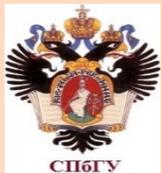


Двумерные кольца Главного пояса астероидов и транснептуновых объектов и их влияние на движение планет и положение барицентра

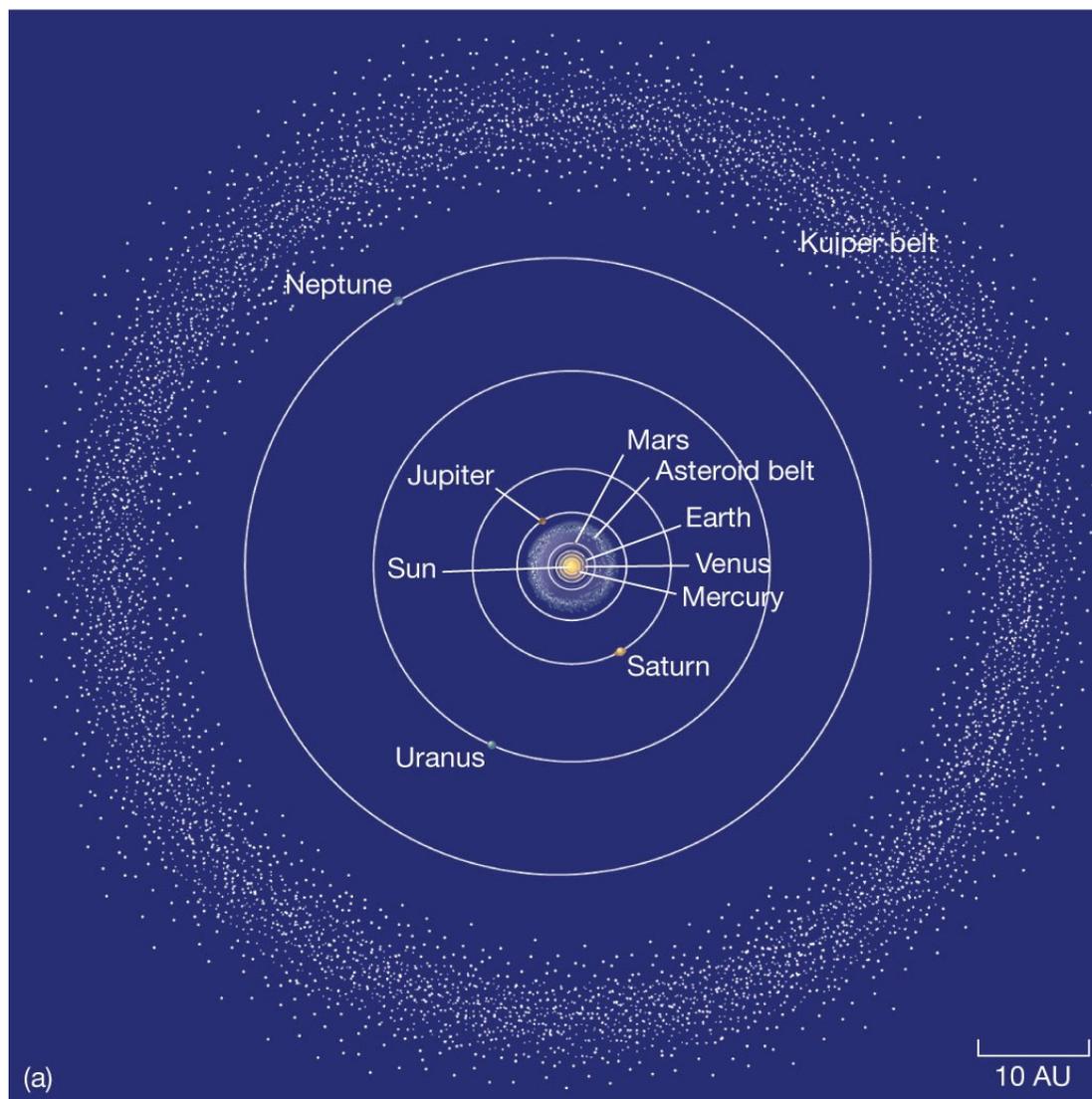
Е. В. Питьева¹, Н. П. Питьев², Д. А. Павлов¹, М. А. Бодунова¹

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия



Положение планет, Главного пояса астероидов и пояса Койпера в Солнечной системе



Г. А. Красинский предложил моделировать возмущение Марса, Земли и Венеры, вызываемое совокупностью небольших астероидов Главного пояса, гравитационным возмущением от однородного кольца, расположенного в плоскости эклиптики с оцениванием массы (M_{ring}) и радиуса (R_{ring}) этого кольца из наблюдений планет и космических аппаратов (КА).

Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., Yagudina E. I. Hidden Mass in the Asteroid Belt // Icarus. – 2002. – V. 158, Issue 1. – P. 98–105.

Однако реальный Главный пояс – довольно широкий, и кроме того, существует значительная корреляция между оцениваемыми параметрами M_{ring} и R_{ring} . Было решено перейти от моделирования возмущений мелких астероидов одномерным кольцом к моделированию притяжением двумерного кольца с радиусами R_1 и R_2

Для Главного астероидного пояса $R_1 = 2.08$ а.е. и $R_2 = 3.27$ а.е., что соответствует орбитальным резонансам с Юпитером 4:1 и 2:1, и где находится большая часть (~ 90%) всех астероидов.



Внутри полости двумерного кругового кольца (R_1, R_2) , $r < R_1$

Пусть $\lambda = r/R_1$, $\mu = r/R_2$

Гравитационный потенциал:

$$U(r) = \frac{2Gm}{R_2^2 - R_1^2} \left[R_2 \cdot F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \mu^2\right) - R_1 \cdot F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \lambda^2\right) \right].$$

Ускорения:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{Gm}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{1}{R_1} \cdot F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \lambda^2\right) - \frac{1}{R_2} \cdot F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \mu^2\right) \right] x,$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{Gm}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{1}{R_1} \cdot F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \lambda^2\right) - \frac{1}{R_2} \cdot F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \mu^2\right) \right] y,$$

где F - гипергеометрическая функция от 4-х аргументов.

Ускорение направлено радиально и **уменьшает** центральное притяжение

$$\lambda = \frac{R_1}{r}, \quad \mu = \frac{R_2}{r} \quad (R_1 < R_2 < r)$$

Гравитационный потенциал:

$$U(r) = \frac{2Gmr}{R_1^2 - R_2^2} \left\{ \left[F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \mu^2\right) - (1 - \mu^2)F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \mu^2\right) \right] - \left[F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \lambda^2\right) - (1 - \lambda^2)F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \lambda^2\right) \right] \right\}$$

Для записи ускорений введём обозначения:

$$q = F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \lambda^2\right) - (1 + \lambda^2)F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \lambda^2\right) + \frac{\lambda^2}{2} \left[F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \lambda^2\right) + (1 - \lambda^2)F\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}, 2, \lambda^2\right) \right]$$
$$s = F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \mu^2\right) - (1 + \mu^2)F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \mu^2\right) + \frac{\mu^2}{2} \left[F\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, \mu^2\right) + (1 - \mu^2)F\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}, 2, \mu^2\right) \right]$$



Тогда компоненты ускорения запишутся:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{2Gm(s - q)}{(R_2^2 - R_1^2)r} \cdot x$$
$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{2Gm(s - q)}{(R_2^2 - R_1^2)r} \cdot y$$

Ускорение направлено радиально и **увеличивает** центральное притяжение. В выражении участвует четыре типа гипергеометрических функций от λ и μ .

В динамическую модель Солнечной системы эфемерид EPM 2017 (ИПА РАН) включены притяжение **двух двумерных колец: для Главного астероидного пояса и пояса Койпера.**

При моделировании влияния поясов на движение планет важно правильно учитывать обратное влияние планет на построенные кольца.

При вычислениях и интегрировании уравнений движения тел Солнечной системы контроль положения центра тяжести Солнечной системы проводился постоянно.

При учёте всех взаимных гравитационных влияний и учёте совпадения центра масс колец с центром Солнца положение барицентра Солнечной системы в наших вычислениях сохраняется на интервале 100 лет в пределах сотых долей миллиметра (смещение меньше 20 микрон).

Массы обоих колец определялись из анализа движения планет (**динамический метод**) по радиотехническим данным КА для разных планет.

