
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ТРЕХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАДИГМАХ

И.А. Бабенко

*Учебно-научный институт гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов*

В статье кратко рассмотрена история развития представлений об источниках генерации магнитного поля Земли и других астрофизических объектов. Обсуждается механизм динамо, а также гипотеза Сазерленда и Эйнштейна. Особое внимание уделено обоснованию гипотезы Сазерленда в рамках реляционной и геометрической физических концепций.

Ключевые слова: главное магнитное поле Земли, гипотеза Сазерленда, теория механизма динамо, реляционная физическая концепция, геометрическая парадигма, разделение зарядов, объемный положительный и поверхностный отрицательный заряды.

Одна из основных задач теории в любой области знаний – найти позицию, с которой объект виден в предельной простоте.

*Джозайя Уиллард Гиббс,
американский физик, XIX в. [1]*

Введение

На сегодняшний день вопрос о механизме формирования магнитного поля Земли стоит довольно остро, так как, выражаясь словами А.И. Дьяченко, «какие бы гипотезы ни строили сегодня ученые относительно поведения геомагнитного поля, очевидно одно – магнитное поле планеты пробудилось и проявляет какую-то активность. Вот только какую? Необычное поведение магнитных полюсов и резкое падение общей напряженности поля – лишь ее проявление. При этом не следует забывать, что наша Земля – лишь один из атомов в организме беспредельной Вселенной, взаимосвязь с которой может оказаться гораздо сложнее, чем представляется сегодня. Магнитосфера Земли погружена в гелиосферу – магнитную капсулу Солнечной системы, которая, в свою очередь, мчится в пространстве через неизведанные галактические магнитные поля. Думается, что понимание подобных взаимодействий позволит геофизике XXI века сделать качественный шаг вперед» [2].

Ф. Буссе утверждает, что А. Эйнштейн считал эту проблему одной из трех важнейших проблем физики [3]. В связи с этим уместно привести рассуждения А.В. Викулина: «Несмотря на колоссальные усилия сотен физиков, занимающихся этой проблемой, нет ни одного достаточно серьезного успеха в этом деле. Проследим еще одну цепочку. Если магнитное поле на Земле обязано динамо-эффекту в жидком железном ядре (что не подвергает-

ся сомнению), то почему магнитное поле раньше было на Марсе, Луне, Ио, Ганимеди, а потом исчезло? (Возможно, что на Ганимеди поле еще существует). Почему оно обнаружено на Меркурии, но его нет на Венере? Почему магнитное поле имеется на больших планетах (по своей структуре однотипных с земным), где, по-видимому, нет железного ядра? Разговоры относительно того, что, дескать, динамо на этих планетах “раскручивается” в жидком водороде и вообще эти планеты “холодные”, “разбиваются” результатами наблюдений космической станцией Вояджер, которая обнаружила, что тепловой поток на этих планетах значительно превышает поток тепла от Солнца на их расстояниях» [4].

Таким образом, можно утверждать, что проблема разработки всеобъемлющей и адекватной теории генерации магнитного поля Земли и других астрофизических объектов, которая могла бы объяснить все характеристики этого явления, – одна из актуальных проблем фундаментальной физики на сегодняшний день.

В предлагаемой работе приведен краткий исторический обзор обнаружения и накопления информации о магнитном поле Земли. Рассмотрены попытки построения теории генерации магнитного поля Земли, такие как динамо-процесс, гипотезы Сазерленда и Эйнштейна. Проанализированы основные вопросы, задаваемые в связи с гипотезой Сазерленда.

1. Краткий исторический обзор обнаружения и накопления информации о магнитном поле Земли

Проследить всю историю знакомства человечества с магнитным полем Земли и его основными характеристиками довольно непростая задача в силу ее обширности и фрагментарности. Но в процессе изучения геомагнитного поля Земли есть несколько важных моментов, существенных для понимания идеи об источнике и генерации магнитного поля Земли и последующего обобщения для астрофизических объектов.

Сами исследования магнитного поля Земли начались непосредственно с фиксации его на поверхности Земного шара и в непосредственной близости от него. На этом этапе выполнялось экспериментальное определение элементов земного магнетизма (магнитного склонения, магнитного наклона, модуля вектора магнитной индукции) в разных точках Земного шара и составлялись магнитные карты.

В 1492 году Х. Колумбом во время плавания из Европы в Америку было открыто магнитное склонение. Открытие же магнитного наклона, как считается, принадлежит мастеру Георгу Гартману из Нюрнберга. Уже на этом этапе исследований земного магнетизма возникли вопросы об источнике магнитного поля Земли. В 1576 году английский гидрограф Р. Норман впервые высказал идею, что причина, по которой стрелка устанавливается в определенном направлении, находится внутри Земли [5].

