



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-370

P17-95-370

Б.В.Васильев*

ОТКУДА У ЗЕМЛИ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ?

*Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия

1995

Загадка земного поля

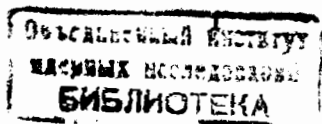
Формулировка вопроса, вынесенного в заглавие статьи, навеяна шуточной репликой, приписываемой Л.Д.Ландау [1]:

”Все можно понять в окружающей природе. Непонятно только, почему есть звезды на небе и откуда у Земли магнитное поле.”

За десятилетия, прошедшие с того времени, когда были произнесены эти слова, ситуация со звездами во многом прояснилась, что в первую очередь связано с развитием теории ”большого взрыва”. Что касается земного магнетизма — скорее, наоборот. Стремительное развитие космической техники позволило напрямую измерить магнитные поля всех планет Солнечной системы и некоторых их спутников, а появление новых чувствительных наземных методов дало достоверную информацию о величине магнитных полей многих звезд. Однако это, мягко говоря, не внесло ясности в проблему, и вопрос, откуда у Земли магнитное поле, требует решения, как и много лет назад.

Первую известную науке попытку объяснить происхождение магнитного поля Земли сделал У.Гильберт, ученый и придворный врач английской королевы Елизаветы I. В 1600 году он выпустил в свет свое знаменитое сочинение, которое спустя три с половиной столетия, в советское время, было даже переиздано на русском языке под несколько сокращенным заглавием: ”О магните, магнитных телах и большом магните — Земле” [2]. В нем У.Гильберт пытался объяснить магнетизм Земли намагничиванием слагающих ее пород. Он писал:

”Мы поставили себе целью — для выяснения благородной сущности совершенно неизвестного до сих пор большого магнита, всеобщей материи (Земли), и замечательной и выдающейся силы этого шара — начать с общеизвестных каменных и железных магнитов,



магнитных тел и наиболее близких к нам частей Земли, которые можно ощупывать руками и воспринимать чувствами; затем продолжить это при помощи наглядных опытов с магнитами и, таким образом, впервые проникнуть во внутренние части Земли”¹.

Гипотеза У. Гильберта испытания временем не выдержала. При этом, справедливости ради, нужно упомянуть, что Гильберт сам обнаружил и описал явление, делающее эту гипотезу нереалистичной: намагниченность ферромагнетика (магнетита) теряется при его нагревании до красного каления; тем самым он установил (в современной терминологии) существование точки Кюри. Опираясь на современные данные о строении Земли, можно смело утверждать, что внутренняя часть Земли слишком горяча, а во внешней коре слишком мало магнетита — гипотеза Гильберта не может объяснить возникновения магнитного поля Земли.

Тем не менее, неоспоримая заслуга У. Гильберта в том, что он сформулировал загадку магнетизма Земли в рамках “добрых наук”. За прошедшие четыреста лет множество ученых искало пути ее решения. Например, целый ряд ученых делал попытки объяснить возникновение магнитного поля генерацией тока за счет термоэлектрического эффекта, возникающего в Земле под действием разницы температуры между ядром и поверхностью. Однако оценки показывают, что ток, генерируемый этим эффектом, на много порядков слабее, чем требуется для возбуждения полей, наблюдаемой величины.

Многочисленные неудачи на пути использования стандартных физических эффектов породили попытки привлечь для объяснения

¹ Уже в то время, четыреста лет назад, само изучение загадки планетарного магнетизма было, видимо, делом непростым, т.к. далее У. Гильберт пишет:

”Но зачем мне при наличии столь обширного океана книг, которые смущают и утомляют умы занимающихся наукой, ... зачем мне, повторяю, вносить кое-что новое в эту пребывающую в таком смятении республику наук и отдавать эту славную и (ввиду множества заключающихся в ней неведомых до сего времени истин) как бы новую и поразительную философию на осуждение и растерзание злоречием либо тем, кто поклялся соблюдать верность чужим мнениям, либо нелепейшим искаителям добрых наук”.

возникновения магнитного поля космических тел несколько экзотических моделей, основой которых было видоизменение электродинамики Максвелла [3]. Позже и они были отвергнуты как противоречащие эксперименту.

Земля — динамо-машина?

В настоящее время для объяснения явления планетарного магнетизма специалистами используется обычно магнитная гидродинамическая гипотеза, или динамо-гипотеза. Эта гипотеза была предложена И. Я. Френкелем в конце сороковых годов и является в наше время наиболее разработанной и, можно сказать, общепризнанной. Она опирается на неоспоримый факт: в технике динамо-машины с самовозбуждением существуют. Как работает эта модель? Ее электромеханический аналог показан на рис. 1, взятом нами из монографии по земному магнетизму [3]. При построении этой модели предполагается, что вращение металлического диска происходит в некотором затравочном магнитном поле, что приводит к появлению э.д.с. между осью и внешней поверхностью диска. Эта э.д.с., снимаемая с помощью щеток, создает ток в многовитковой катушке, магнитное поле которой складывается со слабым затравочным полем, и система приходит в самовозбуждение. При этом энергия поля создается за счет вращения диска. Согласно динамо-гипотезе внутри Земли происходит то же самое, только без катушек и щеток, но за счет конвективного движения проводящей магмы. Энергия, необходимая для существования токов магмы, создается за счет внутренних источников тепла. Подбирая соответствующим образом параметры в этой модели, удастся вполне удовлетворительно описать генерацию магнитного поля в Земле.

