

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-371

Д17-95-371

Б.В.Васильев\*

ВОЗМОЖНА ЛИ СПОНТАННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПОЛЯРИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ?

---

\*Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия

Возможна ли спонтанная электрическая поляризация космических тел?

С помощью численных расчетов делается попытка обосновать гипотезу о том, что для вещества космического тела в собственном гравитационном поле энергетически выгодно приобрести электрическую поляризацию, если масса этого тела достаточно велика. Показано, что если такой эффект существует, то он мог бы объяснить по порядку величины наблюдаемые значения магнитных полей космических объектов и их зависимость от моментов вращения.

Работа выполнена в Институте физико-технических проблем, Дубна.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод автора

Vasiliev B.V.

D17-95-371

Can the Existence of the Magnetic Moments of Cosmic Bodies Be Explained by Internal Spontaneous Electrical Polarization?

Using numerical evaluations, the attempt was made to prove the hypothesis that for the matter of a cosmic body in its own gravitation field, it must be energetically efficient to create an electrical polarization, provided that the mass of a body is large enough. It has been shown that if such an effect exists, it might explain, by an order of magnitude, the observed values of magnetic fields of cosmic bodies and their dependence on the angular momenta.

The investigation has been performed at the Institute in Physical-Technical Problems, Dubna.

## 1. Введение

Гипотеза о том, что причиной возникновения магнитного поля звезд может служить их спонтанная электрическая поляризация, высказывалась неоднократно и имеет уже почти вековую историю. Первым ее, по-видимому, сформулировал Сузерленд [1-2] в начале 20 века в связи с тем, что измерения, проведенные в то время, показали примерно равное отношение магнитных моментов Земли и Солнца к их механическим моментам (гиромагнитное отношение). К настоящему времени измерения с помощью спутников позволили определить гиромагнитные отношения для всех планет Солнечной системы, а с помощью специальных методик — и для целого ряда звезд и пульсаров. Для всех этих космических объектов гиромагнитные отношения имеют близкие порядки величины. Этот факт не находит объяснения в рамках общепринятой в настоящее время модели динамо-генерации, применение которой требует подбора параметров модели для каждого космического объекта. Поэтому гипотеза об электрической поляризации космического тела кажется очень привлекательной, особенно тем, что позволяет объяснить возникновение магнитных полей космических тел единым механизмом, без дополнительных параметров и привлечения гипотез о существовании затравочного поля. Но ее обоснование наталкивается на трудности, которые на первый взгляд кажутся 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  $\rho_e R^5$  ( $\rho_e$  — 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 повер-

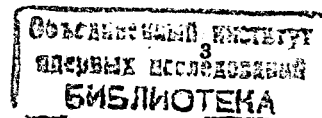
хности. С уверенностью можно утверждать, что ничего подобного не наблюдается, во всяком случае для Земли и ее соседей по Солнечной системе, хотя магнитные моменты они имеют. В-третьих, если бы механизм генерации значительного электрического заряда внутри космических тел существовал, то он, вероятно, должен был бы проявиться в весьма точных земных лабораторных экспериментах, или должно существовать объяснение, почему в космических телах этот механизм работает, а в лаборатории нет.<sup>1</sup>

## 2. Почему возникновение электрической поляризации внутри космического тела может стать энергетически выгодным?

Для того, чтобы объяснить, почему механизм генерации электрической поляризации в веществе включается только в звездах и не работает в лабораторных условиях, можно предположить, что он связан с действием сверхвысоких давлений внутри космических тел, недостижимых в лаборатории. Этим же можно объяснить, почему не наблюдается огромных электрических полей на поверхности космических тел — все электрические явления в этом случае должны разыгрываться во внутренних областях, где действуют сверхвысокие давления. Таким образом, некоторых трудностей можно избежать, сделав соответствующие предположения. Поэтому самым важным остается вопрос: как обосновать энергетическую выгоду возникновения электрической поляризации внутри космического тела?

Оказывается, что обоснование возникновения спонтанной электрической поляризации внутри космического тела можно последо-

<sup>1</sup> В некоторых работах, касающихся этого вопроса, в качестве возражения против такого механизма генерации магнитных полей 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.



вательно провести для случая вещества, подчиняющегося закону Гука:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{p}{K}\right). \quad (1)$$

Здесь  $p$  и  $\rho$  — соответственно давление и плотность массы,  $\rho_0$  — плотность при нулевом давлении,  $K$  — модуль всестороннего сжатия.