К концу XVI века в Европе стали известны два факта, полученные экспериментально: отклонение стрелки от истинного меридиана и изменение величины отклонения от места к месту. В 1600 году У. Гильбертом была опубликована работа «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле», где было высказано утверждение, что Земля представляет собой магнит, полюсы которого совпадают с географическими полюсами, а источник земного магнетизма находится внутри Земли, что подтверждалось опытами с намагниченным железным шаром. В доказательство своей теории У. Гильберт приводит явление наклона магнитной стрелки, которое оказалось примерно одинаковым как для маленькой модели Земного шара, изготовленного из природного магнита, так и для Земли в целом. При этом для объяснения явления склонения, которое противоречило его теории, Гильберт выдвинул предположение о намагниченности материков, которые производят отклоняющее действие на стрелку. С этого времени Гильбертом было введено понятие истинных магнитных полюсов, которые располагались где-то в Арктике и Антарктике, но где точно – тогда еще не было известно [5].

Примерно к 1634 году Г. Геллибрандом на основе измерения склонения в Лондоне были открыты вековые вариации склонения [5].

В 1701 году после путешествия по Атлантике английский астроном Эдмон Галлей (1656–1742) опубликовал первую настоящую карту магнитных склонений, покрывшую весь Атлантический океан [6].

В 1811 году Кристофер Ханстин опубликовал работу «Исследования магнетизма Земли», в которой были собраны все наблюдения магнитного поля, сделанные к тому времени, вместе с картами и попытался построить математическую модель, которая воспроизводила бы результаты наблюдений на основе идеи о системе дипольных магнитов внутри Земли. Вывод Ханстина был таков: «...одного магнита явно недостаточно, требуется как минимум два. Получается всего четыре магнитных полюса». Из них два новых должны быть где-то в Сибири и в юго-восточной части Тихого океана; при этом два первичных полюса Ханстин расположил на далеком севере Канады и в Восточной Антарктике. Удивительно, что в своей работе Ханстин правильно указал не только местонахождение двух главных магнитных полюсов, но и приблизительное положение двух крупнейших мировых магнитных аномалий, которые он называл «полюсами второго, малого диполя» [5].

Что касается непосредственно измерений напряженности магнитного поля, то, по сути, до конца XVII века все наблюдения земного магнетизма сводились к измерениям склонения и наклона. Только в 1785 году, после того как Ш. Кулон предложил метод измерения вращающего момента, появилась возможность разработать метод измерения напряженности магнитного поля [6].

В конце XVIII века, после того как был разработан метод измерения горизонтальной составляющей, были обнаружены вариации наклона [2].

Следующим важным моментом в накоплении информации о магнитном поле Земли стало определение географических координат магнитных полюсов Земли и изменений этих координат с течением времени. Впервые измерения координат Северного магнитного полюса были сделаны английским мореплавателем Джеймсом Кларком Россом в 1831 году, а в 1841 году были измерены координаты южного магнитного полюса [6].

С 1903 года Амундсен на острове Кинг-Уильям в течение 19 месяцев выполнял непрерывные измерения магнитного поля и обнаружил, что средняя точка магнитного полюса сместилась к северу от точки, установленной экспедицией Росса. В итоге было обнаружено смещение северного магнитного полюса на 46 км к северу в период с 1831 по 1904 год. В ходе измерений также стало известно, что магнитный полюс это не одна точка, а скорее область, простирающаяся на несколько километров, в которой существует множество отдельных полюсов с наклоном 90° . По сути, магнитные полюса Земли – это средние точки областей полюсов. Также было установлено, что зона северного магнитного полюса вращается по часовой стрелке, в отличие от южной, которая вращается против часовой стрелки [6]. Рядом других экспедиций было установлено смещение полюсов на сотни километров.

Но одним из самых важных стало открытие, сделанное французским геофизиком Бернаром Брюнесом в 1906 году и японским геологом Мотонори Матуюми в 1920 году, – это обнаружение инверсии магнитных полюсов Земли в прошлом [6].

Резюмируя вышеприведенное, можно сказать, что к началу XX века было выполнено моделирование главного магнитного поля Земли и выявлены элементы земного магнетизма в разных географических координатах. Также стало известно, что северный и южный магнитные полюса не фиксированные точки, а представляют собой средние точки областей с наклоном в 90° . При этом они находятся все время в движении и в прошлом неоднократно менялись местами между собой, то есть происходила инверсия магнитного поля Земли.

Безусловно, постепенно с накоплением экспериментального материала становилось очевидным, что магнитное поле Земли имеет довольно сложную структуру. Все это нуждалось в теоретическом обосновании.

2. Математическое описание магнитного поля Земли

В 1835 году русский ученый И. Симонов опубликовал работу «Опыт математической теории земного магнетизма», в которой показал, что магнитное поле Земли, вызванное суммарным действием магнитных частиц, находящихся внутри нее, будет тождественно с полем диполя, если допустить, что частицы распределены равномерно. При этом выражение потенциала диполя как функции широты и долготы оказалось тождественным с

первым членом разложения потенциала, выведенного впоследствии К. Гауссом [5].

