

О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ГИРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*О. Ауверс, Берлин **

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Почти столетие отделяет возникновение идеи Ампера о молекулярных токах от открытия гироскопической природы атома. Эта длительность объясняется не столько медленным, сколько поздним развитием атомистических представлений, которые начали успешно разрабатываться только в двадцатом столетии. Идея Ампера опередила свое время. Однако уже в прошедшем веке делались неоднократные попытки обнаружить гироскопический эффект на катушках, обтекаемых током, а также на магнитах; базой этих исследований служила идея Ампера и веберовская идея о инерции электрических зарядов. Общеизвестен безрезультатный опыт Клерка Максвелла, относящийся к 1861 г. в котором он пытался обнаружить инертность электричества в катушке, обтекаемой током. После изменений в атомистических представлениях (обусловленных развитием оптики), относящихся к моделям атома Ленарда, Резерфорда и Бора, попытки непосредственного доказательства гироскопической природы атома путем наблюдения магнитных и механических действий получили новый толчок, сказывающийся вплоть до настоящего времени. Следует отметить однако, что мысль о справедливости амперовской идеи уже давно была так сильна, что попытки рассмотреть проблему со стороны гироскопической, в сущности говоря, никогда не прекращались.

В большинстве руководств указываются только два гиромагнитных опыта, а годы 1914 и 1915 считаются годами, в которые гиромагнитный эффект был, наконец, обнаружен. В связи с этим следует напомнить, что сама идея и попытки доказательства ее правильности значительно старше. Сам Барнетт, которому мы обязаны первым успешным доказательством гироскопической природы магнитных атомов, указывал, что опыт Джона Перри, относящийся к 1890 г. и заключавшийся в безуспешной попытке изменения намагничивания железного стержня путем вращения его вокруг его оси, стал известен ему в 1896 или 1897 г., когда Барнетт прочел его книгу „Spinning Tops“. В 1909 г. у Барнетта снова возникла

* Naturwissensch., 23, 202, 1935. Перевод с нем. Н. Н. Малова.

эта идея и после длительных исследований ему удалось добиться результата. Если отвлечься от попытки Шустера (1911—1912) объяснить отклонение магнитного полюса земли от ее географического полюса, то можно считать справедливым, что намагничение при вращении называют обычно эффектом Барнетта.

Обратная идея — возникновение вращения при намагничении — была впервые высказана Ричардсоном в 1908 г. Ему же принадлежит безуспешная попытка обнаружить этот эффект, а также разработка его теории. Только в 1915 г. Эйнштейну и де-Гаазу удалось добиться положительного результата при помощи искусственного метода — метода резонанса. Их результаты не могли с точностью указать на знак эффекта и дали лишь качественное совпадение с теорией. Однако их цифры были довольно близки к тогдашним представлениям о траекториях электронов, оказавшимся, как известно, ошибочными.

Помимо этих двух или — если вместе с Барнеттом учесть эксперимент Максвелла — этих трех опытов, известна еще четвертая возможность обнаружения гиромангнитного эффекта, заключающаяся в том, что вместо вращения магнита в собственном или неподвижном внешнем поле используется вращение поля вокруг неподвижного магнита. Этот опыт можно рассматривать, как магнитную аналогию механического опыта Барнетта, в котором увлечение осей гироскопов вызывается не связью последних с телом, как целым, но обусловлено влиянием поля на отдельные элементарные магниты.

Этот опыт был произведен в 1921 г. Тонксом (работа не опубликована) и независимо от него Фишером (в 1922 г.); результаты обоих опытов были отрицательны. Однако эти опыты, как и исследования Барнетта, имеют то достоинство, что пытаются обнаружить гиромангнитный эффект элементарных магнитов косвенным путем, по наблюдению изменений намагничения. Этот искусственный метод позволяет найти выход из безнадежного положения, создавшегося после безуспешной попытки Максвелла обнаружить гироскопический эффект на магните как целом. В дальнейшем мы увидим, почему опыты с вращающимся полем (вместо вращающегося тела) приводят к отрицательным результатам.

Таким образом мы можем различать четыре отдельных гиромеханических опыта, из которых два дают положительные результаты и два — отрицательные:

1) Макроскопический эффект вращения, вызываемый и наблюдаемый на всем теле целиком (Максвелл, 1861).

2) Атомный гироэффект вращения элементарных магнитов, вызываемый вращением всего тела целиком и наблюдаемый на элементарных магнитах (Барнетт, 1909—1914).

3) Атомный эффект ориентировки осей элементарных магнитов, вызываемый воздействием на элементарные магниты и наблюдаемый на всем теле целиком (Ричардсон, Эйнштейн, де-Гааз, 1908—1915).

4) Атомный гироэффект вращения элементарных гиромангнитов, вызываемый вращением элементарных магнитов и на них же наблюдаемый (Тонкс, 1921; Фишер, 1922).

