

Магнитное поле. Линии

Темы кодификатора ЕГЭ: взаимодействие магнитов, магнитное поле проводника с током.

Магнитные свойства вещества известны людям давно. Магниты получили своё название от античного города Магнесия: в его окрестностях был распространён минерал (названный впоследствии магнитным железняком или магнетитом), куски которого притягивали железные предметы.

Взаимодействие магнитов

На двух сторонах каждого магнита расположены *северный полюс* и *южный полюс*. Два магнита притягиваются друг к другу разноимёнными полюсами и отталкиваются одноимёнными. Магниты могут действовать друг на друга даже сквозь вакуум! Всё это напоминает взаимодействие электрических зарядов, однако *взаимодействие магнитов не является электрическим*. Об этом свидетельствуют следующие опытные факты.

- Магнитная сила ослабевает при нагревании магнита. Сила же взаимодействия точечных зарядов не зависит от их температуры.
- Магнитная сила ослабевает, если трясти магнит. Ничего подобного с электрически заряженными телами не происходит.
- Положительные электрические заряды можно отделить от отрицательных (например, при электризации тел). А вот разделить полюса магнита не получается: если разрезать магнит на две части, то в месте разреза также возникают полюса, и магнит распадается на два магнита с разноимёнными полюсами на концах (ориентированных точно так же, как и полюса исходного магнита).

Таким образом, магниты *всегда* двухполюсные, они существуют только в виде *диполей*. Изолированных магнитных полюсов (так называемых *магнитных монополей* — аналогов электрического заряда) в природе не существует (во всяком случае, экспериментально они пока не обнаружены). Это, пожалуй, самая впечатляющая асимметрия между электричеством и магнетизмом.

- Как и электрически заряженные тела, магниты действуют на электрические заряды. Однако магнит действует только на *движущийся* заряд; если заряд покоится относительно магнита, то действия магнитной силы на заряд не наблюдается. Напротив, наэлектризованное тело действует на любой заряд, вне зависимости от того, покоится он или движется.

По современным представлениям теории близкого действия, взаимодействие магнитов осуществляется посредством *магнитного поля*. А именно, магнит создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует на другой магнит и вызывает видимое притяжение или отталкивание этих магнитов.

Примером магнита служит *магнитная стрелка* компаса. С помощью магнитной стрелки можно судить о наличии магнитного поля в данной области пространства, а также о направлении поля.

Наша планета Земля является гигантским магнитом. Неподалёку от северного географического полюса Земли расположен южный магнитный полюс. Поэтому северный конец стрелки компаса, поворачиваясь к южному магнитному полюсу Земли, указывает на географический север. Отсюда, собственно, и возникло название «северный полюс» магнита.

Линии магнитного поля

Электрическое поле, напомним, исследуется с помощью маленьких пробных зарядов, по действию на которые можно судить о величине и направлении поля. Аналогом пробного заряда в случае магнитного поля является маленькая магнитная стрелка.

Например, можно получить некоторое геометрическое представление о магнитном поле, если разместить в разных точках пространства очень маленькие стрелки компаса. Опыт показывает, что стрелки выстроятся вдоль определённых линий — так называемых *линий магнитного поля*. Дадим определение этого понятия в виде следующих трёх пунктов.

1. *Линии магнитного поля, или магнитные силовые линии — это направленные линии в пространстве, обладающие следующим свойством: маленькая стрелка компаса, помещённая в каждой точке такой линии, ориентируется по касательной к этой линии.*
2. *Направлением линии магнитного поля считается направление северных концов стрелок компаса, расположенных в точках данной линии.*
3. *Чем гуще идут линии, тем сильнее магнитное поле в данной области пространства.*

Роль стрелок компаса с успехом могут выполнять железные опилки: в магнитном поле маленькие опилки намагничиваются и ведут себя в точности как магнитные стрелки.

Так, насыпав железных опилок вокруг постоянного магнита, мы увидим примерно следующую картину линий магнитного поля (рис. 1).