Следом за работой Симонова в 1839 году появились знаменитые работы К. Гаусса: «Напряженность земной магнитной силы, приведенная к абсолютной мере» и «Общая теория земного магнетизма». В первой работе К. Гаусс дал теоретическое обоснование метода измерения горизонтальной составляющей в абсолютных единицах и обосновал технику соответствующих экспериментов. Во второй работе К. Гаусс на основе идеи о внутреннем источнике земного магнетизма предложил выражение для магнитного потенциала в любой точке поверхности Земного шара в виде функции координат (широты и долготы), разложенной в бесконечный ряд по шаровым функциям. Используя конечное число членов этого ряда, можно было определить (применяя результаты наблюдений) коэффициенты этого ряда и теоретически вычислять потенциал в любой точке земной поверхности [5]. Данная теория решала задачу о структуре магнитного поля Земли, но не давала объяснения происхождения магнитного поля Земли.

Физическую интерпретацию указанных К. Гауссом членов разложения дал русский ученый Н. Умов в своей работе «О построении геометрического образа потенциала Гаусса как приеме изыскания законов земного магнетизма» [5]. Это позволило определить вековые изменения геомагнитного поля. Указанные теоретически члены ряда Гаусса–Симонова соответствуют диполям, квадруполям, октуполям и мультиполям. Только к 1950 году были рассчитаны численные значения всех основных коэффициентов ряда Гаусса–Симонова [7], но, что характерно, коэффициенты, соответствующие диполю Симонова, за столетие уменьшились примерно на 7 %, что говорит о том, что Земля постепенно размагничивается. На сегодняшний день, наблюдения за магнитным полем Земли показывают, что магнитный момент планеты уменьшился на 10 % [6].

Данные исследования позволили сделать вывод, что почти 95 % современного геомагнитного поля можно описать диполем Симонова, расположенным вблизи центра Земли. При этом ось диполя наклонена к оси вращения Земли на 11,5 градусов. (Отметим, что в северном полушарии находится южный магнитный полюс, а в южном – северный.) Разница между эталонным дипольным полем и наблюдаемым в текущее время составляет 5 %. Эта разница связана с мировыми магнитными аномалиями (Бразильской, Сибирской, Канадской) [8]. Стало очевидно, что главное геомагнитное поле испытывает медленное вращение (вековые вариации) с периодом от 10 до 10^4 лет: 10–20, 60–100, 600–1200 и 8000 лет. Период в 8000 лет характеризуется изменением дипольного момента в 1,5–2 раза. Для мировых аномалий характерно то, что в ходе вековых вариаций они движутся, распадаются и возникают вновь. Из-за вековых вариаций геомагнитный полюс прецессирует относительно географического полюса с периодом около 1200 лет [7].

В 1895 году Пьером Кюри было открыто явление исчезновения остаточной намагниченности тела при нагреве до критической температуры, которая была названа точкой Кюри. При ее достижении скачкообразно изменяются и другие свойства твердых тел – удельная электропроводность и теплоемкость. Но главное состоит в том, что для железа такая температура $t_k = 758$ °С, а для никеля $t_k = 374$ °С, которые достигаются в недрах Земли в пределах литосферы до 200 км. Таким образом, гипотеза Гильберта о магните в центре Земли, которая являлась основной до начала XX века, оказалась несостоятельной [9].

3. Первые гипотезы обусловленности магнитных полей вращением объектов

Как видно из вышеизложенного, теории Гильберта и Гаусса решали задачу о нахождении закономерностей в распределении элементов земного магнетизма, но не давали ответа на вопрос о происхождении магнитного поля Земли. Ответы на поставленные вопросы необходимо было искать в иных теориях. Исторически именно идея о перераспределении зарядов в недрах Земного шара была выдвинута в качестве основной причины, объясняющей генерацию магнитного поля Земли в целом.

В 1891 году А. Шустер, рассматривая вид солнечной короны, предположил, что Солнце может иметь магнитное поле, и поставил вопрос о том, не «является ли всякая вращающаяся масса магнитом» [10].

В 1909 году в свет вышла известная работа П.Н. Лебедева «Магнитометрическое исследование вращающихся тел. Сообщение первое» [11]. В этой работе Лебедев поставил задачу «непосредственно магнитометрически исследовать магнитные явления, вызываемые вращением тел». В работе были подвергнуты экспериментальной проверке две гипотезы центробежных сдвигов, согласно которой вращающееся тело приобретает отрицательный поверхностный заряд вследствие центробежных ускорений, так что отрицательные заряды, согласно этой гипотезе, испытывают большее ускорение, чем положительные.

Для проверки этой гипотезы Лебедевым была построена специальная установка, в которой испытуемое тело (кольцо диаметром в 6 см) из эбонита, латуни (медно-цинковый сплав), воды и бензола приводилось во вращение со скоростью в 30.000 – 35.000 оборотов в минуту, а магнитное поле измерялось непосредственно чувствительным магнетометром.

