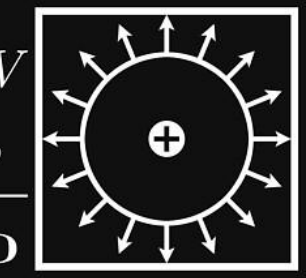
Уравнения Максвелла

$$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_{\Omega}\rho\,\mathrm{d}V$$

$$\nabla\cdot\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$



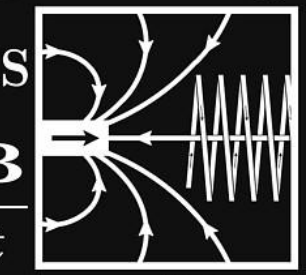
$$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S} = 0$$

$$\nabla\cdot\mathbf{B} = 0$$

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{l} = -\frac{d}{dt}\iint_{\Sigma}\mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S}$$

Feynman

$$\nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$$



$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\mathbf{l} = \iint_{\Sigma}\left(\mu_0\mathbf{J} + \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)\cdot\mathrm{d}\mathbf{S}$$

$$\nabla\times\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{J} + \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}$$

Литература: Касьянов, Стафеев, Савельев m2, Википедия, youtube

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

РЕКОМЕНДОВАНО МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

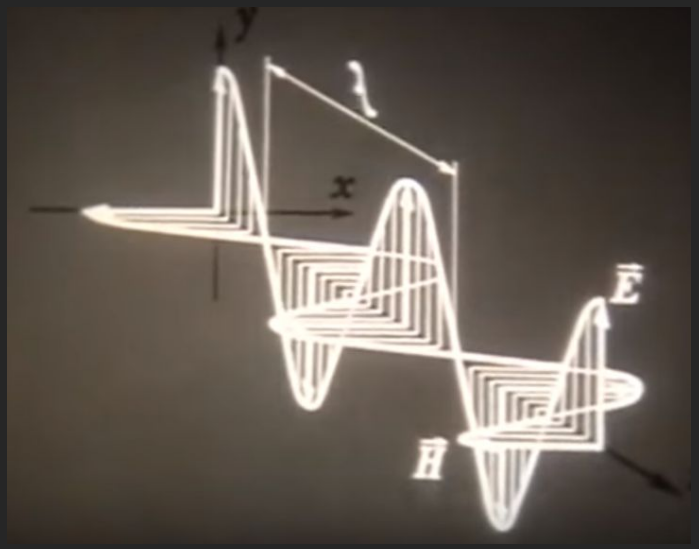
$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial s} \right) d\vec{s}$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{t} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}$$

$$\oint_L \vec{D} d\vec{s} = \int_V \rho dv$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$



Уравне́ния Ма́ксвелла

- Уравне́ния Ма́ксвелла — система уравнений в дифференциальной или интегральной форме, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах. Вместе с выражением для силы Лоренца, задающим меру воздействия электромагнитного поля на заряженные частицы, эти уравнения образуют полную систему уравнений классической электродинамики, называемую иногда уравнениями Максвелла — Лоренца.

- Уравнения, сформулированные Джеймсом Клерком Максвеллом на основе накопленных к середине XIX века экспериментальных результатов, сыграли ключевую роль в развитии представлений теоретической физики и оказали сильное, зачастую решающее влияние не только на все области физики, непосредственно связанные с электромагнетизмом, но и на многие возникшие впоследствии фундаментальные теории, предмет которых не сводился к электромагнетизму (одним из ярчайших примеров здесь может служить специальная теория относительности).

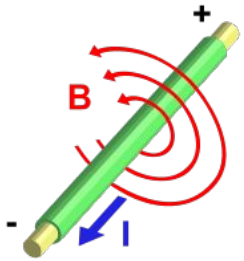
«Динамическая теория электромагнитного поля»

- Настоящая современная физика началась в 1864 г. со статьи Джеймса Клерка Максвелла «Динамическая теория электромагнитного поля»..
- Эти уравнения — уравнения Максвелла — изменили многое. Они превратили пространство из хранилища в материальную среду — нечто вроде космического океана. Перестав быть просто вакуумом, пространство наполнилось потоками энергии, которые управляют миром.
- Уравнения Максвелла дали нам совершенно новое понимание того, что представляет из себя свет, и предсказали существование неожиданных форм излучения, которые являются новыми видами «света». Они прямо привели к изобретению радио и вдохновили на создание нескольких других важных технологий.

Фрэнк Вильчек
«Красота физики».

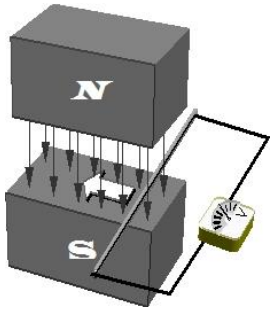
Знания об электромагнетизме в XIX веке

- Уравнения, сформулированные Джеймсом Клерком Максвеллом, возникли на основе ряда важных экспериментальных открытий, которые были сделаны в начале XIX века. В 1820 году Ганс Христиан Эрстед обнаружил, что пропускаемый через провод гальванический ток заставляет отклоняться магнитную стрелку компаса. Это открытие привлекло широкое внимание учёных того времени. В том же 1820 году Био и Савар экспериментально нашли выражение[2] для порождаемой током магнитной индукции (закон Био — Савара), а Андре Мари Ампер обнаружил также, что взаимодействие на расстоянии возникает между двумя проводниками, по которым пропускается ток. Ампер ввёл термин «электродинамический» и выдвинул гипотезу, что природный магнетизм связан с существованием в магните круговых токов.



