

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Электромагнитное излучение возникает во всех случаях, когда в пространстве создается переменное электромагнитное поле. В свою очередь электромагнитное поле будет изменяться во времени, если меняется распределение электрического заряда в системе или является переменной плотность электрического тока. Таким образом, источником электромагнитного излучения являются всякого рода переменные токи и пульсирующие электрические заряды.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Простейшими системами, создающими электромагнитное поле, являются магнитный и электрический диполи (и прежде всего второй из них) с переменным моментом. Таким электрическим диполем является система, состоящая из неподвижного положительного заряда и колеблющегося около него отрицательного заряда. Если это колебание происходит по гармоническому закону, то дипольный момент будет также меняться по этому закону, т.е. представится формулой

$$p = p_0 \cos \omega t.$$

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Значение этой простой модели излучателя весьма велико по той причине, что множество реальных систем ведут себя с хорошей точностью как идеальные диполи.

Вспомним, что электрические свойства любой системы, у которой «центры тяжести» положительного и отрицательного заряда не совпадают, могут быть описаны, если указан дипольный момент такой системы.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

А электрически нейтральные системы, у которых способны смещаться друг по отношению к другу положительные и отрицательные заряды, составляют основную долю излучателей электромагнитной энергии прежде всего потому, что под эту рубрику попадают молекулярные и атомные системы. Электрон, вращающийся около ядра атома, представляет собой систему с переменным дипольным моментом; нейтральная молекула с колеблющимися атомами также зачастую является системой с переменным дипольным моментом. Однако этим еще не исчерпывается наш интерес к электрическому диполю.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Далее будет показано, что радиотехническая линейная антенна может быть уподоблена диполю (аналогичные термины — осциллятор, вибратор — несколько шире точного термина «диполь»).

Что касается магнитных диполей, то мы сталкиваемся с ними тогда, когда распределение электрического заряда, а следовательно, и дипольный момент системы остаются неизменными, но в то же время плотность тока, а значит, и магнитный момент системы меняются во времени.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Основным примером является рамка, по которой идет переменный электрический ток. Если ток замкнут, то электрические заряды нигде не скапливаются и не рассасываются, дипольный электрический момент такой рамки равен нулю и неизменен. В то же время магнитное поле рамки, связанное со значением ее магнитного момента, будет меняться и, следовательно, приведет к излучению электромагнитной энергии.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Следует отметить однако, что если система обладает одновременно и электрическим и магнитным моментом, то обычно излучение магнитного диполя на больших расстояниях от источника много меньше, чем излучение электрического диполя.

Если диполь излучает, отдавая при этом свою внутреннюю энергию, или, как это имеет место в антенне, превращая в энергию излучения энергию сторонних источников, то такой диполь можно назвать *первичным излучателем*.

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Однако, кроме подобных случаев, значительный интерес представляет и *вторичное излучение*, т.е. такое явление, при котором диполь приходит в колебание благодаря действию электромагнитной волны и становится излучателем лишь по этой причине. Вторичные колебания будут особо интенсивными в том случае, если первичная волна имеет ту же частоту, что и собственная частота диполя (резонанс).

Электромагнитное излучение

Элементарный диполь

Приведение диполя в колебательное состояние можно представлять себе как механический процесс — раскачка зарядов внешней силой, равной произведению заряда на напряженность. В то же время для приемной антенны процесс создания в ней вторичных колебаний можно рассматривать как индукционный процесс наведения переменного электрического тока переменным магнитным полем. С той точностью, с которой антенну можно подменять диполем, оба рассмотрения совпадают.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

Между состоянием колебания колебательного контура и колебанием тока в антенне имеется существенное различие. Говоря об электрическом колебании контура, мы говорили об определенной мгновенной силе тока, об определенном мгновенном заряде на обкладках конденсатора. Молчаливо подразумевалось, что сила тока во всех участках цепи одинакова, а электрический заряд сосредоточен на обкладках конденсатора и, следовательно, в данное мгновение может иметь лишь единственное значение.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

При переходе к антенне мы уже теряем право рассматривать электрическое колебание так, как мы изучали в свое время колебание маятника. Тем не менее колебание электрического тока в антенне имеет механическую аналогию: оно во многом похоже на колебание стержня или струны, т.е. представляет собой стоячую волну.

Очевидно, что в середине свободного куска провода, в котором возбуждены электромагнитные колебания, имеет место пучность тока проводимости, а на концах находятся узлы тока проводимости.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

В таком проводе в каждое мгновение ток идет во всех частях провода в одну сторону. В некоторое мгновение ток во всех точках провода обращается в нуль, а затем начинает течь в обратную сторону. Соответственно меняются электрические заряды, которые непрерывно распределены вдоль провода. Очевидно, пока ток идет в одном направлении, происходит скопление положительного заряда на одной половине провода и образование отрицательного заряда на другой. В момент обращения тока в нуль на концах скапливаются максимальные заряды противоположных знаков.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

Далее ток начинает идти в обратную сторону, заряды начинают уменьшаться и обращаются в нуль в тот момент, когда сила тока во всех точках провода максимальна. После этого начинается перезарядка, на половинах провода начинают скапливаться заряды обратного знака и т. д.

Мы обращаем внимание на то, что в каждый момент времени на двух половинах стержня имеются заряды противоположного знака. Два заряда, равные по величине и противоположные по знаку, расположенные на некотором расстоянии друг от друга,— это электрический диполь.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

Можно поэтому сказать, что электрические колебания в антенне весьма похожи на колебание электрического диполя, при котором дипольный момент меняется от максимального положительного значения к нулю, затем от нуля возрастает в противоположном направлении, затем опять уменьшается и т.д.

Отличие антенны от диполя обнаруживается только на близких расстояниях от нее. На расстояниях же в сотни раз больших размеров антенны поле, создаваемое антенной, практически неотличимо от поля, создаваемого идеальным электрическим диполем.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

Вернемся еще раз к аналогии антенны со стержнем. Собственные частоты электрических колебаний, которые могут существовать в свободной незаземленной антенне, не ограничиваются простейшим случаем, когда на длине антенны укладывается полволны (впрочем, в технике УКВ такой полуволновой диполь в основном и применяется). Между длиной волны и длиной антенны имеется понятная связь: $L = n \frac{\lambda}{2}$. Такие длины волн λ антенна с длиной L способна излучать и принимать.

