

## АСТРОНОМИЯ

УДК 539.038

## БАРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НА ЮПИТЕРЕ

В. И. Григорьев, В. С. Ростовский

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

**Теория бароэлектрического эффекта применяется для исследования электромагнитного поля на Юпитере. Предлагается объяснение того, что полярность его магнитного поля обратна полярности магнитного поля Земли. Кратко обсуждаются физические причины интенсивного потока энергии из недр планеты и модуляции ее излучений движением Ио.**

Бароэлектрический эффект — вызываемое пространственными неоднородностями механических напряжений перераспределение электрических зарядов в телах. Это явление было детально рассмотрено в работе [1] и ряде других публикаций, в которых изложены методы теоретического описания бароэлектрического эффекта и примеры применения этих методов к исследованию электромагнетизма планет и звезд.

В Земле и подобных ей планетах земной группы, имеющих отчетливо выраженную поверхность, бароэлектрическое перераспределение зарядов приводит к тому, что на эту поверхность частично вытесняются электроны из внутренних областей, а внутренние области приобретают положительный заряд. Вращаясь вместе с планетой, перераспределившиеся заряды создают магнитное поле.

Если полный заряд планеты равен нулю, т.е. полный объемный и полный поверхностный заряд по модулю одинаковы, то полный баромагнитный момент, обязанный своим появлением вращению вместе с планетой всех перераспределившихся зарядов, должен быть направлен противоположно механическому моменту, так как радиусы вращения поверхностных зарядов больше, чем объемных. Такова картина магнитной полярности Земли (хотя и в несколько упрощенном описании, в частности, не учитывающем эффектов «динамо») и других подобных ей планет\*). Учитывая состав и состояние Юпитера и в особенности отсутствие у него отчетливо выраженной границы поверхности, естественно ожидать заметного отличия от этой картины.

Для простейшей теоретической оценки примем, что распределение вещества в планете можно считать стационарным.

Представим условие механического равновесия в виде

$$\mu \mathbf{a} + \rho \mathbf{E} = 0. \quad (1)$$

\*) Имея в виду механизм их образования, такие поля можно именовать «баромагнитными», в отличие от полей, обязанных происхождением «эффекту динамо»; в настоящей заметке последние не учитываются, хотя часто их рассматривали как доминирующие.

Здесь  $\mu$  — механическая плотность,  $\mathbf{a}$  — напряженность гравитационного поля; их численные значения можно брать, например, из [2];  $\rho$  — объемная плотность электрических зарядов,  $\mathbf{E}$  — макроскопическая, т.е. усредненная по физически бесконечно малым объемам, напряженность электрического поля.

Возможность использования такого макроскопического условия равновесия обсуждалась в книге [1, §17], но там учитывалось еще и влияние принципа Паули, которое здесь несущественно.

Из известного перечня четырех фундаментальных типов сил в природе лишь два — гравитационные и электромагнитные — играют определяющую роль в макроскопическом условии равновесия, что и отражено в соотношении (1).

Упростим задачу, принимая ее сферически симметричной, т.е. полагая, что все величины, входящие в (1), зависят лишь от расстояния рассматриваемой точки от центра планеты  $r = |\mathbf{r}|$ . Привлекая уравнение Пуассона

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = -4\pi G \mu, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho \quad (3)$$

и учитывая, что  $\mathbf{a}$  направлен к центру планеты, а  $\mathbf{E}$  — от центра, приходим к простому условию  $a(0) = E(0) = 0$ , удовлетворяющему в центре планеты соотношению, связывающему векторы напряженностей гравитационного и электрического поля:

$$G\mathbf{E} = -\mathbf{a}, \quad (4)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная.

На рис. 1, взятом из [2], приведены кривые, отражающие зависимость ряда физических параметров от расстояния  $r$  до центра планеты, в том числе и величины гравитационного ускорения  $g(r)$ .

