

## Электромагнитные волны

*Темы кодификатора ЕГЭ:* свойства электромагнитных волн, различные виды электромагнитных излучений и их применение.

Важнейший результат электродинамики, вытекающий из уравнений Максвелла<sup>1</sup>, состоит в том, что *электромагнитные взаимодействия передаются из одной точки пространства в другую не мгновенно, а с конечной скоростью*. В вакууме скорость распространения электромагнитных взаимодействий совпадает со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Рассмотрим, например, два покоящихся заряда, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Сила их взаимодействия определяется законом Кулона. Шевельнём один из зарядов; согласно закону Кулона сила взаимодействия изменится мгновенно — второй заряд сразу «почувствует» изменение положения первого заряда. Так утверждала теория дальнего действия<sup>2</sup>.

Однако в действительности дело обстоит иначе. При шевелении заряда электрическое поле вблизи него меняется и порождает магнитное поле. Это магнитное поле также является переменным и, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле, которое опять порождает переменное магнитное поле и т. д. *В пространстве начинает распространяться процесс колебаний напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля — электромагнитная волна*. Спустя некоторое время эта электромагнитная волна достигнет второго заряда; лишь тогда — а не мгновенно! — он и «почувствует», что положение первого заряда изменилось.

Существование электромагнитных волн было предсказано Максвеллом и получило блестящее подтверждение в опыте Герца.

### Опыт Герца: открытый колебательный контур

Электромагнитные волны должны быть достаточно интенсивными для того, чтобы можно было их наблюдать в эксперименте.

Нетрудно понять, что электромагнитные волны будут тем интенсивнее, чем быстрее меняется положение зарядов, излучающих эти волны. Действительно, в таком случае электрическое поле вблизи зарядов меняется с большей скоростью и порождает большее магнитное поле; оно, в свою очередь, меняется столь же быстро и порождает большее электрическое поле, и т. д.

В частности, *интенсивные электромагнитные волны порождаются высокочастотными электромагнитными колебаниями*.

Электромагнитные колебания создаются в хорошо знакомом нам колебательном контуре. Частота колебаний заряда и тока в контуре равна:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

С этой же частотой колеблются векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в заданной точке пространства. Таким образом, величина  $\nu$ , вычисляемая по формуле (1), будет также *частотой электромагнитной волны*.

Чтобы увеличить частоту колебаний в контуре, нужно уменьшать ёмкость конденсатора и индуктивность катушки.

Но эксперименты показали, что дело не ограничивается одной лишь высокой частотой колебаний. Для образования интенсивных электромагнитных волн существенным оказывается ещё

---

<sup>1</sup>Мы уже не первый раз говорим об уравнениях Максвелла, а самих уравнений при этом не выписываем. Ничего не поделаешь — эти уравнения пока слишком сложны для вас. Вы познакомитесь с ними курсе на втором, когда будут освоены необходимые темы из высшей математики.

<sup>2</sup>Теории дальнего действия и ближнего действия обсуждались в листке «Напряжённость электрического поля».

один фактор: *переменное электромагнитное поле, являющееся источником электромагнитных волн, должно занимать достаточно большую область пространства.*

Между тем, в обычном колебательном контуре, состоящем из конденсатора и катушки, переменное электрическое поле почти целиком сосредоточено в малой области внутри конденсатора, а переменное магнитное поле — в малой области внутри катушки. Поэтому даже при достаточно высокой частоте колебаний такой колебательный контур оказался непригоден для излучения электромагнитных волн.

Как добиться увеличения области, занимаемой высокочастотным электромагнитным полем? Герц нашёл красивое и гениально простое решение — *открытый колебательный контур.*

Возьмём обычный колебательный контур (рис. 1, слева). Начнём уменьшать число витков катушки — от этого её индуктивность будет уменьшаться. Одновременно уменьшаем площадь пластин конденсатора и раздвигаем их — это приводит к уменьшению ёмкости конденсатора и к увеличению пространственной области, занимаемой электрическим полем. Эта промежуточная ситуация изображена на рис. 1 в середине.

