

**ШИРОКАЯ**  
**Алена Алексеевна**

бакалавриат, Петрозаводский государственный университет  
(Петрозаводск, Россия),  
[voplik2002@gmail.com](mailto:voplik2002@gmail.com)

## РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА

**Научный руководитель:**

Казакова Елена Лионовна

**Рецензент:**

Заваркина Елена

Александровна

Статья поступила: 14.06.2023;

Принята к публикации: 28.09.2023;

Размещена в сети: 30.09.2023.

**Аннотация.** В данной статье исследуется становление теории о природе ферромагнетизма. В рамках классической физики можно лишь описать и качественно объяснить свойства ферромагнетиков, опираясь на знание об их доменной структуре. Исчерпывающее же представление о ферромагнетизме невозможно без понятия спина. Таким образом, говорить о данном явлении можно лишь с позиции квантовой теории.

**Ключевые слова:** ферромагнетизм, спин электрона, гиромагнитное отношение, магнитные домены, обменное взаимодействие

**Для цитирования:** Широкая А. А. Развитие представлений о природе ферромагнетизма // StudArctic Forum. 2023. Т. 8, № 3. С. 80–85.

Ферромагнетики — это вещества, способные сильно намагничиваться во внешнем магнитном поле и сохранять свою намагниченность в его отсутствии. В отличие от диа- и парамагнетиков, ферромагнетизм присущ только твердым веществам, в кристаллическую решетку которых входят атомы с недостроенными  $d$  или  $f$  оболочками. К веществам с подобной конфигурацией относят переходные металлы (железо Fe, никель Ni, кобальт Co и т.п.) и их сплавы, а также редкоземельные металлы (гадолиний Gd, гольмий Ho, диспрозий Dy и т.п.). Доменная структура ферромагнетиков определяет их уникальные свойства. Магнитный домен – это микрообласть спонтанного намагничивания. В пределах домена магнитные моменты атомов сонаправлены.

Процесс экспериментального изучения свойств ферромагнетиков и последующее построение теории ферромагнетизма неразрывно связаны с историей развития физики в целом и с зарождением квантовой физики в частности. Именно поэтому целью работы предполагается ретроспективный анализ развития представлений о природе ферромагнетизма.

Рассмотрим основные свойства ферромагнетиков, которые были установлены экспериментально.

1. Нелинейный вид зависимости намагниченности  $J$  ферромагнетика от напряженности магнитного поля  $H$  и достижение насыщения  $J$  (рис. 1). При многократном увеличении данной кривой можно заметить ее неоднородность. Этот эффект впервые был обнаружен Г. Баркгаузеном в 1919 г.

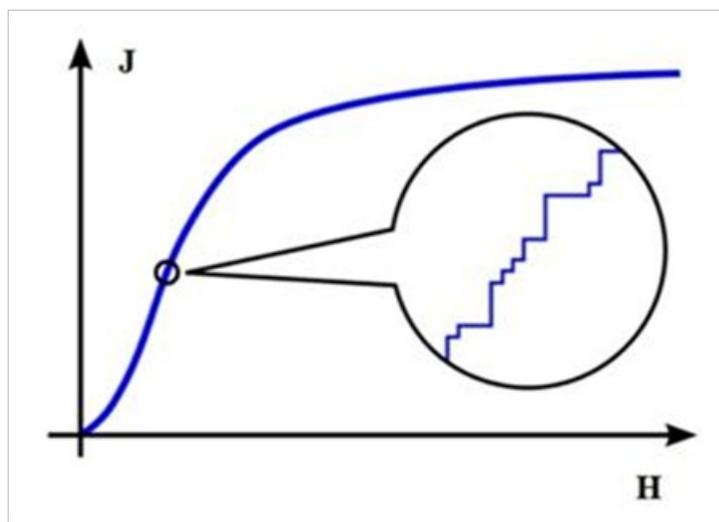


Рис. 1. Зависимость намагниченности  $J$  от напряженности магнитного поля  $H$

2. Нелинейная зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнетика от величины напряженности  $H$  магнитного поля, приложенного к веществу (рис. 2). В 1872 – 1878 гг. А.Г. Столетов исследовал намагничивание колец из разных сортов железа. Он обнаружил, что магнитная проницаемость для каждого из них в зависимости от приложенного поля сначала росла, а после достижения некоторого предельного значения резко уменьшалась. На основе этого ряда экспериментов им была построена зависимость относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от  $H$ , названная впоследствии кривой Столетова. Так, например, для стали максимальное значение  $\mu = 100$ , а для сплава метгласа (англ. Metglas) значение  $\mu$  может достигать  $10^6$ .

