

# Магнитное поле в веществе. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ

# 1.1 Намагничивание вещества.

всякое вещество является магнетиком, т. е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться)

Намагниченное вещество создает магнитное поле  $B'$ , которое накладывается на обусловленное токами поле  $B_0$ . Оба поля в сумме дают результирующее поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

Гипотеза Ампера

Для объяснения намагничивания тел Ампер предположил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи (молекулярные токи).

# **Магнитные свойства вещества**

Подобно тому как электрические свойства вещества характеризуются диэлектрической проницаемостью, магнитные свойства вещества характеризуются магнитной проницаемостью.

Экспериментальные исследования показали, что все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами. Индукция магнитного поля, создаваемого электрическими токами в веществе, отличается от индукции магнитного поля, создаваемого теми же токами в вакууме.

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме, называется ***магнитной проницаемостью***:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

$B$  – в однородной среде

$B_0$  – в вакууме



MyShared

# Вещества

Диамагнетики

$$\mu < 1$$

Парамагнетики

$$\mu > 1$$

Ферромагнетики

$$\mu \gg 1$$

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле

Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

**Слабо-магнитные вещества**



MyShared

# Три класса магнитных веществ

Существует три основных класса веществ с резко различающимися магнитными свойствами: ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики.

## МАГНЕТИЗМ

Магнитные свойства вещества

### МАГНЕТИКИ

СЛАБОМАГНИТНЫЕ  
ВЕЩЕСТВА

СИЛЬНОМАГНИТНЫЕ  
ВЕЩЕСТВА

ДИАМАГНЕТИКИ

ПАРАМАГНЕТИКИ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

- Водород
- Бензол
- Вода
- Медь
- Стекло
- Кварц
- Каменная соль
- Висмут
- Графит

- Азот
- Воздух
- Кислород
- Эбонит
- Алюминий
- Вольфрам
- Платина

- Железо
- Никель
- Кобальт

$$\mu < 1$$

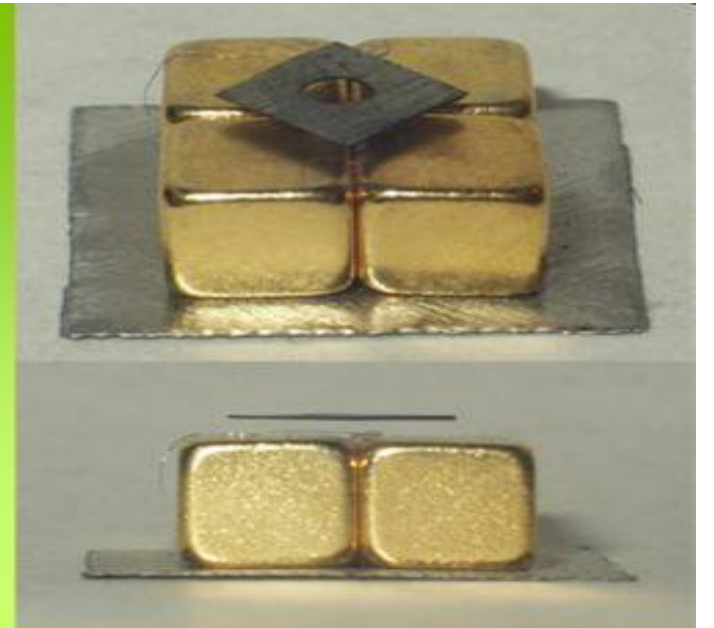
$$\mu \geq 1$$

$$\mu \gg 1$$

$\mu$  - магнитная проницаемость вещества

# Диамагнетики

- вода, висмут, медь, золото, сера, ртуть, хлор, инертные газы и практически все органические соединения.
- Если стержень из диамагнетика подвесить в вакууме в однородном магнитном поле, то в положении равновесия он установится перпендикулярно линиям магнитной индукции



# Диамагнетики

Диамагнетики – вещества, которые выталкиваются из магнитного поля. (Bi, Cu, S, Hg, Cl)

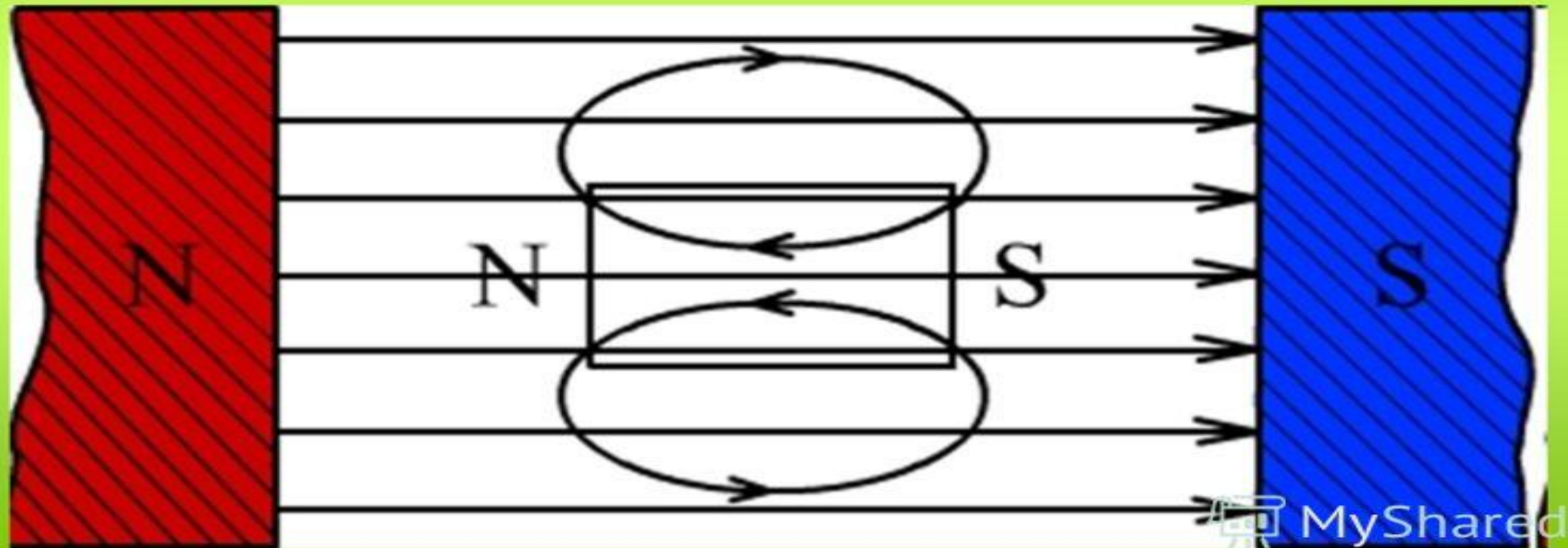
У диамагнетиков  $\mu < 1$ , отличается от единицы на величину порядка  $10^{-6}$ .

