

УДК 537.622.3-022.532:543.422.3-74

© А. И. Жерновой

## КВАНТОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА, СОЗДАВАЕМОГО НАНОЧАСТИЦЕЙ МАГНЕТИТА

В работе проверяется гипотеза, что наночастица магнетита, имеющая минимальный измеренный магнитный момент  $P_{\text{мин}} = 10^{-19} \text{ Ам}^2$ , создает минимальный магнитный поток  $\Phi$ , равный кванту магнитного потока  $f = h / (2e)$ . Для проверки по формуле, связывающей магнитный поток  $\Phi$  и магнитный момент  $P$  соленоида длиной  $L$  —  $\Phi = P\mu_0 / L$ , — получено, что толщина сверхпроводящих контуров, по которым циркулируют токи электронов, создающие  $P_{\text{мин}}$  и  $f$ , составляет 0.75 атомного радиуса иона  $\text{Fe}^{+2}$ . Это согласуется с теорией Нееля, что магнитные свойства магнетита создают электроны ионов  $\text{Fe}^{+2}$ .

*Кл. сл.:* наночастица магнетита, магнитный момент, магнитный поток, квантование

### ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих наших работах [1–3] методом ИК-спектроскопии обнаружена дискретность магнитных моментов наночастиц магнетита, и был измерен минимальный магнитный момент  $P_{\text{мин}} = 10^{-19} \text{ Ам}^2$  [4]. Было предположено, что дискретность магнитного момента наночастицы связана с квантованием ее магнитного потока при комнатной температуре и что минимальному магнитному моменту наночастицы сопутствует минимальный магнитный поток, равный кванту магнитного потока  $f = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Тл}$ . Из опытов Джозефсона и квантового эффекта Холла известно, что квантуется магнитный поток, создаваемый током, протекающим по сверхпроводящему контуру. Так как токи, создающие магнитные моменты атомов, не затухают, можно считать, что они протекают по сверхпроводящим контурам и поэтому могут создавать квантующиеся магнитные потоки.

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КОНТУРЫ КАК ИСТОЧНИКИ СОЗДАВАЕМОГО НАНОЧАСТИЦЕЙ МАГНИТНОГО МОМЕНТА И МАГНИТНОГО ПОТОКА

В работе [5] при описании элементарных круговых токов электронов, создающих магнитное поле в ферромагнетиках, использовано понятие "магнитного слоя", по которому эти токи циркулируют. Так как элементарные круговые токи не затухают, можно считать, что магнитный слой в кристаллах ферромагнетиков является сверхпроводящим. По аналогии можно предположить, что источником создаваемого наночастицей магнитного потока так же являются сверхпроводящие маг-

нитные слои или магнитные контура, по которым циркулируют незатухающие токи электронов незаполненных оболочек атомов материала наночастицы, и что при достижении наночастицей в процессе химического синтеза критического размера  $L = L_0$  в ней возникает магнитный поток  $\Phi$ , имеющий минимальное возможное значение, равное кванту магнитного потока  $f = h / (2e) = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ , и минимальный магнитный момент  $P_{\text{мин}}$ . Для подтверждения этой гипотезы рассчитаем значение  $\Phi$  при минимальном измеренном значении магнитного момента наночастицы  $P_{\text{мин}}$  и сравним его с  $f$ .

### ОЦЕНКА МАГНИТНОГО ПОТОКА $\Phi$ , СОЗДАВАЕМОГО НАНОЧАСТИЦЕЙ, ИМЕЮЩЕЙ МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ $P_{\text{мин}}$

Рассчитаем значение магнитного потока  $\Phi$  внутри наночастицы при минимальном значении магнитного момента наночастицы  $P_{\text{мин}} = 10^{-19} \text{ Ам}^2$ . Представим участок сверхпроводящего магнитного контура, по которому в наночастице протекает круговой ток электронов  $J$ , полым цилиндром с площадью поперечного сечения  $S$  и длиной  $L$ , равной толщине сверхпроводящего слоя. Такой цилиндр, по боковой поверхности которого протекает ток  $J$ , имеет магнитный момент  $P_J = J \cdot S \text{ Ам}^2$ , напряженность магнитного поля внутри  $H = (J / L) \text{ А/м}$  и создает магнитный поток  $\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot S = \mu_0 \cdot J \cdot S / L = \mu_0 P_J / L$ . Если в эту формулу вместо магнитного момента кругового тока  $P_J$  подставить суммарный магнитный момент  $P$  всех круговых токов наночастицы, то получим магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый всеми круговыми токами наночастицы:  $\Phi = \mu_0 P / L$ . Здесь  $L$  —

эффективная толщина сверхпроводящего магнитного слоя, по которому протекают круговые токи. В наночастице магнетита магнитный поток создают магнитные моменты ионов  $\text{Fe}^{+2}$ , расположенных в узлах подрешетки С кристаллической решетки. Можно предположить, что подрешетка С выполняет функцию сверхпроводящего магнитного слоя, а толщина подрешетки С и толщина сверхпроводящего магнитного слоя  $L$  сравнимы между собой. Исходя из этого, чтобы оценить  $L$  и найти создаваемый наночастицей магнитный поток при магнитном моменте  $P_{\text{мин}}$ , нужно определить толщину подрешетки С.

### СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ МАГНЕТИТА

В кристаллической ячейке магнетита, согласно [6], имеется 8 ионов  $\text{Fe}^{+3}$ , расположенных тетраэдрически (между 4 ионами  $\text{O}^{-2}$ ), и 8 ионов  $\text{Fe}^{+3}$ , расположенных октаэдрически (между 8 ионами  $\text{O}^{-2}$ ). Тетраэдрические и октаэдрические ионы  $\text{Fe}^{+3}$  составляют подрешетки А и В. Имеется также 8 расположенных октаэдрически ионов  $\text{Fe}^{+2}$ . Эти ионы составляют подрешетку С. По теории Нееля [6], между ионами внутри подрешеток А, В, С существует ферромагнитное обменное взаимодействие, приводящее к параллельной ориентации их спиновых магнитных моментов внутри подрешеток; между ионами подрешеток А и В существует антиферромагнитное обменное взаимодействие, приводящее к антипараллельной ориентации и взаимной компенсации их суммарных спиновых магнитных моментов, а между ионами подрешеток В и С существует обменное взаимодействие, приводящее к параллельной ориентации их суммарных спиновых магнитных моментов. В результате магнитный момент наночастицы равен суммарному спиновому магнитному моменту электронов ионов  $\text{Fe}^{+2}$ , находящихся в подрешетке С, выполняющей функцию сверхпроводящего магнитного слоя, по которому протекают круговые токи, создающие магнитный момент и магнитный поток наночастицы. Оценим толщину подрешетки С.

### СРАВНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОДРЕШЕТКИ С С АТОМНЫМ РАДИУСОМ ИОНА $\text{Fe}^{+2}$

Как уже говорилось, в элементарной ячейке магнетита [6] имеются две подрешетки (А и В) с ионами  $\text{Fe}^{+3}$  и одна подрешетка (С) с ионами  $\text{Fe}^{+2}$ , расположенными между ионами кислорода  $\text{O}^{+2}$ . Из того, что расстояние между двумя соседними кристаллическими плоскостями, на которых располагаются разные ионы, равно

сумме атомных радиусов этих ионов, следует, что на длине  $l$  элементарной ячейки магнетита уместятся 6 атомных радиусов кислорода, 4 атомных радиуса железа  $\text{Fe}^{+3}$  и 2 атомных радиуса железа  $\text{Fe}^{+2}$ . Согласно [7], атомный радиус кислорода равен  $7.3 \cdot 10^{-11}$  м, железа  $\text{Fe}^{+3}$  —  $7.4 \cdot 10^{-11}$  м и железа  $\text{Fe}^{+2}$  —  $8.4 \cdot 10^{-11}$  м [7]. При этом размер кристаллической ячейки магнетита получается равным  $l = (6 \cdot 7.3 + 4 \cdot 7.4 + 2 \cdot 8.4) \times 10^{-11}$  м =  $(43.8 + 29.6 + 16.8) \cdot 10^{-11}$  м = 0.9 нм, что практически совпадает с табличным значением  $l = 0.84$  нм [6]. Это совпадение подтверждает, что толщины подрешеток А, В, С магнетита близки к удвоенным атомным радиусам содержащихся в них ионов. Следовательно, толщину подрешетки С можно принять равной удвоенному атомному радиусу иона  $\text{Fe}^{+2}$ , т. е. равной 0.168 нм.

### ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТНОГО СЛОЯ, ПРИ КОТОРОЙ КВАНТУЕТСЯ МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Если толщину  $L$  сверхпроводящего магнитного слоя ионов  $\text{Fe}^{+2}$ , в котором движутся электроны, принять равной половине толщины подрешетки С, т. е. равной атомному радиусу иона  $\text{Fe}^{+2}$ , то подставив  $L = 8.4 \cdot 10^{-11}$  м и  $P_{\text{мин}} = 10^{-19}$  Ам<sup>2</sup> в выражение для магнитного потока наночастицы, получаем магнитный поток  $\Phi = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-19} / (8.4 \times 10^{-11}) = 1.5 \cdot 10^{-15}$  Вб, который на 30 % меньше кванта магнитного потока. Если же принять толщину  $L$  сверхпроводящего магнитного слоя равной 0.75 атомного радиуса железа  $\text{Fe}^{+2}$ , т. е.  $L = 6.3 \cdot 10^{-11}$  м, то магнитный поток, создаваемый наночастицей, получается равным кванту магнитного потока  $f = h / (2e) = 2 \times 10^{-15}$  Вб.