ТАБЛИЦА 1

Основы опытов, дающих непосредственное доказательство гироскопической природы атома при помощи наблюдения над механическими и магнитными воздействиями

№	Вращение	Ориентировка осей	Воздействие на	Наблюдения над	Описание эффекта	Исследователь	Год	Примечание
1	<i>K</i>	—	<i>K</i>	<i>K</i>	Ориентировка оси всего тела .	Максвелл	1861	1-е осн. явление, обр. 5
2	<i>E</i>	—	<i>K</i>	<i>E</i>	Продольное намагничение при вращении тела	Барнетт	1914	Атомн. анал. 1-го осн. явления, обр. 3
3	—	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>K</i>	Вращение тела при намагничении	Ричардсон-Эйнштейн-де-Гааз	1908 1915	Макроск. анал. 2-го осн. явления, обр. 2
4	<i>E</i>	—	<i>E</i>	<i>E</i>	Намагничение при вращении внешнего поля	Фишер	1922	Атомн. анал. 1-го осн. явления, обр. 8
5	—	<i>K</i>	<i>K</i>	<i>K</i>	Прецессия всего тела	—	—	Осн. явление 2, обр. 2
6	—	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	Диамагнитный эффект при намагничении	Ганс-Черлинский	1930 1932	Атомн. анал. 2-го осн. явления, обр. 4
7	—	<i>E</i>	<i>K</i>	<i>E</i>	Поперечное намагничение при поворачивании тела	—	—	Атомн. анал. 1-го осн. явления, обр. 3
8	<i>E</i>	—	<i>E</i>	<i>K</i>	Вращение тела при намагничении	—	—	Макроск. анал. 2-го осн. явления, обр. 4

Примечание. *K* — воздействие на тело, *E* — на элементарные магниты.

2. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПЫТОВ

Вышеприведенная схема позволяет сейчас же заключить, что имеется еще ряд возможностей, являющихся обращением указанных выше; однако, все они, хотя и по разным причинам, представляются

ТАБЛИЦА 2
Дополнение к табл. 1

	Вращение	Ориентировка осей	Воздействие на	Наблюдение над	Примечание
9	K	—	E	K	Невозможно
10	K	—	K	E	Совпадает со 2
11	K	—	E	E	Невозможно
12	—	K	E	K	Невозможно
13	—	K	K	E	Совпадает с 7
14	—	K	E	E	Невозможно
15	E	—	K	K	Совпадает с 1
16	—	K	K	K	Совпадает с 1

более или менее безнадежными. Отметим лишь четыре из них, относящиеся к опыту Максвелла и опыту Ричардсона — Эйнштейна, де-Гааза, а именно:

5) Макроскопический гироэффект ориентировки оси тела, вызываемый и наблюдаемый на теле целиком.

6) Атомный гироэффект ориентировки осей,* вызываемый и наблюдаемый на элементарных магнитах.

7) Атомный гироэффект ориентировки осей, вызываемый во всем теле и наблюдаемый на элементарных магнитах.

8) Макроскопический гироэффект вращения, вызываемый на элементарных магнитах и наблюдаемый на теле, как целом.

В табл. 1 сопоставлены все вышеуказанные возможности. По правилам перестановок полная схема должна содержать 16 эффектов. Четыре из них практически идентичны с указанными выше, другие же четыре не могут быть реализованы. В табл. 2, где K соответствует всему телу, а E — элементарному магниту, указаны эти 8 эффектов. Мы можем, таким образом, оставить эти эффекты без рассмотрения и считать табл. 1 достаточно полной.

Все 8 эффектов, содержащихся в табл. 1, могут быть сведены к двум основным гироскопическим опытам, которые на первый взгляд не имеют с магнитными явлениями ничего общего.

Представим себе гироскоп K , так закрепленным в своем центре тяжести, что он может свободно вращаться вокруг своей оси A , **

* Соответствующей вращению вокруг горизонтальной оси (см. ниже).

** В твердом телестрогое выполнение этого условия невозможно (см. А—3), так как при этом вообще невозможно будет никакое воздействие на тело целиком. С другой стороны, очень сильная связь в предельном случае уничтожит гироэффект. Однако важное для последующего отношение механического момента к магнитному оказывается независимым от неизвестной в деталях величины связи.

а также вокруг оси C , перпендикулярной A и проходящей через центр тяжести. Кроме того, пусть A может вращаться в плоскости чертежа вокруг горизонтальной оси B так, что угол Θ между A и C может изменяться. Наконец, B может вращаться вокруг оси C вместе с A (рис. 1).

На подобном гироскопе можно наблюдать два феноменологически различных основных явления.