Магнитная проницаемость практически не зависит от индукции намагничивающего поля и от температуры.

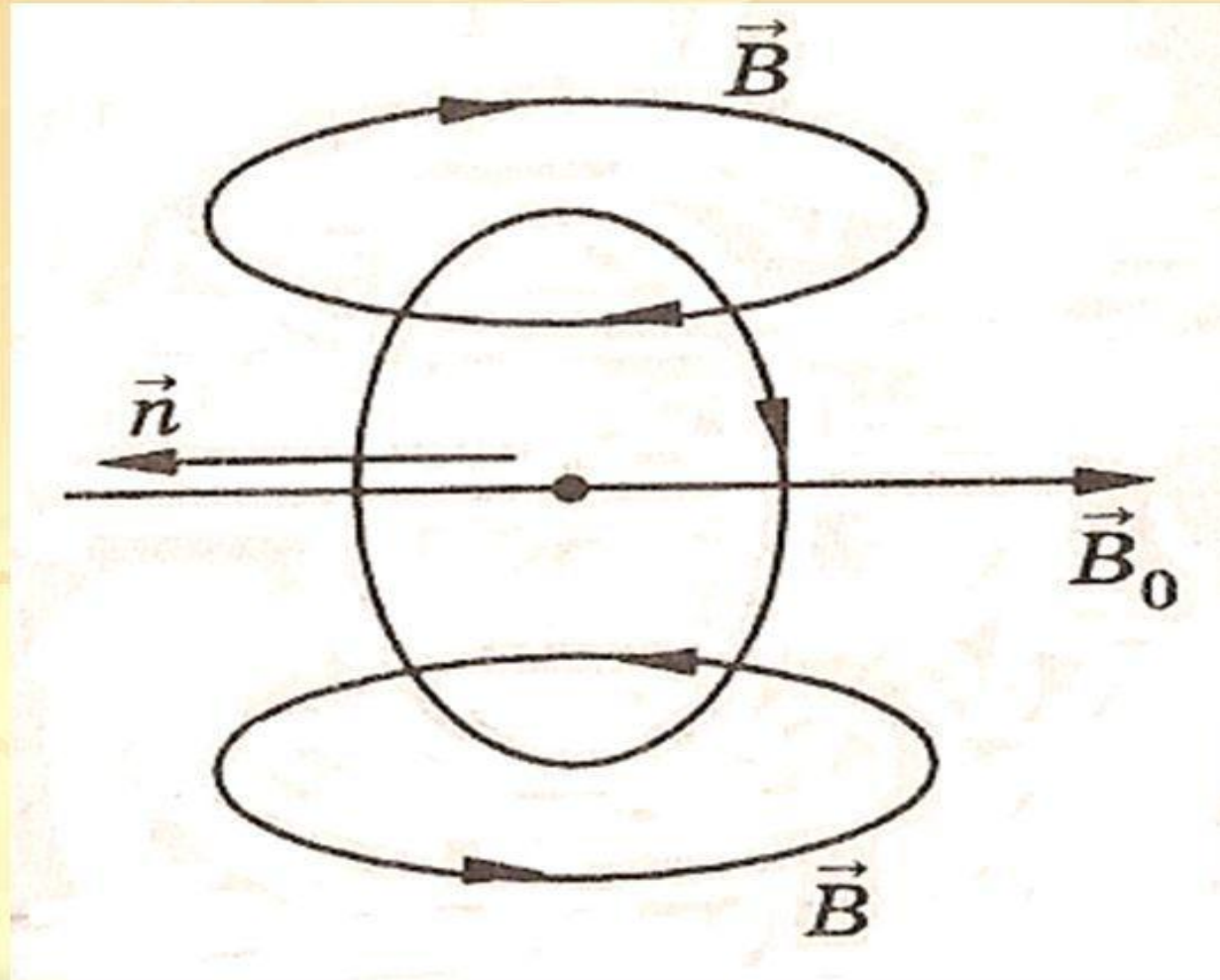
При вынесении диамагнетика из внешнего намагничивающего поля он полностью размагничивается и магнитного поля не создаёт.

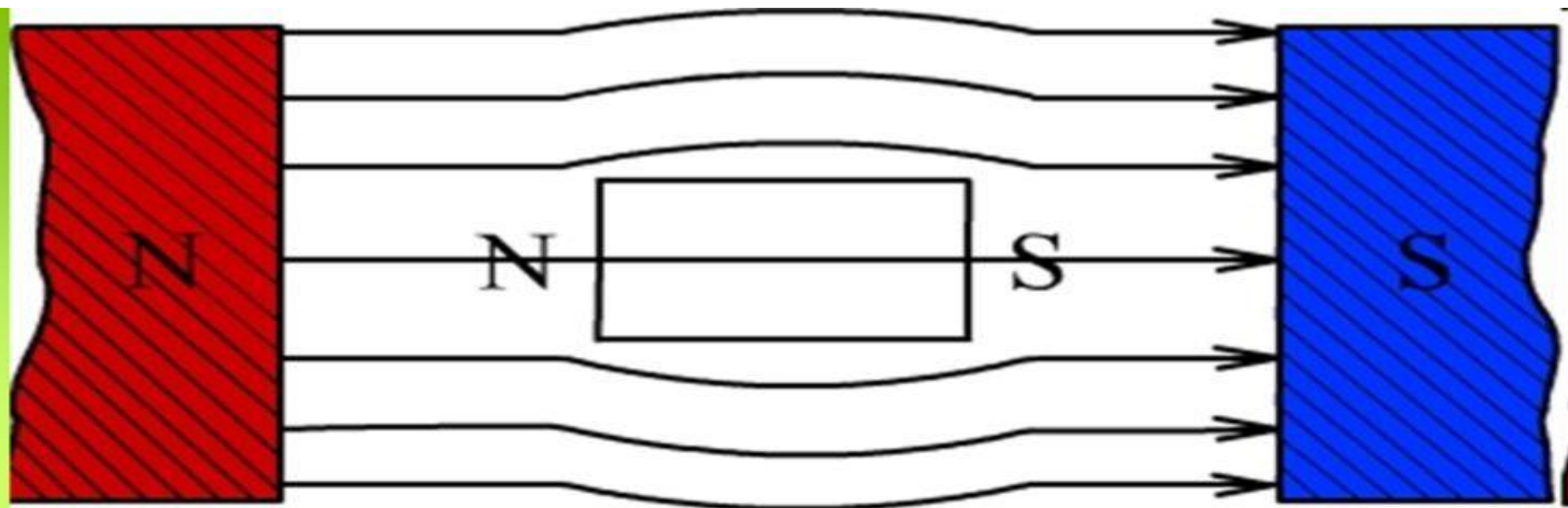


Диамagnetик в магнитном поле намагничивается таким образом, что на том его конце, где входят линии внешнего поля, образуется северный полюс, а с противоположной стороны — южный



