

Динамика вещества в тесных двойных звездах

Дмитрий Валерьевич Бисикало

Кафедра нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике (ак. Е.П.Велихов)

5.Общие сведения о тесных двойных звездах.

6.Наблюдательные проявления элементов структуры течения в тесных двойных звездах.

7.Численное моделирование газовых оболочек экзопланет.

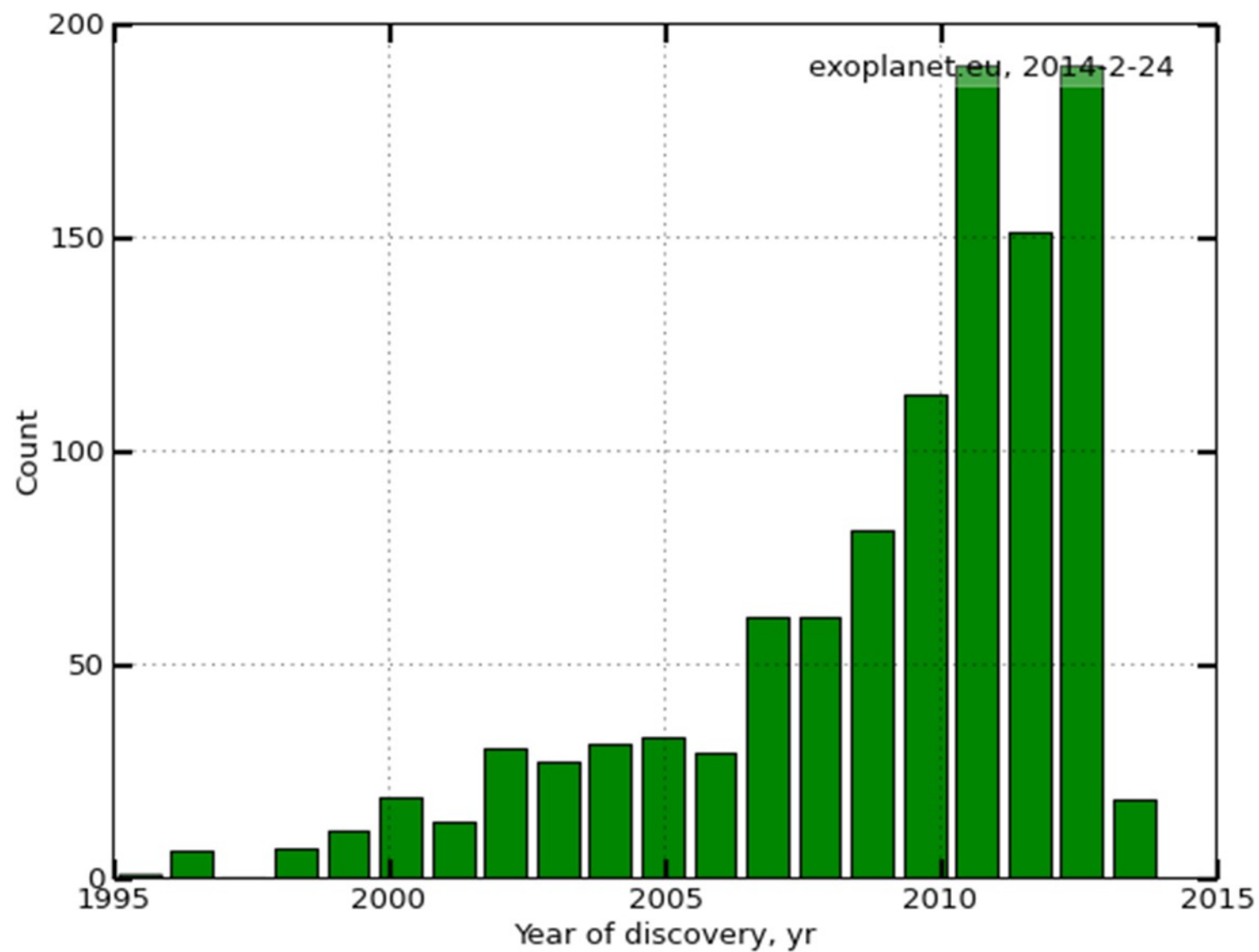
Общие сведения об экзопланетах

**В подготовке этой части лекции были
использованы материалы, предоставленные**

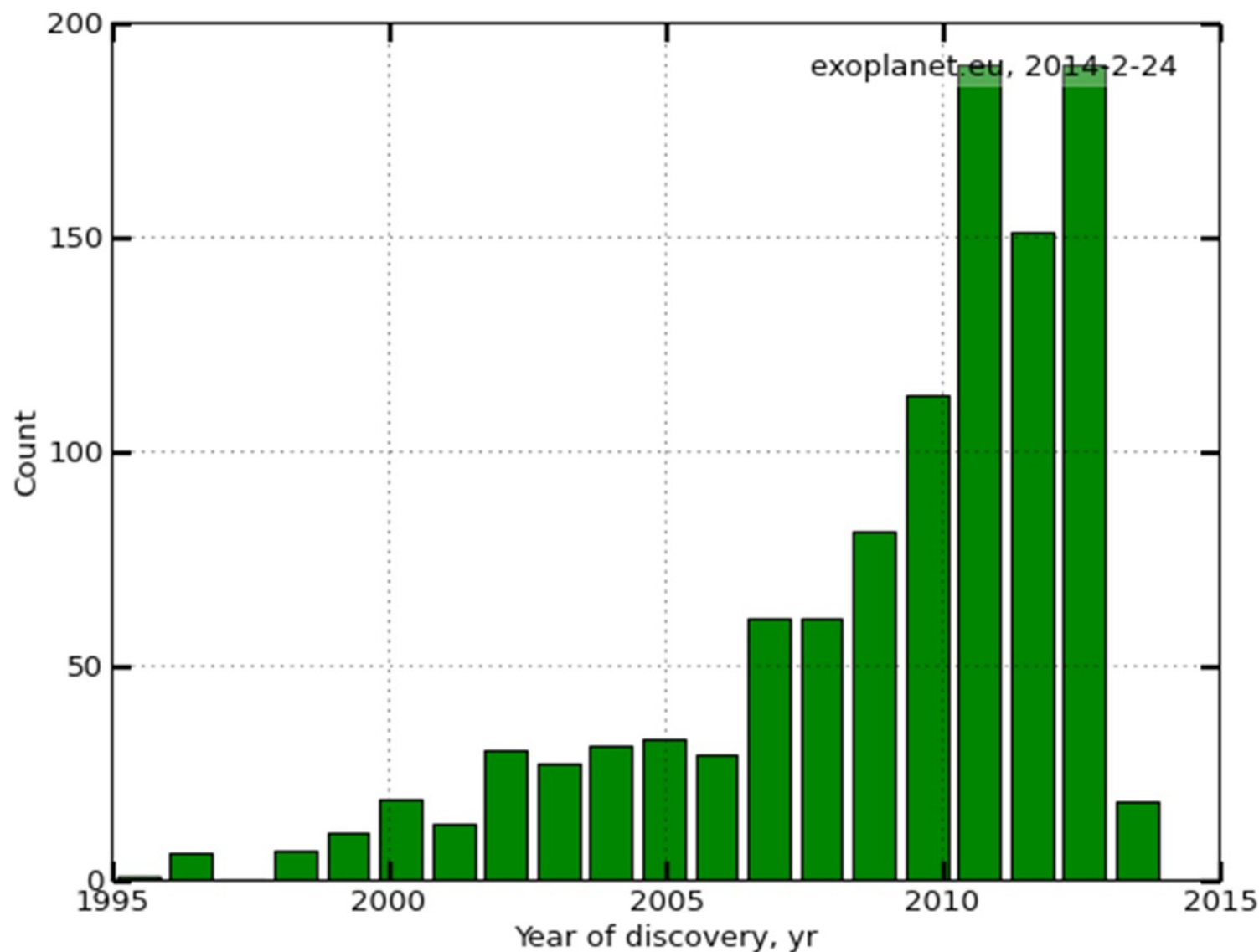
Л.М.Зеленым (ИКИ РАН)

и

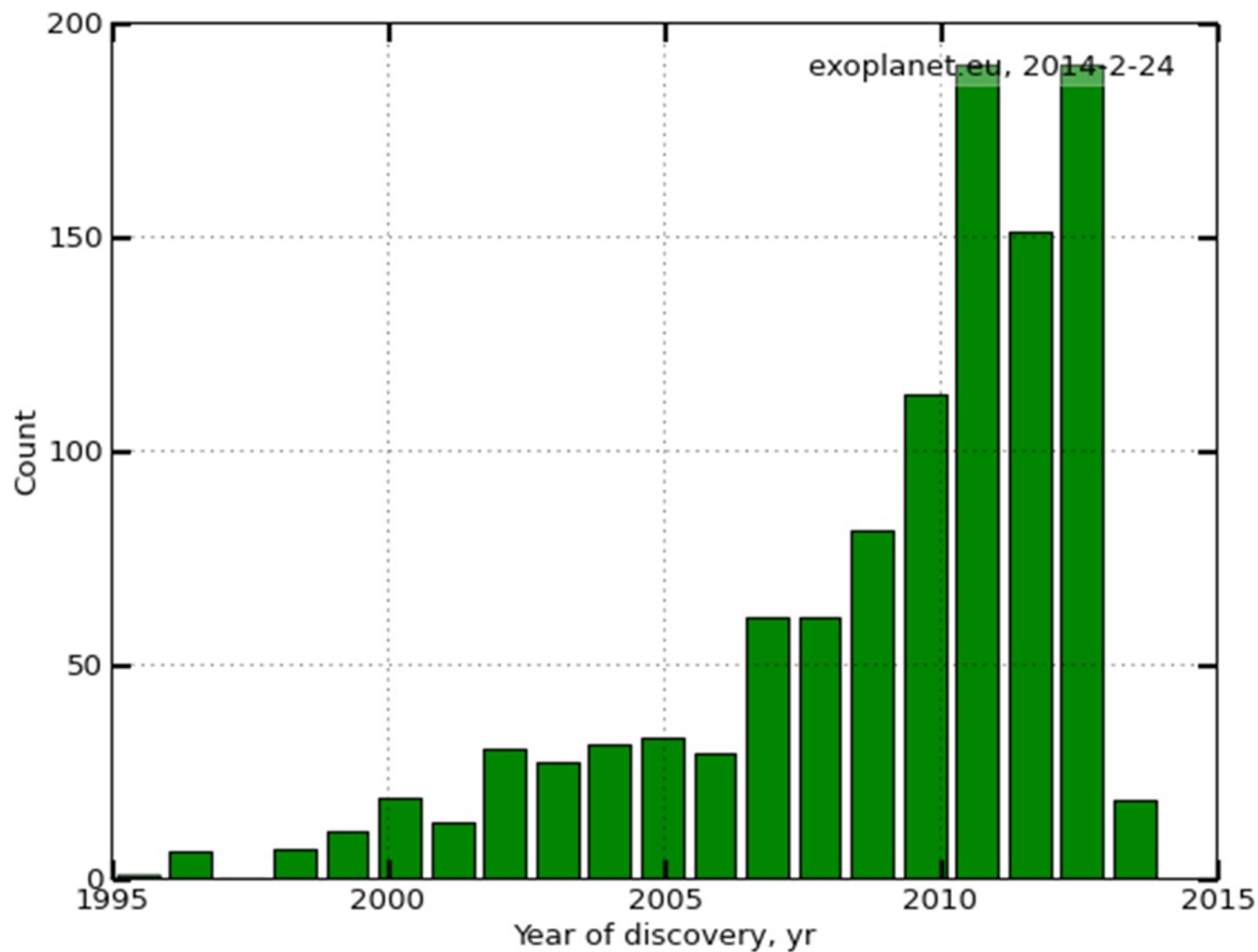
Д.Э.Ионовым (ИНАСАН)



Число открытых планет по годам.



Об открытии первой экзопланеты у пульсара PSR 1257+12 было объявлено в 1992 г.. Первая экзопланета у звезды главной последовательности Рег51β была открыта в 1995 году Майором и Квелоцем.