1-е основное явление. Если попытаться (в то время как гироскоп K вращается вокруг оси A) медленно вращать A и B вокруг оси C („вращение“), т. е. создать момент относительно неподвижной в пространстве оси C , то ось волчка A будет сопротивляться связанному с этой попыткой изменению ее положения в пространстве и установится таким образом (почти в первоначальной плоскости), что угол Θ уменьшится, если направления вращения гироскопа

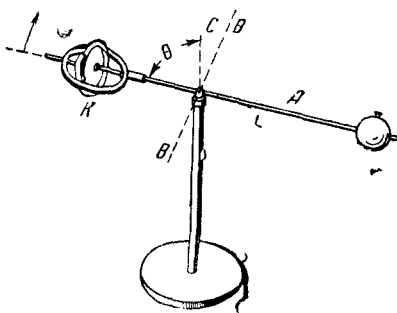


Рис. 1. Модель свободного гироскопа.

относительно оси A и вынужденного вращения относительно оси C одинаковы; если же направления вращений взаимно противоположны, то угол Θ увеличится. Таким образом ось гироскопа A будет совершать вращение вокруг горизонтальной оси B до тех пор, пока по кратчайшему пути не установится параллельно вынужденному вращению относительно C („ориентировка осей“). Таким образом гироскоп K под действием вращающего момента относительно C стремится уста-

новить свою ось вращения таким образом, чтобы угол между его осью и осью вынужденного вращения был минимален, а направления обоих вращений совпадали (теорема Фуко о „тенденции параллелизма“).

2-е основное явление. Если же попытаться насильственно уменьшить угол Θ , т. е. создать вращающий момент относительно участвующей в движении волчка оси B („ориентировка осей“), то эта попытка также не удастся, но ось A повернется перпендикулярно в горизонтальной плоскости вокруг оси C . При этом сила, действующая в направлении увеличения угла Θ , создаст вращение осей A и B относительно C , совпадающее с направлением вращения волчка относительно оси A , и обратно: ось волчка A будет прецессировать вокруг C , пока на B будет действовать вращающий момент, так как параллельность обоих моментов вращения не может быть достигнута (благодаря тому, что связанная с телом ось B участвует в движении („вращение“)).

Из этих двух основных опытов сами собой получаются все описанные выше эффекты, если считать элементарные магниты эквивалентными механическим гироскопам.

А. Четыре известных опыта

1) Опыт Максвелла является непосредственным воспроизведением первого основного явления в предположении, что обтекаемая током катушка или магнит, в котором текут элементарные амперовы токи, вследствие инерции электричества эквивалентны механическому гироскопу. Поэтому вращение магнита или соленоида, укрепленного, как показано на рис. 1, должно повлечь за собой ориентировку магнита или соленоида как целого. Как известно, Максвелл в 1861 г. безуспешно пытался обнаружить этот эффект. Невозможность этого опыта с энергетической точки зрения была доказана де-Гаазом и де-Гааз-Лоренц в 1915 г.

2) Перенос подобной же идеи на элементарные магниты и возможность обнаружения ориентировки их осей, эквивалентной увеличению намагничивания, была доказана эффектом Барнетта в 1914 г.

3) Столь же плодотворно должно оказаться и обращение вышеописанных опытов, аналогичное второму основному явлению, если между прецессионным движением элементарных магнитов и самим телом существует некоторая связь. Эта связь, о природе которой мы до сих пор ничего не знаем, является необходимым допущением при всех гиромагнитных исследованиях, так как в противном случае вообще никакое влияние элементарных гироскопов, находящихся внутри тела, не может быть передано телу как целому. Положительный результат опытов Ричардсона — Эйнштейна — де-Гааза, обнаруживших возможность возникновения вращения тела благодаря ориентировке осей элементарных магнитов, т. е. при намагничении, доказывает существование этой связи, так же как и положительный результат опытов Барнетта.

4) Для понимания отрицательного результата четвертого опыта нам придется начать несколько издалека. Вначале представляется очевидной мысль, что совершенно безразлично, будем ли мы приводить во вращение ось A путем вращения всего тела благодаря тому, что ось связана с телом (опыт 2), или же будем это делать при помощи вращающегося магнитного поля, увлекающего за собой оси элементарных магнитов (опыт 4); можно думать, что в обоих случаях это повлечет за собой ориентировку оси вращения (основное явление 1). Однако, как известно, один из опытов дает положительный результат, другой — отрицательный, что доказывается не только опытами Тонкса и Фишера, но и последними исследованиями Барнетта (1933 г.)

Как понять это кажущееся противоречие? Исходя из представлений о механизме вращения одного единственного элементарного магнита, мы не достигнем цели. Нам придется привлечь к обсуждению некоторые магнитные явления. Прежде всего отметим, что опыт Фишера, как и все опыты, базирующиеся на основном явлении 1, производился исключительно на ферромагнитных веществах; опыты же, базирующиеся на эффекте Ричардсона, Эйнштейна, де-Гааза (типа основного явления 2), производились и на других веществах. Поэтому мы должны принять во внимание осо-

бенности ферромагнитного состояния. Как известно, ферромагнитное тело в ненамагниченном состоянии состоит из множества спонтанно-намагниченных элементарных областей, векторы которых распределены по всем направлениям произвольным образом, в то время как каждая отдельная элементарная область состоит из множества элементарных магнитов, векторы которых параллельны друг другу; иначе говоря, каждая элементарная область намагничена до насыщения. Каждый из векторов может быть разложен на три взаимно-перпендикулярные составляющие (рис. 2); составляющие, параллельные оси A , не влияют на результаты опыта, если магнитное поле H вращается вокруг оси A , так как их направление при этом не будет изменяться. Таким образом нам нужно исследовать только распределение векторов в слое, параллельном плоскости BC . Предположим, что произвольное распределение векторов характери-

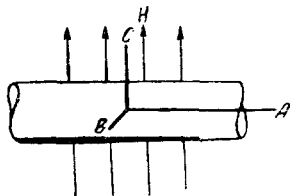


Рис. 2. Расположение опыта Фишера.

