

МРНТИ 27.03.66

У.Е. Садық¹, А.Т. Оспанхан², М.М. Альжигитова³

¹ Университет имени Сулеймана Демиреля, г. Каскелен, Казахстан

² Казахский Национальный Исследовательский технический университет,
г. Алматы, Казахстан

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ДРУГИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Аннотация. Многие модели земного магнетизма стремятся в первую очередь объяснить, почему главное магнитное поле Земли возле её полюсов близко к 1 Э. Такой подход к основной проблеме земного магнетизма в наши дни неприемлем. Космические полёты и развитие астрономических приборов показали замечательный неизвестный ранее факт: магнитные моменты всех планет Солнечной системы, некоторых спутников этих планет и ряда звёзд пропорциональны их моментам вращения. Таким образом, эта задача переросла в частный случай более общей задачи магнетизма космических тел. Этот факт требует переосмысленного построения модели внутреннего строения Земли и переформулировки главной задачи земного магнетизма, поскольку необходимо объяснить, почему отношение магнитного момента Земли к её моменту вращения, так же как и других космических тел.

Ключевые слова: земной магнетизм, магнитные моменты, радиус, космические тела, магнитное поле.

Андатпа. Жер магнетизмінің көптеген модельдері бірінші кезекте, оның полюстері жанындағы жердің басты магниттік өрісі неге 1 Э-ге жақын екенін түсіндіруге ұмтылады. Ғарыштық ұшулар мен астрономиялық аспаптардың дамуы бұрын белгісіз болған тамаша фактіні көрсетті: Күн жүйесінің барлық планеталарының магниттік сәттері, осы планеталардың кейбір серіктері мен бірқатар жұлдыздардың айналу сәттеріне пропорционалды. Бұл факт Жердің ішкі құрылымы моделін қайта ойластыруды және жер магнетизмінің басты міндетін қайта қалыптастыруды талап етеді, өйткені Жердің магнит моментінің оның айналу сәтіне, сондай-ақ басқа да ғарыштық тел. сияқты қатынасын неге түсіндіру қажет.

Түйін сөздер: жер магнетизм, магниттік моменттер, радиус, ғарыштық денелер, магниттік өріс.

Abstract. Many models of terrestrial magnetism seek primarily to explain why the main magnetic field of the Earth near its poles is close to 1 E. This approach to the main problem of terrestrial magnetism is unacceptable today. Space flights and the development of astronomical instruments have shown a remarkable previously unknown fact: the magnetic moments of all the planets of the Solar system, some of the satellites of these planets and a number of stars are proportional to their moments of rotation. Thus, this problem has developed into a special case of the more General problem of magnetism of cosmic bodies. this fact requires a rethinking of the model of the internal structure of the Earth and reformulation of the main problem of terrestrial magnetism, since it is necessary to explain why the ratio of the magnetic moment of the Earth to its moment of rotation, as well as other cosmic bodies.

Keywords: terrestrial magnetism, the magnetic moments, the radius of the cosmic body, the magnetic field.

Один из первых европейских учёных современной формации У. Гилберт издал в 1600 году книгу «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле» [1].

Принято считать, что самый важный экспериментальный факт, которому должна удовлетворять модель магнитного поля Земли, есть дипольный характер главного поля с величиной напряжённости вблизи полюсов примерно равной 1 Э.

Гилберт предполагал, что внутри Земли имеется область, заполненная намагниченным ферромагнетиком (если использовать современный термин). Более поздние исследования показали, что температура в центральной области Земли высока – выше температуры Кюри ферромагнетиков. Поэтому намагниченным ядро Земли быть не может.

Позже предлагалось много различных моделей магнитного поля Земли. В частности, несколько моделей, основанных на модели термоэлектричества. В 40-е годы прошлого века была разработана модель динамо [1], которая завоевала признание специалистов.

Следует заметить, что для работы такого механизма необходимо наличие некоего затравочного поля, которое может быть усилено. В присутствии только космического поля ($\approx 10^{-7}$ Э), работоспособность этой модели вызывает большие сомнения.