Использованные наблюдения в EPM2016



Планеты	Радарные наблюдения		Оптические наблюдения	
	Интервал наблюдений	Число норм. мест	Интервал наблюдений	Число наблюдений
Меркурий*	1964-2015	1570	--	--
Венера	1961-2013	3799	--	--
Марс	1965-2015	49245	--	--
Юпитер + 4 сп.	1973-1997	51	1914-2013	14866
Сатурн + 7 сп.*	1979-2014	187	1913-2013	16455
Уран + 4 сп.	1986	3	1914-2013	12550
Нептун + 1 сп.	1989	3	1913-2013	12404
Pluto	--	--	1914-2013	16674
<i>Total</i>	<i>1961-2015</i>	<i>54858</i>	<i>1913-2013</i>	<i>72929</i>

К Главному астероидному поясу относят многочисленную совокупность малых тел, двигающихся по близко круговым орбитам, расположенным между Марсом и Юпитером:

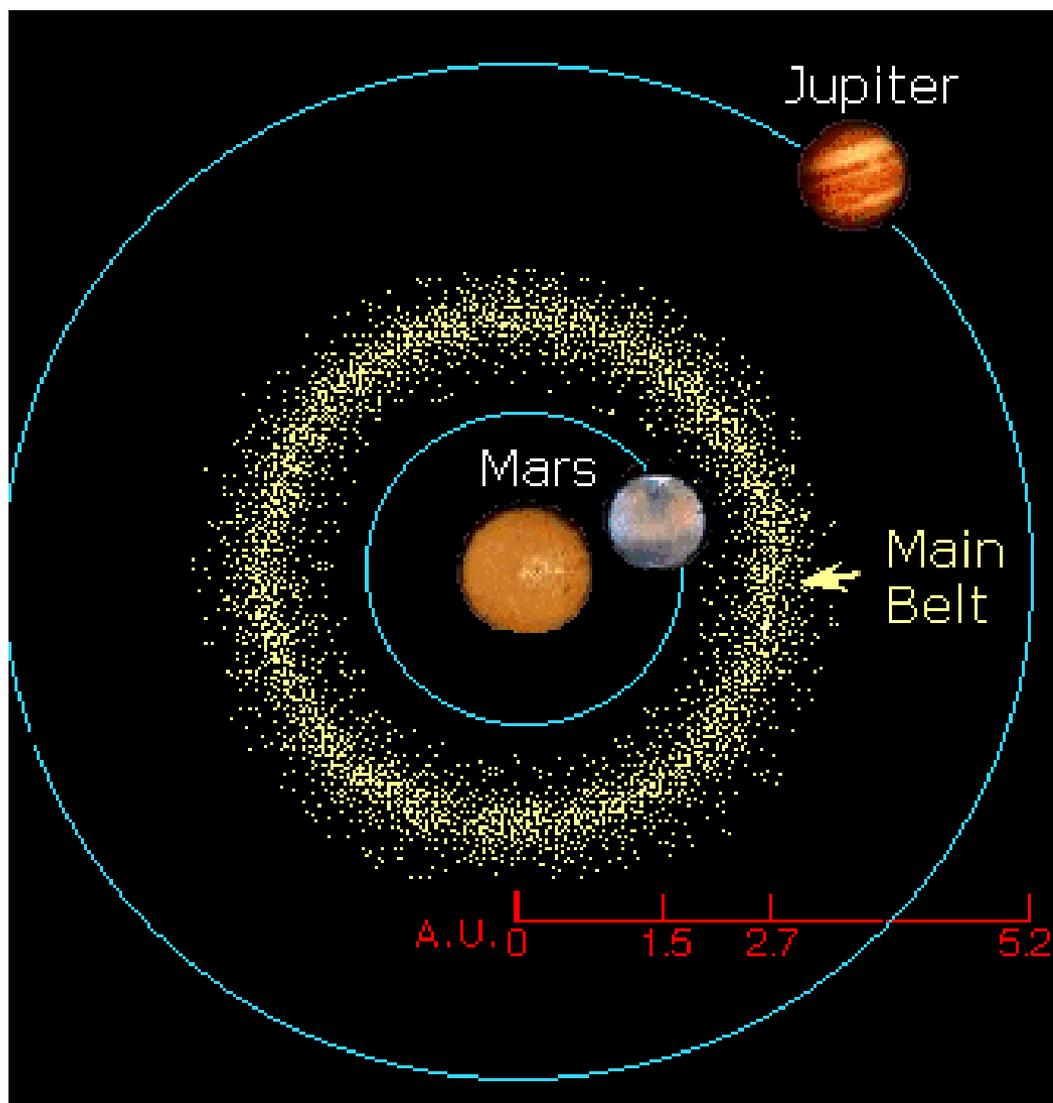
$$1.8 \text{ а.е.} < r < 3.5 \text{ а.е.}$$