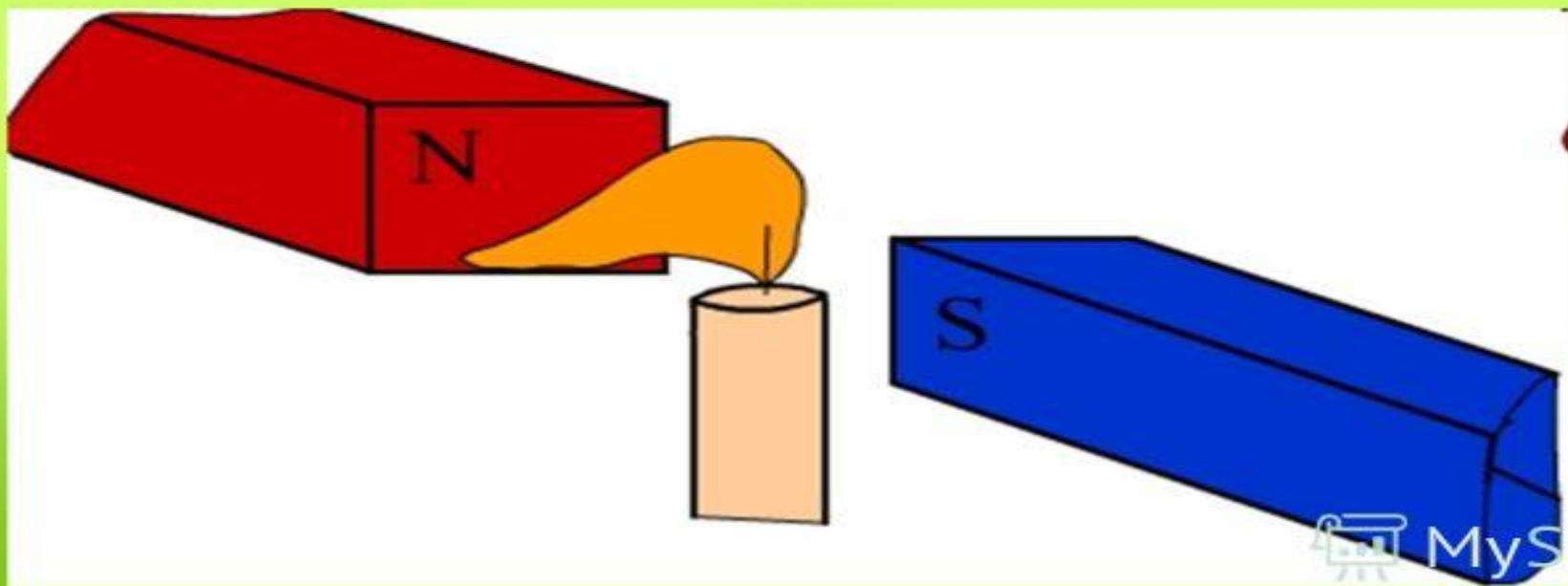
# Диамагнетизм





- Магнитное поле внутри диамагнитных веществ несколько слабее, чем снаружи. Внешнее поле вблизи диамагнетика искажается; силовые линии поля как бы выталкиваются из диамагнитного тела.

- Если диамагнетик поднести к определенному полюсу магнита, то он будет отталкиваться. Например, так как продуктами сгорания свечи являются диамагнитные частицы, то пламя свечи в магнитном поле будет отклоняться



# Диамагнетики

Сверхпроводники – идеальные диамагнетики

Магнитное поле вообще не проникает внутрь сверхпроводника. Это означает что сверхпроводник является идеальным диамагнетиком. Т.к. магнитная индукция внутри проводника равна нулю, то по формуле:  $\vec{B} = \mu\vec{B}_0$ , магнитная проницаемость сверхпроводника также равна нулю.

# Парамагнетики

Существуют вещества, которые ведут себя подобно железу, втягиваются в магнитное поле. Эти вещества называют парамагнитными. (Al, Na, K, Mn, Pt)

У них  $\mu > 1$ , но от единицы отличается на величину порядка  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ .

Магнитная проницаемость парамагнетиков зависит от температуры и уменьшается при её увеличении.

Без намагничивающего поля парамагнетики не создают собственного магнитного поля.  
Постоянных парамагнетиков нет.