Электромагнитное излучение

Антенна как электрический диполь

Способы изменения собственных частот антенны хорошо известны радиотехникам. Они сводятся к подключению к антенне катушки самоиндукции или конденсатора. Меняя индуктивность или емкость, можно менять собственные частоты антенны в широких пределах.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

Излучение диполя можно исследовать экспериментально. Результат полностью совпадает с теоретическим рассмотрением, которое было впервые проведено Герцем. Мы обсудим лишь результаты опытов и теоретических расчетов, при этом ограничимся изучением поля диполя вдали от него, в так называемой волновой зоне, т. е. на расстояниях, значительно больших размера диполя.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

По каким бы сложным законам ни колебался диполь, всегда можно разложить это колебание по теореме Фурье в спектр, т.е. представить его в виде суммы гармонических колебаний с частотами ω , 2ω , 3ω и т.д. Поэтому вполне достаточно рассмотреть электромагнитное поле диполя, момент которого меняется по гармоническому закону $p = p_0 \cos \omega t$.

Расчет и опыт показывают, что поле такой системы представляет собой шаровую волну, распространяющуюся со скоростью $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

Электрический и магнитный векторы волны расположены под углом 90° друг к другу и под таким же углом к направлению распространения.

Последнее обстоятельство следует, впрочем, из теоремы Пойнтинга.

Электрический и магнитный векторы меняются в волновой зоне в одной фазе, совершая в каждой точке пространства гармоническое колебание.

Между числовыми значениями векторов напряженности имеется простая связь, а именно:

$$\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H .$$

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

Отсюда следует такое представление вектора Пойнтинга:

$$K = \frac{c}{4\pi} E^2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} = \frac{v}{4\pi} \epsilon E^2 .$$

Таким образом, интенсивность волны, т.е. энергия, приходящаяся на единицу площади в единицу времени, пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

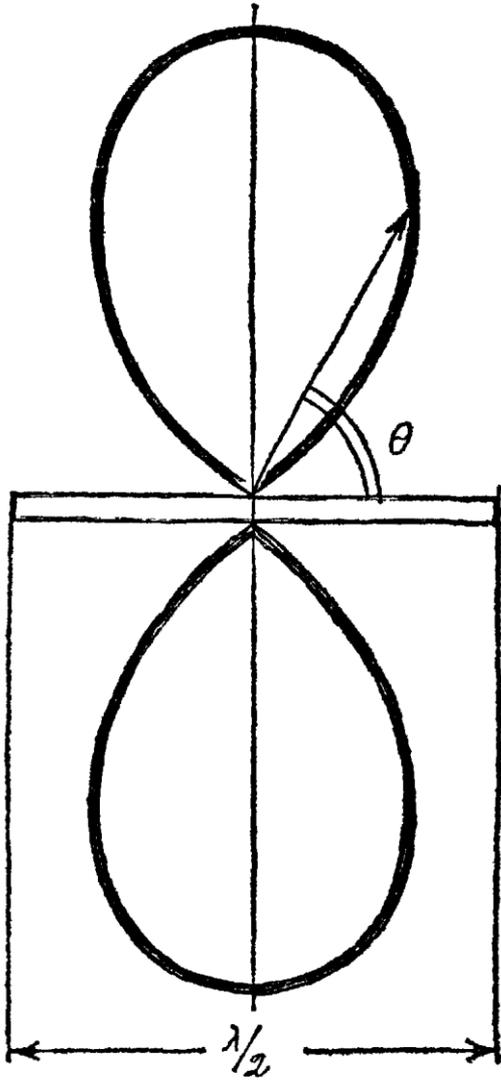
Излучение диполя не одинаково в разные стороны. Амплитуда, а вместе с ней и интенсивность зависят от угла наклона линии распространения к оси диполя. Излучение максимально в направлении, перпендикулярном к оси диполя, и равно нулю в направлении дипольного момента. Теория дает для напряженности электрического поля следующее выражение:

$$E = \frac{p_0 \omega^2}{c^2 R} \sin \theta \cos \left(t - \frac{R}{v} \right) ,$$

где множитель перед косинусом является амплитудой волны вектора E .

Электромагнитное излучение

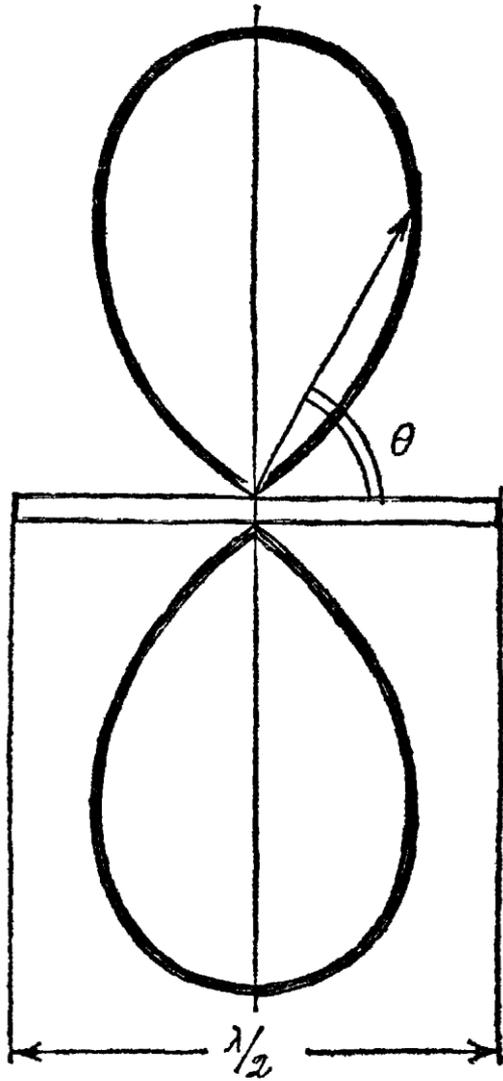
Излучение диполя



Угол θ есть угол между направлением распространения и осью диполя. Выражение для магнитного поля отличается от написанного лишь несущественным множителем. Зависимость интенсивности излучения от направления изображают иногда диаграммой, подобной приведенной на рисунке.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя



Здесь радиус-вектор, проведенный в интересующем нас направлении, пересекает кривую интенсивности. Отрезок, который образуется при этом пересечении, дает в известном масштабе интенсивность излучения.