Электрический ток создаёт магнитную индукцию (закон Ампера)

- Влияние тока на магнит, обнаруженное Эрстедом, привело Майкла Фарадея к идее о том, что должно существовать обратное влияние магнита на токи. После длительных экспериментов, в 1831 году, Фарадей открыл, что перемещающийся возле проводника магнит порождает в проводнике электрический ток. Это явление было названо электромагнитной индукцией. Фарадей ввёл понятие «поля сил» — некоторой среды, находящейся между зарядами и токами. Его рассуждения носили качественный характер, однако они оказали огромное влияние на исследования Максвелла.

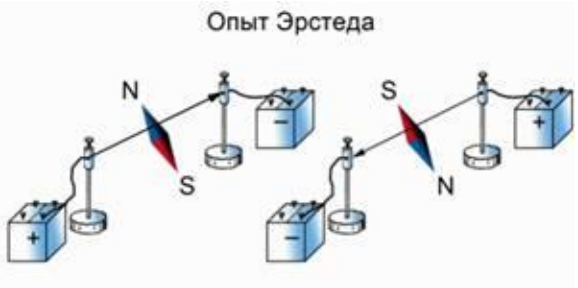


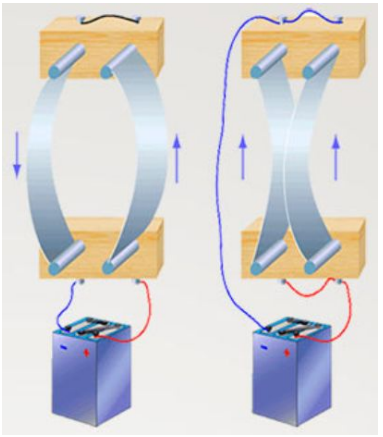
Переменный поток магнитного поля создаёт электрическое поле (закон Фарадея)

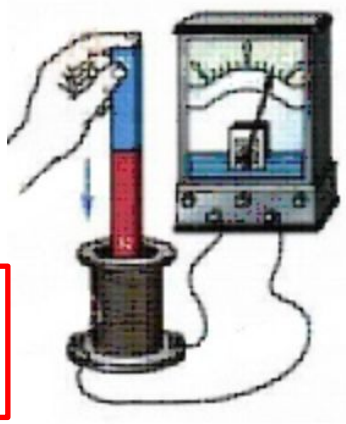
- После открытий Фарадея стало ясно, что старые модели электромагнетизма (Ампер, Пуассон и др.) неполны. Вскоре появилась теория Вебера, основанная на дальнодействии. Однако к этому моменту вся физика, кроме теории тяготения, имела дело только с близкодействием (оптика, термодинамика, механика сплошных сред и др.). Гаусс, Риман и ряд других учёных высказывали догадки, что

Предпосылки написания уравнений

- Уравнения, сформулированные Джеймсом Клерком Максвеллом, возникли на основе ряда важных экспериментальных открытий, которые были сделаны в начале XIX века.
- В 1820 году **Ганс Христиан Эрстед** обнаружил, что пропускаемый через провод гальванический ток заставляет отклоняться магнитную стрелку компаса.
- **Андре Мари Ампер** обнаружил также, что взаимодействие на расстоянии возникает между двумя проводниками, по которым пропускается ток.
- Влияние тока на магнит привело **Майкла Фарадея** к идее о том, что должно существовать обратное влияние магнита на токи. В 1831 году, Фарадей открыл, что перемещающийся возле проводника магнит порождает в проводнике электрический ток. Это явление было названо *электромагнитной индукцией.*