Сомнения в работоспособности модели динамо в последующие десятилетия возникали у многих учёных, и по этой причине вплоть до последнего времени появляются всё новые модели этого явления.

Гипотеза Блэкетта

По другому к проблеме магнитных полей космических тел подошёл барон П.М.С. Блэкетт, Нобелевский лауреат и Президент лондонского королевского общества. Он высказал предположение о том, что магнитное поле порождается не только движущимся электрическим зарядом, но и любой движущейся нейтральной массой. Позже стали предполагать, что это может быть следствием того, что электрические заряды электрона и протона не равны друг другу. Оценивали, что их разница должна быть очень мала – не уровне 10^{-18} е. Однако такой ничтожной разницы было достаточно, чтобы у всех космических тел за счёт их вращения вокруг собственной оси возникло магнитное поле той величины, которую дают измерения. Естественно, что при таком подходе должна существовать связь между магнитным моментом космического тела μ и его моментом вращения L . Блэкетт показал, что отношение этих величин (гиромагнитное отношение) зависит только от мировых констант:

$$g = \mu L \approx G / \sqrt{c}, \quad (1)$$

здесь G – гравитационная константа, c – скорость света.

Однако гипотеза Блэкетта была отвергнута, несмотря на её красоту и привлекательность. Причём отказался от неё сам Блэкетт. Высокоточные эксперименты, проведённые Блэкеттом, а также и другими экспериментаторами, показали, что магнитное поле искомой напряжённости электрически нейтральные массивные тела в лабораторных условиях не создают.

Данные измерений магнитных полей космических тел

Геофизики, занимавшиеся проблемой земного магнетизма, своей задачей первого плана видели построение такой теории, которая объясняла бы причину, почему главное магнитное поле Земли вблизи её полюсов примерно равно 1 Э. Во второй половине XX века такая постановка задачи оказалась неприемлемой, потому что к этому времени эта геофизическая задача переросла в частный случай более общей задачи магнетизма космических тел. Полёты космических аппаратов во второй половине XX века и общий прогресс астрономической техники обнаружили замечательный, неизвестный ранее факт: магнитные моменты всех космических тел Солнечной системы, а также целого ряда звёзд и пульсаров, пропорциональны моментам вращения этих космических тел, как это должно быть в соответствии с гипотезой

Блэкетта. Замечательно то, что эта зависимость сохраняет линейность в пределах около 20 порядков!

Атомное вещество и плазма

Все окружающие нас земные вещества имеют атомную структуру. Это означает, что в конденсированном состоянии (не в газовом) плотность веществ определяется взаимодействием между электронными оболочками соседних атомов.

Теплоёмкость всех атомных тел положительна. Поэтому тепловая энергия этих тел стремится к минимуму (к нулю) при $T \rightarrow 0$.

В веществе с плотностью γ поле тяготения с ускорением \mathbf{g} порождает силу $\gamma\mathbf{g}$. В атомных веществах эта сила уравнивается градиентом давления ∇p , который возникает во взаимодействии атомных оболочек. Равновесное состояние вещества с атомной структурой в поле тяготения описывается уравнением Эйлера:

$$\gamma\mathbf{g} = -\nabla p. \quad (2)$$

Другим (не атомным) веществом является открытая в середине прошлого века плазма. В этом состоянии, в которое переходят все атомные вещества под действием очень высоких давлений или температуры, атомы ионизируются полностью или частично. В результате получаются электронный газ и голые ядра или ионы, образующие электрон-ядерную или электрон-ионную плазму. Свойства плазмы коренным образом отличаются от свойств атомного вещества, поскольку вместе с отсутствием электронных оболочек исчезает их взаимодействие, за счёт которого в атомных веществах под действием тяготения возникал градиент давления.

Оказывается, что для горячей плотной плазмы, которая формирует внутренние области космических тел, минимумом энергии обладает состояние с конечной плотностью и температурой.

