



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-144

P17-98-144

Б.В.Васильев*

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ,
ИНДУЦИРУЕМАЯ ТЯГОТЕНИЕМ В МЕТАЛЛЕ

*Институт физико-технических проблем, Дубна

1998

Механизм возникновения электрической поляризации, индуцированной гравитацией (ЭПИГ) в металле при нормальных давлениях, неоднократно рассматривался ранее [1-6]. Основной целью настоящей работы является получение оценки на величину ЭПИГ в металле, находящемся при сверхвысоком давлении внутри космических тел.

Из общих принципов классической и квантовой механики вытекает, что энергетические соотношения в равновесных многочастичных системах регулируются теоремой вириала, впервые установленной Клаузиусом [7-8]. В частности, для металла, в котором частицы взаимодействуют по кулоновскому закону из теоремы вириала следует, что

$$2(T_e + T_i) = -U \quad (1)$$

Здесь

U - потенциальная энергия взаимодействия электронов и ионов;

T_e и T_i - кинетические энергии электронов и ионов.

Т.к. масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой иона

$$m_e \ll m_i, \quad (2)$$

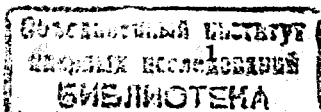
кинетической энергией ионов можно пренебречь, и полная энергия системы согласно теореме вириала есть

$$\mathcal{E}_t = T_e + U = -T_e. \quad (3)$$

Чтобы определить действие гравитации на металл в чистом виде, исключив влияние тепловых эффектов, будем полагать его температуру равной нулю. Средняя кинетическая энергия электронов в металле определяется их энергией Ферми и поэтому пропорциональна плотности частиц n в степени $2/3$. Потенциальная энергия частиц, взаимодействующих по кулоновскому закону, пропорциональна $n^{1/3}$. В присутствии внешнего давления, приводящем к деформации сжатия ($n > n_0$), полная энергия металла [8]

$$\mathcal{E}_t = T + U = -3/5 Niz \cdot E_F [2(n_i/n_0)^{1/3} - (n_i/n_0)^{2/3}]. \quad (4)$$

Здесь



N_1 - число ионов;

Z - заряд иона;

$n_1 = N_1/V$ - концентрация ионов;

значком \circ обозначены величины, характеризующие металл в недеформированном состоянии.

При малых давлениях, когда $n \approx n_0$, полная энергия отрицательна, и ионы с электронами образуют общую самосогласованную потенциальную яму. Существование ионов и электронов в такой яме позволяет выразить условие равновесия металла в поле силы тяжести в виде двух независимых уравнений: отдельно записать равновесие ионной решетки и отдельно - равновесие электронного газа в поле ионов, выражая их в виде постоянства соответствующих электрохимических потенциалов. Таким образом, процесс деформации металла силами тяготения можно рассматривать, как бы разделив на два этапа: на первом - силы тяготения деформируют ионную решетку, а на втором - электроны подстраивают свою плотность под плотность ионов так, чтобы по возможности сохранить локальную электронейтральность, т.к. отклонение от электронейтральности ведет к дополнительному росту энергии. В результате электронейтральность все-таки нарушается, но в очень малой степени, и внутри металла возникает очень малое электрическое поле с напряженностью

$$E \approx \gamma g / en, \quad (5)$$

где γ - плотность металла,

g - ускорение силы тяжести,

e - заряд электрона.

С учетом действия электрической поляризации на электронную подсистему запишем ее условие равновесия в виде

$$\mu_e - e\phi = \text{const.} \quad (6)$$

Прямым действием тяготения на электроны мы пренебрегаем.

Для ионной системы в гравитационном поле с учетом возможного возникновения электрической поляризации имеем

$$\mu_1 + m\psi + e\phi = \text{const.} \quad (7)$$

Здесь

μ_1 - химпотенциал иона в решетке;

ψ и ϕ - потенциалы действующего гравитационного поля и индуцированного электрического поля.

Поддействовав на уравнения (6) и (7) оператором ∇ , получаем систему, описывающую равновесие сил в металле:

$$\begin{aligned} \nabla \mu_e + eE &= 0, \\ \nabla \mu_1 - mg - eE &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь

$g = -\nabla\psi$ - ускорение силы тяжести.