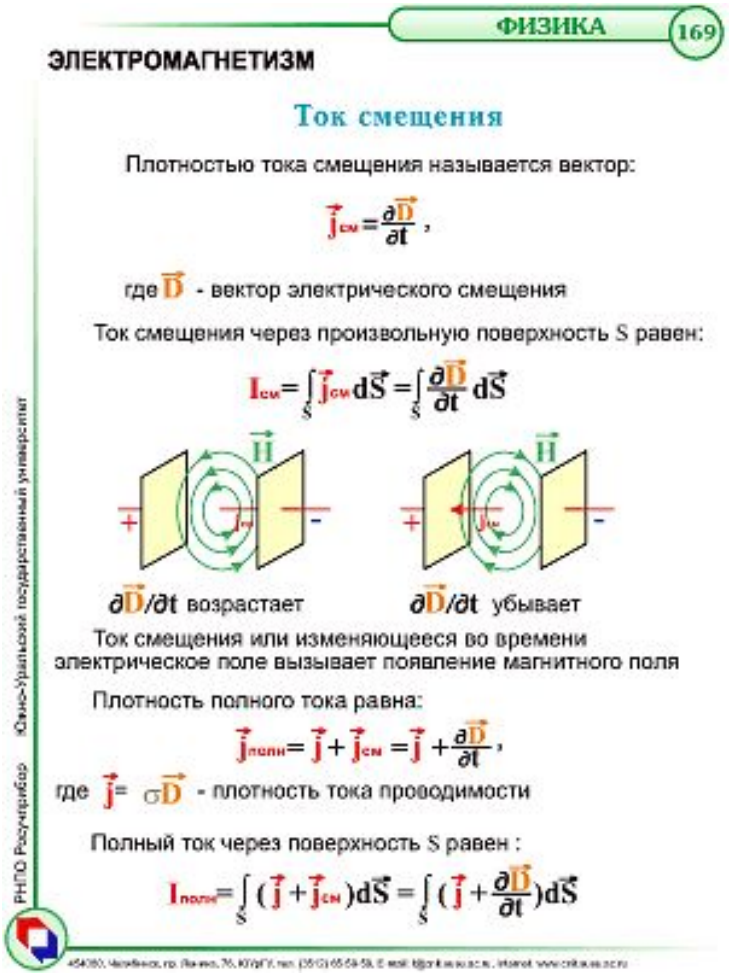




Английский ученый ***Джеймс Максвелл*** в 1864 г. теоретически предсказал существование электромагнитных волн.

Ток смещения

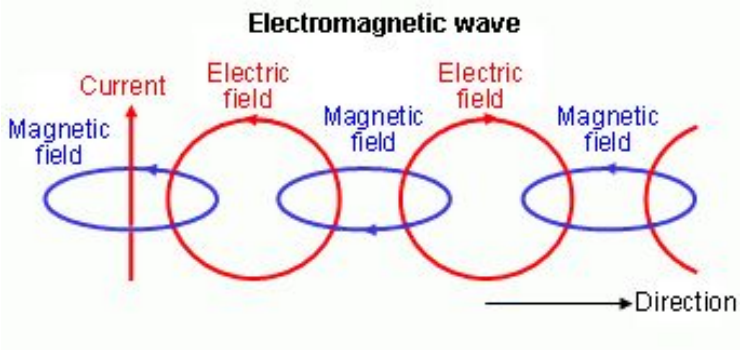
- Анализируя известные эксперименты, Максвелл получил систему уравнений для электрического и магнитного полей. В 1855 году в своей самой первой статье «О фарадеевых силовых линиях» («On Faraday's Lines of Force») он впервые записал в дифференциальной форме систему уравнений электродинамики, но не вводя ещё ток смещения. Такая система уравнений описывала все известные к тому времени экспериментальные данные, но не позволяла связать между собой заряды и токи и предсказать электромагнитные волны.
- Впервые **ток смещения** был введён Максвеллом в работе «О физических силовых линиях» («On Physical Lines of Force»), состоящей из четырёх частей и опубликованной в 1861—1862 годах. Обобщая закон Ампера, Максвелл вводит ток смещения, вероятно, чтобы связать токи и заряды уравнением непрерывности, которое уже было известно для других физических величин. В этой статье Максвелл впервые сформулировал понятие электромагнитного поля как физической реальности, имеющей собственную энергию и конечное время распространения, определяющее запаздывающий характер электромагнитного взаимодействия.
- *Ток смещения*, — величина, прямо пропорциональная скорости *изменения* электрической индукции. Существование тока смещения следует из закона

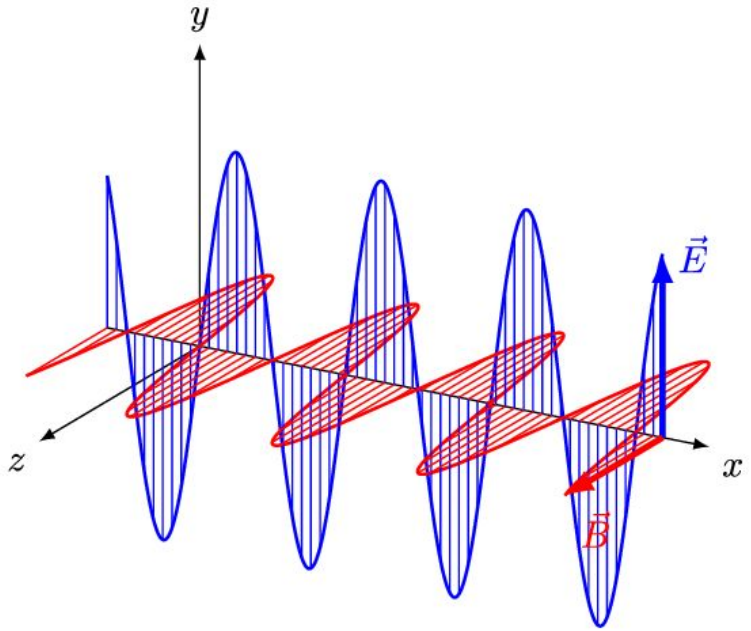


Строго говоря, ток смещения не является электрическим током, но измеряется в тех же единицах, что и электрический ток.