Ядро пояса (наиболее плотная часть) расположено в полосе между орбитальными резонансами **1:4 (2.06 а.е.)** и **1:2 (3.27 а.е.)** с Юпитером

Разделяют пояс:

на внутреннюю часть	2.06 – 2.50 а.е.,
среднюю часть	2.50 – 2.82 а.е.,
и внешнюю часть	2.82 – 3.27 а.е..

Положение Главного пояса астероидов



Влияние на смещение перигелиев планет в mas для 10 оборотов

Планета	Одномерное кольцо	Двумерное кольцо
	$m=10^{-10} M_{\text{Sun}}$, $R=2.67$ а.е.	$m=10^{-10} M_{\text{Sun}}$, $R_1=2.06$ а.е., $R_2=3.28$ а.е.
Меркурий	0.003003110	0.003214501
Венера	0.021951638	0.025042493
Земля	0.067852470	0.075169552
Марс	0.383162773	0.497285998
Юпитер	0.460329887	0.539980540
Сатурн	0.088503040	0.094955654

Общая масса 301 крупных астероидов с индивидуально оцениваемыми массами равна

$$M_{301} = (11.186 \pm 0.095) \cdot 10^{-10} M_{\text{sun}} \quad (3\sigma)$$

Масса двумерного кольца небольших астероидов

$$M_{\text{annulus}} = (1.059 \pm 0.161) \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma)$$

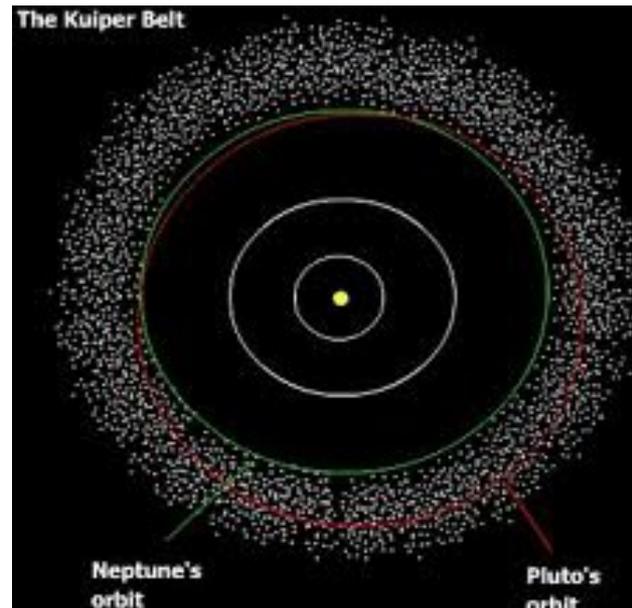
Общая масса астероидного пояса составляет

$$M_{\text{belt}} = (12.245 \pm 0.187) \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma)$$

или $\approx 2.5 M_{\text{Ceres}}$

Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и получил обозначение **1992 QB1**.

David Jewitt, Jane Luu. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. Nature (1992)



Все транснептуновые объекты обращаются вокруг Солнца в прямом направлении (как большие планеты).

У **классических объектов** пояса Койпера почти круговые орбиты, лежат в области **40-50 а.е.** от Солнца, а плоскости орбит наклонены к эклиптике, в основном, менее чем на **10°**. Эти объекты не испытывают сильного влияния больших планет; их орбиты остаются практически неизменными;

У **резонансных объектов** пояса Койпера, или плутино; большие полуоси их орбит близки к **39.5 а.е.**, а значит их орбитальный период, как и у Плутона (248 лет), соотносится с орбитальным периодом Нептуна как **3:2**. Возможно, именно эта резонансная связь с планетой-гигантом служит стабилизирующим фактором для движения плутино. Некоторые плутино пересекают орбиту Нептуна, но никогда не сближаются с ним (как и сам Плутон).