Весьма важным результатом является пропорциональность амплитуды квадрату частоты излучения.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

Очевидно, что интенсивность излучения диполя будет исключительно резко зависеть от частоты, а именно, пропорционально четвертой степени частоты:

$$K \sim \frac{\omega^4}{R^2} \sin^2 \theta .$$

Так, при уменьшении частоты вдвое интенсивность упадет в 16 раз.

Теория привела к важному заключению о поперечности электромагнитной волны.

Электрический и магнитный векторы перпендикулярны к направлению распространения.

Электромагнитное излучение

Излучение диполя

Благодаря этому при вращении около направления распространения электромагнитная волна меняет свои свойства. Подобные свойства носят название *поляризационных*.

Картина силовых линий излучающего диполя не представляет особого интереса. Поле — вихревое, и силовые линии замкнуты. При излучении замкнутые линии движутся, расширяясь в сторону от излучателя. Что касается магнитных силовых линий, то они представляют собой окружности, охватывающие ось диполя.

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

Электромагнитное излучение образуется тогда, когда электрические заряды движутся неравномерно, ускоренно. Равномерно движущийся (свободный) поток электрических зарядов не излучает. Нет излучения электромагнитного поля и у зарядов, движущихся под действием постоянной силы, например у зарядов, описывающих окружность в магнитном поле.

В колебательных движениях ускорение непрерывно меняется, поэтому колебания электрических зарядов дают электромагнитное излучение.

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

Кроме того, электромагнитное излучение возникнет при резком неравномерном торможении зарядов, например при попадании пучка электронов на препятствие (образование рентгеновских лучей). В хаотическом тепловом движении частиц также рождается электромагнитное излучение (тепловое излучение). Пульсации ядерного заряда приводят к созданию электромагнитного излучения, известного под названием γ -лучей. Ультрафиолетовые лучи и видимый свет производятся движением атомных электронов. Колебания электрического заряда в космических масштабах приводят к радиоизлучению небесных тел.

Электромагнитное излучение

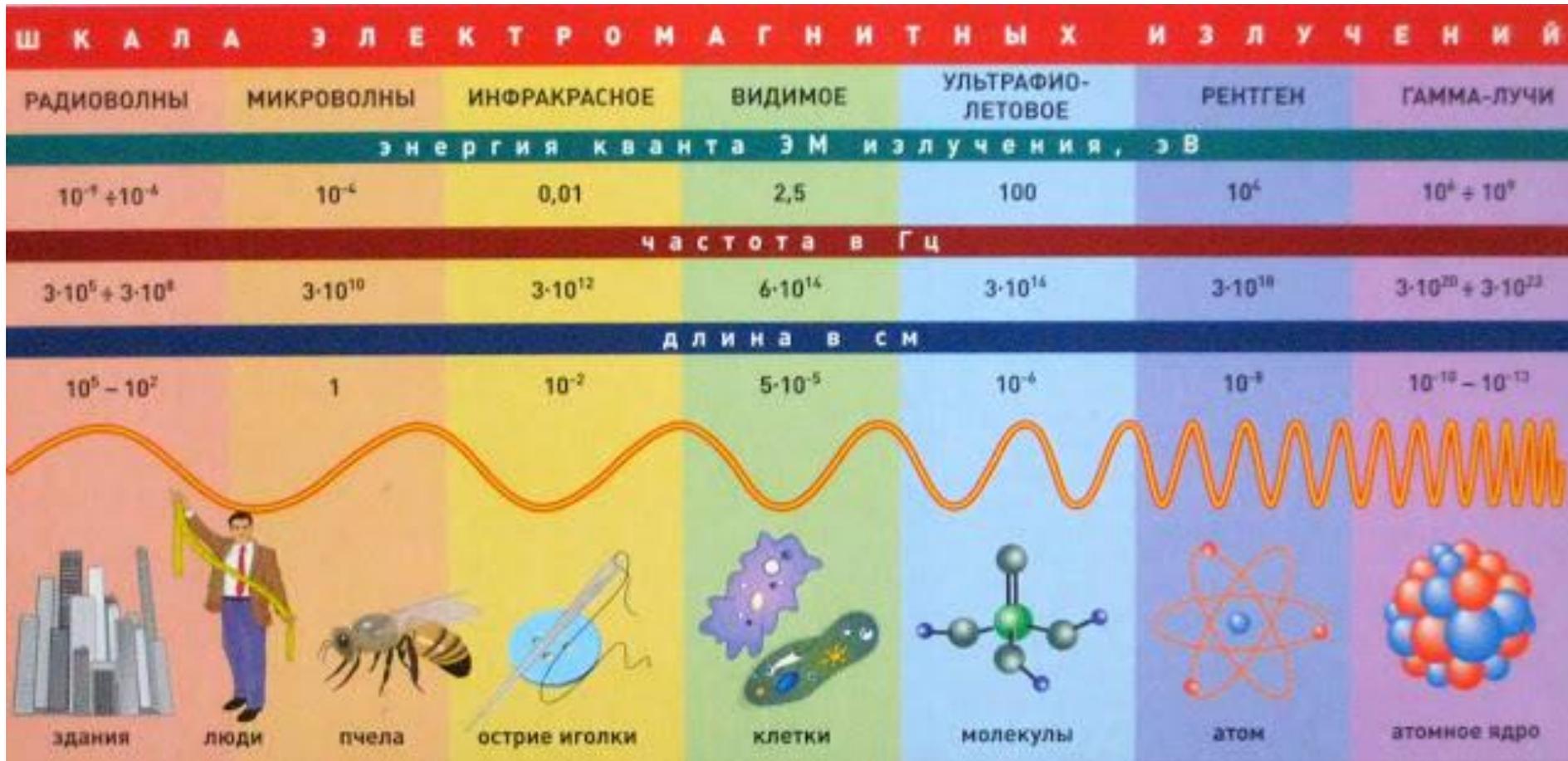
Электромагнитный спектр

Наряду с естественными процессами, в результате которых создается электромагнитное излучение самых различных свойств, имеются разнообразные экспериментальные возможности по созданию электромагнитного излучения.

Основной характеристикой электромагнитного излучения является его частота (если речь идет о гармоническом колебании) или полоса частот. Интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени частоты. Поэтому излучение очень низких частот с длинами волн порядка сотен километров не прослеживается.