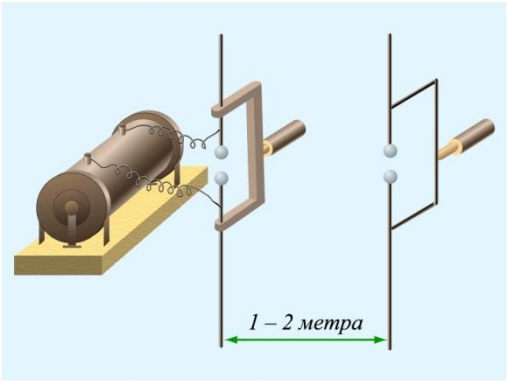
Электромагнитная волна

- Оказалось, что не только ток, но и изменяющееся со временем электрическое поле (ток смещения) порождает магнитное поле.
- В свою очередь, в силу закона Фарадея, изменяющееся магнитное поле снова порождает электрическое. В результате, в пустом пространстве может распространяться электромагнитная волна.
- Из уравнений Максвелла следовало, что её скорость равна скорости света, поэтому Максвелл сделал вывод об электромагнитной природе света.
- Самое важное предсказание теории Максвелла о том, что электрические и магнитные поля могут давать жизнь друг другу и распространяться как самообновляющиеся волны

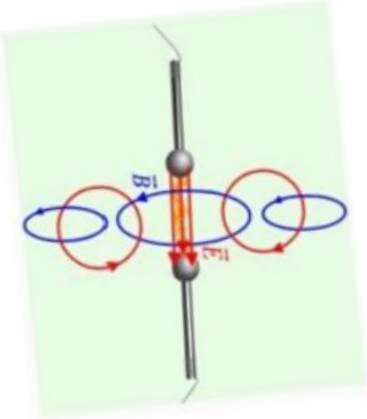


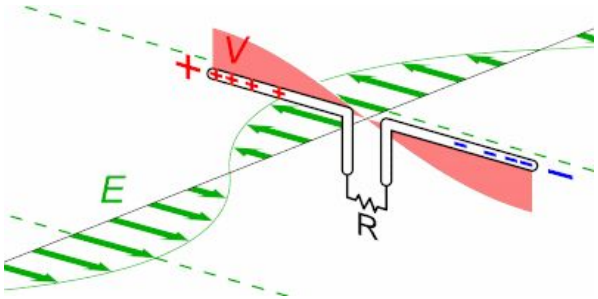


Опыты Герца – через несколько десятилетий после Максвелла (1887 год)



Опыты Герца





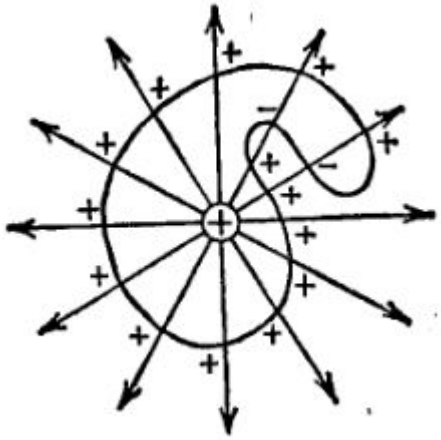
С 1885 по 1889 годы Герц работал профессором физики технического университета в Карлсруэ. Именно в эти годы он провёл свои знаменитые опыты по распространению электрической силы, доказавшие реальность электромагнитных волн. Аппаратура, которой пользовался Герц, может показаться теперь более чем простой, но тем замечательнее полученные им результаты. Источниками электромагнитного излучения у него были искры в разрядниках. Электромагнитные волны от разрядников вызывали искровые разряды между шариками в «приёмниках» — расположенных в нескольких метрах контурах, настроенных в резонанс. Герцу удалось не только обнаружить волны, в том числе, и стоячие, но и исследовать скорость их распространения, отражение, преломление и даже поляризацию. Все это очень напоминало оптику, с тем только (весьма существенным!) отличием, что длины волн были почти в миллион раз больше (порядка 3 метров).

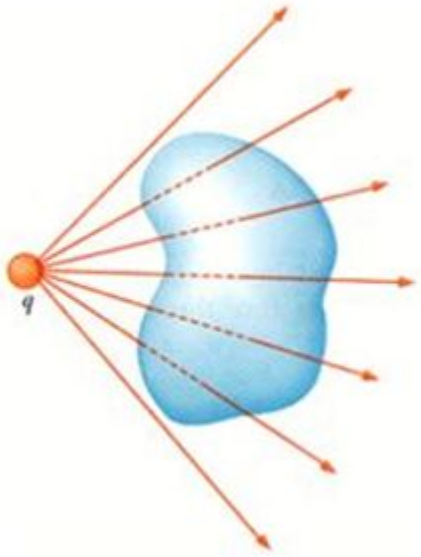
Чтобы улавливать излучаемые волны, Герц придумал простейший резонатор — проволочное незамкнутое кольцо или прямоугольную незамкнутую рамку с такими же, как у «передатчика» латунными шариками на концах и регулируемым искровым промежутком. В результате проведённых опытов Герц обнаружил, что если в генераторе будут происходить высокочастотные колебания (в его разрядном промежутке проскакивает искра), то в разрядном промежутке резонатора, удалённом от генератора даже на 3 м, тоже будут проскакивать маленькие искры.