Тем не менее, после ознакомления с этой моделью неудовольствие

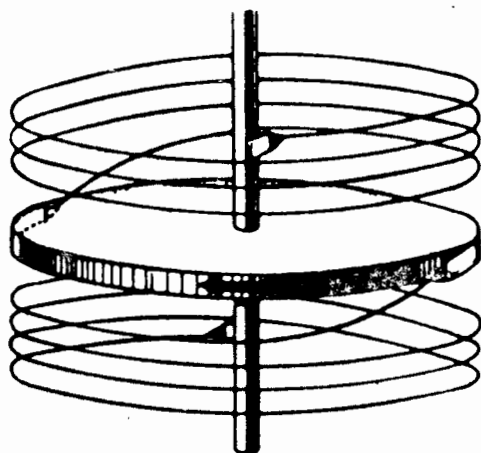


Рис. 1. Дискное динамо, с помощью которого демонстрируется принцип автовозбуждения в динамо-гипотезе (из [3])

ность остается. Во-первых, динамо-машины с самовозбуждением, конечно, существуют, но они специально и искусно сконструированы из подходящих катушек, дисков, щеток, и само существование таких динамо-машин еще не является однозначным доказательством того, что аналогичный механизм может реализоваться в сферическом теле, заполненном слабо проводящей и очень вязкой жидкостью, конвекция в которой вызвана радиальным градиентом температуры. Во всяком случае, прямых экспериментов, подтверждающих это, нет. Во-вторых, магнитные поля в настоящее время обнаружены у различных космических объектов. Для каждого объекта можно применить динамо-гипотезу, но при этом параметры модели необходимо подбирать в каждом случае независимо. Невозможность описать разные объекты единым набором параметров не является сильной стороной этой модели. Третья трудность состоит в том, что для работы механизма динамо необходимо начальное, затравочное поле, которое может быть усилено. Таким полем обоснованно можно считать, казалось бы, галактическое, имеющее величину порядка 10^{-6} Э. Но тогда трудно вообразить возможность существования способа, который позволяет усилить это поле в звездах до 10^6 Э, а в пульсарах до 10^{12} Э. А ведь согласно динамо-гипотезе этих огромных полей не должно было бы быть без ничтожного затравочного.

Магнитное поле возникает при вращении электрических зарядов

Но, пожалуй, главный аргумент против большинства гипотез, включая динамо-гипотезу, представляет собой надежно установленный с помощью наблюдений факт: магнитные моменты M всех космических тел, для которых они известны, по порядку величины

пропорциональны их механическим моментам L , т.е. по порядку величины все космические тела имеют одно и то же гиромагнитное отношение ϑ [6]:

$$M = \vartheta L. \quad (1)$$

Важно, что само гиромагнитное отношение ϑ при этом по порядку величины простым способом выражается через мировые константы

$$\vartheta \approx \frac{\sqrt{G}}{c} \quad (2)$$

(G — гравитационная константа, c — скорость света). По-видимому, причина этого явления должна быть фундаментальной и универсальной для всех космических тел.

Начало развитию этого подхода положил в первые годы нашего столетия австралийский геофизик Сузерленд [4], предположивший, что земное магнитное поле обусловлено тем, что Земля обладает положительным объемным зарядом и компенсирующим его отрицательным поверхностным. При этом, если предположить, что электризация возникает внутри космического тела за счет действия единого механизма, то это могло бы объяснить существование магнитных полей у всех космических объектов единым способом. После того как в 1909 году Гелем было измерено магнитное поле Солнца и оказалось, что отношение магнитных моментов к механическим для Земли и Солнца почти одинаково, эта идея стала очень привлекательной.

Крупнейший русский физик того времени П.Н.Лебедев поставил серию экспериментов по поиску намагничивания быстро вращающихся тел, электрическая поляризация которых могла бы возникнуть за счет действия сил инерции, эквивалентных силам тяготения. Однако опыты дали отрицательный результат [5]. Примерно через двадцать лет американскими учеными подобный опыт был повторен и отрицательный результат его подтвержден.

Несмотря на всю кажущуюся привлекательность идеи Сузерленда ее обоснование наталкивается на трудности, которые на первый взгляд представляются непреодолимыми. Во-первых, для того чтобы внутри космического тела существовала электрическая поляризация, это должно быть энергетически выгодно, а дополнительная кулоновская энергия, возникающая в этом случае, получается очень большой — порядка ρR^5 (ρ — плотность заряда в космическом теле, R — его радиус). Во-вторых, необходимый кулоновский заряд внутри тела должен, по-видимому, привести к огромной напряженности электрического поля вблизи его поверхности. С уверенностью можно утверждать, что ничего подобного не наблюдается, во всяком случае для Земли. И, конечно, при обосновании этой гипотезы требуется понять, почему дают отрицательный результат лабораторные опыты².

