсвеченные им облака краснеют.

💡 Один и тот же закон $1/\lambda^4$ объясняет оба явления. Днём мы смотрим на рассеянный (синий) свет сбоку — небо голубое. На закате смотрим на прямой луч, из которого синее выбито рассеянием, — Солнце красное. Две стороны одной медали: то, что вбок ушло синим (небо), из прямого луча ушло — и оставило его красным (закат).

⚠️ **Частая ошибка:** думать, что закат красный, потому что «Солнце дальше» или «остывает». Расстояние до Солнца на закате практически то же. Всё дело в длине пути луча сквозь атмосферу и рэлеевском рассеянии.

Почему облака и туман белые

А вот капельки воды в облаках и тумане **крупные** — сравнимы с длиной волны или больше. Для них закон Рэля не работает: он справедлив только для частиц, которые намного меньше длины волны. Крупные капли рассеивают все цвета почти одинаково. А смесь всех рассеянных цветов вместе — это снова белый (мы ведь помним: белый = смесь всех цветов). Поэтому облака белые, а небо между ними — голубое.



Опыт дома

Голубое небо и красный закат в стакане — классика, и она правда работает.

Возьми: прозрачный стакан или банку с водой, молоко, фонарик (лучше яркий белый, например фонарик телефона), тёмную комнату.

1. Наполни стакан водой. Добавь **буквально несколько капель** молока и размешай — вода должна чуть помутнеть, стать слегка голубоватой на просвет, но оставаться почти прозрачной. Молочный жир даёт мельчайшие частички — наши «молекулы воздуха».
2. Посвети фонариком **сбоку** сквозь стакан и посмотри на воду со стороны. Она отсвечивает **голубоватым** — это рассеянный молочными частичками синий свет, наше «небо».

3. Теперь посмотри на фонарик **сквозь** стакан, вдоль луча. Свет фонарика станет **желтоватым, а если добавить ещё молока — оранжево-красным**. Это наш «закат»: синее рассеялось вбок, прямой луч покраснел.

Почему: жировые капельки молока рассеивают синий сильнее красного — тот самый закон Рэля. Сбоку видишь рассеянное синее (небо), насквозь — обеднённое синим красноватое (закат). Добавляя молоко, ты как будто удлиняешь «путь через атмосферу»: каждая новая капелька — ещё немного воздуха, через который надо пробиться, поэтому насквозь свет краснеет всё сильнее.

Разбор примера

Задача. Во сколько раз сильнее рассеивается фиолетовый свет ($\lambda = 400$ нм) по сравнению с оранжевым ($\lambda = 600$ нм)?

Решение по шагам.

1. По закону Рэля $I \propto 1/\lambda^4$. Нам нужно отношение интенсивностей $I_{\text{фиол}} / I_{\text{оранж}}$. Поскольку λ стоит в знаменателе, при делении дробей длины волн меняются местами, и наверх попадает λ большего цвета: $I_{\text{фиол}} / I_{\text{оранж}} = (\lambda_{\text{оранж}} / \lambda_{\text{фиол}})^4$.
2. Подставляем числа: $(600/400)^4$. Сначала делим: $600/400 = 1,5$. Значит, получаем $(1,5)^4$.
3. Считаем четвёртую степень как квадрат от квадрата: сначала $1,5^2 = 1,5 \times 1,5 = 2,25$; затем $2,25^2 = 2,25 \times 2,25 \approx \mathbf{5,06}$.

Ответ: фиолетовый рассеивается примерно в **5 раз** сильнее оранжевого. Именно поэтому коротковолновая часть спектра «размазывается» по всему небу, а длинноволновая летит прямо.

Задачи

1. Во сколько раз синий свет (450 нм) рассеивается сильнее красного (700 нм)?
Дай число.
2. Некий цвет А рассеивается ровно в 16 раз сильнее цвета В. Во сколько раз отличаются их длины волн? Какой из них короче?
3. Объясни в двух-трёх фразах, почему один и тот же закон $1/\lambda^4$ делает небо голубым днём и Солнце красным на закате.
4. Почему облака белые, а не голубые, хотя состоят из воды? При чём тут размер капель?
5. Оцени, во сколько раз длиннее путь солнечного луча сквозь атмосферу на закате, чем в полдень, если считать атмосферу однородным слоем толщиной 8 км, а Землю — шаром радиусом 6400 км. (Подсказка: в полдень путь ~ 8 км; на закате луч идёт по касательной, длина хорды через слой $\approx 2\sqrt{(2Rh)}$.)
6. В опыте со стаканом: почему нужно добавлять именно немного молока? Что случится с «небом» и «закатом», если налить молока слишком много?
7. Инфракрасное излучение имеет длину волны ~ 1000 нм. Во сколько раз слабее оно рассеивается по сравнению с синим (450 нм)? Как это используют в съёмке сквозь дымку?
8. Почему сигнальные огни (стоп-сигналы, светофор «стоп») делают красными, а не синими? Свяжи с рассеянием в тумане.