

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Б.П. КОНДРАТЬЕВ

1. Луна

2. Кентавры (Chariklo) и объекты пояса Койпера
(Pluto-Charon..., Haumea, кольца)

3. Существует ли Планета 9?

4. Некоторые вопросы глобальной динамики
Солнечной системы

ГАИШ 2020

**1. Смещение центра инерции Луны к востоку:
на пути к пониманию
её образования и эволюции**

Проблема происхождения Луны рассматривалась многими. Результаты были противоречивыми. Однако не представляет сомнения качественный вывод Дж. Дарвина приливное трение должно непрерывно замедлять вращение Земли и вместе с тем, увеличивая момент количества движения Луны, расширять ее орбиту. Следовательно, Земля в прошлом вращалась скорее, а Луна находилась к Земле ближе. *Постепенное удаление Луны от Земли (38 мм/год) подтверждается наблюдениями. Известно, что и в настоящее время продолжительность суток увеличивается. Далее, исследования структуры кораллов показали, что в раннем палеозое сутки составляли около 20 часов и число дней в году было больше.*

Для решения проблемы происхождения Луны нужно было бы рассчитать, на каком расстоянии от Земли находилась Луна в самом начале формирования солнечной системы. (4,5 млрд лет назад). **Однако сделать достаточно уверенный расчет приливной эволюции системы Земля — Луна в настоящее время еще невозможно.** Нельзя сказать, как происходило постепенное накопление океанских бассейнов и как изменялось приливное трение.

**идея всеобщей эволюции - одна из центральных идей
в современном естествознании и астрономии**

Все в мире развивается и эволюционирует.

Мы живем в эволюционирующей расширяющейся Вселенной.

Её возраст 13-15 миллиардов лет.

Рождаются и умирают планеты, звезды. Фундаментальный вопрос:
как образовалась наша планета и наш естественный спутник Луна?

Луна — относительно большой спутник с диаметром, равным четверти земного. Это самый большой, по отношению к размерам своей планеты, спутник Солнечной системы.

Гравитационное притяжение между Землёй и Луной является причиной земных приливов и отливов. Аналогичный эффект на Луне проявляется в том, что она постоянно обращена к Земле одной и той же стороной (период оборота Луны вокруг своей оси равен периоду её оборота вокруг Земли. Лагранж - приливная синхронизация).

Гармония движений Луны в наше время

Законы Кассини оптической либрации Луны 1693 г.

1. Луна равномерно вращается вокруг оси, причем период ее вращения совпадает с периодом обращения по орбите вокруг Земли.
2. Плоскость экватора Луны сохраняет постоянный (сейчас сказали бы, почти постоянный) наклон к эклиптике.
3. Восходящий узел *экватора Луны на эклиптике* всегда совпадает с нисходящим узлом *орбиты Луны на эклиптике*.

Фундаментальный вопрос:

как образовалась наша планета и наш естественный спутник Луна?

Происхождение Луны: есть несколько гипотез

Дарвин, Шмидт, Юри, Рускол, Галеев

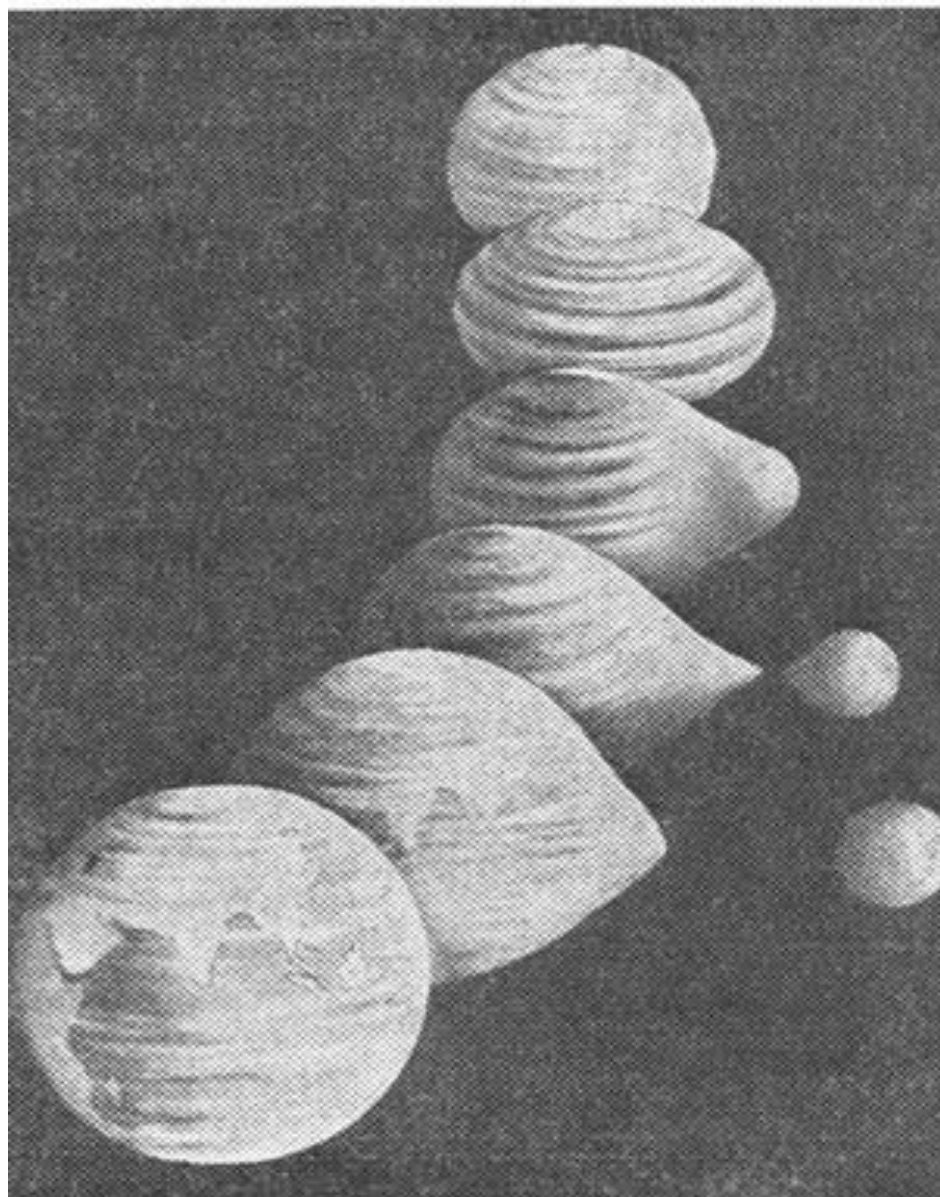
Захват, отделение;

импакт-гипотеза:

Луна образовалась в результате столкновения протопланеты Тейи (размером примерно с Марс) с прото-Землей. Это объясняет причины сходства и различия состава земного и лунного грунта



Дарвин



Самый драматический вариант



Естественно поставить вопрос:

нельзя ли по современному состоянию системы Земля-Луна определить её состояние *ab initio*. Проблема приливной эволюции трудна и механизмы до конца не разработаны:

Кант-Лаплас-Пуанкаре-Д. Дарвин-Джинс

Каула-Макдональд-Голдрайх - Real

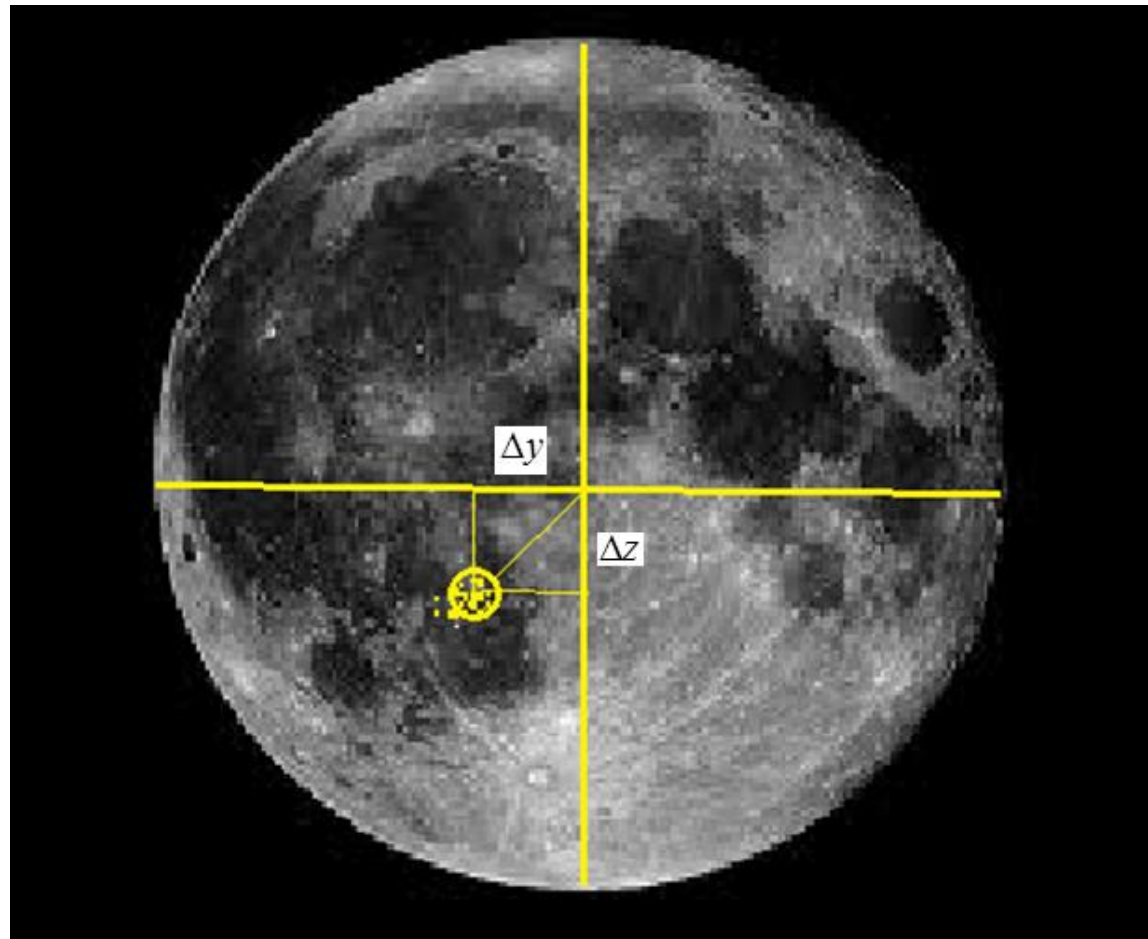
- До сих пор мы не можем указать безошибочно, где и как на Земле расходуется приливная энергия от Луны;

- Теория возмущений в небесной механике разработана только до второго приближения ;

- компьютерные расчеты эволюции Солнечной системы «на миллионы лет» имеют ряд недостатков.

Маленькая зацепка: смещение центра масс Луны
к Востоку от центра её фигуры

Как объяснить?