Новое дыхание в решение проблемы возникновения магнитного поля космических объектов вдохнул лауреат Нобелевской премии П.М.С.Блэкетт [6], который обнаружил, что на линейную зависимость между магнитными и угловыми моментами кроме Земли и Солнца ложится и звезда Vir-78, магнитное поле которой было незадолго до этого определено Бэдкоком. При этом Блэкетт, хотя и исходил из неверных предпосылок, смог вывести выражение для гиромагнитного отношения космических тел (равенство (2)).

Новый подход в исследовании возможности генерации магнитного поля космическими объектами за счет их электрической поляризации в последние годы развил профессор В.И.Григорьев с коллегами [7].

Обычно предполагается, что действие гравитационного поля на

² В некоторых работах, касающихся этого вопроса, в качестве возражения против механизма генерации магнитных полей за счет электрической поляризации выдвигается соображение, что земной наблюдатель вообще не должен видеть такого магнитного поля, так как движется вместе с вращающимися электрическими зарядами. Это недоразумение связано с неправильным применением преобразований полей при переходе во вращающуюся систему координат.

металлы приводит к чрезвычайно малой электрической поляризации:

$$E \approx \frac{mg}{q} \quad (3)$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, m — масса иона, q — электрический заряд иона.

Основная идея В.И.Григорьева базировалась на утверждении о том, что в знаменателе равенства (3) должен стоять суммарный заряд иона и электрона проводимости. Так как кулоновская сила, связывающая их, много больше гравитационной силы, действующей на ион, то в металлах под действием гравитации должно устанавливаться равновесие, при котором ионы смещаются вместе со своими электронными облаками. Суммарный заряд такого образования должен быть близок к нулю. В этом случае, в соответствии с формулой (3), равновесие иона, окруженного электронным облаком, по мнению В.И.Григорьева, должно привести к возникновению внутри металла высокой электрической напряженности.

В нашей лаборатории было потрачено немало усилий, чтобы проверить эту гипотезу экспериментально [8]. При этом постановка опытов была почти такой же, как и у П.Н.Лебедева, только с использованием возможностей, которые дает экспериментальная техника конца XX века: опыты велись в условиях глубокого магнитного вакуума, и в качестве чувствительного элемента был применен сверхчувствительный сквид-магнитометр. При этом, как и в опытах П.Н.Лебедева, измерялось магнитное поле, которое мог бы индуцировать быстро вращающийся металлический цилиндр. Предполагалось, что электризация образца должна происходить за счет действия сил инерции, эквивалентных тяготению. Раскрутка образца производилась скоростной воздушной турбинкой, так что в исследуемом металлическом образце, помещавшемся в прочную оболочку, за счет сил инерции развивались давления до нескольких сот атмосфер. Результаты измерений показали отсутствие иско-

мого эффекта в твердых металлах, таких как свинец, олово, индий и др. Некоторый не вполне понятный эффект был зарегистрирован при вращении ампулы с жидкой ртутью. Этот эффект не был повторяющимся и, по-видимому, вызывался перемещением ртути внутри ампулы.

Итак, подводя итог истории изучения земного магнетизма, приходится констатировать, что лабораторные эксперименты не подтвердили ни одну из выдвигавшихся гипотез. Это наталкивает на мысль, что причину неудач следует искать в том, что механизм генерации магнитного поля включается только в космических телах и не работает в лабораторных условиях. Может быть, он связан с действием сверхвысоких давлений внутри космических тел, недостижимых в лаборатории? Если это так, то естественно вновь вернуться к вопросу о возможности возникновения внутри космического тела электрической поляризации. Во всяком случае, если при этом еще предположить, что электрические явления разыгрываются во внутренних областях, там, где действуют сверхвысокие давления, то этим же можно было бы объяснить, почему не наблюдается огромных электрических полей на поверхности космических тел. Таким образом, некоторых трудностей этого подхода можно избежать, сделав соответствующие предположения. Поэтому основным остается вопрос: как обосновать энергетическую выгодность возникновения электрической поляризации внутри космического тела?

N+1-я модель

Если обозначить число моделей, предложенных исследователями для объяснения механизма возникновения магнитного поля Земли и других космических тел, буквой N , то оценка дает по крайней мере $N > 30$. Ниже мы попытаемся описать еще одну, $N + 1$ -ю. Ее

основой является предположение, что электрическая поляризация нужной величины в космическом теле может стать энергетически выгодной, если космическое тело образовано из вещества, описываемого подходящим уравнением состояния.

Для незаряженного космического тела равновесное состояние определяется минимумом гравитационной, упругой и тепловой энергии. При появлении электрической поляризации вещества в игру вступает еще кулоновская энергия.

