

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 524.3

ШИРОТНАЯ АСИММЕТРИЯ БАРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЛАНЕТ И ЗВЕЗД**В. И. Григорьев, В. С. Ростовский***(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)***Показано, каким образом широтная магнитная асимметрия небесных тел может быть объяснена на основе теории бароэлектрического эффекта.**

Публикации, посвященные теоретическому исследованию магнитных полей небесных тел, как правило, опираются на «механизм динамо», т. е. магнитогидродинамический эффект (МГД) усиления магнитных полей из-за дифференциальных внутривзвездных или внутрипланетных потоков.

Но есть и другой механизм формирования магнитных полей, связанный с бароэлектрическим эффектом (БЭ) — перегруппировкой электрических зарядов в этих телах, порождаемой перепадами давлений в них.

Основы теории БЭ и ее приложений к исследованиям электромагнетизма планет и звезд изложены в ряде публикаций, частично включенных в монографию [1]. Уместно хотя бы кратко коснуться некоторых положений этой теории.

Хорошо известны эффекты, которые можно объединить общим названием «градиентных». Градиенты температуры порождают термоЭДС, химические неоднородности обуславливают контактные разности потенциалов.

Подобно этому, градиенты давлений (и вообще механических напряжений) даже в химически однородных изотермических проводниках вызывают перегруппировку зарядов, порождающую поля, которые естественно именовать бароэлектрическими. Если перегруппировавшиеся заряды вовлекаются в движения проводника, то порождаются «баромагнитные» поля, накладывающиеся на магнитные поля, возникновение которых связано с эффектом динамо. Однако распределение давлений в планетах и звездах, в отличие от распределения дифференциальных потоков в их недрах, сравнительно стабильно, да и более доступно для оценок, что открывает перед теорией баромагнетизма более широкое поле возможностей, чем перед теорией динамо, хотя, конечно, оба эти механизма формирования магнитных полей небесных тел дополняют друг друга.

В настоящей публикации обсуждается лишь круг баромагнитных эффектов.

Бароэлектрические поля, порождаемые не зависящими от времени градиентами давлений, подобно

контактным, являются безваттными, т. е. они не могут передавать энергию зарядам (правило Вольта). Но такая передача становится возможной, если параметры системы переменны. Хрестоматийной иллюстрацией этому можно назвать метод Кельвина для измерения контактных разностей потенциалов. По проводу, соединяющему неподвижные обкладки конденсатора, изготовленные из металлов с различными работами выхода, постоянный ток в силу правила Вольта протекать не может. Но если изменять расстояние между обкладками (для чего нужно производить работу), то возникает ток [2, гл. 18]. Динамо-генерация магнитных полей требует затрат энергии, и они не являются безваттными.

В отличие от «МГД эффекта динамо» бароэлектрическое перераспределение зарядов связано с нарушением электронейтральности вещества: электроны перераспределяются, вытесняясь из областей больших в области меньших механических напряжений.

В монографии [1] на базе простейших реалистических моделей обсуждаются вопросы о распределении бароэлектрических и баромагнитных полей в планетах и в первую очередь в Земле.

Напряженность бароэлектрического поля, направленного радиально, монотонно (по закону, близкому к линейному) возрастает от нуля в центре планеты до максимального ее значения у поверхности, на которой она скачком убывает (до нуля, если планета в целом электронейтральна и если не проявляются факторы, вызывающие нарушения сферической симметрии).

Баромагнитное поле, обусловленное вращением планеты вместе с перераспредевшимися в ней зарядами, имеет более сложную структуру.

Во внешней области, над поверхностью планеты, магнитное поле оказывается чисто дипольным, причем магнитный дипольный момент по направлению противоположен механическому.

На поверхности планеты силовые линии магнитного поля испытывают излом, обусловленный наличием поверхностных зарядов, вращение которых (вместе с планетой) создает поверхностные токи,

что обуславливает скачок тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля.

Во внутренней же области планеты магнитное поле не является дипольным. Этот вопрос детально рассмотрен в § 6 и § 23 монографии [1]. Упрощенная схема расположения магнитных силовых линий на Земле приведена на рис. 1.