зуется четырьмя возможными направлениями (рис. 3, где направление стрелки соответствует вращению по часовой стрелке); допустим далее, что магнитное поле вращается от C к B (направление стрелки за плоскостью чертежа параллельно A рис. 2). В этом случае все наши векторы будут пытаться вращаться в плоскостях CA и BA таким образом, чтобы установиться параллельно вынужденному вращению по кратчайшему пути (основное явление 1). Поэтому независимо от расположения векторов в плоскости CB должно возникнуть намагничение в направлении оси A . Таким образом мы приходим к заключению, что эффект Фишера должен давать положительный результат. Причина неудачи соответствующих опытов должна лежать глубже.

Несколько лет тому назад для преодоления энергетических затруднений, связанных с рассмотрением представления об одновременном изменении полюсов целой элементарной области, Акулов ввел представление об „инверсии“. Согласно этому представлению вектор намагничения J элементарной области при ее перемагничении не вращается, как это предполагал Юинг, сохраняя неизменной свою величину, но непрерывно уменьшает свое значение от $+J$ через нуль до $-J$, причем направление его остается неизменным.

Это представление, которое мы вынуждены принять благодаря

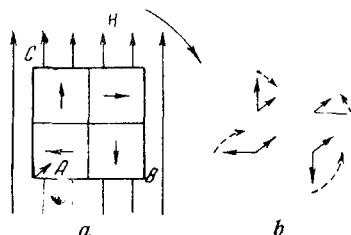


Рис. 3. а) Ферромагнитная модель опыта Фишера.

б) Переход векторов намагничения из плоскости BC в направлении оси A по кратчайшему пути (указано пунктирной стрелкой).

существованию обратимой проницаемости в слабых полях, кажется несовместимым с гироскопической моделью атома, так как гироскоп атомных размеров изменяет направление своего вращения, конечно, путем поворота оси на 180° при неизменной скорости вращения, но не путем постепенного уменьшения скорости вращения до нуля и дальнейшего возрастания ее до первоначальной величины при обратном направлении вращения.* Однако это представление может быть совмещено с гироскопической природой единичного атома, если вспомнить, что вектор элементарной области является результирующим всех атомных векторов рассматриваемой области и что наблюдению доступно лишь вращение этой результирующей множества атомных векторов.** Разъяснение противоречия между инверсией и гироскопической природой атома было сделано Блохом и Бекером в 1932 г. Эти авторы предложили идею „смещения границ“, утверждающую, что переход от одного направления вектора к другому происходит всегда на границе двух отдельных областей, намагниченных до насыщения, причем элементарная область, более благоприятно ориентированная относительно внешнего поля, расширяется за счет области, ориентированной менее благоприятно, т. е. ее граница перемещается. Поэтому в слабых полях мы не должны рассуждать так, как это было сделано при рассмотрении рис. 3, где были изображены векторы отдельных элементарных областей, но необходимо детально разобрать, каким образом будут перемещаться границы наших четырех областей (рис. 4). Легко видеть, что в этих областях границы будут смещаться в направлении пунктирных линий, если внешнее поле H вращается по направлению, указанному стрелкой, так как каждый раз будет увеличиваться та из областей, вектор которой образует наименьший угол с вектором внешнего поля H . Но переход от одного направления к другому при перемещении границы может происходить либо статистически либо — что более вероятно — по кратчайшему пути, так как он протекает под воздействием двух сильных полей наиболее близких векторов, которые при вращении внешнего поля должны энергетически увеличиваться или уменьшаться. Поэтому не должно происходить непосредственного вращения наших векторов в направлении вектора внешнего поля. Если детально проанализировать вращения, воз-

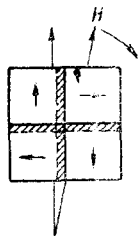


Рис. 4. „Смещение границ“ при изменении направления вектора внешнего поля. Первоначальная граница показана сплошной чертой, окончательная — пунктирной.

* Следует отметить, что в литературе о магнетизме магнитный момент трактуется либо как гироскопический момент, либо же как дипольный момент. При этом гироскопическое представление имеет бесспорные преимущества.

** Если рассматривать атомный гироскоп как комбинацию двух связанных волчков, вроде изображенного на рис. 6, то процесс инверсии может быть совмещен с гироскопической моделью атома.

