

же гауссовой системой единиц.⁴ Единица названа в честь немецкого физика Карла Фридриха Гаусса (1777 – 1855). По-видимому, гаусс – маленькая единица, если, для того чтобы магнитное поле было сверхсильным, нужно поле индукцией в миллион гаусс. В Международной системе единиц (СИ) пользуются более крупной единицей для измерения магнитного поля – тесла (Тл): 1 Тл = 10^4 Гс. Эта единица получила название в честь Никола Тесла (1856 – 1943) – сербского ученого в области электро- и радиотехники.

Слово «сильный», а тем более «сверхсильный», имеет эмоциональную окраску. Словосочетание «сильное магнитное поле» вызывает в моей памяти рисунок из какой-то скорее всего научно-популярной книжки: магнитный подъемный кран поднимает автомобиль. Особенно большое впечатление на меня производил рисунок после того, как я понял, что магнетизм – квантовое свойство.⁵ «Квант», «квантовый» – эти термины воспринимались как нечто, относящееся к атому, к субатомной частице, а тут – магнит, да еще поднимает автомобиль! Однако оказывается, что магнит, способный удерживать тонну металла, должен создать отнюдь не сверхсильное магнитное поле: достаточно всего 10^4 Гс!

Теперь от магнитного подъемного крана перейдем к микроскопическим магнетикам – к электронам, протонам, нейтронам. Каждый из них создает вокруг себя свое магнитное поле. Мерой способности электрона создавать магнитное поле служит магнетон Бора, или магнитный момент электрона,

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 0,9 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс},$$

(заметим, что в единицах СИ в формуле отсутствует c), а магнитные моменты протона и нейтрона удобно

оценивать с помощью ядерного магнетона

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/Гс},$$

где m_p – масса протона. Ясно видно, что из-за сравнительно большой массы нуклона магнитные моменты протона и нейтрона во много раз меньше магнитного момента электрона. Есть интересные и важные явления, связанные с магнетизмом нуклонов, но наиболее существенную роль в физике магнитных явлений играют электроны. Такие явления, как ферро- и антиферромагнетизм, – электронно происхождения.

Как известно, при удалении от магнитного диполя созданное им магнитное поле убывает обратно пропорционально кубу расстояния от диполя. Правда, кроме того, магнитное поле зависит от направления по отношению к диполю (не надо забывать, что магнитный диполь – вектор, который характеризуется не только величиной, но и направлением). Выбрав направление таким, чтобы магнитное поле было максимальным, можно оценить величину магнитного поля на атомном расстоянии от электрона. Мерой атомного расстояния служит радиус Бора (см. *Бора радиус*)

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см},$$

тогда магнитное поле на расстоянии a_0 от электрона будет

$$B \sim \frac{\mu_e}{a_0^3} \sim 10^4 \text{ Гс}.$$

Скажем откровенно, эта величина мало что характеризует: магнитные поля, создаваемые отдельными микрочастицами, имеют, как правило, совершенно случайные направления; складываясь, они либо компенсируют друг друга, либо усиливают. Результат – какое магнитное поле создает тело и создает ли оно его на макроскопических расстояниях – зависит от строения тела, в состав которого входят микрочастицы.

Наличие у микрочастиц заряда e и магнитного момента μ делает их чувствительными (восприимчивыми) к магнитному полю. В магнитном поле \vec{B} на всякую заряженную движущуюся со скоростью \vec{v} частицу действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = \frac{e}{c} [\vec{v} \vec{B}].$$

(Заметим, что в СИ формула для силы Лоренца имеет другой вид: $\vec{F}_L = e[\vec{v} \vec{B}]$.) Под действием этой силы частица (для определенности, электрон) вращается в плоскости, перпендикулярной \vec{B} . Каждый вращающийся электрон обладает магнитным моментом, направленным против магнитного поля. Энергия движения электрона в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, квантуется. Разность энергий соседних уровней есть $e\hbar B / (m^* c)$. Но, кроме того, как мы уже говорили, электрон обладает собственным магнитным моментом. Собственный магнитный момент электрона μ_e ориентируется либо по магнитному полю, либо против. Разность энергий двух ориентаций равна $2\mu_e B = e\hbar B / (m_e c)$. Если m^* и m_e не слишком отличаются друг от друга, то величина $e\hbar B / (m_e c)$ может служить энергетической мерой воздействия магнитного поля на любую атомную систему. Если же $m^* \ll m_e$ (как мы говорили, такое бывает в некоторых полупроводниках и полуметаллах), то роль магнитного поля больше, чем можно было бы думать, руководствуясь оценкой, получаемой при использовании массы свободного электрона.

Основные силы, действующие между электронами и ядрами в атомах, – это силы электростатического притяжения и отталкивания. Им соответствует энергия порядка e^2/a . Каково должно быть магнитное поле, чтобы соответствующая ему энергия превышала электростатическую? Сравним $2\mu_e B$ и e^2/a , подставив значение борковского радиуса:

$$2\mu_e B > \frac{e^2}{a_0},$$

если

$$B > B_{\text{ат}} = \frac{m_e^2 e^3 c}{\hbar^3} = 2,35 \cdot 10^9 \text{ Гс(!)}.$$

Таким образом, сверхсильное магнитное поле должно существенно сказываться на структуре атомов, молекул, твердых тел.

Сделаем еще один шаг – в сторону больших магнитных полей. Запишем электростатическую энергию $e^2/a_0 = e^4 m_e / \hbar^2$ несколько иначе. Умножим числитель и знаменатель правой части последнего равенства

⁴ В этой статье автор использует гауссову систему единиц, незнакому большинству наших читателей. Эта система отличается от привычной СИ не только наименованиями и значениями единиц измерения физических величин, но иписанием многих формул. Однако мы решили в виде исключения сохранить привычную для автора и вообще для физиков-теоретиков систему единиц, чтобы читатель получил более глубокое представление о «кухне» теоретической физики. (Прим. ред.)

⁵ См. книгу М.И.Каганова и В.М.Цукерника «Природа магнетизма» (Библиотечка «Квант», выпуск 16, 1982 г.).