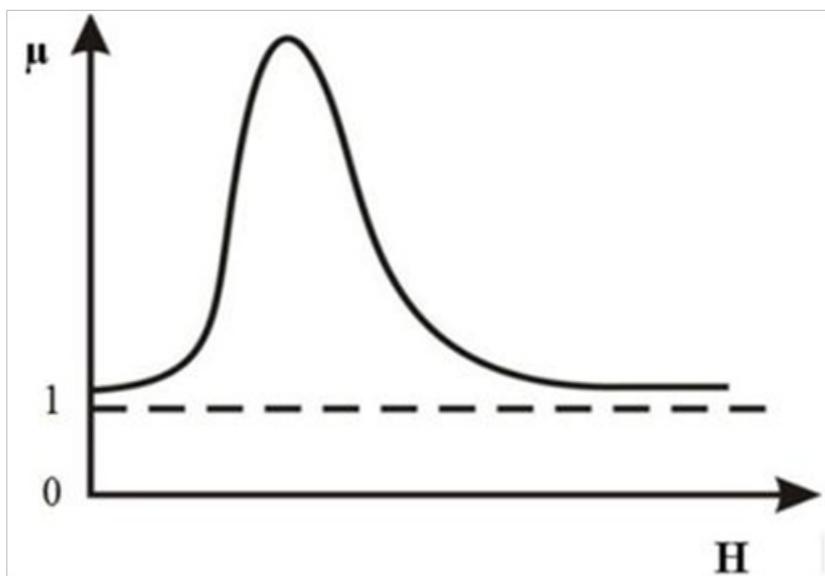


Рис. 2. Зависимость относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от напряженности  $H$  магнитного поля (кривая Столетова)

3. Наличие остаточной намагниченности. Обусловлено ее существование тем, что даже в отсутствие приложенного магнитного поля некоторые домены остаются ориентированы по полю, ранее вызвавшему их поворот. Отсюда вытекает еще одно свойство ферромагнетика – существование коэрцитивной силы  $H_c$ , т. е. величины магнитного поля  $H$ , которое нужно приложить для полного размагничивания вещества. Наглядно эти две величины можно представить на графике зависимости магнитной индукции  $B$

ферромагнитного образца от величины приложенного магнитного поля  $H$  при перемагничивании образца (рис. 3). Данная кривая, называемая также петлей гистерезиса, впервые была получена Э. Варбургом в 1880 г.

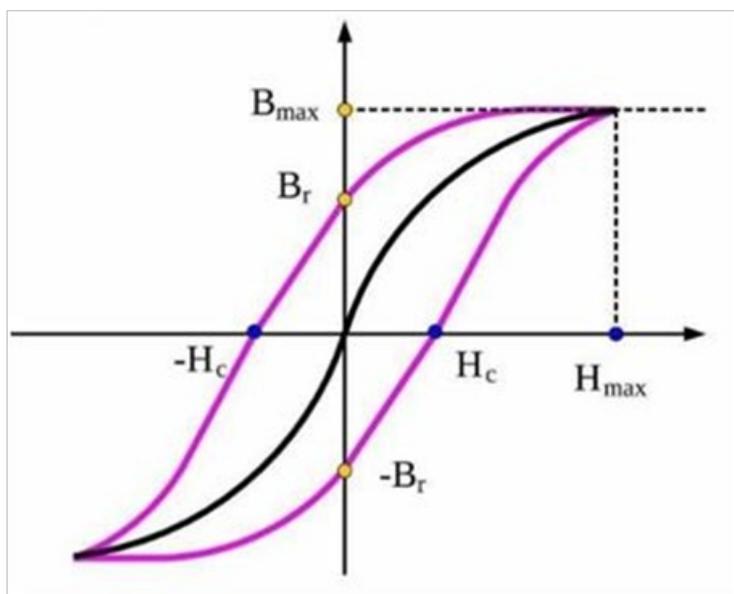


Рис. 3. Петля гистерезиса.  $B_{\max}$  - максимальная магнитная индукция,  $H_{\max}$  - напряженность магнитного поля при насыщении