Оценки показывают, что вклад тепловой энергии в общий баланс, во всяком случае для Земли, невелик, и им можно пренебречь [9]. Известно, что гравитационная энергия космического тела уменьшается при уменьшении его радиуса. Иными словами, собственное гравитационное поле стремится сжать космическое тело. При таком сжатии, естественно, растет упругая энергия вещества. Равновесие наступает, когда уменьшение энергии, возникающее за счет сжатия тела гравитационной силой, компенсируется сопутствующим возрастанием упругой энергии. Возникновение электрической поляризации вещества и появление дополнительной кулоновской энергии само по себе энергетически невыгодно. Но вместе с появлением электрической поляризации может уменьшиться упругая энергия тела, в результате изменятся его радиус и гравитационная энергия. Поэтому, в принципе, нельзя исключить того, что полная энергия тела при этом может уменьшиться, а значит, появление электрической поляризации станет выгодным. Отвергать такую возможность нельзя, необходимо провести расчеты. Для этого, прежде всего, нужно договориться, с каким веществом мы имеем дело или каково его уравнение состояния. Немецкий ученый Р.Эмден в своей работе "Газовые шары" в 1907 году заложил основы такого расчета. Он впервые смог решить подобную задачу, предположив, что зависимость плотности звездного вещества γ от давления внутри

звезды p можно описать политропным уравнением:

$$\gamma \sim p^k. \quad (4)$$

Здесь k — показатель политропы. Если $k = 0$, то вещество несжимаемо, т.к. его плотность не зависит от давления. Газовое состояние вещества описывается показателем $k = 1$. Нерелятивистский ферми-газ, т.е. вещество в состоянии электрон-ионной плазмы, которое считается обычным для "обычного" звездного вещества, имеет $k = 3/5$.

Для получения решения вместе с уравнением состояния необходимо записать уравнение равновесия. Пока электрическая поляризация отсутствует, уравнение равновесия определяется тем, что гравитационная сила γg (g — гравитационное ускорение) компенсируется действующим на вещество градиентом давления:

$$\gamma g = \text{grad } p. \quad (5)$$

Если в веществе возникает электрическая поляризация, то можно говорить о том, что каждый его атом приобретает небольшой электрический заряд, а в единице объема вещества сосредоточится заряд ρ . Это приведет к тому, что в веществе возникнет электрическое поле E и дополнительная электрическая сила ρE , которая будет направлена против силы гравитации от центра к поверхности звезды. В этом случае условие равновесия возможно записать так:

$$\gamma g - \rho E = \text{grad } p. \quad (6)$$

Если обозначить

$$\frac{\rho E}{\gamma g} = q, \quad (7)$$

то уравнение равновесия переписывается в виде

$$\gamma g(1 - q) = \text{grad } p. \quad (8)$$

В случае $q = 0$ мы имеем незаряженное тело, а при $q = 1$ электрическая сила полностью компенсирует действие гравитации. Силы гравитации много слабее электрических, поэтому для полной компенсации гравитационной силы необходим ничтожный электрический заряд: для этого достаточно иметь на каждый атом внутри космического тела всего 10^{-18} от заряда одного электрона.

При такой компенсации, как видно из равенства (8), градиент давления внутри космического тела исчезнет. Но это не значит, что будет отсутствовать само давление! Действительно, хотя находящийся на один атом вещества электрический заряд ничтожен, суммарная энергия электрического поля, которая будет существовать вне звезды, оказывается огромной. Кулоновская энергия уменьшится, если на поверхность звезды "налипнет" поверхностный заряд другого знака, чем объемный заряд внутри звезды, и мы получим структуру, предложенную еще Сузерлендом. В этом случае звезда будет нести заряд с плотностью ρ внутри, но в целом будет электронеутральной и кулоновское поле вне звезды будет отсутствовать. В плане уменьшения кулоновской энергии это выгодно. Но при этом поверхностный заряд, находящийся на заряженном шаре, будет притягиваться к центру шара и равномерно сдавливать его вещество. Это приведет к уменьшению гравитационной энергии при одновременном росте энергии деформации.

Таким образом, при $q = 0$ вещество космического тела сжато неоднородно: давление P_0 в его центре очень велико, а на поверхности давление отсутствует. При $q = 1$ все космическое тело однородно сжато слоем поверхностного заряда. Действующее в этом случае на вещество давление P_1 получается несколько меньшим, но, тем не менее, величина его имеет тот же порядок, что и давление в центре при отсутствии электрической поляризации.

Полное отсутствие заряда при $q = 0$ и максимальный заряд при

$q = 1$ — это два предельных случая. Конечно, следует ожидать, что расчет может показать, что энергетически выгодным окажется некий промежуточный вариант.

К сожалению, сам расчет оказывается настолько сложным, что его можно провести только с помощью вычислительных машин. Эта сложность возникает в основном из-за того, что давление, которое развивается внутри звезды, зависит от плотности вещества внутри рассматриваемого шара, а эта плотность в свою очередь зависит от давления. Такие расчеты примерно через два десятилетия после создания Р.Эмденом политропной модели провели независимо С.Чандрасекар и Л.Д.Ландау. Чандрасекар смог их провести благодаря тому, что у его учителя, знаменитого астрофизика А.Эддингтона в Кембридже была достаточно совершенная по тому времени механическая счетная машина. Как проводил расчеты Л.Д.Ландау, неизвестно, но он придавал этим расчетам такое внимание, что их результаты привел в виде графиков [10], которые редко встречаются в его знаменитом курсе. Всю энциклопедию физики ему удалось выразить языком формул.

