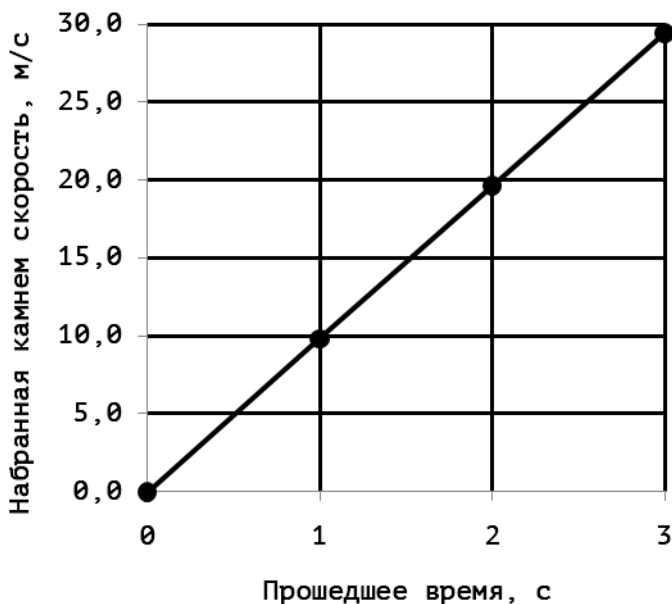


1 Логарифмические координаты

Мы привыкли, что деления на графиках отличаются на постоянную величину.



Вертикальная компонента скорости камня, брошенного с крыши Главного корпуса ТПУ, будет меняться так, как показано на графике

На приведенном графике деления по горизонтальной оси отличаются друг от друга на одну единицу измерения. По вертикальной оси — на пять.

Но вот вопрос — что если нам нужно нарисовать наглядный график, а значения функции или ее аргумента меняются на несколько порядков величины?

Под изменением на порядок традиционно понимают изменение величины в 10 раз. Это происходит от десятичной системы счисления, где десятки, сотни, тысячи и т. д. называются порядком числа

Яркий пример такого большого изменения величин — радиусы орбит и периоды обращения планет в солнечной системе.

Расстояния и периоды обращения планет в солнечной системе

Название планеты	Радиус орбиты, а. е.	Период обращения вокруг Солнца, земных лет
Меркурий	0,38	0,241
Венера	0,72	0,615
Земля	1,0 ~31,57 млн с	1,0 ~15 млн км
Марс	1,52	1,88
Юпитер	5,20	11,86
Сатурн	9,54	29,46
Уран	19,22	84,01
Нептун	30,06	164,79

а. е. — т. н. «астрономическая единица»; внесистемная единица измерения расстояний, используемая в астрономии, равная расстоянию от Земли до Солнца

Если мы нарисуем это в привычных нам координатах (т. н. «натуральном масштабе»), то получится очень неудобный график — соответствующие первым четырем планетам точки будут сливаться друг с другом (см. сл. стр.)

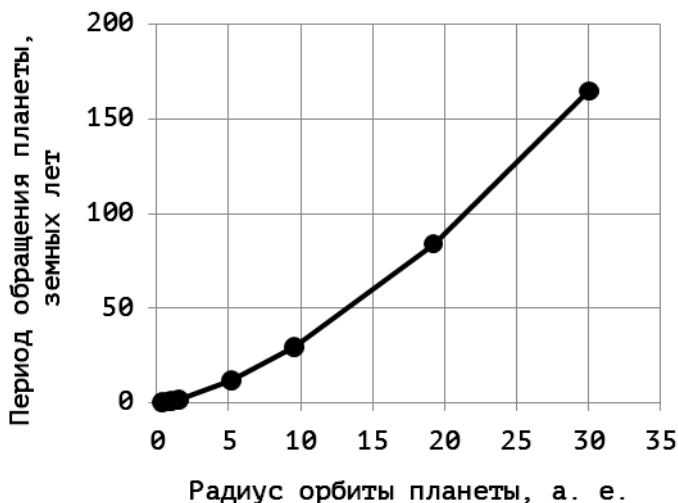


График зависимости периода обращения планет вокруг Солнца от радиуса их орбиты в натуральном масштабе

Мы не можем анализировать начальный участок. Возникнут вопросы с оформлением — придется подбирать размеры точек, толщину линий графика, чтобы все четыре точки были хорошо видны.