Классическая плазма и распределение Больцмана

Свободные электроны, будучи фермионами, в соответствии с распределением Ферми – Дирака, при низких температурах должны заполнять энергетические уровни, лежащие ниже энергии Ферми E_F . При высоких температурах и высоких давлениях все вещества превращаются в электрон-ядерную плазму (eN -плазму). В высокотемпературной плазме борются две тенденции. При $kT \gg E_F$ поправки на Ферми-статистику для плазмы становятся малыми. Но их роль увеличивается при повышении давления, ведущего к увеличению плотности электронного газа и соответствующему росту E_F . При условии, когда квантовые отличия в поведении электронного газа малы, появляется возможность

рассматривать электронный газ как идеальный, подчиняющийся статистике Больцмана. Критерий применимости классической статистики

$$T \gg EF_k \quad (3)$$

для нерелятивистского электронного газа с плотностью частиц 10^{25} см^{-3} выполняется при $T \gg 10^6 \text{ K}$.

При такой температуре плазма обладает энергией

$$E = 32kTN, \quad (4)$$

и её уравнение состояния есть уравнение идеального газа

$$p = NkTV. \quad (5)$$

Но даже при столь высокой температуре плазму можно рассматривать как идеальный газ только в первом приближении. Для более точного описания её свойств необходимо принять во внимание специфику взаимодействия её частиц, учтя в первую очередь две главных характерных для неё поправки к закону идеального газа.

Первая поправка – это поправка на Ферми-статистику, которой подчиняется электронный газ плазмы. В соответствии с принципом Паули электрон при заполнении энергетических уровней не может попасть на те, которые уже заняты другими электронами. Соответственно, эта поправка должна быть положительной, т.к. ведёт к увеличению энергии плазмы по сравнению с идеальным газом той же плотности при той же температуре.

Вторая поправка – это так называемая корреляционная поправка, которая учитывает корреляцию к расположению заряженных частиц за счёт электрического взаимодействия, что ведёт к уменьшению энергии плазмы по сравнению с идеальным газом той же плотности при той же температуре. Поэтому эта поправка должна быть отрицательной.

Следует заметить, что построение теории земного магнитного поля невозможно без более общего подхода:

1. Сначала необходимо построить теорию внутреннего строения Земли, понять, в каком состоянии и в каких количественных соотношениях находятся вещества, её составляющие.

2. Только после этого можно строить модель механизма, возбуждающего магнитное поле в земных недрах.

Соотношение между средней плотностью Земли ($\langle \gamma \rangle \approx 5,5 \text{ г/см}^3$ и плотностью вещества вблизи её поверхности ($\gamma_0 \approx 3,2 \text{ г/см}^3$), а также прямые сейсмические измерения говорят о наличии у Земли ядра с высокой плотностью.

Доминирующая в настоящее время модель Земли предполагает наличие у неё жидкого проводящего (металлического) ядра, расположенного глубже примерно половины её радиуса. Этот взгляд на строение Земли восходит ещё к Г. Лейбницу, который высказал его, наблюдая за работой плавильной домны в XVII веке. В домне тяжёлый расплавленный металл опускался вниз, а лёгкие шлаки всплывали. Кажется, что ядро может образоваться из тяжёлых металлов также за счёт силы тяжести. Тяжёлые расплавленные металлы под действием силы тяжести опустятся к центру Земли, более лёгкие граниты и базальты всплывут на поверхность.

Такое представление ошибочно. Это конечно не так. Вблизи центра космического тела тяготение слабо. В центре Земли оно просто равно нулю.

Так что высокоплотное ядро Земли должно образоваться под действием другого механизма. Таким механизмом является превращение любого твёрдого вещества в плазму. Плазменное состояние, в которое переходят все вещества при очень высоких давлениях и температурах, было открыто сравнительно недавно – в середине XX века. В настоящее время считается установленным, что центральные области звёзд состоят из электрон-ядерной плазмы. Она образуется в результате действия сверхвысоких давлений и температур. Под этим воздействием атомы звёздного вещества полностью теряют все электронные оболочки, и внутризвёздная плазма состоит из электронов и голых ядер.

