

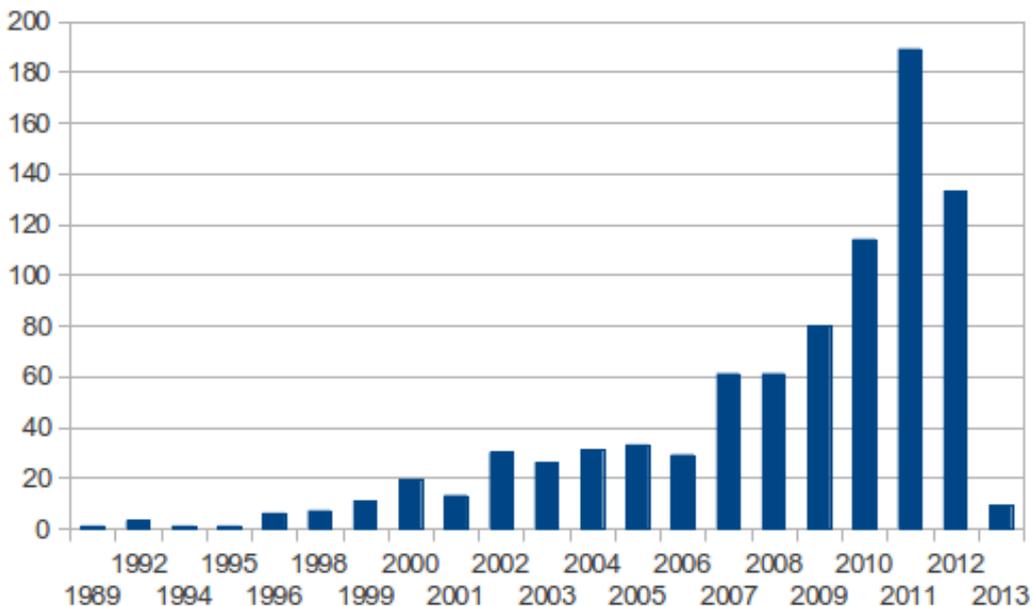
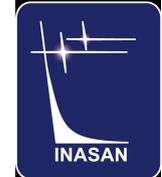


Ионов Д.Э., Бисикало Д.В., Кайгородов П.В.,
Шематович В.И.

Газодинамические особенности оболочек экзопланет класса «горячий юпитер»

ГАИШ, 21 сентября 2013 г.

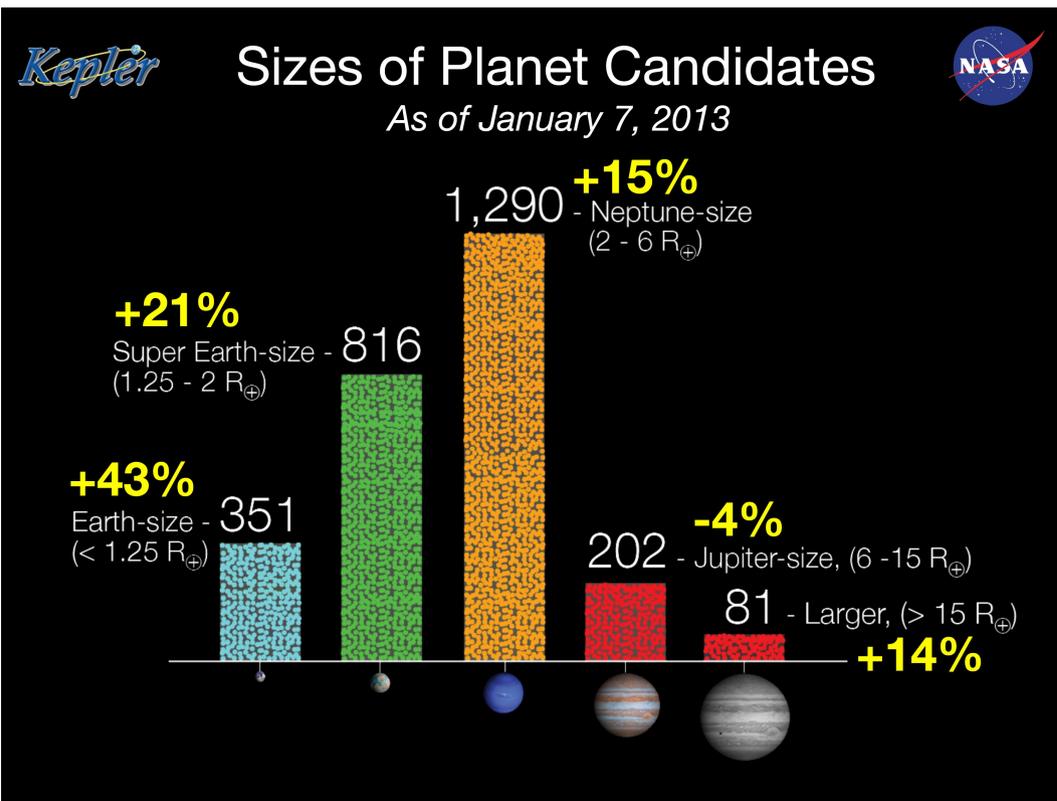
Экзопланеты



Первая экзопланета у звезды солнечного типа открыта в 1995 году методом лучевых скоростей. К настоящему времени открыто 974 планеты в 744 системах. Космический аппарат Кеплер обнаружил более 2000 кандидатов в экзопланеты

Аппарат Gaia, запуск которого состоится в конце 2013 года, откроет до 10000 экзопланет.

Большая часть планет открыта методом лучевых скоростей, наблюдаются немногие непосредственно.



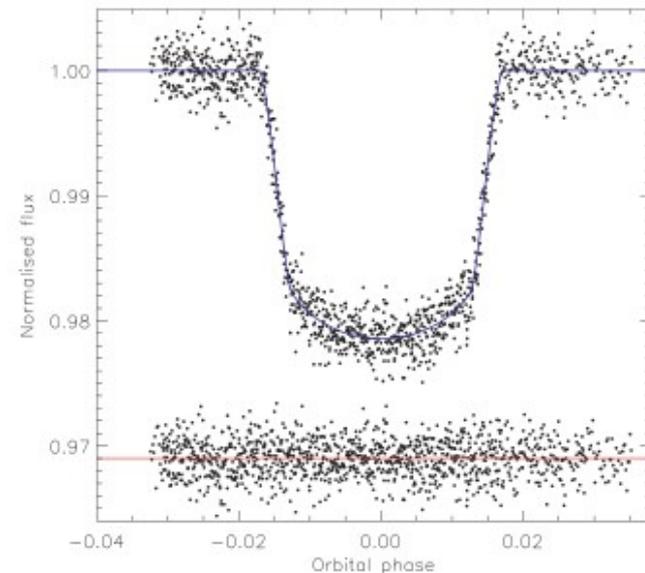
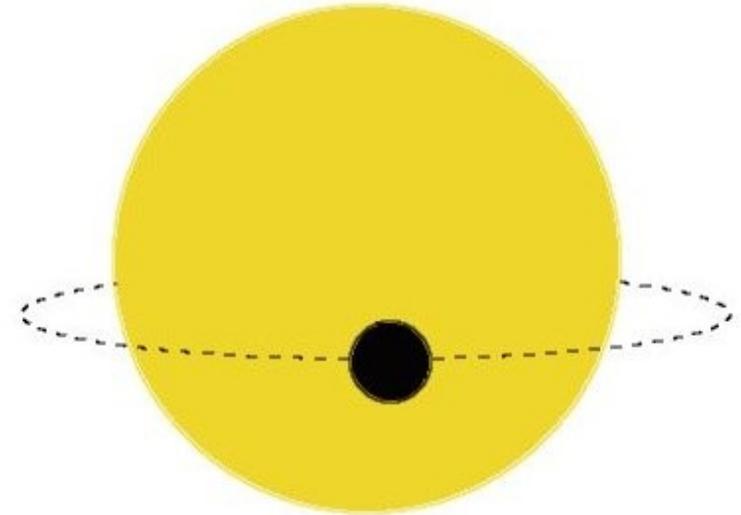
Транзитные экзопланеты

Транзитом планеты называется ее наблюдаемое прохождение по диску звезды

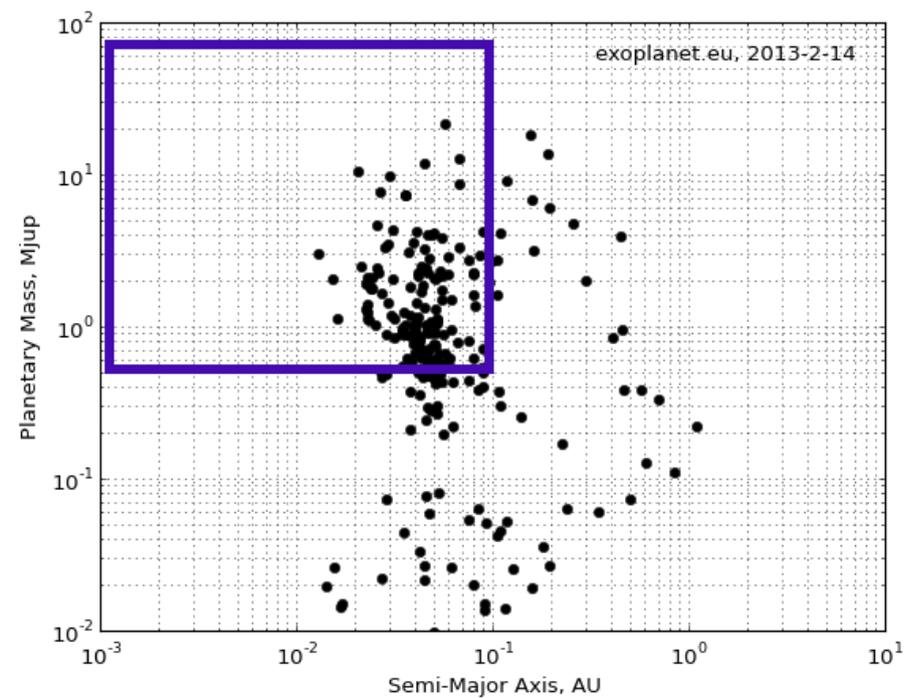
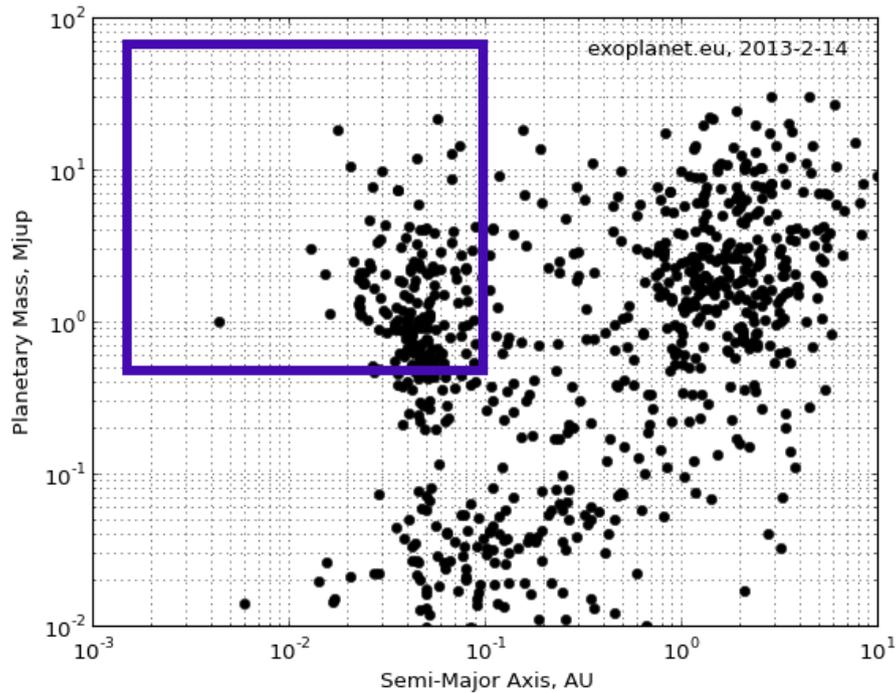
На сегодняшний день известно 365 транзитных планет в 281 планетных системах.

Из них 185 имеют массу $M > 0,5 M_{\text{jup}}$ и большую полуось $a < 0,1$ а.е.