График  $a(x)$ , где  $x = r/R_J$ , особенно интересен, поскольку он, как указано выше, непосредственно связан с зависимостью  $E(r)$  и, так как объемная плотность зарядов  $\rho(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{d}{dr}(r^2 E(r))$ , то также и с распределением  $\rho(r)$ .

При  $1.5 \geq x \geq 0$  гравитационное ускорение растет почти по линейному закону, так что объемная плотность заряда постоянна и положительна. Затем начинается спад  $g(x)$ , продолжающийся до  $x \approx 2.2$ .

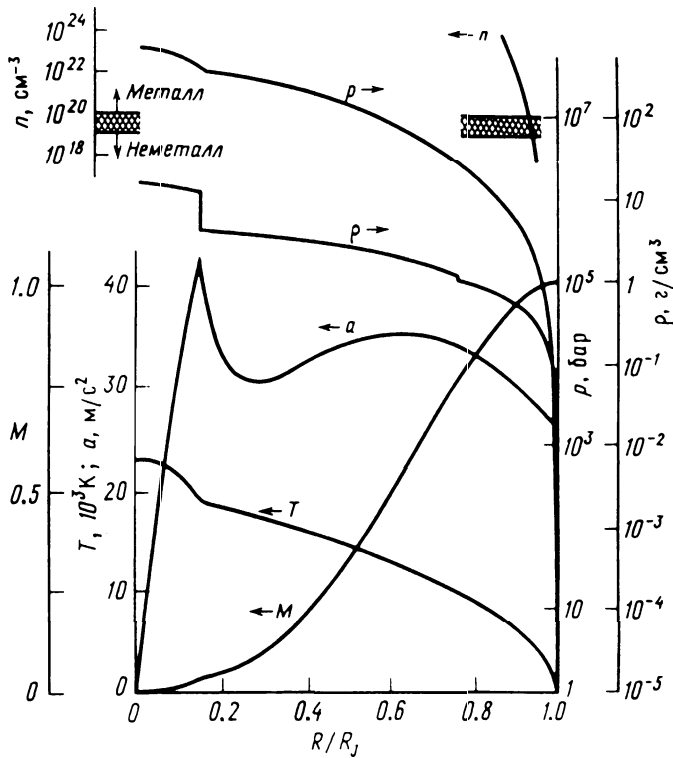


Рис. 1. Радиальное распределение массы  $M$ , температуры  $T$ , давления  $p$ , плотности  $\rho$  и гравитационного ускорения  $a$  на Юпитере (из [2])

Здесь объемная плотность зарядов может оказаться отрицательной. При дальнейшем росте  $x$  она снова становится положительной, и ее величина довольно медленно возрастает, приближаясь к нулю при  $x \rightarrow 1$ .

Найдя  $\rho(r)$ , можно найти магнитный момент, порождаемый вращением с угловой скоростью  $\omega$  зарядов, находящихся в области радиуса  $r$ :

$$M(r) = \frac{1}{2c} \int \rho(r) [\mathbf{r}[\omega \mathbf{r}]] dV. \quad (5)$$

Интегрирование в (5) ведется по области Юпитера радиуса  $r$ .

Благодаря отсутствию у Юпитера резко выраженной поверхностной границы, формально  $r$  может принимать все значения до  $\infty$ , но часто используется представление о радиусе Юпитера  $R_J$ . Введение этого радиуса несколько условно: принимается, что на расстоянии  $R_J$  от центра планеты давление падает до значения в 1 бар (в сферически симметричной модели планеты).

Пользуясь табличными значениями  $g(r)$ , находим «граничное» значение величины напряженности электрического поля  $E(R_J)$ , через которую выражается полный заряд  $Q$  области радиуса  $R_J$  (будем называть ее внутренней):  $Q = E(R_J) R^2$ . Этот заряд может именоваться «полным» лишь условно, так как в области  $r > R_J$  (нередко называемой «атмосферой») также имеются электрические заряды, в частности, электроны, вытесняемые из внутренних областей.

Угловая скорость  $\omega$  и та часть магнитного момента, которая связана с вращением зарядов во внутренней области, по направлению совпадают.