никающие в нашей модели, то легко видеть, что они происходят следующим образом (рис. 5).

Изогнутая стрелка в плоскости чертежа указывает направление вращения вектора пограничного слоя; стрелка, перпендикулярная плоскости чертежа, определяет возникшую при этом результирующую компоненту намагничивания. Из рисунка сразу видно, что направления вращения результирующих взаимно противоположны. Следовательно, эффект Фишера в слабых полях должен быть отрицателен.

Совершенно непонятные с чисто-гироскопической точки зрения отрицательные результаты опытов Фишера можно рассматривать как подтверждение правильности представления о смещении границы, если допустить что справедлива гипотеза о переходе в пограничном слое от одного направления к другому, происходящем статистически или по кратчайшему пути, но во всяком случае независимо от направления вращения внешнего поля.*

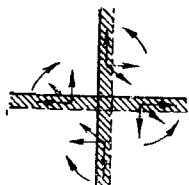


Рис. 5. Перемещение векторов намагничивания на „границах“.

Аналогичные представления могут быть приложены и к необратимым смещениям границы (скачки Баркгаузена), так как они совершенно независимы от скоростей смещения границы. Только в сильных полях могут возникать вращения результирующих векторов, и поэтому можно думать, что опыты Фишера в очень сильных полях дадут положительный результат. Однако подобные исследования представляются в настоящее время невозможными, так как при поперечном намагничивании требуются поля от 5 до 10 тыс. эрстедт, так как размагничивающий фактор очень велик. Между тем, например, Барнетт, работавший при полях около 15 эрстедт, работал в области начальной проницаемости. То же самое относится к полю порядка 100 эрстедт, использованному Фишером.

Изложенное здесь объяснение отрицательных результатов опыта Фишера было дано Барнеттом; но Барнетт заменил вращение векторов периодическим изменением полярности векторных компонент, расположенных в плоскости сечения.

Б. Четыре дальнейших эффекта

В дальнейшем мы кратко рассмотрим четыре эффекта, обозначенных номерами 5—8. Эти эффекты теоретически мыслимы, но экспериментально существует так же мало надежд на возможность их обнаружения, как и на положительный результат опыта Максвелла.

5) Подобно тому, как опыт Максвелла является воспроизведением первого основного явления, опыт 5, т. е. прецессия магнита при

* Модель обратимых вращений в преимущественных направлениях, определяемых кристаллической структурой, также позволяет объяснить отрицательный результат опытов Фишера в слабых полях.

изменении его положения, является воспроизведением основного явления 2. Повидимому, Максвелл не пытался осуществить этот опыт, энергические возможности которого столь же ничтожны, как и опыта Максвелла.

6) Подобно тому, как прецессия основного явления 2 обнаруживается в эффекте Ричардсона—Эйнштейна—де-Гааза как механическое действие на все тело целиком, она должна проявляться так же, как магнитный эффект, действующий на отдельные атомы или элементарные области: прецессия эквивалентна добавочному диамагнетизму. Этот эффект по предложению Ганса безуспешно пытался обнаружить Черлинский. В области насыщения он должен проявляться как уменьшение интенсивности намагничивания, пропорциональное полю. Следует отметить, что эти рассуждения имеют существенный пробел, так как параллельное установление всех осей по отношению к направлению внешнего поля не может возникнуть без наличия некоторого передающего энергию механизма. Так как этот механизм нам неизвестен, то *a priori* нельзя решить, будет ли энергия параллельного установления осей при постоянной угловой скорости прецессии

$$\omega = - \frac{e}{2mc} H \quad (1)$$

(т. е. диамагнетизм) получаться только за счет энергии внешнего поля, либо же она может получаться также за счет уменьшения энергии прецессии. С этой точки зрения опыт 6 относится не столько к абсолютной величине магнитного момента единицы объема, сколько к его возникновению во времени; отделение же последнего от эффекта вихревых токов должно быть весьма затруднительно.

7) При опыте 7, в котором пытаются достичь ориентировки осей элементарных магнитов при вращении всего тела целиком вокруг горизонтальной оси B , следует иметь в виду, что ось B является в этом случае пространственно неподвижной. Если бы, как это было в основном явлении 2, она была связана с телом, то при вращении тела, обладающего остаточным намагничиванием, должен был бы возникнуть диамагнитный эффект, налагающийся на остаточный ферромагнетизм и вызывающий увеличение магнитного момента, т. е. положительный диамагнитный эффект; это объясняется тем, что возникающее увеличение угла Θ (рис. 1) должно быть нейтрализовано также образующимся уменьшением его по закону синусов. В действительности, однако, в опыте 7 горизонтальная ось B является пространственно неподвижной, так что этот опыт формально аналогичен опыту Барнетта при повороте оси на 90° .

Таким образом при поворачивании тела должна образоваться поперечная компонента намагничивания. Затруднительность этого опыта лежит прежде всего в необходимости создания свободного от поля пространства. Теоретически же он не представляет интереса, так как не содержит ничего нового по сравнению с опытом Барнетта, экспериментально же менее удобен (например, благодаря наличию размагничивающего фактора).