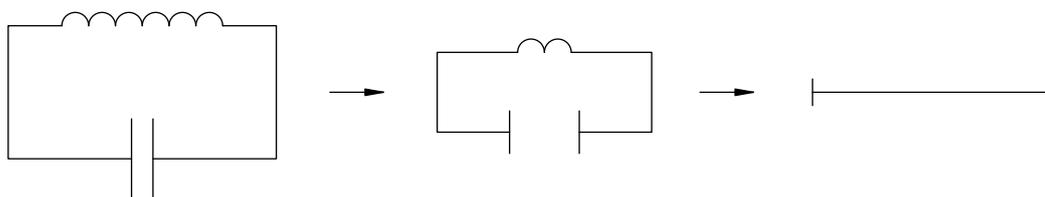


Рис. 1. Превращение обычного колебательного контура в открытый

К чему мы придём, продолжая этот процесс? Катушка ликвидируется вовсе, превращаясь в кусок проводника. Пластины конденсатора раздвигаются максимально далеко и оказываются на концах этого проводника (рис. 1, справа). Остаётся уменьшить до предела размеры пластин — и получится самый обычный прямолинейный стержень! Это и есть открытый колебательный контур (рис. 2).



Рис. 2. Открытый колебательный контур

Как видим, идея Герца об открытом колебательном контуре позволила «убить двух зайцев»: 1) ёмкость и индуктивность стержня очень малы, поэтому в нём возбуждаются колебания весьма высокой частоты; 2) переменное электромагнитное поле занимает довольно большую область пространства вокруг стержня. Поэтому такой стержень может служить источником достаточно интенсивных электромагнитных волн.

Но как возбудить в стержне электромагнитные колебания? Герц разрезал стержень по середине, раздвинул половинки на небольшое расстояние (создав так называемый разрядный промежуток) и подключил их к источнику высокого напряжения. Получился *излучающий вибратор Герца* (рис. 3; концы провода в разрядном промежутке снабжались небольшими шариками).



Рис. 3. Излучающий вибратор Герца

Когда напряжение между шариками превышало напряжение пробоя, в разрядном промежутке проскакивала искра. Во время существования искры цепь замыкалась, и в стержне возникали электромагнитные колебания — вибратор излучал электромагнитные волны.

Герц регистрировал эти волны с помощью *приёмного вибратора* — проводника с шариками на концах разрядного промежутка (рис. 4). Приёмный вибратор находился поодаль, на некотором расстоянии от излучающего вибратора.

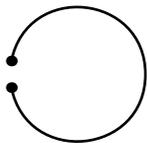


Рис. 4. Приёмный вибратор Герца

Переменное электрическое поле электромагнитной волны возбуждало в приёмном вибраторе переменный ток. Если частота этого тока совпадала с собственной частотой приёмного вибратора, то возникал резонанс, и в разрядном промежутке проскакивала искра!

Наличие этой искры, появляющейся на концах совершенно изолированного проводника, явилось ярким свидетельством существования электромагнитных волн.

### Свойства электромагнитных волн

Для излучения электромагнитных волн заряд не обязательно должен совершать колебательное движение; главное — чтобы у заряда было ускорение. *Любой заряд, движущийся с ускорением, является источником электромагнитных волн.* При этом излучение будет тем интенсивнее, чем больше модуль ускорения заряда.

Так, при равномерном движении по окружности (скажем, в магнитном поле) заряд имеет центростремительное ускорение и, стало быть, излучает электромагнитные волны. Быстрые электроны в газоразрядных трубках, налетая на стенки, тормозятся с очень большим по модулю ускорением; поэтому вблизи стенок регистрируется рентгеновское излучение высокой энергии (так называемое *тормозное излучение*).

Электромагнитные волны оказались **поперечными** — колебания векторов напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Рассмотрим, например, излучение заряда, совершающего гармонические колебания с частотой  $\nu$  вдоль оси  $Y$  вокруг начала координат. Во все стороны от него бегут электромагнитные волны — в частности, вдоль оси  $X$ . На рис. 5 показана структура излучаемой электромагнитной волны на большом расстоянии от заряда в фиксированный момент времени.