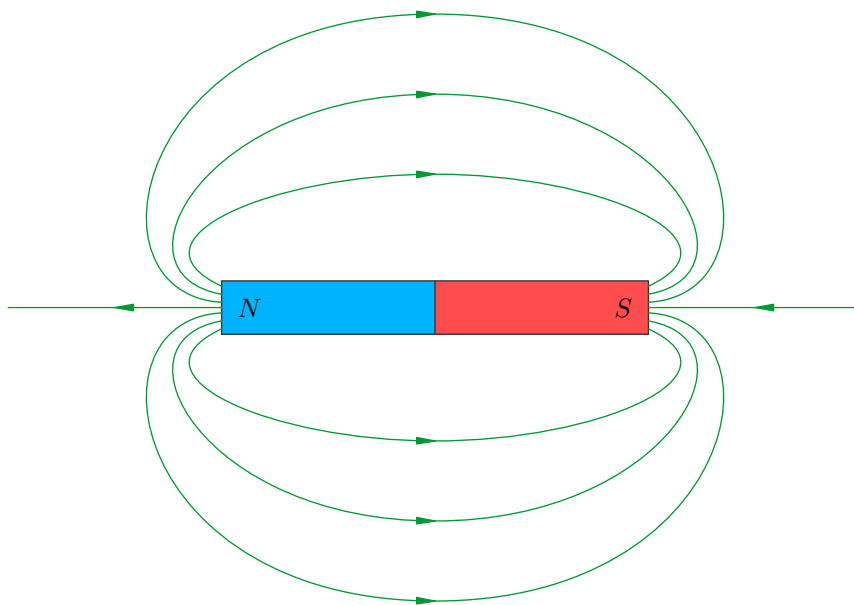


Рис. 1. Поле постоянного магнита

Северный полюс магнита обозначается синим цветом и буквой *N*; южный полюс — красным цветом и буквой *S*. Обратите внимание, что линии поля выходят из северного полюса магнита и входят в южный полюс: ведь именно к южному полюсу магнита будет направлен северный конец стрелки компаса.

Опыт Эрстеда

Несмотря на то, что электрические и магнитные явления были известны людям ещё с античности, никакой взаимосвязи между ними долгое время не наблюдалось. В течение нескольких

столетий исследования электричества и магнетизма шли параллельно и независимо друг от друга.

Тот замечательный факт, что электрические и магнитные явления на самом деле связаны друг с другом, был впервые обнаружен в 1820 году — в знаменитом опыте Эрстеда.

Схема опыта Эрстеда показана¹ на рис. 2. Над магнитной стрелкой NS (N и S — северный и южный полюсы стрелки) расположен металлический проводник, подключённый к источнику тока. Если замкнуть цепь, то стрелка поворачивается перпендикулярно проводнику!

Этот простой опыт прямо указал на взаимосвязь электричества и магнетизма. Эксперименты последовавшие за опытом Эрстеда, твёрдо установили следующую закономерность: *магнитное поле порождается электрическими токами и действует на токи.*

Картина линий магнитного поля, порождённого проводником с током, зависит от формы проводника.

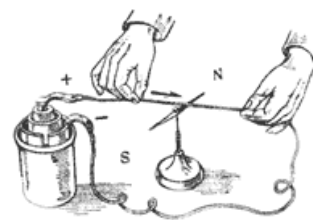


Рис. 2. Опыт Эрстеда

Магнитное поле прямого провода с током

Линии магнитного поля прямолинейного провода с током являются концентрическими окружностями. Центры этих окружностей лежат на проводе, а их плоскости перпендикулярны проводу (рис. 3).

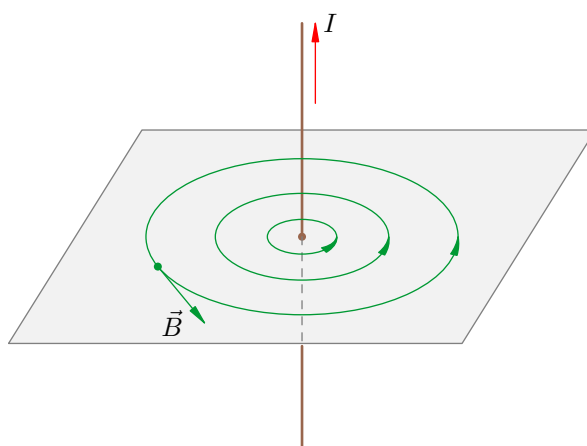


Рис. 3. Поле прямого провода с током

Для определения направления линий магнитного поля прямого тока существуют два альтернативных правила.