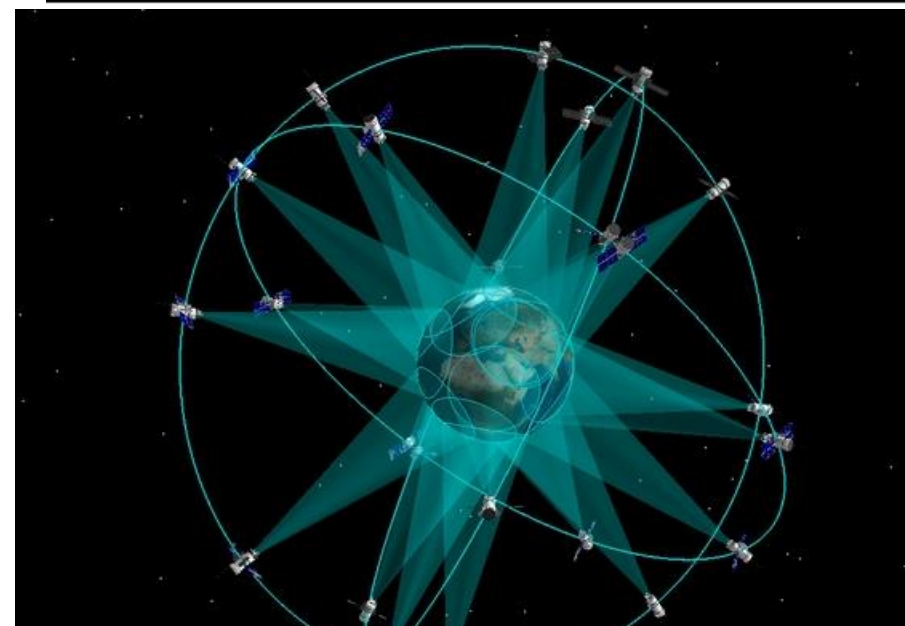
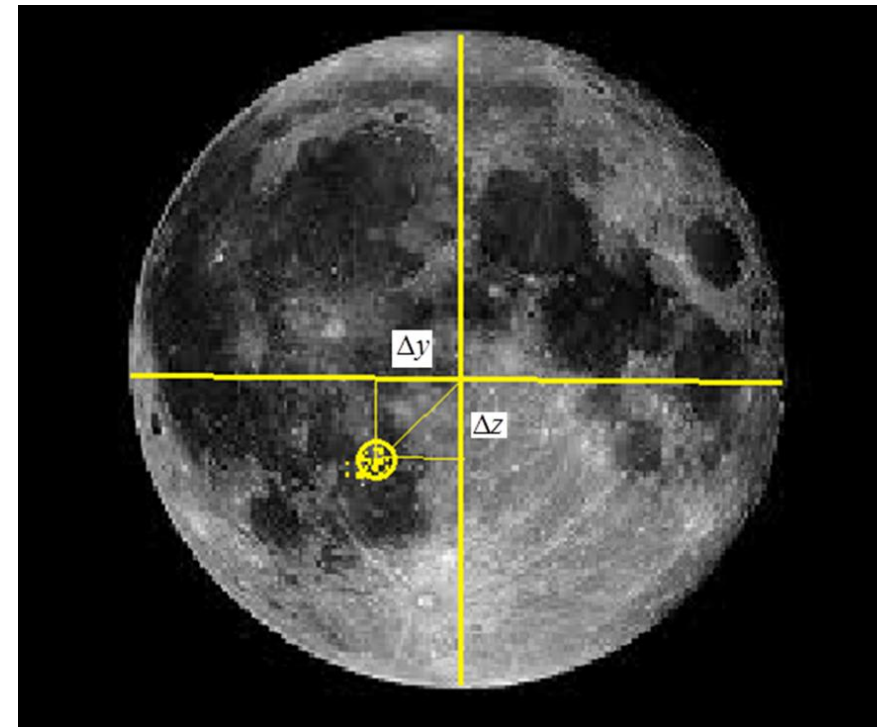
Система координат $Oxyz$ с началом в центре масс Луны, ось Ox направлена к Земле, ось Oy влево (если смотреть с Земли), Oz – вниз. По данным ULCN (The United Lunar Control Network), учитываются выводы многих исследований, в том числе и информация с космических аппаратов, смещение центра фигуры относительно центра масс (COM/COF) составило

$$\Delta x \approx -1.71 \text{ км}, \Delta y \approx -0.73 \text{ км}, \Delta z \approx -0.26 \text{ км}.$$

По результатам изучения топографии поверхности Луны с помощью лазерной альтиметрии со спутника смещение COM/COF было определено более точно

$$\Delta x \approx -1.7752 \text{ км}, \Delta y \approx -0.7311 \text{ км}, \Delta z \approx -0.2399 \text{ км}.$$

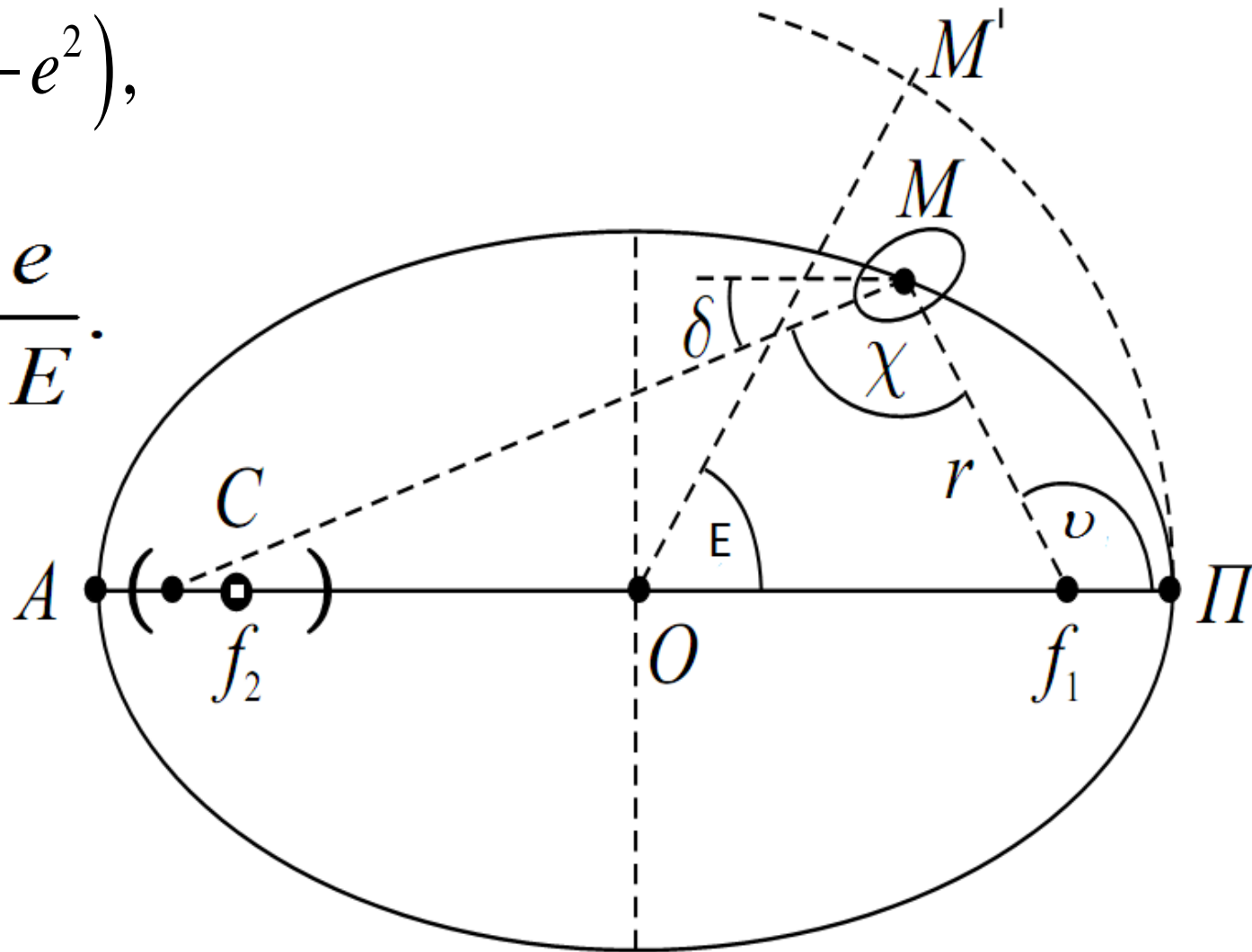
Полное смещение ЦМ $|\Delta| \approx 1.935 \text{ км}$.



**Часть 2. ОТКЛОНЕНИЕ ЦЕНТРА МАСС ЛУНЫ К ВОСТОКУ ОТ
НАПРАВЛЕНИЯ НА ЗЕМЛЮ. МЕХАНИЗМ, ОСНОВАННЫЙ НА
ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТЫ**

$$r = \frac{p}{1 + e \cos v}, \quad p = a(1 - e^2),$$

$$\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}.$$



Из треугольника f_1MC

$$\frac{d_C f_1}{\sin \chi} = \frac{r}{\sin(\nu - \chi)}, \quad \delta + \chi = \nu,$$

определим $\text{ctg} \theta$ как функцию от угла E (или ν):

$$\text{ctg} \delta = \frac{1 + \frac{\sqrt{1-e^2} \sin \nu}{e + \cos \nu} \cdot \text{tg} \left[\frac{e\sqrt{1-e^2} \sin \nu}{1 + e \cos \nu} \right]}{\frac{\sqrt{1-e^2} \sin \nu}{e + \cos \nu} - \text{tg} \left[\frac{e\sqrt{1-e^2} \sin \nu}{1 + e \cos \nu} \right]}.$$

Искомое расстояние от точки второго фокуса, на котором продолжение большой оси инерции Луны пересекает линию апсид, отлично, вообще говоря, от нуля и равно

$$\frac{\Delta}{a_1} = e + \cos E - \operatorname{ctg} \delta \sqrt{1 - e^2} \sin E.$$

Разложение в ряд по степеням малого эксцентриситета даёт

$$\frac{\Delta}{a_1} = -\frac{\cos \nu}{2} e^2 - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\cos^2 \nu}{2} \right) e^3 - \frac{\cos \nu}{8} (7 - 4 \cos^2 \nu) e^4 + O(e^5);$$

$$\frac{\Delta}{a_1} = -\frac{\cos E}{2} e^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} - 2 \cos^2 E \right) e^3 - \frac{\cos E}{24} (1 + 8 \cos^2 E) e^4 + O(e^5).$$

Подчеркнем, что согласно формулам, эффект искомого отклонения $\frac{\Delta}{a_1}$ уже в первом приближении пропорционален квадрату эксцентриситета орбиты Луны ($e=0.0549$).

Таким образом, при обращении Луны по эллипсу вокруг Земли конец большой оси инерции нашего спутника лишь примерно (в среднем по периоду) будет направлен в точку второго фокуса. Строго говоря, этот конец оси будет совершать (без учёта весьма малой физической либрации Луны в долготе) колебательные движения в окрестности этой точки в интервале

$$-1.5933 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\Delta}{a_1} \leq 1.4275 \cdot 10^{-3}.$$

В данную эпоху в линейной мере это составляет примерно

$$-612 \text{ км} \leq \Delta \leq 548 \text{ км}.$$

Результаты расчетов указывают на асимметрию амплитуд колебаний (составляющую примерно 11%) относительно правой и левой стороны точки фокуса f_2 . Подчеркнем, что физическая либрация Луны по долготе в силу своей малости с большим запасом укладывается в найденный интервал.

Таким образом, при небольшом эксцентриситете эллиптической орбиты главная ось инерции спутника в среднем будет направлена к свободному фокусу орбиты. Это следует учитывать при объяснении эффекта смещения центра масс Луны к Востоку.

Начиная с Д. Дарвина, делались многочисленные попытки изучения вековой эволюция орбиты Луны, но до сих пор надежно не установлено, была ли орбита нашего спутника в раннюю эпоху сжата более (или, наоборот, менее) сильно, чем сейчас. **Изучение эффекта смещения центра масс Луны к Востоку может пролить свет на данную проблему.**

Исследователи согласны с тем, что именно в раннюю эпоху произошла гравитационная дифференциация Луны, в результате которой образовалось её небольшое плотное ядро и произошло известное ныне небольшое $\left(0.001 \cdot R_{\text{Ц}}\right)$ смещение центра масс Луны по направлению к Земле. Одной из причин смещения ЦМ Луны к Земле м.б. некоторая **асимметрия приливных сил от Земли.**

Резюмируем. В эпоху гравитационной дифференциации образовалось ядро Луны и под действием асимметричных приливных сил со стороны Земли центр масс Луны сместился **вначале по направлению к Земле.** Это смещение ЦМ Луны для наземного наблюдателя дано углом ориентации $f_1 O' f_2$ между линией ЦМ / ЦФ и направлением на центр Земли (Рис. 3b).

Итак, асимметрия приливных сил от воздействия Земли на ближнее и дальнее полушария Луны. Приняв, что дифференциация Луны и образование её ядра произошли на космогонических временах достаточно быстро, надо потребовать, что и смещение центра масс по направлению к Земле произошло ещё до затвердения вещества Луны.