8) Наконец, опыт Фишера должен обнаружить механическое действие на все тело целиком, так как при ориентировке осей элементарных магнитов (намагничение в направлении оси вращения магнитного поля), связанных с телом, последнее должно быть приведено в некоторое, хотя и очень слабое, вращение. Так как опыт Фишера с ферромагнитными веществами по указанным выше причинам оказывается безуспешным, то безрезультатным должен быть и опыт 8. В сильных же полях и при парамагнитных веществах он может дать положительные результаты.

3. РАССМОТРЕНИЕ ОПЫТОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ АТОМА

До сих пор, базируясь на представлениях старой идеи Ампера о молекулярных токах и гипотезы Вебера об инерции электричества, мы рассуждали, однако, таким образом, как будто бы гироскопическая природа атома была нам известна. И действительно, Прокoppiу, базировавшийся на модели атома Бора, вычислил величину магнетона, т. е. единицы магнитного момента в „единичных полюсах $\times$ сантиметры“ или „эргах/эрстедт“. Однако это вычисление доказывает реальность гироскопической природы, которая может быть обнаружена только опытом, в столь же малой степени, как и сама модель атома.

Из веберовского определения электромагнитной массы тока в единицах CGS для магнитного момента μ может быть получено выражение:

$$\mu = ev\pi r^2 \quad (2)$$

(где e — заряд электрона в электромагнитных единицах, v — частота его вращения на расстоянии r от ядра атома).

При этих же условиях механический момент p равен:

$$p = mv 2\pi r^2, \quad (3)$$

где m — масса электрона.

Из (2) и (3) непосредственно определяется отношение механического момента к магнитному:

$$\frac{p}{\mu} = \frac{2m}{e} = 1,13 \cdot 10^{-7}. \quad (4)$$

Так как по квантовой теории механический момент должен быть целым кратным $\hbar/2\pi$, то из (4) следует, что таков же должен быть и магнитный момент. Для квантового числа 1 находим:

$$\mu_1 = \frac{\hbar e}{4\pi m} = 9,174 \cdot 10^{-21} \text{ эрг/эрстедт} \quad (5)$$

или для моля:

$$\mu_B = 5564 \text{ един. пол. } \times \text{ см}, \quad (6)$$

что соответствует одному боровскому магнетону.

Из уравнения (4) следует, что атом, имеющий механический момент, равный нулю, не должен обладать также и постоянным магнитным моментом, т. е. должен быть диамагнитен.

Так как обычного гироскопа с механическим моментом, равным нулю, существовать не может, то, желая провести аналогию между элементарным магнитом и гироскопом, мы по необходимости приходим к заключению, что диамагнитный атом должен состоять по меньшей мере из двух гироскопов, каким-то образом связанных друг с другом (рис. 6). Этот вывод соответствует опытным фактам, что диамагнетизм наблюдается только у атомов с законченными электронными слоями, наименьшая симметрия которых равна двум.

Однако опыт не подтверждает, что отношение $p/\mu = 1,13 \cdot 10^{-7}$. Для ферромагнитных веществ это отношение близко к половине указанного значения. Для согласования наших рассуждений с опытом уравнение (4) следует написать в более общем виде:

$$p/\mu = \frac{2m}{ge}, \quad (7)$$

где g обозначает фактор расщепления Ланде, известный из теории спектров:

$$g = \frac{2s + l}{s + l}. \quad (8)$$

Здесь l — орбитальное квантовое число, s — квантовое число спина; уравнение (8) определяет отношение магнитного момента к механическому в единицах $\frac{e}{2m}$.

Из этой формулы вытекает замечательное заключение, что полный импульс вращения атома никогда не может совпадать с импульсом вращения электронов, что, как известно, молчаливо допускалось при всех рассуждениях. Это затруднение может быть преодолено, если приписать электрону винтовое движение. Электрон должен не только вращаться по орбите (с квантовым числом l) вокруг ядра, но должен совершать вращение вокруг собственной оси (с квантовым числом s). Эта гипотеза спина электрона обусловлена не только результатами исследования спектров (Юленбек и Гаудсмит, 1925), но доказывается также любым гиромагнитным опытом, являющимся не чем иным, как определением фактора g . Одновременно доказывается и гироскопическая природа атома, поскольку принятие этой гипотезы дает результаты, согласные с опытом.

В S -состоянии атома, где $l = 0$, значение имеет только спин электрона, равный для одного электрона, согласно эмпирическим данным, $s = \frac{1}{2}$.

Так как при $l = 0$ и $s = \frac{1}{2}$ получается $g = 2$, то

$$\frac{p}{\mu} = 0,5 \cdot 1,13 \cdot 10^{-7}; \quad (9)$$

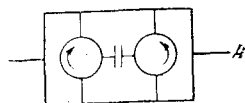


Рис. 6. Пример связанных гироскопов, обладающих инертным сопротивлением только относительно оси A . (Параллельные черты между гироскопами символизируют наличие связи.)