Считая металл электронейтральным в нулевом приближении и полагая

$$ne \approx n_1 \approx n, \quad (9)$$

получим

$$\frac{d\mu_e}{dn} \nabla n = -eE, \quad (10)$$

$$\frac{d\mu_1}{dn} \nabla n = mg + eE$$

и

$$\frac{d}{dn} (\mu_e + \mu_1) \nabla n = mg. \quad (11)$$

По определению модуль упругого сжатия ионной решетки

$$B_i = n^2 \frac{d\mu_1}{dn} \quad (12)$$

и модуль упругого сжатия электронного газа

$$B_e = n^2 \frac{d\mu_e}{dn} \quad (13)$$

Для металла

$$B = B_e + B_i = n^2 \frac{d}{dn} (\mu_e + \mu_1). \quad (14)$$

Подставив эти выражения в уравнения (8), получаем, что напряженность электрического поля внутри металла (в согласии с оценкой (5))

$$E = - \frac{B_e - mg}{e} \quad (15)$$

Этот результат является следствием того, что ионы в металле закреплены в ионной решетке, а электронный газ в меру своей

упругости свободно смещается относительно решетки. Следует отметить, что напряженность, описываемая равенствами (15) (или (5)), столь мала, что измерить ее невозможно.

По-другому обстоит дело при действии гравитации на металл, находящийся при сверхвысоком давлении. Действие сверхвысокого давления может привести к такому увеличению плотности вещества, при котором его полная энергия, в соответствии с равенством (4), станет положительной и металл перейдет в состояние, которое мы будем называть холодной сверхплотной плазмой. В этом состоянии электронный газ будет удерживаться стенками, создающими внешнее давление. За счет действия кулоновских сил вблизи ионов будут существовать облака электронов проводимости, образуя комплексы ион-электрон, но ионная решетка будет отсутствовать. В целом между такими комплексами будут доминировать силы отталкивания. В этом состоянии полная энергия металла, помещенного в поле тяготения, будет определяться суммой его гравитационной, электрической и внутренней (упругой) энергии $\mathcal{E}(\gamma)$:

$$\mathcal{E}_t = 1/2 \gamma \psi + 1/2 \rho \phi + \mathcal{E}(\gamma) \quad (16)$$

При этом вклад электронов в гравитационную и ионов во внутреннюю энергии можно не учитывать. Электрическая энергия будет возникать за счет потери ион-электронными комплексами малой части заряда их электронными облаками. Поэтому в данном случае

$$\Delta \phi = - 4\pi \rho \quad (17)$$

$$\rho = (e - q_e)n \quad (18)$$

Здесь

e и q_e - заряд иона и электронного облака, экранирующего ион; n - плотность ионов.

Взяв производную от полной энергии

$$\frac{\delta \mathcal{E}_t}{\delta \gamma} = \psi + \frac{\delta \rho}{\delta \gamma} \phi + \frac{\delta \mathcal{E}(\gamma)}{\delta \gamma} \quad (19)$$

и учитывая, что

$$p = \gamma \frac{\delta \mathcal{E}(\gamma)}{\delta \gamma} - \mathcal{E}(\gamma); \quad \frac{\delta \mathcal{E}(\gamma)}{\delta \gamma} = \frac{\mu}{M}; \quad \nabla \frac{\delta \mathcal{E}(\gamma)}{\delta \gamma} = \frac{\nabla p}{\gamma} \quad (20)$$

в предположении, что

$$\rho = \text{Const } \gamma, \quad (21)$$

получаем уравнение равновесия для холодной плазмы:

$$\gamma g = \nabla p_e + \rho E \quad (22)$$

Это уравнение вместе с уравнениями (17) и (18) описывает поведение в поле сил тяжести комплексов, образующихся за счет взаимного притяжения иона и электрона при существовании отталкивания между самими комплексами. Это уравнение применимо и к плотной плазме, и к разреженной плазме, поэтому не позволяет сразу получить ответ: какая электрическая поляризация возникнет в каждом случае.

Исходя из того, что внутри электронного газа потенциал иона спадает с расстоянием по закону Юкавы с длиной экранирования λ

$$\phi = ez \frac{\exp(-r/\lambda)}{r} \quad (23)$$

можно записать выражение для плотности электронного газа, находящегося между двумя соседними ионами, расположенными на расстоянии a :

$$n(r) = \frac{1}{4\pi\lambda^2} \left[\frac{e^{-r/\lambda}}{r} + \frac{e^{-(a-r)/\lambda}}{a-r} \right] \quad (24)$$

Эта плотность в области "хвоста" распределения на малом расстоянии x от точки $R=a/2$:

$$n(x) = \frac{e^{-R/\lambda}}{2\pi R \lambda^2} \left[1 + \frac{x^2}{2R\lambda} \right] \quad (25)$$

Смещение иона под действием гравитации относительно его равновесного положения в электронном газе, который фиксирован стенками, приводит к возникновению двух механизмов возвращающих сил. Первый связан с отталкиванием "хвостов" электронных облаков между ионами. Второй - со смещением иона относительно закрепленного стенками

электронного газа постоянной плотности

$$n_e = \frac{e^{-R/\lambda}}{2\pi R \lambda^2} \quad (26)$$

Т.к. длина экранирования

$$\lambda \approx R \quad (27)$$

то давление электронного газа в области "хвоста" распределения на малом расстоянии x от точки $R=a/2$ по порядку величины в соответствии с (25)

$$p_x \approx n_e E F \left[1 + \frac{x^2}{R^2} \right]^{5/3} \approx \bar{n} E F \left[1 + \frac{5x^2}{3R^2} \right] \quad (28)$$

\bar{n} - средняя плотность электронного газа.