Эти опыты дали отрицательный результат. При этом, как показали расчеты, выполненные на основании данной гипотезы, чувствительности магнетометров было достаточно для обнаружения ожидаемого Лебедевым магнитного поля.

Несмотря на полученный Лебедевым отрицательный результат, идею о намагничивании тела при вращении развивал Вильсон [12], Блэккет [13], Ступонченко [14] и др. Но после того как было выполнено измерение в шах-

тах горизонтальной составляющей магнитного поля, показавшее, что значение с глубиной увеличивается, С.А. Арсеньев в своей статье [7] опровергает гипотезы, предложенные Вильсоном, Блэккетом и Ступонченко.

С.А. Арсеньев в своей работе [7] исследует, почему эксперимент Лебедева, а также Свонна и Лангарка в 1928-м и русского физика Васильева в 1894 году оказался отрицательным. Для экспериментов использовались диэлектрики, пара- и диамагнетики, а Лебедеву было необходимо использовать ферромагнетик (железо, никель и кобальт). Тогда бы он в результате смог бы получить магнитное поле. Данное явление было открыто в 1909 году Самуэлем Барнеттом и в 1908 году английским физиком О. Ричардсом, который, исследуя связь намагничивания и вращения, согласно уравнениям Максвелла, обнаружил возможность обратного гиромангнитного эффекта – ферромагнитное тело, намагниченное вдоль некоторой оси, приобретает около нее вращательный импульс, пропорциональный намагниченности. В 1915 году этот эффект был экспериментально обнаружен де Гаазом и А. Эйнштейном. Если это явление принять как источник магнитного поля Земли, то это сразу же приводит к серьезному противоречию, так как эффект Барнетта, де Гааза и А. Эйнштейна пропадает при температурах выше точки Кюри t_k , которая как раз достигается в ядре Земли. Мантия также не подходит, так как ее силикатный состав не приводит к намагничиванию.

4. Теория магнитного динамо

Параллельно вышеназванным теориям, основанным на вращении Земли, развивалась другая идея о генерации магнитного поля Земли посредством механизма динамо. Она стартовала с открытия Хэйлом в 1903 году сильных магнитных полей вокруг пятен на Солнце [7]. Английский физик-теоретик Джозеф Лармор в 1919 году для объяснения магнитного поля Солнца выдвинул идею механизма динамо [15].

Идею Лармора в 1933 году попытался развить Каулинг. Но ему тогда на этой идее не удалось объяснить ни магнитные поля солнечных пятен, ни основные поля Земли и Солнца [13].

В 1939 году немецкий физик Вальтер Эльзассер попытался приписать ток термоэлектрическим ЭДС, возникающим вследствие разности температур в жидком ядре, обусловленным конвекционными движениями. По его мнению, именно этот механизм и создает главное магнитное поле Земли [16].

Но в 1945 году Каулинг показал, что термические эффекты, вызываемые конвекцией во вращающемся Солнце, дают лишь правильный знак поля, а по величине только 10^7 Гс·см³ от измеренного значения. Он показал также, что время электромагнитного спада общего магнитного поля Солнца составляет 10^{10} лет, поэтому, возможно, что наблюдаемое на сегодняшний день поле – это остатки от первичного состояния [13]. Однако еще

Лэмб в 1920 году показал [17], что спадание токов в Земле происходило бы слишком быстро и к настоящему времени его бы уже не существовало.

Помимо этого в 1947 году русский физик Я.В. Френкель показал, что термоэлектрическая теория ведет к существенным трудностям и предложил заменить термоэлектрические токи токами вертикальной конвекции, возникающими из-за выделения теплоты при распаде тяжелых радиоактивных веществ в ядре Земли. Кстати, именно он первым сравнил ядро Земли с турбогенератором. При этом система конвекционных токов выполняет роль своего рода турбины. Слабое начальное поле будет усиливаться этими токами. Френкель показал [18], что, согласно его представлениям, магнитное поле внутри Земли достигает 10 000 эрстед, что является довольно большой величиной, однако, по его мнению, ее можно снизить. Для этого необходимо разбить конвекцию на ряд ячеек, подобно ячейкам Бернара.

В 1963 году Лоус и Уилксон [19] в лабораторных условиях построили модель работающего динамо, которая показала способность менять полярность магнитного поля. Это был основной фактор в пользу этой модели, так как, согласно наблюдениям, инверсия магнитного поля Солнца происходит каждые 22 года, а на Земле последняя была примерно 700 000 лет назад и по всем признакам на сегодняшний день готовится к смене полярности магнитного поля. При этом теория динамо объясняет инверсию поля нестабильностью самого механизма генерации поля и вариациями в структуре ядерных течений.

Предложенная модель конвективного динамо Я.И. Френкеля была впоследствии развивалась в многочисленных работах М. Эльзассера, Э. Булларда, Е. Паркера, Я.Б. Зельдовича, Д.Д. Соколова, С.И. Брагинского и т.д.

