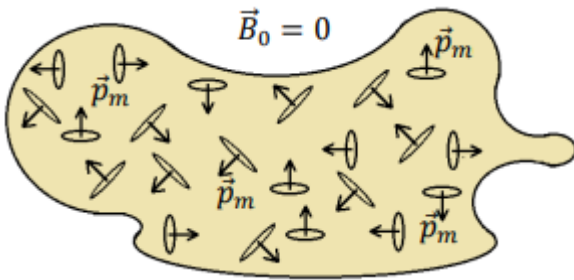


## 34 - Магнитное поле в веществе. Вектор намагниченности.

### Несколько слов об используемой модели

В рамках нашей модели принимаем строение атома по Бору: планетарная модель - электроны движутся вокруг почти неподвижных протонов по замкнутым орбитам. Тем самым создается подобие тока по маленькому замкнутому контуру



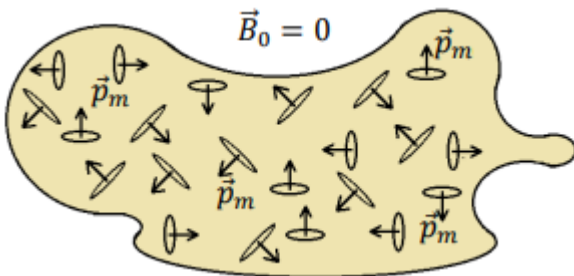
Для описания поведения контура с током применяется понятие магнитного момента (то есть это не закон природы, просто величина, с которой связаны некоторые закономерности):

$$\vec{p}_m = I \cdot \vec{S}_\Gamma$$

Также не забудем что как мы выясняли в одном из предыдущих билетов  $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}_0]$ , стремящийся повернуть контур так, чтобы момент стал параллелен полю

### О намагничивании вещества

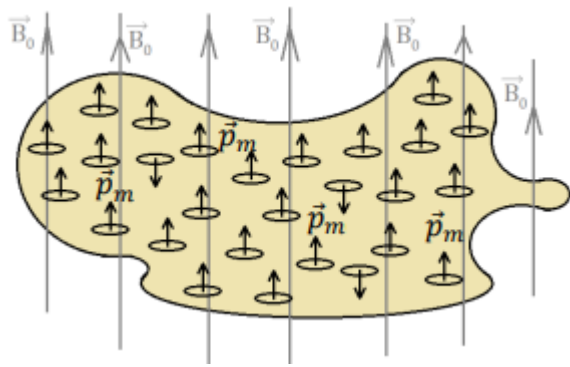
Когда нет внешнего магнитного поля, все орбиты электронов ориентированы  $\pm$  хаотически, и также хаотически движутся сами атомы в веществе (броуновское и тепловое движения)



Тогда можно считать, что итоговый магнитный момент равен нулю:

$$\sum \vec{p}_{m_i} = 0$$

Однако при появлении внешнего поля, как я уже упоминал, возникают моменты сил, стремящиеся повернуть магнитные моменты параллельно полю



В таком случае магнитные моменты частично или полностью ориентируются, из-за чего нарушается компенсация:

$$\sum \vec{p}_{m_i} \neq 0$$

И возникает новое магнитное пол  $\vec{B}'$ . В таких случаях говорят, что **вещество намагничено**. *Вещества, способные намагничиваться называются Магнетиками*

## Классификация магнетиков

Большинство веществ слабо намагничиваются во внешнем поле:

- Диамагнетики - **немного ослабляют внешнее поле**.  $\sum \vec{p}_{m_i} \uparrow \downarrow \vec{B}_0 \Rightarrow \vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$
- Парамагнетики - **немного усиливают внешнее поле**  $\sum \vec{p}_{m_i} \uparrow \uparrow \vec{B}_0 \Rightarrow \vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$

Однако очень редко встречаются вещества, способные усиливать  $\vec{B}_0$  очень сильно - **ферромагнетики**. Среди них:

- Железо
- Никель
- Кобальт
- Многие их сплавы
- И т.д.