К настоящему времени (24.02.2014) подтверждено существование **свыше 1077 планет в более чем 814 звездных системах.**

Космические миссии

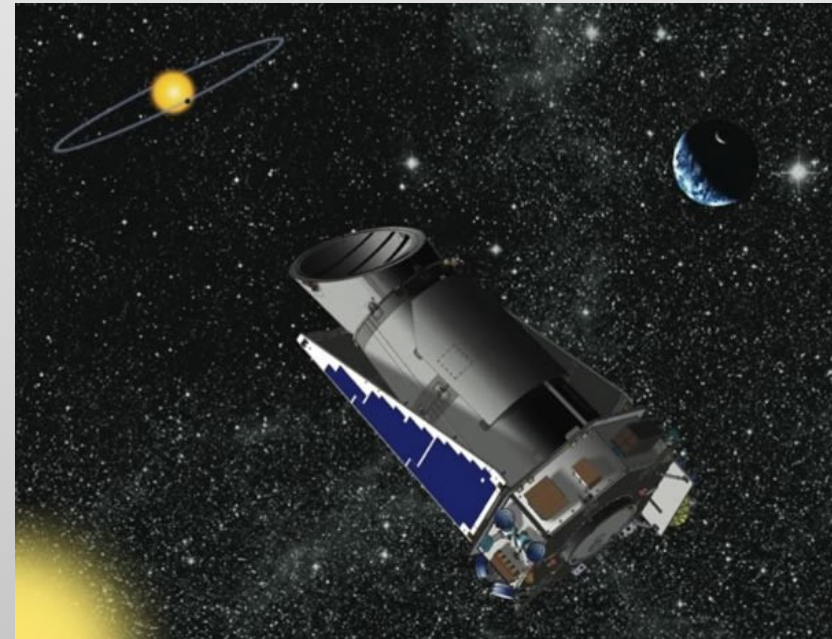
COROT

- Запущен в 2006 г. - закончил миссию 24 июня 2013 г.
- Открыл 27 экзопланет



Kepler

- Запущен в 2009 г. - 11.05.2013 вышел из строя.
- Открыл более 2500 кандидатов в экзопланеты.
- Существование 134 (705?) из них подтверждено.



GAIA

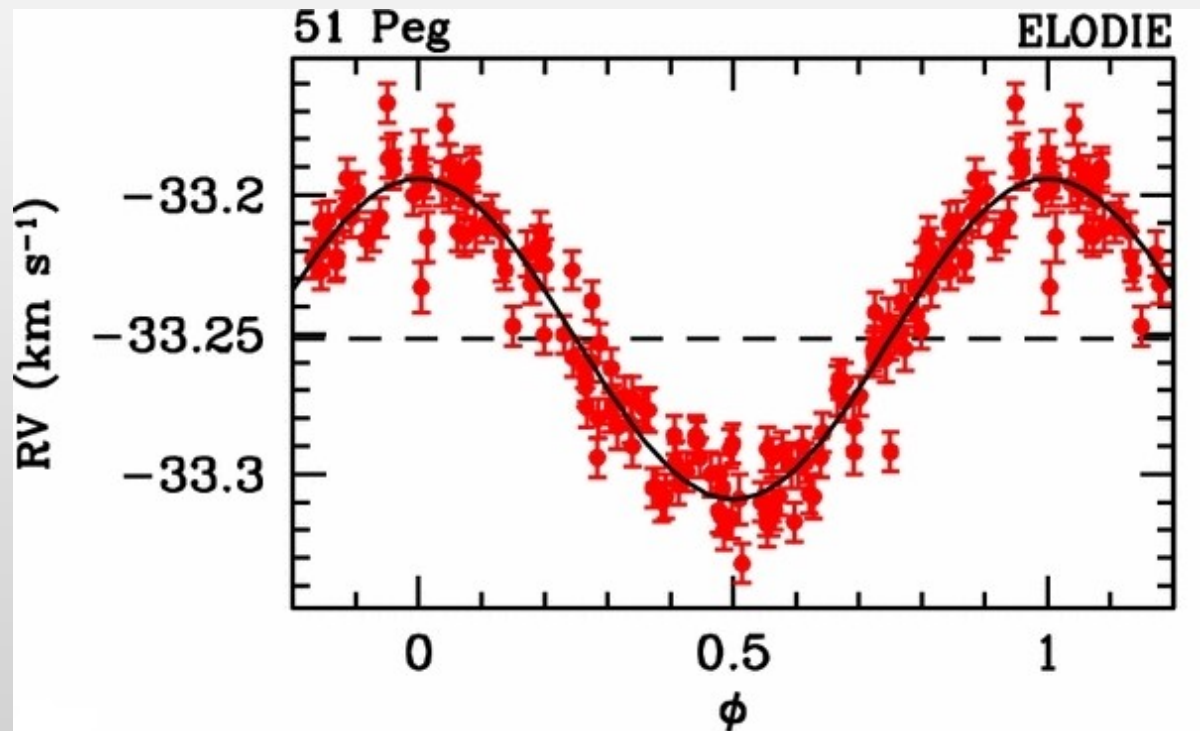
- Запущен 19 декабря 2013 г.
- Откроет около ста тысяч экзопланет?

Методы обнаружения экзопланет

- **Метод измерения лучевых скоростей родительских звезд (549).**
- **Транзитный метод (437).**
- **Метод прямого получения изображений экзопланет (47).**
- **Метод микролинзирования (27).**
- **Метод тайминга (14).**

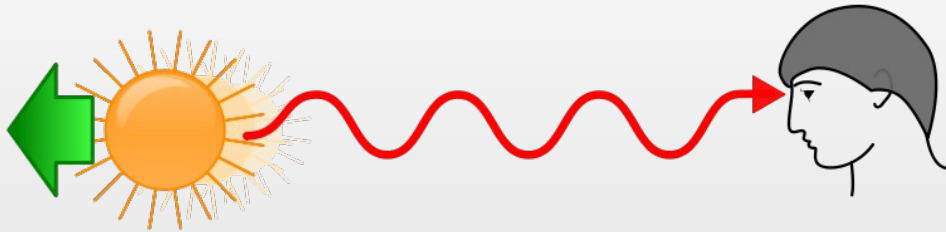
Метод лучевых скоростей

- Для обнаружения планеты с массой Юпитера на малом расстоянии от звезды с массой Солнца необходимо измерение скорости звезды с точностью около 10 м/с.
- Для обнаружения планеты с параметрами Земли необходима точность в несколько см/с.

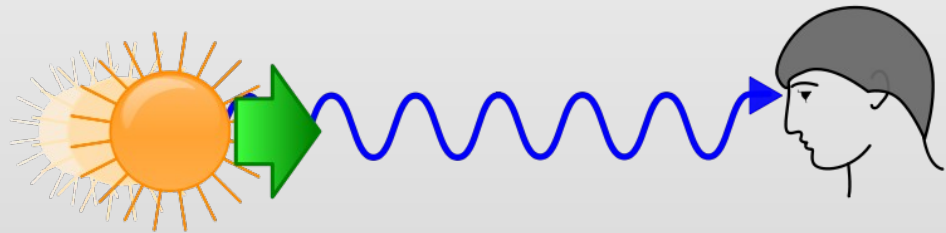


Кривая лучевых скоростей звезды Peg51

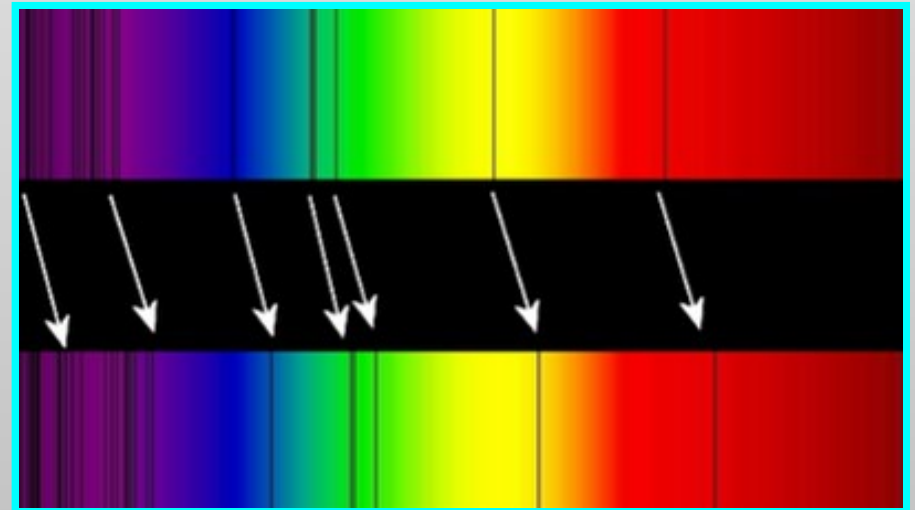
Эффект Доплера



Точность измерения ~ 1 м/с!