Но при всем этом теория магнитного гидродинамо позволяет объяснить основные характеристики магнитного поля Земли только на качественном уровне. Как отмечает Арсеньев: «Хотя модели динамо позволяют качественно объяснить основные особенности главного магнитного поля, окончательная теория, дающая метод расчета и прогноза магнитного поля Земли, до сих пор не построена» [7. С. 31].

Основные трудности теории связаны с решением полной системы уравнений магнитной гидродинамики, которые состоят из уравнений гидродинамики и уравнений Максвелла. Решение совместных уравнений трудная и почти не решаемая задача. Во всяком случае, на сегодняшний день, она не решена. Для того чтобы как-то приблизиться к ее решению, многие исследователи прибегают к ряду упрощений, порождающих большое количество моделей динамо, обзор которых можно встретить в ряде работ [7–9; 13; 18; 20–23]. В итоге к настоящему времени нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей $\alpha\omega$ – динамо: α^2 – динамо, динамо Рикитаке, диск Фарадея и т.д. ставят вопрос о правильности такого подхода к обоснованию магнитного поля Земли. При этом важным моментом многих моделей динамо является наличие во внеш-

нем ядре сильного тороидального поля. По некоторым моделям интенсивность тороидального поля больше дипольного в 500 раз. Тем не менее, тороидального поля на поверхности Земли не обнаружено. Его можно было бы обнаружить на земной поверхности, если бы, например, в ядре был обнаружен сверхпроводящий экран. Но электромагнитное зондирование дает отрицательный результат на этот счет [4].

В дополнение к этому следует иметь в виду критические замечания И.Л. Жулановой: «Несмотря на гигантский массив расчетов и физические эксперименты, доводы в пользу ячеистой конвекции мантийных масс, оставляют большие сомнения в том, что она может рассматриваться как фактор сопряженного проявления тектонических сил (горизонтальное движение плит, субдукция) и петрогенетических (вплавление огромных объемов магм на границе плит) процессов. Дело в том, что стационарная ячеистая конвекция способна реализовываться только в закрытых термодинамических системах, будучи направлена на выравнивание внутренних тепловых неоднородностей. Она несовместима с выносом энергии и вещества вовне, сопровождающим вулканизм» [20].

5. Гипотезы Сазерленда и Эйнштейна

Неудачи теории динамо и более ранних работ, основанных на вращении астрофизических объектов, заставляют вспомнить еще один блок идей, высказанных в начале XX века В. Сазерлендом и затем усовершенствованных А. Эйнштейном.

В. Сазерленд в ряде своих работ (1900-1908 гг.) [25] выдвинул необычную, на первый взгляд, гипотезу о происхождении магнитного поля Земли. Он предположил, что наблюдаемое магнитное поле производится вкладами двух противоположно направленных магнитных полей, генерируемых вращениями 1) объемного (положительного) и 2) поверхностного (отрицательного) зарядов. Полагалось, что создаваемые ими электрические поля скомпенсированы, но это не означало, что скомпенсированы и их магнитные поля.

В модели Сазерленда существовало также остаточное поле, ответственное за разницу между осью вращения Земли и магнитной осью, а также за движение полюсов. При этом наклон магнитной оси определялся несимметричным распределением проводящего материала. Это распределение также полагалось ответственным за вековые вариации магнитного поля Земли.

Но самое важное в гипотезе Сазерленда состояло в том, что происхождение двух видов зарядов внутри Земли связывалось с различием электрических полей, создаваемых электроном и протоном.

А. Шустер в 1912-м и Брэнт в 1913 году подробно исследовали теорию, основанную на гипотезе Сазерленда о неравенстве сил, действующих между одинаковыми и неодинаковыми частицами атома. В их работах было

показано, что разделение положительного и отрицательного зарядов Солнца не может обусловить больше чем 10^{15} Гс·см³ магнитного поля Солнца [13].

В 1925 году Эйнштейн (неизвестно, был ли он знаком с работами Сазерленда) [26] высказал предположение об очень малом (вне пределов разрешимости современной аппаратурой) различии значений зарядов тяжелых – положительно заряженных и легких – отрицательно заряженных частиц. Это приводит к возникновению избытка заряда у достаточно массивных астрофизических объектов, имеющих объемный положительный заряд, кулоновское поле которого компенсируется редуцируемыми отрицательными частицами. А вращение астрофизических объектов приводит к генерации наблюдаемого дипольного магнитного поля. Гипотеза Эйнштейна соответствовала и уточняла гипотезу Сазерленда.

Но в том же 1925 году А. Пиккард и Е. Кесслер показали, что значения зарядов протона и электрона одинаковы до 20-го знака (10^{-20}) [27], и тем самым поставили под сомнение гипотезу Эйнштейна. На данный момент экспериментально подтверждается сохранение зарядов протона и электрона до 21-го знака (10^{-21}) [28].