Придумаем следующее — пусть основные деления на графике будут отличаться друг от друга не на определенную величину, а в определенное количество раз. Возьмем, к примеру, число 10. В жизни мы практически везде пользуемся десятичной системой счисления. Если мы это сделаем, то график будет изображен в логарифмическом масштабе и будет выглядеть так, как показано на следующей странице.



График зависимости периода обращения планет вокруг Солнца от радиуса их орбиты в логарифмическом масштабе

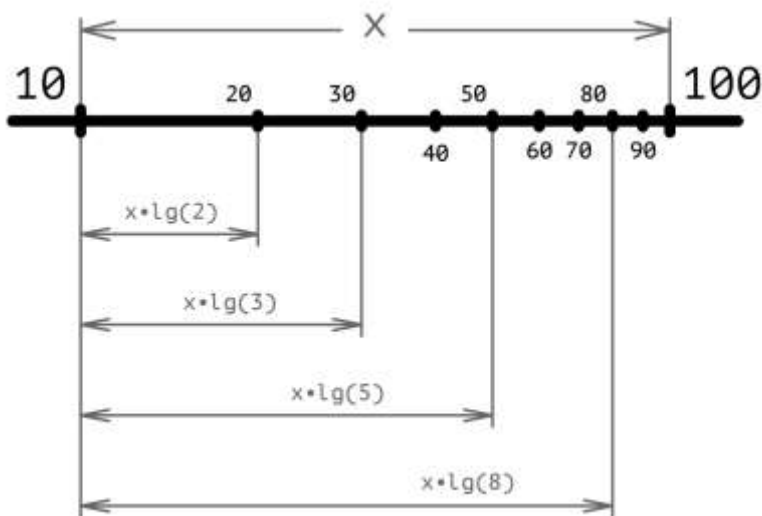
Есть мнение, что так он выглядит гораздо удобнее. Все точки отделены друг от друга достаточными расстояниями и не сливаются друг с другом.

Как такие координаты получились? Легко!

Мы выбрали, во сколько раз будут отличаться друг от друга наши основные деления — в 10 раз. Назовем это число основанием. Положение промежуточных делений и точек графика определяется следующим образом:

1. Выбираем значение для точки / промежуточного деления. Для примера возьмем 30;

2. Делим выбранное деление на число-основание до тех пор, пока делимое не станет меньше его. В нашем случае после однократного деления на 10 получаем число «3»;
3. Находим логарифм полученного значения по выбранному основанию. Для нашего примера получим $\log_{10}(3) = \lg(3) \approx 0,477$;
4. Полученный результат умножаем на длину отрезка между основными делениями. Затем соображаем, между какими основными делениями он должен быть и от меньшего из двух делений откладываем полученное произведение. Деление «30» расположено на $\sim 47,7\%$ длины отрезка между делениями «10» и «100»;



Аналогично поступаем с остальными значениями.

Разумеется, выбирать 10-кратную разницу между соседними делениями необязательно. Можно выбрать 2-кратное, 8-кратное, любое другое, даже выражаемое дробью или иррациональным числом. Нас ведь не смущает наличие 24 часов в сутках, 1024 гигабайт в терабайте, 180 градусов в развернутом угле, 12 дюймов в футе и т. д. Единственный вопрос при выборе основания — будет график наглядным.

Обратим внимание на одну «удобность» логарифмических координат — все степенные функции отображаются в них прямыми линиями. Например, наша зависимость периода обращения планет от радиуса орбиты описывается следующей функцией

$$y = 1,0095 \cdot x^{1,4957}$$

y — период обращения планеты, земных лет,

x — радиус орбиты планеты.

Иными словами, период обращения всех планет практически пропорционален квадратному корню из куба радиуса орбиты. На графике это видно потому, что при изменении радиуса планеты в 100 раз период обращения увеличивается в 1000 раз.