Поэтому смещение иона на малое расстояние x относительно своих соседей повысит с одной стороны иона и уменьшит с другой его стороны давление на величину

$$\Delta p_x \approx \bar{n} E F \frac{x^2}{a^2} \quad (29)$$

что приведет к появлению возвращающей (объемной) силы

$$\nabla p \approx \frac{\Delta p_x}{a} \approx \frac{e^2}{a^2} \bar{n} \left(\frac{x}{a} \right)^2 \quad (30)$$

Электрическая сила, связанная со смещением иона относительно центра электронного облака постоянной плотности \bar{n} на расстояние x , по порядку величины равна

$$\rho E \approx \frac{e^2}{a^2} \bar{n} \left(\frac{x}{a} \right) \quad (31)$$

В связи с тем, что $x \ll a$, в рассматриваемом случае сверхплотной плазмы силой (30) можем пренебречь, и вместо (22) получим

$$\gamma g - \rho E = 0 \quad (32)$$

Таким образом, в плотной холодной плазме, находящейся под действием сверхвысокого внешнего давления, плотность электронной компоненты так велика, что имеет постоянную величину везде, кроме ближайшей окрестности иона. При этом перекрытие "хвостов" электронной плотности не играет

заметной роли в определении положения ионов. Их положение внутри объема будет определяться только электрической силой, которая и будет в соответствии с равенством (32) компенсировать действие тяготения на ионы.

Напряженность поля, соответствующая равенству (32), может быть очень большой, т.к. в соответствии с определениями электродинамики

$$\operatorname{div} E = 4\pi \rho, \quad (33)$$

и ρ определяется равенством (18). Из-за того, что гравитационная сила много слабее электрической, отклонение от электронейтральности комплекса ион-электрон будет очень малым. Так, в земном гравитационном поле величина относительного заряда составит всего

$$\frac{(e-q_e)}{e} \approx 10^{-15} \quad (34)$$

но за счет того, что размеры космического тела огромны, очень велика будет и результирующая напряженность поля. Если размер тела R и межатомное расстояние a , то она примерно в R/a раз превышает напряженность поля, описываемую равенством (15). Но возникает такое сильное поле, когда на металл действуют одновременно однородное сверхвысокое давление сжатия и тяготение. Получить такое давление, которое увеличивало бы плотность вещества примерно в 8 раз, как это необходимо для перевода металла в плазменное состояние согласно уравнению (4), в лабораторных условиях невозможно. Однако этот эффект должен ярко проявлять себя в космических объектах.

Учитывая, что ускорение силы тяжести связано с плотностью вещества соотношением, подобным (33):

$$4\pi G \gamma = -\operatorname{div} g, \quad (35)$$

из этих равенств, в соответствии с (21), получаем

$$\rho = G^{1/2} \gamma \quad (36)$$

В результате эффекта ЭПИГ внутри космического тела, где вещество подвергнуто действию сверхвысокого давления, должно