Такого рода экзопланеты называются «горячими юпитерами».



Горячие юпитеры



За счет малого орбитального периода и большого размера «горячие юпитеры» имеют хорошую наблюдаемость.

Два типичных «горячих юпитера» исследуемых в работе

Планета WASP-12b

- Масса звезды — $1,1 M_{\text{sun}}$
- Радиус звезды — $1,1 R_{\text{sun}}$
- Масса планеты — $0,64 M_{\text{Jup}}$
- Радиус планеты — $1,32 R_{\text{Jup}}$
- Большая полуось — $0,045 \text{ а.е.}$
- Период обращения — $3,5$ суток

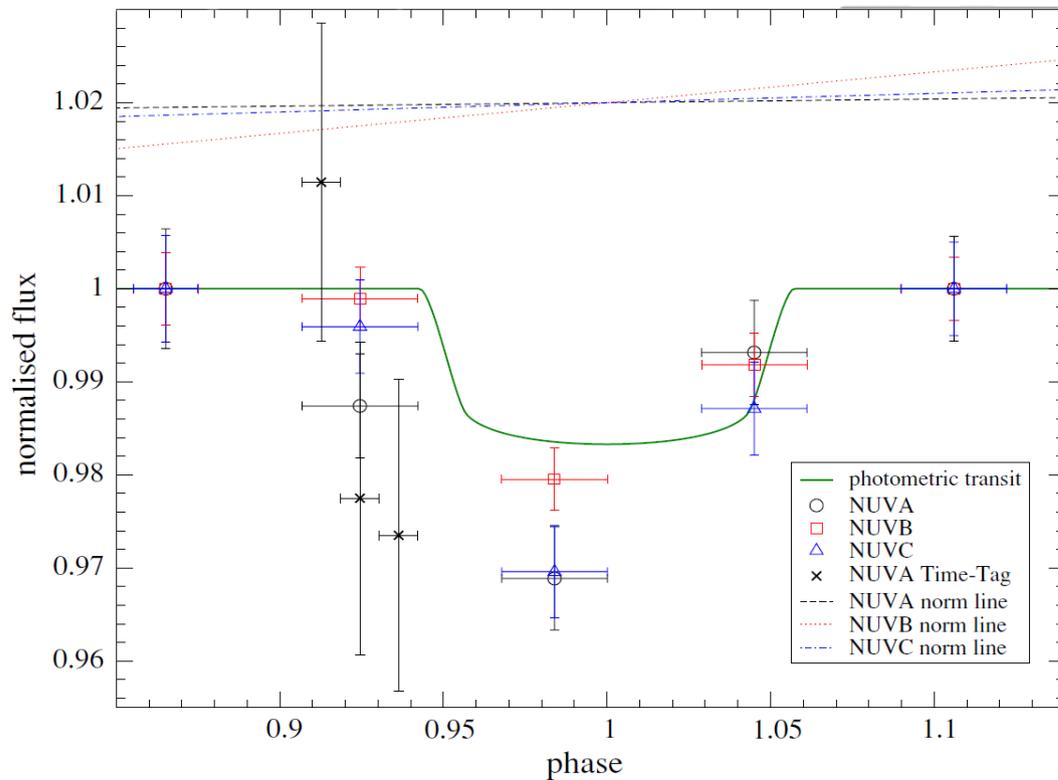
Планета HD 209458b

- Масса звезды — $1,1 M_{\text{sun}}$
- Радиус звезды — $1,1 R_{\text{sun}}$
- Масса планеты — $0,64 M_{\text{Jup}}$
- Радиус планеты — $1,32 R_{\text{Jup}}$
- Большая полуось — $0,045 \text{ а.е.}$
- Период обращения — $3,5$ суток

Несферическая оболочка WASP-12b

Наблюдения планеты WASP-12b

Fossati et al. ApJ 2010



Результаты наблюдений, проведенных с помощью спектрографа COS, установленном на HST. Характерная особенность полученных кривых блеска — раннее начало транзита в некоторых диапазонах.

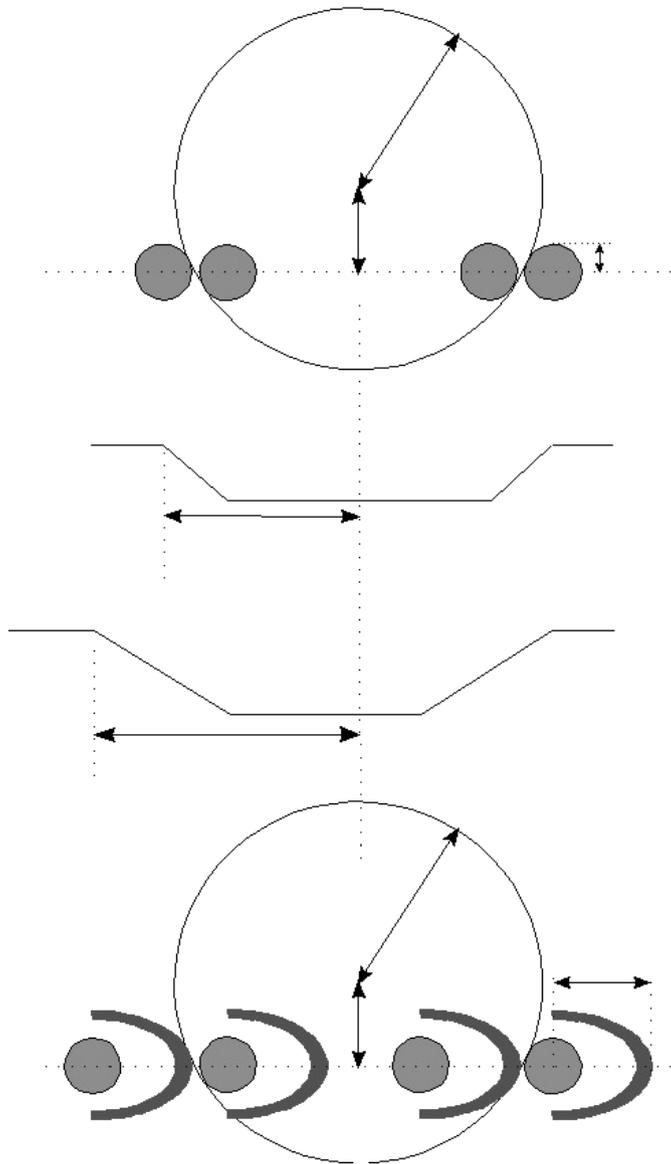
Кривые блеска в различных диапазонах:

NUVA: 2539–2580 Å; NUVB: 2655–2696 Å; NUVB: 2770–2811 Å

Характеристики системы:

- $M = 1,41 M_J$
- $R = 1,79 R_J$
- $P = 1,09$ сут
- $a = 0,0229$ а.е.
- $e = 0,017$

Кривые блеска систем с отошедшими ударными волнами



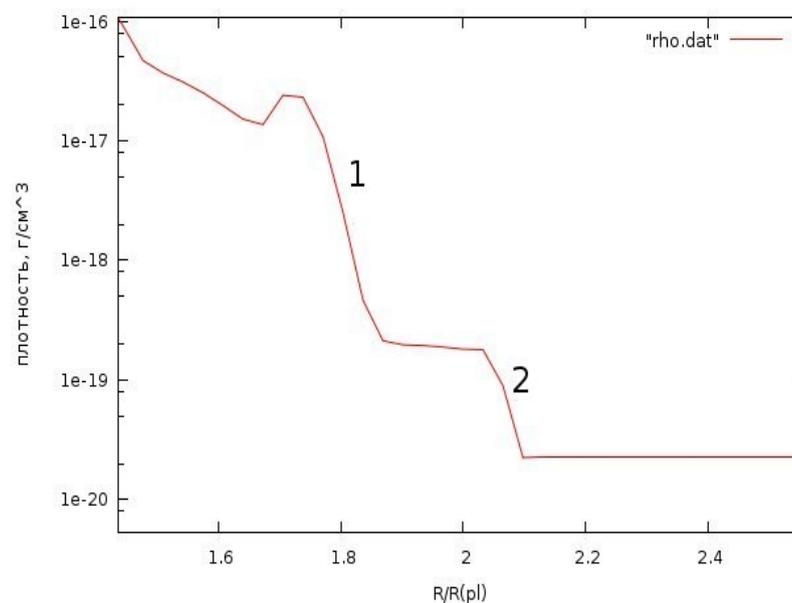
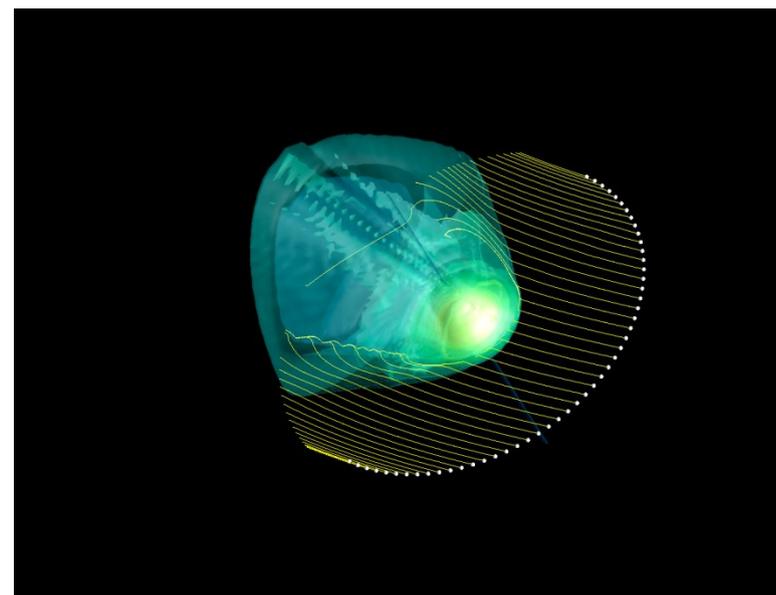
Одно из объяснений — существование у планеты магнитосферы. (Vidotto et al. MNRAS 2011) Наличие горячего плотного вещества перед планетой должно привести к асимметрии кривой блеска относительно середины транзита. Затмение света звезды веществом за ударной волной произойдет раньше затмения диском планеты.

Кривые блеска в отсутствии и при наличии ударной волны в системе

Отошедшие ударные волны у горячих юпитеров

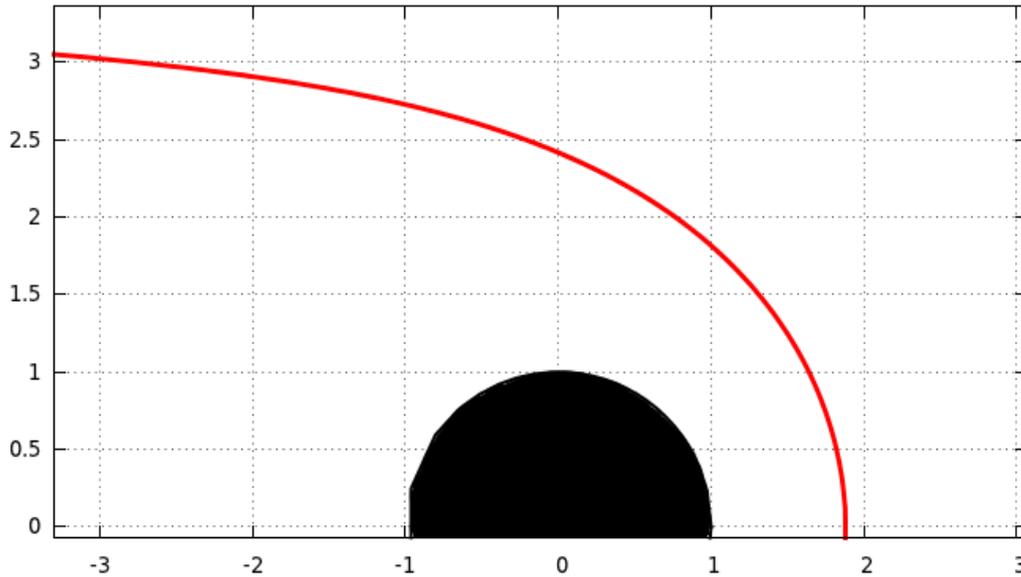


Орбитальное движение планет в среде звездного ветра почти всегда является сверхзвуковым с большим числом Маха. При этом впереди них образуется отошедшая ударная волна. За ударной волной находится контактный разрыв, отделяющий вещество звездного ветра от вещества атмосферы.