После захвата Луны в резонанс 1:1 стало возможным говорить о её ближнем и отдаленном для земного наблюдателя полушариях. Разложением в ряд находим силы на ближнюю и дальнюю точку

$$F_1 \approx \frac{2GM_{\oplus}}{R_0^2} x \left(1 + \frac{3}{2} x \right), F_2 \approx \frac{2GM_{\oplus}}{R_0^2} x \left(1 - \frac{3}{2} x \right),$$

где $x = \frac{R}{R_0}$, R_0 — расстояние между центрами Земли и Луны, R — расстояние от центра

Луны до ближней (дальней) точек её поверхности. Разность этих сил равна

$$\Delta F = F_1 - F_2 \approx \frac{6GM_{\oplus}}{R_0^2} x^2.$$

Так как в раннюю эпоху Луна находилась намного ближе к Земле, чем сегодня, то и относительное расстояние $x = \frac{R}{R_0}$ тогда было значительно больше. Из-за близости к Земле, много больше была и указанная разница приливных сил на лунных полушариях.

Это делает асимметричным процесс дифференциации вещества Луны. С физ. т. з. ясно: действие небольшого избытка приливной силы на точки ближнего полушария будет чуть замедлять опускание плотного вещества к центру. И наоборот, на противоположном полушарии Луны небольшой недостаток в приливной силе приведет к некоторому ускорению процесса опускания элементов плотного вещества. **Поэтому в ходе дифференциации в-ва под влиянием указанной асимметрии приливных сил ЦМ Луны немного сместится по направлению к Земле.**

Но это физическая сторона процесса, а *решение вопроса об отклонении ЦМ Луны на Восток оказывается тесно связанным с дальнейшей вековой эволюцией орбиты спутника.* Рассмотрим два возможных варианта эволюции орбиты.

Первая вариант: вековая эволюция орбиты Луны с увеличением эксцентриситета. Напомним теперь, что смещенный к Земле центр масс Луны s после отвердения тела Луны будет зафиксирован относительно её главных осей инерции, и в последствии уже не должен заметно смещаться относительно принятой системы отсчета в ходе приливной эволюции орбиты Луны.

Так орбита Луны в ходе вековой эволюции становится более сжатой, то появляются два фокуса. В соответствии с законами небесной механики, при движении по эллипсу линия, проходящая через центр фигуры Луны и центр её масс, будет направлена примерно на второй фокус орбиты. Поэтому в нашу эпоху, когда эксцентриситет лунной орбиты возрос до значения $e = 0.0549$, будет наблюдаться картина, показанная на рис. 3б.

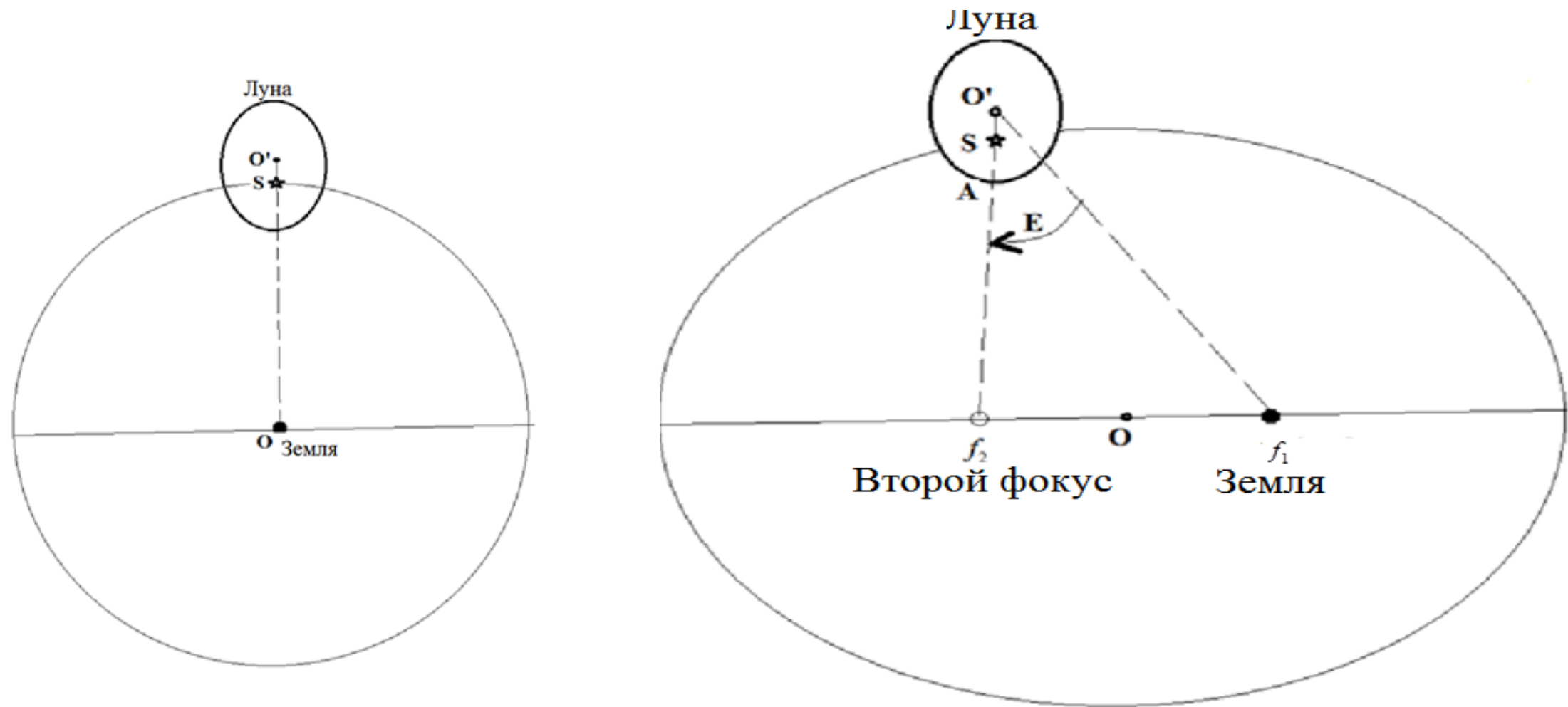


Рис.3в. Ориентация ЦМ S Луны в нашу эпоху в первом варианте эволюции орбиты Луны. Большой эллипс - орбита Луны, малый - поперечное сечение Луны. Угол E определяет ориентацию центра масс Луны S относительно направления на центр Земли

Из Рис. 3б видно, что для наблюдателя с Земли (из точки f_1) центр масс Луны s будет расположен слева (к Востоку) от направления на центр Луны. Таким образом, при эволюции орбиты Луны от менее сжатой к более сжатой, современный земной наблюдатель в итоге увидит центр масс Луны сдвинутым на Восток относительно направления на центр её фигуры o' . Именно такое расположение центра масс Луны относительно центра её фигуры мы и наблюдаем в нашу эпоху.

Разрешение альтернативы выбора в вопросе эволюции орбиты. Сравнивая оба указанных выше варианта эволюции орбиты Луны, мы приходим к важному выводу: оказывается, наблюдаемое ныне небольшое смещение центра масс Луны к Востоку относительно центра её фигуры можно объяснить только в первом варианте эволюции орбиты, когда в раннюю эпоху орбита Луны была более круглой чем в наше время. Из этого следует, что эксцентриситет орбиты Луны в течение всего времени эволюции мог изменяться только в узком интервале $0 < e \leq 0.0549$.

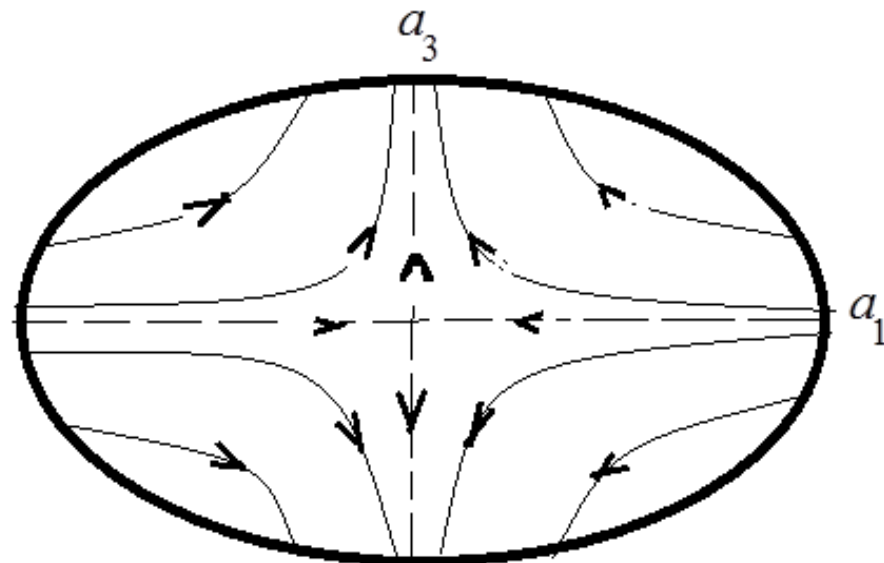
Сделанный вывод о том, что из двух вариантов эволюции лунной орбиты годится только сценарий с увеличением ее эксцентриситета, подтверждается тем, что в настоящее время эксцентриситет орбиты Луны действительно увеличивается, и поэтому в прошлом он был меньше современного ([22], [23], см. также [24], [25], [26].

Разработан второй механизм, где обращается внимание на то, что смещение центра масс Луны к Востоку зависит также от эволюции формы Луны. Получено и решено дифференциальное уравнение, описывающее процесс смещения ЦМ Луны к Востоку в ходе физически неизбежного округления её формы при удалении от Земли. Этот механизм не только объясняет эффект сдвига центра масс Луны к Востоку, но и предсказывает, что сжатие Луны в раннюю эпоху могло быть значительным и достигать значения $\varepsilon \approx 0.31$. Применяя теорию фигур равновесия в приливном поле найдено, насколько близко к Земле могла образоваться Луна.

$$u_1 = \frac{\dot{a}_1}{a_1} x_1 - \Omega x_2,$$

$$u_2 = \frac{\dot{a}_2}{a_2} x_1 + \Omega x_1,$$

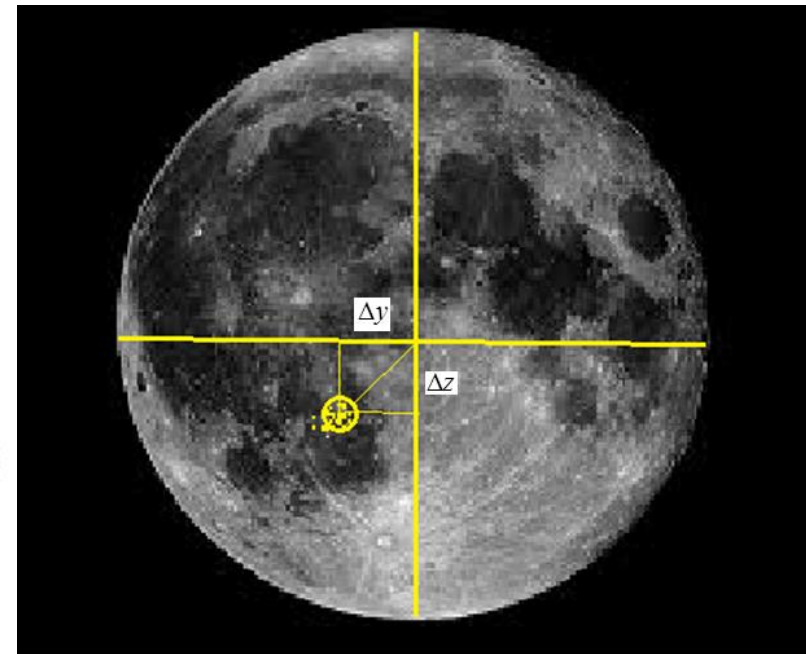
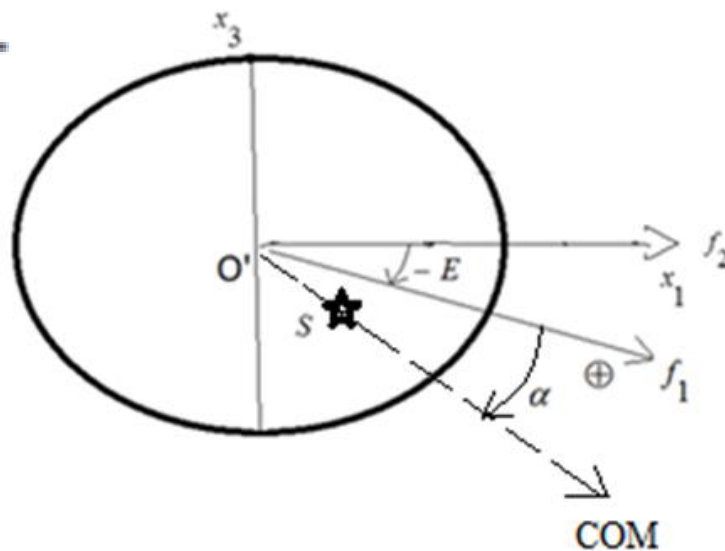
$$u_3 = \frac{\dot{a}_3}{a_3} x_3.$$