# Парамагнетики

- ал  
пл  
ни
- Ес  
в  
то  
ин
- Па  
ос  
вы  
те

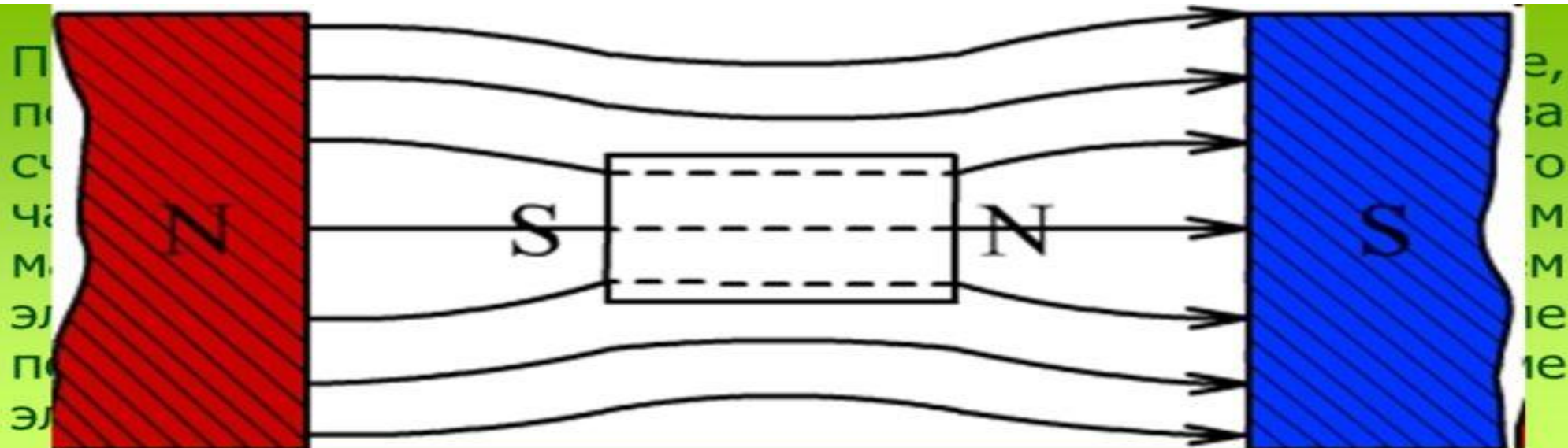


весить  
поле,  
нитной

имеют  
после  
я, они



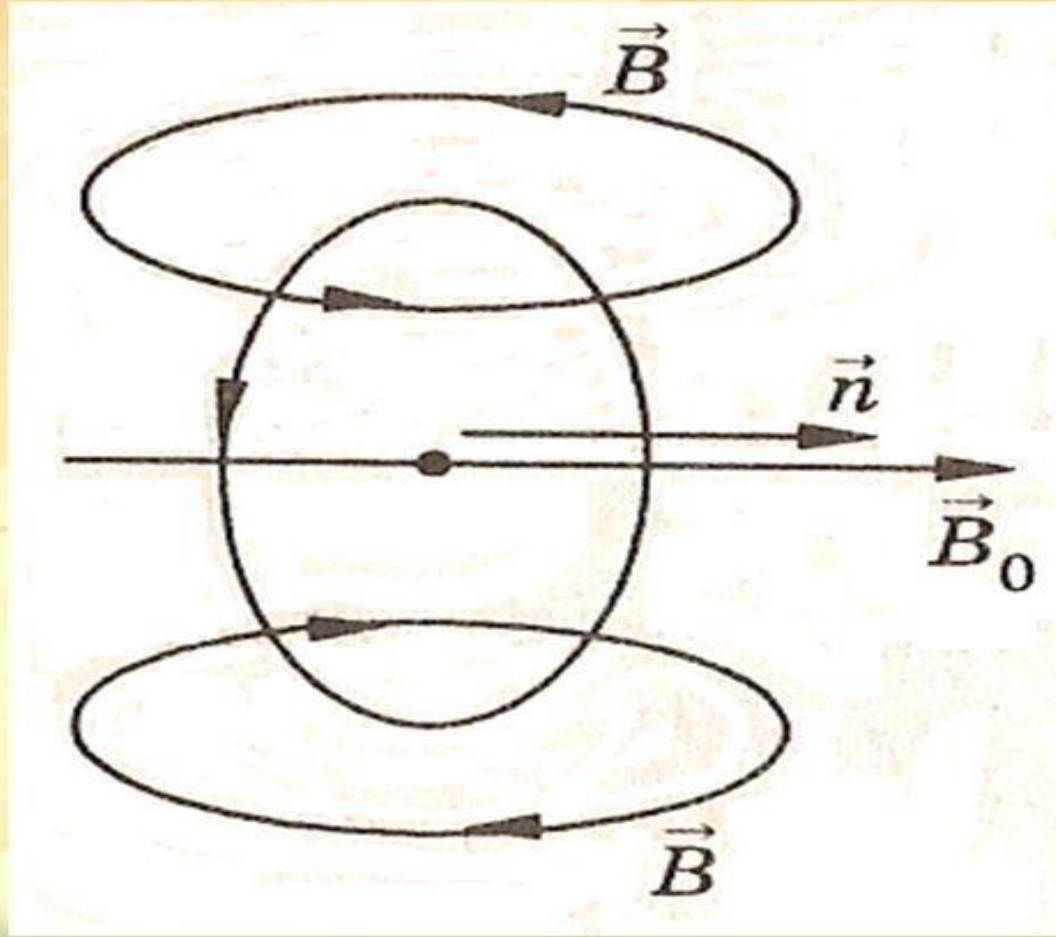
MyShared



- При намагничивании парамагнетика его молекулярные токи располагаются так, что общее магнитное поле частиц оказывается направленным вдоль внешнего поля, намагничивающего парамагнетик. Действительно, каждая частица парамагнетика является элементарным магнетиком. Внешнее магнитное поле заставляет северные полюсы частиц поворачиваться в направлении внешнего поля. Магнитное поле, созданное парамагнетиком, усиливает, хотя и незначительно внешнее магнитное поле, поэтому индукция  $B$  результирующего поля больше магнитной индукции  $B_0$  внешнего поля при отсутствии парамагнетика



# Парамагнетизм



# Ферромагнетики

- кристаллическое железо, никель, кобальт, многие сплавы этих элементов между собой и с другими ферромагнитными соединениями, а также сплавы и соединения хрома и марганца с ферромагнитными элементами
- Намагниченность в ферромагнетиках сохраняется и после выключения внешнего поля.



# Ферромагнетики

Вещества, у которых подобно железу,  $\mu \gg 1$ , называются ферромагнетиками. (Fe, Ni, Co)

Важнейшее свойство ферромагнетиков существование у них остаточного магнетизма.

При нагревании до достаточно высокой температуры ферромагнитные свойства у тел исчезают (точка Кюри).

Магнитная проницаемость ферромагнетиков непостоянна, она зависит от магнитной индукции внешнего поля.

- Ферромагнетики во внешнем магнитном поле намагничиваются подобно парамагнетикам, они создают собственное магнитное поле. **Это вещества, которые имеют самостоятельно намагниченные области (домены — от франц. domaine - владение).** Понятие домена было введено П. Вейсом в 1907 г. Вейс представлял домены в виде небольших «колоний» атомов, в пределах которых магнитные моменты всех атомов в силу каких-то причин вынуждены сохранять одинаковую ориентацию, так что каждый домен намагничен до насыщения. Отдельный домен может иметь линейные размеры порядка 0,01 мм и соответственно объем порядка  $10^{-6}$  мм<sup>3</sup>. Домены разделены так называемыми блоховскими стенками, толщина которых не превышает 1000 атомных размеров. Такие стенки представляют собой «переходные слои», в которых происходит изменение направления намагниченности доменов.