1 — контактный разрыв
2 — отошедшая ударная волна

Аналитическое рассмотрение отошедшей ударной волны



Теоретическое положение контактного разрыва относительно планеты

$$R/R_{pl} = \frac{1}{1 + \frac{kT_0 R_{pl}}{\mu GM} \ln \left(\frac{kT_0 \rho_0}{\rho_{sw} (v_{sw}^2 + v_{orb}^2 + kT_{sw})} \right)}$$

Из простых полуаналитических соображений равенства газового и динамического давления можно определить положение и форму контактного разрыва

$$kT_0 \rho_0 e^{-\frac{\mu GM_{pl}(R-R_{pl})}{kT_0 R_{pl}}} = \rho_{sw} (v_{sw}^2 + v_{orb}^2) + \rho_{sw} kT_{sw}$$

– положение контактного разрыва в точке лобового столкновения

Расстояние между контактными разрывом и ударной волной

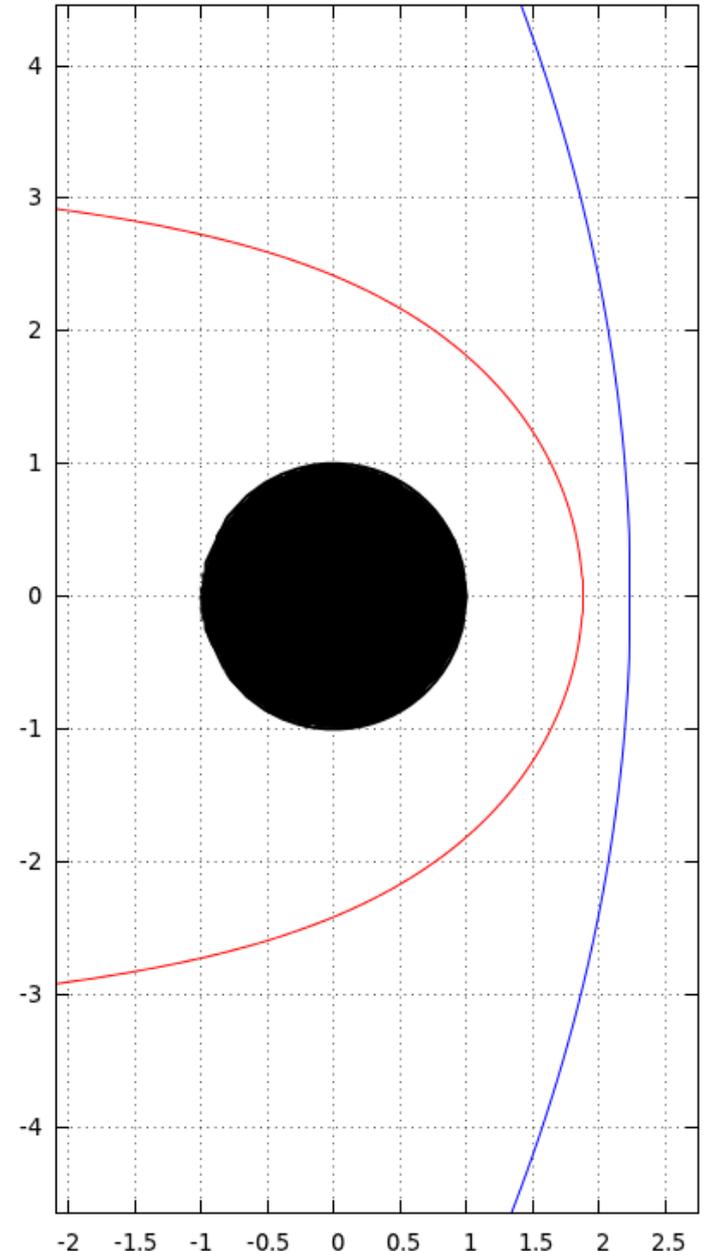
Для определения отхода можно воспользоваться эмпирическими формулами (Verigin et al., Geomagnetism and Aeronomy 2011).

Отход волны:

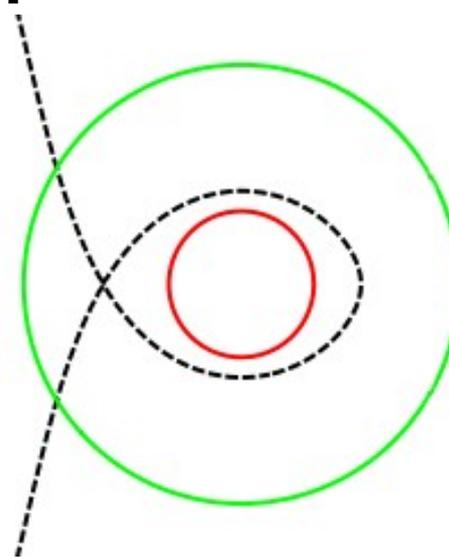
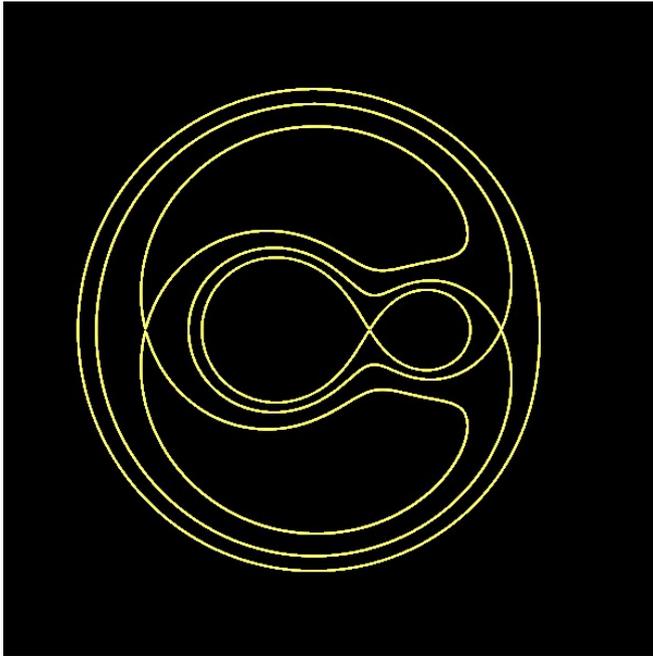
$$\Delta = 1,1 r_0 \cdot ((\gamma - 1) M^2 + 2) / ((\gamma + 1) M^2)$$

M — число Маха, r_0 — расстояние до контактного разрыва, γ — радиус кривизны контактного разрыва

Для WASP -12b ударная волна находится на расстоянии **2,3 R_{pl}**



Оценки темпа потери массы атмосферой



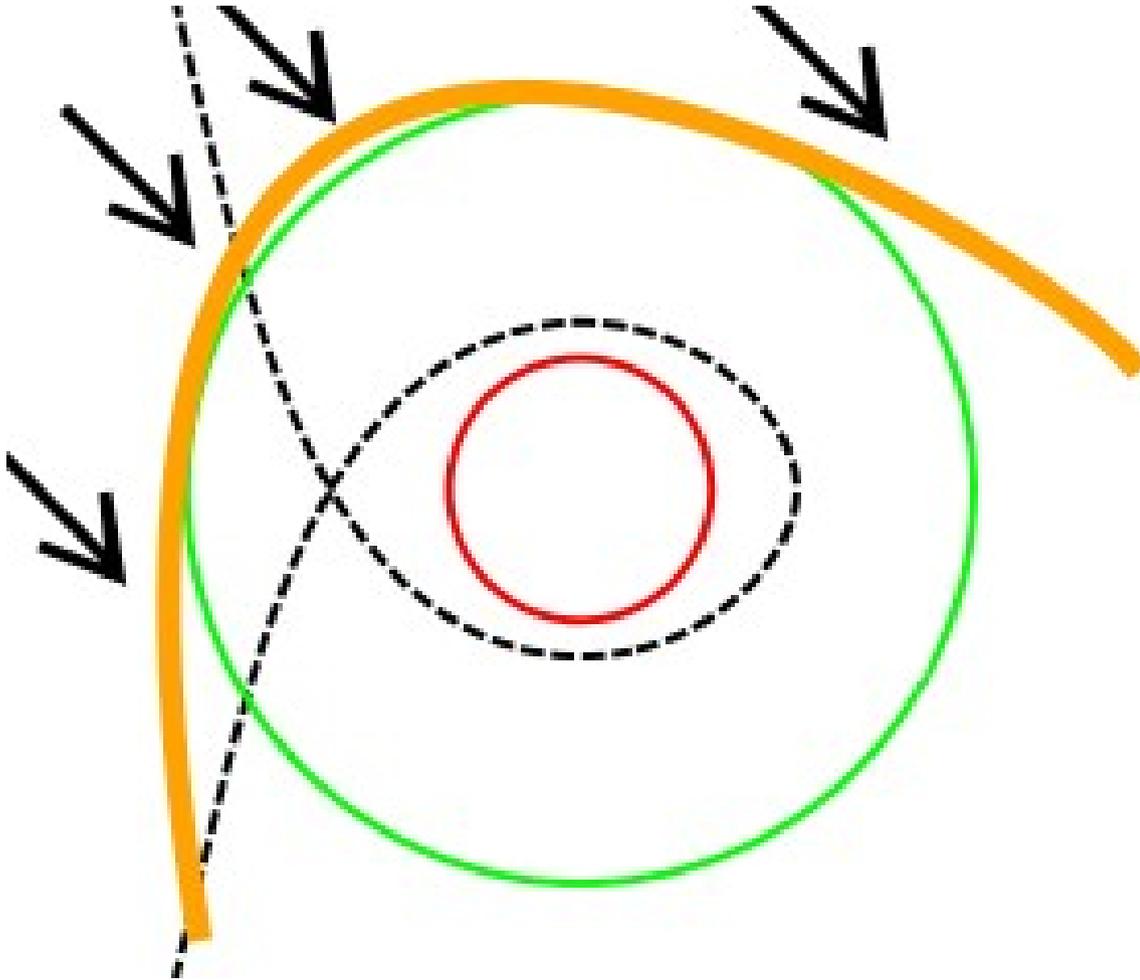
Темп истечения атмосферы в двойной системе можно оценить по формуле (Pringle, Wade):