Однако гипотезы Сазерленда и Эйнштейна окончательно не были забыты. Так, гипотеза Сазерленда обсуждалась в трудах Б.М. Яновского, где он отмечал, что «гипотеза требует дополнительного предположения о причинах разделения зарядов». При этом он писал в полном согласии с Сазерлендом: «Существование предполагаемых зарядов также предполагает наличие электрических полей на земной поверхности, которые бы взаимно уничтожились, а магнитные поля, создаваемые каждым из них, по абсолютной величине оказались бы разными. Эти заряды, принимая участие в суточном вращении Земли, образуют замкнутые токи, которые в свою очередь создают магнитное поле. Поэтому при соответствующем выборе величины заряда магнитное поле могло быть равным наблюдаемому магнитному полю Земли» [5].

Как следует из изложенного, основным вопросом к гипотезе является проблема обоснования различия зарядов по абсолютной величине.

6. Обоснование гипотезы Сазерленда в рамках геометрической парадигмы

Все попытки обоснования происхождения магнитного поля Земли в рамках теорий «не динамо», и в частности гипотезы Сазерленда, предпринимались в рамках ныне доминирующей теоретико-полевой физической концепции. Данный подход включает в себя представление о классическом пространстве-времени как априори заданном плоском фоне, в который вкладываются поля источников (частиц) и поля переносчиков физических взаимодействий. Это путь классической теории поля.

Однако в последнее время уже было обращено внимание на наличие еще двух (также дуалистических) парадигм: 1) геометрической и 2) реляци-

онной, основанной на идеях, в свое время сформулированных в работах Г. Лейбница и Э. Маха.

Основу геометрического подхода составляет общая теория относительности и ее обобщения в виде многомерных геометрических моделей (типа Калуцы или Клейна, теорий с кручением, с сегментарной кривизной и др.), в которых поля-переносчики геометризуются, то есть трактуются как проявление геометрии искривленного пространственно-временного многообразия подходящей топологии и размерности [29].

К идее малой зарядовой асимметрии и предлагаемому на этой основе объяснению магнитных полей астрофизических объектов можно было прийти на рубеже 20–30-х годов в рамках многомерных геометрических моделей физических взаимодействий, где физические поля, в частности электромагнитное, описываются смешанными компонентами $G_{\mu\alpha}$ многомерного метрического тензора G_{AB} . Здесь индекс μ пробегает 4 значения: 0, 1, 2, 3, а индекс α может принимать значения: 4, 5, Соответствующие полям заряды, в частности электромагнитный, описываются через циклическую зависимость волновых функций заряженных частиц от 5-й или иных дополнительных координат. Анализ показывает, что в рамках общего термина «5-мерная теория Калуцы-Клейна» можно говорить о двух различных теориях, имеющих дело с разными дополнительными размерностями, которые нацелены на описание разных сторон физической реальности. Вариант Т. Калуцы предназначен для геометризации электромагнитных взаимодействий, а вариант О. Клейна – для геометризации масс [29].

Синтез теории Калуцы и Клейна можно осуществить в рамках 6-мерной геометрической модели с двумя дополнительными координатами: x^4 и x^5 , где волновые функции частиц зависят от двух координат в данной модели [29]. Редукция на 4-мерное пространственно-временное сечение осуществляется с помощью диадного метода (1+1+4-расщепления) в калибровке типа дважды хронометрической, введенной в ОТО. Взаимодействие частиц описывается посредством диадного оператора 4-мерного дифференцирования, инвариантного при преобразованиях двух дополнительных координат и ковариантного относительно 4-мерных преобразований. Одна из дополнительных недиагональных компонент метрического тензора $G_{5\mu}$ отождествляется с векторным потенциалом электромагнитного поля, а другая – $G_{4\mu}$ остается физически неопределенной. В работах Ю.С. Владимирова [29–30] было также предложено отождествить ее с векторным потенциалом электромагнитного поля. В этом случае в качестве дополнительного электрического заряда будет выступать величина, пропорциональная массе частиц. Однако поскольку массы отрицательно заряженного электрона много меньше массы положительно заряженного протона, то это приводит к обоснованию высказанной еще Эйнштейном гипотезы о разности зарядов главных частиц, из которых построен наш мир.

Расчеты показывают, что индуцируемый таким образом дополнительный («массовый») электрический заряд определяется формулой

$\Delta q = 2\sqrt{G}m$. Учитывая, что для электрона масса $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, получаем для него отношение дополнительного заряда к основному: $\frac{q_{\text{д}}}{q_e} \approx 10^{-21}$.

Очевидно, что такая поправка в электромагнитное взаимодействие частиц лежит далеко за пределами точности лабораторного эксперимента. Однако для больших электрически квазинейтральных масс, когда электрические заряды частиц двух знаков в среднем компенсируются, «массовый вклад» в электромагнитное взаимодействие, обусловленный квадратичным по зарядам слагаемым, может оказаться существенным [30].