но это значение весьма близко к величине $\bar{P}$, найденной для всех ферромагнитных веществ.

4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА g -ФАКТОРОВ ПАРА-И ФЕРРОМАГНИТНЫХ ВЕЩЕСТВ

О квантовом состоянии атома твердого тела мы знаем очень мало или даже совсем ничего не знаем. В этих случаях изучение оптических спектров не дает никаких результатов за очень редкими исключениями. Единственным возможным средством является изучение магнетизма бинарных смешанных кристаллов, едва только начинающееся, но уже позволившее сделать некоторые заключения о ионизации атомов в твердых растворах. Другой непосредственный путь исследования — изучение гиromеханических явлений в предположении, что уравнение (7) соответствует действительности. Однако и в этом направлении сделаны только первые шаги, и до настоящего времени почти совершенно отсутствует систематическое изучение рядов сплавов бинарных систем, весьма важное для исследования изменений ионизации с концентрацией.

Этот же путь позволяет продвинуться вперед в отношении изучения физики металлического состояния.*

Данные табл. 3 показывают, что в нормальных ферромагнитных веществах значение g близко к двум, но несомненно несколько меньше двух. Это понятно, поскольку атомы кубической ферромагнитной решетки находятся в квази S -состоянии, так что при намагничении происходит по преимуществу ориентировка моментов спина электронов. Однако отклонения от значения $g=2$ показывают, что кроме этого явления, некоторое, хотя и незначительное, влияние оказывает также орбитальный момент, так как в противном случае должно было бы строго выполняться условие $g=2$. Классическим примером является пирротин, имеющий $g \approx 0,63$; это значение фактора g несомненно тесно связано с тем обстоятельством, что пирротин ферромагнитен только в одной из кристаллографических плоскостей, а во всех других направлениях оказывается парамагнитным. Энглис (1934) предложил простую модель для объяснения этого значения g ; по его мнению, орбитальный момент антипараллелен моменту спина и связан с ним. При $l=2$ и $s=-\frac{1}{2}$ согласно уравнению (8) находим:

$$g = \frac{-1+2}{-\frac{1}{2}+2} = 0,66,$$

что хорошо совпадает с наблюдаемым значением (Гетерье, 1933).

* Помимо всех неправильных кристаллов, особый интерес представляют бимагнитные кристаллы Гетца, которые парамагнитны в направлении главной кристаллической оси и диамагнитны в перпендикулярном направлении.

При всех вышеуказанных рассуждениях следует, однако, помнить, что гиromеханический эффект дает малое количество сведений об истинных вращающих моментах.

ТАБЛИЦА 3
Значение g ферромагнитных веществ

Ферромагнитное вещество	$2/g$	$1/g$	g
Чистое железо	1,03	0,515	1,945
Сталь	1,06	0,530	1,888
Кобальт	1,07	0,535	1,860
Никель	1,05	0,525	1,905
Пермаллой	1,05	0,525	1,905
Сплав Гопкинсона (Fe, Ni) . .	1,02	0,510	1,960
„ Прейсса (Fe, Co)	1,08	0,540	2,852
„ Блоха (Co, Ni)	1,08	0,540	1,852
„ Гейслера (Al, Mn, Cu) . .	1,02	0,510	1,960
Магнетит	0,99	0,495	2,02
Пирротин	3,18	1,59	0,63

ТАБЛИЦА 4
Значения g парамагнитных веществ

Ион	Cr^3	Mn^2	Fe^2	Co^2	Nd^3	Eu^3	Gd^3	Dy^3
Вещество	CrCl_3	MnCO_3	FeCO_4	CoSO_4	Nd_2O_3	Eu_2O_3	Gd_2O_3	Dy_2O_3
Значение g	1,95	1,98	1,89	1,54	0,78	$> 4,5$	2,12	1,36

Эти моменты могут не совпадать с полным моментом атома, который он имел бы, находясь в том же состоянии и будучи свободен, но определяют лишь тот момент, полярность которого может быть изменена при воздействии внешнего магнитного поля на вещество, находящееся в твердом состоянии.

ТАБЛИЦА 5
Значения g некоторых редких земель

Ион	Состояние	Вычислено	Измерено
Nd^3	$4J_{9/2}$	0,73	0,78
Gd^3	$8S_{7/2}$	2,00	2,12
Dy^3	$6F_{15/2}$	1,33	1,36

Эти моменты могут иногда совпадать с моментами, присущими свободным атомам и наблюдаемыми при спектроскопических исследованиях, что доказывается удовлетворительным совпадением вычисленных и наблюдаемых значений для некоторых редких земель (табл. 5).