Электромагнитное излучение

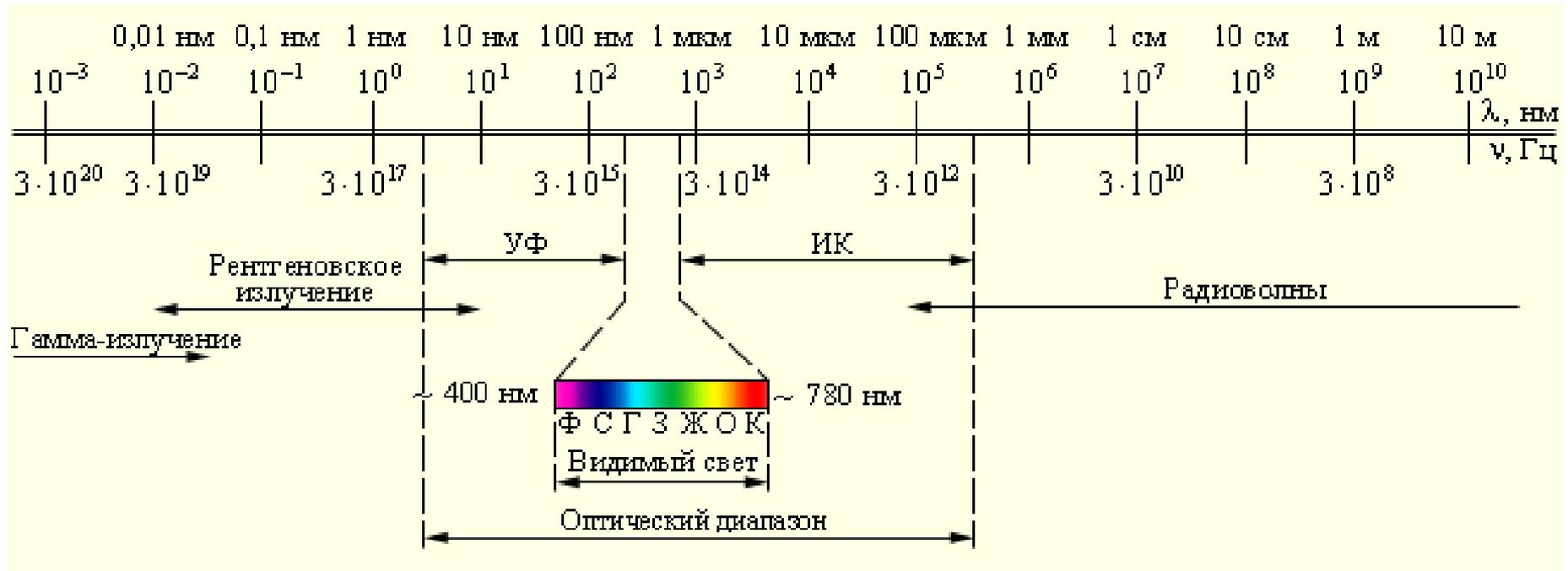
Электромагнитный спектр



Практический радиодиапазон начинается, как известно, с длин волн порядка 1 - 2 км,

Электромагнитное излучение

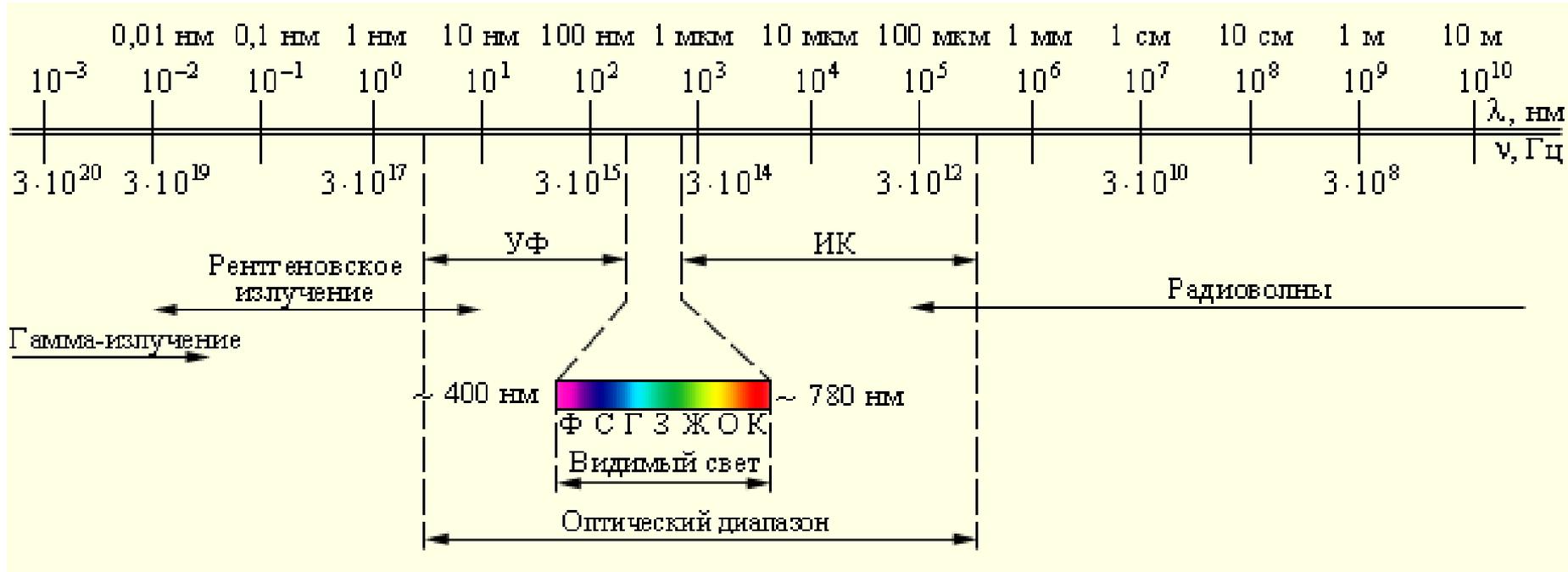
Электромагнитный спектр



что соответствует частотам порядка 150 кГц; длины волн порядка 200 м относят к среднему диапазону, десятки метров — это уже короткие волны.