Очевидно, что кулоновское поле объемно распределенных электрических зарядов астрофизических объектов будет скомпенсировано внешними зарядами противоположного знака, распределенными вблизи поверхности этих объектов. Но это не означает, что будут скомпенсированы и создаваемые из-за вращения их противоположно направленные магнитные поля. Наблюдаемое магнитное поле представляет результат их наложения. Эти рассуждения полностью соответствуют идее, высказанной Сазерлендом в начале XX века.

Так как первичный электрический заряд и дипольный магнитный момент остаются практически неизменными, то такие эффекты, как изменения полярности дипольного момента Земли, Солнца, дрейф магнитного полюса, отклонение магнитного полюса от географического, можно связать с процессами перераспределения абсорбированных электрических зарядов.

Тогда, согласно оценкам на основе вышеприведенной формулы для дополнительного заряда, первичный дипольный магнитный момент Земли $M_1 \approx 1 \cdot 10^{27}$ Гс·см³ оказывается близким по порядку к известному эффективному значению момента Земли $M_1 - M_2 = M_{\text{exp}} \approx 8 \cdot 10^{25}$ Гс·см³. Последний составляет 8 % от первичного магнитного момента [30].

7. Обоснование гипотезы Сазерленда в рамках реляционной парадигмы

В рамках реляционного подхода пространство-время трактуется как специфическая система отношений между объектами микромира. Более того, в рамках этой парадигмы ставится и решается задача вывода свойства классического пространства-времени (протяженность, размерность, сигнатура) из свойств микроскопических ансамблей взаимодействующих частиц путем некоторых статистических процедур, аналогичных тому, как в термодинамических системах возникает понятие температуры. Идейные основы реляционного подхода были заложены в трудах Г. Лейбница, Р.И. Бошковича, Э. Маха и ряда других мыслителей. В XX веке эти идеи развивались в трудах А. Фоккера, Я.И. Френкеля, Р. Фейнмана, Ф. Хойла и ряда других физиков-теоретиков в рамках так называемых теорий прямого межчастичного взаимодействия. Реляционный подход содержит три составляющие:

- 1) реляционную трактовку понятий классического пространства-времени,
- 2) описание физических взаимодействий на базе релятивистски-

инвариантной концепции дальнего действия и 3) принцип Маха. Подчеркнем, что принятие первой составляющей делает неизбежным использование второй и естественной – третьей [31].

Подробное изложение реляционного подхода дано в ряде публикаций Ю.С. Владимирова (см. [31–33]). Не вдаваясь в подробности оснований и уже полученных принципиально важных результатов, отметим, что в работе Ю.С. Владимирова и С.В. Болохова [32] на самом фундаментальном уровне было продемонстрировано возникновение малой зарядовой асимметрии у различающихся по массе частиц. Этот факт сказывается на определенных квантово-полевых представлениях о характере электромагнитных взаимодействий [33]. Но условия, при которых данный эффект может давать вклад, являются большие массы (астрофизические объекты).

Заключение

Таким образом, отметим, что на протяжении всего процесса накопления информации о магнитном поле Земли выдвигались различного рода гипотезы о механизме происхождения этого поля, причем, как правило, это делалось в рамках общепринятой теоретико-полевой парадигмы. В рамках этой парадигмы данная проблема так и не была решена. Ныне наиболее популярная теория динамо описывает магнетизм планет на качественном уровне. Безусловно, как показали измерения, магнитное поле Земли и планет имеет довольно сложную структуру, и описать его с позиции какой-то частной теории довольно затруднительно, – необходима «общая теория», которая была бы способна описать все нюансы магнетизма планет. Ныне предложенные теории динамо представляют собой лишь «частные теории», так как описываемый ими механизм запускает уже изначально имеющееся, притом уже дипольное магнитное поле. «Общая теория» должна описывать возможность появления дипольного затравочного магнитного поля и лишь потом допускать механизм динамо.