4. Наличие температуры – точки Кюри, при переходе через которую ферромагнетик становится парамагнетиком, то есть испытывает фазовый переход второго рода. Закон был установлен П. Кюри и П. Вейссом в 1907 году. В пределах каждого отдельно взятого домена ферромагнетика намагниченность обращается в ноль вследствие дезориентирующего теплового движения молекул. Это свойство является ярким подтверждением того, что ферромагнетизм присущ только веществам в твердом кристаллическом состоянии и зависит от кристаллической структуры, которая может изменяться при различных воздействиях.

В начале XX века были предприняты попытки построения первой количественной теории ферромагнетизма. В 1907 году П. Вейсс выдвинул гипотезу о том, что внутри объема ферромагнетиков находятся микрообласти, спонтанно намагниченные до насыщения и ориентированные различным образом [Киттель : 456]. Он также предположил, что атомы ферромагнетиков, как и атомы парамагнетиков, обладают магнитными моментами и взаимодействуют между собой с силами, зависящими от угла между этими моментами. Данные силы стремятся установить магнитные моменты соседних атомов параллельно друг другу. Согласно этой теории силы взаимодействия между атомами формально сводятся к некоторому «эффективному» магнитному полю, которое и ориентирует атомы ферромагнетика. Это «эффективное» поле складывается из внешнего магнитного поля некоторого гипотетического «молекулярного» поля магнитной природы [Тамм : 324]. Вейссу в рамках своей теории удалось объяснить некоторые свойства ферромагнетиков, например, спонтанную намагниченность ферромагнетика и существование температуры Кюри.

В дальнейшем проверка теории Вейсса показала, что ферромагнетизм не может быть объяснен только магнитным взаимодействием атомов. А опыт, поставленный в 1927 г. Я.Г. Дюфманом, доказал, что молекулярное поле, ориентирующее атомы ферромагнетика, не может быть магнитной природы.

В 1915 году при исследовании гиромангнитных явлений А. Эйнштейн и В. де Гааз поставили следующий опыт. Свободно подвешенный на тончайшей кварцевой нити

железный стержень вращался при его намагничивании в магнитном поле соленоида, внутрь которого он был помещен. Угол поворота стержня определялся при помощи специальной шкалы и падающего на нее светового «зайчика» от зеркала, закрепленного на нити. По известным параметрам установки и фиксируемому углу поворота рассчитывался момент импульса стержня  $L$  и его намагниченность  $J$ . В ходе данного эксперимента было получено значение гиромагнитного отношения (через отношение  $J$  к  $L$ ), которое оказалось в два раза больше теоретического, т.е. гиромагнитного отношения для орбитального движения электрона [Тамм : 319].

Объяснить расхождение теории с экспериментом удалось О. Штерну и В. Герлаху. В 1922 году они исследовали прохождение пучка атомов серебра сквозь неоднородное магнитное поле. Пучок расщепился на два потока, отклонившихся от изначального направления на равные расстояния в противоположные стороны [Мартинсон : 299]. Таким образом, опыт привел к появлению гипотезы о наличии у электрона собственного механического момента – спина, имеющего квантовую природу. Наличие у электрона именно этой характеристики позволило выяснить причину различия результатов эксперимента Эйнштейна – де Гааза и теоретического значения гиромагнитного отношения, а именно то, что ферромагнетизм обусловлен наличием у атома спинового магнитного момента.