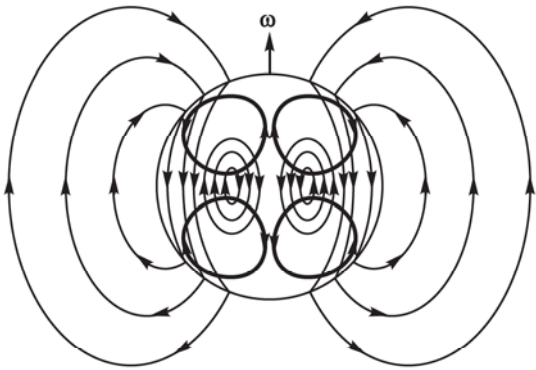


Рис. 1. Упрощенная схема распределения силовых линий геомагнитного поля и механических линий тока (более толстые линии) в Земле (без учета ее вращения)

На этом же рисунке более жирными линиями показаны линии механических токов.

Потоки вещества в недрах планеты возникают из-за градиентов температур. Но благодаря БЭ эти механические потоки вещества являются одновременно и потоками объемных зарядов. На движение зарядов оказывают воздействие и магнитные поля: заряды движутся преимущественно вдоль, а не поперек магнитных силовых линий, так что магнитное поле способствует увеличению устойчивости механических трубок тока.

В горячей центральной области планеты зарождаются конвективные потоки, которые, разделившись на два приосевых рукава, направляемых и стабилизируемых магнитным полем, под действием сил Архимеда устремляются из глубины планеты к ее поверхности. Растекающиеся приповерхностные потоки, возникающие на поверхности, направлены в сторону экваториальной плоскости (и здесь сказывается стабилизирующее и направляющее воздействие магнитного поля). Остывая, вещество вновь погружается к центру планеты, как то и изображено на рисунке.

Но этот рисунок неточен в одном важном пункте: он выполнен без учета вращения планеты.

Влияние вращения сильнее всего сказывается на нисходящих приповерхностных потоках и на потоках, направленных вблизи экваториальной плоскости к оси вращения планеты, т. е. на тех участках, где эти потоки имеют составляющую скорости, перпендикулярную к оси вращения.

Под влиянием направленной на запад составляющей силы Кориолиса возникает западный дрейф

вещества в планете. А так как благодаря БЭ вместе с дрейфующим веществом движутся и объемные положительные заряды, то возникают направленные на запад добавки к объемным токам, они создают «кориолисовы» добавки к основному баромагнитному полю. На рис. 2 изображен жирной линией один из возможных конвективных витков в Северном полушарии*). Идущие от этой линии более тонкие линии со стрелками показывают направление и примерную величину широтной компоненты силы Кориолиса. На участке 0–1–2 она возрастает от нуля на магнитном полюсе до максимального значения на широте $\theta = \pi/4$. На этот участок конвективного витка действует момент сил, стремящийся повернуть его в западном направлении. Наибольшего значения этот момент достигает именно в тех широтах, на которых, по-видимому, наиболее явно проявляется западный дрейф участков Земли**). На участке 2–3, лежащем в экваториальной плоскости, момент сил Кориолиса вызывает поворот этого участка конвективного потока в восточном направлении.

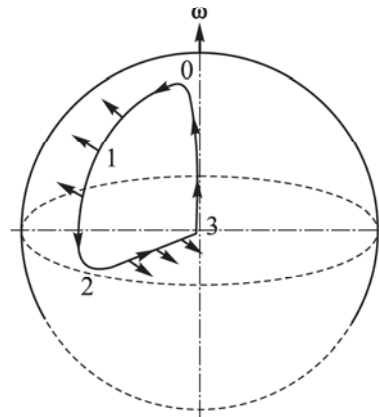


Рис. 2. Один из конвективных витков в Северном полушарии и действующие на него силы Кориолиса

Участок 3–0 замыкает конвективный контур. Поскольку этот участок почти совпадает с осью вращения, сила Кориолиса, как и ее момент, здесь становятся близкими к нулю.

