

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-129

P17-99-129

Б.В.Васильев

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ
С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ВЕЩЕСТВА

1999

1. Введение

Принято думать, что электрическая поляризация звездного вещества и электрическое взаимодействие вообще не играют практически никакой роли в астрофизике и электрические силы при рассмотрении равновесия вещества планет и звезд никогда не принимаются во внимание. Это можно считать следствием прочно установившегося мнения, что заметная электрическая поляризация в металлах и других «обычных» (несегнето- или пирозлектрических) веществах ни при каких условиях спонтанно возникнуть не может. Это, конечно, справедливо для веществ, находящихся под действием малых давлений. Но при этом упускается из виду то, что под действием сверхвысокого давления при переходе в состояние плазмы свойства вещества радикально изменяются. В сверхплотной плазме создаются условия для возникновения значительной электрической поляризации под действием даже относительно слабого тяготения. В большом космическом теле, состоящем из сверхплотной плазмы, эта *гравитационно - индуцированная электрическая поляризация* (ГИЭП) может быть достаточно велика, чтобы играть определяющую роль в формировании ряда особенностей строения космического тела и его свойств. В первую очередь это относится к трем проблемам, постановка и решение которых изменяются коренным образом. Это :

- а) распределение давления и плотности вещества внутри космического тела;
 - б) генерация магнитного поля космическими телами;
 - в) формирование спектра масс космических тел.
- Как следствие, эти особенности строения могут проявиться в эволюции звезд.

2. Гравитационно-индуцированная электрическая поляризация вещества

2.1. ГИЭП в металле

Электрическая поляризация, индуцируемая тяготением в металле, неоднократно изучалась ранее [2-7]. Основной результат этих исследований сводится к утверждению, что внутри металла под действием тяготения должно возникнуть электрическое поле с напряженностью

$$\vec{E} \approx -\frac{m_i \vec{g}}{e} \quad (1)$$

Здесь m_i - масса иона,

\vec{g} – ускорение тяготения,

e – заряд электрона.

Это поле столь мало, что в земных условиях его невозможно измерить экспериментально. Малость величины электрического поля, индуцируемого тяготением в металле, является прямым следствием наличия в металле ионной решетки, которая существует за счет прямого взаимодействия

между ионами. Под действием тяготения эта решетка деформируется и затем легкий электронный газ подстраивается под эту деформацию в меру своей упругости.

2.2. ГИЭП в сверхплотной ядерно-электронной плазме

Под действием достаточно высокого давления все вещества теряют свою индивидуальность и переходят в состояние сверхплотной ядерно-электронной плазмы (Не-плазмы). Это происходит, когда объем, приходящийся на один атом, становится меньше обычных атомных размеров. Если исходным веществом был металл, то его переход в состояние Не-плазмы удобно проиллюстрировать, используя для этого теорему вириала [1]. Согласно этой теореме полная энергия металла, деформированного внешним давлением, может быть записана в виде [8]

$$E_i = -\frac{3}{5} N_i E_F^{(e)} \left[2 \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^{2/3} \right]. \quad (2)$$

Здесь

N_i - число ионов;

n_i - плотность ионов в деформированном металле (ионы мы считаем одновалентными);

n_0 и $E_F^{(e)}$ - плотность ионов и энергия Ферми при отсутствии давления.

Пока давления невелики и плотность $n_i \approx n_0$, согласно (2), полная энергия металла отрицательна. При этом ионы с электронами существуют внутри общей самосогласованной потенциальной ямы, существование которой связано с наличием ионной решетки.

Когда на металл действует столь высокое давление, что его плотность возрастает в восемь или более раз, то согласно (2) его энергия становится положительной. Это и означает переход металла в состояние Не-плазмы. В этом состоянии электронный газ удерживается стенками, создающими давление. Взаимное притяжение между ядрами и электронным газом приводит к образованию электронной «шубы» вокруг каждого ядра и возникновению эффективных сил отталкивания между ядрами. Поэтому при рассмотрении равновесия в Не-плазме необходимо учитывать, что, в отличие от металла, в ней нет ионной решетки, которая бы существовала за счет прямого взаимодействия между ядрами.

В Не-плазме электроны испытывают и притяжение со стороны ионов, и отталкивание со стороны других электронов. В первом приближении эти взаимодействия взаимно компенсируют друг друга и электронную подсистему, оказывается, можно рассматривать как идеальный электронный газ. Это же относится и к металлу, но для плазмы это тем более справедливо, потому что электронный газ по своим свойствам приближается к идеальному тем ближе, чем выше внешнее давление, электронная плотность и энергия вырождения.