Легче найти планету с
большой массой рядом
со звездой



Прохождения планет по дискам звезд *Метод транзитов*

~40% всех открытых экзопланет

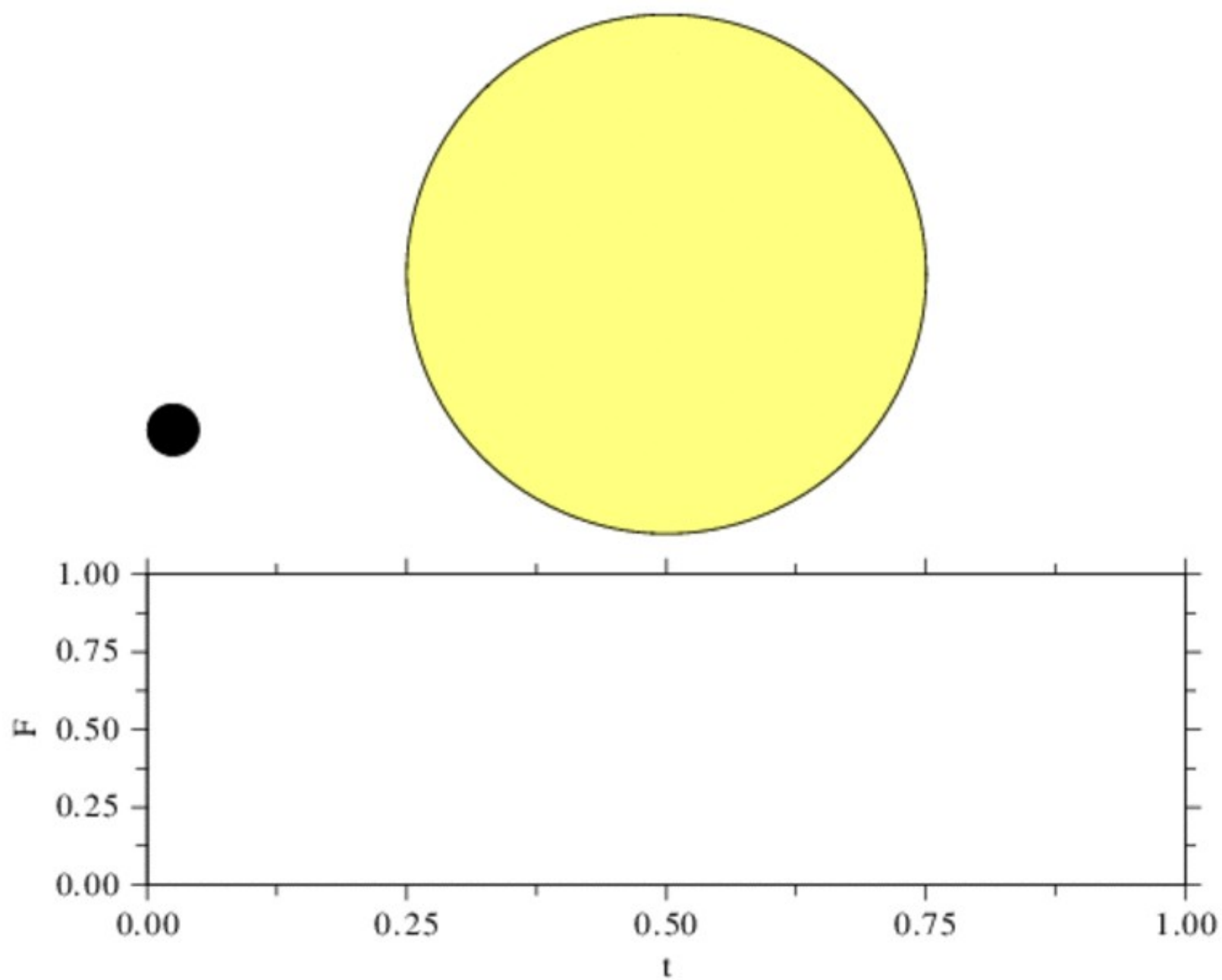


Венера на диске Солнца

8 июня 2004 года

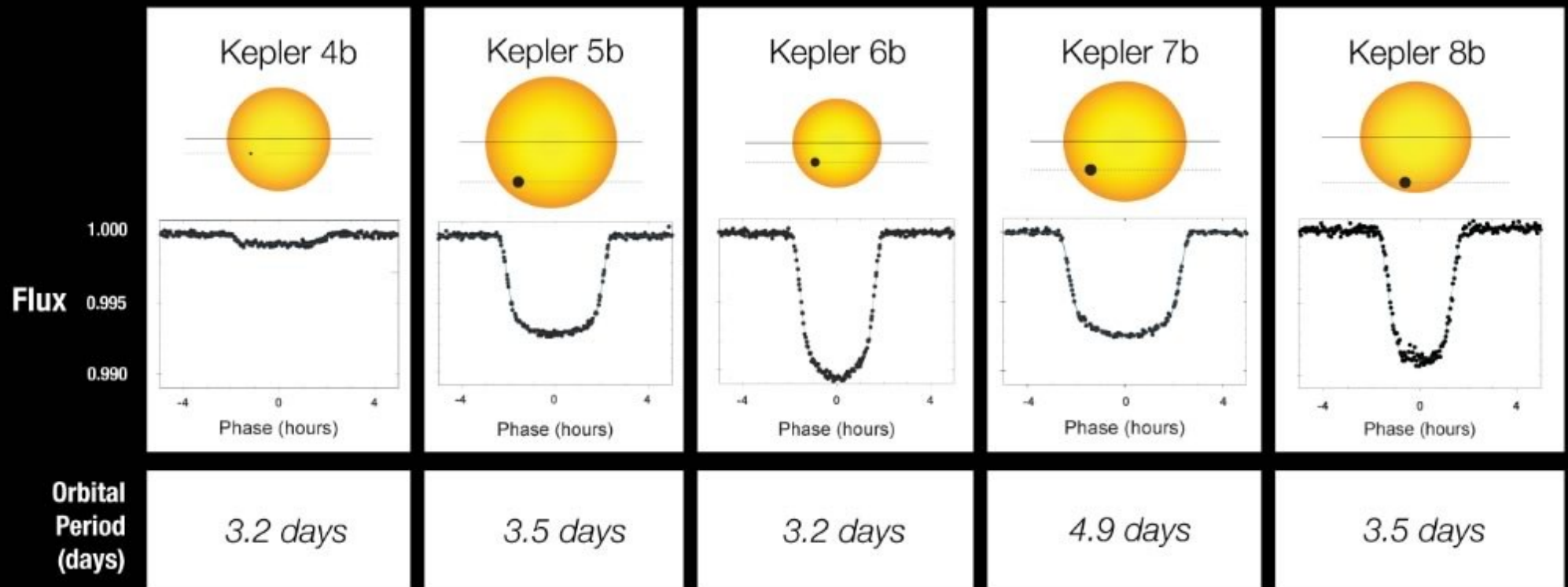
6 июня 2012 года

Следующий раз —
декабрь 2117 г!

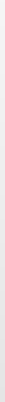


Кривые блеска звезд, наблюдаемых космическим телескопом КЕПЛЕР

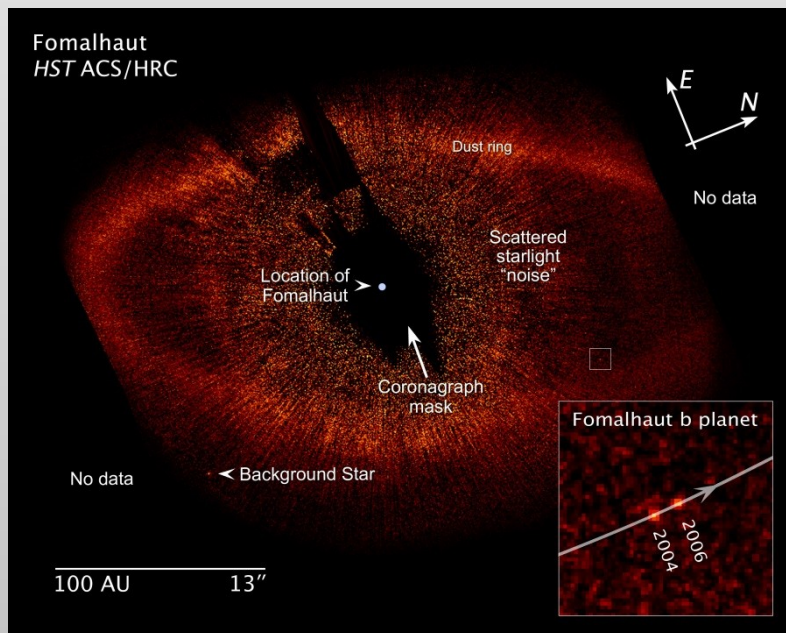
Transit Light Curves



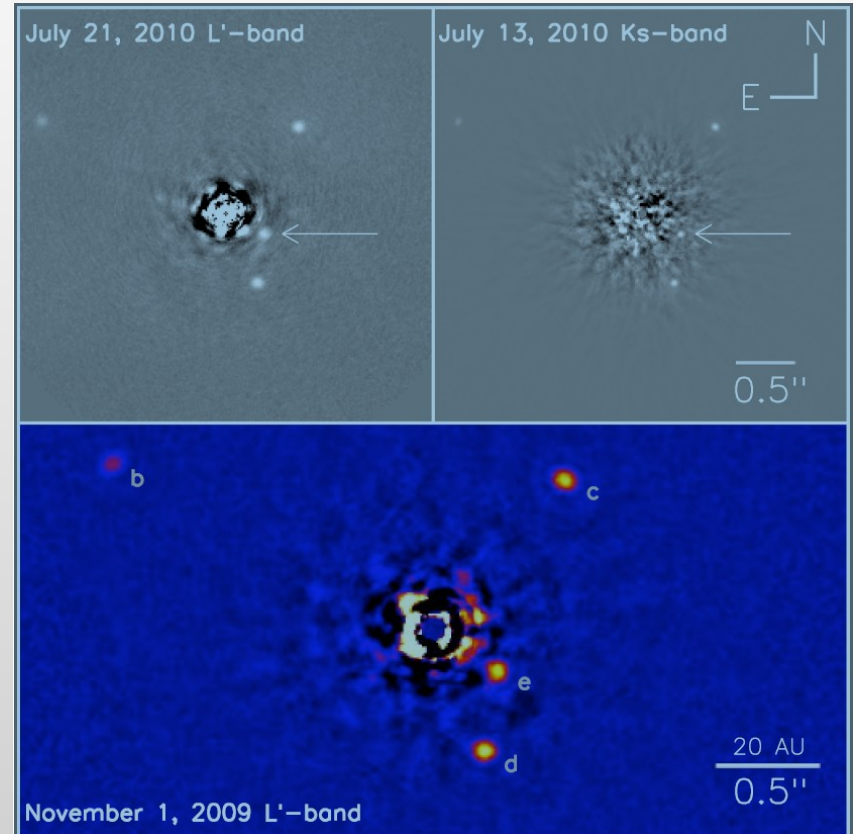
Прямое наблюдение



2M1207 b - первая



Fomalhaut b

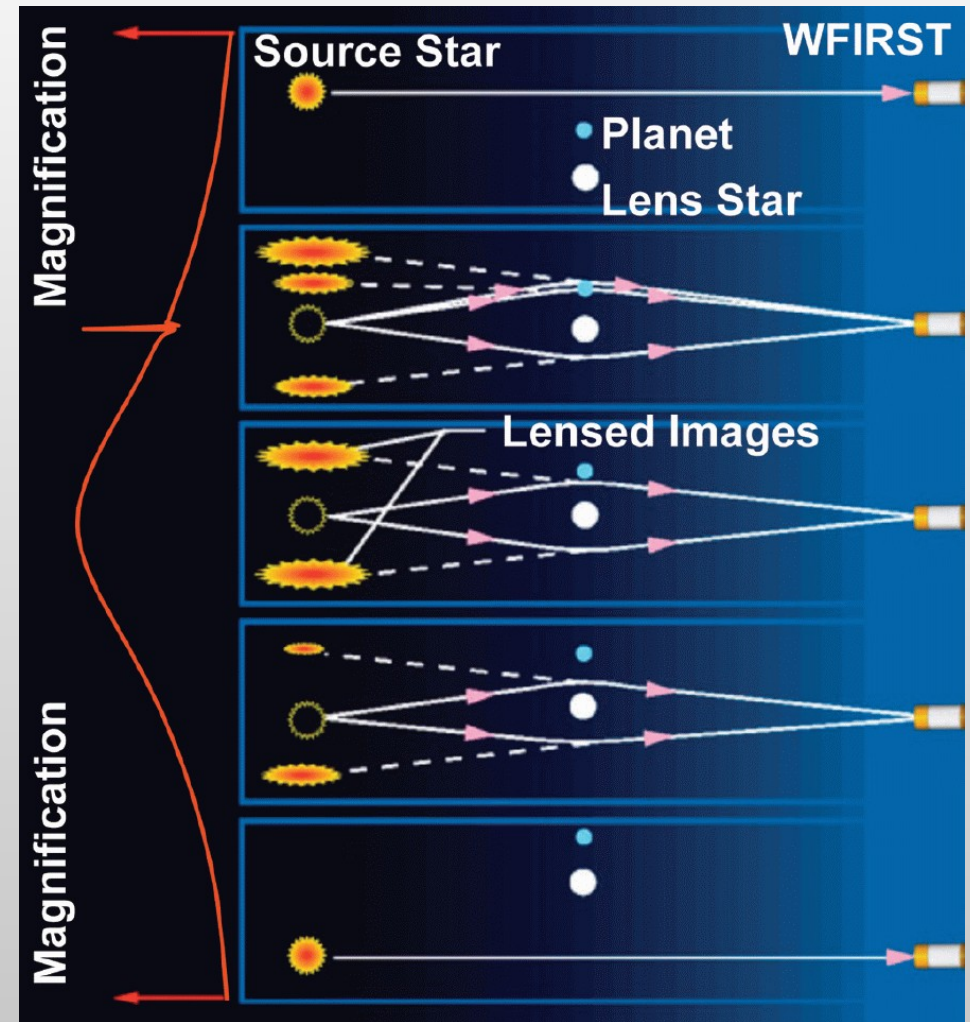


Система HR 8799

На 24.02.2014 таким методом
открыто 47 планет в 43 системах

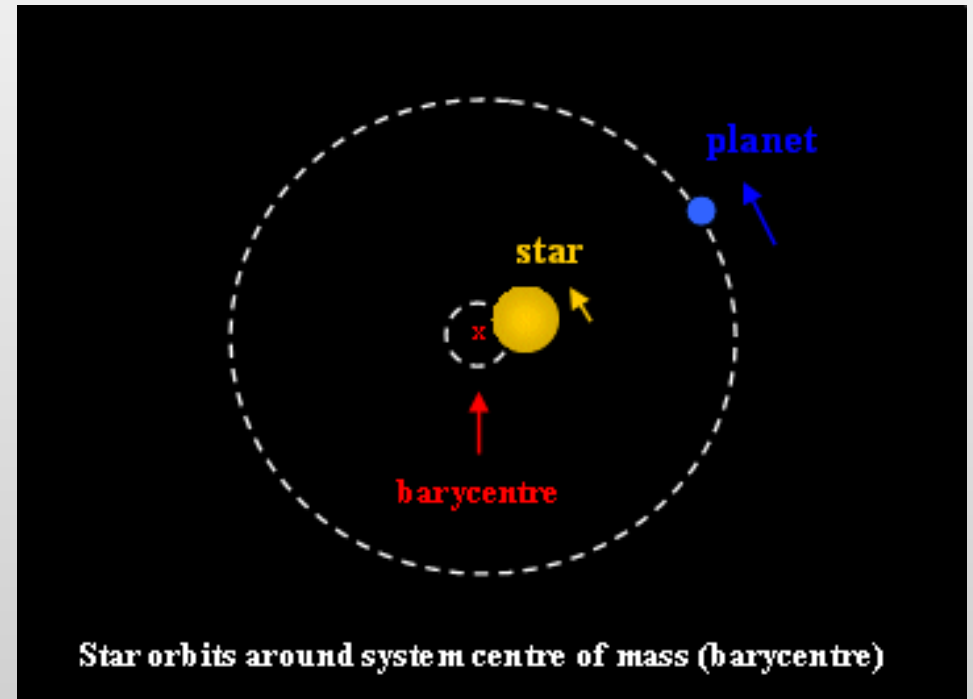
Микролинзирование

- Микролинзирование — единственный метод для обнаружения планет в других галактиках.
- Обнаружено 27 планет в 25 системах.
- Обнаружена самая удаленная планета — MOA-2011-BLG-322 b, 7740 парсек
- Недостатки: уникальность событий микролинзирования.