$$\dot{M} / M = (\Delta R / R)^3 \sqrt{GM / R^3}$$

$$\Delta R / R_{L_1} = (R_{\text{ex}} - R_{L_1}) / R_{L_1} \approx 0.13.$$

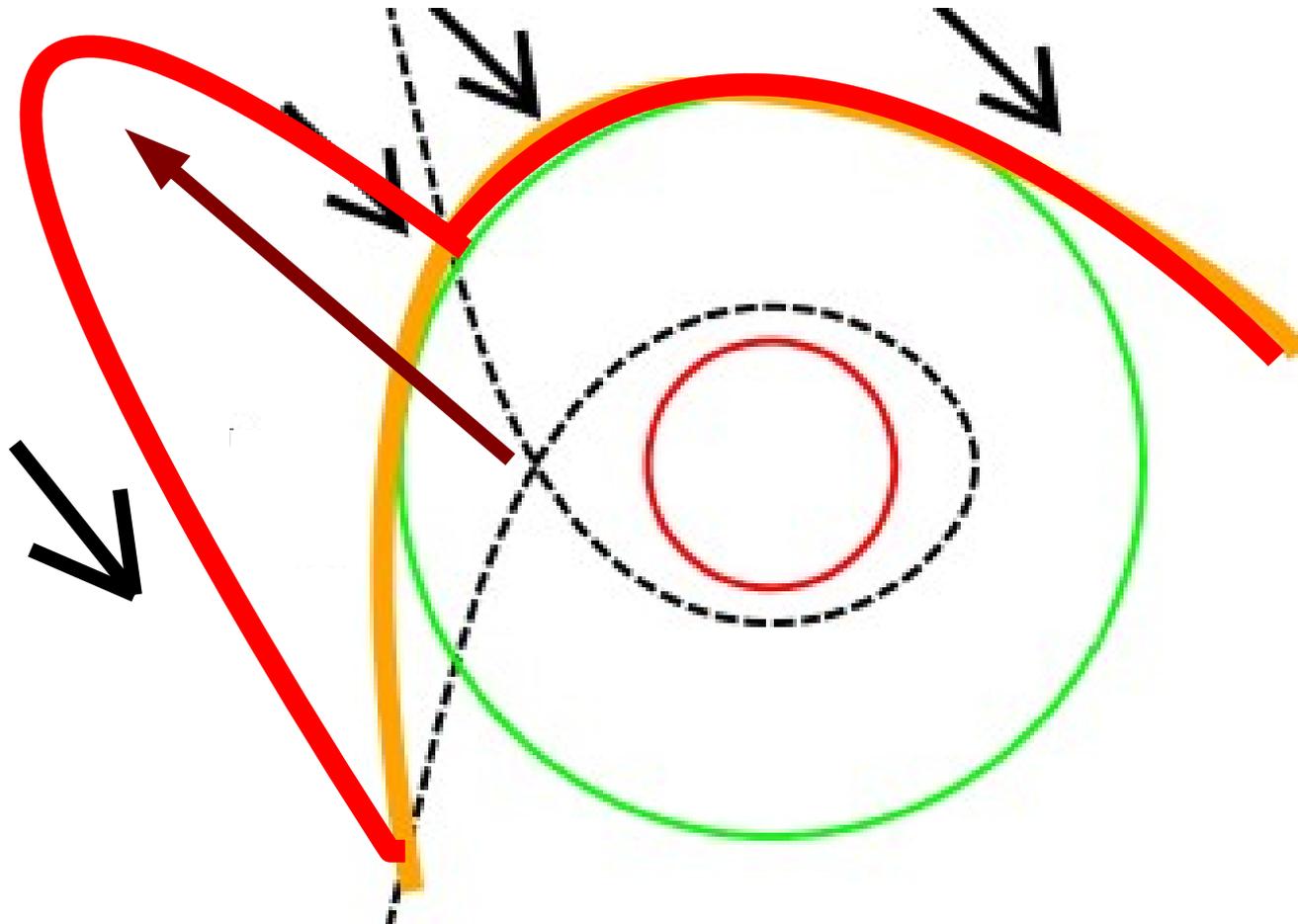
Тогда примерное время жизни атмосферы планеты будет очень малым.

Переполнение полости Роша



При незначительном переполнении полости Роша истечению через точки $L1$ и $L2$ препятствует отошедшая ударная волна.

Взаимодействие струи из точки L1 со звездным ветром



$$p_1 + \rho_1 \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho_2 \frac{v_2^2}{2}$$

Под давлением струи из точки L1 фронт волны изгибается и образует выступ, который может отодвинуть фронт на расстояние 5-6 R_{pl}

Используемые уравнения газовой динамики



Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

Уравнение переноса импульса

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial x} + 2\Omega v\rho$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + P)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial y} - 2\Omega u\rho$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 + P)}{\partial z} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

Уравнение переноса энергии

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho uh}{\partial x} + \frac{\partial \rho vh}{\partial y} + \frac{\partial \rho wh}{\partial z} = -\rho u \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \rho w \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

Уравнение состояния:

$$P = (\gamma - 1)\rho \varepsilon$$

Потенциал Роша:

$$\Phi(\mathbf{r}) = -\frac{GM_1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{GM_2}{\sqrt{(x-A)^2 + y^2 + z^2}} - \frac{1}{2}\Omega^2 \left(\left(x - A \frac{M_2}{M_1 + M_2} \right)^2 + y^2 \right)$$

Параметры при газодинамическом моделировании

Параметры системы : Параметры атмосферы:

● $M_* = 1.1 M_{\text{sun}}$

● $R_* = 1.1 R_{\text{sun}}$

● $M_{\text{pl}} = 0.64 M_{\text{Jup}}$

● $R_{\text{pl}} = 1.32 R_{\text{Jup}}$

● $A = 0,045 \text{ a.e.}$

● $P = 3.5 \text{ сут}$

$$\rho = \rho_0 \exp(-\mu GM(R-R_{\text{pl}})/kTRR_{\text{pl}})$$

$$\rho_0 = 3.2 \cdot 10^{-14} \text{ g/cm}^3$$

$$T = 10000 \text{ K}$$

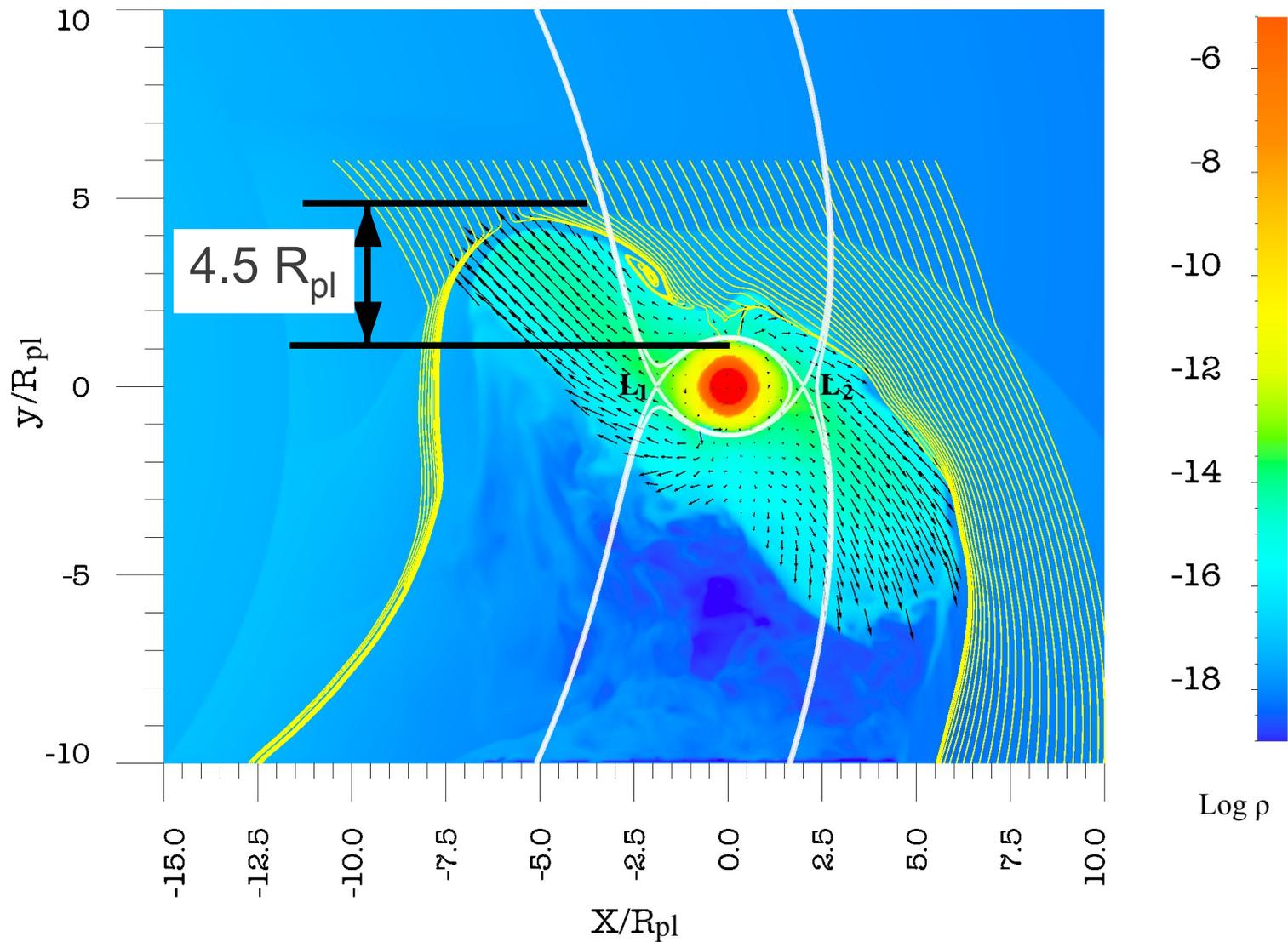
Параметры ветра:

$$n = 1.4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$T = 1 \cdot 10^5 \text{ K}$$

$$v = 100 \text{ km/s}$$

Результаты моделирования



Распределение плотности, линии тока и вектора скорости в системе WASP-12b

Промежуточные выводы

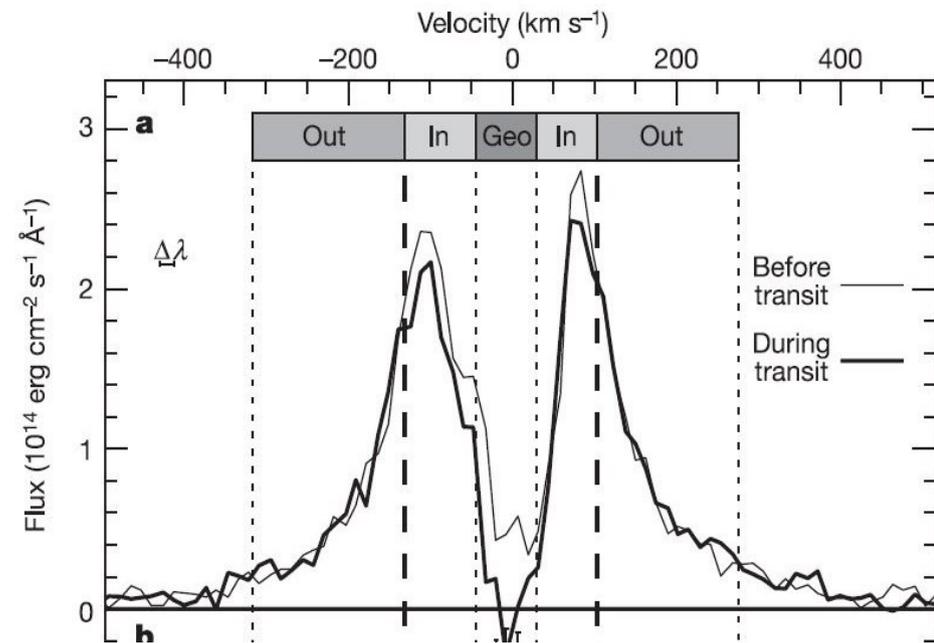
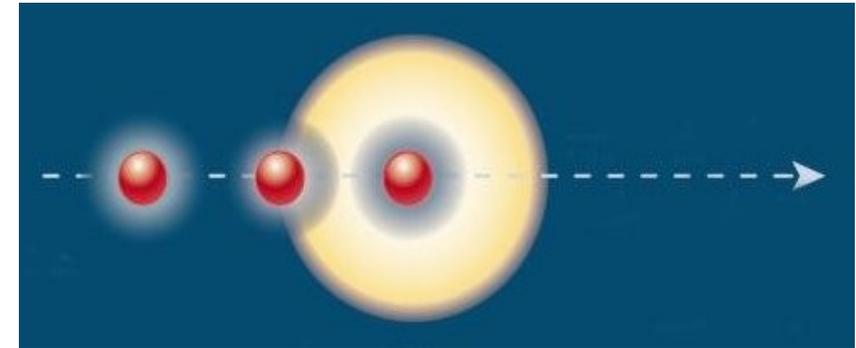
- Наблюдения свидетельствуют о наличии плотного горячего вещества впереди планеты на расстоянии 5-6 ее радиусов
- Оценки истечения атмосферы WASP-12b через точку L1 показывают необходимость существования механизма, ограничивающего истечение.
- Таким механизмом может стать динамическое давление звездного ветра, останавливающее струю на необходимом расстоянии.
- При этом перед планетой образуется ударная волна, вещество за фронтом которой может вызвать наблюдаемое поглощение.