# Пьер Эрнест Вейс (1865 — 1940) - французский физик

В 1907 высказал гипотезу о существовании в ферромагнетиках внутреннего взаимодействия, приводящего к самопроизвольной намагниченности, разработал феноменологическую теорию Ферромагнетизма, теоретически предсказал и экспериментально изучил аномалию теплоёмкости и магнитокалорический эффект у ферромагнетиков и открыл закон температурной зависимости восприимчивости ферромагнетиков выше точки Кюри (Кюри - Вейса закон). В 1911 пришёл к выводу о существовании магнитного момента атома, который он назвал Магнетоном. Сконструировал мощные электромагниты и ряд приборов для магнитных и электрических измерений.



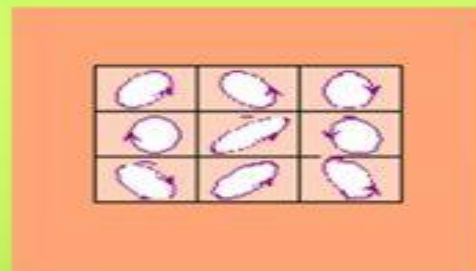
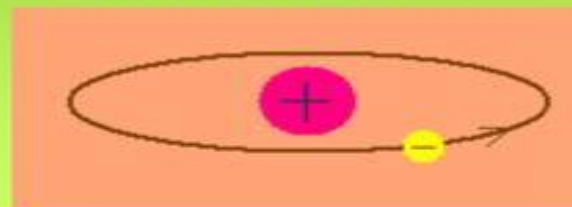
# Гипотеза Ампера



- Магнетизм Земли вызван токами внутри

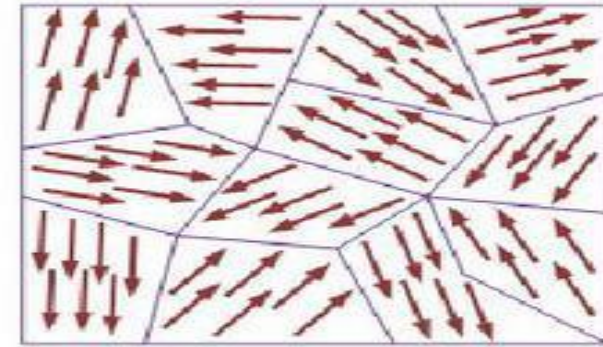


- Магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми токами внутри него.
- М.П. в веществе создают электроны за счёт орбитального движения (диа-, пара-) и из-за собственного «вращения» (ферро-)



# 1.7 Природа ферромагнетизма.

При определенных условиях в кристаллах могут возникать силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, которые называют также доменами.



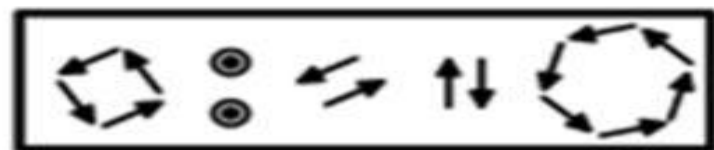
- В ненамагниченном веществе оси доменов ориентированы хаотично. Общий магнитный эффект весьма мал или равен нулю (Рис. б) Когда же все домены ориентируются в одном направлении, то вещество намагничивается, имея полюсы возле концов (Рис. в).

Домен

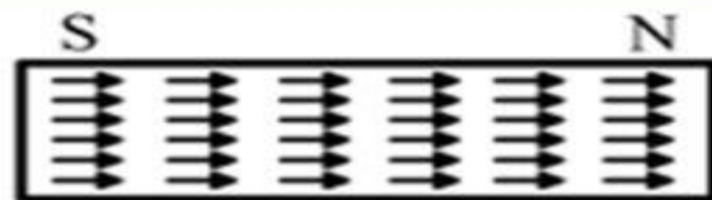


а)