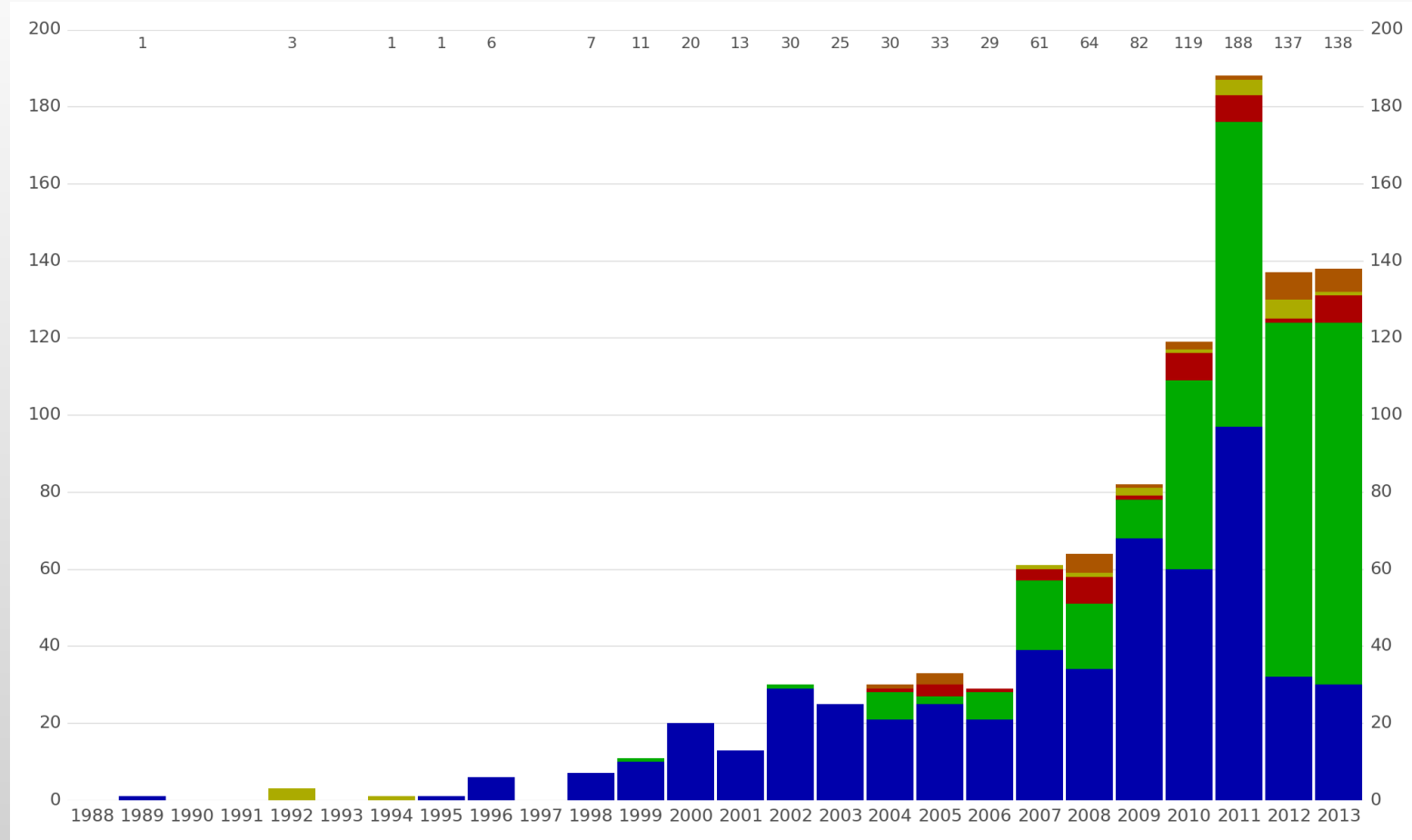


Астрометрический метод

- Основан на точном определении положения звезды и поиска ее вращения вокруг центра масс системы.
- Пока этим методом обнаружено всего 3 планеты
- Однако GAIA должна обнаружить таким образом многие тысячи планет.



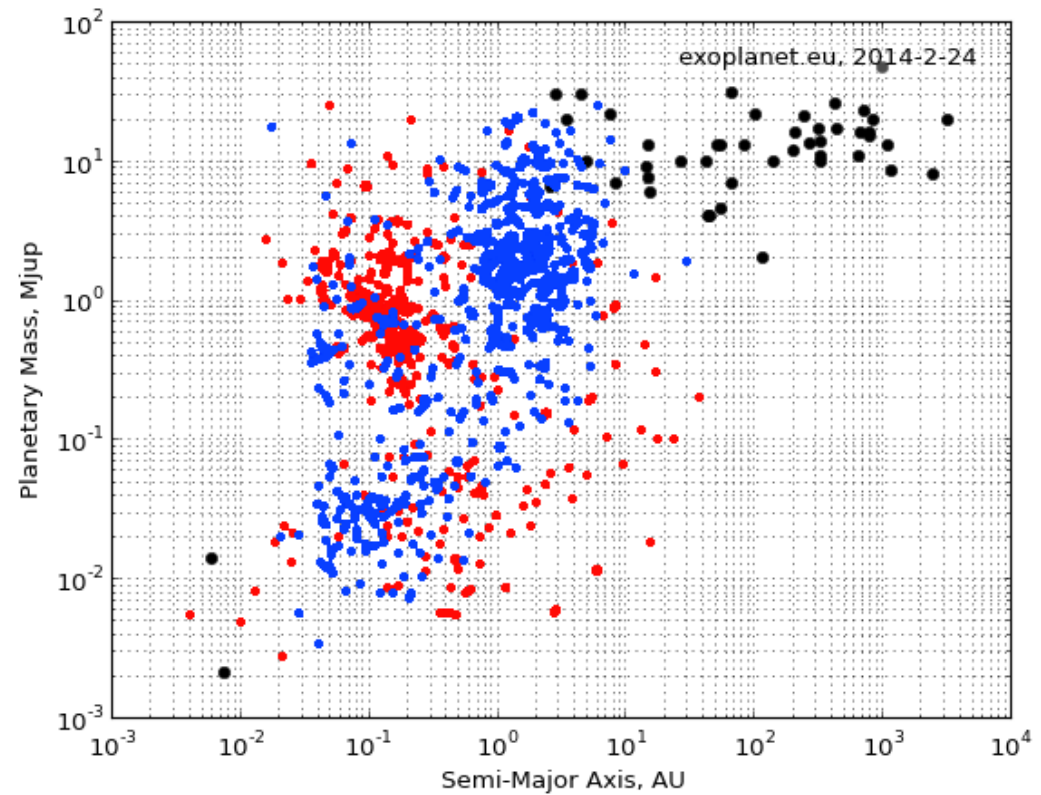
Сравнение методов



- Зеленый - транзит
- Синий — метод лучевых скоростей
- Красный — прямое наблюдение
- Оранжевый — микролинзирование
- Желтый - тайминг

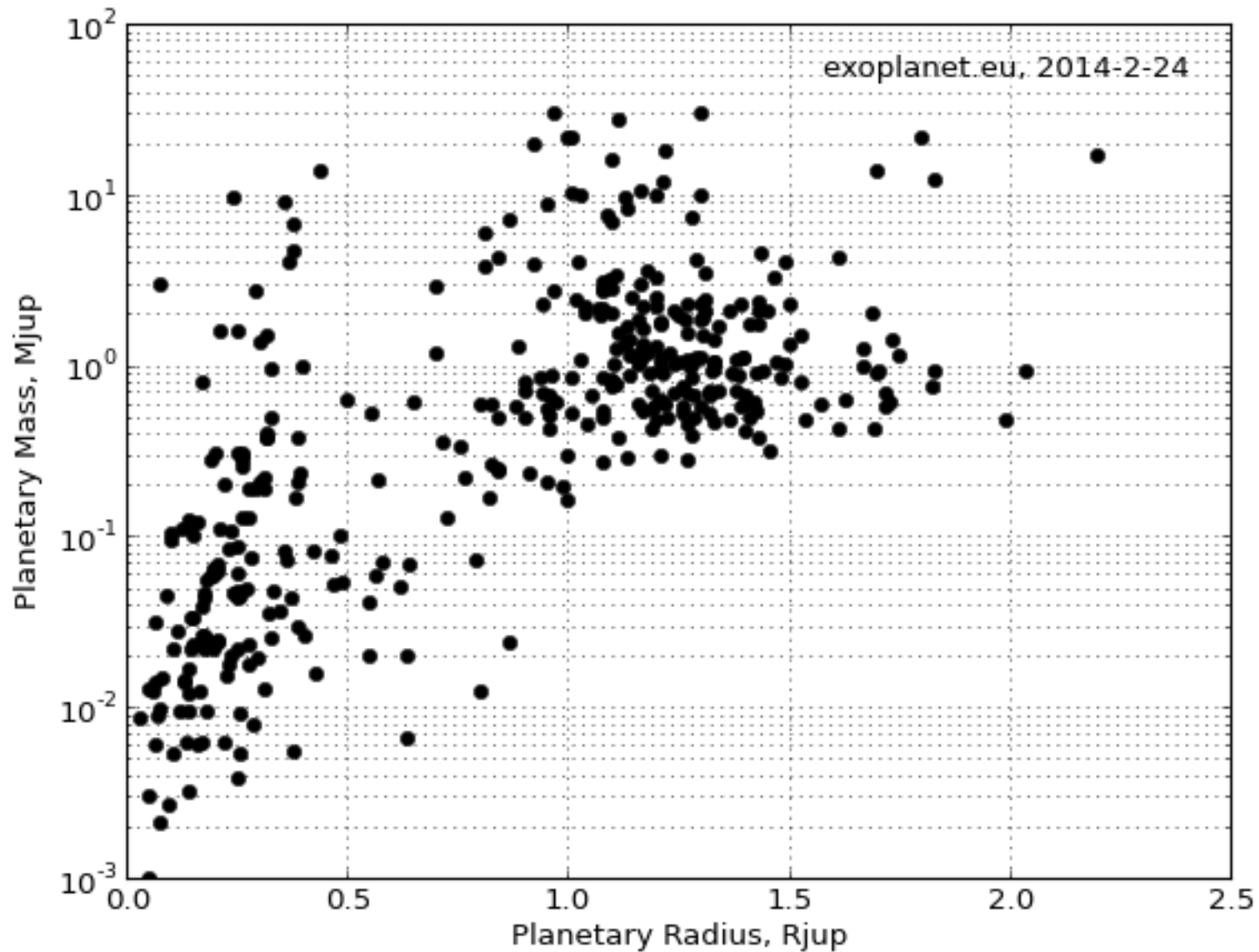
Эффекты селекции разных методов

- МЛС: вероятность открытия тем выше, чем больше масса и чем меньше большая полуось
- Транзит: вероятность открытия тем выше, чем меньше большая полуось
- Астрометрия: вероятность открытия тем выше, чем больше масса и чем больше большая полуось
- Прямое обнаружение: вероятность открытия тем выше, чем больше размер и чем больше большая полуось