## Терминология магнитных полей

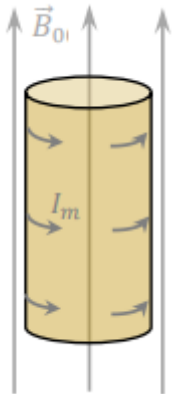
- **Микроскопическое поле** - поле, возбуждаемое частицами внутри и вблизи атомов и молекул вещества
- **Макроскопическое поле** - получается из микроскопического усреднением по физически бесконечно малым объёмам пространства. Индукция макроскопического поля обозначается  $\vec{B}$
- **Молекулярные токи** - то самое приближение того, что электрон, крутящийся по замкнутой орбите считается током. Это приближение и получило такое название
- **Макроскопические токи** - результат сложения молекулярных токов, которые и определяют  $\vec{B}$ . Эти токи в *теории магнетизма* получили название "**токи намагничивания**"
- Токи разделяются на:

- *токи намагничивания*
- *токи проводимости* - токи, текущие по проводникам и связанные с перемещением в них свободных зарядов – носителей тока

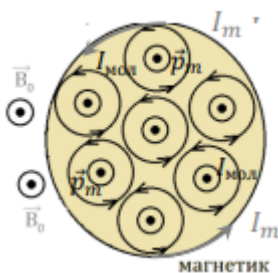
## Поведение магнетика определенной формы в случае с однородной поляризацией

*Не спрашивайте, что значит этот заголовок, я сам не до конца раскурил*

Рассмотрим однородный магнетик в форме цилиндра. Направим однородное поле вдоль этого цилиндра магнетика



Если рассмотреть молекулярные токи такой системы, то оказывается, что *токи соседних молекул в местах их соприкосновения текут в противоположные стороны и макроскопически компенсируют друг друга* (так как они направлены в противоположных направлениях)



Однако видно, что токи на самом краю уже ничто не компенсирует эти молекулярные токи. Эти токи складываются в *макроскопический поверхностный ток* - или *ток намагничивания  $I_m$* , циркулирующий по поверхности цилиндра

Это значит, что в случае с *однородной поляризацией в объеме магнетика ток намагничивания не течет*. Для *неоднородной поляризации ток намагничивания будет и в объеме*

## Как характеризовать намагниченность

Величиной, характеризующей намагниченность магнетика, является вектор  $\vec{J}$  – вектор намагничивания (или просто намагниченность), определяют через суммарный магнитный момент единицы объема магнетика

$$\vec{J} = \frac{d\vec{p}_m}{dV}$$

В случае однородного магнитного поля:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{V} = \frac{N \cdot \langle \vec{p}_m \rangle}{V} = n \cdot \langle \vec{p}_m \rangle,$$

Где  $\langle \vec{p}_m \rangle$  - это средний магнитный момент молекулы.

Размерность намагниченности

$$[J] = \frac{[p_{mi}]}{V} = \frac{A \cdot m^2}{m^3} = \frac{A}{m}$$

- Ампер на метр

Для стационарного случая циркуляция вектора намагничивания по произвольному контуру  $\Gamma$ , выбранному в магнетике, равна алгебраической сумме токов намагничивания, охватываемых этим контуром (интегральная форма):

$$\oint_{\Gamma} \vec{J} \cdot d\vec{l} = I_m$$

Применив формулу Стокса из прошлых билетов можно получить локальную форму:

$$\oint_{\Gamma} \vec{J} \cdot d\vec{l} = \int_{S_{\Gamma}} \text{rot } \vec{J} \cdot d\vec{S}.$$

Правую часть можно переписать, выразив ток намагничивания, охватываемый этим контуром, через его плотность:

$$I_m = \int_{S_{\Gamma}} \vec{j}_m \cdot d\vec{S}.$$

$$\int_{S_{\Gamma}} \text{rot } \vec{J} \cdot d\vec{S} = \int_{S_{\Gamma}} \vec{j}_m \cdot d\vec{S}$$

Или, поскольку полученное выражение справедливо для любых контуров и любых поверхностей, опирающихся на них:

$$\text{rot } \vec{J} = \vec{j}_m$$

- плотность тока намагничивания равна ротору вектора намагничивания в той же точке пространства.

**АХТУНГ:** Свойства поля вектора  $\vec{J}$ , которые мы выразили интегральным и дифференциальным выражениями, не означают, что поле вектора намагничивания определяется только токами намагничивания. Поле вектора  $\vec{J}$  (существующее внутри магнетика) зависит от всех токов – как от тока намагничивания  $I_m$ , так и от тока

проводимости  $I$ . Токи намагничивания (или их плотности) определяют лишь циркуляцию (или ротор) вектора намагничивания