Оценим проекцию «внутреннего» баромагнитного дипольного момента на это направление:

$$M_\omega = \frac{\omega}{3c} \int r^4 \rho(r) dr, \quad (6)$$

где интегрирование ведется по  $r$  от 0 до  $R_J$ .

Пользуясь тем, что  $\rho = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{d}{dr} \{r^2 E(r)\}$ , (6) можно преобразовать к виду

$$M_\omega = \frac{\omega R_J^4 E(R_J)}{3c} - \frac{2\omega}{3c} \int_0^{R_J} dr r^3 E(r). \quad (7)$$

Подставляя численные значения входящих в (7) величин, находим для «внутреннего» дипольного магнитного момента численную оценку  $\sim 10^{32}$  (в гауссовой абсолютной системе единиц).

Это несколько превосходит эмпирический момент Юпитера, что говорит о дополнительном вкладе порядка 10%, создаваемом электронами внешней области, вовлекаемыми во вращение.

Может показаться, что, начав обсуждение дипольного магнитного поля Юпитера, мы обошли главный вопрос — об «инверсности» этого поля: если на Земле, например, магнитный и механический моменты имеют примерно противоположные направления, то на Юпитере их направления близки.

Приняв, что магнетизм Юпитера обусловлен вращением объемных зарядов, обязанных происхождением бароэлектрическому эффекту, нетрудно дать этому факту объяснение. Действительно, уже отмечалось, что на поверхности Земли имеются отрицательные заряды, и их вращение вместе с Землей и вносит более значительный вклад в результирующий магнитный момент, чем вращение положительных объемных зарядов. Юпитер же не имеет такой отрицательно заряженной поверхности, хотя в его атмосферу вытесняется часть электронов из внутренних областей, однако если при этом и создается некий отрицательно заряженный слой, его вклад в общий магнитный момент не доминирует.

Иллюстрацией этих утверждений могут служить рис. 2 и 3.

На первом из них приведена упрощенная схема расположения силовых линий магнитного поля как во внутренней, так и во внешней области Юпитера. На границе между этими областями силовые линии не испытывают изломов: здесь все составляющие напряженностей магнитного поля непрерывны.

На Земле же, например, тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля испытывает скачок, пропорциональный плотности поверхностных токов, обусловленных вращением поверхностных зарядов. Благодаря этому схема расположения силовых линий магнитного поля внутри Земли (ее обоснование дано в [1, §6]), приведенная на рис. 2,

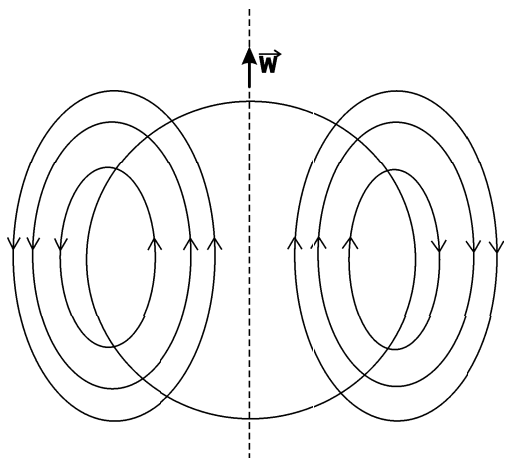


Рис. 2. Упрощенная схема распределения магнитных силовых линий на Юпитере

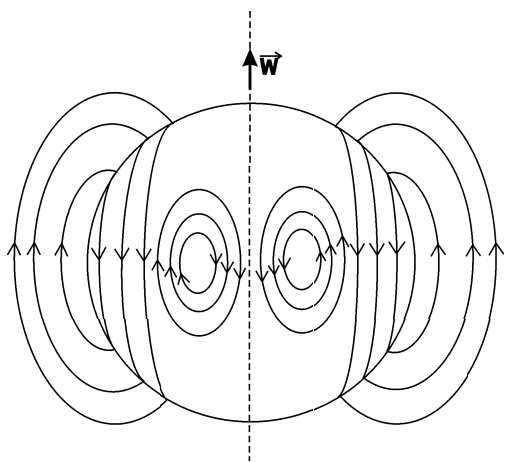


Рис. 3. Упрощенная схема распределения магнитных силовых линий на Земле

заметно отличается от схемы, изображенной на рис. 3 и относящейся к Юпитеру.