В то же время положительные заряды, сконцентрированные в ядрах, распределены неравномерно в объеме. Они могут, как и в металле,

образовать внутри плазмы плотно упакованную пространственную решетку [9]. Важно подчеркнуть, что эта упорядоченность ядер возникает за счет их взаимодействия с электронным газом в противоположность металлу, где решетка образуется за счет взаимодействия ионов друг с другом. При описании пространственной решетки ядер в плазме ее ячейку принято заменять сферической ячейкой Вигнера - Зейтца [9]. Для плазмы, имеющей плотность γ и состоящей из ядер с атомным номером A и зарядом Ze , радиус ячейки Вигнера - Зейтца r_i определяется равенством

$$\left(\frac{\gamma}{m_i} \right)^{1/3} = \frac{4\pi}{3} r_i^3 = \frac{Z}{n}. \quad (3)$$

Здесь $m_i = Am_p$ - масса ядра, m_p - масса протона;

$n = \frac{3Z}{4\pi r_i^3}$ - плотность электронного газа.

Условие равновесия в веществе описывается постоянством его химического потенциала [1]. Так как в ядерной подсистеме прямое взаимодействие между ядрами отсутствует, то равновесие в этой подсистеме (при $T=0$) можно записать в виде

$$\mu_i = Ze\varphi(r) + m_i\psi = const. \quad (4)$$

Здесь ψ - потенциал действующего на плазму гравитационного поля;

$\varphi(r)$ - потенциал электрического поля внутри ячейки Вигнера - Зейтца.

Это уравнение фактически является определением положения ядра внутри ячейки Вигнера - Зейтца.

Так как прямым воздействием тяготения на электроны, масса которых мала, можно пренебречь, то равновесие в электронном газе можно записать в виде

$$\mu_e = E_F = \frac{p_F^2(r)}{2m} - e\varphi(r) = const. \quad (5)$$

Интересующая нас электризация плазмы будет связана с изменением плотности ядерной и электронной компонент. При этом потенциал возникающего электрического поля определяется законом Гаусса

$$\nabla^2 \varphi(r) = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \varphi(r) \right) = -4\pi (Ze\delta(r) - en(r)). \quad (6)$$

Здесь функция $\delta(r)$ описывает распределение ядер.

Так как в приближении Томаса - Ферми плотность электронного газа

$$n(r) = \frac{8\pi}{3h^3} p_F^3(r). \quad (7)$$

С учетом (4) и (5) имеем

$$\frac{p_F^2(r)}{2m} = \mu_i + \mu_e - m_i\psi. \quad (8)$$

Это позволяет преобразовать уравнение (6) при $r > 0$ в нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \varphi(r) \right) = -4\pi \left(\frac{8\pi}{3h^3} \right)^{3/2} [2m(\mu_e + \mu_i - m_i \psi)]^{3/2}. \quad (9)$$

Это уравнение упрощается введением новых переменных [10]:

$$\mu_i + \mu_e - m_i \psi = Ze^2 \frac{u}{r} \quad (10)$$

и $r = ax$.

Здесь $a = \left(\frac{9\pi^2}{128Z} \right)^{1/3} a_0$ и $a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2}$ = радиус Бора.

В новых переменных уравнение (9) запишется в виде [10]

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{u^{3/2}}{x^{1/2}}. \quad (11)$$

При этом фермиевский импульс электронного газа

$$p_F = \left[2m \left(\frac{Ze^2}{a} \right) \left(\frac{u}{x} \right) \right]^{1/2} = \frac{\hbar}{a_0} \left(\frac{128Z^4}{9\pi^2} \right)^{1/6} 2^{1/2} \left(\frac{u}{x} \right)^{1/2} \quad (12)$$

и электронная плотность

$$n_{TF} = \frac{8\pi}{3h^3} p_F^3 = \frac{32Z^2}{9\pi^3 a_0^3} \left(\frac{u}{x} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

При $r \rightarrow 0$ электрический потенциал создается только ядрами $\varphi(r) \rightarrow \frac{Ze}{r}$.

В новых переменных [10] это означает $u(0) \rightarrow 1$.

В отсутствие гравитационного поля полный заряд ячейки Вигнера - Зейтца равен нулю. Воздействие гравитационного поля приводит к тому, что электронный газ в этой ячейке в очень малой степени изменяет свою плотность и его заряд становится равным

$$Q_e = 4\pi e \int_0^{r_0} n(r) r^2 dr = \frac{8\pi e}{3h^3} \left(2m \frac{Ze^2}{a} \right)^{3/2} 4\pi a_0^3 \int_0^1 x^2 \left(\frac{u}{x} \right)^{3/2} dx. \quad (14)$$

Используя (11), получаем

$$Q_e = Ze \int_0^1 \frac{d^2 u}{dx^2} x dx = Ze \int_0^1 dx \frac{d}{dx} \left(x \frac{du}{dx} - u \right) = Ze \left[x \frac{du}{dx} \Big|_0^1 - u(x_1) + u(0) \right] \quad (15)$$

или

$$Q_e = Ze \left[1 + \frac{r_0^2 m_i \nabla \psi}{Ze^2} \right] = Ze + \delta q. \quad (16)$$

Здесь $\delta q = -\frac{mg}{E_e}$;

$\vec{g} = -\vec{\nabla} \psi$ - гравитационное ускорение;

$\vec{E}_e = -\left(\frac{e}{r_0^2} \right) \vec{g}$ - вектор усредненной напряженности электрического

поля.