Простое решение в рамках политропной модели получается для случая несжимаемого вещества, но при этом возникновение электрической поляризации не может привести к изменению ни гравитационной, ни упругой энергии тела, а значит, результат ясен и без всякого расчета: появление дополнительной кулоновской энергии будет невыгодно.

Однако проведение расчета для вещества с отличными от нуля политропными индексами к изменению этого вывода не ведет: расчет в рамках политропной модели показывает, что для газового шара, состоящего из вещества с любым политропным индексом, возникновение электрической поляризации энергетически невыгодно.

Но Земля — не газовый шар. Для нее использование уравнения состояния (4) вряд ли оправданно. Если считать Землю твердым телом, каким она, безусловно, является вблизи поверхности, наша задача сильно упростится. В этом случае можно воспользоваться результатами аналитического решения задачи о деформации твердого шара собственным гравитационным полем, приведенного в "Теории упругости" Ландау—Лифшица [11]. Это решение получается аналитическим только для случая слабой гравитации, когда деформации вещества малы, но качественно большие деформации сути дела не изменяют. А суть решения состоит в том, что в центральной области шара вещество оказывается сжатым, но примерно на одной четверти радиуса, прилегающей к поверхности, оно подвергается радиальному растяжению. Это означает, что растянуто вдоль направления радиуса вещество, занимающее почти половину объема шара вблизи поверхности. Это существенное отличие от случая газового шара. Для газового шара при $q = 0$ в соответствии с (4) вблизи поверхности вместе с обращением в нуль давления к нулю стремится и плотность вещества. Поэтому для этого случая основной вклад в гравитационную энергию тела вносит плотное вещество в центральной области звезды. Возникновение электрического заряда и перераспределение давления не ведет в этом случае к заметному уменьшению гравитационной энергии, и в результате возникновение электрической поляризации оказывается невыгодным. Для твердого шара ситуация качественно изменяется именно в силу того, что вблизи поверхности, где велико ускорение g , вещество не сжато по радиусу, а растянуто. Это значит, что для случая $q = 0$ гравитационная энергия получается большой. Расчет показывает, что в случае $q = 1$ все вещество шара сжимается давлением

$$P_1 = \frac{GM^2}{6RV} \quad (9)$$

(M , V и R — масса, объем и радиус космического тела), и в результате радиус такого космического тела оказывается меньше, а значит, меньше и гравитационная энергия. Упругая энергия при этом меняется не так сильно, потому что происходит только изменение знака радиальной деформации — растяжение заменяется сжатием.

В связи с этим для вычисления энергетического равновесия в твердом шаре более оправданно пользоваться другим уравнением состояния, переходящим при малых давлениях в закон Гука, например:

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 + \frac{p}{K}\right). \quad (10)$$

Здесь γ_0 — плотность при нулевом давлении, K — модуль всестороннего сжатия вещества. Вблизи поверхности, где $p \ll K$, такое уравнение состояния соответствует несжимаемому веществу с $\gamma = \gamma_0$. Вблизи центра Земли, где $p \simeq K$, уравнение состояния соответствует веществу с политропным индексом, близким к 1,

$$\gamma \simeq \gamma_0 \frac{p}{K}.$$

В этом случае шар как бы составлен из двух слоев: внутреннего — сжимаемого, который не вносит большого вклада в гравитационную энергию, и внешнего несжимаемого, который в основном ее и определяет. Возникновение заряда приводит к сжатию всего шара. Но заметное уменьшение гравитационной энергии в этом случае произойдет только для достаточно массивных тел, для которых давления P_1 приближаются к модулю всестороннего сжатия K . Ясно, что для малых космических тел, для которых $P_1 < K$, деформации будут малы, заметного уменьшения гравитационной энергии не произойдет и возникновение электрической поляризации останется невыгодным.

Именно такой результат и дает компьютерный расчет [12] для баланса энергии в массивном шаре, состоящем из вещества с ура-