Правило часовой стрелки. *Линии поля идут против часовой стрелки, если смотреть так, чтобы ток тёк на нас.*

Правило винта². *Линии поля идут туда, куда надо вращать винт (с обычной правой резьбой), чтобы он двигался по резьбе в направлении тока.*

Пользуйтесь тем правилом, которое вам больше по душе. Лучше привыкнуть к правилу часовой стрелки — вы сами впоследствии убедитесь, что оно более универсально и им проще пользоваться³.

¹Изображение с сайта rt.mipt.ru.

²Или *правило буравчика*, или *правило штопора* — это уж кому что ближе ;-)

³А потом с благодарностью вспомните его на первом курсе, когда будете изучать аналитическую геометрию.

На рис. 3 появилось и кое-что новое: это вектор \vec{B} , который называется *индукцией магнитного поля*, или *магнитной индукцией*. Вектор магнитной индукции является аналогом вектора напряжённости электрического поля: он служит *силовой характеристикой* магнитного поля, определяя силу, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряды.

О силах в магнитном поле мы поговорим позже, а пока отметим лишь, что величина и направление магнитного поля определяется вектором магнитной индукции \vec{B} . В каждой точке пространства вектор \vec{B} направлен туда же, куда и северный конец стрелки компаса, помещённой в данную точку, а именно по касательной к линии поля в направлении этой линии. Измеряется магнитная индукция в *теслах* (Тл).

Как и в случае электрического поля, для индукции магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции*. Он заключается в том, что *индукции магнитных полей $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \dots, \vec{B}_n$, создаваемых в данной точке различными токами, складываются векторно и дают результирующий вектор магнитной индукции: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$.*

Магнитное поле витка с током

Рассмотрим круговой виток, по которому циркулирует постоянный ток I . Источник, создающий ток, мы на рисунке не показываем.

Картина линий поля нашего витка будет иметь приблизительно следующий вид (рис. 4).