У **рассеянных (scattered) объектов**, «бродяг» весьма вытянутые орбиты ($e=0.5-0.9$) с большой полуосью **60-100 а.е.**; некоторые из них удаляются от Солнца в афелии на **100-200 а.е.**, а объект 2000 CR105 - даже на **1300 а.е.**

Статистические оценки массы пояса Койпера



Год	Авторы	Масса	Примечание
1997	Weissman, Levinson	0.1 – 0.3 m_{\oplus}	Между 30 а.е. и 50 а.е.
1998	Jewitt et al.	~ 0.1 m_{\oplus}	
1999	Chiang, Brown	~ 0.2 m_{\oplus}	Между 30 а.е. и 50 а.е.
1999	Kenyon, Luu	~ 0.1 m_{\oplus}	Между 30 а.е. и 50 а.е.
2001	Gladman et al.	0.04 – 0.1 m_{\oplus}	Между 30 а.е. и 50 а.е.,
2002	Luu, Jewitt	0.01 – 0.1 m_{\oplus}	Между 35 а.е. и 150 а.е.
2002	Kenyon	0.1 – 0.2 m_{\oplus}	Общая масса за орбитой Нептуна
2004	Bernstein et al.	0.010 m_{\oplus}	Классические объекты пояса
2009	Booth et al.	0.01 m_{\oplus} 0.02 m_{\oplus}	Классические объекты пояса рассеянный пояс Койпера
2010	Vitense et al.	0.05 m_{\oplus} 0.07 m_{\oplus}	Классические + резонансные объекты рассеянный пояс Койпера

Влияние кольца ТНО с массой $0.01 m_{\oplus}$ на смещение перигелиев

Планета	Число оборотов	Одномерное кольцо 43 а.е.	Двумерный кольцевой пояс 39.4 а.е. – 47.8 а.е.
Нептун	50	4".196	3".611
Уран	50	2".212	1".104
Сатурн	50	0".041	0".038
Юпитер	50	0".015	0".014

Возмущения больших тел (30) ТНО прямо учитываются включением в общую систему интегрирования. Возмущения более мелких ТНО моделировались сначала одномерным кольцом с радиусом, равным 43 а.е. Моделирование притяжения одномерным кольцом следует рассматривать как первое, упрощенное представление гравитационного влияния со стороны пояса Койпера.

В настоящее время сделан переход к моделированию двумерным однородным кольцом с размерами, соответствующими наблюдаемой ширине основной части пояса.

Это более адекватное представление, учитывая, что наиболее плотной частью пояса Койпера является кольцевая зона шириной более 8 а.е. между двумя основными орбитальными резонансами с Нептуном 3:2 и 2:1 с соответствующими средними расстояниями от Солнца 39.4 а.е. и 47.8 а.е.

Динамические оценки массы пояса Койпера при моделировании одномерным кольцом



Масса в m_{\odot}	Масса в m_{\oplus}	Ссылки
$7.75 \cdot 10^{-8}$	$2.58 \cdot 10^{-2}$	Pitjeva, 2010
$(7.9 \pm 2.5) \cdot 10^{-8}$	$(2.63 \pm 0.83) \cdot 10^{-2}$	Pitjeva, 2013
$(5.9 \pm 1.8) \cdot 10^{-8}$	$(1.97 \pm 0.60) \cdot 10^{-2}$	Pitjeva, Pitjev, 2014

Из 30 крупнейших ТНО и Плутона + Харона :

$$M_{31\text{TNO}} = (252 \pm 40) \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma),$$

и массы кольца ТНО

$$M_{\text{TNOring}} = (434 \pm 120) \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma)$$

получаем оценку общей массы всех ТНО:

$$M_{\text{TNO}} = (686 \pm 129) \cdot 10^{-10} M_{\text{sun}} \approx (0.0228 \pm 0.0043) m_{\oplus} \quad (3\sigma)$$

Спасибо за внимание!