Обозначая  $m$  и  $n$  массу и число частиц в единице объема, из термодинамического равенства

$$d\mu = \frac{dp}{n} \quad (2)$$

можем записать химический потенциал в виде:

$$\mu = \frac{m}{\rho_0} K \ln \left(1 + \frac{p}{K}\right). \quad (3)$$

Отсюда получаем соответствующее рассматриваемому случаю выражение для плотности внутренней энергии:

$$\varepsilon = \mu n - p = (K + p) \ln \left(1 + \frac{p}{K}\right) - p. \quad (4)$$

Предположим, что гравитирующее тело массы  $M$  и радиуса  $R$  поляризуется так, что дипольный момент единицы объема  $\bar{P}$  пропорционален ускорению силы тяжести  $\bar{g}$ :

$$\bar{P} = \beta \bar{g}, \quad \bar{g} = -\frac{GM(r)\bar{r}}{r^2}, \quad M(r) = \int_0^r \rho 4\pi r'^2 dr'. \quad (5)$$

Поскольку тело электронейтрально

$$\text{div} \bar{D} = 0, \quad \bar{E} = -4\pi \bar{P} = -4\pi \beta \bar{g}, \quad (6)$$

то удобнее говорить об объемной плотности "связанных" зарядов

$$\rho_e = -\text{div} \bar{P} = 4\pi G \beta \rho, \quad (7)$$

т.к.

$$\text{div} \bar{g} = -4\pi G \rho, \quad (8)$$

$$\sigma_e = -\frac{Q}{4\pi R^2}, \quad Q = \int_0^R \rho_e 4\pi r^2 dr = 4\pi \beta GM(R). \quad (9)$$

Здесь  $G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$  — гравитационная постоянная. Равновесие сил в объеме

$$-\nabla p + \rho \bar{g} + \rho_e \bar{E} = 0 \quad (10)$$

перепишем в форме

$$\frac{dp}{dr} = -(1 - q) \frac{G\rho M(r)}{r^2}. \quad (11)$$

Отметим, что даже для полной компенсации гравитационной силы электрической силой ( $q = 1$ ) требуется очень слабое относительное отклонение от электронейтральности

$$\frac{\rho_e}{e\rho/m} \approx 10^{-18}.$$

Когда электрическая поляризация отсутствует, то на поверхности тела давление равно нулю. Но в ее присутствии (за счет действия поверхностной плотности заряда) на поверхности звезды возникает скачок давления:

$$P(R) = 2\pi \sigma_e^2, \quad VP(R) = \frac{1}{6} \frac{qGM^2}{R}, \quad V = \frac{4\pi}{3} R^3. \quad (12)$$

Введем обозначения

$$M = \frac{4\pi}{3} R_0^3 \rho_0; \quad V_0 = \frac{4\pi}{3} R_0^3; \quad r = R_0 x; \quad R = R_0 X_2; \quad p = YK; \quad A = \frac{GM^2}{R_0 K V_0}. \quad (13)$$

В этих обозначениях

$$M(r) = M [x^3 + f(x)], \quad (14)$$

$$f(x) = 3 \int_0^x dx x^2 Y, \quad (15)$$

и уравнение равновесия (11) примет вид

$$-\frac{dY}{dx} = (1 - q) A x (1 + Y) \left(1 + \frac{f(x)}{x^3}\right). \quad (16)$$

Для решения этого уравнения воспользуемся методом моментов.

Будем искать функцию  $Y$  в форме:

$$Y(x) = Y_0 + Y_2 x^2 + Y_4 x^4. \quad (17)$$

Подставив это выражение в интегральную форму уравнения (11)

$$Y_0 - Y = A(1 - q) \int_0^x dx x(1 + Y) \left(1 + \frac{f(x)}{x^3}\right), \quad (18)$$

интегрируя обе части уравнения в пределах  $(0, X_2)$  с весом 1 и  $1/x^2$ , получаем два уравнения на коэффициенты  $Y_0, Y_2$  и  $Y_4$  и безразмерный радиус звезды  $X_2$ . Еще два уравнения получаем из величины скачка давления на поверхности тела при  $q \neq 0$  (уравнение (12)):

$$Y(X_2) = \frac{qA}{6X_2^4} \quad (19)$$

и выражения (14) при  $x = X_2$ :

$$1 - X_2^3 = f(X_2), \quad (20)$$

где

$$f(X_2) = X_2^3 \left( Y_0 + \frac{3}{5} Y_2 X_2^2 + \frac{3}{7} Y_4 X_2^4 \right). \quad (21)$$

Из этих четырех уравнений находим значения четырех параметров от величин  $A$  и  $q$ .