$$\frac{d\alpha}{d\varepsilon} = -\frac{\sin \alpha \cos(2E - \alpha)}{1 - \varepsilon}.$$

$$\varepsilon(\alpha, E) = 1 - C \cdot \exp \left\{ \left[-\frac{\sin \alpha}{\cos(2E + \alpha)} \right] \frac{1}{\cos 2E} \right\}.$$

$$C \approx 0.69.$$



сжатие Луны в раннюю эпоху могло
быть значительным и достигать
значения

$$\varepsilon \approx 0.31$$

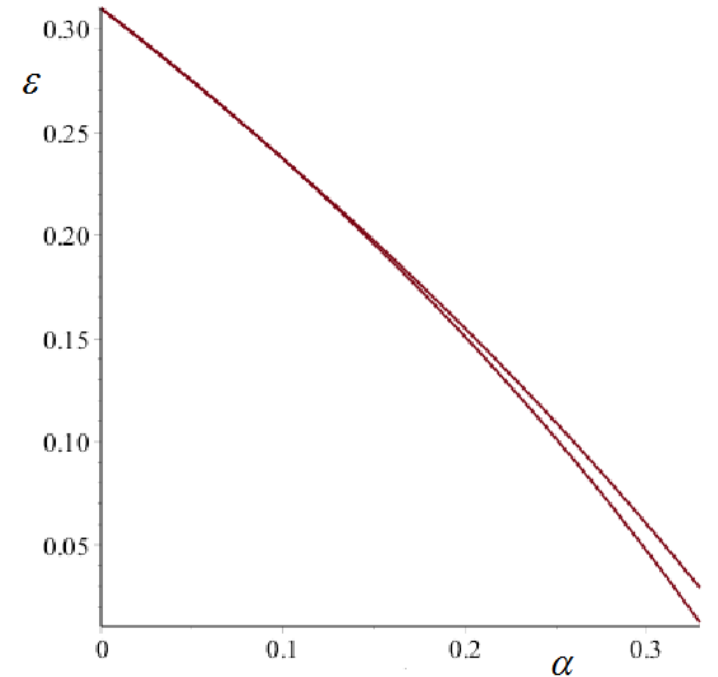
сжатие Луны в раннюю эпоху могло
быть значительным и достигать
значения

$$a_1 \approx 1.4a_3$$

Луна могла образоваться вследствие
гигантского импакта не прямо из
обломков вещества, а в «бублике» из
раскаленного газа, который возник
после столкновения и испарения
обломков.

$$x = \frac{R_0}{R_e}; \quad \kappa = \frac{2 \rho_e}{3 \rho_c} \approx 1.09875,$$

$$x \approx 3.23$$



Выводы

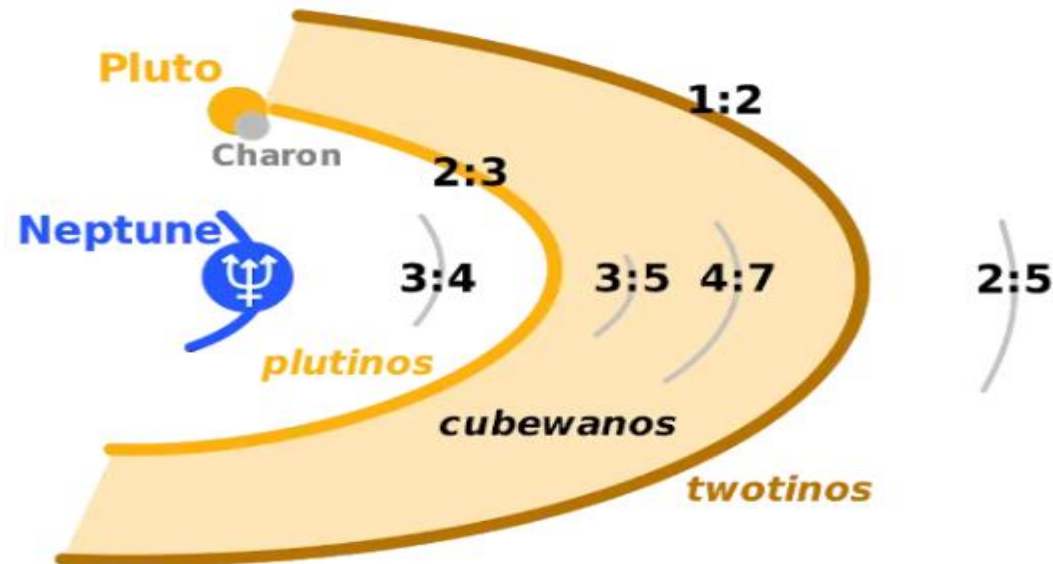
В работе установлено, что из двух альтернативных вариантов эволюции орбиты Луны, с наблюдаемым отклонением ЦМ Луны к Востоку согласуется только тот, который связан с увеличением эксцентриситета орбиты нашего естественного спутника. Современные численные методы в небесной механике подтверждают, что эксцентриситет лунной орбиты в настоящее время возрастает и, следовательно, в прошлом он был меньше современного значения $e = 0.0549$.

Изучение проблемы о смещении центра масс Луны может пролить свет на нерешенные вопросы космогонии и должно быть продолжено. Оказывается, ценную информацию об эволюции орбиты Луны можно получить из такого, казалось бы малоизвестного факта, как небольшое смещение центра масс Луны именно к Востоку, а не к Западу.

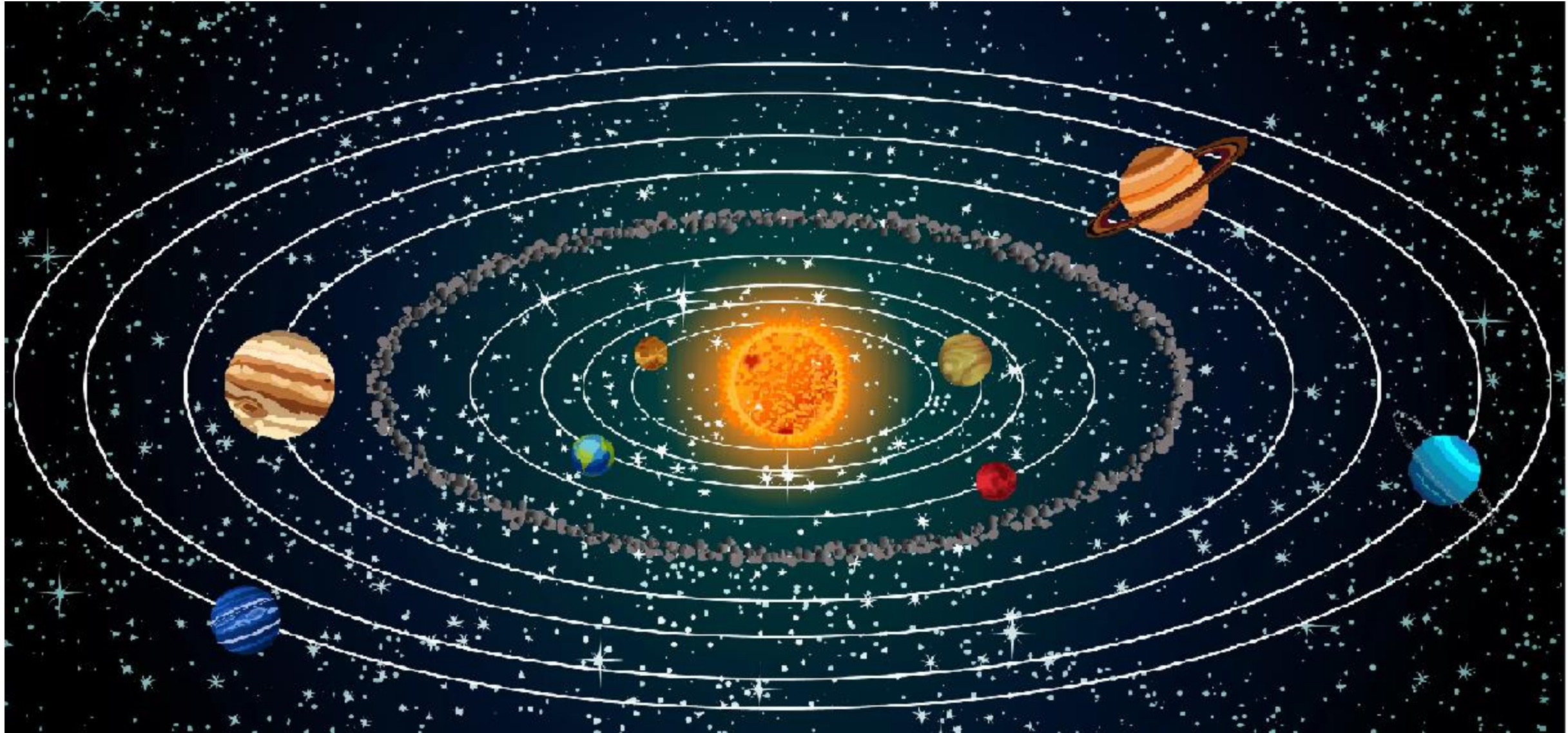
2. Кентавры (Chariklo) и объекты пояса Койпера (Pluto-Charon..., Хаумеа, кольца)

«Медвежий угол» в Солнечной системе
– пояс Койпера

Kuiper belt and orbital resonance



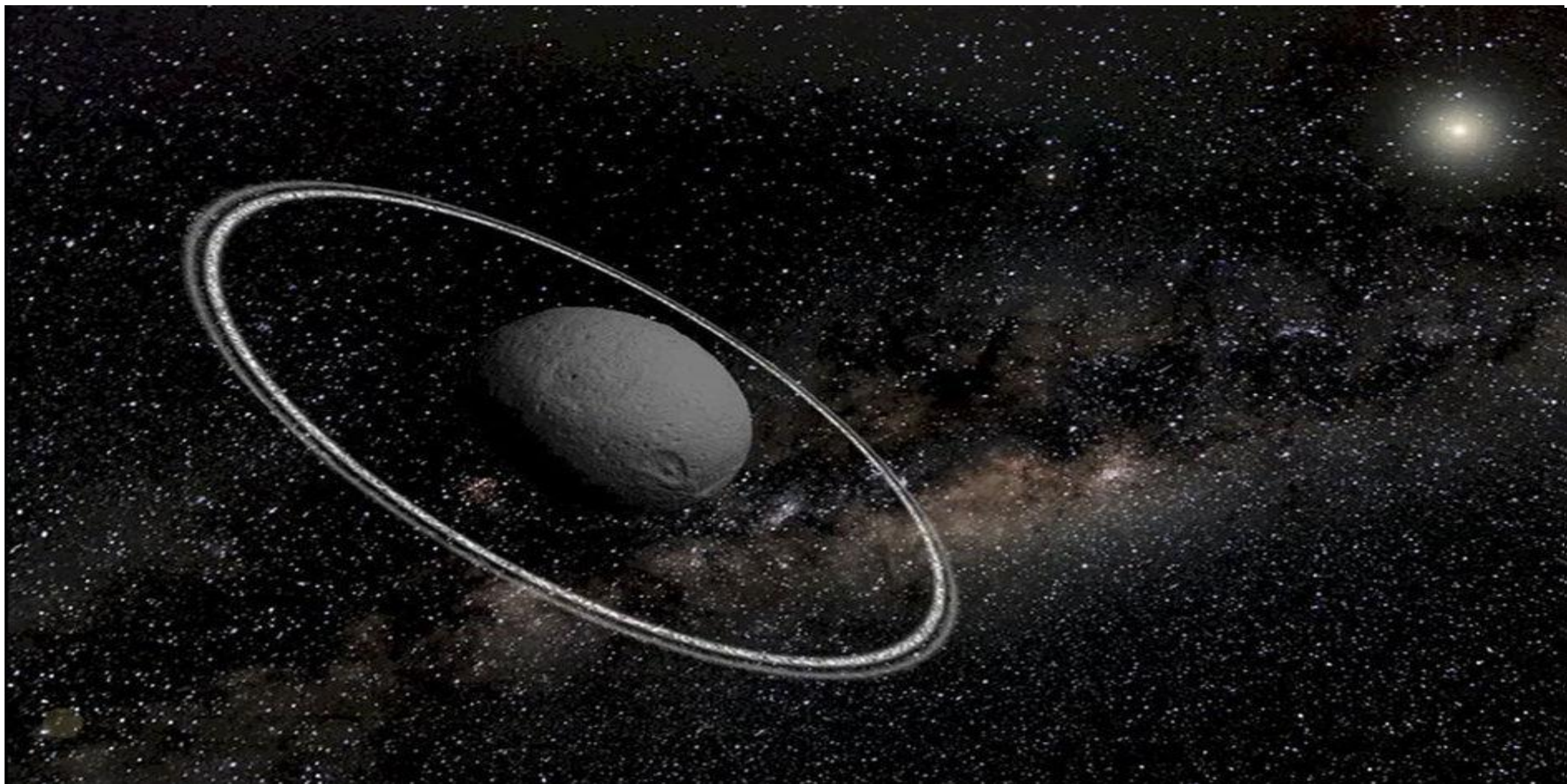
В центре нашей системы находится Солнце, но никто пока не знает ту загадочную границу, которая отделяет нас от других звездных систем.