Предложенная Сазерлендом гипотеза и идея Эйнштейна о малом отличии абсолютных значений зарядов электрона и протона, суточное вращение которых обеспечивало бы наблюдаемое магнитное поле, основывалась на не вполне ясном механизме разделения электрических зарядов. Поэтому данная теория не получила должного развития и была забыта. Но если взглянуть на эту проблему не с позиции теоретико-полевой концепции, в рамках которой она до этого рассматривалась, а с реляционной или геометрической физических концепций (парадигм), то возникает возможность обосновать гипотезу Сазерленда и идею Эйнштейна. В итоге открывается новый путь для теоретического обоснования происхождения наблюдаемых магнитных полей астрофизических объектов и описания их свойств и поведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гиббс Дж.В.* Термодинамика. Статистическая механика. – М.: Наука, 1982.
2. *Дьяченко А.И.* Магнитные полюса Земли. – М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2013.
3. *Буссе Ф.* Магнитная гидродинамика земного динамо // Вихри и волны. – М.: Мир, 1984.
4. *Викулин А.В.* Физика Земли и геодинамика: учебное пособие для геофизических специальностей вузов. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008.
5. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. – Т. 1. – Л.: Ленинград, 1964.
6. *Тарасов Л.В.* Земной магнетизм. – М.: Интеллект, 2012.
7. *Арсеньев С.А.* Теоретическое моделирование главного магнитного поля Земли и планет // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – Т. 2. – № 4. – С.31.
8. *Зверева Т.И.* Динамика магнитных полюсов Земли в последнем десятилетии // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2012. – Т. 52. – № 2.
9. *Каганов М.И., Цукерник В.М.* Природа магнетизма. – М.: Наука, 1982.
10. *Schuster A.* A critical examination of the possible causes of terrestrial magnetism // Proc. Phys. Soc. – 1912. – V. 24. – P. 121–137.
11. *Лебедев П.Н.* Магнитометрические исследования вращающихся тел // Избранные сочинения. – М.: Гос. тех.-теор. издат., 1949.
12. *Wilson H.A.* An experiment on the origin of the Earth's magnetic field // Proc. Roy. Soc. – 1923. {London}. Ser. A. – Vol. 104.
13. *Blackett P.M.S.* The magnetic field of massive rotating bodies // Nature. – 1947. {London} – Vol. 159.
14. *Ступоченко Е.В.* О происхождении магнетизма Земли // ДАН СССР. – 1948. – Т. 62. – № 4.
15. *Larmor J.* How could a rotating body such as the Sun become a magnet? // Rep. Brit. Ass. Advmt. Sci. {for 1919} – 1920.
16. *Elsasser W.M.* On the origin of the Earth's magnetic field // Phys. Rev. – Vol. 1939. – 55.
17. *Lamb H.* On electrical motions in a spherical conductor // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1883. {London}. Ser. A. – Vol. 174 – P. 519–549. Also: Vol. 180, 1889.
18. *Френкель Я.И.* Земной магнетизм // Собрание избранных трудов: научные статьи. – Т. II. – М.-Л.: АН СССР, 1958.
19. *Lowes F.J., Wilkinson I.* Geomagnetic Dynamo: A Laboratory Model // Nature. – 1963. – Vol. 198. – P. 1158–1160.
20. *Жуланова И.Л.* Методология познания вулканизма Земли: геодинамика или геосинергетика? // Вулканизм и геодинамика. 2-й Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. – Екатеринбург, 2003.
21. *Паркер Юджин.* Беседы об электрических и магнитных полях в космосе. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2010.
22. *Бочкарев Н.Г.* Магнитные поля в космосе. – М.: ЛИБРОКОМ, 2011.
23. *Зельдович Я.Б., Рузмайкин Ф.Ф.* Гидромагнитное динамо как источник планетарного солнечного и галактического магнетизма // УФН. – 1987. – Т. 152. – Вып. 2.
24. *Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008.
25. *Sutherland W.* A possible cause of the Earth's magnetism and a theory of its variations // Terr. Mag. PlanetSci. – 1900. – Vol. 5. – Issue 2, 73. – 84.
26. *Schwinger J.* Einstein's Legacy: The Unity of Space and Time // Paperback. – December 13, 2002.

27. *Piccard A., Kessler E.* Experimental Limits for the electron-proton charge difference and for the charge of the neutron // *Arch. sci. phys. et nat.* – 1925. – 7, 340.
28. *Bressi G., Carugno G., Della Valle F., Galeazzi G., Ruoso G., Sartori G.* Testing the neutrality of matter by acoustic means in a spherical resonator. – arXiv:1102.2766v2[physics.atom-ph], 18 Mar. 2011.
29. *Владимиров Ю.С.* Геометрофизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
30. *Владимиров Ю.С.* Происхождение магнитного поля астрофизических объектов // *Вестник Московского ун-та. – Серия 3. Физика. Астрономия.* – 2000. – № 2. – С. 6–8.
31. *Владимиров Ю.С.* Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 2: Теория физических взаимодействий. – М.: МГУ, 1998.
32. *Владимиров Ю.С., Болохов С.В.* К теории прямого межчастичного электро-гравитационного взаимодействия // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия.* – 2016. – № 2 (15).
33. *Vladimirov Yu.S., Bolokhov S.V., Babenko I.A.* On Explanations of magnetic fields of Astrophysical Objects in the Geometric and Relational Approaches // *Gravitation and Cosmology.* – 2018. – Vol. 24. – P. 139–147.

MAGNETIC FIELDS OF ASTROPHYSICAL OBJECTS IN THREE PHYSICAL PARADIGMS

I.A. Babenko

Institute of Gravitation and Cosmology, RUDN University

The article briefly reviewed the history the development ideas about the sources generation the Earth's magnetic field and other astrophysical objects. The dynamo mechanism, the Sutherland and Einstein hypothesis is discussed. Particular attention is paid to the substantiation Sutherland's hypothesis in the framework of relational and geometric physical concepts.

Keywords: main magnetic field of Earth, Sutherland's hypothesis, theory of the mechanism of a dynamo, relational physical concept, geometrical paradigm, division of charges, volume positive and superficial negative charges.