Таким образом, заряд электронной «шубы» оказывается несколько меньшим заряда иона и суммарный заряд ячейки отличается от нуля.

2.3. Уточнение условия равновесия

Это обстоятельство заставляет учесть отклонение от электронейтральности в исходном уравнении равновесия и вместо (5) записать:

$$\mu_e = E_F = \frac{p_F^2(r)}{2m} - (e + \delta q) \varphi(r) = const. \quad (5')$$

Здесь $\left| \frac{\delta q}{e} \right| \ll 1$.

Это приведет к изменению уравнения (8)

$$\frac{p_F^2(r)}{2m} = \mu_i + \mu_e - m_i \psi - \delta q \varphi, \quad (8')$$

уравнения (9)

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \varphi(r) \right) = -4\pi \left(\frac{8\pi}{3h^3} \right)^{3/2} [2m(\mu_e + \mu_i - m_i \psi - \delta q \varphi)]^{3/2} \quad (9')$$

и уравнения (10)

$$\mu_i + \mu_e - m_i \psi - \delta q \varphi = Ze^2 \frac{u}{r}. \quad (10')$$

В результате, учитывая, что напряженность электрического поля $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$, из (15), как и ранее, получаем

$$Q_e = Ze + \delta q, \quad (17)$$

но здесь

$$\delta q = -\frac{mg}{E_e + E}. \quad (18)$$

2.4. Электрическая поляризация в центрально-симметричном гравитационном поле

В силу того, что в центрально-симметричном гравитационном поле космического тела ускорение свободного падения определяется равенством

$$\text{div } \vec{g} = -4\pi G \gamma, \quad (19)$$

которое подобно уравнению электростатики

$$\text{div } \vec{E} = 4\pi \rho, \quad (20)$$

при $E \gg E_e$, из (18) получаем величину суммарного заряда ячейки

$$\delta q = G^{1/2} m_i. \quad (21)$$

и величину плотности заряда

$$\rho = G^{1/2} \gamma \quad (22)$$

Таким образом, в гравитационном поле каждая ячейка электронно-ядерной плазмы приобретает заряд, который по порядку величины составляет 10^{-18} заряда электрона. При этом полная электронейтральность

космического тела выполняется за счет некоторого малого числа электронов, которые выталкиваются на поверхность космического тела. При этом внутри космического тела существует электрическое поле с напряженностью

$$\vec{E} = -G^{1/2} \vec{g}. \quad (23)$$

Таким образом, тяготение приведет к очень малому отклонению от электронейтральности каждого атома. Но суммарная напряженность поля, соответствующая равенству (23), может быть очень большой из-за того, что велики размеры космического тела. Возникновение под действием тяготения в Ne-плазме электрической поляризации с плотностью заряда, описываемой равенством (22), мы называем эффектом ГИЭП.

3. Распределение плотности вещества и давления внутри космического тела

На поверхности космического тела давление равно нулю, поэтому вблизи нее всегда существует область, где нет условий для возникновения эффекта ГИЭП. Для больших звезд размеры этой области можно считать пренебрежимо малыми. Но для небольшой планеты размеры поверхностной области могут составлять значительную часть, так что поляризованным будет лишь внутренняя область планеты – ядро. На поверхности ядра напряженность электрического поля скачком обращается в нуль, что сопровождается скачком давления Δp [11,12].

Важным астрофизическим следствием эффекта ГИЭП является перераспределение плотности вещества внутри космического тела. Если в космическом теле, состоящем из вещества с атомной структурой, плотность и давление монотонно растут по мере приближения к центру, то в космическом теле, состоящем из Ne-плазмы, эффект ГИЭП приводит к тому, что в соответствии с равенствами (22) и (23) сила тяготения оказывается полностью скомпенсированной кулоновской силой:

$$\gamma \vec{g} + \rho \vec{E} = 0, \quad (24)$$

и градиент давления внутри поляризованной области отсутствует. Поэтому в ядре существует вещество с постоянной плотностью. При этом нетрудно подсчитать то давление, при котором находится вещество внутри ядра, т.к. оно равно скачку давления на его поверхности:

$$p = \Delta p(R) = \frac{E(R)^2}{8\pi} = \frac{2\pi}{9} G \gamma^2 R^2. \quad (25)$$

Здесь γ – плотность вещества в ядре;

R – радиус ядра.