S → N



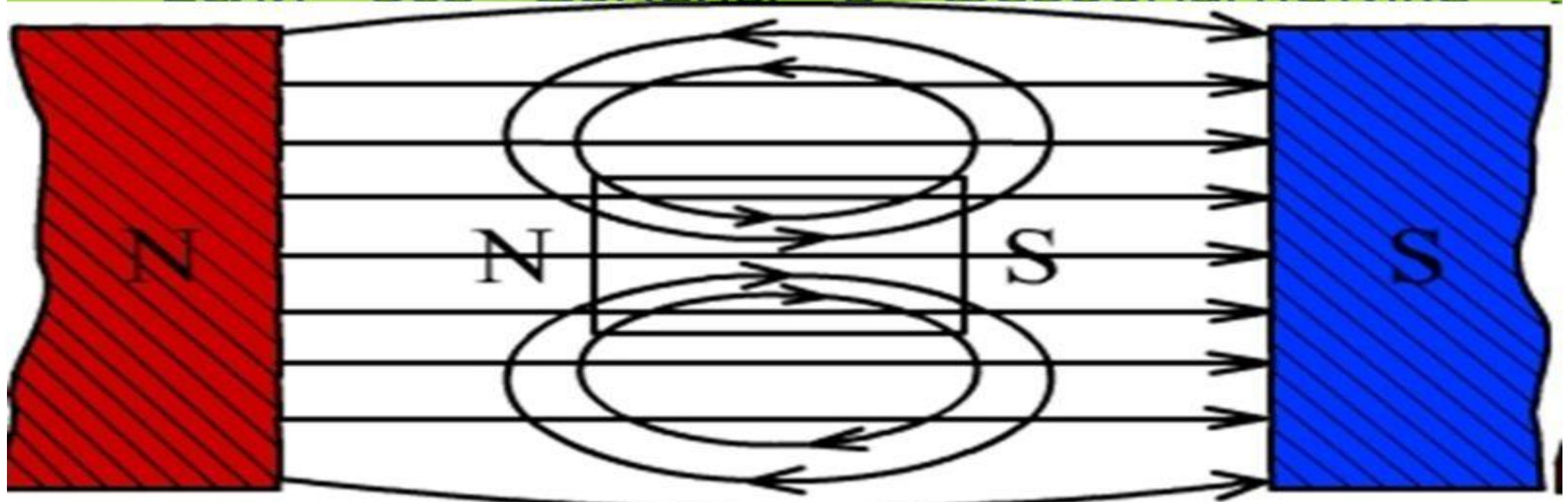
б) Ненамагничено



в) Намагничено

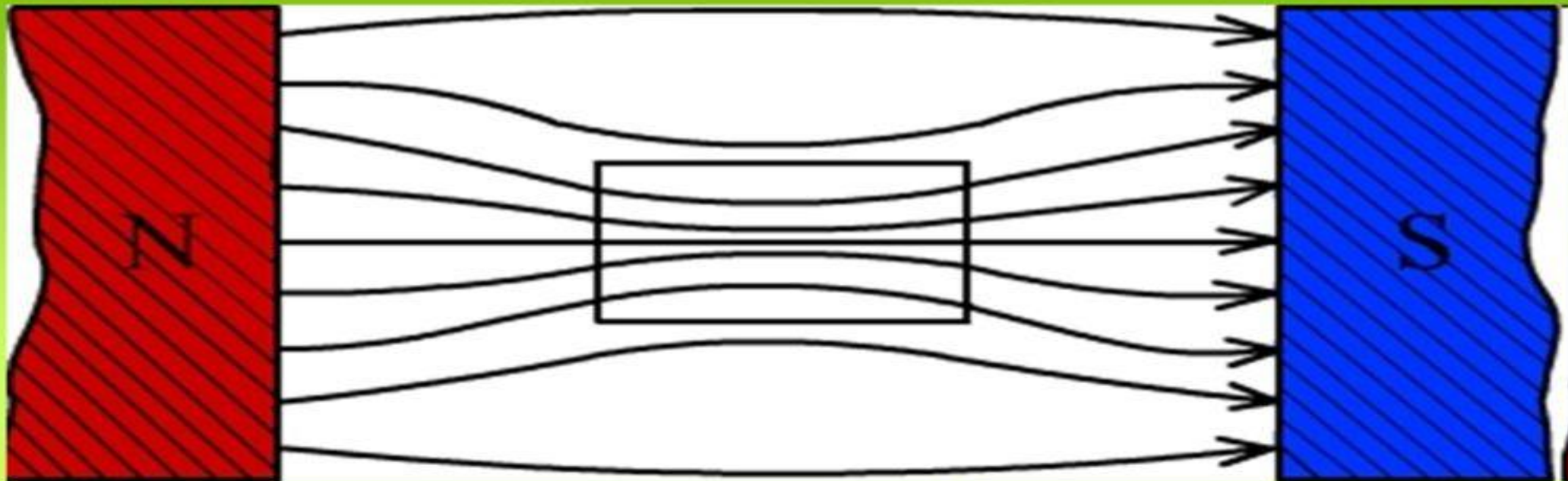


- Если все домены в ферромагнетике



русский ученый А. Г. Столетов

- Магнитное поле внутри ферромагнитных веществ во много раз сильнее, чем в парамагнетиках



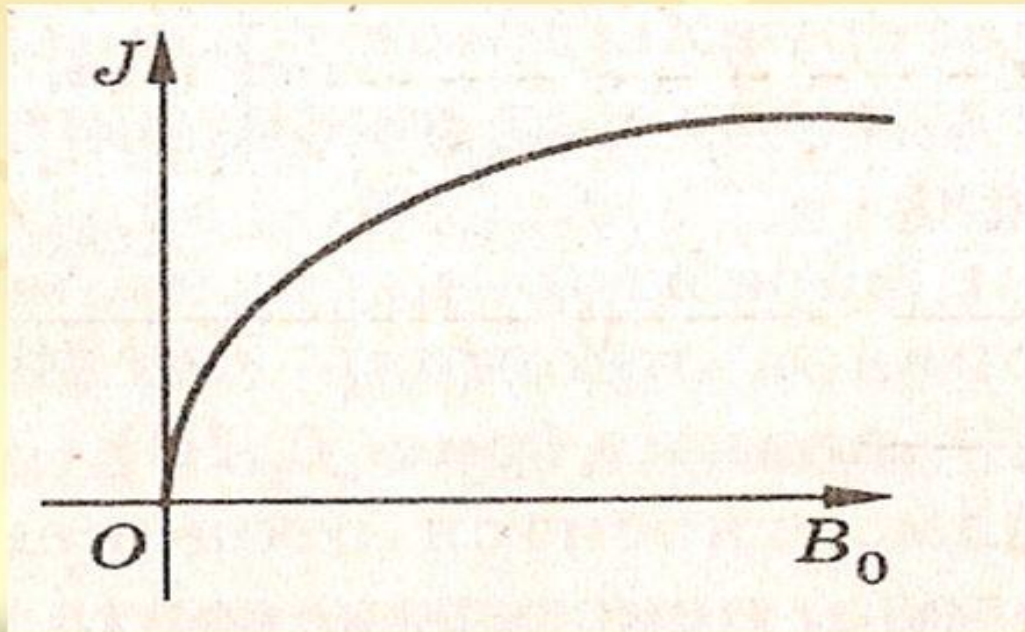
- Внешнее поле вокруг ферромагнетика оказывается значительно более искаженным, чем в случае парамагнетика, и имеет такой вид, как если бы его силовые линии оказались втянутыми и ферромагнетик

## Кривая намагничивания

Разность между  $B$  и  $B_0$  может служить мерой намагничивания материала.

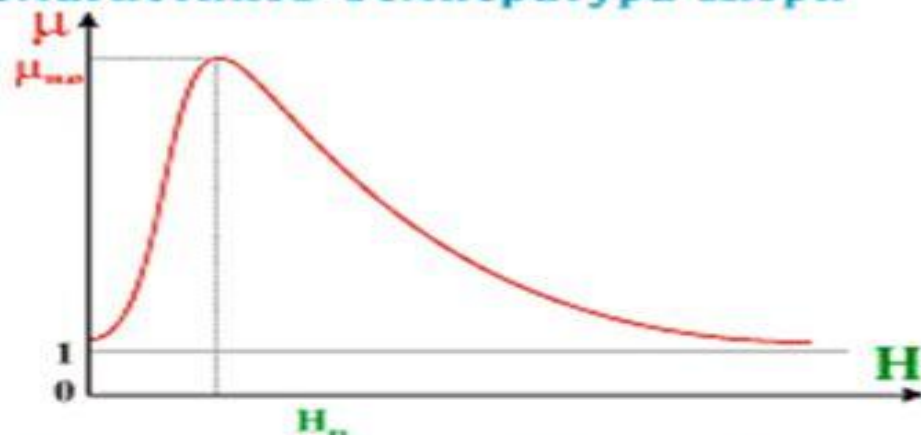
Намагниченность  $J$  равна:  $J = B - B_0$