Становление теории ферромагнетизма неразрывно связано с зарождением и развитием квантовой физики. Оказывается, что ферромагнитные свойства проявляются лишь у кристаллических тел, в которых возникают обменные силы, имеющие квантовую природу. Впервые идея об обменном взаимодействии была высказана в 1928 г. Я.И. Френкелем и В. Гейзенбергом (независимо друг от друга) для объяснения физической природы молекулярного поля Вейсса. Обменные силы действуют на расстояниях порядка атомных. Под их действием и при определенных условиях, относящихся к электронному строению атомов, структуре кристаллической решетки и т. п., спиновые магнитные моменты электронов располагаются в одном направлении параллельно друг другу, так как данное состояние характеризуется минимумом полной энергии системы [Ландау : 285]. Образцу в целом быть намагниченным энергетически невыгодно и поэтому он разбивается на микрообласти спонтанного намагничивания – домены.

Реальность существования доменов была впервые подтверждена в опыте Баркгаузена (1919 г.). Сущность эксперимента состояла в том, чтобы зафиксировать скачкообразное изменение намагниченности образца, помещенного в непрерывно увеличивающееся магнитное поле, которое происходило из-за неоднородного смещения границ доменов. Возникавшие благодаря этому импульсы тока вызывали шум и отдельные щелчки, регистрировавшиеся телефоном. В 1932 году благодаря методу порошковых фигур (концентрация магнитного порошка вдоль стенок доменов) данные области ферромагнетика даже удалось пронаблюдать [Кандаурова : 34]; [Киттель : 511]. На рис. 4 при помощи метода порошковых фигур показан процесс ориентации доменов по полю.

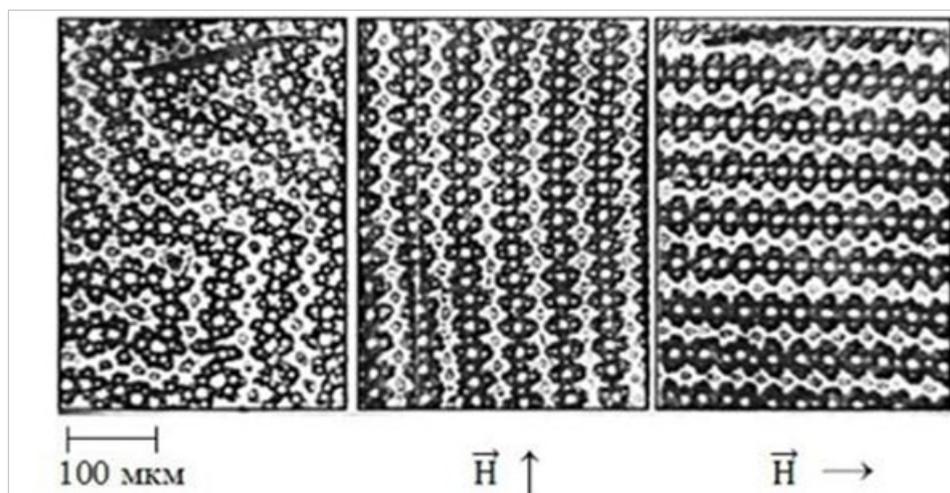


Рис. 4. Доменная структура на одном и том же участке магнитоодноосного массивного кристалла в исходном состоянии и после намагничивания до насыщения в направлениях, указанных стрелками [Кандаурова : 38]

Благодаря квантовой теории можно также объяснить наличие точки Кюри. В 1937 г. Л.Д. Ландау показал, что фазовые переходы второго рода связаны с изменением симметрии системы. Ферромагнетики с температурой выше температуры перехода, как правило, обладают более высокой симметрией. В магнетике спиновые моменты выше точки Кюри ориентированы хаотически, и одновременное вращение всех спинов вокруг одной оси на одинаковый угол не изменяет свойств системы. Ниже точки перехода спины имеют некоторую преимущественную ориентацию, и одновременный их поворот меняет направление магнитного момента системы [Дубнищева : 306].

Таким образом, в данной работе был проведен ретроспективный анализ развития теории ферромагнетизма. Он возможен только в рамках квантовой физики и на сегодняшний день не является полностью завершенным. Однако с развитием экспериментальных методов изучения строения вещества расширяются и возможности изучения доменной структуры. Например, метод лоренцевской электронной микроскопии позволяет наблюдать домены в тонких магнитных пленках.