Можно говорить, что этот скачок давления обязан существованию скачка поляризации, которая внутри ядра в каждой точке направлена по радиусу. Такая форма поляризации эквивалентна существованию положительного «связанного» объемного заряда с постоянной плотностью (22) и отрицательного поверхностного заряда, который образуется за счет выталкивания легких электронов на поверхность ядра и делает полный

заряд тела равным нулю. Скачку давления $\Delta p(R)$ можно дать эквивалентное объяснение как давлению этого поверхностного заряда.

Пример распределения давления и плотности вещества внутри планеты, имеющей электрически поляризованное ядро, показан на рис. 1.

4. Внутреннее строение Земли

Важным, скорее геофизическим, чем астрофизическим, следствием эффекта ГИЭП является построение на его основе внутренне самосогласованной теории Земли [12]. Модели Земли, построенные ранее, предполагали существование монотонной зависимости давления внутри Земли, а разделение Земли на ядро и мантию объяснялось тем обстоятельством, что при возникновении Земли на ее долю выпало определенное количество железа и других тяжелых металлов, из которых сформировалось ядро, и нужная масса камня, которая построила мантию. В этих моделях следовало так подобрать параметры, чтобы получить нужные значения плотности ядра и мантии, а также их размеры. При построении

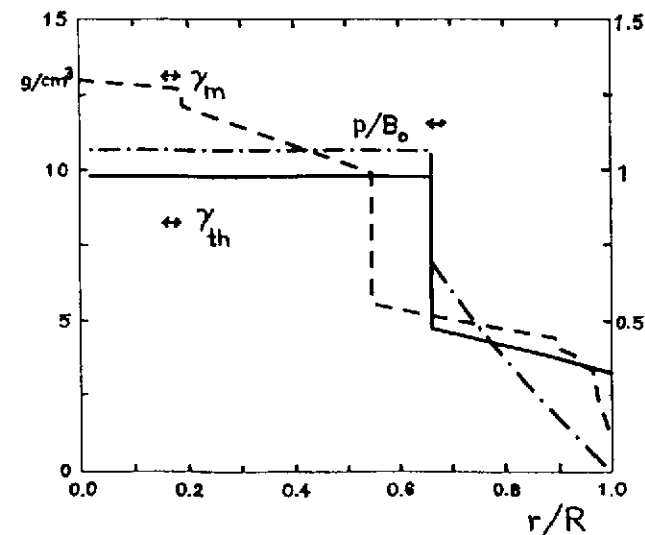


Рис.1.

Радиальная зависимость давления и плотности вещества внутри Земли [12].

Сплошная линия – расчетная зависимость плотности вещества, полученная по теории Земли, построенной методом минимизации полной энергии с учетом действия ГИЭП.

Пунктир – плотность Земли, полученная из измерений скорости распространения сейсмических волн.

Штрихпунктир – полученная с учетом действия ГИЭП расчетная зависимость давления внутри Земли, отнесенного к модулю упругого сжатия вещества мантии ($1,3 \cdot 10^{12}$ дин/см²)

теории Земли, основанной на эффекте ГИЭП, нет необходимости вводить свободные параметры. Предполагая, что Земля построена из однородного материала, разделение на ядро и мантию в ней получается за счет скачка давления (25) на границе электрически поляризованной центральной области. Основные результаты расчета сводятся к вычислению четырех величин:

- а) радиуса ядра;
- б) плотности вещества в ядре;
- в) скачка плотности на границе ядра с мантией;
- г) средней массы иона, приходящейся на один электрон в ядре.

Все эти величины получаются путем минимизации полной энергии планеты и подстановки в соответствующие уравнения четырех параметров, характеризующих Землю:

- а) массы Земли M ;
- б) радиуса Земли R ;
- в) плотности вещества на поверхности Земли;
- г) модуля упругого сжатия вещества на поверхности Земли (при известной гравитационной константе).

Расчет позволяет получить и другие данные, например распределение давления внутри Земли. Основные результаты этого расчета приведены на рис.1. На этом рисунке также показана зависимость плотности вещества внутри Земли, определенная из измерений скорости распространения сейсмических волн. Из этого рисунка видно, что при определенном различии расчетной и измеренной зависимостей плотности они совпадают в главном – обе отражают существование примерно одинаковых скачков плотности на границе ядра и мантии в районе половины радиуса планеты.

Исходя из полученных данных о распределении плотности, можно вычислить момент инерции Земли, который получается равным $0,339MR^2$, что неплохо согласуется с измеренным значением $0,331MR^2$.

По-видимому, используя соответствующие данные о массе, размере и свойствах вещества на поверхности других планет, можно построить модели этих планет, если эти планеты имеют ядро, что может быть определено по тому, обладают они магнитным полем или нет.