Увидев это следует радостно вскрикнуть, потому что у нас получилось подтверждение **третьего закона Кеплера**, формулирующегося следующим образом:

*Отношение квадратов периодов обращения
спутников вокруг «хозяина» //планет вокруг
Солнца// равно отношению кубов больших полуосей
их эллиптических орбит*

Это самое мы и получили, это самое мы на графике
в логарифмических координатах и увидели. Вот такие
мы молодцы!



Конфетку нам, конфетку!

2 Введение в оптику

Глазами мы видим не предметы (стулья, наушники, часы), а отраженное, прошедшее сквозь или рассеянное от них *излучение*. Поэтому глаз можно обмануть — хорошей голограммой, хорошим фильмом, снятым в 3D. В них имитируется объемность всего окружающего и происходящего.

Излучение — одна из разновидностей энергии. Нам более привычны пока что кинетическая, внутренняя, потенциальная энергии. Со временем привыкнем к излучению, поймем ее взаимосвязь с остальными.

В свою очередь энергия — понятие философское. Сейчас достаточно запомнить, что *энергия — одна из форм существования всего окружающего мира (также как и материя)*. Более глубокое понимание будет формироваться дальше.

Раньше, чтобы объяснить уникальную возможность человека видеть, говорили так: из человеческого глаза исходит огромное количество невидимых щупальцев, которые ощупывают окружающие предметы и возвращаются обратно в глаза, «сообщая» человеку информацию об увиденном. С возрастом количество щупальцев уменьшается, поэтому человек лишается зрения.

Однако вскоре люди перестали в это верить, поскольку щупальца удивительным образом перестают работать ночью, а при свете лампы или факела — вновь работают. Но и то цвет предметов становится

желовато-оранжевым, а не таким, как был на Солнце. Так люди пришли к мысли, что в глазу никаких щупальцев нет, а в него только попадает что-то со стороны.

То излучение, которое мы видим *разумно называть видимым*. Много лет назад ученые установили, что то излучение, которое мы видим, ведет себя как волна. Оно огибает препятствия, оно складывается так, как складываются волны, расходится так, как это делает волна. Ученые даже измерили длины этих волн — оказалось, что они очень маленькие. Темно-фиолетовому цвету соответствует длина волны ~380 нм. Темно-вишневому соответствует длина волны ~780 нм. В промежутке между этими цветами заключены все цвета радуги — красный, оранжевый, зеленый и т. д.



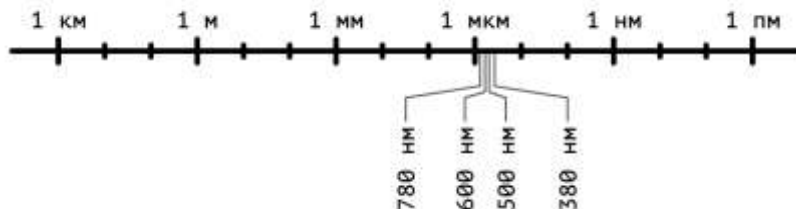
Фотография радуги — хорошо видны фиолетовая, желтая и красная дуги

Этот факт восхитителен сам по себе — оказывается в радуге не семь, а бесконечно огромное количество цветов! Ведь никто не будет спорить, что 450,0003 нм и 450,0004 нм — это разные длины волн, а, значит, и разные цвета. Другое дело, что врят ли когда-нибудь человек заметит эту разницу глазом.

Но все мы помним, что в радуге нет белого цвета, нет розового. Что же, белому не соответствует никакая длина волны? Да, так и есть. Белый цвет — это не какая-то особая длина волны, а все длины волн, взятые в определенном соотношении. Если это соотношение изменить, мы получим оттенки розового, светло-зеленого и так далее. И если абзацем раньше нас удивляло само количество длин волн и соответствующих им цветов, то от комбинаций должно просто дух захватить. Какие там суперсовременные мониторы с их 16581375 цветами!? У нас в распоряжении получается поистине бесконечное количество цветов.

