

## Как вращение превращается в магнетизм: эффекты Эйнштейна — де Хааса и Барнетта

Дата публикации: 10.06.2026

На первый взгляд вращение тела и его магнитные свойства кажутся совершенно разными явлениями. Одно относится к механике, другое — к электромагнетизму. Однако физика начала XX века показала, что между ними существует глубокая связь. Оказалось, что механический момент импульса может превращаться в магнитный момент, а изменение намагниченности способно вызывать вращение вещества. Эти удивительные эффекты получили названия эффекта Эйнштейна — де Хааса и эффекта Барнетта.

Сегодня они рассматриваются как два проявления одного фундаментального свойства материи — спина электрона. Спин можно представить как внутренний момент импульса элементарной частицы. Хотя электрон не вращается в буквальном смысле как миниатюрный шарик, его спин обладает одновременно механическими и магнитными характеристиками. Именно благодаря этому возникает связь между вращением и магнетизмом.

В 1915 году Альберт Эйнштейн и нидерландский физик Вандер Йоханнес де Хаас поставили эксперимент, который стал классикой физики. Они подвесили железный стержень на чрезвычайно тонкой нити и поместили его во внешнее магнитное поле. Когда направление намагниченности стержня изменялось, исследователи обнаружили неожиданное явление: образец начинал слегка поворачиваться вокруг своей оси.

На первый взгляд такое поведение выглядело странно. Однако объяснение оказалось связано с законом сохранения момента импульса. В ферромагнитном материале огромное количество электронных спинов ориентировано преимущественно в одном направлении. Каждый спин одновременно представляет собой крошечный магнит и носитель механического момента импульса.

Когда внешнее поле заставляет спины изменить ориентацию, меняется их суммарный момент импульса. Поскольку момент импульса должен сохраняться, часть этого изменения передается всему образцу. В результате железный стержень начинает вращаться. Так был открыт эффект Эйнштейна — де Хааса — превращение изменения намагниченности в механическое движение.

Практически одновременно американский физик Сэмюэль Барнетт обнаружил обратное явление. Он исследовал быстро вращающиеся

ферромагнитные образцы и обнаружил, что само механическое вращение способно вызывать намагниченность.

Если раскрутить ферромагнитный цилиндр вокруг своей оси, спины электронов начинают слегка выстраиваться вдоль направления вращения. В результате материал приобретает магнитный момент даже без внешнего магнитного поля. Это явление получило название эффекта Барнетта.

С точки зрения современной физики оба эффекта представляют собой разные стороны одного процесса. В первом случае изменение ориентации спинов приводит к вращению тела. Во втором вращение влияет на ориентацию спинов и создает магнитное поле. Именно поэтому эти явления называют магнитомеханическими эффектами.

Особую роль в их изучении сыграло гиромангнитное отношение — коэффициент, связывающий магнитный момент частицы с ее механическим моментом импульса. Измерения, выполненные в экспериментах Эйнштейна, де Хааса и Барнетта, показали, что свойства электронов невозможно полностью объяснить классической физикой.

Позже развитие квантовой механики привело к открытию спина электрона, который и оказался источником наблюдаемых эффектов. Таким образом, магнитомеханические эксперименты стали одними из первых косвенных доказательств существования квантовых степеней свободы, еще до того как была окончательно сформулирована современная теория элементарных частиц.

Спустя более ста лет интерес к этим эффектам не исчез. Напротив, развитие нанотехнологий открыло новые возможности для их изучения. В экспериментах 2025 года исследователи работают уже не с массивными металлическими стержнями, а с наночастицами размером всего несколько нанометров.

Для таких исследований используются оптические пинцеты, способные удерживать отдельные частицы с помощью лазерного излучения, а также сверхчувствительные магнитометры на основе NV-центров в алмазе. Эти дефекты кристаллической решетки позволяют регистрировать чрезвычайно слабые магнитные поля и наблюдать магнитомеханические процессы на уровне отдельных магнитных доменов.

Особенно перспективным считается применение эффекта Барнетта в технологиях хранения информации. Современные магнитные накопители обычно используют магнитные поля или электрические токи для записи данных, что сопровождается потерями энергии в виде тепла.

Магнитомеханические методы открывают альтернативный путь. Если

вращение наночастицы способно переключать направление ее намагниченности, информация может записываться механическим способом. В этом случае магнитная наночастица становится своеобразной бистабильной ячейкой памяти с двумя устойчивыми состояниями — намагниченность вверх и намагниченность вниз. Такие системы потенциально могут работать быстрее и потреблять меньше энергии.

Связь вращения и магнетизма оказывается важной не только в лабораториях, но и в космосе. Особенно интересным объектом для астрофизиков являются нейтронные звезды и пульсары. Эти компактные остатки взрывов сверхновых обладают огромной плотностью и способны вращаться с частотой до тысячи оборотов в секунду.

Эффект Барнетта предсказывает, что столь быстрое вращение должно способствовать формированию колоссальной намагниченности. В сочетании с другими физическими механизмами это помогает объяснить происхождение магнитных полей нейтронных звезд, которые могут достигать миллиардов тесла и значительно превосходят магнитные поля любых объектов, созданных человеком.

Существует и обратная связь. Изменение внутренней магнитной структуры нейтронной звезды способно влиять на распределение момента импульса внутри объекта. В некоторых случаях это проявляется в виде так называемых глитчей — внезапных скачков скорости вращения пульсаров, которые регулярно фиксируются астрономическими наблюдениями.

Эффекты Эйнштейна — де Хааса и Барнетта наглядно демонстрируют единство механики и электромагнетизма на квантовом уровне. Более века назад они стали важными экспериментальными подтверждениями существования спина электрона. Сегодня эти явления используются для разработки новых нанотехнологий и помогают понимать экстремальные процессы в нейтронных звездах. Они показывают, что фундаментальная физика начала XX века продолжает работать одинаково успешно как в лабораторных установках размером с нанометр, так и в самых мощных магнитных объектах Вселенной.