5. Постоянство гиромагнитного отношения космических тел

Другое астрофизическое следствие эффекта ГИЭП связано с вращением космического тела вокруг своей оси. Это вращение в целом электронейтрального тела ведет к появлению у него магнитного момента за счет того, что положительный объемный заряд, сосредоточенный внутри ядра, и отрицательный поверхностный, расположенный на его поверхности, движутся при вращении по разным радиусам. Это приводит к тому, что все космические тела, где действует эффект ГИЭП, приобретают магнитные моменты μ , отношение которых к моментам вращения тел L (точнее, к моментам вращения их ядер) выражается через отношение

фундаментальных констант [11,12]:

$$\frac{\mu}{L} = \frac{G^{1/2}}{3c} \quad (26)$$

Значения $\mu(L)$ для всех космических тел, для которых они известны сегодня, показаны на рис.2 [13], где сплошной линией показано отношение (26), а штрихпунктирная линия получена методом наименьших квадратов из наблюдаемых данных. Данные, использованные при построении этого рисунка, взяты из справочников, обзоров и отчетов об экспедициях космических аппаратов. Данные для планет и их спутников приведены в работе [14], данные для звезд - в работе [15], а магнитные поля пульсаров - в монографии [16].

Как видно из этого рисунка, с логарифмической точностью гиромагнитные отношения, близкие к универсальной величине $G^{1/2}/3c$, действительно, имеют все космические тела: и планеты, и звезды, и пульсары. Заметно выпадает только Луна, размеры которой слишком малы и, соответственно, внутреннее давление мало для образования поляризованного ядра. Для Земли расчет по теории, описанной выше, дает $\mu = 4 \cdot 10^{25} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$, что

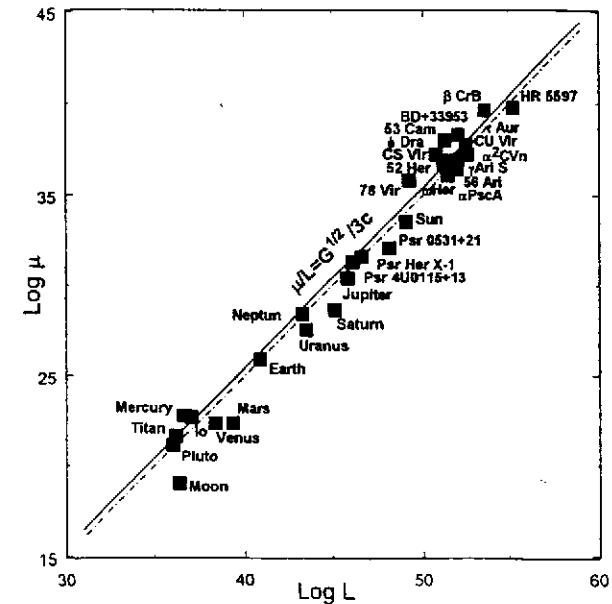


Рис.2. Наблюдаемые значения магнитных моментов космических тел в зависимости от их угловых моментов.

По оси ординат - логарифм магнитного момента, отнесенного к $\text{Гс} / \text{см}^3$, по оси абсцисс - логарифм углового момента вращения, отнесенного к $\text{эрг} / \text{с}$

составляет почти точно половину от наблюдаемого значения $\mu = 8,05 \cdot 10^{25} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$.

Тот факт, что для некоторых планет величины магнитных моментов вполне согласуются с равенством (26), но имеют другой знак, по-видимому, говорит о том, что механизм гидродинамо играет свою роль. Палеомагнитные данные на Земле также как будто указывают на то, что знак магнитного поля может меняться со временем. По-видимому, можно считать, что эффект ГИЭП создает основное магнитное поле космического тела. Детальная его структура, временная зависимость и направленность наблюдаемого поля могут быть объяснены действием динамо, для которого основное поле играет роль затравочного.

6. Спектр масс космических тел

Важным астрофизическим следствием эффекта ГИЭП является формирование дискретного спектра масс космических тел, связанного с возможностью существования Ne-плазмы в различных состояниях. В общем виде уравнение состояния вещества, подвергнутого действию высокого давления, принято представлять как политропу [1]

$$p = C \gamma^{1+\frac{1}{k}} \quad (27)$$

Здесь C – размерная константа;

k – индекс политропы.

Согласно [1] при возрастании давления вещество может последовательно находиться в состоянии нерелятивистской, релятивистской и ультрарелятивистской Ne-плазмы, а также нерелятивистского и релятивистского нейтронного ферми-газа.

6.1. Нерелятивистская Ne-плазма

Согласно [1] при приложении высокого давления вещество с атомной структурой переходит сначала в состояние нерелятивистской Ne-плазмы, которая характеризуется политропным индексом $k=3/2$. Ее уравнение состояния имеет вид

$$p_{(3/2)} = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 \gamma^{5/3}}{5m_e(\beta m_p)^{5/3}} \quad (28)$$

Здесь m_e – масса электрона;

βm_p – масса вещества, приходящегося на один электрон ферми-газа;

m_p – масса нуклона (протона).