Картины же распределения этих линий во внешних областях как Земли, так и Юпитера, могут, на первый взгляд, показаться весьма похожими: они имеют знакомый «дипольный» вид. Но только на первый. Если обратить внимание на стрелки на линиях, указывающие направление напряженностей магнитного поля, то различие, связанное с инверсностью магнитного поля Юпитера по отношению к полю Земли, сразу же обнаруживается. Как следует из предыдущего, оно обусловлено отсутствием на Юпитере аналога отрицательного поверхностного слоя Земли.

Бароэлектрическое поле является безваттным; будучи равновесным, оно не создает токов, т. е. не способно передавать энергии зарядам. Это положение напоминает известное правило Вольты, согласно которому не могут существовать постоянные токи, порождаемые только химическими неоднородностями в цепи, т. е. контактной разностью потенциалов.

Но если система (или «цепь») не является равновесной, если она испытывает сторонние воздействия, то энергия от источников этих воздействий может передаваться зарядам, порождая токи.

Классическим примером тому можно назвать конструкцию Кельвина для измерения контактной разности потенциалов. Принцип ее действия таков: если плоский конденсатор, пластины которого, изготовленные из различных материалов, замкнуть через гальванометр, то последний не может зарегистрировать постоянный ток; но если менять расстояние между обкладками (что требует затрат энергии), то по возбуждаемому в приборе току (на образование которого и затрачивается энергия) можно определить контактную разность потенциалов.

Аналогом этого является порождение токов (т. е. передача энергии зарядам) от бароэлектрических полей в системах, меняющихся со временем. Причины этих изменений могут быть разнообразными — от нестационарных внешних воздействий до флуктуаций.

Напряженность бароэлектрического поля имеет радиальное направление, и потому при ускорении положительных ионов (в основном протонов) их потоки также направлены радиально. На электроны же бароэлектрическое поле оказывает противоположное по направлению действие. Однако электроны частично вовлекаются и в радиальные потоки протонов.

Ускоренное радиальное движение протонов и их столкновения с другими частицами плазмы и формирует обнаруженный большой поток энергии из недр Юпитера.

Энергия, приобретаемая протоном за время его свободного пробега, пропорциональна как напряженности ускоряющего электрического поля, так и длине свободного пробега. Поэтому она тем больше, чем сильнее разрежена плазма, и потому сильнее нагреваются верхние слои атмосферы, что действительно зарегистрировано наблюдениями. Похожее явление существует и на Солнце, и на других массивных плазменных объектах.

Важные физические процессы на Юпитере определяются его взаимодействием со спутниками (в первую очередь гравитационным, но не только).

Особый интерес представляет приливное воздействие Юпитера на самый близкий к нему галилеевский спутник Ио.

Как было впервые показано в 1995 г. [3], геоэлектрическое поле («поле ясной погоды» Земли) можно в главных чертах объяснить как бароэлектрическое поле, вызываемое приливным воздействием на Землю со стороны Луны и Солнца.

Приливные квадрупольные электрические поля должны существовать и над другими небесными телами, на которые действуют приливные силы.

Оценки для напряженностей этих полей приведены в работе [4]. В частности, согласно такой оценке, над спутником Юпитера Ио, испытывающим приливное воздействие довольно близко расположенной огромной планеты, напряженность электрического поля, порождаемого приливными силами, должна на три порядка превышать напряженность геоэлектри-

ческого поля. Приведем краткую количественную оценку.