Электромагнитное излучение

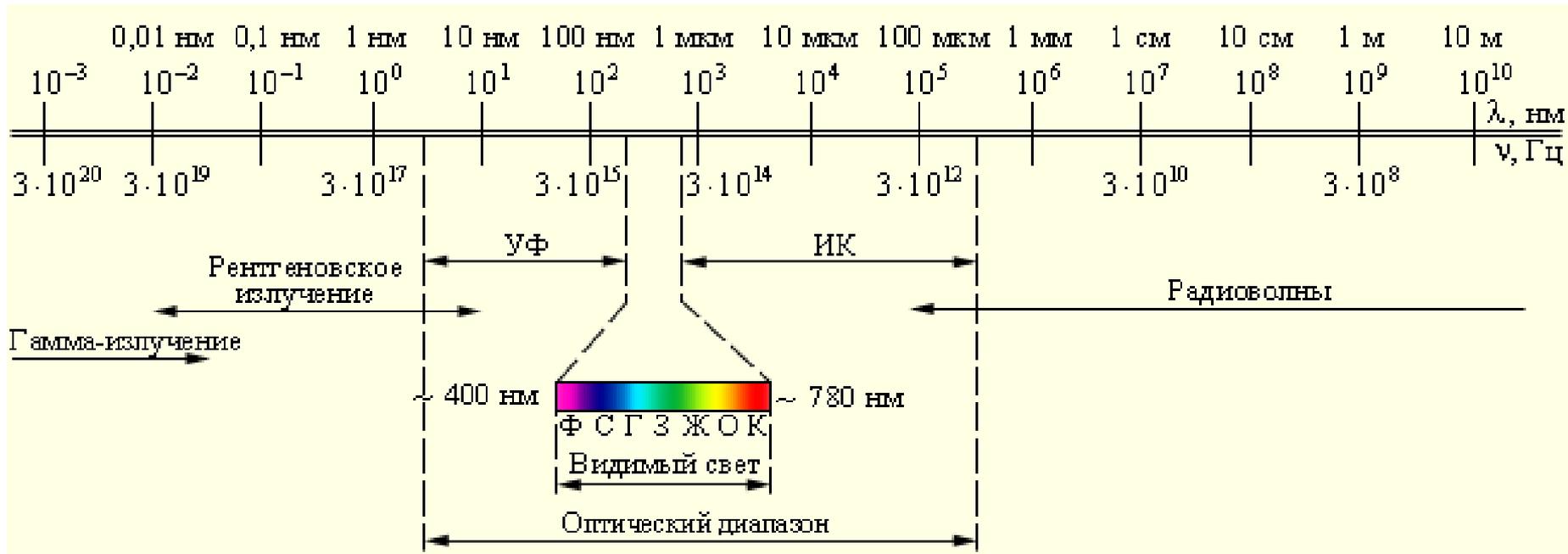
Электромагнитный спектр



Ультракороткие волны (УКВ) выводят нас из обычного радиодиапазона; длины волн порядка нескольких метров и долей метра вплоть до сантиметра (частоты порядка 10^{10} — 10^{11} Гц) употребляются в телевидении и радиолокации.

Электромагнитное излучение

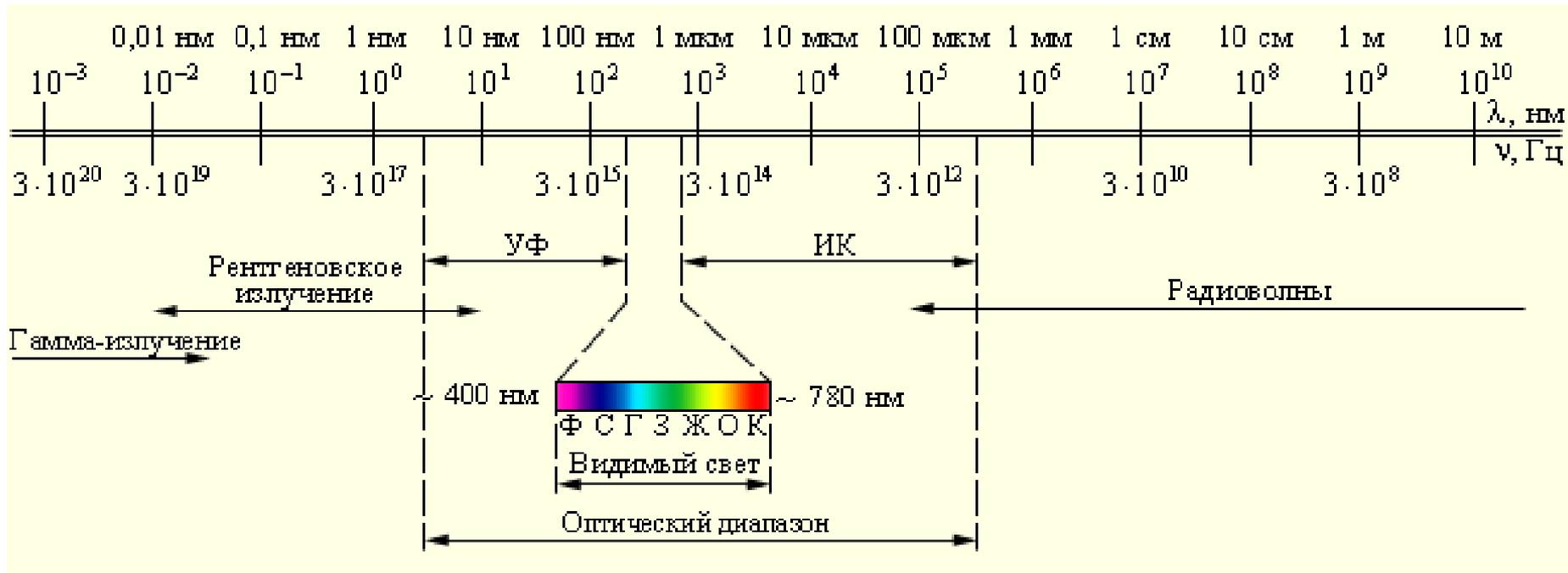
Электромагнитный спектр



Еще более короткие электромагнитные волны были получены в 1924 г. Глаголевой-Аркадьевой. Она использовала в качестве генератора электрические искры, проскакивающие между взвешенными в масле железными опилками.