Ферромагнетики активно применяются в различных областях науки и техники, особенно в микро- и нанoeлектронике. Продолжается создание и изучение новых ферромагнитных материалов, например, ферромагнитных пленок, на основе которых производятся запоминающие и логические устройства [Магнитные материалы : 71]. Опыт создания твердотельной памяти на основе ферромагнетиков показал, что благодаря им можно значительно снизить энергопотребление. Именно поэтому ферромагнетизм, индуцируемый в «немагнитных» материалах, можно по праву назвать одним из приоритетных направлений дальнейших исследований [Jeff : 2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. Москва: Академия, 2008. 608 с.

Кандаурова Г.С. Хаос, порядок и красота в мире магнитных доменов // Известия Уральского федерального университета. 1997. № 5. Вып. 1. С. 31-52. URL: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/23504/1/iurp-1997-05-06.pdf> (дата обращения 02.04.2023).

Киттель К. Физическая теория доменной структуры ферромагнетиков // Успехи физических наук. 1950. Т. 41, вып. 4. С. 452–544.

Ландау Л.Д. Курс теоретической физики / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. 6-е изд., испр.

Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т. 3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). 800 с.

Магнитные материалы микро- и наноэлектроники / А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк, Н.К. Душутин, Ю.В. Ясюкевич. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 147 с.

Мартинсон Л.К. Квантовая физика / Л.К. Мартинсон, Е.В. Смирнов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. Т. 5: Физика в техническом университете. 390 с.

Тамм И.Е. Основы теории электричества. Москва: Наука, 1966. 624 с.

Jeff W. Voltage-induced ferromagnetism in a diamagnet. New York: Science Advances, 2020. Vol. 6 (31). DOI: 10.1126/sciadv.abb7721.

## EVOLUTION OF IDEAS ABOUT THE NATURE OF FERROMAGNETISM

**Scientific adviser:**

Elena L. Kazakova

**Reviewer:**

Elena Zavarkina

Paper submitted on: 06/14/2023;

Accepted on: 09/28/2023;

Published online on: 09/30/2023.

**Abstract.** This article examines the formation of the theory of the nature of ferromagnetism. With the help of classical physics one can only depict and qualitatively explain the properties inherent in ferromagnets based on the knowledge of magnetic domains. A comprehensive view of ferromagnetism is impossible without the concept of spin. Thus, ferromagnetism can be fully described only from the standpoint of quantum theory.

**Keywords:** ferromagnetism, electron spin, gyromagnetic ratio, magnetic domains, exchange interaction

**For citation:** Shirokaya, A. A. Evolution of Ideas About the Nature of Ferromagnetism. *StudArctic Forum*. 2023, 8 (3): 80–85.

### REFERENCES

- Dubnishcheva T.Ya. *Concepts of modern natural science*. Moscow, Akademy, 2008, 608 p. (In Russ.)
- Kandaurova G.S. Chaos, order and beauty in the world of magnetic domains. *Izvestia. Ural Federal University Journal*, 1997, Vol. 5, No. 1, pp. 31-52. URL: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/23504/1/iurp-1997-05-06.pdf> (Accessed: 02.04.2023) (In Russ.)
- Kittel K. Physical theory of the domain structure of ferromagnets. *Advances in Physical Sciences*, 1950, Vol. 41, No. 4, pp. 452–544. (In Russ.)
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Course of theoretical physics*. Moscow, FIZMATLIT, 2004, Vol. 3: Quantum mechanics (non-relativistic theory), 800 p. (In Russ.)
- Semenov A.L., Gavriluk A.A., et. al. *Magnetic materials of micro- and nanoelectronics*. Irkutsk, ISU, 2012, 147 p. (In Russ.)
- Martinson L.K., Smirnov E.V. *Quantum physics*. Moscow, BMSTU, 2002, Vol. 5: Physics at technical universities, 390 p. (In Russ.)
- Tamm I.E. *Fundamentals of the theory of electricity*. Moscow, Nauka, 1966, 624 p. (In Russ.)
- Jeff W. *Voltage-induced ferromagnetism in a diamagnet*. New York, Science Advances, 2020, Vol. 6 (31). DOI: 10.1126/sciadv.abb7721.