Возможные типы оболочки экзопланеты HD 209458b

Нестационарная атмосфера планеты HD 209458b

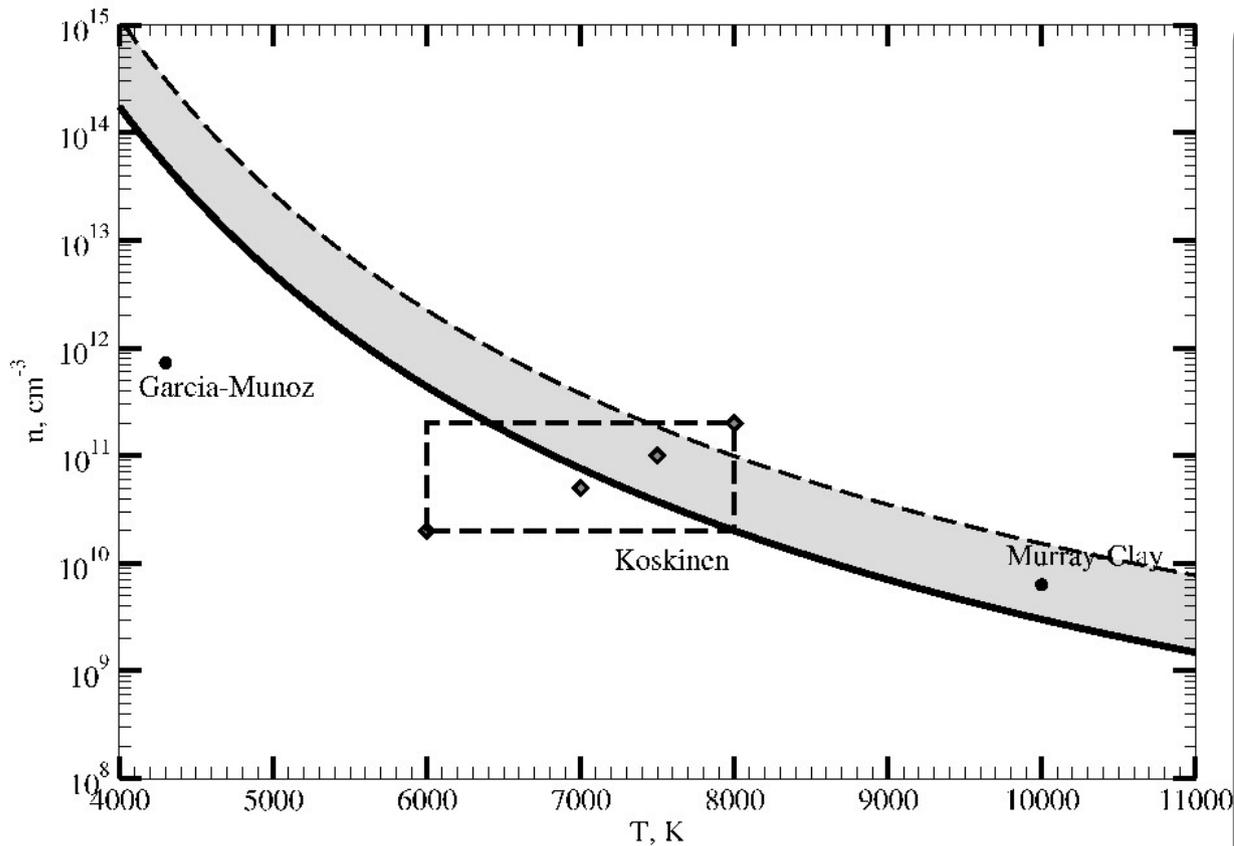


- В 2003 г опубликованы наблюдения Vidal-Madjar на HST
- Обнаружена обширная оболочка нейтрального водорода
- В атмосфере планеты обнаружены горячие атомы водорода со скоростями около 100 км/с
- Предполагается, что планета теряет массу со скоростью 10^{10} г/с



Наблюдения Vidal-Madjar et al. (2003) транзита HD 209458b в линии Ly- α

Разделение типов оболочек



Параметры звездного ветра:

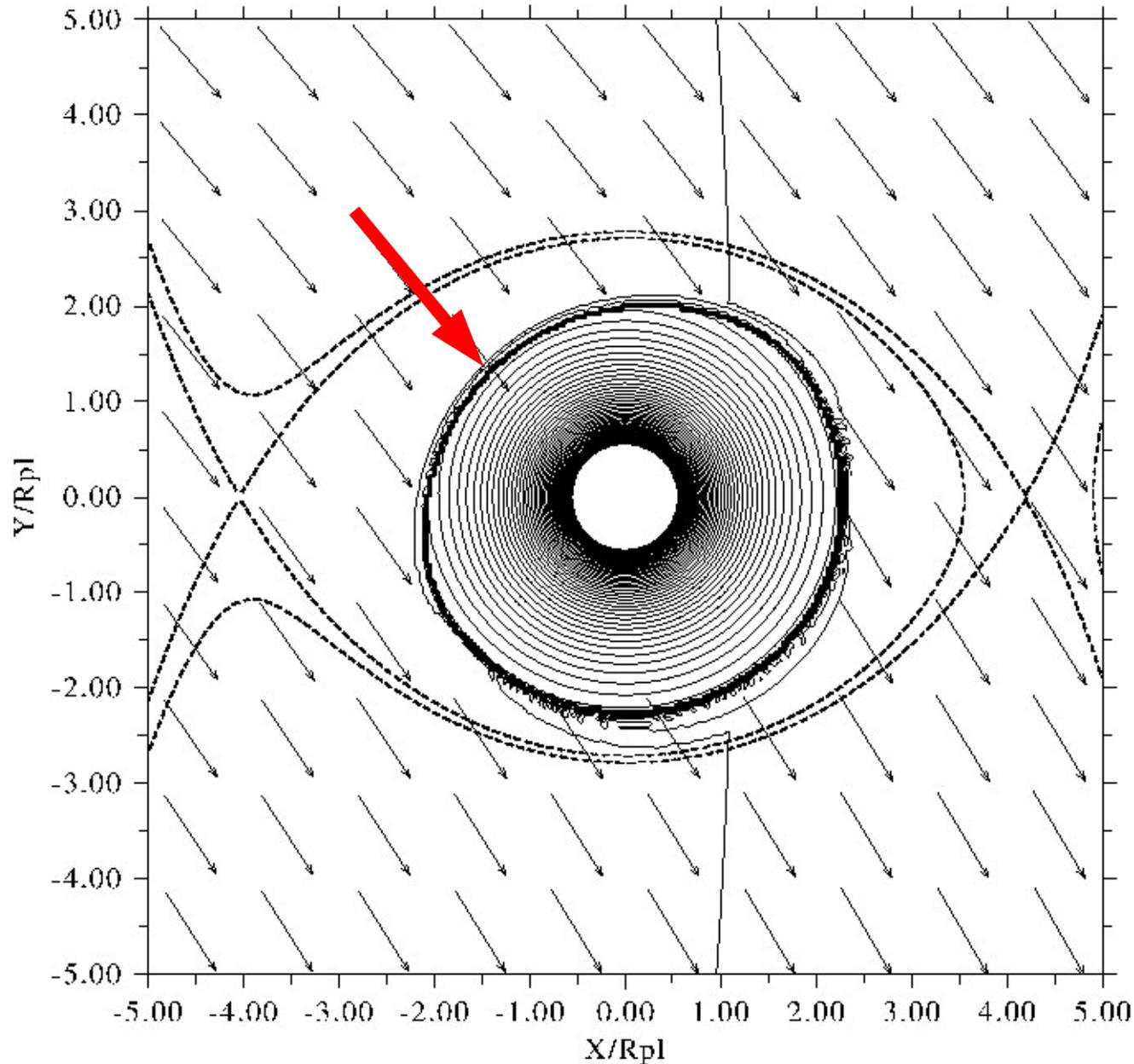
$$n = 10^4 \text{ см}^{-3}$$

$$T = 7.3 \cdot 10^5 \text{ К}$$

Типы оболочек:

- Замкнутая сферическая — истечение не начинается
- Замкнутая несферическая — истечение начинается, но не развивается
- Незамкнутая

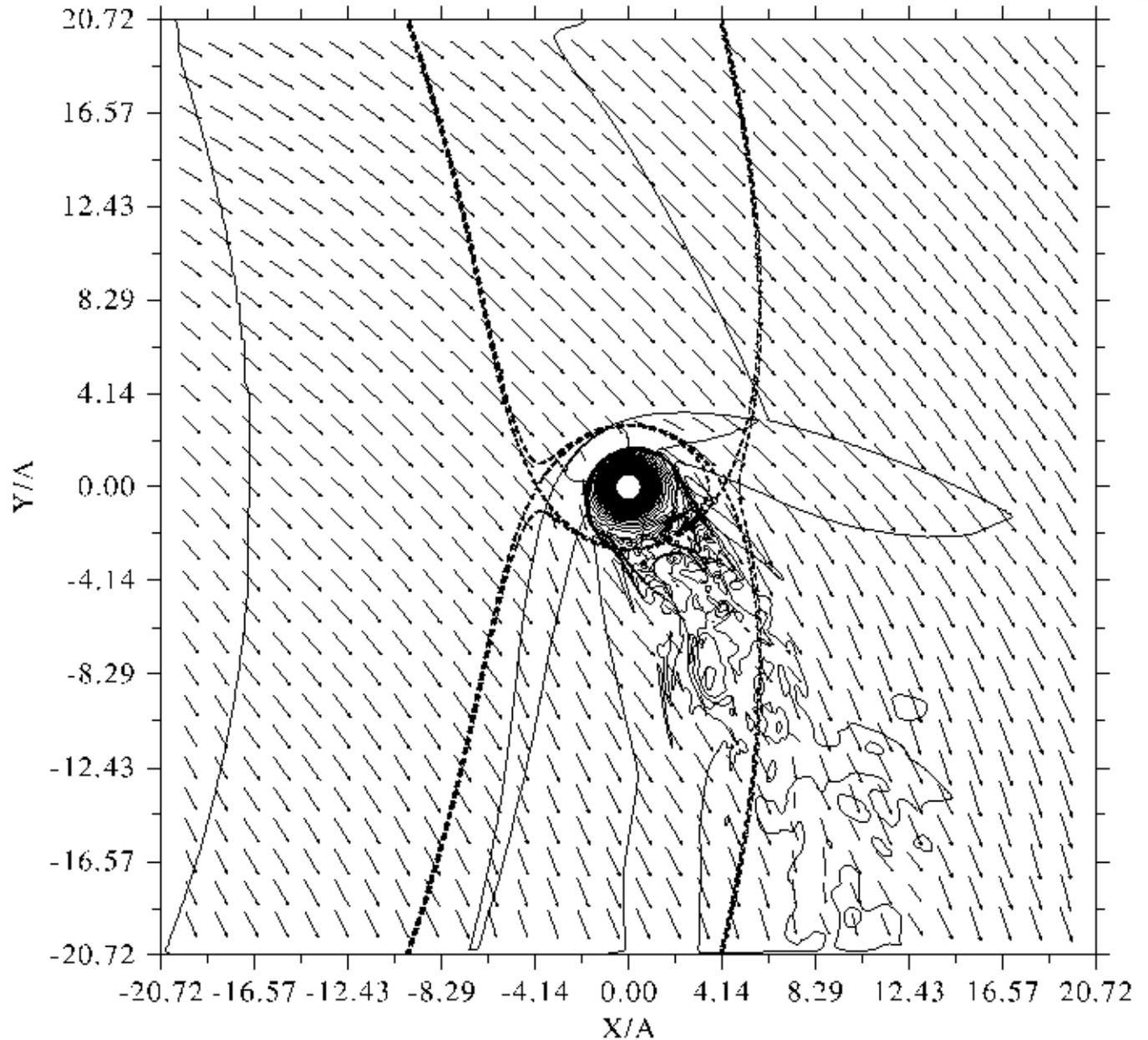
Условие начала истечения



Точка лобового
столкновения
должна находиться
за пределами
полости Роша.