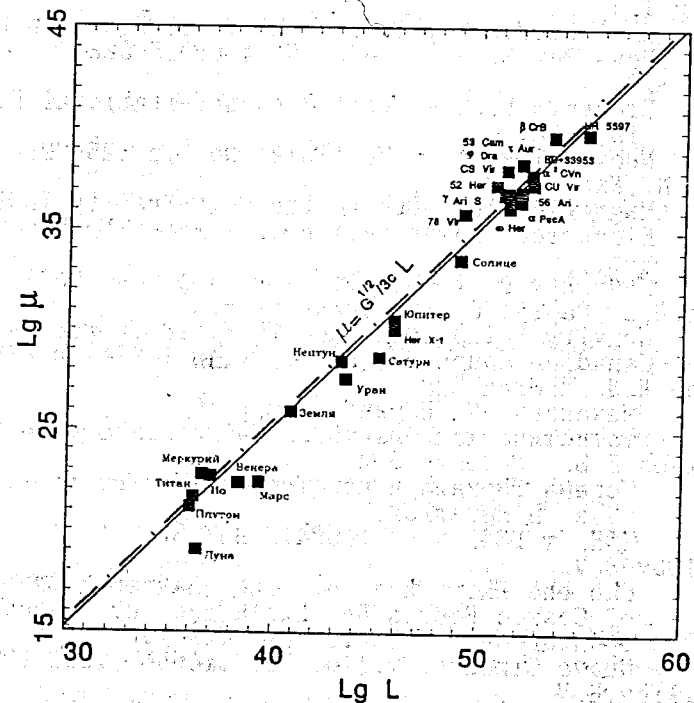
возникнуть электрически заряженное ядро с объемной плотностью положительного заряда ρ , определяемой равенством (36), и соответствующий отрицательный поверхностный заряд на границе ядра, обеспечивающий электрическую нейтральность тела как целого [10,12]. Вращение вокруг своей оси такого в целом электронейтрального космического объекта приведет к возникновению у него магнитного момента μ , пропорционального моменту вращения ядра. Для космических тел, имеющих достаточно большие размеры, радиус ядра может не сильно отличаться от внешнего радиуса тела. Для таких космических тел момент вращения ядра будет по порядку величины совпадать с моментом вращения всего тела L . В результате гироманнитные отношения для этих тел должны быть близки к универсальной величине

$$\mu/L \approx G^{1/2}/3c \quad (37)$$

Значения $\mu(L)$ для всех космических тел, для которых они известны сегодня, показаны на рисунке в логарифмическом масштабе [11]. На этом рисунке штрихпунктирной линией показано отношение (37), сплошная линия получена методом наименьших квадратов из наблюдаемых данных. Как видно из этого рисунка, с логарифмической точностью гироманнитные отношения, близкие к универсальному значению $G^{1/2}/3c$, действительно имеют все космические тела. Заметно выпадает только Луна, размеры которой слишком малы и, соответственно, мало внутреннее давление.

Следует отметить, что рассмотренный механизм возникновения внутри космических объектов ЭПИГ согласуется с полученным нами ранее выводом об энергетической выгоде существования электрической поляризации внутри космических объектов [9-12].

Автор выражает искреннюю благодарность Л. А. Максимову, В. Л. Любошицу и В. Б. Приезжеву за многочисленные обсуждения, приведшие к уточнению приведенных расчетов.



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

Данные приведены в логарифмическом масштабе. По ординат - логарифм магнитного момента, отнесенного к M^3 ; по оси абсцисс - логарифм углового момента вращения, отнесенного к эрг·с.

Штрихпунктирная линия - результат расчета по формуле $3c$, сплошная линия - результат фитирования по наблюдаемым значениям

Литература

1. Schiff L. I., Barnhill M. V.,
Gravitation - Induced Electric Field near a Metal,
Phys.Rev., v.151 (1968) No 4, p.1067-1071.
2. Dressler A. I. a.o.,
Gravitationally Induced Electric Field
in Conductors,
Phys.Rev., v.168 (1968) No 3, p.737-743.
3. Rieger T. J.
Gravitationally Induced Electric Field in Metal,
Phys.Rev.B, v.2 (1970) No 4, p.825-828.
4. Leung M. C.
Electric Fields Induced by Gravitational Field
in Metal,
Nuovo Cimento, v.76 (1972) No 2, p.825-828.
5. Kumar N., Naddini R.,
Magnetic Field Due to the Self-Gravity Induced
Electrical Polarization of a Rotating Massive
Body,
Phys.Rev.D, v.151 (1973) No 4, p.1067-1071.
6. Leung M. C., Papini G., Rystephanick R. G.,
Gravity - Induced Electric Field in Metals,
Canadian Journ. of Phys., v.49 (1971) p.2754-2767.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.
Механика, М, "Наука", 1988, § 10.
Статистическая физика, М, "Наука", 1976, § 24, 31, 57, 85.
8. Васильев Б. В., Любошиц В. Л.
Терма вириала и некоторые свойства электронного
газа в металлах.
УФН, т.164, N 4, (1994), 367-374.
9. Vasiliev B. V.
Can the Existance of the Magnetic Moments
of Cosmic Bodies Be Explained by Internal
Spontaneous Electric Polarization?
Nuovo Cimento, v.110, N12, (1996), 1381-1389.
10. Vasiliev B. V.
Why Can Spontaneous Electric Polarization
Arise Inside Cosmic Bodies?
Nuovo Cimento, v.112, N10, (1997), 1361-1372.
11. Васильев Б. В.
Природа, 1996, N. 6, стр.13-23.
12. Васильев Б. В.
Модель Земли, построенная методом
минимизации полной энергии.
Препринт ОИЯИ, P17-97-405, Дубна, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1998 года.