Исходя из того, что давление внутри ядра космического тела создается эффектом ГИЭП и определяется равенством (25), из (28) для случая нерелятивистского ферми-газа электронов, соответствующего условиям, существующим внутри планет, получаем для массы ядра планеты

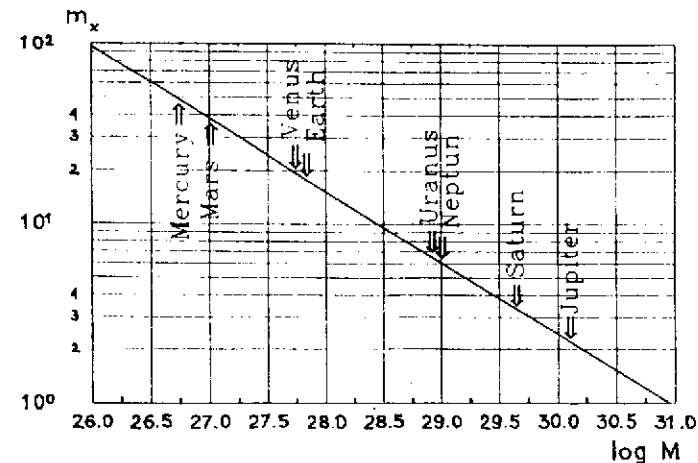


Рис.3.

Зависимость массы ядра планет от параметра β и значения масс планет Солнечной системы

$$M_{(3/2)} = \zeta_{(3/2)} \cdot \left(\frac{\hbar^2}{G \cdot m_e \cdot m_p} \right)^{3/2} \cdot \frac{\gamma^{1/2}}{m_p \beta^{5/2}} \quad (29)$$

Здесь константа $\zeta_{(3/2)} = \frac{54\pi}{5} \left(\frac{\pi}{10} \right)^{1/2} \approx 19$.

В равенстве (29) величина β должна соответствовать средней массе иона, приходящегося на один электрон ферми-газа. Поэтому самую большую массу, около $10^{31} z$, должна иметь планета, состоящая из чистого водорода. На рис. 3 показана зависимость (29) и приведены массы планет Солнечной системы. К указанному пределу близка масса Юпитера, равная $1,9 \cdot 10^{30} z$. Это значение согласуется с равенством (29) при $\beta \approx 2$, что подтверждается данными о дейтериево-гелиевом составе больших планет [17]. У небольших планет поверхностная мантия не мала по сравнению с их размерами, и это обстоятельство делает равенство (29) слишком завышенной оценкой. Так, для Земли, ядро которой имеет массу около $2 \cdot 10^{27} z$, при плотности ядра $10 z / \text{см}^3$, согласно (29) средняя масса иона получается примерно в два раза выше, чем дает более точный расчет [12]. Это является следствием того, что мы учли давление на ядро только электрических сил. Кроме них примерно такое же давление на ядро Земли оказывает вещество мантии. Учет этого давления уменьшает значение β и приводит к хорошему согласию с [12]. Для более массивных планет давление мантии можно не учитывать, но для более легких этот эффект будет играть еще большую роль.

6.2. Релятивистская Ne-плазма

Если давление на вещество увеличивается, то оно переходит в состояние релятивистской Ne-плазмы, политропный индекс которой равен 3. Уравнение состояния такой плазмы есть [1]

$$P_{(3)} = \frac{(3\pi^2)^{1/3} \hbar c \gamma^{4/3}}{4m_p^{4/3} \beta^{4/3}} \quad (30)$$

Равновесная масса звезды, состоящей из релятивистской Ne-плазмы, возникшей под действием эффекта ГИЭП, получается из (25) и (30) равной

$$M_{(3)} = \zeta_{(3)} A^{3/2} \frac{m_p}{\beta^2} \quad (31)$$

Здесь безразмерные константы

$$A = \left(\frac{\hbar c}{G m_p^2} \right) = 1,54 \cdot 10^{38} \quad (32)$$

$$\text{и } \zeta_{(3)} = (1,5^5 \cdot \pi)^{1/2} \approx 4,9.$$

При этом из-за электронейтральности вещества на один электрон ферми-газа в Ne-плазме должен приходиться один протон. Для вещества, состоящего из легких атомных ядер, характерно наличие одного нейтрона на протон, в тяжелых ядрах приходится примерно 1,8 нейтрона на один протон. Поэтому следует ожидать, что для релятивистской плазмы внутри релятивистских звезд должно быть характерно значение параметра $2 \leq \beta \leq 2,8$.