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

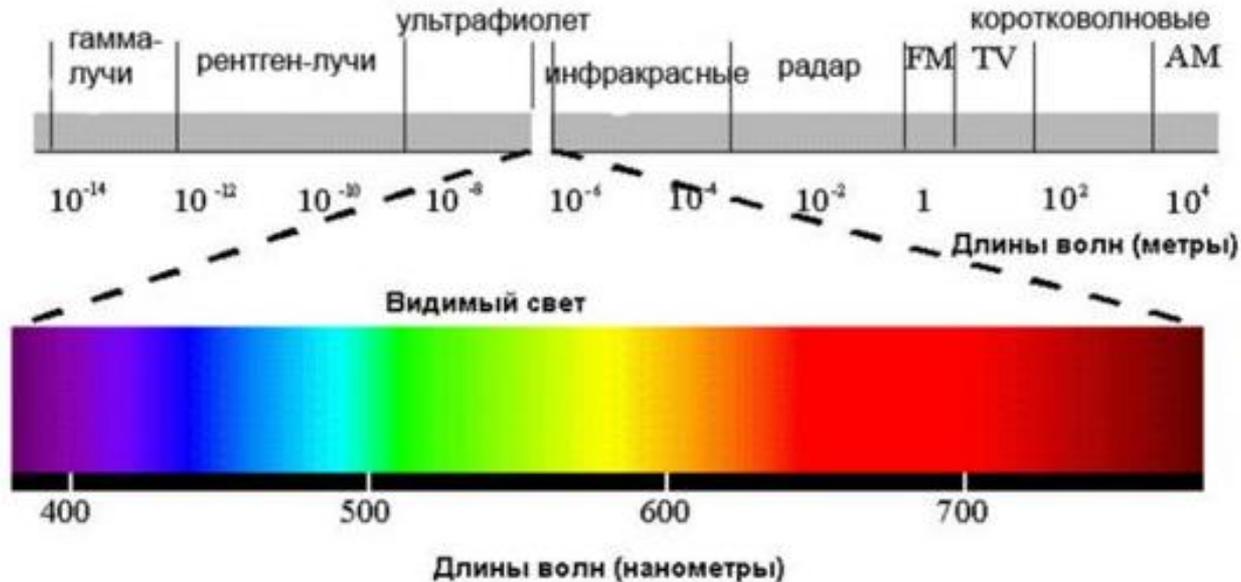


Длина полученной волны составила 0,1 мм. Здесь уже достигается перекрывание с длинами волн теплового излучения.

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

Участок видимого света весьма мал: он занимает всего лишь длины волн от 760 до 400 нм.



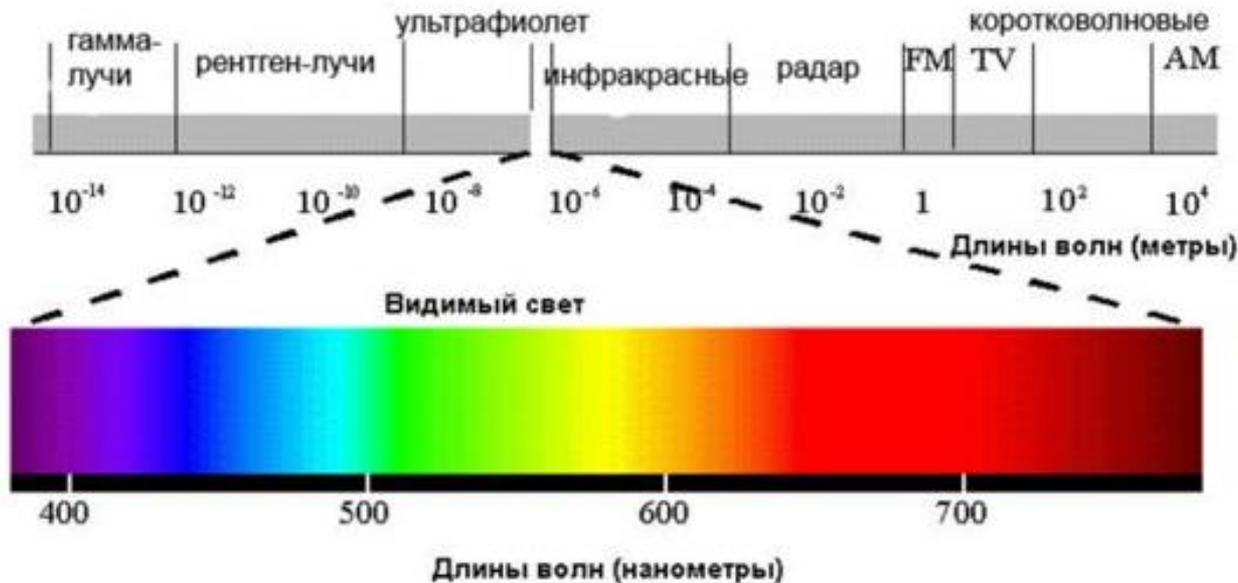
■ Видимым диапазон

- Диапазон частоты электромагнитного излучения, на который реагирует чувствительная система глаза
- Обычно в видимый диапазон включают частоты от 380 до 780 нанометров ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$)

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

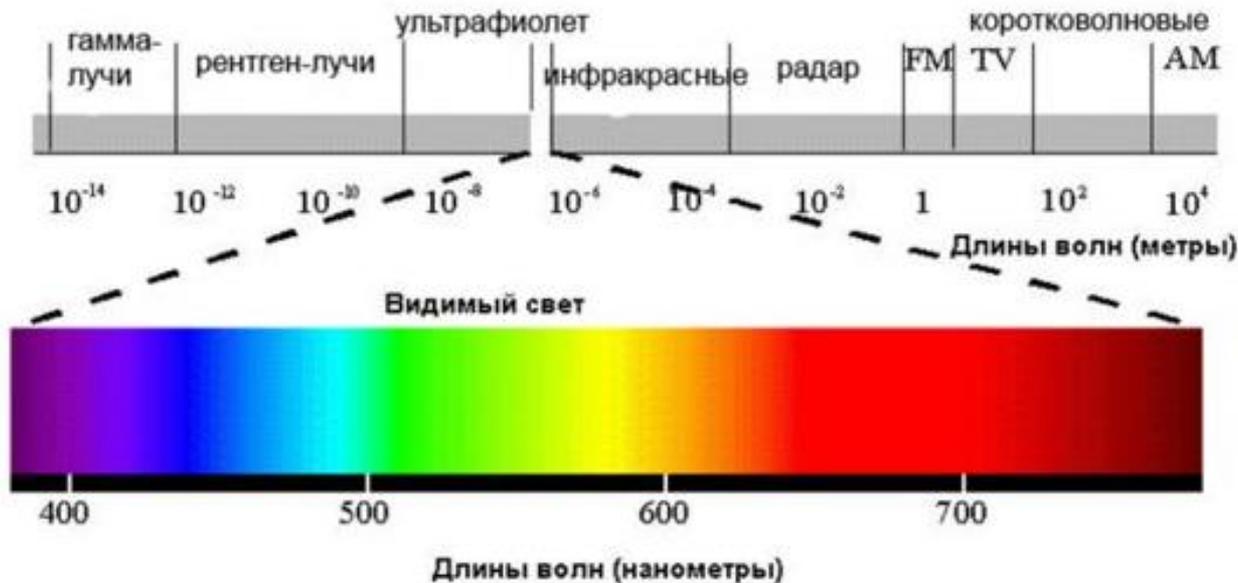
Далее следуют ультрафиолетовые лучи, невидимые глазом, но весьма хорошо фиксируемые физическими приборами. Это длины волн от 400 до 100 нм.



Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

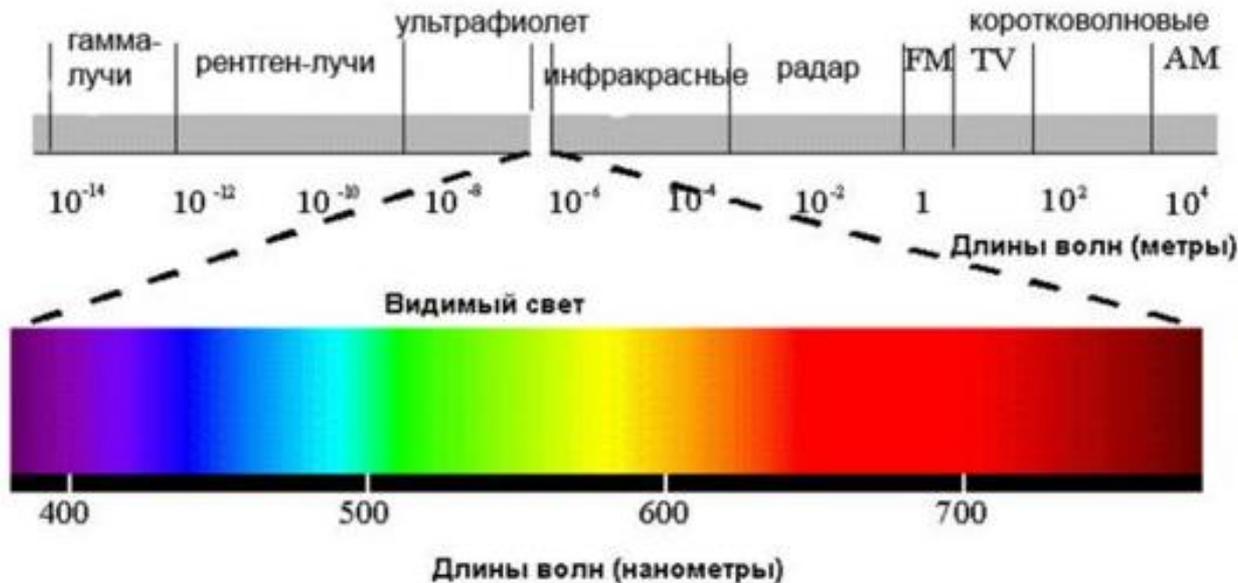
За ультрафиолетовыми следуют рентгеновские лучи. Их длины волн от 10 нм до 1 Å. Чем меньше длина волны, тем слабее рентгеновские лучи поглощаются веществом.



Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

Наиболее коротковолновое и проникающее электромагнитное излучение носит название γ -лучей (длины волн от 10 \AA и ниже).



Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

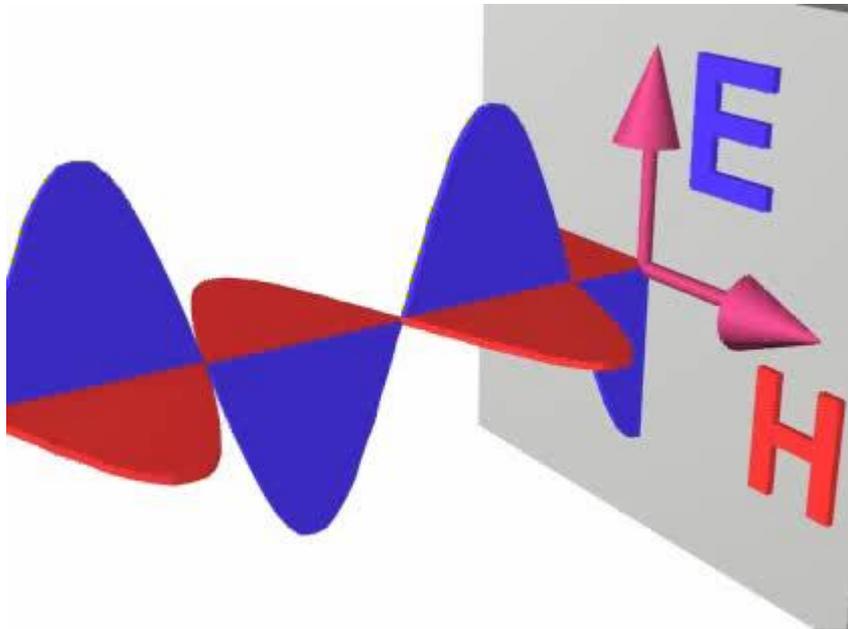
Характеристика любого из перечисленных видов электромагнитных излучений будет исчерпывающей, если указать его спектральный состав и поляризационное состояние.

Спектр излучения может быть сплошным или линейчатым, т. е. может заполнять непрерывно некоторую полосу частот, а может состоять из отдельных резких линий, соответствующих крайне узкому частотному интервалу.

Электромагнитное излучение

Электромагнитный спектр

В первом случае для характеристики спектра надо задать кривую интенсивности в функции частоты (длины волны), во втором случае спектр будет описан заданием всех имеющихся в нем линий с указанием их частот и интенсивностей.



Электромагнитное излучение заданной частоты и интенсивности может отличаться своим поляризационным состоянием.

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Мы уже говорили, что изучение атомных явлений привело к открытию закона, согласно которому внутренняя энергия системы не может иметь произвольного значения, а характеризуется системой энергетических уровней. Излучение энергии связано с переходом системы с более высокого на более низкий уровень. Поглощение энергии связано с подъемом на более высокий уровень.