Для того, чтобы определить, может ли внутри тела возникнуть электрическая поляризация, определим минимум энергии тела. Полная энергия звезды равна сумме гравитационной энергии

$$\varepsilon_g = G \int \frac{M(r)dM(r)}{r} = -\frac{GM^2}{2R} + \varepsilon_g^*, \quad (22)$$

электрической энергии

$$\varepsilon_e = \int \frac{E^2}{8\pi} dV = -q\varepsilon_g^* \quad (23)$$

и внутренней энергии

$$\varepsilon_i = KV_0\varphi(X_2), \quad (24)$$

где в соответствии с (4)

$$\varphi(X_2) = 3 \int_0^{X_2} dx x^2 [(1 + Y) \lg(1 + Y) - Y]. \quad (25)$$

Вспомогательная величина  $\varepsilon_g^*$  имеет смысл энергии гравитационного поля внутри звезды.

Используя уравнение (11) и интегрируя по частям, можно выразить энергию гравитационного поля через интеграл от давления:

$$\varepsilon_g = \frac{1}{1 - q} \left( \frac{qGM^2}{2R} - 3\varepsilon_p \right), \quad (26)$$

где

$$\varepsilon_p = \int_0^R pdV = KV_0 f(X_2). \quad (27)$$

Используя (22), (23) и (26), получаем выражение для полной энергии звезды, которое не содержит явно  $q$  и поэтому по форме совпадает с уравнением для энергии звезды при  $q = 0$ , которое ранее получено в [3, 4]:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_g + \varepsilon_e + \varepsilon_i = -3\varepsilon_p + \varepsilon_e. \quad (28)$$

Отсюда находим

$$\frac{\varepsilon_{total}}{KV_0} = -3f(X_2) + \varphi(X_2). \quad (29)$$

Полная энергия (29) есть функция двух параметров  $A \sim M^{2/3}/K$  и  $q$ .

Равновесное значение поляризации  $q$  определяется минимальным значением полной энергии при варьировании по  $q$ . Численные расчеты показывают, что при  $A < A_c \simeq 0.6$  спонтанная электрическая поляризация не возникает. При  $A > A_c$  звезда неустойчива относительно возникновения электрической поляризации (рис.1). В частности, при  $A = 1$  минимум энергии лежит вблизи  $q \simeq 0.4$ . При больших  $A$  минимум энергии смещается в сторону  $q \rightarrow 1$  (рис.2).

Таким образом, расчеты показывают, что спонтанная электрическая поляризация возникает в звезде, масса которой превышает критическое значение:

$$M > M_c = \left( \frac{A_c K}{G \rho_0^{4/3} (4\pi/3)^{1/3}} \right)^{3/2}. \quad (30)$$

Если принять  $K \simeq 5 \cdot 10^{11}$  эрг/см<sup>3</sup>,  $\rho_0 \simeq 3$  г/см<sup>3</sup>, то  $M_c \simeq 8M_{Moon}$ , где  $M_{Moon}$  - масса Луны.

Поэтому для космического тела с массой на порядок большей массы Луны (или еще большей) энергетически выгодно появление