Первое уравнение Максвелла - Теорема Гаусса

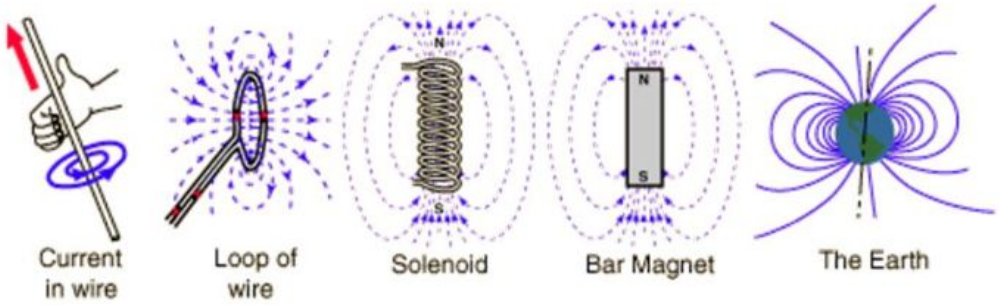
Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность, пропорционален сумме зарядов, находящейся внутри нее

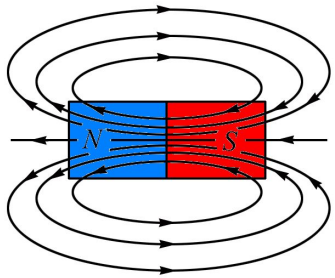
$$\oint_{\mathbf{S}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = 4\pi Q$$



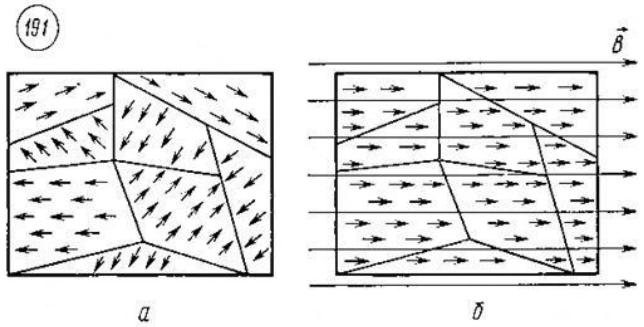


Магниты и магнитное поле



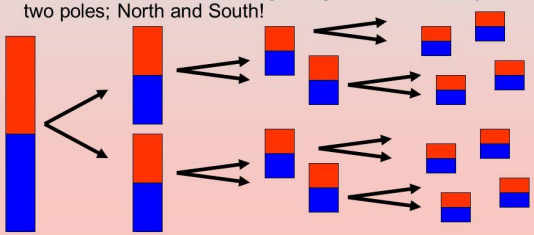


Доменная структура магнита



What happens when you break a magnet?

- A magnet **always** has two poles; North and South.
- If you break a magnet in half, you get TWO magnets, each having two poles; North and South.
- No matter how small the magnets get there will always be two poles; North and South!



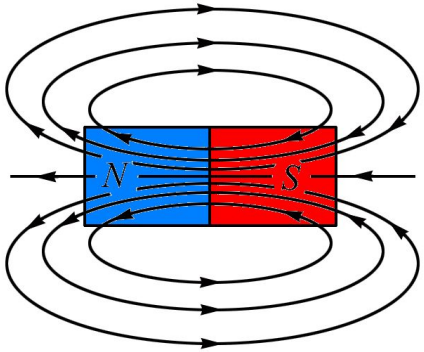
Ферромагнетизм (англ. ferromagnetism) — появление спонтанной намагниченности при температуре ниже температуры Кюри вследствие упорядочения магнитных моментов, при котором большая их часть параллельна друг другу. Вещества, в которых возникает ферромагнитное упорядочение магнитных моментов, называются ферромагнетиками.

Магни́тный моме́нт, магни́тный дипо́льный моме́нт — основная величина, характеризующая магнитные свойства вещества (источником магнетизма, согласно классической теории электромагнитных явлений, являются электрические макро- и микротоки; элементарным источником магнетизма считают замкнутый ток). Магнитными свойствами обладают элементарные частицы, атомные ядра, электронные оболочки атомов и молекул. Магнитный момент элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов и других частиц), как показала квантовая механика, обусловлен существованием у них собственного механического момента — спина.

Второе уравнение Максвелла - Закон Гаусса для магнитного поля

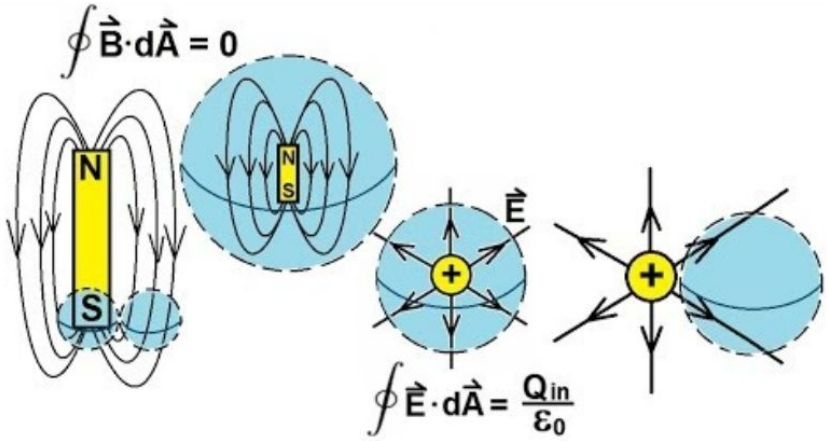
$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

Поток магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю (магнитные заряды не обнаружены[29]).



Поток вектора **магнитной индукции** через любую замкнутую поверхность равен нулю: Это эквивалентно тому, что в природе не существует «**магнитных** зарядов» (монополей), которые создавали бы **магнитное** поле, как электрические заряды создают электрическое поле.