Asteroid Chariklo (10199) was discovered in 1997 and is largest of centaurs. Chariklo revolves around the Sun with the period 62.446 y. and has the orbital resonance 4:3 with Uranus. Its orbit with the semi-major axis $a \approx 15.8329$ AU is located between orbits of Saturn and Uranus. From observations follows (Bérard et al. 2015), that the asteroid's shape is an oblate spheroid with the semi-axes

$$a_1 \approx 133 \text{ km}, \quad a_3 \approx 119 \text{ km}, \quad R_0 \approx 128.16 \text{ km}$$

The flattening and eccentricity of this figure are quite considerable $\varepsilon = 1 - \frac{a_3}{a_1} \approx 0.10526$, $e \approx 0.44660$. |



scales are approximately respected

We model the asteroid by the rotating Maclaurin spheroid with the internal gravitational potential

$$\varphi(r, x_3) = \pi G \rho \left(I - A_1 r^2 - A_3 x_3^2 \right), \quad A_1 \approx 0.636571, \quad A_3 \approx 0.726858.$$

From observations (Warner et al. 2014; Duffard et al. 2014; Fornasier et al. 2014), it follows that asteroid Chariklo has an uniform axial rotation with the period

$$T_0 \approx 7.004 \pm 0.036 \text{ h.}$$

The basic characteristic of this equilibrium figure is a square of angular velocity

$$\frac{\Omega_0^2}{2\pi G \rho_0} = A_1 - (1 - e^2) A_3 \approx 0.0546819.$$

The density and mass of a body

$$\rho_0 = \frac{\Omega^2}{2\pi G} \approx 2.709 \text{ g/cm}^3. \quad M_0 \approx 8.817 \cdot 10^{21} \text{ g.}$$

The angular velocity of its spin rotation is equal to

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \approx 2.491904 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}.$$

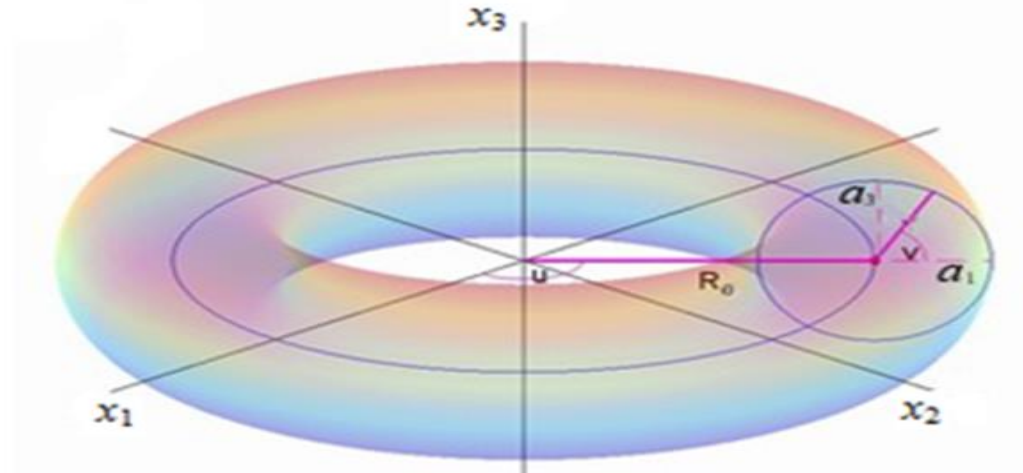
The density is quite real value for a class of stone asteroids. *Thus, the theory of equilibrium figures allows to determine the density and mass of the asteroid (Chariklo).*

MODELLING AND DYNAMICS OF THE CHARIKLO'S RINGS

As already mentioned, the asteroid Chariklo has two outer rings (Braga-Ribas et al. 2014). This ring's system consists of the first dense inner ring and second outer ring (Bérard et al. 2015) and has the following features (Margot et al. 2015; Sicardy et al. 2015):

$$R_{r1} \approx 390.6 \pm 3 \text{ km}, \quad \Delta_1 \approx 6.5 \text{ km};$$
$$R_{r2} \approx 404.8 \pm 3.3 \text{ km}, \quad \Delta_2 \approx 2 \text{ km}.$$

Between the rings there is a gap of 9 km. However, while the geometric parameters of Chariklo's rings are known, their masses remain uncertain. There is a little information on this subject.



Torus as equilibrium model of the ring

Let M_0 is the mass of a central asteroid, R_{ri} and M_{ri} are the average radius and mass of i -th ring ($i=1,2$).

Then, the volume density in the ring is equal

$$\rho_r = \frac{M_r}{2\pi^2 R_r r_0^2}$$

|

Since the peculiar vertical velocity of particles may not be significantly less than the horizontal velocity, the velocity dispersion can be estimated from the virial theorem

$$M_r v^2 + W_r = 0$$

(M_r is the total mass of a ring, and W_r is its gravitational energy). For a homogeneous body, the gravitational energy is $W_r = -\frac{\rho_r}{2} \iiint_V \varphi_r dV$. Introducing v.a. potential φ_m

$$\varphi_m = \frac{1}{V} \iiint_V \varphi_r dV,$$

v.a. we find the velocity dispersion $v^2 = \frac{\varphi_m}{2}$. Now we have to find the v.a. pot. φ_m and gravitational energy of a ring.

$$\varphi_{torus}(r', x_3) = \varphi_0 + \varphi_2 q^2 + \varphi_4 q^4 + \varphi_6 q^6 + \dots$$

It is important to notice, that in the series vanish all coefficients at odd degrees φ_{2n+1} . At small values $q \ll 1$, contribution of the members in the torus potential very rapidly decreases. Therefore, for the Chariklo's rings enough to write only two coefficients of the series:

$$\varphi_0 = \frac{2GM_r}{\pi b} K(k),$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi G \rho_r R_r^3}{16b\tilde{b}^2} \left\{ \left[r^2 - R_r^2 + x_3^2 \right] E(k) - \tilde{b}^2 K(k) \right\},$$

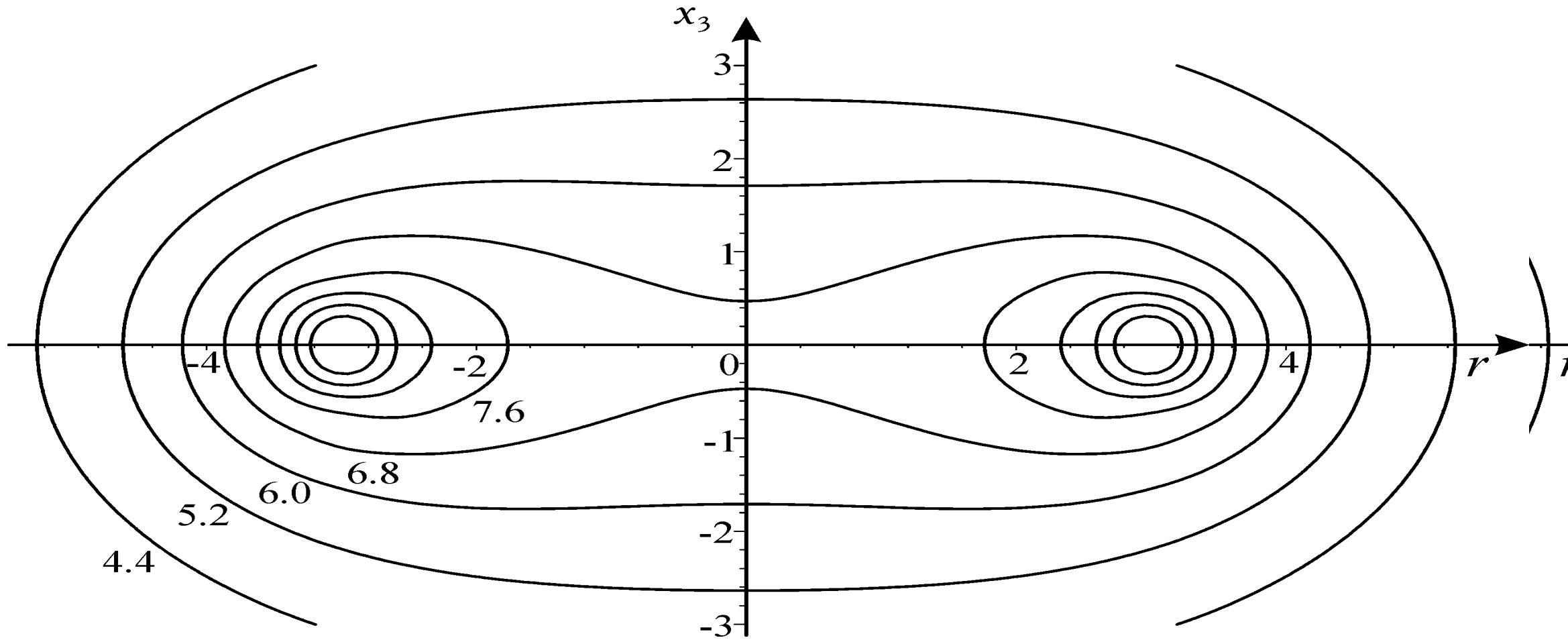
$$\varphi_{torus}(r', x_3) = \varphi_0 + \varphi_2 q^2 + \varphi_4 q^4 + \varphi_6 q^6 + \dots$$

It is important to notice, that in the series vanish all coefficients at odd degrees φ_{2n+1} . At small values $q \ll 1$, contribution of the members in the torus potential very rapidly decreases. Therefore, for the Chariklo's rings enough to write only two coefficients of the series:

$$\varphi_0 = \frac{2GM_r}{\pi b} K(k),$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi G \rho_r R_r^3}{16b\tilde{b}^2} \left\{ \left[r^2 - R_r^2 + x_3^2 \right] E(k) - \tilde{b}^2 K(k) \right\},$$

The lines of equal gravitational potential of the torus
This is a separatrix



The mass and density of rings

Now we apply the results in order to find the mass of each Chariklo's ring. Equating the expression for square of the velocity by the Toomre criterion and by the virial theorem, after some transformations we find the volume density and mass of a ring:

$$\rho_r = \frac{1.41}{8\pi} \cdot \tilde{\varphi}_m \cdot \frac{M_0}{R_r^3} \quad M_r = \frac{1.41\pi}{4} \frac{r_0^2}{R_r^2} \cdot \tilde{\varphi}_m \cdot M_0$$

It is significant that in the formulas the desired density ρ_r and mass M_r of the ring is expressed in terms of known mass of the central body M_0 .