Таким образом, общий вращающий момент кориолисовых сил, действующих на весь конвективный виток, поворачивает его таким образом, что его северная часть смещается в западном, а южная — в восточном направлении. Магнитный момент токов этого витка (который лежал бы в плоскости меридиана, если бы не сказывалась сила Кориолиса), приобретает некоторый наклон в восточном направлении. Благодаря этому результирующая верти-

*) То, какая из возможностей ориентации витка реализуется, определяется начальными условиями случайным образом, но, возникнув, виток обретает устойчивость благодаря эффекту Бернулли и уже упоминавшемуся выше стабилизирующему воздействию магнитного поля на движение зарядов.

***) Угол θ отсчитывается от направления вектора ω .

кальная компонента магнитного поля над северным магнитным полюсом становится меньше.

Изменяется и магнитное поле над южным магнитным полюсом. Здесь общая напряженность баромагнитного поля также складывается из трех частей: первая обусловлена вращением поверхностных отрицательных зарядов, вторая — вращением положительных объемных зарядов и, наконец, третья представляет добавку, обусловленную конвективным витком в Южном полушарии. Над Южным магнитным полюсом вклады в вертикальную компоненту напряженности магнитного поля от второй и третьей из этих частей имеют противоположные знаки, так что от первой из указанных частей вычитается меньшая величина, чем соответственно для Северного полюса. Поэтому величина суммарной вертикальной компоненты над Южным полюсом должна быть больше, чем над Северным. И действительно, вертикальная составляющая напряженности магнитного поля на северном геомагнитном полюсе равна 0.58 Гс, тогда как на южном она имеет величину 0.68 Гс. На Юпитере магнитная полярность обратная, т. е. не такая, как на Земле: направления магнитного и механического моментов там почти одинаковы, тогда как на Земле они противоположны.

На рис. 3 приводится упрощенная схема расположения силовых линий магнитного поля на Юпитере, которую уместно сравнить с изображенной на рис. 1 для Земли. При сравнении этих схем нужно обратить внимание на стрелки на магнитных силовых линиях, обозначающие направления напряженностей магнитных полей. На этих двух планетах направления полей над полюсами противоположны: над Северным полюсом Земли магнитное поле направлено на юг, тогда как на Юпитере — на север. В то же время направления токов, обусловленных вращением объемных зарядов, и токов, вызываемых действием сил Кориолиса, сходны.

Из этого следует, что соотношения между величинами нормальных компонент напряженностей

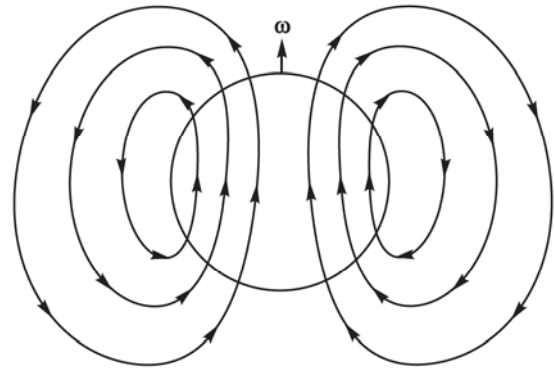


Рис. 3. Упрощенная схема распределения силовых линий магнитного поля на Юпитере

магнитных полей вблизи магнитных полюсов у этих планет должны быть противоположными. И такое различие в асимметрии магнитных полярностей действительно наблюдается. Как следует из вышеизложенного, есть основания полагать, что магнитная асимметрия, подобная земной, проявляется у всех планет, обладающих резко выраженной поверхностью, тогда как небесные тела с диффузной внешней границей могут обладать и противоположной магнитной асимметрией, такой же, как на Юпитере. Картина конвективных механических потоков непосредственно связана с асимметрией тепловых потоков на Юпитере [3].

Литература

1. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М., 2003.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М., 1979.
3. Ingersoll A.P. // Icarus. 1976. 29. P. 245.

Поступила в редакцию
19.04.2005