Несмотря на то, что с помощью этих цветов созданы настоящие шедевры изобразительного искусства (такие как «Девятый вал» Айвазовского, фильм «Аватар» Кэмерона, мультфильм «ВАЛЛИ» студии Пиксар, иллюстрации Олега «Smart» Пашенко), физикам это не нравилось. Их терзала мысль о том, что не может природа ограничиться таким узким диапазоном длин волн излучения. Так и оказалось — существует излучение с длинами волн как меньше 380 нм, так и больше 780 нм.

Открываемые диапазоны получали свое название. Ниже приведена так называемая «шкала излучений», где показано, сколь малый диапазон на нем занимает видимое излучение.



Для физика окружающий мир гораздо «цветнее» © Р. Фейнман

То, как называются остальные излучения, приведем в таблице.

Названия и примерные диапазоны
длин волн электромагнитного излучения

Диапазон длин волн	Название диапазона
менее 0,7 фм	космическое гамма-излучение
от ~0,7 фм до ~5 пм	гамма-излучение
от ~5 пм до ~50 пм	жесткое рентгеновское излучение
от ~50 пм до ~5 нм	мягкое рентгеновское излучение
от ~5 нм до ~100 нм	вакуумный ультрафиолет
от ~100 нм до ~380 нм	ближний ультрафиолет
от ~380 нм до ~780 нм	видимое излучение
от ~780 нм до ~3 мкм	ближний инфракрасный диапазон
от ~3 мкм до ~10 мкм	средний инфракрасный диапазон

от ~10 мкм до ~50 мкм	дальний инфракрасный диапазон
от ~50 мкм до ~1 мм	терагерцовое излучение
от ~1 мм до ~300 мм	микроволновое излучение
свыше от ~300 мм	радиоизлучение

Излучение, лежащее в диапазоне от 1 нм до 1 мм, называется оптическим излучением. Как ни странно, это официальное определение. Странно потому, что непонятно, чем 1 мм лучше, чем 1,5 мм. Чем 1 мм лучше чем 100 мкм? Поэтому формулировать определение науки оптики через оптический диапазон мы не можем. Мы можем сделать так:

Оптика — наука о способах получения, преобразования и регистрации видимого излучения и других излучений, имеющих такую же природу и ведущих себя подобным же образом.

Эти определением мы подчеркиваем несколько вещей. Во-первых, оптика появилась из изучения особенностей зрения, то есть понятно происхождение этой науки. Во-вторых, мы подчеркиваем условность границ рассматриваемого диапазона, ведь природа понятия не имеет о нашей классификации. В природе все явления переходят друг в друга плавно. Поэтому мы подчеркнули, что если излучение проявляет себя во всем так же, как видимое — оно принадлежит интересному для нас диапазону.

3 Единицы измерения (начало)

Раз уж мы сказали, что излучение (в том числе оптическое) является разновидностью энергии, это количество энергии можно измерить. Но наиболее важно, что можно измерить распределение энергии — пространственное, угловое, временное. Очень важно понимать все нижеследующее не только как отношение одной величины к другой, но именно как распределение.

Поток излучения (Φ_e) — распределение энергии излучения во времени, мощность излучения. Как и всякая мощность, поток излучения измеряется в ваттах (Вт) и определяется по формуле

$$\Phi_e = \frac{\partial E}{\partial t}$$

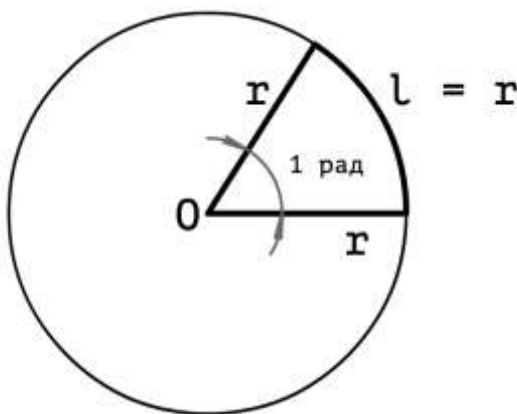
∂t — интервал времени, с

∂E — количество излученной или перенесенной в пространстве энергии за интервал времени ∂t , Дж

Энергетическая сила света (I_e) — распределение потока излучения по направлениям. Мерой направления в данном случае выступает телесный (или сферический) угол.