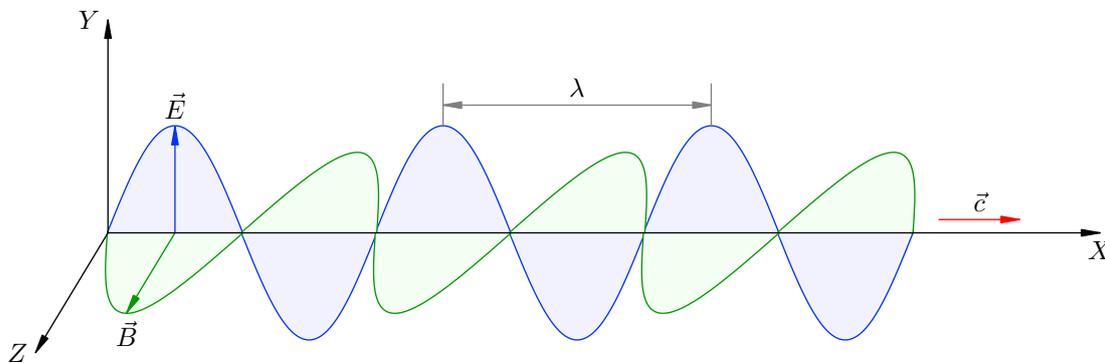


Рис. 5. Синусоидальная электромагнитная волна

Скорость волны  $\vec{c}$  направлена вдоль оси  $X$ . Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в каждой точке оси  $X$  совершают синусоидальные колебания вдоль осей  $Y$  и  $Z$  соответственно, меняясь при этом синфазно.

Кратчайший поворот вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$  всегда совершается против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора  $\vec{c}$ .

В любой фиксированный момент времени распределение вдоль оси  $X$  значений модуля векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  имеет вид двух синфазных синусоид, расположенных перпендикулярно друг другу в плоскостях  $XY$  и  $XZ$  соответственно. *Длина волны*  $\lambda$  — это расстояние между двумя ближайшими точками оси  $X$ , в которых колебания значений поля происходят в одинаковой фазе (в частности — между двумя ближайшими максимумами поля, как на рис. 5).

Частота, с которой меняются значения  $E$  и  $B$  в данной точке пространства, называется *частотой электромагнитной волны*; она совпадает с частотой  $\nu$  колебаний излучающего заряда. Длина электромагнитной волны  $\lambda$ , её частота  $\nu$  и скорость распространения  $c$  связаны стандартным для всех волн соотношением:

$$c = \lambda\nu. \quad (2)$$

Эксперименты показали, что электромагнитным волнам присущи те же основные свойства, что и другим видам волновых процессов.

1. *Отражение волн.* Электромагнитные волны отражаются от металлического листа — это было обнаружено ещё Герцем. Угол отражения при этом равен углу падения.
2. *Поглощение волн.* Электромагнитные волны частично поглощаются при прохождении сквозь диэлектрик.
3. *Преломление волн.* Электромагнитные волны меняют направление распространения при переходе из воздуха в диэлектрик (и вообще на границе двух различных диэлектриков).
4. *Интерференция волн.* Герц наблюдал интерференцию двух волн: первая приходила к приёмному вибратору непосредственно от излучающего вибратора, вторая — после предварительного отражения от металлического листа.

Меняя положение приёмного вибратора и фиксируя положения интерференционных максимумов, Герц измерил длину волны  $\lambda$ . Частота  $\nu$  собственных колебаний в приёмном вибраторе была Герцу известна. По формуле (2) Герц вычислил скорость распространения электромагнитных волн и получил приближённо  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. Именно такой результат предсказывала теория, построенная Максвеллом!

5. *Дифракция волн.* Электромагнитные волны огибают препятствия, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Например, радиоволны, длина волны которых составляет несколько десятков или сотен метров, огибают дома или горы, находящиеся на пути их распространения.

## Плотность потока излучения

Электромагнитные волны переносят энергию из одних участков пространства в другие. Перенос энергии осуществляется вдоль *лучей* — воображаемых линий, указывающих направление распространения волны<sup>3</sup>.

Важнейшей энергетической характеристикой электромагнитных волн служит плотность потока излучения.

---

<sup>3</sup>Мы не даём строгого определения понятия луча и надеемся на ваше интуитивное понимание, которого пока будет вполне достаточно.

Представим себе площадку площадью  $S$ , расположенную перпендикулярно лучам. Допустим, что за время  $t$  волна переносит через эту площадку энергию  $W$ . Тогда *плотность потока излучения*  $I$  определяется формулой:

$$I = \frac{W}{St}. \quad (3)$$

Иначе говоря, плотность потока излучения — это энергия, переносимая через единичную площадку (перпендикулярную лучам) в единицу времени; или, что то же самое — это мощность излучения, переносимая через единичную площадку. Единицей измерения плотности потока излучения служит Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность потока излучения связана простым соотношением с плотностью энергии электромагнитного поля.