Объемная плотность приливной силы, действующей на Ио в его системе центра масс, со стороны Юпитера:

$$\mathbf{f} = GM\mu \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{nr}) - \mathbf{r}}{R_0^3}, \quad (8)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $M$  — масса Юпитера,  $\mu$  — механическая плотность Ио в точке, определяемой радиус-вектором  $\mathbf{r}$ , указывающим ее положение относительно центра Ио,  $\mathbf{R}_0$  — вектор, соединяющий центры Юпитера и его спутника,  $\mathbf{n} = \mathbf{R}_0/R_0$ . Распределение дополнительных давлений в Ио, порождаемых этой приливной силой, определяется соотношением  $\mathbf{f} = \nabla p$ .

Привлекая условие бароэлектрического равновесия ([1, §2])  $\text{grad} \left( W + \frac{1}{8\pi} E^2 \right) = 0$ , где  $W(p)$  — объемная плотность «избыточной» энергии, которую можно при давлениях, значительно меньших, чем давление Ферми, принять равной  $W \approx p^2/2B$  (где  $B$  — упругий модуль, порядок величины которого для Ио равен  $10^{13} - 10^{14}$ , как и для ряда планет земной группы) и пользуясь (8), можно находить напряженность «приливного» бароэлектрического поля. Это поле оказывается квадрупольным, и над поверхностью Ио его напряженность

$$\mathbf{E} = K \left\{ 5\mathbf{r} \left( \frac{3(\mathbf{nr})^2 - r^2}{2r^7} - \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{nr}) - \mathbf{r}}{r^5} \right) \right\}, \quad (9)$$

где  $K = \frac{GMmR^3}{R_0^3 \sqrt{6\pi B}}$  ( $R$  — радиус Ио,  $m$  — его масса).

Непосредственно над поверхностью Ио вертикальная компонента квадрупольного поля  $\mathbf{E}$  приближенно равна  $\frac{K}{R^4} (3\cos^2 \theta - 1)$ , где  $\cos \theta = \frac{(\mathbf{nr})}{r}$ .

Подстановка численных значений (см. [1, §19 и §29]) показывает, что эта напряженность достигает значений  $\approx 10^5$  В/м.

Приливные воздействия взаимны, т. е., например, наряду с приливным воздействием Юпитера на Ио существует и приливное воздействие Ио на Юпитер (подобно тому как приливное поле на Земле, вызванное действием Луны, существует наряду с по-

лем над Луной, порождаемым воздействием Земли). В настоящей заметке приливные поля над Юпитером не обсуждаются, поскольку их напряженности, по-видимому, во столько раз меньше напряженности приливного поля над Ио, во сколько раз масса последнего меньше массы Юпитера.

Благодаря вращению Ио относительно Юпитера приливное электрическое поле Ио оказывает периодически меняющееся воздействие на атмосферу Юпитера, что может порождать всплески электромагнитного излучения. Влияние на декаметровое (и на открытое позже дециметровое) излучение Юпитера обращающихся вокруг него ближайших больших спутников (в основном Ио, но также, хотя более слабое, и Европы) было замечено уже давно (см., напр., [4]). Так, например, в статье Р. А. Смита [5] говорится: «Таким образом, центральной проблемой в теории ДКМ является объяснение связующего механизма, посредством которого орбитальное движение Ио обеспечивает источник свободной энергии в нижней плазмосфере». Изложенное выше может иметь непосредственное отношение к этому механизму.

#### Литература

1. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М., 2003.
2. Смолуховский Р. // Юпитер. Т. 1. Происхождение и внутреннее строение. Спутники. / Под ред. Т. Герелса. В 3-х т. М., 1978. С. 10.
3. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. // Прикл. физика. 1995. № 3-4. С. 154.
4. Жарков В.Н., Трубицин В.Н. // Юпитер. Т. 1. Происхождение и внутреннее строение. Спутники. / Под ред. Т. Герелса. В 3-х т. М., 1978. С. 178.
5. Смит Р.А. // Юпитер. Т. 1. Происхождение и внутреннее строение. Спутники. / Под ред. Т. Герелса. В 3-х т. М., 1978. С. 433.

Поступила в редакцию  
27.09.04