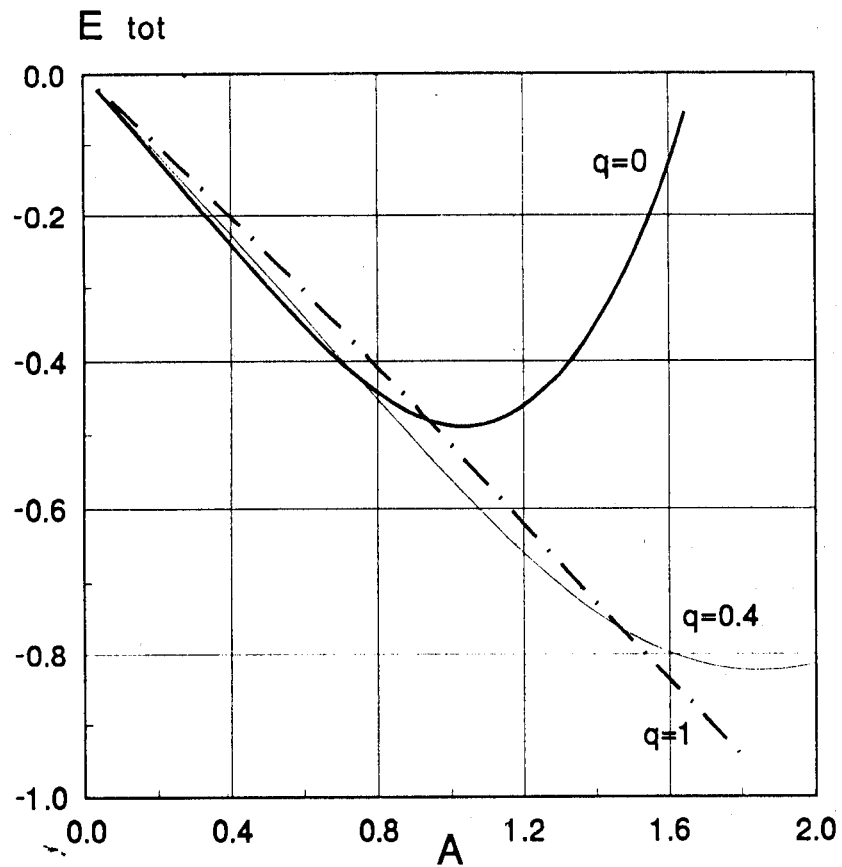


Рис. 2. Зависимость полной энергии космического тела от параметра A (приведенной массы космического тела) для трех значений электрической поляризации. Видно, что при $A > 0.6$ возникновение электрической поляризации становится энергетически выгодно

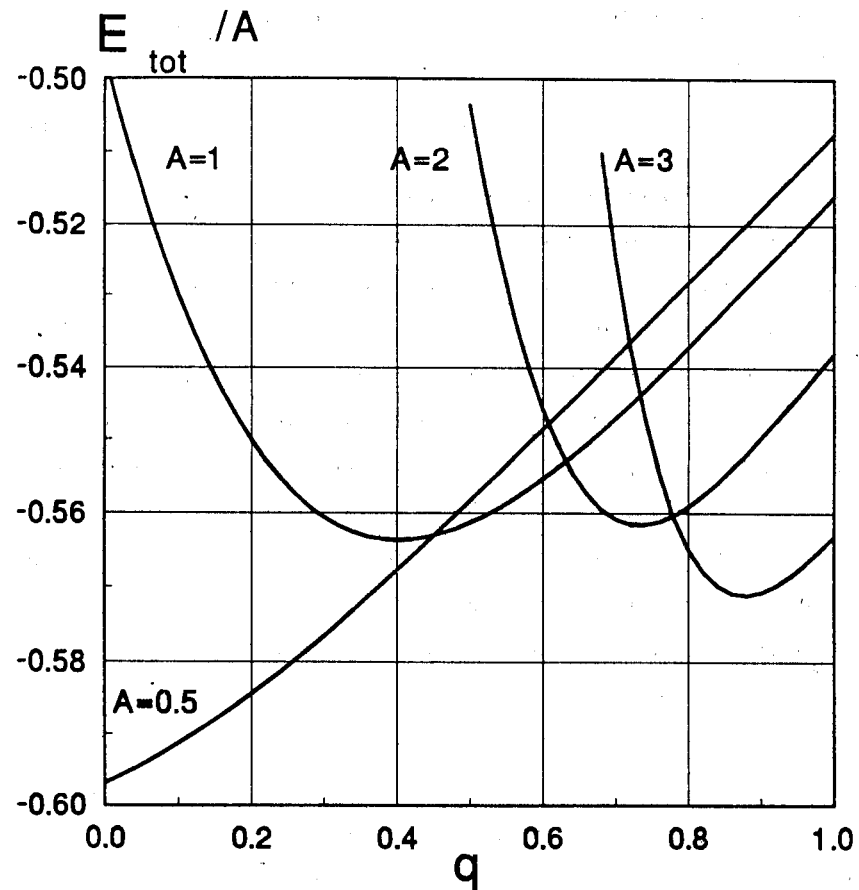


Рис. 3. Зависимость полной энергии космического тела от величины электрической поляризации в случаях $A = 0.5$, $A = 1$, $A = 2$, $A = 3$. Видно, что при $A = 0.5$ появление электрической поляризации энергетически невыгодно. При больших A минимум энергии смещается в сторону $q \rightarrow 1$

внешним состоянием (10). Результат этого расчета показан на рис. 2 и 3. На этих рисунках

$$A = 6P_1/K. \quad (11)$$

Из рис. 2 можно видеть, что возникновение заряда в космическом теле становится энергетически выгодным, когда параметр $A \geq 0.6$. Для шара с меньшими размерами возникновение спонтанной электрической поляризации энергетически невыгодно. Согласно определению (9), в первую очередь к росту параметра A ведет увеличение массы космического тела. Поэтому результат расчета может быть сформулирован по-другому: спонтанная электрическая поляризация становится энергетически выгодной, если масса тела превышает примерно в 10 раз или больше массу Луны (конечно, если остальные константы составляющего тело вещества — плотность и упругость — остаются типичными для "земных" условий).