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Это относится в первую очередь к электромагнитному излучению. Квантовая природа субмикроскопических явлений была открыта исследованием ряда противоречивых фактов, найденных в отношении электромагнитного излучения еще в начале XX века.

Испускание диполем электромагнитного излучения частоты ν происходит не непрерывно, а квантами (порциями). Величина энергии кванта равна $h\nu$, где h — постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с = $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Квантовая природа электромагнитных волн проявляется как в излучении, так и в поглощении, поскольку поглощение также может происходить лишь квантами энергии. Только если величина кванта энергии равна разности каких-либо энергетических уровней системы, на которую падает волна, может происходить процесс поглощения. Такое поглощение можно назвать резонансным. С точки зрения классической физики такое положение имеет место тогда, когда частота внешнего поля равна частоте колебаний частиц, из которых состоит система.

Электромагнитное излучение

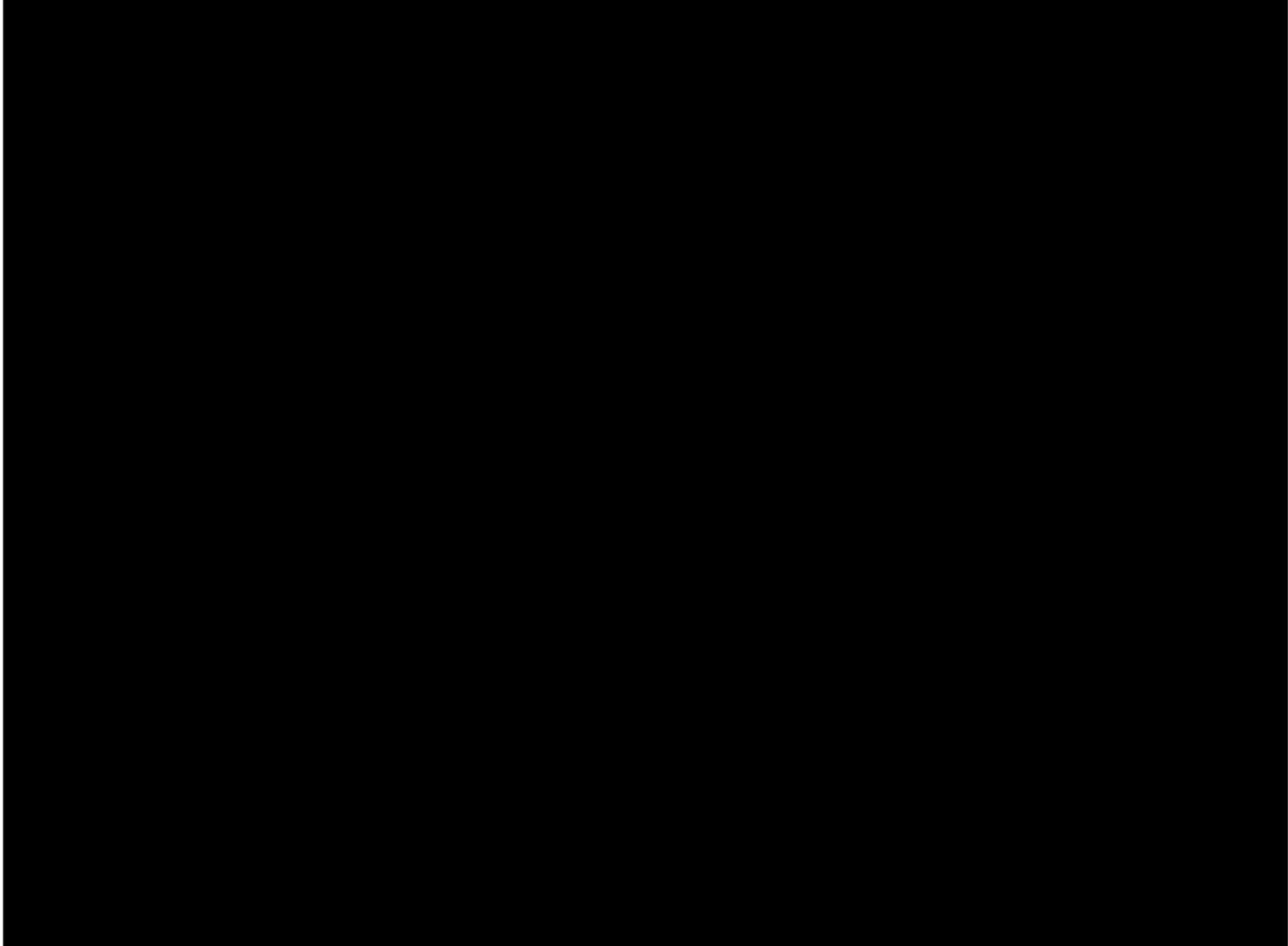
Квантовая природа излучения

Если величина кванта электромагнитной волны меньше разности энергетических уровней, то поглощение не может иметь места и такая волна будет свободно проходить через систему.

Вторичное излучение системы описывается на квантовом языке следующим образом. Система поглощает квант электромагнитной энергии и поднимается на более высокий энергетический уровень. На этом уровне система некоторое время существует, а затем возвращается на прежний энергетический уровень, отдавая при этом энергию также в виде кванта.

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения



Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Как это очевидно из формулы кванта энергии $h\nu$, квантовые явления обнаруживаются тем отчетливее, чем больше частота излучения. Тем не менее в настоящее время обнаружена квантовая природа излучения практически всех участков электромагнитного спектра. Оказывается возможным обнаружить квантовое поглощение радиоволн длиной в несколько сотен метров (радиоспектроскопия).

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Возникновение того или иного электромагнитного спектра излучения связано, прежде всего, с расположением энергетических уровней у такой системы и, далее, зависит от вероятностей перехода системы с одного уровня на другой. Если бы эти вероятности были известны заранее вместе с картиной энергетических уровней, то предсказание спектра, излучаемого системой, было бы простой задачей.

Электромагнитное излучение

Квантовая природа излучения

Мы еще не раз вернемся к проблемам излучения и поглощения электромагнитной энергии, а пока займемся вопросами распространения электромагнитных волн, в которых квантовая природа излучения не проявляет себя, если явление не сопровождается поглощением и излучением энергии.