Результаты моделирования

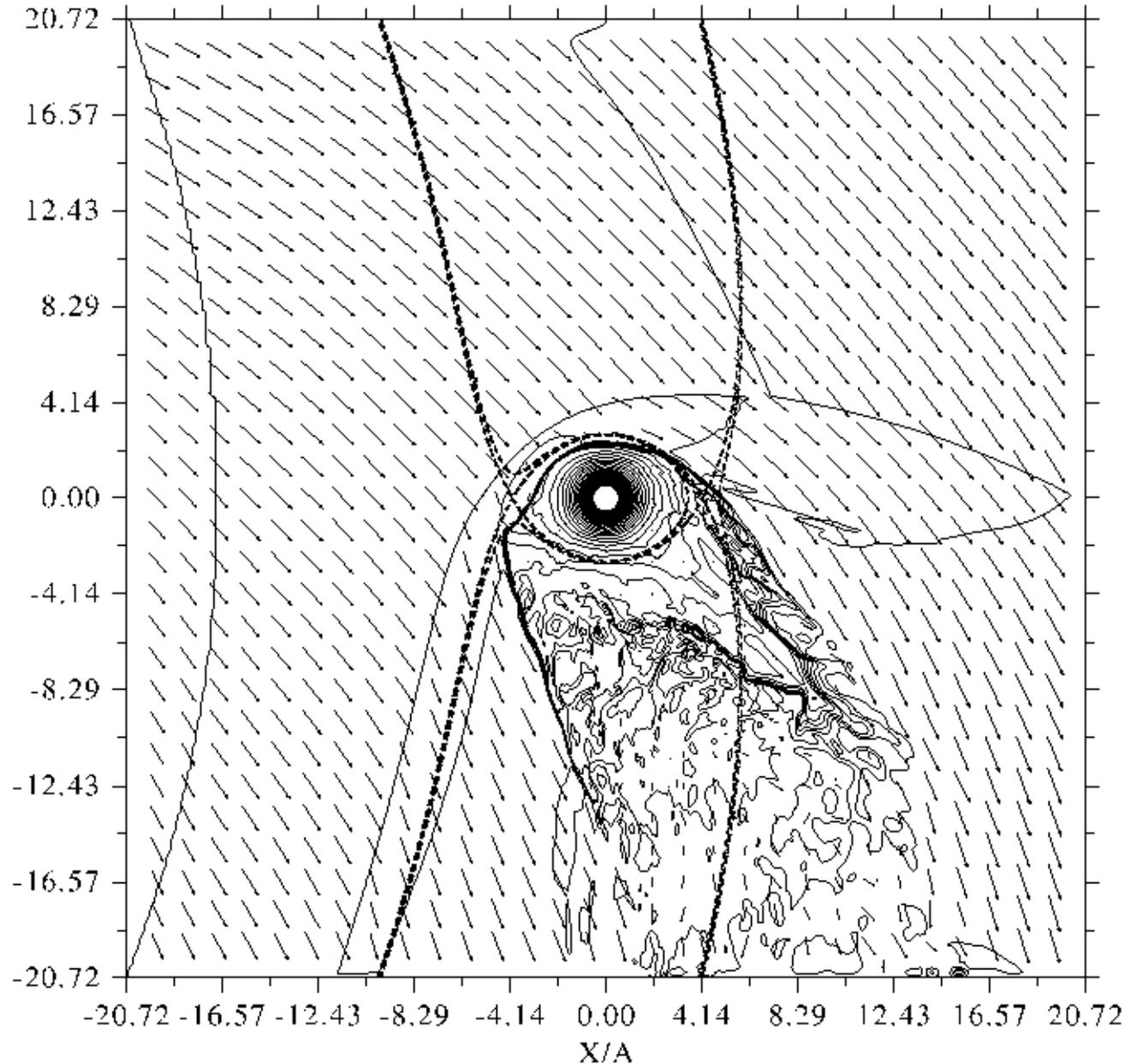
$T = 6000 \text{ K}$
 $n = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$



Замкнутая сферическая оболочка

Результаты моделирования

$T = 7000 \text{ K}$
 $n = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

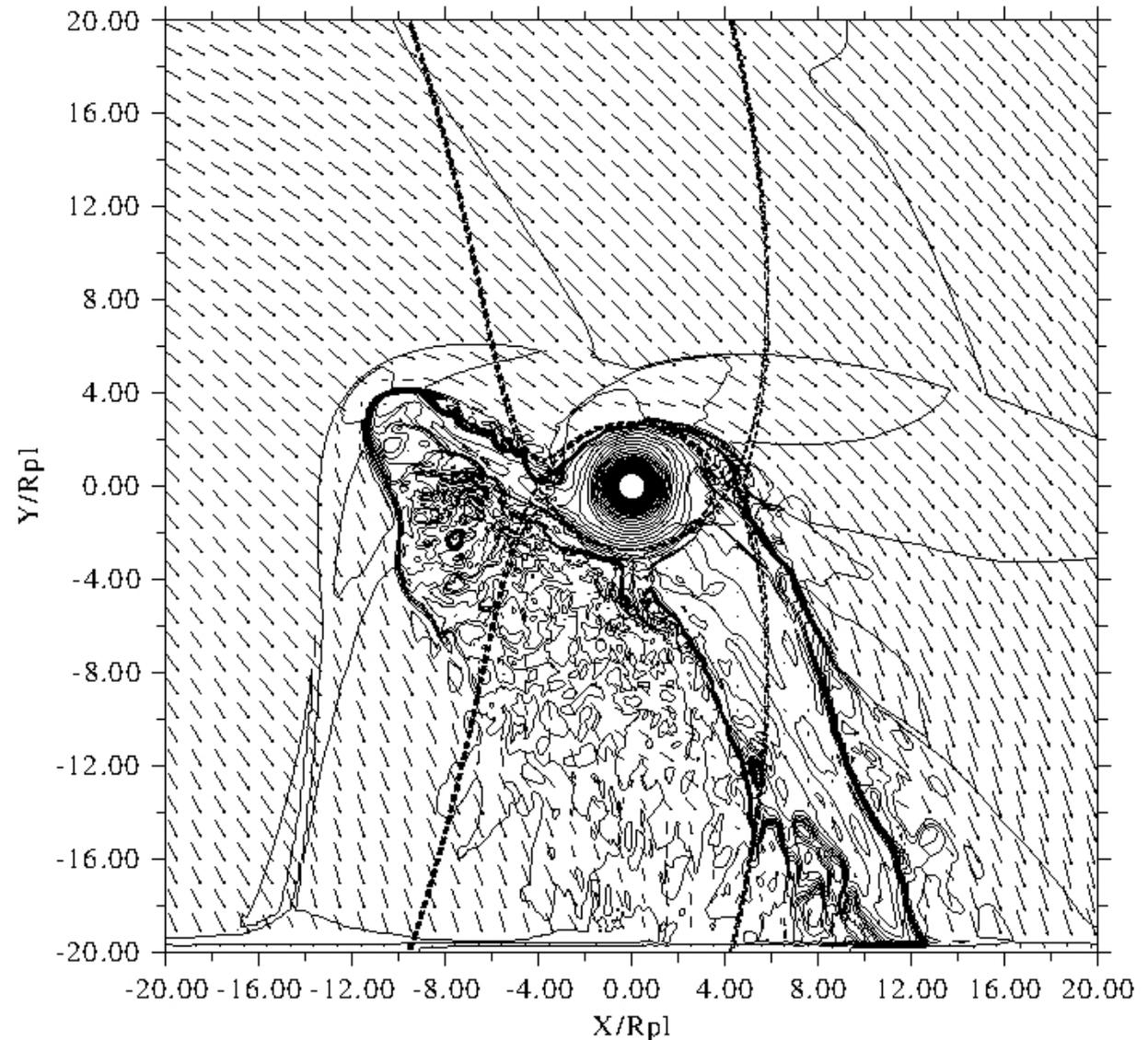


Замкнутая несферическая оболочка

Результаты моделирования



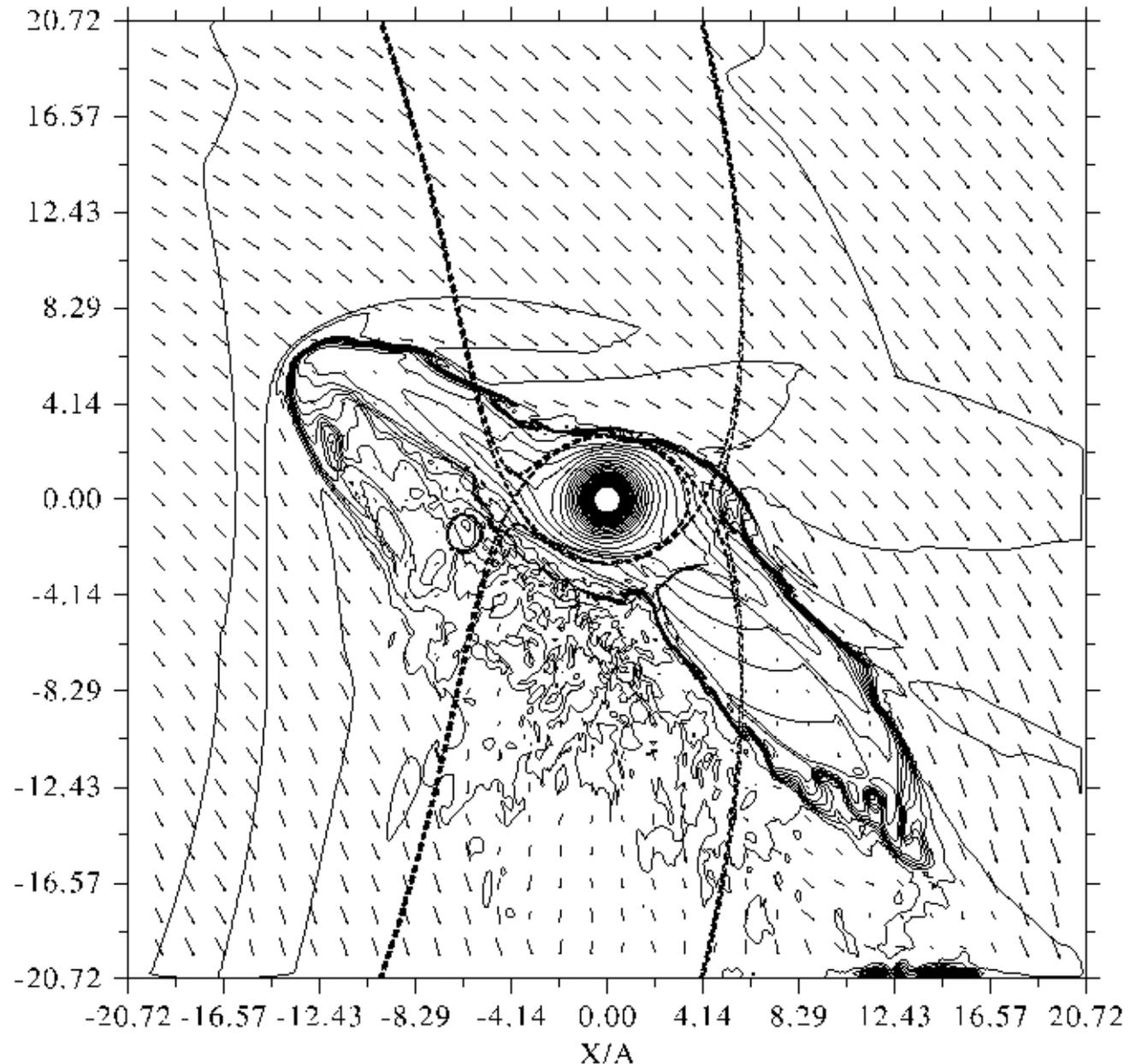
$T = 7500 \text{ K}$
 $n = 8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$