Различия между электрическим и магнитным полями



В чём сходство и различие магнитного и электрического полей?

•Сходство:

Вид материи

Порождаются зарядом

•Различие :

Вокруг **неподвижных** электрических зарядов существует только **электрическое поле**,

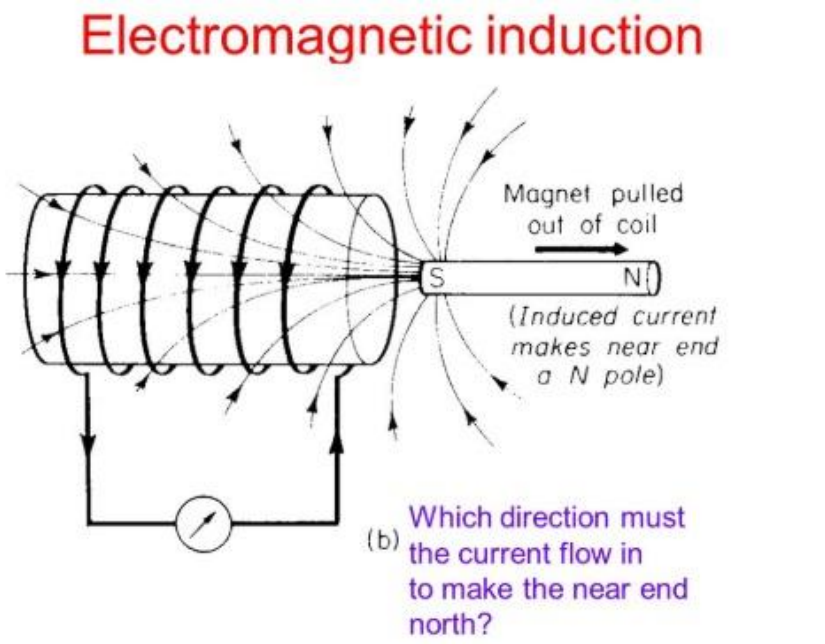
Вокруг **движущихся** электрических зарядов, создающих электрический ток, существуют и **электрическое, и магнитное** поля.

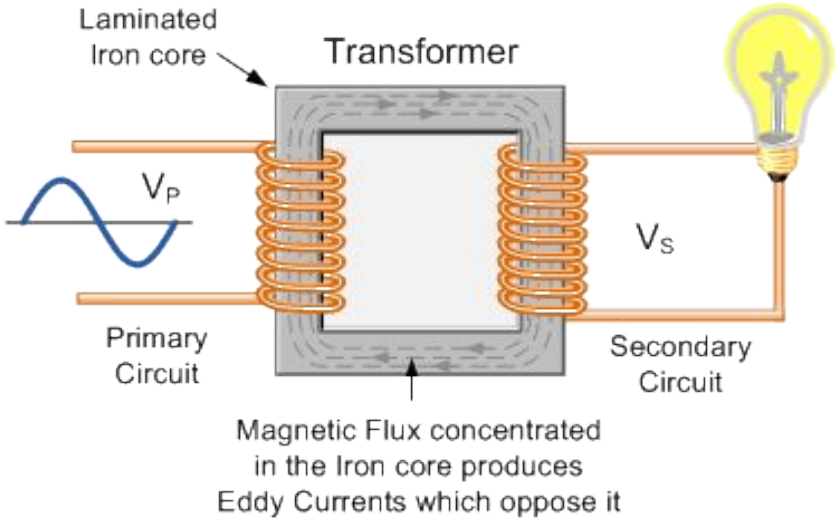
Магнитное поле, как и электрическое, является векторным. Если электрическое поле создаётся любыми заряженными телами, то магнитное поле создаётся только движущимися зарядами.

Третье уравнение Максвелла – закон индукции Фарадея

Варианты формулировки

- Изменение магнитного потока через проводящий контур ведет к возникновению электродвижущей силы
- Изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле
- Генерируемая ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

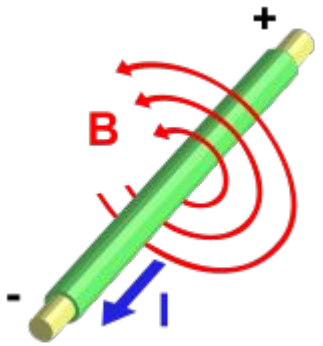




Как работает трансформатор?

Четвертое уравнение Максвелла (Теорема о циркуляции магнитного поля)

Циркуляция магнитного поля постоянных токов по всякому замкнутому контуру пропорциональна сумме сил токов, пронизывающих контур циркуляции.



$$\oint_{\rightarrow} \vec{B} \cdot \overrightarrow{dl} = \frac{4\pi}{c} \int \vec{j} \cdot \overrightarrow{ds}$$

Но такая формула не может объяснить электромагнитные волны – ведь в вакууме нет носителей зарядов

Дополнение к 4 уравнению Максвелла: Ток смещения

14.2. Ток смещения.

Если замкнуть ключ (рис. 14.1), то лампа при ***постоянном токе*** – гореть не будет:

емкость C – разрыв в цепи *постоянного* тока.

Но вот в моменты включения лампа будет вспыхивать.