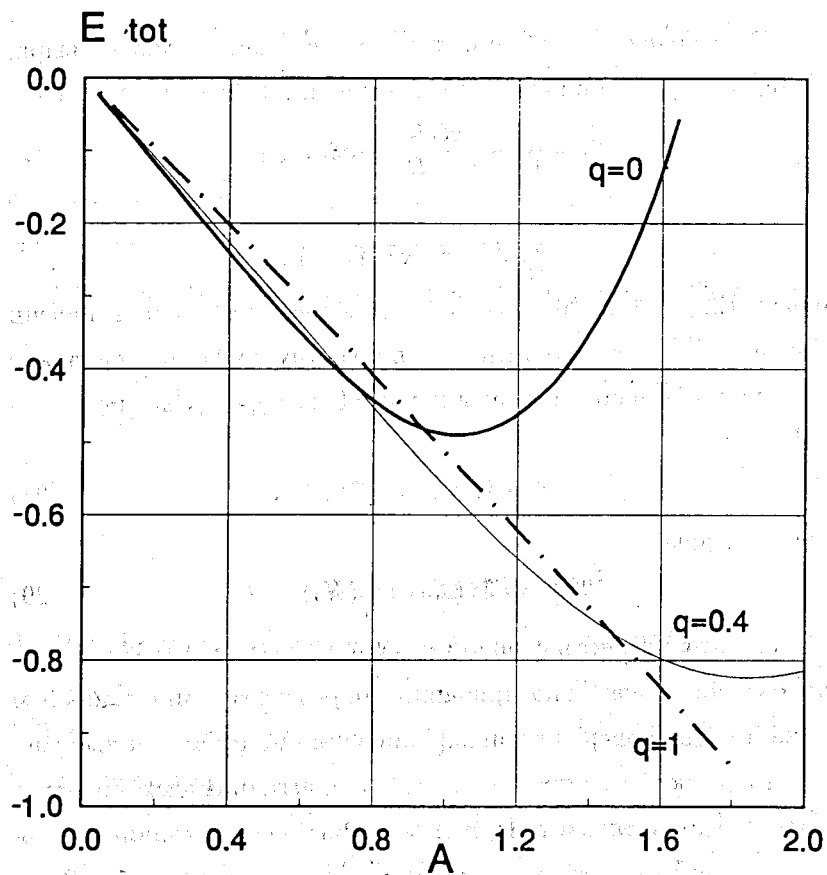


Рис.1. Зависимость полной энергии космического тела от параметра  $A$  (приведенной массы космического тела) для трех значений электрической поляризации. Видно, что при  $A > 0,6$  возникновение электрической поляризации энергетически выгодно

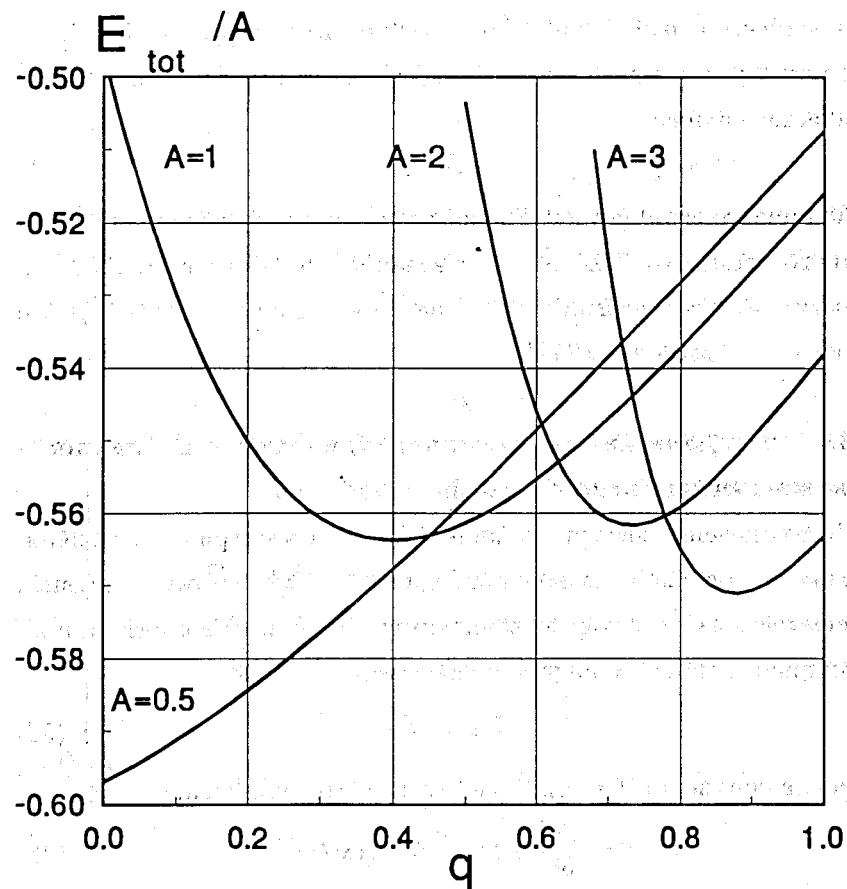


Рис.2. Зависимость полной энергии космического тела от величины электрической поляризации в случаях  $A = 0,5, A = 1, A = 2$ . Видно, что при  $A = 0,5$  появление электрической поляризации энергетически не выгодно. При больших  $A$  минимум энергии смещается в сторону  $q \rightarrow 1$

электрической поляризации. При этом при достаточно больших массах минимуму энергии соответствует плотность связанного электрического заряда

$$\rho_e \approx G^{1/2} \rho. \quad (31)$$

Физически возникновение такой электрической поляризации объясняется тем, что при ее существовании происходит уменьшение гравитационной энергии тела из-за более сильного равномерного сжатия тела давлением (12).