Таким образом, магнитный поток наночастицы равен одному кванту, если толщина слоя, в котором циркулируют 3d-электроны ионов  $\text{Fe}^{+2}$ , создающие квант магнитного потока наночастицы, составляет 0.75 от атомного радиуса иона  $\text{Fe}^{+2}$ .

### РАЗМЕР НАНОЧАСТИЦЫ, СОЗДАЮЩЕЙ ОДИН КВАНТ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Наночастица, создающая один квант магнитного потока, имеет измеренный методом ИК-спектроскопии минимальный магнитный момент  $P_{\text{мин}} = 10^{-19}$  Ам<sup>2</sup>. Разделив  $P_{\text{мин}}$  на удельный магнитный момент магнетита  $P_{\text{уд}} = 4.8 \cdot 10^5$  Ам<sup>2</sup> [8], получаем объем наночастицы  $V = (P_{\text{мин}} / P_{\text{уд}}) = 0.21 \cdot 10^{-19-5} = 0.21 \cdot 10^{-24}$  м<sup>3</sup>, откуда находим минимальный диаметр магнитной сферической наночастицы из магнетита  $d = (6V / \pi)^{0.33} = (0.4)^{0.33} \cdot 10^{-8} = 7.4$  нм. Этот диаметр в несколько раз больше указанного в [8] ориентировочного

минимального размера магнитной наночастицы, равного 1–2 нм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из материала, изложенного в настоящей статье, можно сделать вывод, что обнаруженная ранее дискретность магнитных моментов наночастиц является следствием квантования их магнитных потоков при комнатной температуре и что не может быть магнитных наночастиц из магнетита диаметром меньше 7.4 нм, т. к. создаваемый ими магнитный поток меньше одного кванта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Исследование инфракрасного спектра поглощения магнитной жидкости в магнитной поле // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 2. С. 60–63. URL: <http://213.170.69.26/mag/2016/full2/Art8.pdf>.
2. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Дискретность магнитных моментов однодоменных ферромагнитных наночастиц // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1. С. 72–76. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/full1/Art12.pdf>.
3. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Исследование структуры ИК-спектра ферромагнитных наночастиц в магнитном поле // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 61–65. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/full2/Art8.pdf>.
4. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Измерение магнитных моментов ферромагнитных наночастиц по положению линий ИК-спектра магнитной жидкости в магнитном поле // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 1. С. 37–44. URL: <http://213.170.69.26/mag/2018/full1/Art5.pdf>.
5. Калашиников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985. 576 с.
6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 366 с.
7. Лидин Р.А. Справочник по общей и неорганической химии. М.: КолосС, 2008. 350 с.
8. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)*

Контакты: Жерновой Александр Иванович,  
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 22.02.2018

## QUANTIZATION OF MAGNETIC FLOW CREATED BY NANOPARTICLE OF MAGNETITE

**A. I. Zhernovoy**

*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia*

Magnetic flow  $\Phi$  created by nanoparticle of magnetite possessing minimal observed magnetic moment  $P_{\min} = 10^{-19} \text{ Am}^2$  was estimated. Assuming thickness of layer in that circulated currents of electrons producing magnetic field to be 0.75 of atomic radius of ion of  $\text{Fe}^{+2}$ , we get value of  $\Phi$  to be equal to quantum of magnetic flow of  $2 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$ .

*Keywords:* nanoparticles of magnetite, magnetic moment, magnetic flow, quantization

### REFERENCES

1. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [Magnetic fluid in magnetic field infrared absorption spectra investigation]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 2, pp. 60–63. Doi: 10.18358/np-26-2-i6063. (In Russ.).
2. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [The discreteness of magnetic moments of single-domain ferromagnetic nanoparticles]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 1, pp. 72–76. Doi: 10.18358/np-27-1-i7276. (In Russ.).
3. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [The study of the infrared spectrum of a magnetic nanoparticles in a magnetic field structure]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 2, pp. 61–65. Doi: 10.18358/np-27-2-i6165. (In Russ.).
4. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [The measurement of magnetic moments of ferromagnetic nanoparticles by the positions of the lines of infra red spectra of a magnetic liquid in a magnetic field]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 1, pp. 37–44. Doi: 10.18358/np-28-1-i3744. (In Russ.).
5. Kalashnikov S.G. *Elektrichestvo* [Electricity]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 576 p. (In Russ.).
6. Kittel' Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to solid state physics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 366 p. (In Russ.).
7. Lidin R.A. *Spravochnik po obschey i neorganicheskoy khimii* [The reference manual in the general and inorganic chemistry]. Moscow, KolosS Publ., 2008. 350 p. (In Russ.).
8. Berkovskiy B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic liquids]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 240 p. (In Russ.).

Contacts: *Zhernovoy Aleksandr Ivanovich*,  
azhspsb@rambler.ru

Article received in edition 22.02.2018