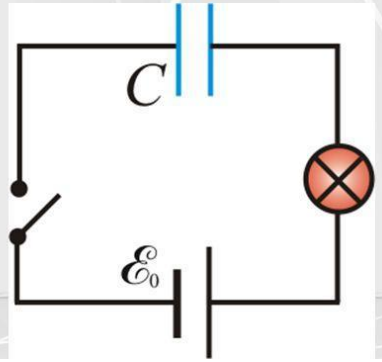
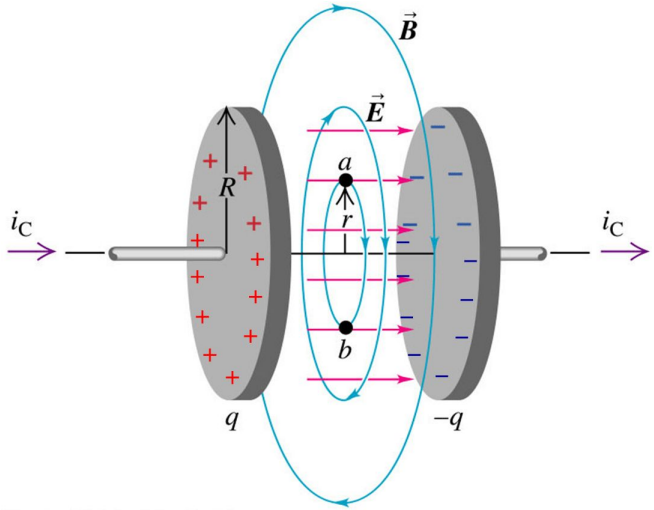


Рис. 14.1

Током смещения называется поток вектора быстроты изменения электрического поля через некоторую поверхность.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле



Между обкладками тока носителей заряда нет, в магнитная индукция такая же, как будто течет обычный ток.

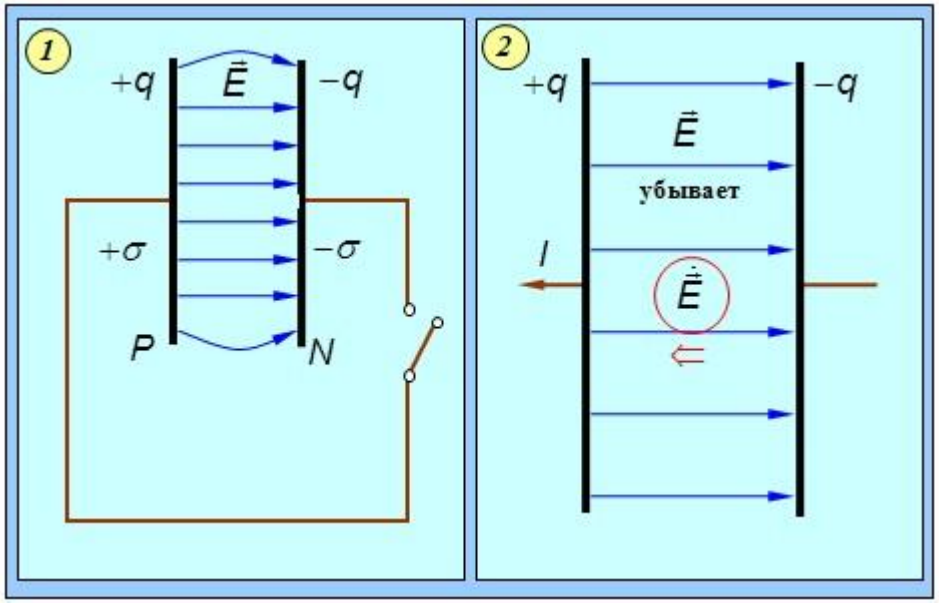
Существование тока смещения следует из закона сохранения электрического заряда.

Закон Ампера — Максвелла (синоним: **обобщенная теорема Ампера о циркуляции**) — закон электромагнетизма, исторически завершивший создание замкнутой и непротиворечивой классической электродинамики.

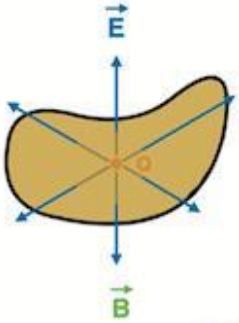
Открыт Максвеллом, обобщившим теорему Ампера о циркуляции магнитного поля на общий случай, включающий переменные несоленоидальные (незамкнутые) токи и меняющиеся во времени поля.

Формулировка этого закона составляет четвёртое уравнение Максвелла:

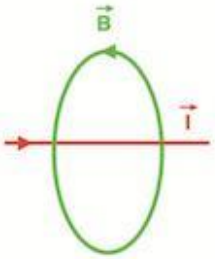
$$\oint\limits_{\partial S} \mathbf{B} \cdot \mathbf{dl} = \int\limits_{S} \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{dS}$$



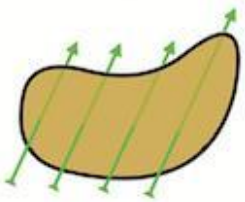
УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА



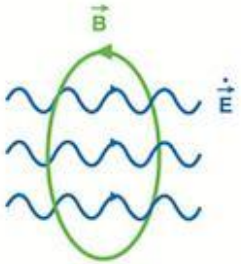
Закон Гаусса для напряженности электростатического поля