Давления и температуры, которые существуют внутри планет, меньше звёздных на несколько порядков. Их воздействия не достаточно для того, чтобы оторвать от атомов все электроны. Они отрывают от каждого атома только несколько электронов с внешних оболочек. В результате в центральной области планеты должна образоваться электрон-ионная плазма.

Не существует простого метода определить, сколько атомных оболочек будет разрушено в результате этого воздействия, и каков будет объём плазменного ядра. Эту задачу можно решить минимизируя полную энергию планеты.

Эта задача является главной для этой статьи и будет решена ниже. В середине XX века была открыта плазменное состояние вещества. В это состояние переходят все вещества при столь высоких давлениях и температурах, которые достаточны, чтобы полностью или частично ионизовать атомы вещества. При полной ионизации образуется электрон-ядерная плазма, при частичной – электрон-ионная. Состояние электрон-ядерной плазмы характерно для вещества внутри звёзд. Учитывая, что

давление в ядре Земли достаточно велико, чтобы «сломать» внешние электронные оболочки атомарных веществ, то ядро Земли должно состоять из электрон-ионной плазмы. В связи с тем, что плазма, в отличие от жидкого металла, является электрически поляризуемой средой, действие тяготения на плазму должно приводить к её электрической поляризации [2]. Вращение электрически поляризованного ядра (вместе со всей планетой) индуцирует её магнитный момент. Таким в общих чертах качественно должен быть механизм возникновения земного магнитного поля.

Для получения количественных оценок сначала необходимо найти размер и состояние плазменного ядра Земли. Это можно сделать, используя метод минимизации полной энергии планеты.

Уравнение состояния вещества

Во-первых, для создания теории Земли необходимо найти радиальную зависимость её плотности $\gamma(r)$. Для этого нужно записать уравнение для сил, приложенных к земному веществу, и уравнение его состояния, т.е. зависимость плотности вещества от приложенного к нему давления. При малых давлениях зависимость плотности вещества $\gamma(r)$ от давления описывается законом Гука:

$$\gamma = \gamma_0 (1 - p/B), \quad (46)$$

т.е. при малых давлениях уравнение состояния имеет вид:

$$p = B(1 - \gamma/\gamma_0). \quad (47)$$

Здесь γ_0 – плотность вещества в отсутствии внешнего давления, B – модуль всестороннего сжатия вещества.

При высоких давлениях модуль всестороннего сжатия сам начинает зависеть от плотности. Эту зависимость можно представить в виде политропы:

$$B = \alpha \gamma^{1+1/\kappa}, \quad (48)$$

где α – постоянная, κ – политропный индекс, описывающий сжимаемость вещества ($\kappa = 0$ описывает несжимаемое вещество). Таким образом, уравнение состояния может быть записано в виде:

$$p = \alpha \gamma^{1+1/\kappa} (1 - \gamma_0/\gamma) \quad (49)$$

При малых давлениях это уравнение превращается в закон Гука, а при больших давлениях трансформируется в стандартное политропное равенство:

$$p=\alpha\gamma^{1+1/\kappa}. \quad (50)$$

Проведённые расчёты показывают, что в состоянии с минимальной энергией Земле энергетически выгодно иметь ядро с радиусом примерно равным половине радиуса Земли, состоящее из электрон-ионной плазмы. Полученные в результате расчётов радиальное распределение плотности, момент инерции и магнитный момент Земли удовлетворительно согласуются с данными измерений. Загадка магнитного поля Земли уже насколько веков волнует исследователей

Список использованной литературы:

- 1 Савельев И.В. «Курс общей физики: т. I-III», М.: Наука, 1989. – Т. 1. – 517 с.
- 2 Парсел Э. Электричество и магнетизм. –М.: Физматлит, 1973. 150 с.