$$J = (\mu - 1)B_0$$

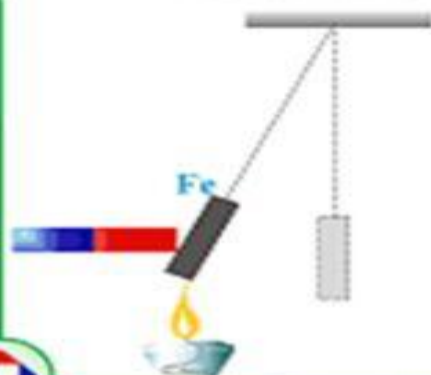


МАГНЕТИЗМ

Магнитная проницаемость ферромагнетиков Температура Кюри



Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнетика от напряженности магнитного поля  $H$   
 Если ферромагнетик нагревать, то он превратится по магнитным свойствам в парамагнетик



Температура Кюри

Железо (99% Fe)	780 °C
Никель (Ni)	350 °C
Кобальт (Co)	1150 °C
Пермаллой (Fe - 16%, Ni - 78%, Mo - 3,8%)	550 °C

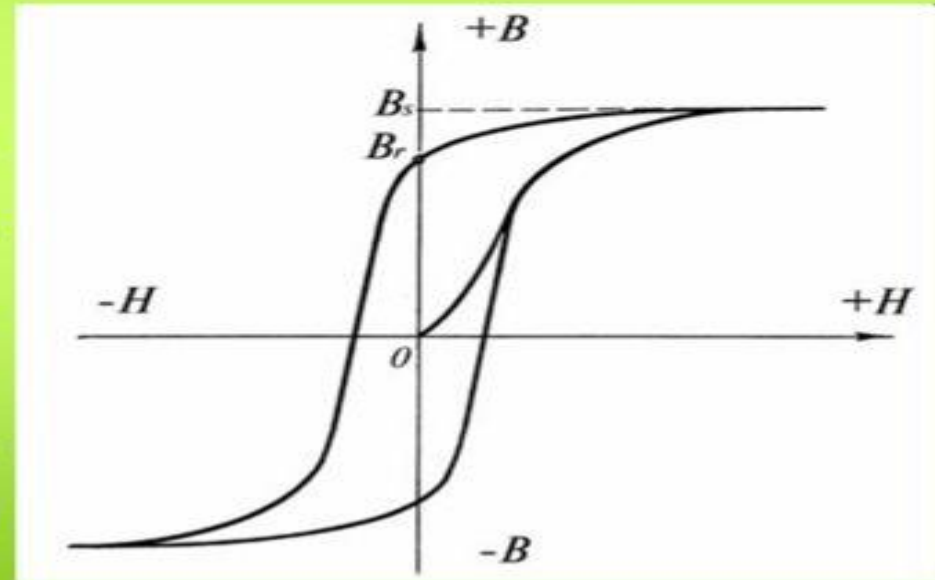
# Температура Кюри

температура, при которой ферромагнетики теряют свои магнитные свойства и ведут себя как парамагнетики.



**Магнитный гистерезис — явление зависимости вектора намагничивания и вектора напряженности магнитного поля в веществе не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца.**

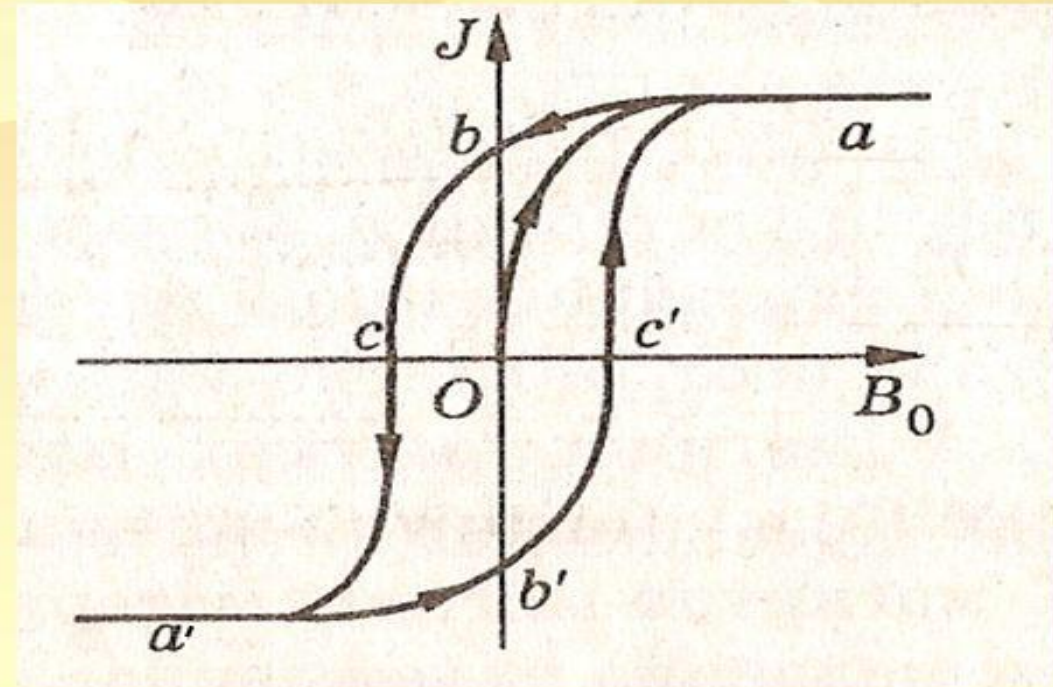
- Магнитный гистерезис обычно проявляется в ферромагнетиках — Fe, Co, Ni и сплавах на их основе. Именно магнитным гистерезисом объясняется существование постоянных магнитов.



# Магнитный гистерезис

При уменьшении индукции намагничивающего поля после достижения насыщения намагниченность  $J$  уменьшается медленнее, чем происходил её рост. Это явление называют магнитным гистерезисом.