Фиксируем площадку  $S$ , перпендикулярную лучам, и небольшой промежуток времени  $t$ . Сквозь площадку пройдёт энергия:

$$W = ISt. \quad (4)$$

Эта энергия будет сосредоточена в цилиндре с площадью основания  $S$  и высотой  $ct$  (рис. 6), где  $c$  — скорость электромагнитной волны.

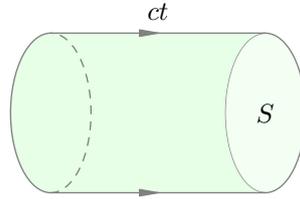


Рис. 6. К выводу формулы (6)

Объём данного цилиндра равен:  $V = Sct$ . Поэтому если  $w$  — плотность энергии электромагнитного поля, то для энергии  $W$  получим также:

$$W = wV = wSct. \quad (5)$$

Приравнивая правые части формул (4) и (5) и сокращая на  $St$ , получим соотношение:

$$I = wc. \quad (6)$$

Плотность потока излучения характеризует, в частности, степень воздействия электромагнитного излучения на его приёмники; когда говорят об *интенсивности* электромагнитных волн, имеют в виду именно плотность потока излучения.

Интересным является вопрос о том, как интенсивность излучения зависит от его частоты.

Пусть электромагнитная волна излучается зарядом, совершающим гармонические колебания вдоль оси  $X$  по закону  $x = x_0 \sin \omega t$ . Циклическая частота  $\omega$  колебаний заряда будет в то же время циклической частотой излучаемой электромагнитной волны.

Для скорости и ускорения заряда имеем:  $v = \dot{x} = x_0 \omega \cos \omega t$  и  $a = \dot{v} = -x_0 \omega^2 \sin \omega t$ . Как видим,  $a \sim \omega^2$ . Напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля в электромагнитной волне пропорциональны ускорению заряда:  $E \sim a$  и  $B \sim a$ . Стало быть,  $E \sim \omega^2$  и  $B \sim \omega^2$ .

Плотность энергии электромагнитного поля есть сумма плотности энергии электрического поля и плотности энергии магнитного поля:  $w = w_{\text{эл}} + w_{\text{магн}}$ . Плотность энергии электрического поля, как мы знаем, пропорциональна квадрату напряжённости поля:  $w_{\text{эл}} \sim E^2$ . Аналогично можно показать, что  $w_{\text{магн}} \sim B^2$ . Следовательно,  $w_{\text{эл}} \sim \omega^4$  и  $w_{\text{магн}} \sim \omega^4$ , так что  $w \sim \omega^4$ .

Согласно формуле (6) плотность потока излучения пропорциональна плотности энергии:  $I \sim w$ . Поэтому  $I \sim \omega^4$ . Мы получили важный результат: *интенсивность электромагнитного излучения пропорциональна четвёртой степени его частоты*.

Другой важный результат заключается в том, что *интенсивность излучения убывает с увеличением расстояния до источника*. Это понятно: ведь источник излучает в разных направлениях, и по мере удаления от источника излучённая энергия распределяется по всё большей и большей площади.

Количественную зависимость плотности потока излучения от расстояния до источника легко получить для так называемого точечного источника излучения.

*Точечный источник излучения* — это источник, размерами которого в условиях данной ситуации можно пренебречь. Кроме того, считается, что точечный источник одинаково излучает во всех направлениях.

Конечно, точечный источник является идеализацией, но в некоторых задачах эта идеализация отлично работает. Например, при исследовании излучения звёзд их вполне можно считать точечными источниками — ведь расстояния до звёзд настолько громадны, что их собственные размеры можно не принимать во внимание.

На расстоянии  $r$  от источника излучённая энергия равномерно распределяется по поверхности сферы радиуса  $r$ . Площадь сферы, напомним,  $S = 4\pi r^2$ . Если мощность излучения нашего источника равна  $P$ , то за время  $t$  через поверхность сферы проходит энергия  $W = Pt$ . С помощью формулы (3) получаем тогда:

$$I = \frac{Pt}{4\pi r^2 t} = \frac{P}{4\pi r^2}.$$

Таким образом, *интенсивность излучения точечного источника обратно пропорциональна расстоянию до него*.