Но это совпадение не должно приводить к заключению, что указанная область физики в настоящее время освещена достаточно полно. Исследования здесь только начинаются. Если мы в настоящее время сумели разъяснить так называемую „гиромагнитную аномалию“, т. е. противоречие между ожидавшимся ранее значением орбитального числа и фактически найденным числом спина, пользуясь гипотезой комптоновского электрона, обладающего спином, то следует все же указать, что в основах современной теории имеется до сих пор много неясностей, как, например, вопросы передачи момента вращения от элементарных частиц на тело целиком, вопросы о недозволенных ориентировках гироскопических осей в направлении внешнего поля, а также и то обстоятельство, что теоретическое значение $\frac{P}{\mu}$ для электрона является функцией модели электрона, положенной в основу рассуждений, т. е. это отношение будет иметь различные значения в зависимости от того, будем ли мы пользоваться представлением о „поверхностном заряде“, „объемном заряде“, вихревом кольце или же рассматривать электрон с точки зрения волновой механики.

Несмотря на кажущиеся успехи в этой области физики, следует заметить, что экспериментальные методы, несмотря на громадные требования, предъявляемые к искусству экспериментатора и строгую критику ошибок опыта, в значительной степени опередили теоретическое объяснение результатов опытов; это замечание в особенности относится к гиromеханическим исследованиям. Подобно тому, как при начале развития измерительной физики обнаруживаемые ею кажущиеся „аномалии“ ставили перед теоретической физикой новые задачи, так же и дальнейшее исследование значений g в твердом и металлическом состоянии поставит в будущем перед теоретической физикой целый ряд новых проблем.

ЛИТЕРАТУРА

- J. Clerk Maxwell, *Electricity and Magnetism*, 1861, p. 575.
 Jonh Perry, *Spinning Tops*, S. 112, 1890.
 A. Walzel, S. 90, 1913.
 M. Abraham, *Ann. Phys.* **10**, 151, 169, 171, 1903.
 O. M. Richardson, *Phys. Rev.* **26**, 248, 1908.
 S. J. Barnett, *Science* (N. Y.) **30**, 413, 1909.
 A. Schuster, *Proc. phys. Soc. Lond.* **24**, 121, 1911.
 S. J. Barnett, *Phys. Rev.* **6**, 171, 239, 1915; *Science* (N. Y.) **42**, 163, 459, 1915.
 W. I. de Haas and G. L. de Haas-Lorentz, *Pros. Acad. Amst.* **19**, 248, 1915.
 A. Einstein u. W. I. de Haas, *Verh. dtsh. physik. Ges.* **17**, 152, 420, 1915.
 A. Einstein, *Verh. dtsh. phys. Ges.* **17**, 203, 1915; **18**, 173, 1616.
 W. I. de Haas, *Verh. dtsh. phys. Ges.* **18**, 423, 1916.
 G. J. Garnett, *Phys. Rev.* **10**, 7, 1917. — I. Q. Stewart, *Phys. Rev.* **11**, 100, 1918.
 E. Beck, *Ann. Phys.* **60**, 109, 1919.
 G. Arvidsson, *Physik. Z.* **21**, 88, 1920. — S. J. Barnett, *J. Washington Acad. Soc.* **11**, 162, 1921; *Phys. Rev.* **17**, 404, 1921; **20**, 90, 1922.
 A. P. Chattock a. L. F. Bates, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* **A 223**, 257, 1922.
 I. W. Fisher, *Proc. phys. Soc. Lond.* **34**, 177, 1922.
 S. J. Barnett, *Bull. Bat. res. Counc.* **3**, 3, Nr. 18, S. 235, 1922; *Physik. Z.* **24**, 14, 1923.
 W. Sucksmith a. L. F. Bates, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A 104**, 499, 1923; **108**, 638, 1925.
 I. W. Fisher, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A 109**, 7, 1925.
 S. J. Barnett a. O. I. Barnett, *Proc. Am. Acad.* **60**, 1925.
 E. C. Stoner, *Magnetism and Atomic Structure*, London, 1926, S. 196.
 S. J. Barnett, *Phys. Rev.* **30**, 964, 1927; **31**, 1116, 1928; **36**, 789, 1930.
 R. Gans, *Naturwiss.* **18**, 184, 1930.
 W. Sucksmith, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A 128**, 276, 1930; **133**, 179, 1931.
 S. J. Barnett, *Proc. Amer. Acad.* **66**, 273, 1931; *Phys. Rev.* **42**, 147, 1932.
 E. Czerlinsky, *Ann. Physik* (5) **13**, 80, 1932.
 F. Coeterier u. P. Sherrer, *Helv. phys. Acta* (3) **5**, 217, 1932.
 I. H. van Vleck, *Theory of electr. and magnet. susceptibilities*, Oxford, 1932, S. 255, 300.
 S. J. Barnett, *Proc. Amer. Acad.* **68**, 229, 1933; **69**, 119, 1934; *Physica* **13**, 241, 1933; *Physik. Z.* **35**, 203, 1934.
 D. R. Inglis, *Phys. Rev.* (2) **45**, 118, 1934.
 E. C. Stoner, *Magnetic Properties of Matter*, London, 1934, p. 231.