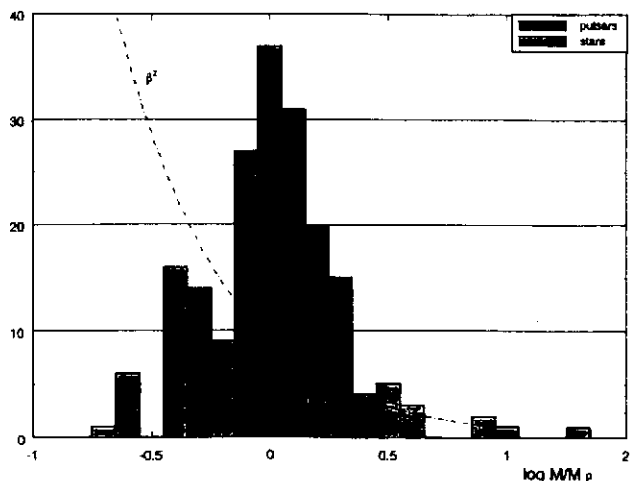


Рис.4. Распределения по массе звезд и пульсаров, входящих в двойные системы. Кривая - зависимость (26). По оси абсцисс - логарифм массы, отнесенной к массе Солнца

С достаточно высокой точностью массы звезд могут быть измерены, если звезды образуют двойную систему. Существует примерно 200 двойных звезд, массы которых, как считается, определены довольно точно [18]. Среди них имеются и гиганты, и белые карлики, и звезды главной последовательности. Распределение этих звезд по массе описывается равенством

$$\langle M_* \rangle = (1,36 \pm 0,05) M_{\odot} \quad (M_{\odot} - \text{масса Солнца}) \quad (33)$$

Центр этого распределения (рис.4) соответствует равенству (33) при $\beta \approx 2,6$.

6.3. Ультрарелятивистская Ne-плазма

Дальнейшее увеличение давления приводит к тому, что в плазме термодинамически выгодными становятся ядерные реакции захвата электронов ядрами (с испусканием нейтрино). Энергетическая выгода такого процесса обусловлена уменьшением энергии электронного газа за счет уменьшения числа электронов. Это приводит к тому, что в такой ультрарелятивистской плазме устанавливается равновесное давление, не зависящее от плотности частиц. Уравнение состояния такой плазмы, в которой происходит процесс нейтронизации вещества, формально характеризуется политропным индексом $k = -1$ и записывается в виде [1]

$$P_{(-1)} = \frac{\Delta^4}{12 \cdot \pi^2 \cdot (\hbar \cdot c)^3} \quad (34)$$

Здесь $\Delta \approx 10^6 \text{ эВ}$ - разница в энергии исходного и дочернего ядер, получившихся в результате захвата электрона.

В случае ультрарелятивистской плазмы из (25) и (34) получаем

$$M_{(-1)} = \zeta_{(-1)} \cdot \left(\frac{\Delta^4}{(\hbar c)^{9/2} \cdot G^{3/2} \cdot \gamma^2} \right) \quad (35)$$

$$\text{Здесь константа } \zeta_{(-1)} = \frac{1}{4\pi^3} \cdot \left(\frac{3}{2\pi} \right)^{1/2} \approx 6 \cdot 10^{-3}.$$

Согласно данным астрофизиков, нейтронизация вещества происходит при плотности вещества $\gamma \approx 10^7 \text{ г/см}^3$. При этом равенство (35) дает

$$M_{(-1)} \approx 8 \cdot 10^{32} \text{ г} \approx 0,4 M_{\odot} \quad (36)$$

Конечно, к этому значению необходимо относиться только как к грубой оценке по порядку величины, которая вполне согласуется с измерениями астрономов массы белых карликов, входящих в двойные звезды [18].

6.4. Нерелятивистское ядерное вещество

При еще более высоком давлении вещество переходит в состояние, которое можно рассматривать как нерелятивистское ядерное вещество, состоящее из нейтронов с примесью протонов и электронов [1]. Уравнение состояния такого вещества будет совпадать с равенством (29) при замене m_e на m_p :

$$P_{(3/2)}^{(n)} = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 \gamma^{5/3}}{5m_p^{4/3} \beta^{5/3}}. \quad (37)$$

При этом равновесная масса получается равной

$$M_{(3/2)}^{(n)} = \zeta_{(3/2)} \frac{\hbar^3}{G^{3/2}} \frac{\gamma^{1/2}}{m_p^4 \beta^{5/2}}. \quad (38)$$

При плотности $\gamma \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ г/см}^3$ и $\beta = 2,6$ эта масса примерно равна $0,05 M_{\odot}$.

Такие космические объекты астрономами не обнаружены.