Петля гистерезиса:

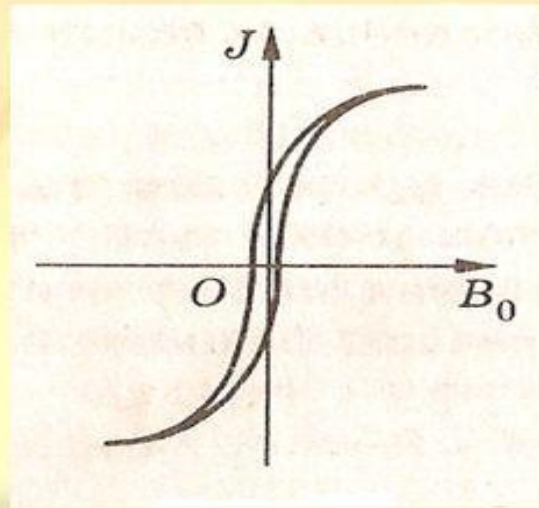


# Магнитные металлы

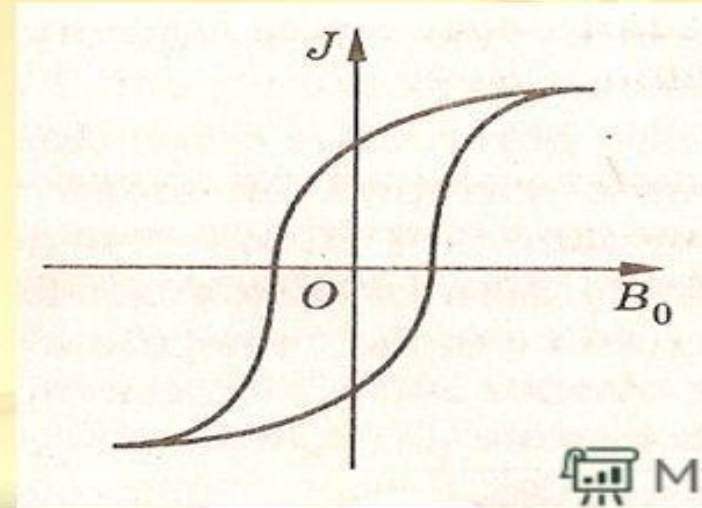
Различные ферромагнитные материалы имеют разные формы петли гистерезиса.

Различают магнитно-мягкие и магнитно-жесткие материалы.

магнитно-мягкие:



магнитно-жесткие



# Применение

Изготовление постоянных магнитов, сердечников трансформаторов, находят применение в магнитных плёнках для записи разнообразной информации: голос, музыка, программы ЭВМ.





# Вывод. Сравнение свойств

	$\mu$	остаточный магнетизм	магнитная проницаемость:
ферромагнетики	$\gg 1$	есть	непостоянна, зависит от магнитной индукции внешнего поля
парамагнетики	$> 1$ ( $10^{-5} \dots 10^{-6}$ )	нет	зависит от температуры и уменьшается при её увеличении
диамагнетики	$< 1$ ( $10^{-6}$ )	нет	практически не зависит от индукции намагничивающего поля и от температуры

## *Гиромагнитные явления*

Физическая теория предсказывает, что между механическими и магнитными моментам молекул (или атомов) существует определенная связь; следовательно, между механическими и магнитными моментами массивных образцов также существует взаимосвязь. Соответствующие гиромагнитные эффекты обнаружены экспериментально.

*Эффект Эйнштейна-Дее-Газа.* Если намагнитить подвешенный вертикально цилиндр, то согласно закону сохранения момента количества движения, одновременный по-

ворот молекул внутри образца должен вызвать поворот всего цилиндра вокруг оси; этот поворот был зафиксирован по углу закручивания нити подвеса. *Эффект Барнетта (обратный)* – быстрое вращение цилиндра приводит к появлению намагниченности вдоль оси.

Оба эффекта сами по себе слабы, однако при применении усилителей вполне измеримы; кроме чисто научного значения, они могут иметь и прикладное значение, например,

при решении различных изобретательских задач в области измерительной техники.



## *Температурой Кюри называют*

- 1 температуру, при которой исчезают различия в физических свойствах жидкости и ее насыщенного пара
- 2 температуру, при которой вещество становится сверхпроводником
- 3 температуру, при которой вещество плавится
- 4 температуру, при которой исчезают ферромагнитные свойства вещества
- 5 температуру, при которой жидкость кипит



*Гипотеза Ампера состоит в том, что*

---

- 1 пустоты есть внутри самих атомов
- 2 на частицу, имеющую отрицательный заряд и находящуюся в электрическом поле, действует сила
- 3 ядро атома состоит из протонов и нейтронов
- 4 магнитные свойства тела объясняются циркулирующими внутри него токами
- 5 электроны на внешней орбите атома удерживаются ядром слабо

*Диамagnetики – это вещества, у которых магнитная проницаемость*

...

- 
- 1 больше единицы и они слабо втягиваются в магнитное поле
  - 2 меньше единицы и они слабо выталкиваются из магнитного поля
  - 3 очень маленькая
  - 4 очень большая
  - 5 равна единице они слабо выталкиваются из магнитного поля

*Какие вещества относятся к группе ферромагнетиков?*

---

- 1 железо, никель, гадолиний, кобальт
- 2 железо, никель, гадолиний, алюминий
- 3 железо, вольфрам, гадолиний, кобальт
- 4 железо, висмут, гадолиний, кобальт
- 5 железо, никель, медь, кобальт



*Магнитные свойства вещества характеризует*

---

- 1 вектор магнитной индукции
- 2 магнитная постоянная
- 3 вектор напряженности
- 4 магнитная проницаемость среды
- 5 плотность вещества

*Если ферромагнетик нагреть до температуры, превышающей температуру Кюри, то*

- 1 его магнитные свойства не изменятся
- 2 его магнитные свойства незначительно ослабнут
- 3 его магнитные свойства многократно усилятся
- 4 он потеряет ферромагнитные свойства
- 5 его ферромагнитные свойства усилятся



*Ферромагнетиками называют вещества*

- 1 с большей плотностью
- 2 с большой магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$
- 3 с магнитной проницаемостью  $\mu = 1$
- 4 с малой магнитной проницаемостью  $\mu \ll 1$
- 5 с малой плотностью

*Явление диамагнетизма было открыто*

---

- 1 Х.Эрстедом
- 2 А.Ампером
- 3 М.Фарадеем
- 4 Х.Лоренцом
- 5 Д.Максвеллом

**Спасибо за внимание!**