## Виды электромагнитных излучений

Спектр электромагнитных волн необычайно широк: длина волны может измеряться тысячами километров, а может быть меньше пикометра. Тем не менее, весь этот спектр можно разделить на несколько характерных диапазонов длин волн; внутри каждого диапазона электромагнитные волны обладают более-менее схожими свойствами и способами излучения.

Мы рассмотрим эти диапазоны в порядке убывания длины волны. Диапазоны плавно переходят друг в друга, чёткой границы между ними нет. Поэтому граничные значения длин волн порой весьма условны.

### 1. Радиоволны ( $\lambda > 1$ мм).

Источниками радиоволн служат колебания зарядов в проводах, антеннах, колебательных контурах. Радиоволны излучаются также во время гроз.

- *Сверхдлинные волны* ( $\lambda > 10$  км). Хорошо распространяются в воде, поэтому используются для связи с подводными лодками.
- *Длинные волны* ( $1$  км  $< \lambda < 10$  км). Используются в радиосвязи, радиовещании, радионавигации.
- *Средние волны* ( $100$  м  $< \lambda < 1$  км). Радиовещание. Радиосвязь на расстоянии не более 1500 км.
- *Короткие волны* ( $10$  м  $< \lambda < 100$  м). Радиовещание. Хорошо отражаются от ионосферы; в результате многократных отражений от ионосферы и от поверхности Земли могут распространяться вокруг земного шара. Поэтому на коротких волнах можно ловить радиостанции других стран.

- *Метровые волны* ( $1 \text{ м} < \lambda < 10 \text{ м}$ ). Местное радиовещание в УКВ-диапазоне. Например, длина волны радиостанции «Эхо Москвы» составляет 4 м. Используются также в телевидении (федеральные каналы); так, длина волны телеканала «Россия 1» равна примерно 5 м.
- *Дециметровые волны* ( $10 \text{ см} < \lambda < 1 \text{ м}$ ). Телевидение (дециметровые каналы). Например, длина волны телеканала «Animal Planet» приблизительно равна 42 см. Это также диапазон мобильной связи; так, стандарт GSM 1800 использует радиоволны с частотой примерно 1800 МГц, т. е. с длиной волны около 17 см. Есть ещё одно хорошо известное вам применение дециметровых волн — это микроволновые печи. Стандартная частота микроволновой печи равна 2450 МГц (это частота, на которой происходит резонансное поглощение электромагнитного излучения молекулами воды). Она отвечает длине волны примерно 12 см. Наконец, в технологиях беспроводной связи Wi-Fi и Bluetooth используется такая же длина волны — 12 см (частота 2400 МГц).
- *Сантиметровые волны* ( $1 \text{ см} < \lambda < 10 \text{ см}$ ). Это — область радиолокации и спутниковых телеканалов. Например, канал НТВ+ ведёт своё телевидение на длинах волн около 2 см.
- *Миллиметровые волны* ( $1 \text{ мм} < \lambda < 1 \text{ см}$ ). Радиолокация, космические линии связи. Здесь мы подходим к длинноволновой границе инфракрасного излучения.

## 2. Инфракрасное излучение ( $780 \text{ нм} < \lambda < 1 \text{ мм}$ ).

Испускается молекулами и атомами нагретых тел. Инфракрасное излучение называется ещё *тепловым* — когда оно попадает на наше тело, мы чувствуем тепло. Человеческим глазом инфракрасное излучение не воспринимается<sup>4</sup>.

Мощнейшим источником инфракрасного излучения служит Солнце. Лампы накаливания излучают наибольшее количество энергии (до 80%) в как раз в инфракрасной области спектра.

Инфракрасное излучение имеет широкую область применения: инфракрасные обогреватели, пульты дистанционного управления, приборы ночного видения, сушка лакокрасочных покрытий и многое другое.

При повышении температуры тела длина волны инфракрасного излучения уменьшается, смещаясь в сторону видимого света. Засунув гвоздь в пламя горелки, мы можем наблюдать это воочию: в какой-то момент гвоздь «раскаляется докрасна», начиная излучать в видимом диапазоне.