Из рис. 3 видно, что вместе с увеличением A , т.е. вместе с ростом массы тела, равновесие, соответствующее минимуму энергии, смещается в сторону $q \rightarrow 1$. Поэтому при достаточно больших массах, в соответствии с определением (7) минимуму энергии соответствует плотность связанного электрического заряда

$$\rho \approx G^{1/2} \gamma. \quad (12)$$

Гироманнитное отношение

Вращение вокруг своей оси космического тела с таким объемным зарядом (с учетом компенсирующего поверхностного) создаст у него магнитный момент, величина которого определяется равенством Блэкетта (1) с гироманнитным отношением:

$$\vartheta = \frac{\sqrt{G}}{3c} \approx 2.88 \cdot 10^{-15} (\text{см/г})^{1/2},$$

логарифм которого

$$\lg \vartheta = -14.54$$

показан на рис. 4 штрихпунктирной линией.

На этом рисунке также показаны значения $M(L)$ для тех космических объектов, для которых они нам известны. Данные, использованные при построении этого рисунка, взяты из справочников, обзоров и отчетов об экспедициях космических аппаратов [13—19]. Для всех указанных звезд, кроме Солнца и пульсара (Her X-1), значения магнитных полей, скоростей вращения и радиусов приведены в обзоре [15]. В этом обзоре не приведены массы звезд, нужные нам для вычисления L . Их можно определить, исходя из данных о спектральных классах звезд, которые известны. Однако все эти звезды относятся к классам, близким к солнечному, поэтому, зная их радиусы, массы можно определить, предположив, что эти звезды имеют ту же плотность, что и Солнце. Полученные этим путем угловые моменты для звезд использованы при построении рис. 4.

Для Ио и Титана магнитные поля определены космическим аппаратом "Вояджер-1" [17, 18]. В литературе отсутствуют данные об угловой скорости вращения этих спутников Юпитера и Сатурна. В связи с тем, что за счет действия приливного трения период вращения спутников вокруг оси стремится к периоду их орбитального вращения, при построении рис. 4 для Ио и Титана вместо угловых скоростей взяты значения обратных периодов их обращения вокруг центральных планет.

Расчет по методу наименьших квадратов даст для наблюдаемых данных:

$$\lg \vartheta = -(14.82 \pm 0.87).$$

Этому равенству на рис. 4 соответствует сплошная линия.

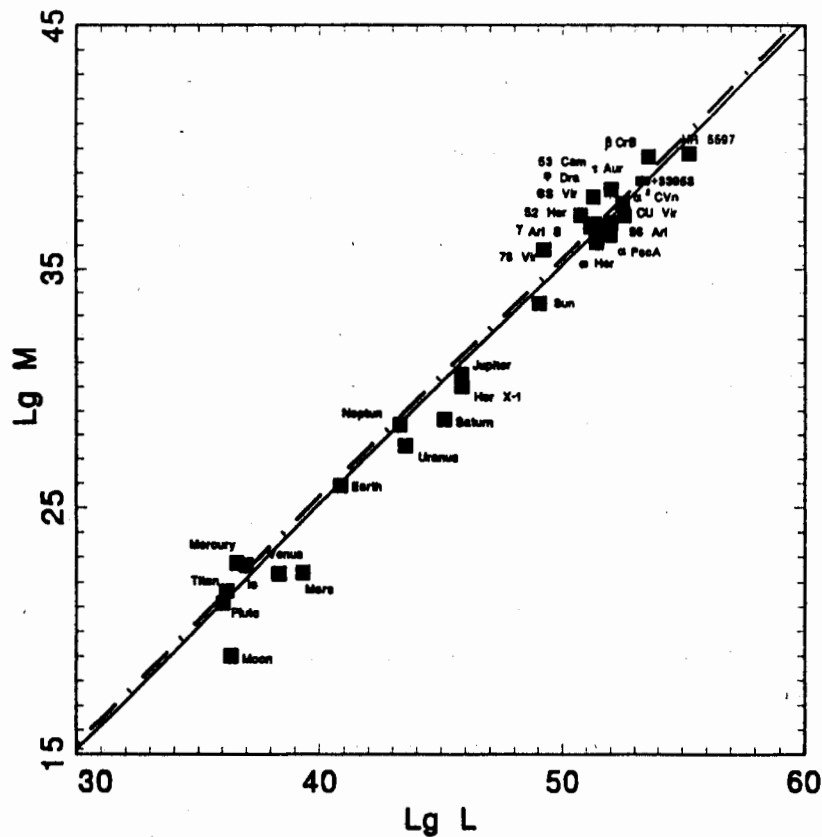


Рис. 4. Наблюдаемые значения магнитных моментов космических тел в зависимости от их угловых моментов.