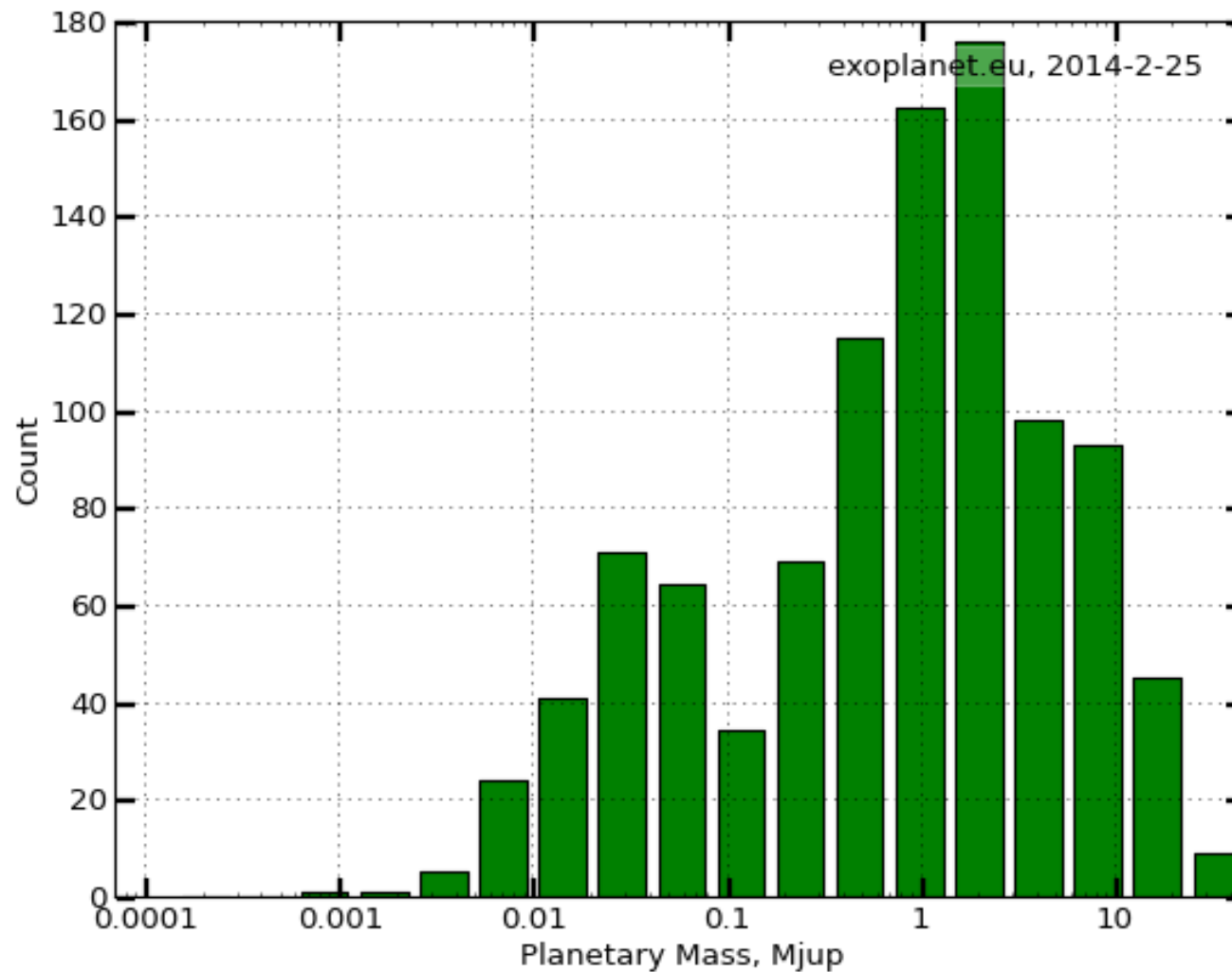


красный — транзитный метод,
синий — МЛС,
черный — прямое наблюдение.

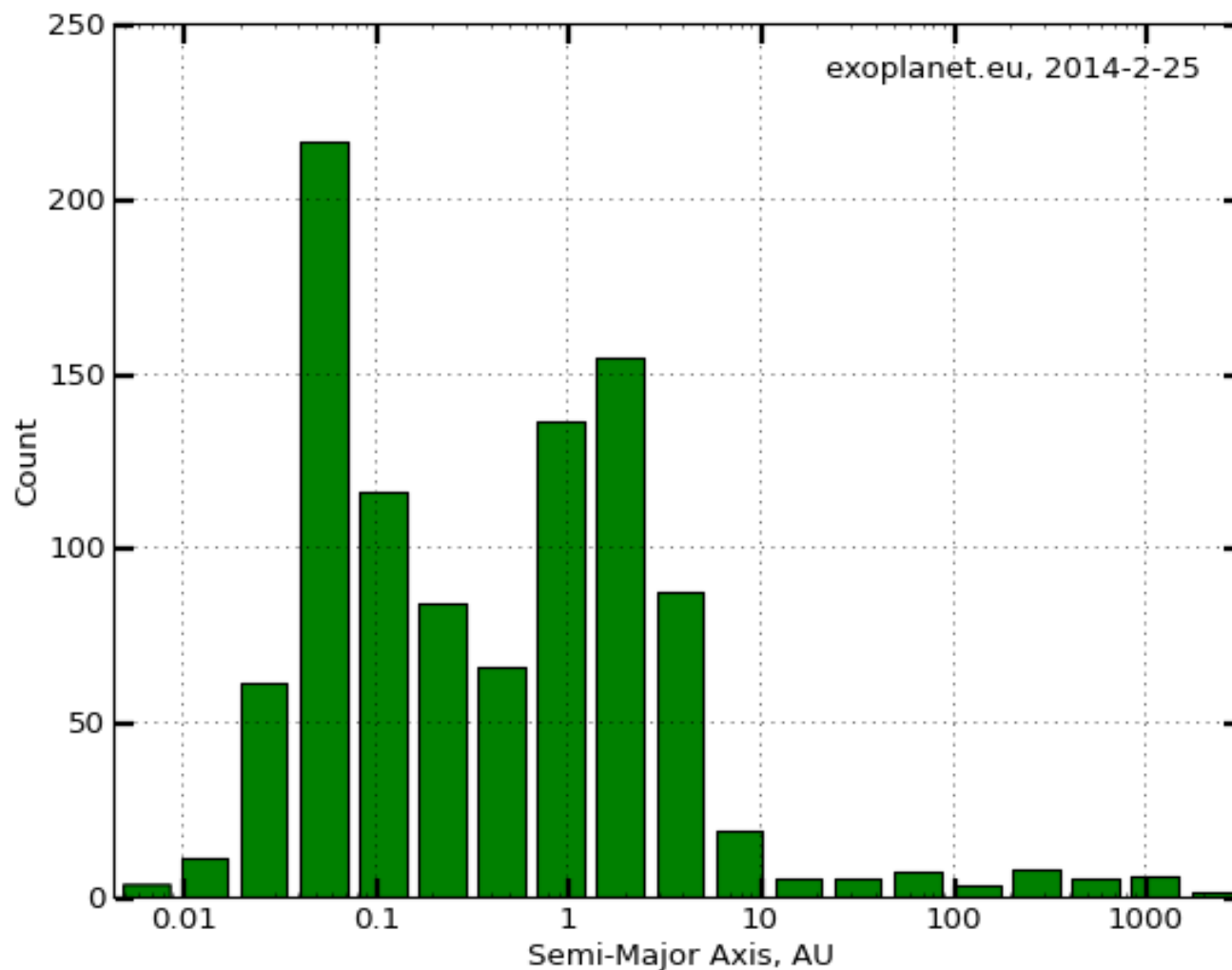
Распределение масса-радиус



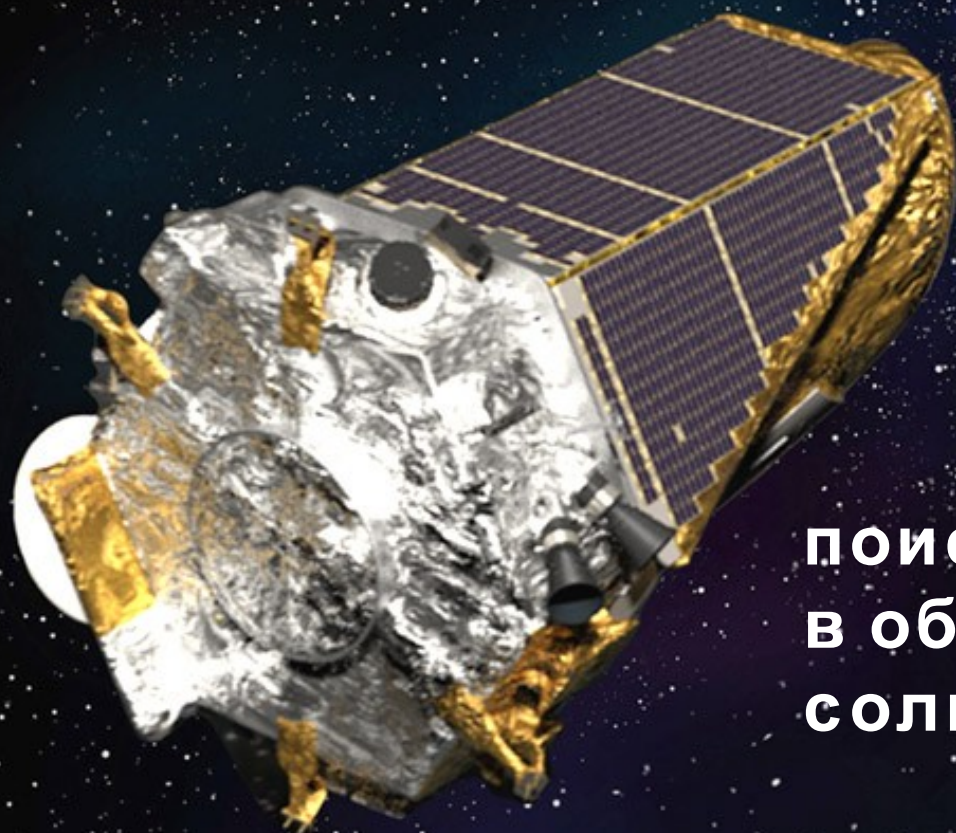
Зависимость числа планет от их массы



Зависимость числа планет от размера большой полуоси

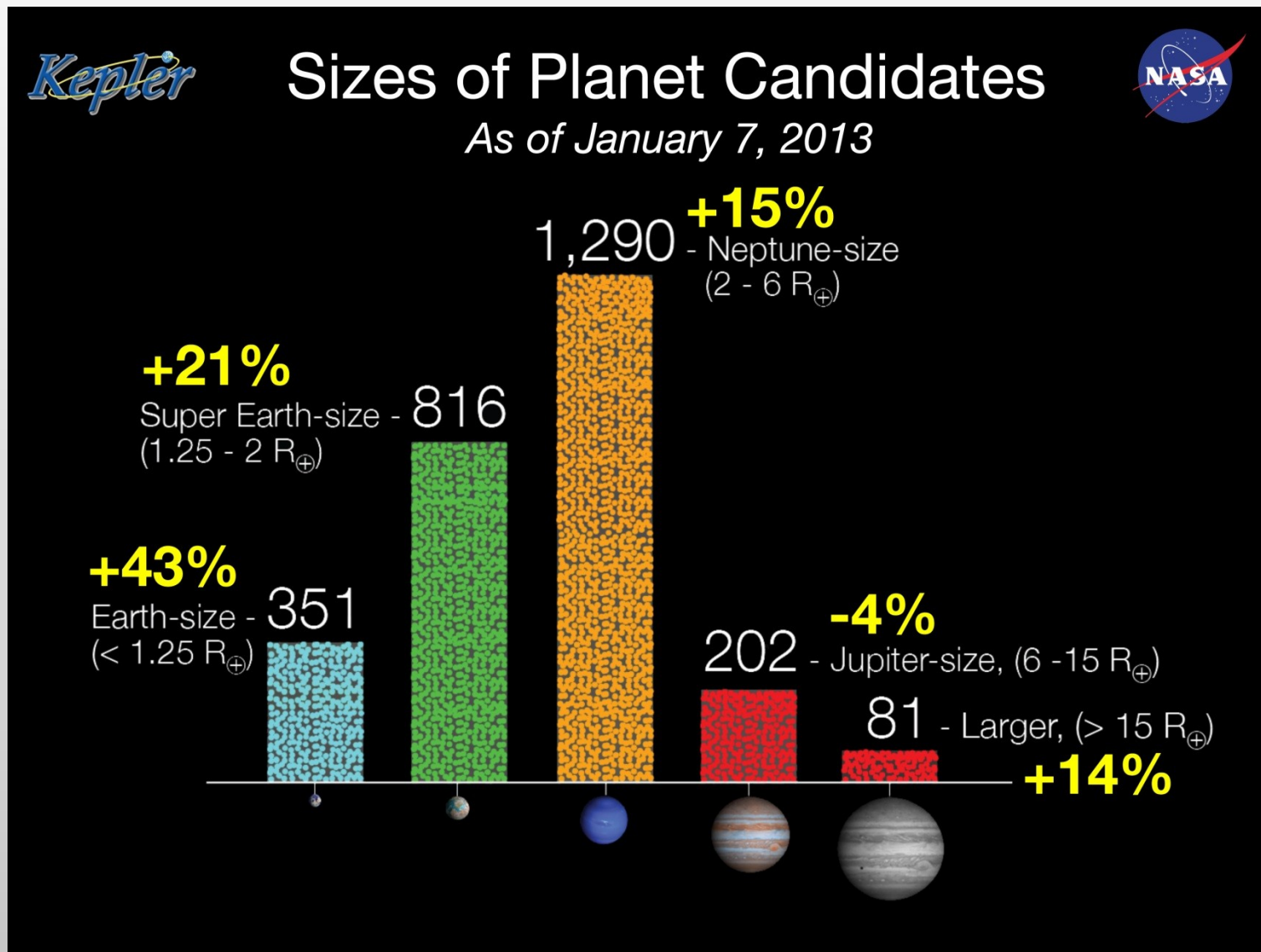


**Космический телескоп
имени Кеплера:**



**поиск планет земного типа
в обитаемой зоне
солнцеподобных звезд**

Распределение планет по размерам по данным Kepler



По оценкам, основанным на данных Кеплера, до трети звезд имеют планеты типа Земли в зоне обитаемости.