Thus, by the formula we obtain the density of rings:

$$\rho_{r1} \approx 0.120 \text{ g/cm}^3; \rho_{r2} \approx 0.126 \text{ g/cm}^3.$$

This density is very small; however, this is not evidenced of the low-density of particles ρ_p , but only about the low concentration n of particles in the rings.

As a result, we find the mass of the first ring

$$M_{r1} \approx 9.77 \cdot 10^{18} \text{ g}, \quad \frac{M_{r1}}{M_0} \approx 0.001.$$

(which relative to the mass of central asteroid is equal to)

Similarly, we find the mass of the second ring

$$M_{r2} \approx 10^{18} \text{ g}, \quad \frac{M_{r2}}{M_0} \approx 10^{-4}. \quad |$$

The time of energy dissipation

Consequently, the rate of energy dissipation is equal to

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle \approx -\frac{E}{T'} = -\frac{8\pi r_p \rho_p}{3r^2} \frac{\rho_p}{\rho_r} M_r v^3,$$

and dissipation time T_d we get from the relationship

$$-T_d \left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = M_r R_r^2 \Omega^2 = \frac{GM_0 M_r}{R_r}, \quad \text{whence}$$

$$| \quad T_d \approx \frac{3}{8\pi} \frac{GM_0 \rho_r r^2}{R_r v^3 \rho_p r_p}, \quad v^3 = \left(\frac{GM_r \tilde{\varphi}_m}{4\pi R_r} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

According to these formulas, and taking into account the additional parameters, we find for the first (inner) and second (external) ring

$$T_{d1} \approx T_{d2} \approx 10^4 - 10^5 \text{ years}, \quad \left(\frac{T_{d1}}{T_{rot1}} \approx \frac{T_{d2}}{T_{rot2}} \approx 2 \cdot 10^4 \right).$$

Thus, the dissipation time of the first and second ring is about identical.

EVOLUTION OF THE RINGS

Analysis shows that the ring of ice-stone particles, over time, will inevitably evolve due to dissipation of energy and mass change. For asteroid Chariklo can foresee two options: either these rings eventually dissipate, or alternatively, they turn into satellites of the asteroid.

First, we need to compare rings and moons

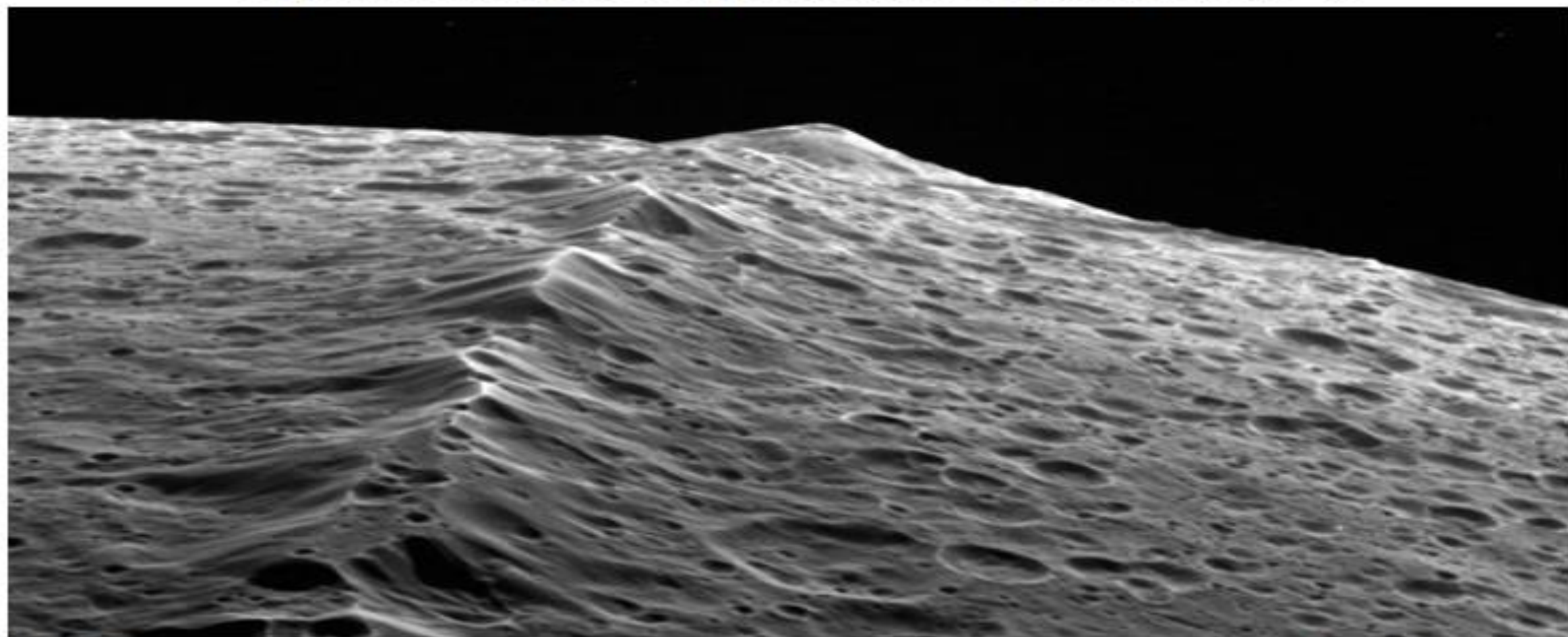
Comparison of rings with satellites of asteroids

In Solar system there are many asteroids with satellites, but only the asteroid Chariklo has two outer rings. The Chariklo's rings are within the Hill sphere, and are spaced from the center of asteroid about 3.1 of its mean radius. Thus, these rings are beyond the critical Roche radius $R_R \approx 1.5 \div 2.2 R_0$. This important circumstance distinguishes the Chariklo's rings from the usual planetary rings (for example, from Saturn's rings), and raises the important question on a direction of their evolution. |

RESULTS

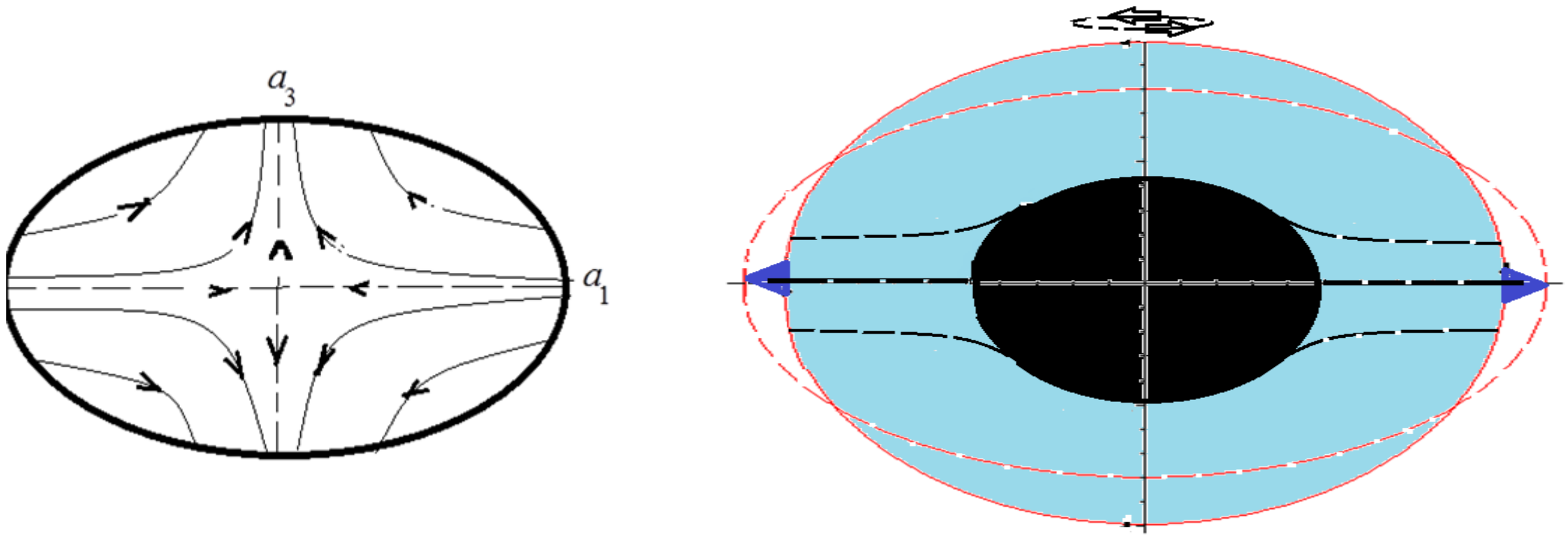
Previously it was thought that the rings could be stable only around more massive bodies than asteroids. Then, it is natural began to look for the satellites-shepherds near the asteroid Chariklo. However, searches of small satellites at Chariklo have given nothing yet (Sicardy et al. 2015). This is important, because without satellites-shepherds the asteroid's rings must inevitably evolve. |

ЯШЕТ Образование экваториального горного кольца



Хребет покрыт кратерами – древнее происхождение. В ТП имеет среднюю высоту $h \approx 13$ км и ширину 20 км. Его дуга (> 1600 км) составляет более 70% половины длины экватора П. В ХСП хребет прерывается; там есть только отдельные высокие ледяные горы.





Схема, изображающая начальную (красный эллипс штрихами) и современную (красный круг) форму Япета. Голубым цветом показана ледяная оболочка, черным – каменное ядро спутника. Черным штрихами в ледяной оболочке показана деформация некоторых ледяных столбов, происходившая при релаксации оболочки спутника

ПОЯС КОЙПЕРА (ТНО)

Хаумеа

В поперечнике составляет примерно 2350 км

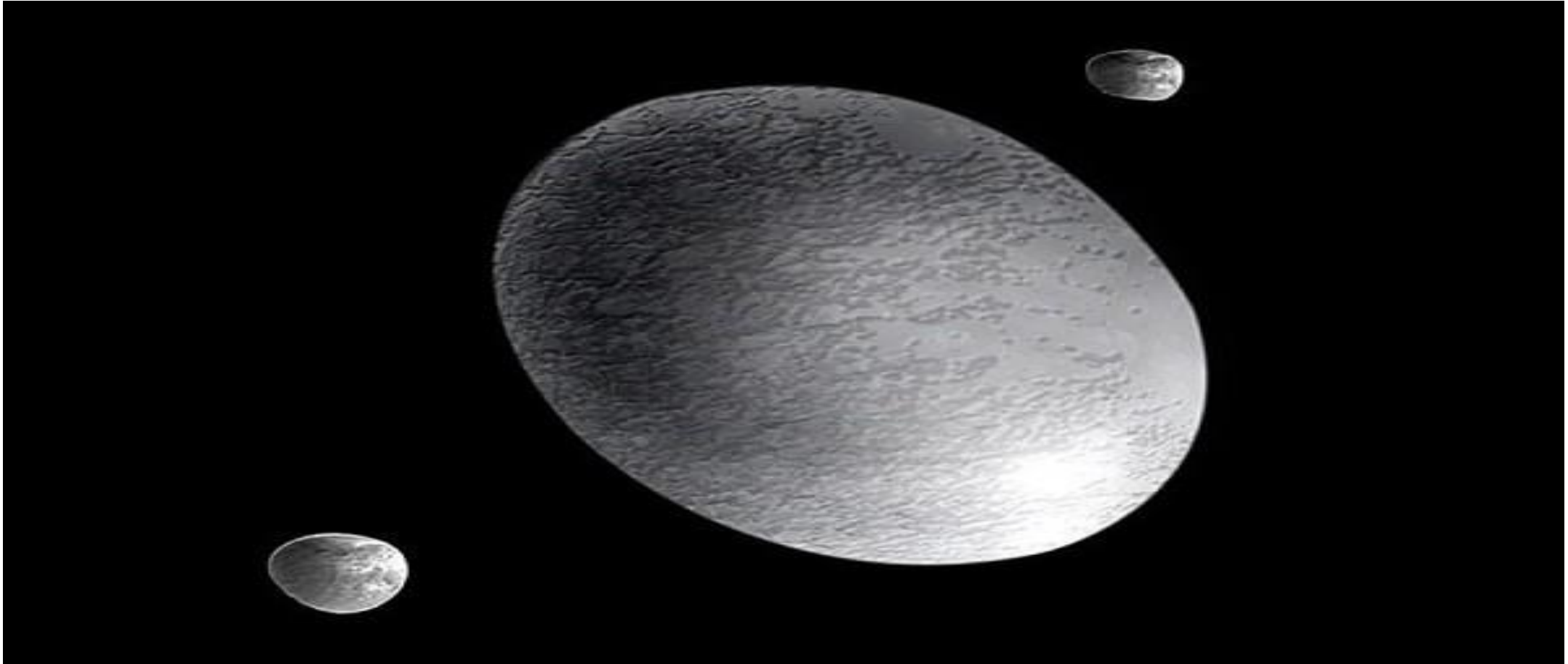
Масса (по спутникам) $M = 4.006 \cdot 10^{24}$ g

Период вращения вокруг Солнца 281.83 years

Период суточного вращения

$T = 3.915483113$ h.