Мы привыкли к тому, что такое плоский угол — это характеристика непараллельности двух прямых / лучей / отрезков. Мы придумали ему единицу измерения — радиан. Радиан мы определили как угол между лучами, выходящими из центра окружности и выделяющими на

ней дугу, равную по длине радиусу. Вышесказанное проиллюстрируем на рисунке.



Так традиционно определяется угол в один радиан
точка O — центр окружности, r — радиусы, l — длина дуги

Важно понимать, что такое определение радиана — не закон природы, а результат договоренности людей. Можно было бы договориться и назвать радианом угол в 90° или любой другой.

При имеющемся раскладе мы получаем, что полная длина окружности равняется $2 \cdot \pi \cdot r$, а двойной развернутый угол (360°) равен 2π радиан.

Сферический угол определяют приблизительно также, только в пространстве. Он уже определяет непараллельность бесконечно большого пучка лучей, имеющих общую точку пересечения. Единица измерения телесного угла, называемая «стерадиан» (обозначается «срад») определяется через площадь

поверхности, выделяемой этим пучком лучей на поверхности шара. Пучки лучей, расходящиеся под углом 1 срад, выделяют на поверхности шара участок площадью, численно равной квадрату радиуса шара. Отсюда получается, что полный сферический угол равен 4π стерadian.

Если мы обозначим телесный угол буквой Ω (омега), то сила света определится по следующей формуле

$$I_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \Omega}$$

$\partial \Omega$ — телесный угол, срад

$\partial \Phi_e$ — поток излучения, идущий в телесном угле $\partial \Omega$, Вт

Интенсивность потока излучения (q_e), энергетическая освещенность (E_e) и энергетическая светимость (M_e) — поверхностное распределение потока излучения. Все эти единицы измерения имеют одну и ту же размерность (Вт/м²) и определяются одной формулой

$$q_e, E_e, M_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S}$$

∂S — элемент поверхности, м²

$\partial \Phi_e$ — поток излучения, идущий в телесном угле $\partial \Omega$, Вт

Единственная разница между ними состоит в том, что интенсивностью чаще всего называют распределение потока по любой (в том числе мысленной) поверхности. В это же время освещенность

касается только распределения потока излучения, падающего на какую-то настоящую поверхность, а светимость — поверхностное распределение испускаемого источником потока излучения.

Помните, что понятие «интенсивность» очень часто используется неправильно. Ситуация такова, что мы даже рекомендуем его не использовать. Вместо этого можно пользоваться термином «плотность потока излучения». Спутать этот термин с линейной плотностью потока или объемной плотностью потока невозможно — хорошие физики и хорошие оптики вас не поймут. Линейная и объемная плотности имеют смысл только для «ненаправленных» величин, а поток излучения соответствует скорости переноса энергии.

Текст лекции, иллюстрации и графики оформлены с использованием бесплатного общенационального русского шрифта PT, созданного студией шрифтового дизайна «ПараТайп» (<http://paratype.ru/>).

Формулы набраны гарнитурой Times New Roman ввиду отсутствия необходимых символов в шрифте PT. Также Таймсом набрано обозначение потока излучения в тексте. В подписях к формулам греческие символы набраны гарнитуройTahoma.

Документ можно свободно скачивать, копировать, удалять, отправлять и хранить в корзине, держать на флешке, sd-карте, жестком и гибком магнитном диске любого размера и файловой системы, открывать и закрывать неограниченное количество раз любой программой, понимающей формат pdf, распечатывать любое количество раз и хранить в распечатанном виде. Распечатанную копию разрешается использовать для любых целей.

Разрешается критиковать изложенное, обсуждать, запоминать, цитировать.

Однако помните, что текст может обновляться, дополняться, исправляться и быть некоторое время недоступным на усмотрение автора.

Иллюстрация конфеты позаимствована с сайта компании «Озерский сувенир», а именно [с этой страницы](#).

Иллюстрация радуги позаимствована с сайта «История вещей», а именно [отсюда](#). Откуда иллюстрация появилась там, мы не знаем и даже интересоваться не хотим