Рекорды: Kepler-37b - экзопланета размером с Меркурий

Радиус открытой экзопланеты —
0.003 от радиуса звезды.

A sub-Mercury-sized exoplanet

Thomas Barclay^{1,2}, Jason F. Rowe^{1,3}, Jack J. Lissauer¹, Daniel Huber^{1,4}, François Fressin⁵, Steve B. Howell¹, Stephen T. Bryson¹, William J. Chaplin⁶, Jean-Michel Désert⁵, Eric D. Lopez⁷, Geoffrey W. Marcy⁸, Fergal Mullally^{1,3}, Darin Ragozzine^{5,9}, Guillermo Torres⁵, Elisabeth R. Adams⁵, Eric Agol¹⁰, David Barrado^{11,12}, Sarbani Basu^{1,3}, Timothy R. Bedding¹⁴, Lars A. Buchhave^{15,16}, David Charbonneau⁵, Jessie L. Christiansen^{1,3}, Jørgen Christensen-Dalsgaard¹⁷, David Ciardi¹⁸, William D. Cochran¹⁹, Andrea K. Dupree⁵, Yvonne Elsworth⁶, Mark Everett²⁰, Debra A. Fischer^{1,3}, Eric B. Ford⁹, Jonathan J. Fortney⁷, John C. Geary⁵, Michael R. Haas¹, Rasmus Handberg¹⁷, Saskia Hekker^{6,21}, Christopher E. Henze¹, Elliott Horch²², Andrew W. Howard²³, Roger C. Hunter¹, Howard Isaacson⁸, Jon M. Jenkins^{1,3}, Christoffer Karoff¹⁷, Steven D. Kawaler²⁴, Hans Kjeldsen¹⁷, Todd C. Klaus²⁵, David W. Latham⁵, Jie Li^{1,3}, Jorge Lillo-Box¹², Mikkel N. Lund¹⁷, Mia Lundkvist¹⁷, Travis S. Metcalfe²⁶, Andrea Miglio⁶, Robert L. Morris^{1,3}, Elisa V. Quintana^{1,3}, Dennis Stello¹⁴, Jeffrey C. Smith^{1,3}, Martin Still^{1,2}, & Susan E. Thompson^{1,3}

¹ NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035, USA

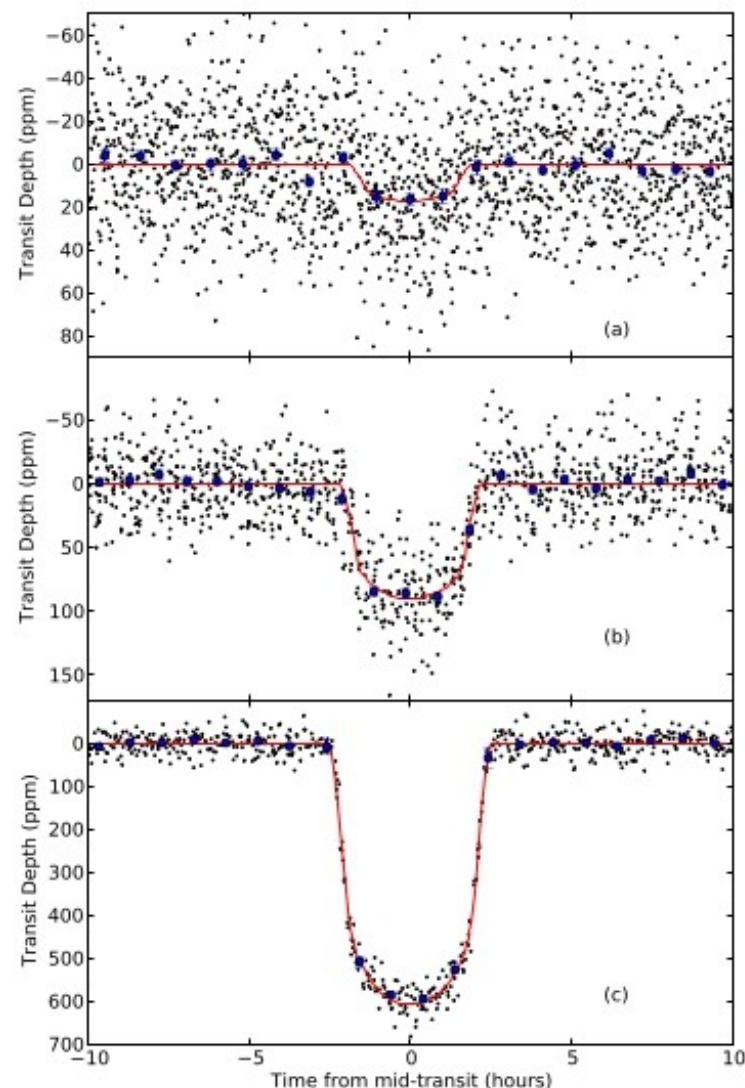
² Bay Area Environmental Research Institute, 596 First St West, Sonoma, CA 95476, USA

³ SETI Institute, 189 Bernardo Ave, Mountain View, CA 94043, USA

⁴ NASA Postdoctoral Program Fellow

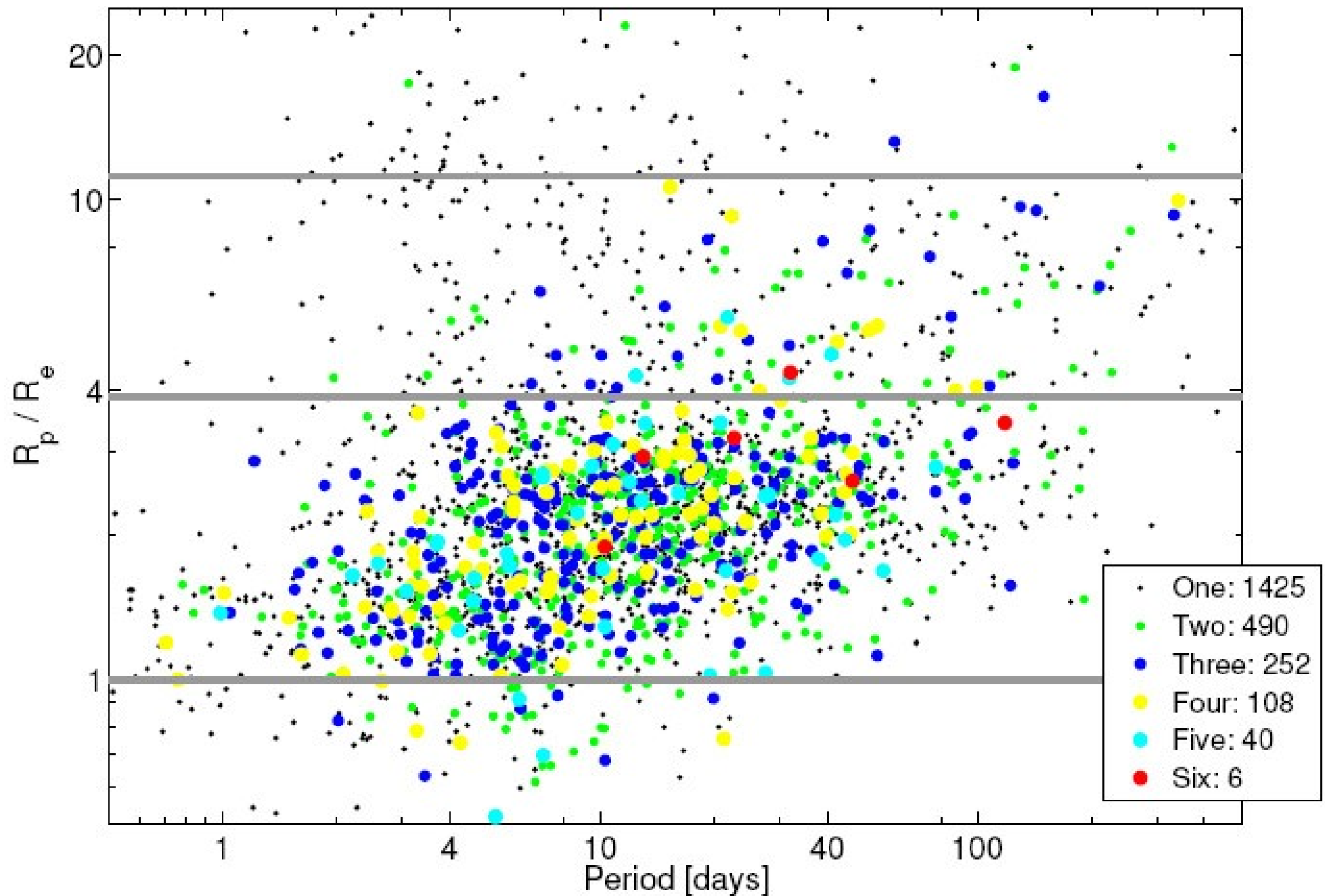
⁵ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA

⁶ School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, B15 2TT, UK

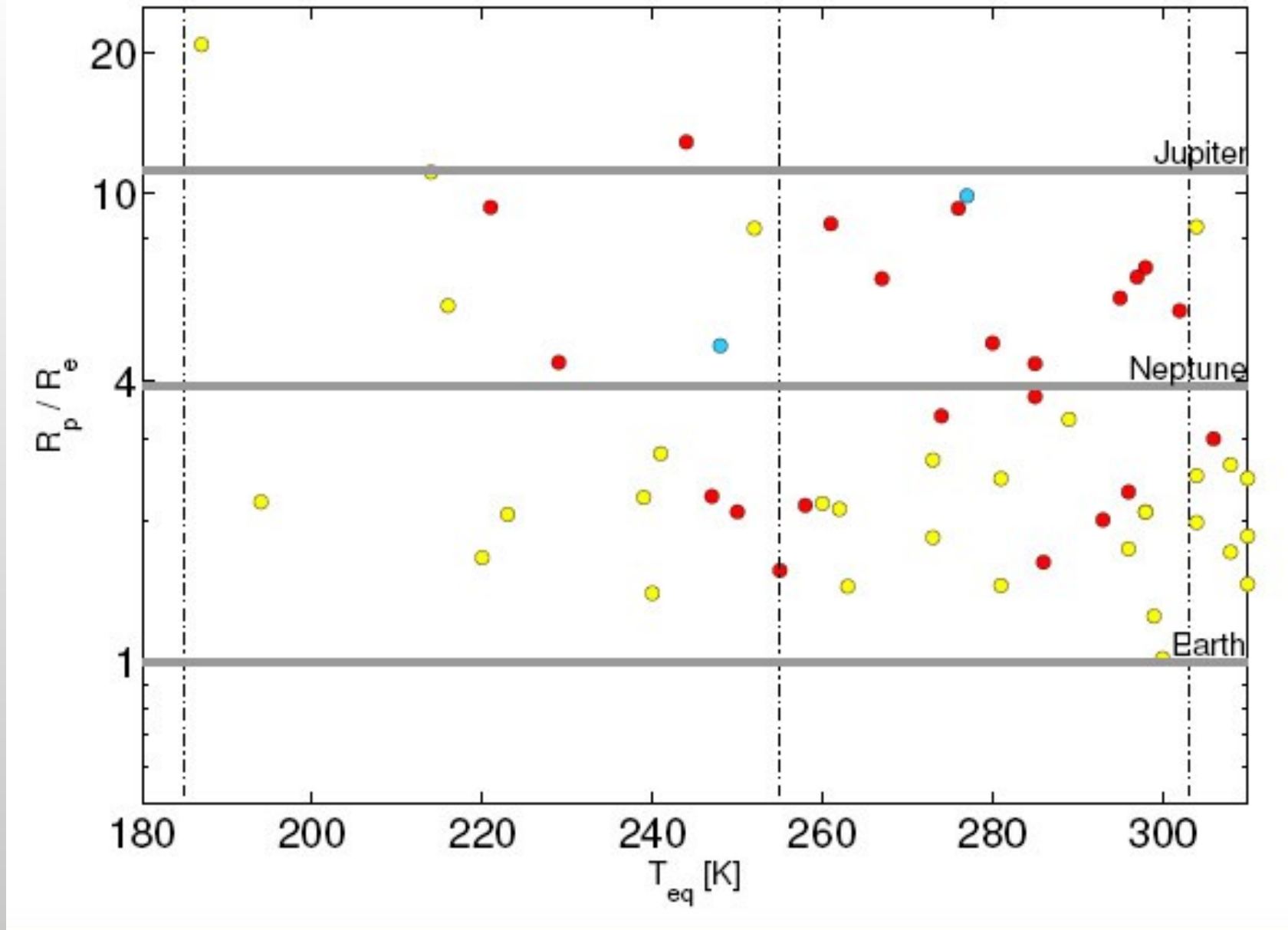


Кандидаты Кеплера на плоскости «орб. период – размер»

Горизонтальными серыми линиями отмечены размеры Земли, Нептуна и Юпитера.

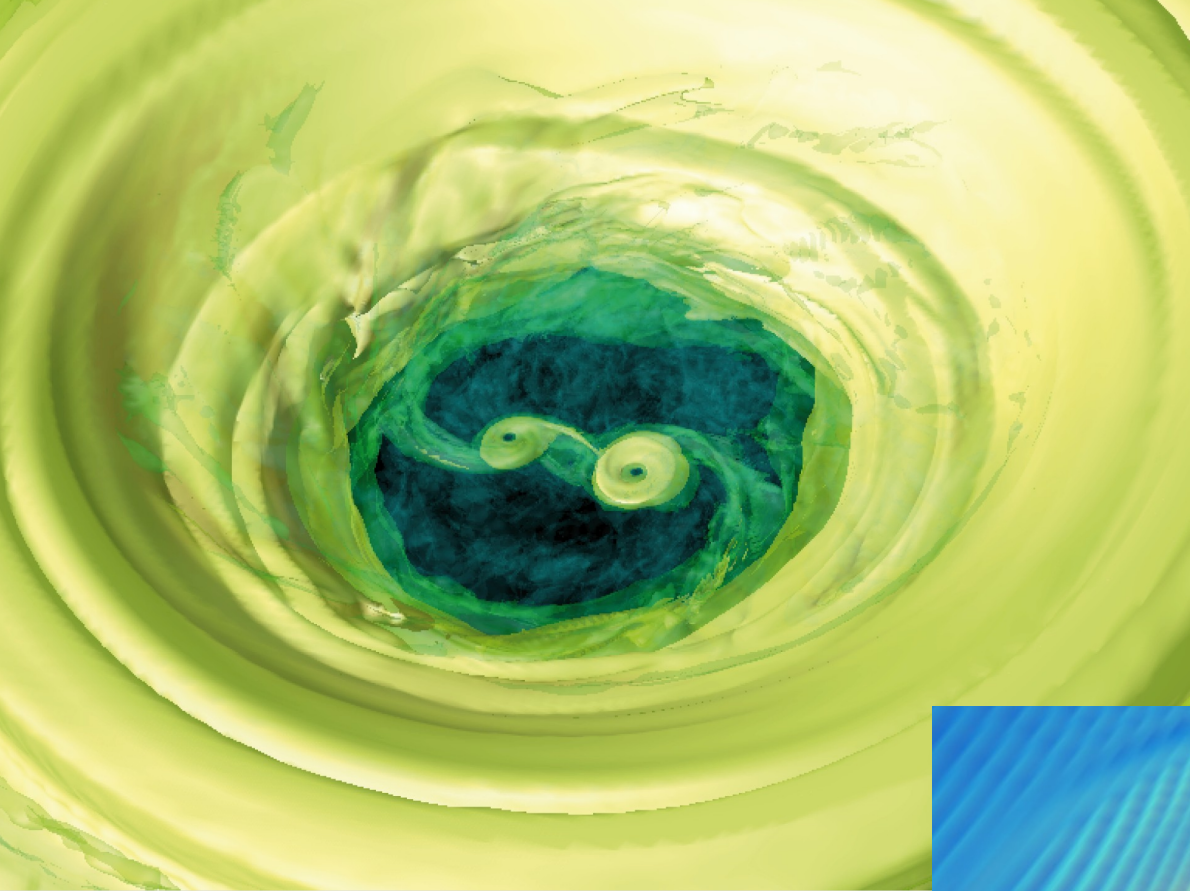


Планетные кандидаты Кеплера в обитаемой зоне

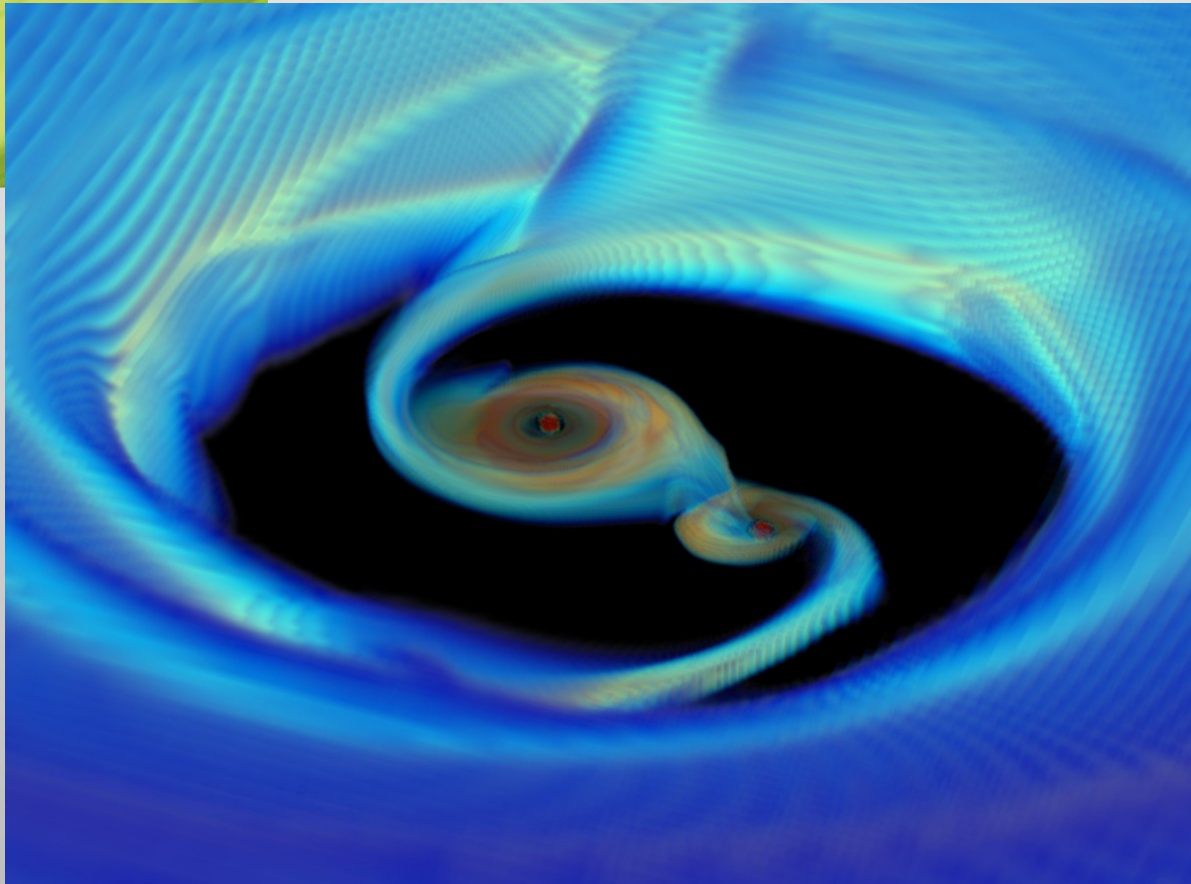


Эффективная температура планет рассчитывалась для серой сферы с альбедо 30% без учета парникового эффекта. Пунктирной вертикальной линией показана эффективная температура Земли

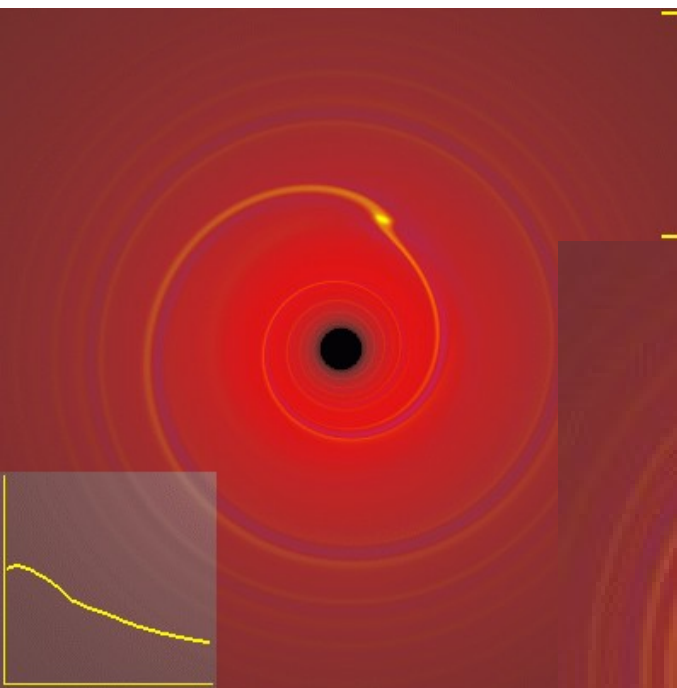
***Что делается кроме
поисков экзопланет***