Haumea and two satellites: Hi'iaka and Namaka



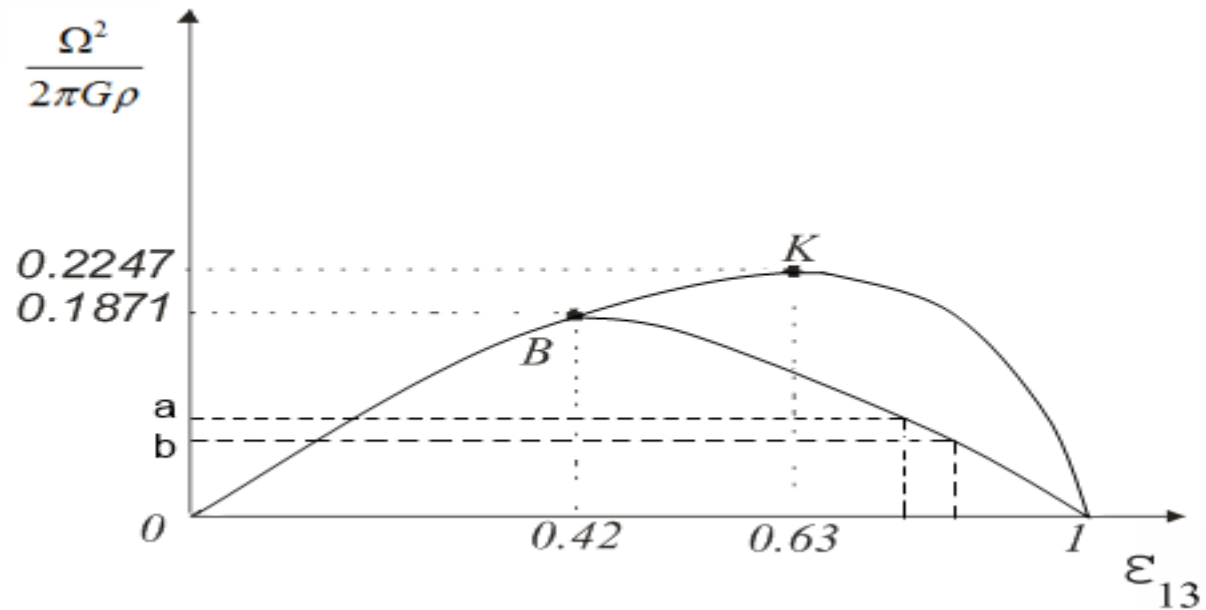
A recognized hypothesis in America is the hypothesis of the impact of the origin of satellites
we proposed another mechanism for the formation of satellites

Сразу же стало ясно: Хаумеа обладает удивительными физическими свойствами (Трехосная форма + необычайно быстрое спиновое вращение), и её пример расширил наши

представления об объектах Солнечной системы.

Но это ещё не все.

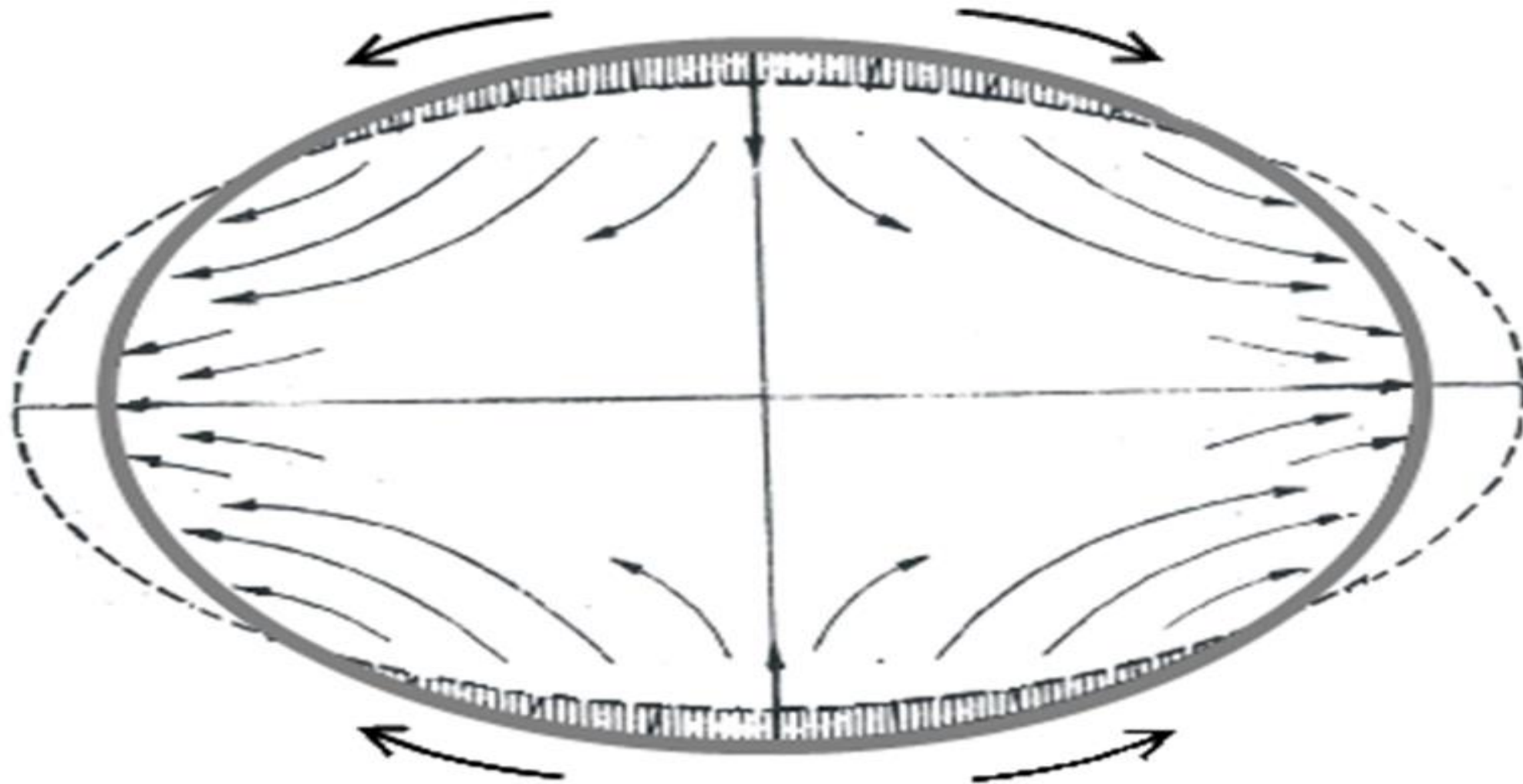
Эллипсоид Якоби



$$\frac{\Omega^2}{2\pi G\rho} = \frac{A_1 a_1^2 - A_2 a_2^2}{a_1^2 - a_2^2};$$

$$a_1^2 a_2^2 \frac{A_2 - A_1}{a_1^2 - a_2^2} = A_3 a_3^2.$$

НАУМЕА – стекание льда к острым концам



НОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ХАУМЕА ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗАТМЕНИЯ ЗВЕЗДЫ ФОНА

**21 ЯНВАРЯ КАРЛИКОВАЯ ПЛАНЕТА
ХАУМЕА ПОКРЫЛА ОТДАЛЕННУЮ ЗВЕЗДУ.**

**Это очень редкое событие наблюдали 12
обсерваторий на Земле (Ortiz et al. 2017)**

Secondly, observe the ring around the planet $a'_{\text{ring}} = 2287 \pm \begin{matrix} 75 \\ 45 \end{matrix} \text{ km}$. В ЗОНЕ ПОША!





Вид на Солнечную систему. Рассеянный диск и почти сферическое облако Оорта

2. О фигурах равновесия околозвездных облаков частиц

РАССМОТРИМ ПОДРОБНЕЕ ОБЛАКО ООРТА. ВАЖНОЙ ЗАДАЧЕЙ в современной астрономии является изучение равновесия и эволюции плотных газопылевых или кометных облаков, локализованных возле Солнца и других звезд в Галактике. ТАКИЕ ОБЛАКА состоят из частиц малой массы (КОМЕТ), на движение которых оказывает влияние не только притяжение центральной звезды, но и гравитационное поле всей Галактики.

ДВА ПОДХОДА К ИЗУЧЕНИЮ остаточных холодных КОМЕТНО-ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ. Первый - небесномеханический, исследуется движение отдельных малых тел в гравитационном поле звезды и Галактики (в Солнечной системе речь идет о движении комет в облаке Оорта); этой проблеме посвящено немало работ.

Но для нас более важен другой подход, целью которого является изучение равновесных состояний компактных облаков частиц в целом. **Такой подход опирается на теорию фигур равновесия и на статистические методы.** Итак, нас интересует равновесная форма околозвездных облаков, которую они принимают под влиянием вращения ВОКРУГ ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ и внешних гравитационных полей

Считая Галактику осесимметричной, введем цилиндрические координаты $R = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ и x_3 . Гравитационный потенциал Галактики, который учитывает существование в ней не только барионной, но и темной материи, обозначим через $\Phi(R, x_3)$. Пробная звезда окружена облаком частиц малой массы, центр масс облака находится в главной плоскости Галактики на расстоянии $R = R_0$ от центра и обращается вокруг центра звездной системы с угловой скоростью $\Omega(R, x_3)$. Из баланса галактической гравитационной и центробежной сил следуют |

$$\frac{\partial \Phi}{\partial R} = -\Omega^2 R_0; \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial R_0^2} = -\left(\Omega^2(R_0) + R_0 \frac{d\Omega^2}{dR_0} \right).$$

С центром облака свяжем систему декартовых координат $O'x_1x_2x_3$: ось $O'x_1$ направим по радиусу от центра Галактики, а ось $O'x_2$ по ходу обращения облака. На каждую частицу действует также потенциал от центральной звезды

$$\varphi(r) = \frac{Gm}{r}, \quad r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}.$$

Компактность облака в сравнении с размерами Галактики позволяет работать в приливном приближении:

$$\Phi \approx \Phi_0 - \Omega^2 R_0 \cdot \left(x_1 + \frac{x_2^2}{2R_0} \right) - \frac{1}{2} \left(\Omega^2 + R \frac{\partial \Omega^2}{\partial R} \right)_0 \cdot x_1^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} \right)_0 \cdot x_3^2.$$

Кроме гравитационных сил, на частицы облака будут действовать центробежные силы, имеющие потенциал

$$\Phi = \frac{1}{2} \left[(R_0 + x_1)^2 + x_2^2 \right] \Omega^2 (R_0).$$

Складывая теперь три потенциала, получим полный потенциал сил, действующих на частицы облака

$$W = \frac{Gm}{r} - \frac{1}{2} R \frac{d\Omega^2}{dR} \cdot x_1^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} \cdot x_3^2. \quad |$$

С помощью постоянных Оорта

$$A = \frac{1}{2} \left(\Omega - \frac{\partial v_{\theta}}{\partial R} \right); \quad B = -\frac{1}{2} \left(\Omega + \frac{\partial v_{\theta}}{\partial R} \right),$$

коэффициент у второго члена представим в виде

$$-\frac{1}{2} R \frac{d\Omega^2}{dR} = 2A(A - B) = K_1.$$

Кроме того, обозначим $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} = -C^2 = -2K_3$. Для Галактики,

имеющей плоскость симметрии, $K_3 \geq 0$, чего нельзя заранее сказать о коэффициенте K_1 . В некоторых