6.5. Релятивистское ядерное вещество

При дальнейшем увеличении давления ядерное вещество становится релятивистским, уравнение состояния которого подобно уравнению состояния релятивистского электронного ферми-газа (31):

$$P_{(3)} = \frac{(3 \cdot \pi^2)^{1/3} \cdot \hbar \cdot c \cdot \gamma^{4/3}}{4 \cdot m_p^{4/3} \beta^{4/3}}. \quad (39)$$

Так же, как массы релятивистских звезд, массы релятивистских пульсаров не зависят от их плотности и могут быть прямо выражены через мировые константы:

$$M_{(3)}^{(n)} = \zeta_{(3)} \cdot A_o^{3/2} \cdot \frac{m_p}{\beta^2}. \quad (40)$$

Масса нейтронной звезды может быть измерена с достаточной точностью, если она входит в состав двойной системы. Астрономы обнаружили в двойных системах 16 радиопульсаров [19] и 7 рентгеновских пульсаров [16]. Их массы описываются очень узким распределением (рис. 4):

$$\langle M_{\text{пу}} \rangle = (1,38 \pm 0,03) M_{\odot}. \quad (41)$$

Центр этого распределения соответствует равенству (40) при $\beta \approx 2,6$, точно так же, как и для релятивистских звезд. Это позволяет рассматривать пульсары не просто состоящими из нейтронов с произвольной примесью протонов и электронов, а как Ne-плазму ядерной плотности, имеющую «стандартный» ядерный состав.

7. Заключение

Коротко упомянем еще о нескольких астрофизических явлениях, в возникновении которых роль ГИЭП требует дополнительного обдумывания.

7.1. ГИЭП и генерация сверхжесткого космического излучения

По-видимому, пульсары могут быть теми источниками, которые генерируют наблюдаемое сверхжесткое космическое излучение с энергией частиц $10^{18} \div 10^{20} \text{ эВ}$. Согласно равенству (23) у пульсара под поверхностью должно существовать электрическое поле с напряженностью порядка 10^{19} В/см . Это поле при сферической форме пульсара не будет выходить наружу и для внешнего наблюдателя будет не обнаружимо. Но вращение пульсара вызовет отклонение от сферичности, и электрическое поле определенной

конфигурации, пропорциональное степени этой несферичности, будет существовать снаружи и, как кажется, способно ускорить частицы до высоких энергий.

7.2. ГИЭП и коллапс звезд

Стабильные значения массы звезд и пульсаров, согласующиеся с данными наблюдений, получаются в результате рассмотрения равновесия ферми-газа электронов. Температура ионной компоненты не имеет при этом значения. Поэтому выгорание ядерного горючего внутри звезд не должно сказываться на сохранении устойчивости рассмотренных космических объектов. Существующие звезды, согласно проведенному рассмотрению, должны оставаться устойчивыми при любой и даже нулевой температуре. Поэтому процесс коллапса внутри уже существующих звезд, стабилизированных эффектом ГИЭП, по-видимому, осуществиться не может.

7.3. Переход вещества в состояние Ne-плазмы требует столь высокого давления, что наблюдать явление ГИЭП в лабораторных условиях не удастся. По-видимому, именно это обстоятельство явилось причиной того, что это явление не было изучено ранее. Но проявления эффекта ГИЭП в астрофизических условиях не оставляет сомнения в его существовании. Особенности внутреннего строения планет и звезд, их магнетизм и спектр масс демонстрируют ту значительную роль, которую этот эффект играет в формировании космических тел.

Литература

1. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Статистическая физика, М., "Наука", (1976).
2. L.I.Shiff, M.V.Barnhill, Phys.Rev. **151**, (1968), 1067-1071.
3. A.I.Dressler a.o., Phys.Rev. **168** (1968) 737-743.
4. T.J.Riegel, Phys. Rev.B, **2**, (1970) 825-828.
5. M.S.Leung, Nuovo Cimento, **76**, (1972) 825-929.
6. N.Kumar, R.Naddini, Phys. Rev. D, **7**, (1973) 1067-1071.
7. C.Leung a.o. Canad.Journ. of Phys, **49** (1971) 2754-2767.
8. Васильев Б.В., Любошиц В.Л. УФН, **164**, N 4, (1994), 367-374.
9. Киржниц Д.А. - ЖЭТФ, **38**, (1960) 503-508.
10. Feynman R.P.,Metropolis N.,Teller E. - The Physical Review, **75**, (1949) N10, 1561-1573.
11. B.V.Vasiliev, Nuovo Cimento B, **112**, (1997) 1361-1372.
12. B.V.Vasiliev, Nuovo Cimento B, **114**, (1999) N3,291.
13. Васильев Б.В. Природа, N6, (1996),стр.13-23.
14. S.-P.Sirag, Nature, **275**, (1979), 535-538.
15. Borra E.F., Landsstreet J.D., The Astrophysical Journ, Suppl., **42** (1980), 421-445.
16. V.S. Beskin, A.V. Gurevich, Ya.N. Istomin, Physics of the Pulsar Magnetosphere, (Cambridge University Press), 1993.
17. У.Хаббард, Внутреннее строение планет, М., «Мир», 1987.
18. W.D. Heintz, Double stars, (Geoph. and Astroph. monographs, vol.15, D.Reidel publ.comp, 1978).
19. S.E. Thorsett, D. Chakrabarty, E-preprint: astro-ph/9803260,(1998),35pp.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1999 года.