### 3. Электрическая поляризация приводит к возникновению магнитных полей у космических тел

Возникновение внутри космического тела электрически поляризованного состояния должно приводить к наблюдаемому следствию: у космического тела должен возникнуть магнитный момент  $M$ , пропорциональный его моменту вращения  $L$ :

$$\vec{M} = \vartheta \cdot \vec{L}. \quad (32)$$

Здесь, в соответствии с (31), гиромангнитное отношение

$$\vartheta = \frac{\sqrt{G}}{3c} \approx 2.88 \cdot 10^{-15} (\text{см/г})^{1/2} \quad (33)$$

и

$$\lg \vartheta = -14.54. \quad (34)$$

Равенство (32) дает объяснение наблюдаемой пропорциональности между магнитными и механическими моментами космических тел [5]. Зависимость (32)-(34) показана на рис.3 штрихпунктирной линией. На этом же рисунке приведены наблюдаемые значения  $M(L)$  для всех космических объектов, для которых они известны.

Данные, использовавшиеся при построении этого рисунка, взяты из справочников, обзоров и отчетов об экспедициях космических аппаратов [6-12]. Для всех указанных звезд, кроме Солнца и пульсара (*Her X-1*), значения магнитных полей, скоростей вращения и

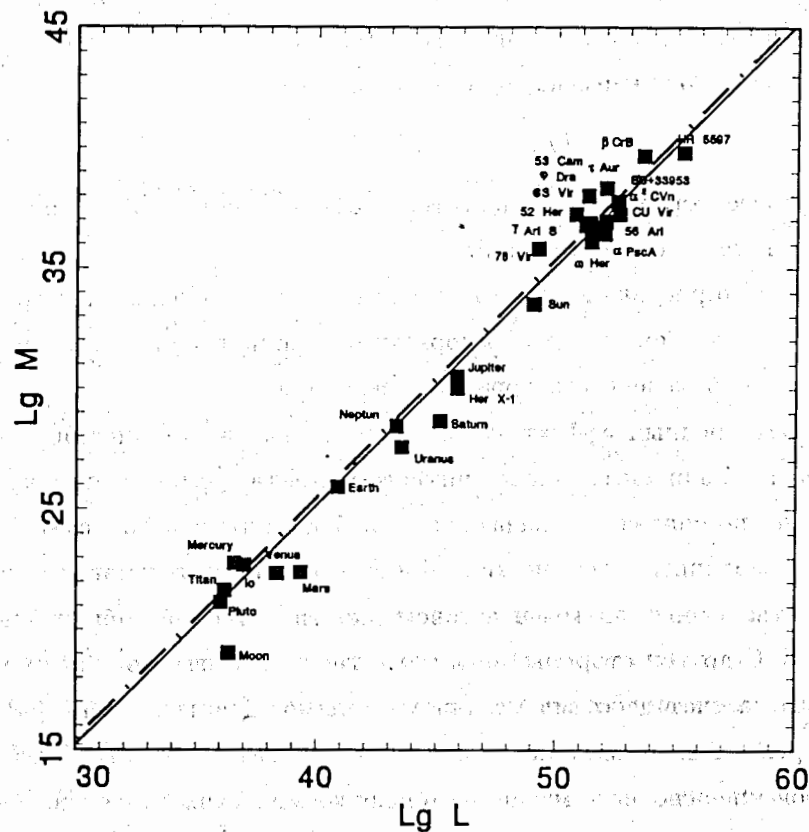


Рис.3. Наблюдаемые значения магнитных моментов космических тел в зависимости от их угловых моментов. Данные приведены в логарифмическом масштабе. По оси ординат — логарифм магнитного момента в Гс·см, по оси абсцисс — логарифм углового момента вращения в эрг·с. Штрихпунктирная линия — результат расчета по формулам (32)-(33), сплошная линия — результат фитирования по наблюдаемым значениям  $M(L)$ .