случаях (когда звезда находится в зоне твердотельного вращения в Галактике) этот коэффициент пропадает $K_1 = 0$, а в аномальных галактиках может даже изменять

свой знак. В окрестности Солнца $K_1 \geq 0$. Таким образом,

полный потенциал внутри фигуры принимает вид

$$W = \frac{Gm}{r} + K_1 \cdot x_1^2 - K_3 \cdot x_3^2.$$

Форма фигур равновесия с критическим W

Вблизи начала координат член $W \sim \frac{Gm}{r}$ перевешивает все остальные; в этой области $W = const$ имеют замкнутую, почти сферическую форму. Напротив, вдали от центра, где потенциал W мал, кривые равного потенциала будут уже разомкнутыми. Следовательно, существует некоторый критический случай со значением потенциала W^* , которое разделяет все изопотенциали на семейства замкнутых и незамкнутых. Чтобы найти критическое значение W^* , надо решить уравнение

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} = 0, \quad x_2 = x_3 = 0.$$

Это дает для критической фигуры равновесия предельное значение

$$x_1^* = \left(\frac{Gm}{2K_1} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad W^* = \frac{3}{2} (Gm)^{\frac{2}{3}} (2K_1)^{\frac{1}{3}}.$$

После нормировки координат на x_1^* получим уравнение критической фигуры в пространстве трех измерений

$$3 = \frac{2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}} + x_1^2 - kx_3^2, \quad k = \frac{K_3}{K_1}. \quad V = 0.3528\pi x_1^{*3}$$

Постоянные Оорта (По данным Gaia 2019)

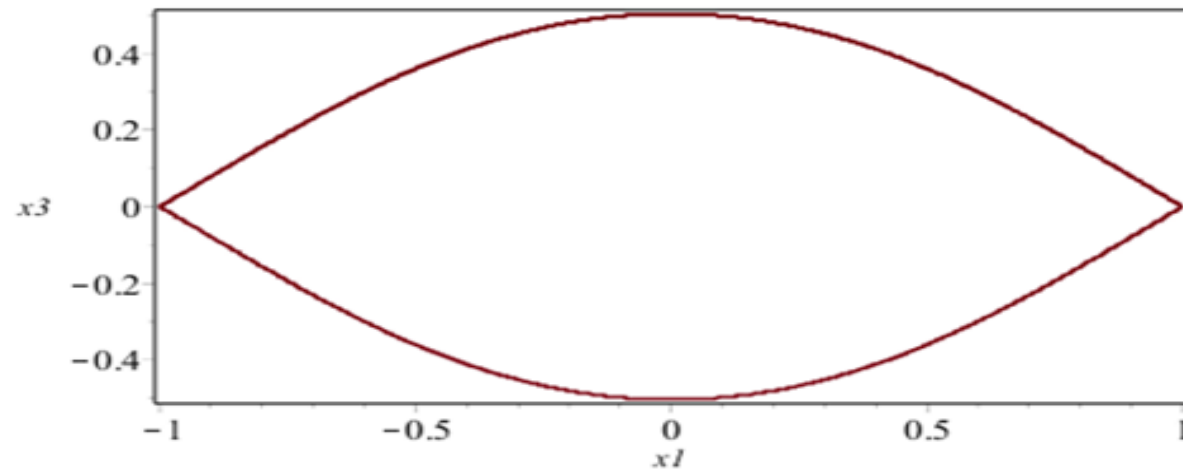
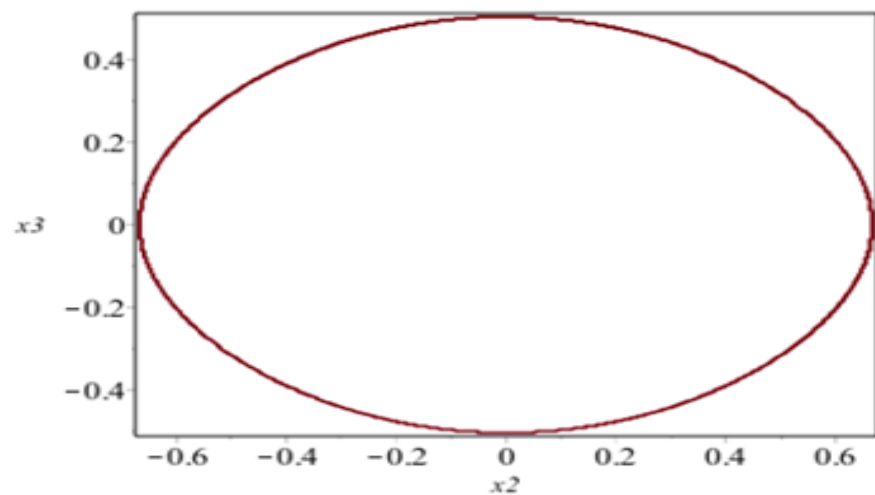
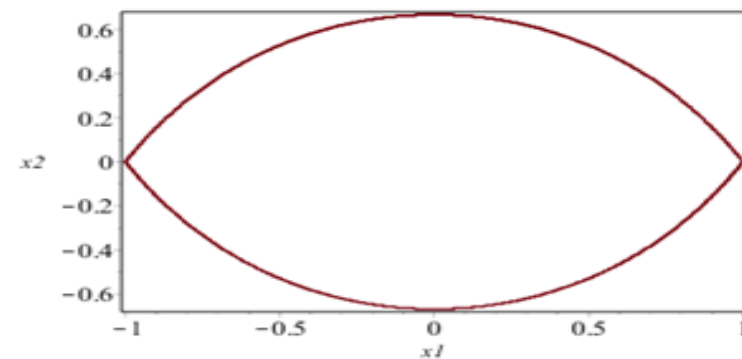
$$A = 15.1 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{kpc}}; \quad B = -13.4 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{kpc}}; \quad \rho_0 = 0.119 \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^3}.$$

$$K_1 := 2A(A - B) = 0.90377 \cdot 10^{-30} \text{s}^{-2};$$

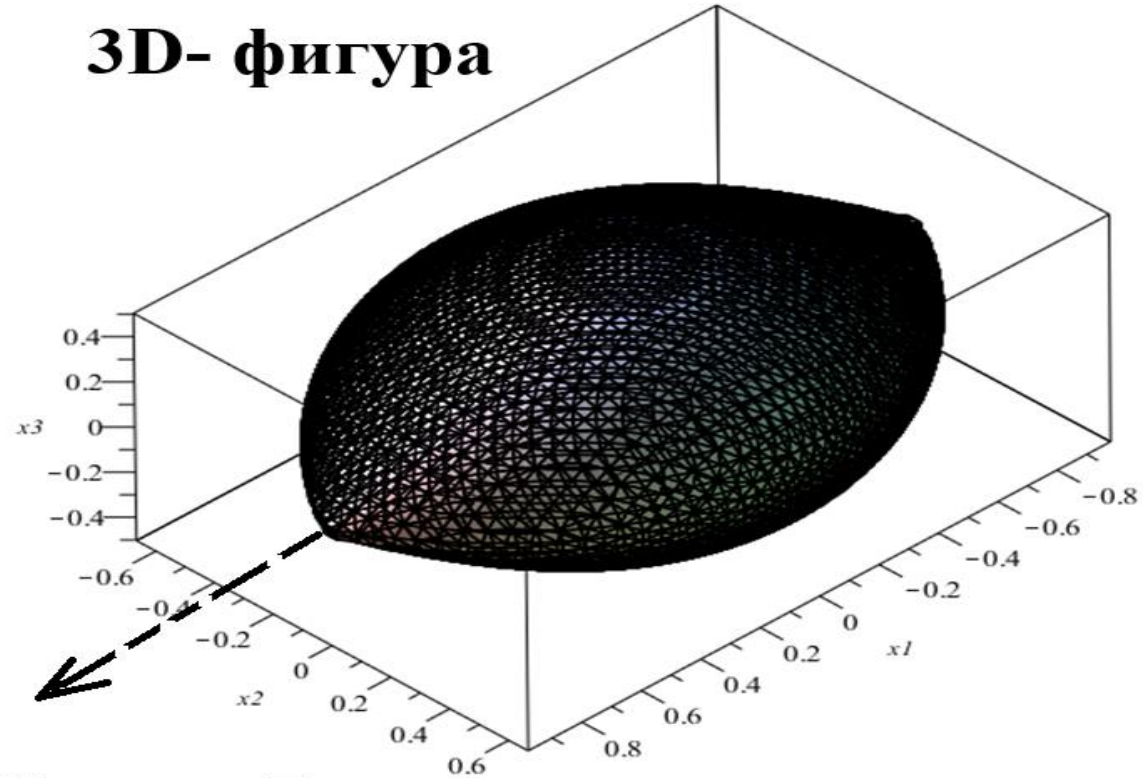
$$K_3 := 2\pi G \rho_0 + A^2 - B^2 = 3.44678 \cdot 10^{-30} \text{s}^{-2};$$

$$k = \frac{K_3}{K_1} = 3.81376.$$

Главные сечения



3D- фигура



На центр Галактики

Найденная фигура равновесия имеет сложную форму: у неё три плоскости симметрии и две особые точки. Чтобы найти угол заострения в плоскости Ox_1x_3 , надо вычислить производную от сложной неявной функции. Находим:

$$\operatorname{tg} \theta_{13} = \sqrt{\frac{3}{1+k}}, \quad \text{или } \theta_{13} \approx 38.289^\circ;$$

$$\text{Угол в плоскости } Ox_1x_2: \theta_{12} = 60^\circ.$$

Объем фигуры

$$V = 0.3528\pi x_1^{*3}$$

Космогонические приложения

Фигура равновесия облака частиц имеет три плоскости симметрии и только две особые точки. Анализ найденных свойств равновесной фигуры представляет большой интерес, но здесь мы хотим обратить внимание на следующий факт. Расчеты показывают, что объем «лимона» $V = 0.3528\pi x_1^{*3}$

Поэтому средняя плотность вещества внутри фигуры

$$\tilde{\rho} = \frac{2K_1}{0.565\pi G} \approx 1.9 \cdot 10^{-23} \frac{g}{cm^3}. \quad \text{С другой стороны, средняя}$$

плотность вещества в Галактике, согласно точным расчетам (см., King 2002) в плоскости симметрии,

$$\text{равна } \rho_0 = 0.15 \frac{M_{\odot}}{pc^3}, \quad \text{или } \rho_0 \approx 1.027 \cdot 10^{-23} \frac{g}{cm^3}.$$

Сравнивая найденные плотности, приходим к интересному выводу: оказывается, объем Галактики полностью заполнен указанными здесь фигурами равновесия с критическим значением потенциала на поверхности. Видимо, именно эта фигура представляет собой элементарную ячейку в объемной конструкции Галактики. Такие совпадения не могут быть случайными. Следствием этого может быть то, что кометные облака соседних звезд в Галактике соприкасаются (даже пересекаются) друг с другом. Следовательно, звезды могут обмениваться собственными кометами, а часть комет в Солнечной системе может принадлежать другим звездам.



Среднее расстояние между соседними звездами R и полуось «лимона» x_1^* связаны соотношением $R = 3/4 x_1^*$. Можно

показать, что половина области взаимопроникновения двух соседних «лимона» есть круговой конус высотой $R/8$ и объемом $\Delta V = \frac{\pi R^3}{3 \cdot 8^3} (\tan 33^\circ)^2$. То-

гда отношение $\frac{2\Delta V}{V} = \frac{(\tan 33^\circ)^2}{2^{10}} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ позволяет оце-

нить относительное число комет, в области взаимопроникновения двух «лимона» . Следовательно, из каждых пяти тысяч комет в среднем две кометы могут принадлежать соседней звезде.

Это расширяет наши представления о
природе комет. И не только комет.
Пример: межзвездный астероид
ОУМУАМУА 2017



Общий вывод таков: имеющиеся в настоящее время данные наблюдений уже позволяют воссоздать и представить те процессы, которые привели к наиболее важным чертам современной Солнечной системы.

Спасибо за внимание!

Чандрасекхар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия . 1973. М: Мир. 288 с.

Субботин М. Ф. Курс небесной механики, т 3. 1949. Л.-М.: ГИТТЛ. 280 с.

Кондратьев Б.П. Теория потенциала и фигуры равновесия. 2003. РХД, Москва-Ижевск. 624 с.