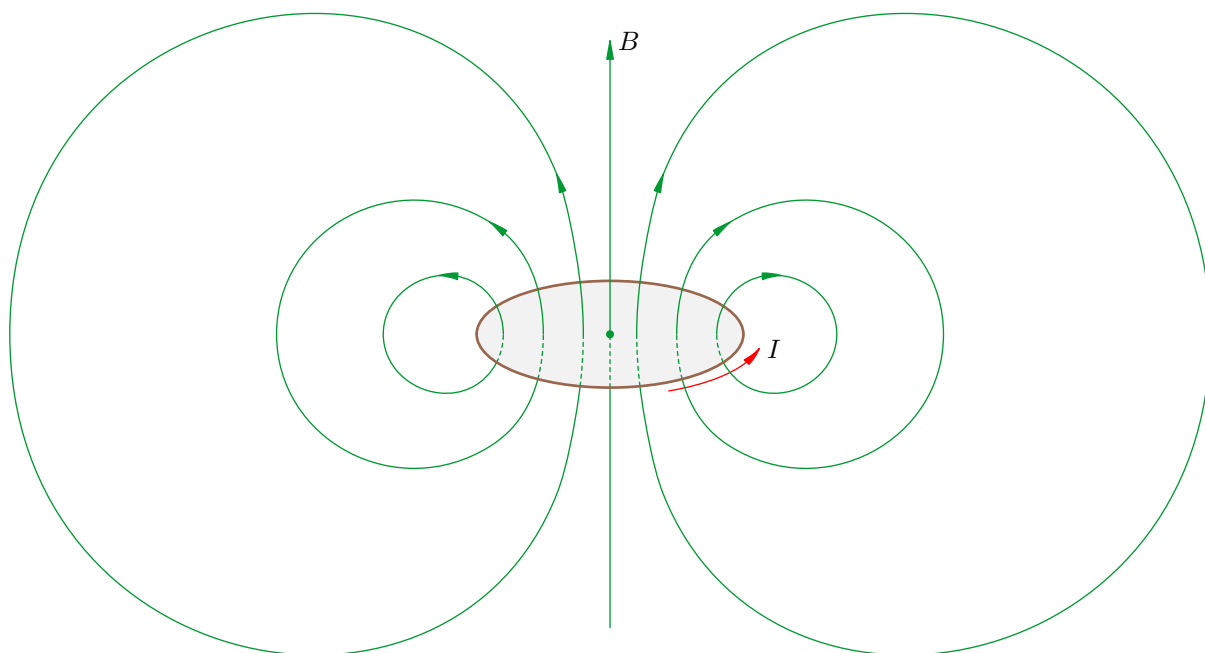


Рис. 4. Поле витка с током

Нам будет важно уметь определять, в какое полупространство (относительно плоскости витка) направлено магнитное поле. Снова имеем два альтернативных правила.

Правило часовой стрелки. *Линии поля идут туда, глядя откуда ток кажется циркулирующим против часовой стрелки.*

Правило винта *Линии поля идут туда, куда будет перемещаться винт (с обычной правой резьбой), если вращать его в направлении тока.*

Как видите, ток и поле меняются ролями — по сравнению с формулировками этих правил для случая прямого тока.

Магнитное поле катушки с током

Катушка получится, если плотно, виток к витку, намотать провод в достаточно длинную спираль (рис. 5)⁴. В катушке может быть несколько десятков, сотен или даже тысяч витков. Катушка называется ещё *соленоидом*.

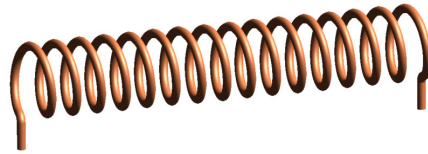


Рис. 5. Катушка (соленоид)

Магнитное поле одного витка, как мы знаем, выглядит не очень-то просто. Поля отдельных витков катушки накладываются друг на друга, и, казалось бы, в результате должна получиться совсем уж запутанная картина. Однако это не так: поле длинной катушки имеет неожиданно простую структуру (рис. 6).

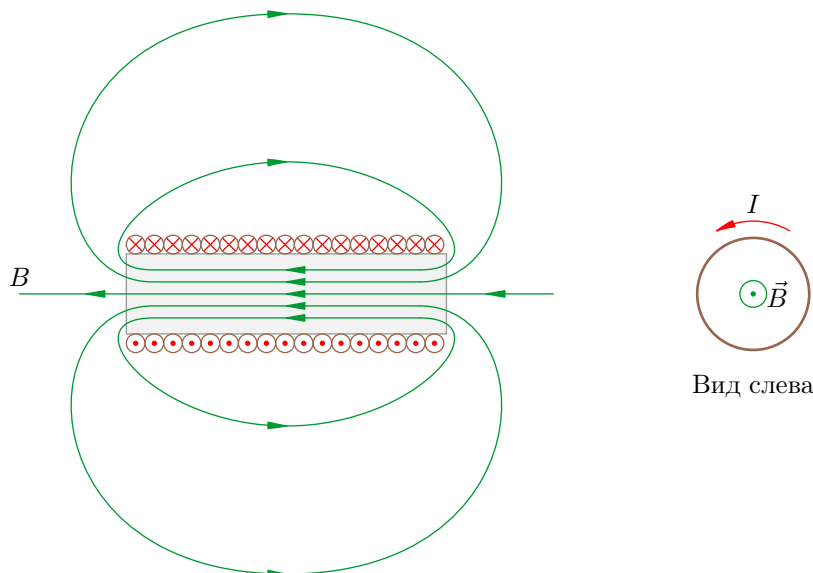


Рис. 6. Поле катушки с током

На этом рисунке ток в катушке идёт против часовой стрелки, если смотреть слева (так будет, если на рис. 5 правый конец катушки подключить к «плюсу» источника тока, а левый конец — к «минусу»). Мы видим, что магнитное поле катушки обладает двумя характерными свойствами.