## 3. Видимый свет ( $380 \text{ нм} < \lambda < 780 \text{ нм}$ ).

Излучение в этом промежутке длин волн воспринимается человеческим глазом.

Диапазон видимого света можно разделить на семь интервалов — так называемые *спектральные цвета*.

- Красный: 625 нм — 780 нм;
- Оранжевый: 590 нм — 625 нм;
- Жёлтый: 565 нм — 590 нм;
- Зелёный: 500 нм — 565 нм;
- Голубой: 485 нм — 500 нм;

<sup>4</sup>Некоторые змеи видят в инфракрасном диапазоне.

- Синий: 440 нм — 485 нм;
- Фиолетовый: 380 нм — 440 нм.

Глаз имеет максимальную чувствительность к свету в зелёной части спектра. Вот почему школьные доски согласно ГОСТу должны быть зелёными: глядя на них, глаз испытывает меньшее напряжение.

#### 4. Ультрафиолетовое излучение ( $10 \text{ нм} < \lambda < 380 \text{ нм}$ ).

Главным источником ультрафиолетового излучения является Солнце. Именно ультрафиолетовое излучение приводит к появлению загара. Человеческим глазом оно уже не воспринимается<sup>5</sup>.

В небольших дозах ультрафиолетовое излучение полезно для человека: оно повышает иммунитет, улучшает обмен веществ, имеет целый ряд других целебных воздействий и потому применяется в физиотерапии.

Ультрафиолетовое излучение обладает бактерицидными свойствами. Например, в больницах для дезинфекции операционных в них включаются специальные ультрафиолетовые лампы.

Очень опасным является воздействие УФ излучения на сетчатку глаза — при больших дозах ультрафиолета можно получить ожог сетчатки. Поэтому для защиты глаз (высоко в горах, например) нужно надевать очки, стёкла которых поглощают ультрафиолет.

#### 5. Рентгеновское излучение ( $5 \text{ пм} < \lambda < 10 \text{ нм}$ ).

Возникает в результате торможения быстрых электронов у анода и стенок газоразрядных трубок (*тормозное излучение*), а также при некоторых переходах электронов внутри атомов с одного уровня на другой (*характеристическое излучение*).

Рентгеновское излучение легко проникает сквозь мягкие ткани человеческого тела, но поглощается кальцием, входящим в состав костей. Это даёт возможность хорошо известные вам рентгеновские снимки.

В аэропортах вы наверняка видели действие *рентгенотелевизионных интроскопов* — эти приборы просвечивают рентгеновскими лучами ручную кладь и багаж.

Длина волны рентгеновского излучения сравнима с размерами атомов и межатомных расстояний в кристаллах; поэтому кристаллы являются естественными дифракционными решётками для рентгеновских лучей. Наблюдая дифракционные картины, получаемые при прохождении рентгеновских лучей сквозь различные кристаллы, можно изучать порядок расположения атомов в кристаллических решётках и сложных молекулах.

Так, именно с помощью *рентгеноструктурного анализа* было определено устройство ряда сложных органических молекул — например, ДНК и гемоглобина.

В больших дозах рентгеновское излучение опасно для человека — оно может вызывать раковые заболевания и лучевую болезнь.

#### 6. Гамма-излучение ( $\lambda < 5 \text{ пм}$ ).

Это излучение наиболее высокой энергии. Его проникающая способность намного выше, чем у рентгеновских лучей.

Гамма-излучение возникает при переходах атомных ядер из одного состояния в другое, а также при некоторых ядерных реакциях.

---

<sup>5</sup>Некоторые насекомые и птицы способны видеть в ультрафиолете. Например, пчёлы с помощью своего ультрафиолетового зрения находят нектар на цветах.

Источниками гамма-лучей могут быть заряженные частицы, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света — в случае, если траектории таких частиц искривлены магнитным полем (так называемое *синхротронное излучение*).

В больших дозах гамма-излучение очень опасно для человека: оно вызывает лучевую болезнь и онкологические заболевания. Но в малых дозах оно может подавлять рост раковых опухолей и потому применяется в *лучевой терапии*.

Бактерицидное действие гамма-излучения используется в сельском хозяйстве (гамма-стерилизация сельхозпродукции перед длительным хранением), в пищевой промышленности (консервирование продуктов), а также в медицине (стерилизация материалов).