Замкнутая несферическая оболочка

Результаты моделирования

$T = 8000 \text{ K}$
 $n = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$



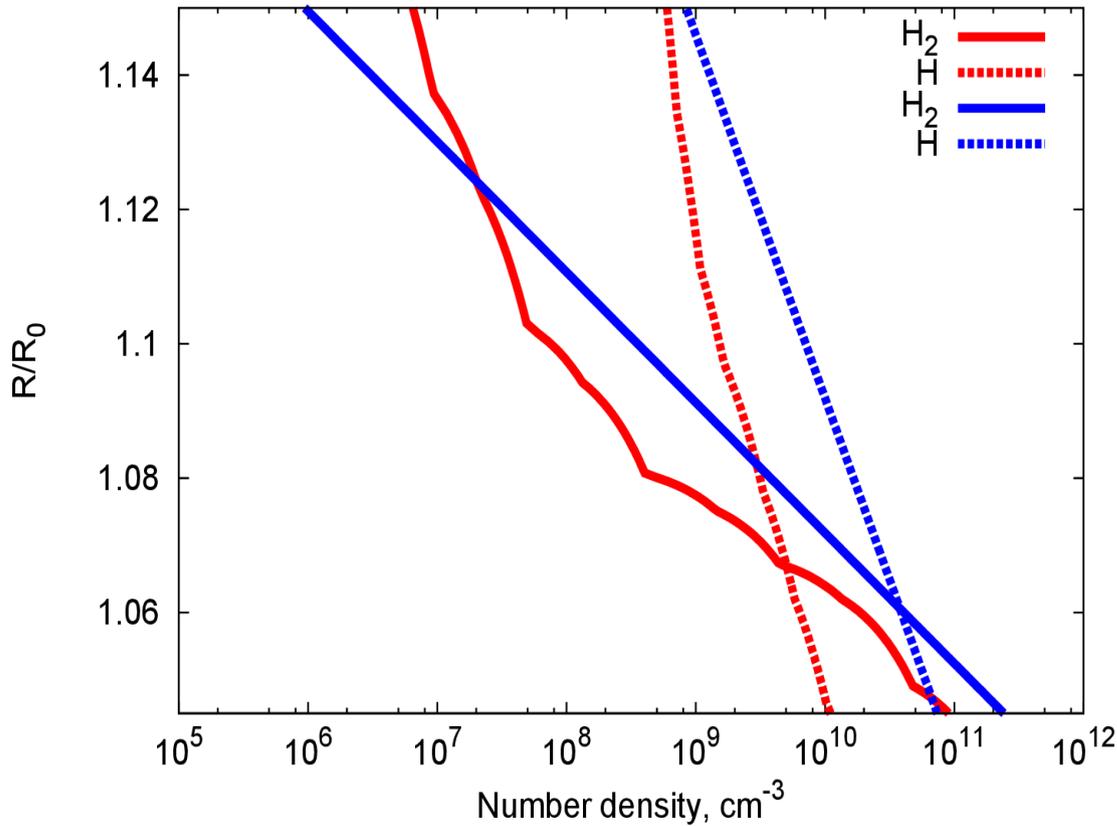
Незамкнутая оболочка

Промежуточные выводы

- Возможно существование нескольких типов оболочек «горячих юпитеров»: замкнутой сферической, замкнутой несферической и незамкнутой. Тип оболочки зависит от параметров атмосферы и звездного ветра
- Оболочки имеют различные наблюдательные проявления, таким образом определение типа оболочки может использоваться для определения параметров системы.
- Все три типа оболочек могут существовать в диапазоне параметров, оцененных для планеты HD 209458b.

Надтепловые фотоэлектроны в термосфере HD 209458b

Используемые модели атмосфер



- Две аэрономические модели термосферы:
- Yelle et al., 2004 (RY04)
- Garcia-Munoz et al., 2007 (GM07)

 RY04
 GM07

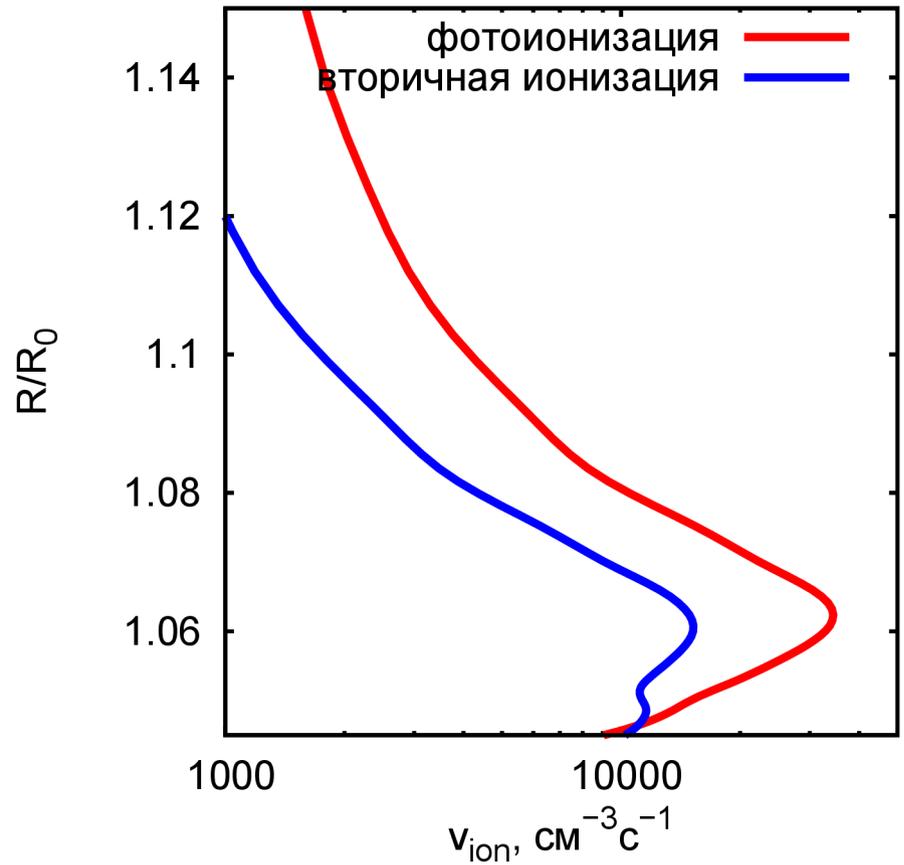
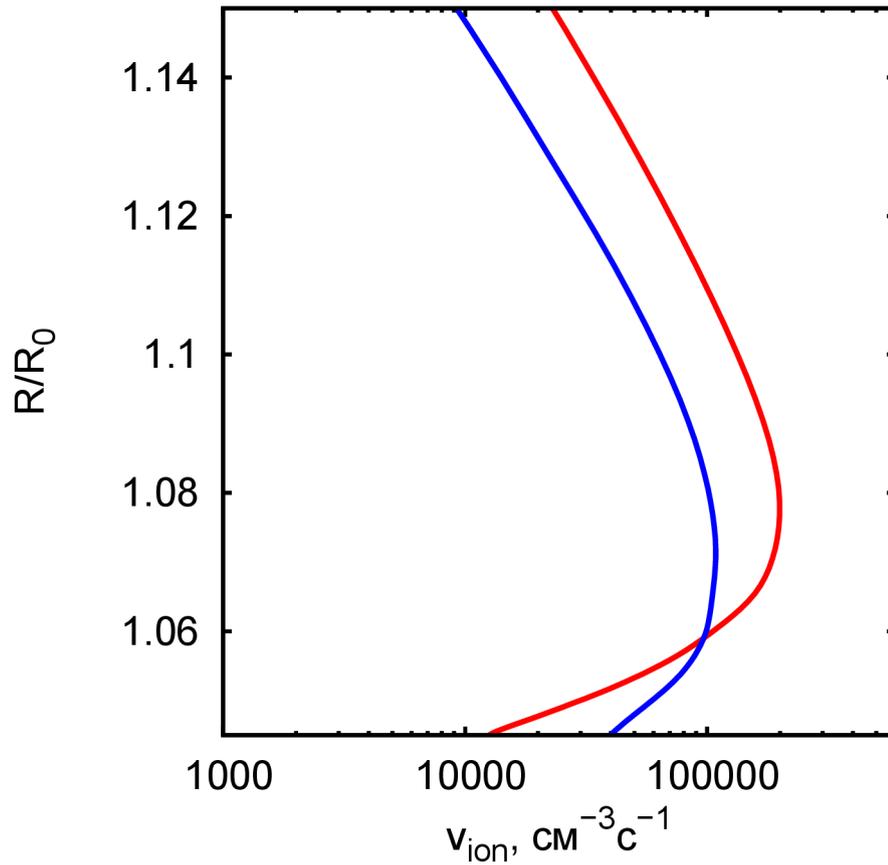
Расчет ионизационных процессов