1. Внутри катушки вдали от её краёв магнитное поле является *однородным*: в каждой точке вектор магнитной индукции одинаков по величине и направлению. Линии поля — параллельные прямые; они искривляются лишь вблизи краёв катушки, когда выходят наружу.
2. Вне катушки поле близко к нулю. Чем больше витков в катушке — тем слабее поле снаружи неё.

Заметим, что бесконечно длинная катушка вообще не выпускает поле наружу: вне катушки магнитное поле отсутствует. Внутри такой катушки поле всюду является однородным.

⁴Изображение с сайта en.wikipedia.org.

Ничего не напоминает? Катушка является «магнитным» аналогом конденсатора. Вы же помните, что конденсатор создаёт внутри себя однородное электрическое поле, линии которого искривляются лишь вблизи краёв пластин, а вне конденсатора поле близко к нулю; конденсатор с бесконечными обкладками вообще не выпускает поле наружу, а всюду внутри него поле однородно.

А теперь — главное наблюдение. Сопоставьте, пожалуйста, картину линий магнитного поля вне катушки (рис. 6) с линиями поля магнита на рис. 1. Одно и то же, не правда ли? И вот мы подходим к вопросу, который, вероятно, у вас уже давно возник: если магнитное поле порождается токами и действует на токи, то какова причина возникновения магнитного поля вблизи постоянного магнита? Ведь этот магнит вроде бы не является проводником с током!

Гипотеза Ампера. Элементарные токи

Поначалу думали, что взаимодействие магнитов объясняется особыми магнитными зарядами, сосредоточенными на полюсах. Но, в отличие от электричества, никто не мог изолировать магнитный заряд; ведь, как мы уже говорили, не удавалось получить по отдельности северный и южный полюс магнита — полюса всегда присутствуют в магните парами.

Сомнения насчёт магнитных зарядов усугубил опыт Эрстеда, когда выяснилось, что магнитное поле порождается электрическим током. Более того, оказалось, что для всякого магнита можно подобрать проводник с током соответствующей конфигурации, такой, что поле этого проводника совпадает с полем магнита.

Ампер выдвинул смелую гипотезу. *Нет никаких магнитных зарядов. Действие магнита объясняется замкнутыми электрическими токами внутри него.*

Что это за токи? Эти *элементарные токи* циркулируют внутри атомов и молекул; они связаны с движением электронов по атомным орбитам. Магнитное поле любого тела складывается из магнитных полей этих элементарных токов.

Элементарные токи могут быть беспорядочным образом расположены друг относительно друга. Тогда их поля взаимно погашаются, и тело не проявляет магнитных свойств.

Но если элементарные токи расположены согласованно, то их поля, складываясь, усиливают друг друга. Тело становится магнитом (рис. 7; магнитное поле будет направлено на нас; также на нас будет направлен и северный полюс магнита).

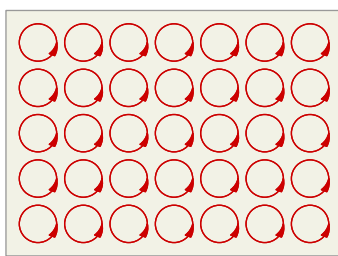


Рис. 7. Элементарные токи магнита

Гипотеза Ампера об элементарных токах прояснила свойства магнитов. Нагревание и тряска магнита разрушают порядок расположения его элементарных токов, и магнитные свойства ослабевают. Неразделимость полюсов магнита стала очевидной: в месте разреза магнита мы получаем те же элементарные токи на торцах. Способность тела намагничиваться в магнитном поле объясняется согласованным выстраиванием элементарных токов, «поворачивающихся» должным образом (о повороте кругового тока в магнитном поле читайте в следующем листке).

Гипотеза Ампера оказалась справедливой — это показало дальнейшее развитие физики. Представления об элементарных токах стали неотъемлемой частью теории атома, разработанной уже в XX веке — почти через сто лет после гениальной догадки Ампера.