Данные приведены в логарифмическом масштабе. По оси ординат — логарифм магнитного момента в $\text{Гс} \cdot \text{см}^3$, по оси абсцисс — логарифм углового момента вращения в $\text{эрг} \cdot \text{с}$.

Штрихпунктирная линия — результат расчета, сплошная линия — результат фитирования по наблюдаемым значениям $M(L)$

Использование равенства (12), справедливого только для предельно больших тел, должно вести к завышению расчетной оценки. То, что Луна наиболее сильно удалена от расчетной прямой, подтверждает, что внутри этого малого космического объекта давления невелики и не способны электризовать вещество в достаточной мере.

Некоторые выводы

Удовлетворительно согласуясь с результатами наблюдений, описанная выше модель имеет сомнительное преимущество перед предложенными ранее в том, что не требует лабораторной проверки. Точнее, так как работать описанный механизм электрической поляризации начинает при столь высоких давлениях, которые нельзя получить при проведении нужного опыта, то ставить вопрос о ее лабораторной проверке представляется невозможным.

Однако проявление земного магнетизма характеризуется кроме величины поля еще целым рядом черт. Что может сказать о них рассмотренная модель?

В этой модели, строго говоря, знак электрической поляризации, а значит, и знак магнитного момента космического тела, не определен. Но действие тяготения на тяжелые ионы должно было бы вытолкнуть легкие электроны на поверхность, и этот малый эффект мог бы определить предпочтительный знак магнитных моментов — именно такой знак поля имеет в настоящее время Земля и многие другие космические тела. С другой стороны, знак магнитного момента может изменяться за счет действия механизма динамо. Действительно, рассмотренный выше механизм может нести ответственность за возникновение основного магнитного поля космических объектов. Детальная структура, временная зависимость и знак магнитных полей могут быть объяснены действием динамо,

для которого основное поле служит затравочным. Поэтому представляется, что основная трудность модели динамо, состоящая в отсутствии затравочного поля, может быть преодолена, т.к. рассмотренный эффект электрической поляризации не ведет к отмене модели динамо, но дополняет ее механизмом возникновения затравочного поля.

Но имеется еще один момент, вызывающий серьезные опасения: обоснование рассмотренной модели проведено для конденсированного вещества, поведение которого при малых давлениях описывается законом Гука. Поэтому, казалось бы, применимость этой модели должна быть ограничена планетами и их спутниками. Реально результаты расчета оказываются применимы для всех объектов, для которых есть данные наблюдений. То, что в этом ряду оказываются звезды, состоящие в основном, как мы уверены, из электронно-ионной плазмы, и пульсары, можно, конечно, рассматривать как некоторую аналогию с тринадцатым ударом часов, который обесценивает все предыдущие. Но представляется, что это, скорее всего, результат некорректности использования при проведении расчетов в рамках политропной модели уравнения состояния с фиксированным политропным индексом.

Автор глубоко благодарен В.Л.Любошицу, Л.А.Максимову и М.И.Подгорецкому за многолетние полезные обсуждения изложенной проблемы, критику и помощь в создании описанной модели и уточнение расчетов.

Литература

1. Долгинов Ш.Ш., Магнетизм планет, Новое в жизни, науке, технике, 12/1974.
2. Гилберт В., О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле. М.: АН СССР, 1956.
3. Паркинсон У., Введение в геомагнетизм, М.: Мир, 1986.
4. Sutherland W., *Terrestr. Magn. Atm. Elec.* 1903, 8, p.49.
Sutherland W., *Terrestr. Magn. Atm. Elec.* 1904, 9, p.167.
5. Лебедев П.Н. Магнитометрическое исследование вращающихся тел, Собрание сочинений, Москва, 1913, с.207.
6. Blackett P.M.S., *Nature*, 159 (1947) 658-666.
7. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. Вестник МГУ, сер.3, Физика и астрономия, 1984, т.25, N2, с.40-45.
Григорьев В.И. и др., Бароэлектрический эффект и магнитные поля планет и звезд, Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, N4, 1990, с.3-14.
8. Васильев Б.В. Электрическая поляризация в металлах, возникающая при их вращении. Препринт ОИЯИ Р14-84-255, Дубна, 1984.
9. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики, М.: Наука, 1975.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, часть 1, М.: Наука, 1964.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория упругости, М.: Наука, 1964.
12. Васильев Б.В. Спонтанная электрическая поляризуемость космических тел, Препринт ИФТП, N94-2-1, Дубна, 1994.
13. Allen C.W., *Astrophysical quantities*, The Athlone press, 1973.
14. Stevenson D.J., *Rep. Prog. Phys.*, 46 (1983) 555-620 .

15. Borra E.F., Landstreet J.D., The Astrophysical Journal, Suppl, 42 (1980) 421-445.
16. Anderson I., New Scientist , 1493 (1986) 21-22.
17. Ness N.F. et al., Science , 206 (1979) 966-971.
18. Ness N.F. et al., Science , 212 (1981) 211-217.
19. Manchester R., Taylor J., Pulsars, San Francisco, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 августа 1995 года