радиусов приведены в обзоре [8]<sup>2</sup>. Для Ио и Титана магнитные поля определены космическим аппаратом "Вояджер-1" [10,11]<sup>3</sup>. Фитирование по методу наименьших квадратов дает

$$\lg \vartheta = -(14.82 \pm 0.87), \quad (35)$$

что удовлетворительно согласуется с (34). Равенству (35) на рис.3 соответствует сплошная линия.

Из этого рисунка видно, что магнитные поля большинства космических тел могут быть по порядку величины вполне удовлетворительно объяснены электризацией вещества.

Рассмотренный эффект не определяет знак электрической поляризации, а значит, знак магнитного момента космического тела. Это можно считать совпадающим с наблюдениями в том смысле, что у различных космических объектов наблюдаются магнитные моменты разных знаков и закономерности в этом не обнаруживаются. С другой стороны, знак магнитного момента может изменяться за счет действия механизма динамо. Действительно, рассмотренный выше механизм должен нести ответственность за возникновение основного магнитного поля космических объектов. Детальная структура и временная зависимость магнитных полей могут быть объяснены действием динамо, для которого основное поле служит затравочным. Поэтому рассмотренный эффект не отменяет модели динамо, но объясняет механизм возникновения затравочного поля.

<sup>2</sup> 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.3. (Следует заметить, что обе оценки вполне удовлетворительно согласуются.)

<sup>3</sup> 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.3 для Ио и Титана вместо угловых скоростей взяты значения обратных периодов их обращения вокруг центральных планет.

#### 4. Заключение

Наши расчеты базируются на двух основных предположениях:

- 1) электрическая поляризация внутри космического тела пропорциональна ускорению силы тяжести (равенство (5));
- 2) сжатие вещества под действием собственного гравитационного поля внутри космического тела происходит по закону Гука (равенство (1)). Первое предположение сделано для того, чтобы иметь возможность последовательно провести необходимые расчеты. Второе предположение о применимости закона Гука имеет более принципиальное значение. Проведенные нами дополнительные расчеты в рамках стандартной политропной модели, когда

$$\rho \sim p^k, \quad (36)$$

показывают, что при любых значениях показателя политропы  $k$  и массы минимальной энергией обладает незаряженное тело. Только учет того обстоятельства, что реальное тело на поверхности является несжимаемым, а вблизи центра вещество ведет себя как сжимаемый газ, приводит к тому, что состояние с отличной от нуля поляризацией становится энергетически выгодным.

Именно это обстоятельство теряется из виду при проведении расчетов в рамках политропной модели. В связи с тем, что вещество внутри космического тела можно считать электрон-ионной плазмой, нам при расчетах следовало бы при высоких давлениях использовать закон, приводящий к показателю политропы  $k = 3/2$ . Результаты таких расчетов мы надеемся привести в другой работе. Использование закона Гука претендует на качественное доказательство вывода о том, что возникновение электрической поляризации при сжатии становится энергетически выгодно, только если тело достаточно массивно.

Автор глубоко благодарен В.Л.Любошцу, Л.А.Мак-



символу и М.И.Подгорецкому за многолетние "полезные обсуждения изложенной проблемы, критику и помощь в создании описанной модели и уточнение расчетов".

## Литература

1. Sutherland W., *Terrestr. Magn. Atm. Elec.*, 1903, 8, p.49.
2. Sutherland W., *Terrestr. Magn. Atm. Elec.*, 1904, 9, p.167.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., *Статистическая физика, часть 1*. М.: Наука, 1964.
4. Соболев В.В. *Курс теоретической астрофизики*. М.: Наука, 1975.
5. Blackett P.M.S., *Nature*, 159 (1947) 658-666.
6. Allen C.W., *Astrophysical quantities*, The Athlone press, 1973.
7. Stevenson D.J., *Rep. Prog. Phys.*, 46 (1983) 555-620.
8. Borra E.F., Landstreet J.D., *The Astrophysical Journal, Suppl.*, 42 (1980) 421-445.
9. Anderson I., *New Scientist*, 1493 (1986) 21-22.
10. Ness N.F. et al., *Science*, 206 (1979) 966-971.
11. Ness N.F. et al., *Science*, 212 (1981) 211-217.
12. Manchester R., Taylor J., *Pulsars*, San Francisco, 1977.