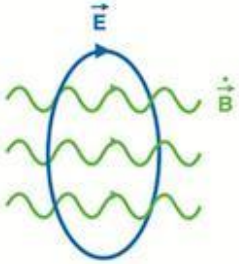
Закон Ампера



Закон Гаусса для магнитной индукции



Закон Максвелла



Закон Фарадея

Настоящая современная физика началась в 1864 г. со статьи Джеймса Клерка Максвелла «Динамическая теория электромагнитного поля».. Эти уравнения — уравнения Максвелла — изменили многое. Они превратили пространство из хранилища в материальную среду — нечто вроде космического океана. Перестав быть просто вакуумом, пространство наполнилось потоками энергии, которые управляют миром. Уравнения Максвелла дали нам совершенно новое понимание того, что представляет из себя свет, и предсказали существование неожиданных форм излучения, которые являются новыми видами «света». Они прямо привели к изобретению радио и вдохновили на создание нескольких других важных технологий.

Фрэнк Вильчек
«Красота физики».

Уравнения в дифференциальной форме

Название	СГС	Примерное словесное выражение
Закон Гаусса	$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$	Электрический заряд является источником электрической индукции.
Закон Гаусса для магнитного поля	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Магнитные заряды не обнаружены.[29]
Закон индукции Фарадея	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле.[29]
Теорема о циркуляции магнитного поля	$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	Электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле

закон Кулона

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\varrho,$$

закон Ампера

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{J},$$

закон Фарадея

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0,$$

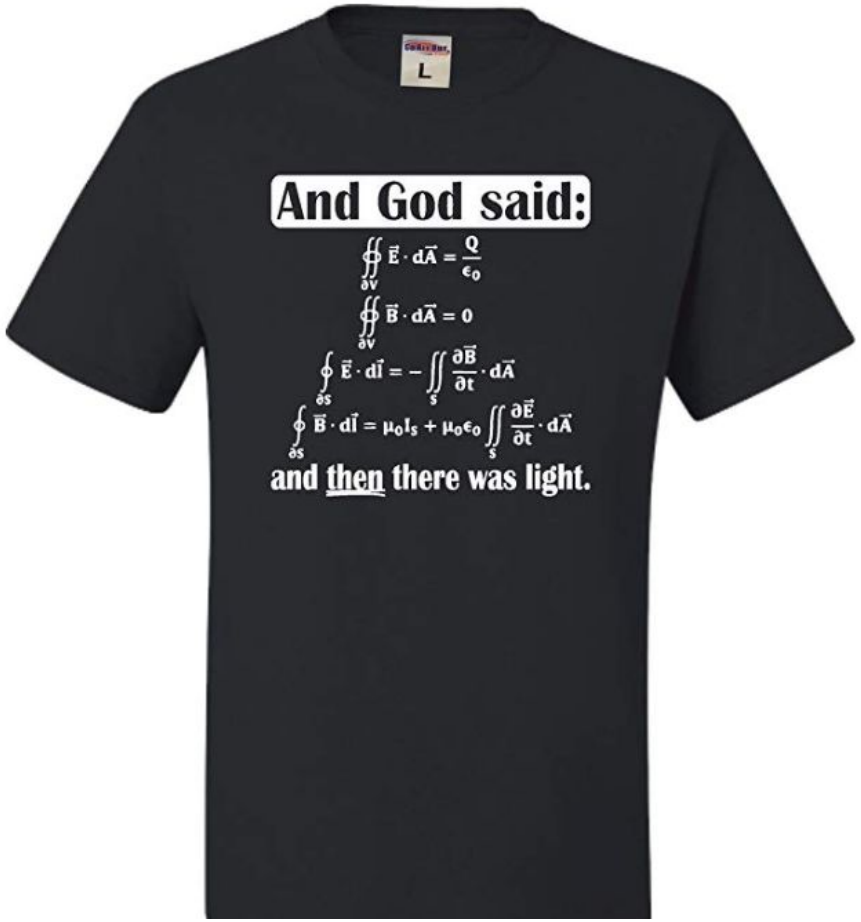
отсутствие свободных магнитных зарядов

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Уравнения в интегральной форме

Название	СГС	Примерное словесное выражение
Закон Гаусса	$\oint\limits_{\mathbf{s}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = 4\pi Q$	Поток электрической индукции через замкнутую поверхность пропорционален величине свободного заряда, находящегося в объёме, ограниченном этой поверхностью.
Закон Гаусса для магнитного поля	$\oint\limits_{\mathbf{s}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	Поток магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю (магнитные заряды не обнаружены[29]).
Закон индукции Фарадея	$\oint\limits_{\mathbf{l}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int\limits_{\mathbf{s}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$	Изменение потока магнитной индукции, проходящего через незамкнутую поверхность s, взятое с обратным знаком, пропорционально циркуляции электрического поля на замкнутом контуре l, который является границей поверхности s[29].
Теорема о циркуляции магнитного поля	$\oint\limits_{\mathbf{l}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} I + \frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int\limits_{\mathbf{s}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$	Полный электрический ток свободных зарядов и изменение потока электрической индукции через незамкнутую поверхность s пропорциональны циркуляции магнитного поля на замкнутом контуре l, который является границей поверхности s.

Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах



Maxwell's
Equations
$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \cdot D = \rho$
$\nabla \times E = -\frac{1}{\partial t} \frac{\partial B}{\partial t}$
$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$