Скорости фотоионизации и вторичной ионизации

Атмосфера GM07

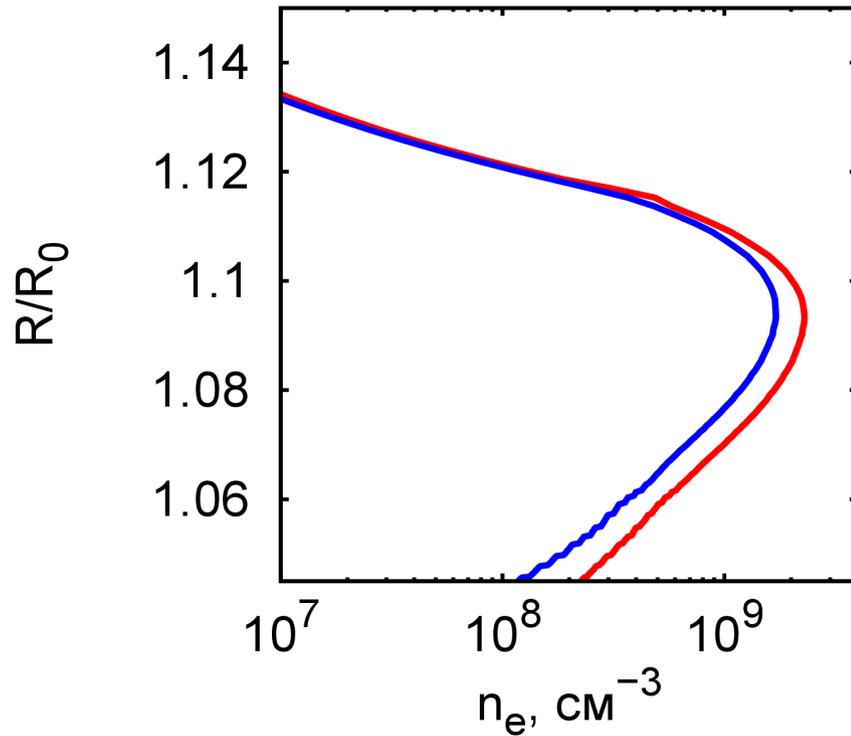
Атмосфера RY04



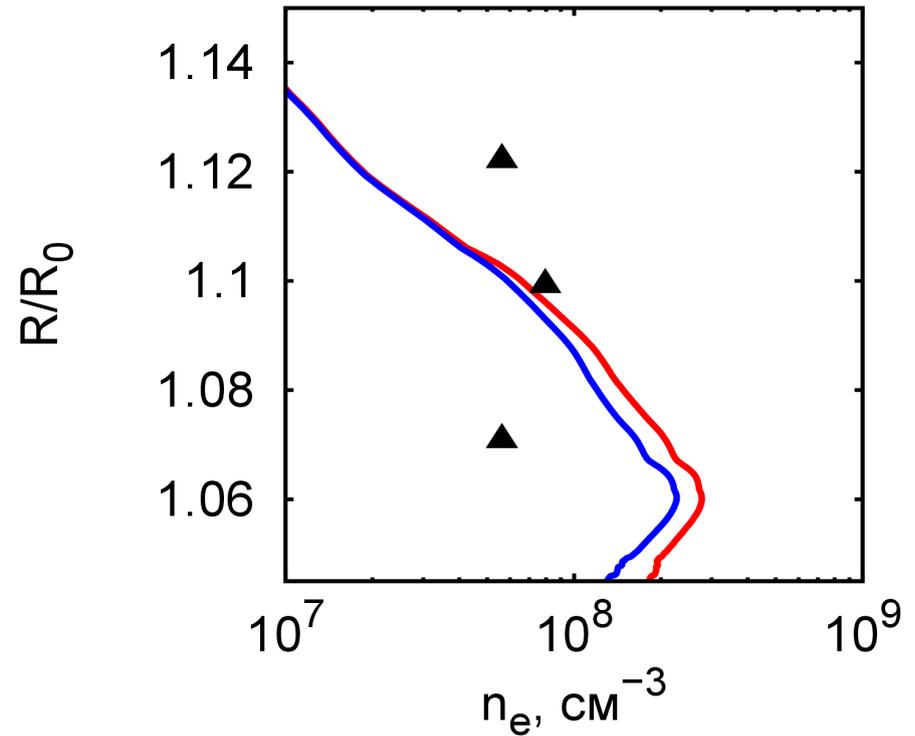
-  Фотоионизация
-  Вторичная ионизация

Концентрация электронов в атмосфере

Атмосфера GM07



Атмосфера RY04

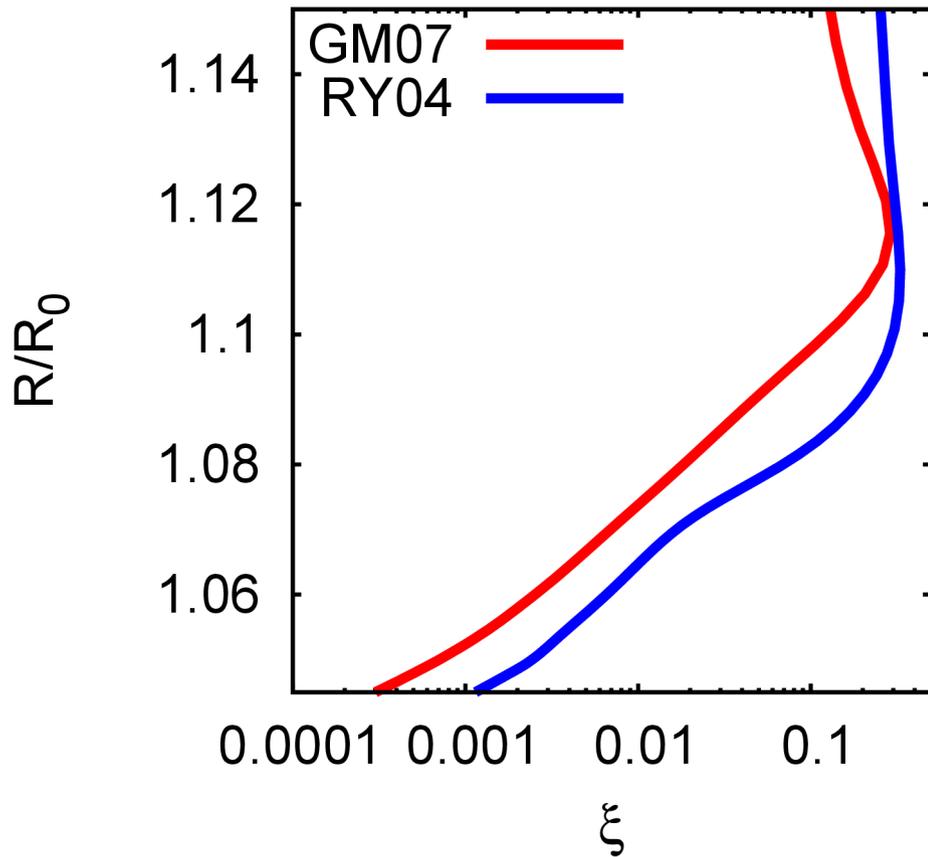


- с учетом фотоэлектронов
- без учета фотоэлектронов

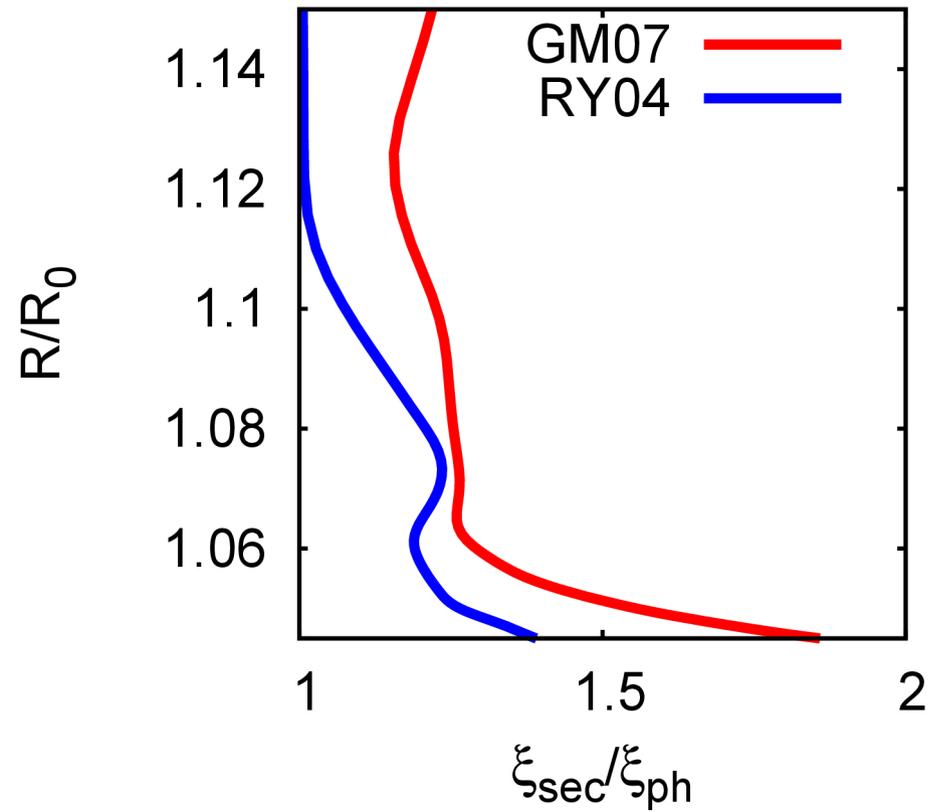
Результаты моделирования сравниваются с результатами модели Koskinen et al. 2010 (обозначены треугольниками)

Степень ионизации термосферы

Степень ионизации



Отношение



$$\xi = \frac{n_{el}}{2n_{H_2} + n_H + n_{H^+} + 2n_{H_2^+} + 3n_{H_3^+}}$$

Выводы



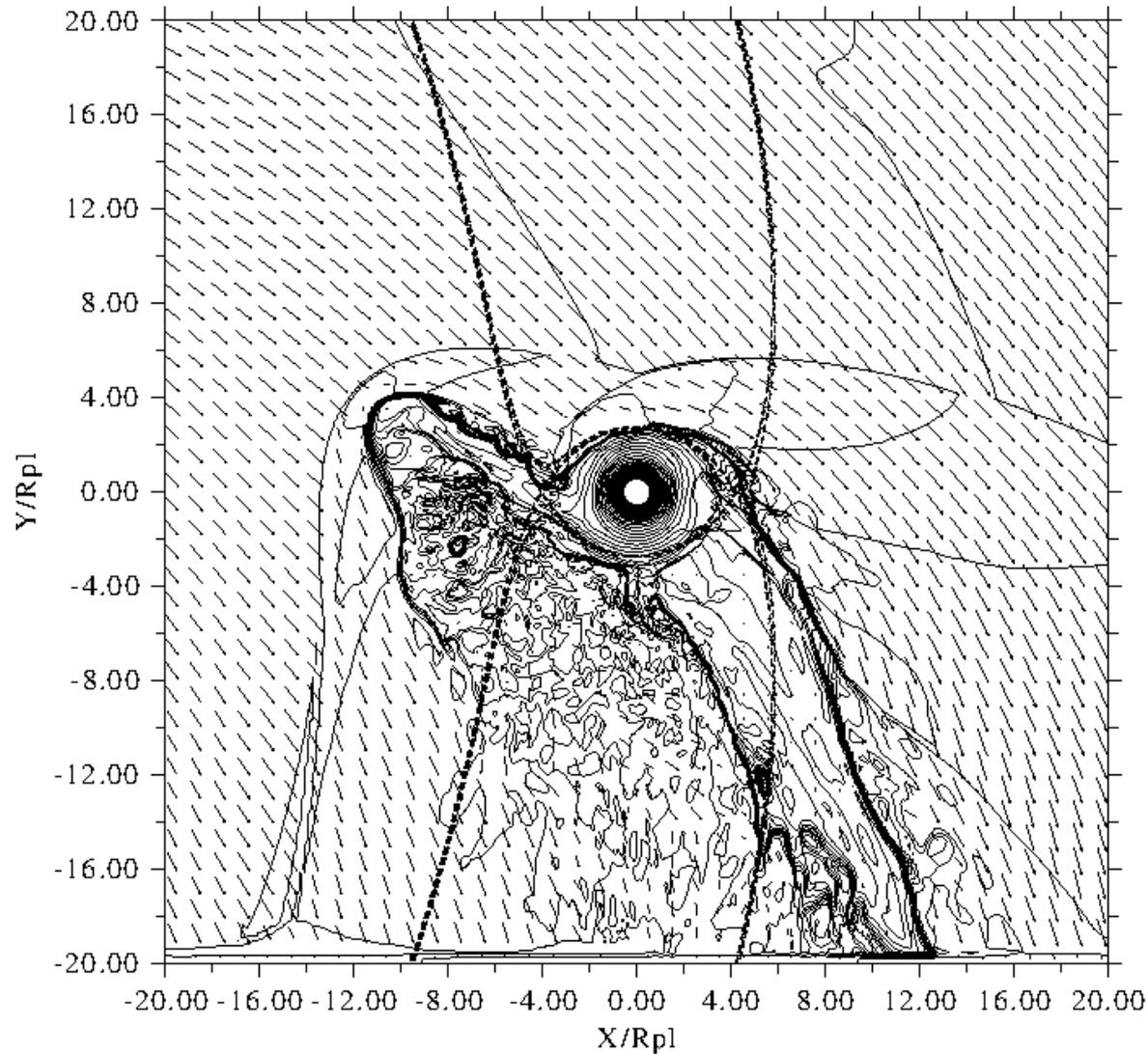
- Показана возможность существования у «горячих юпитеров» замкнутых сильно несферических оболочек. Такие оболочки формируются в результате переполнения полости Роша и начала истечения через точки L1 и L2. При этом динамическое давление звездного ветра прекращает активную потерю вещества атмосферы планеты через окрестности точек L1 и L2, благодаря чему оболочка становится стационарной и долгоживущей. Полученные в расчетах параметры оболочки соответствуют имеющимся наблюдениям.
- Введена классификация газовых оболочек экзопланет класса «горячий юпитер». Установлено, что вокруг таких экзопланет могут формироваться оболочки трех типов: сферическая замкнутая, несферическая замкнутая и открытая. На примере типичного «горячего юпитера», HD 209458b, показано, что все три типа атмосфер могут существовать в диапазоне параметров, оцененных в настоящее время для этой планеты.
- Показано, что формирование несферической оболочки и отошедшей ударной волны является причиной появления раннего начала транзита в полосах УФ-диапазона и аномально большой глубины транзита в спектральных линиях, что наблюдается у планет HD 209458b, WASP-12b.
- Впервые рассчитаны скорости ионизации термосферы экзопланеты HD 209458b потоком фотоэлектронов. Установлено, что скорость ионизации, вызванной фотоэлектронами сравнима, а на небольших высотах превосходит скорость фотоионизации. Таким образом, показано, что учет надтепловых частиц необходим для корректного моделирования верхних атмосфер «горячих юпитеров».

Публикации по теме работы:

- Bisikalo, D.V., Kaygorodov, P. V., Ionov, D. E., Shematovich, V. I., Lammer, H., Fossati, L. Simulation of the interaction between WASP-12b and its host star. // The Astrophysical Journal. 2013. 764. 19.
- Д. Э. Ионов, Д. В. Бисикало, В. И. Шематович, Б. Хубер Степень ионизации термосферы экзопланеты HD209458b. // Астрономический вестник
- Д. В. Бисикало, П. В. Кайгородов, Д. Э. Ионов, В. И. Шематович Типы газовых оболочек экзопланет, относящихся к классу «горячих юпитеров». // Астрономический журнал. 2013. т. 90. с. 779-790.
- Ionov, D. E., Bisikalo, D. V., Kaygorodov, P. V., Shematovich, V. I. Gas dynamic simulation of the star-planet interaction using a binary star model. // Proceedings of the IAU Symposium. 2012. 282. с. 545-546.
- Bisikalo, D.V., Kaygorodov, P. V., Ionov, D. E. Three-dimensional Gas Dynamic Simulations of the Interaction Between the Stellar Wind and Non-magnetized Exoplanets // ASP Conference Series, Vol. 474. 2013. с. 41-46
- Д. Э. Ионов, Д. В. Бисикало, П. В. Кайгородов, В. И. Шематович Газодинамическое моделирование взаимодействия атмосферы экзопланеты со звездным ветром. // Физика космоса: Труды 41-ой Международной студенческой научной конференции. 2012. с. 241
- Д. Э. Ионов, Д. В. Бисикало, В. И. Шематович Степень ионизации термосферы экзопланеты HD209458b. // Физика космоса: Труды 41-ой Международной студенческой научной конференции. 2013. с. 159.

Спасибо!

Результаты моделирования



Замкнутая несферическая оболочка