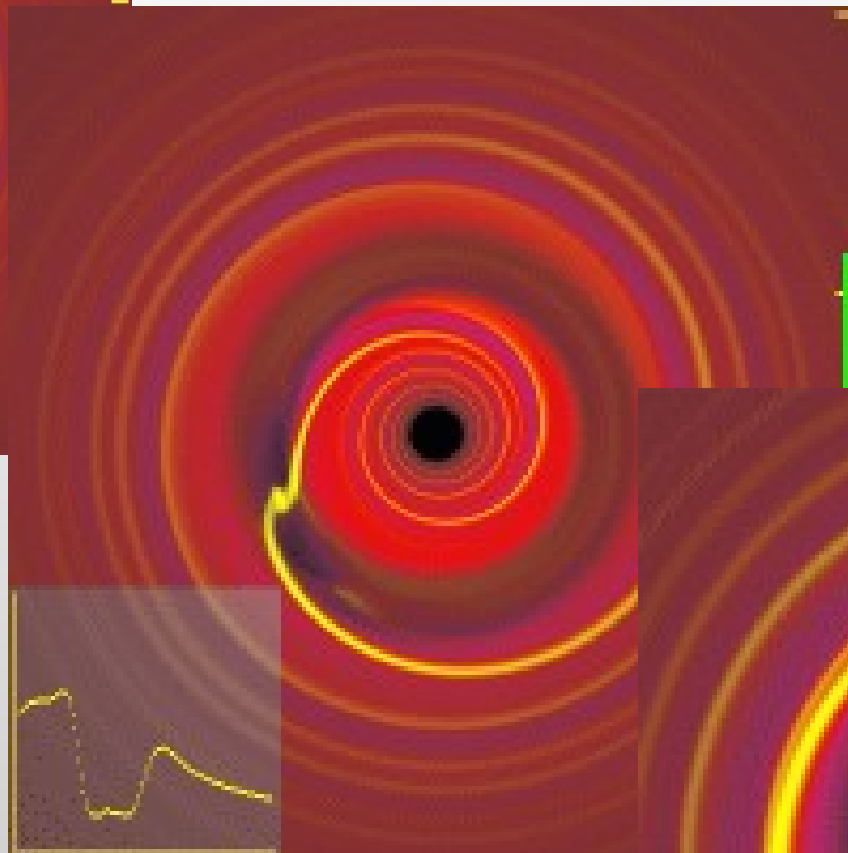
Исследование протопланетных дисков



Исследование процессов формирования и миграции



$M=M_3$

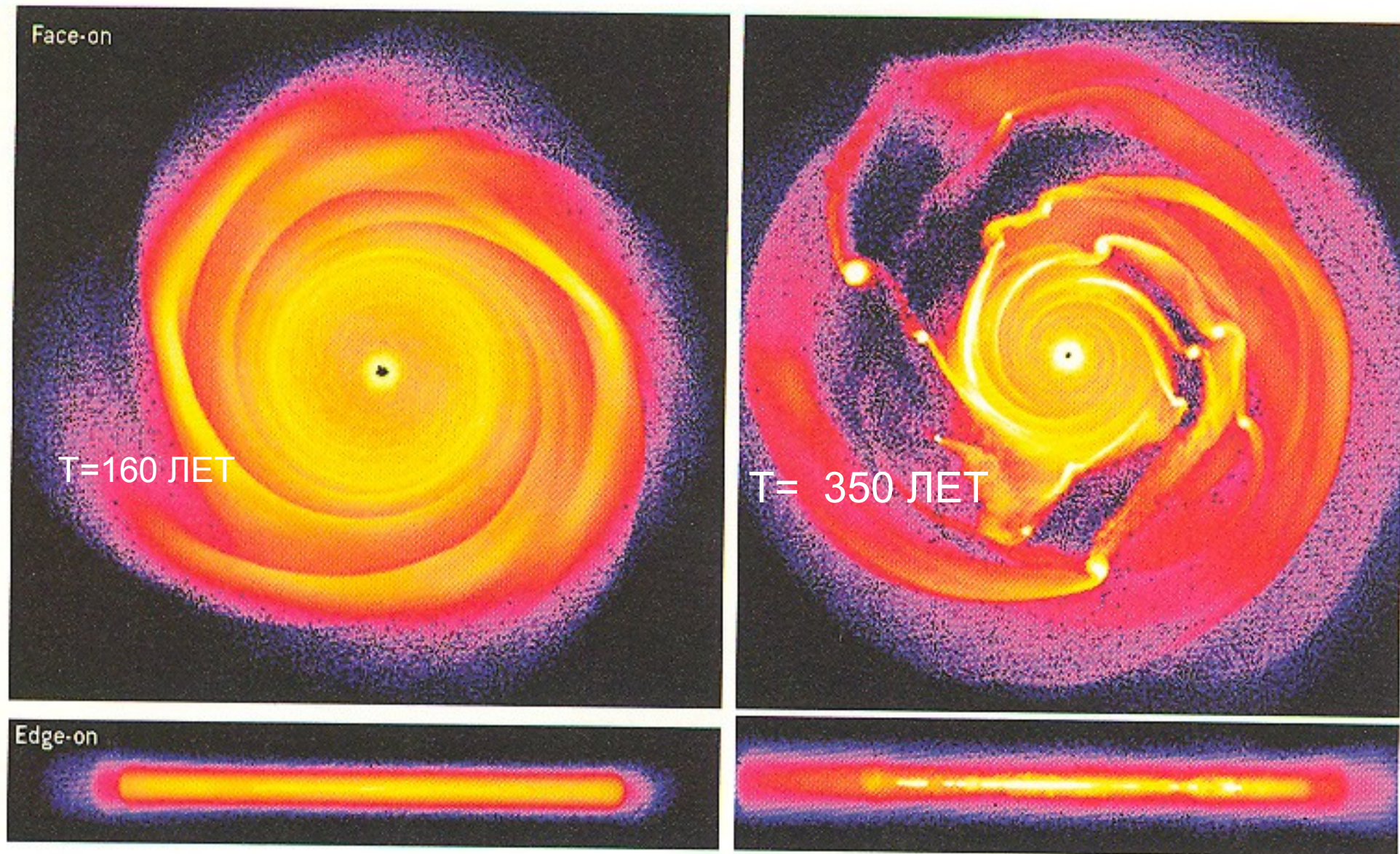


$M=M_{\text{ю}}$



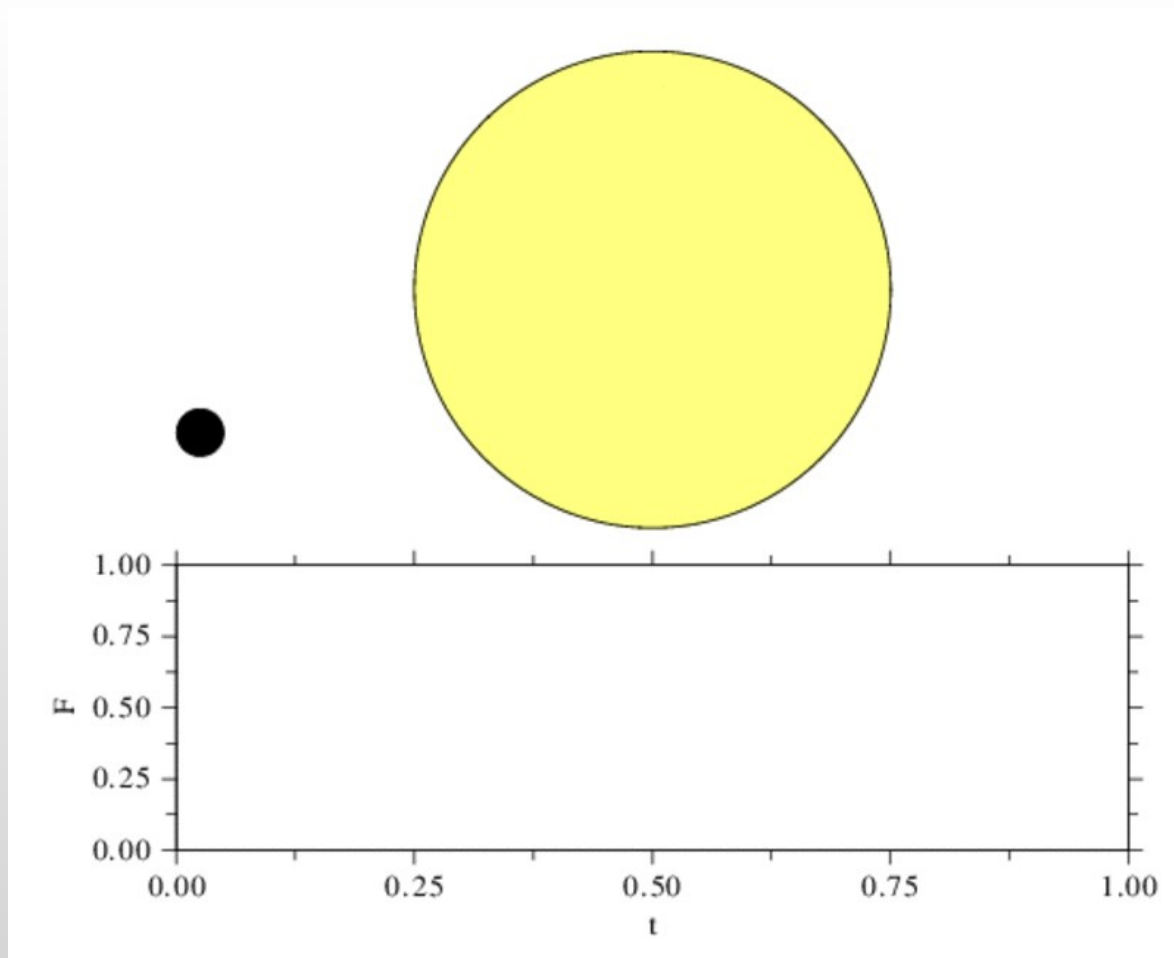
$M=10M_{\text{ю}}$

Исследование процессов формирования и миграции

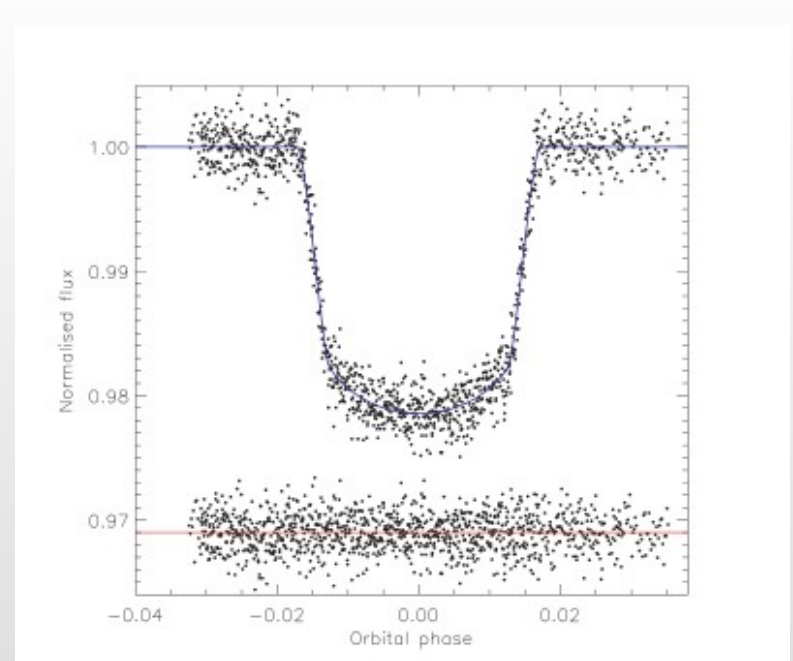
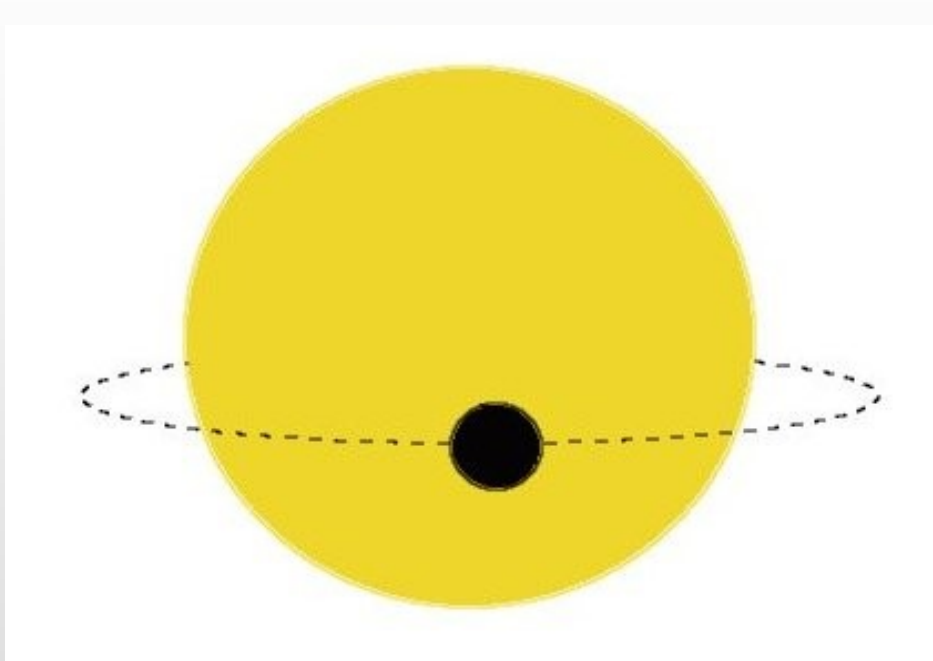


Computer simulations of the formation of giant planets in a disk of gas, as a result of gravitational instability. These images show the evolution of the disk at $t = 160$ years and

Исследование атмосфер

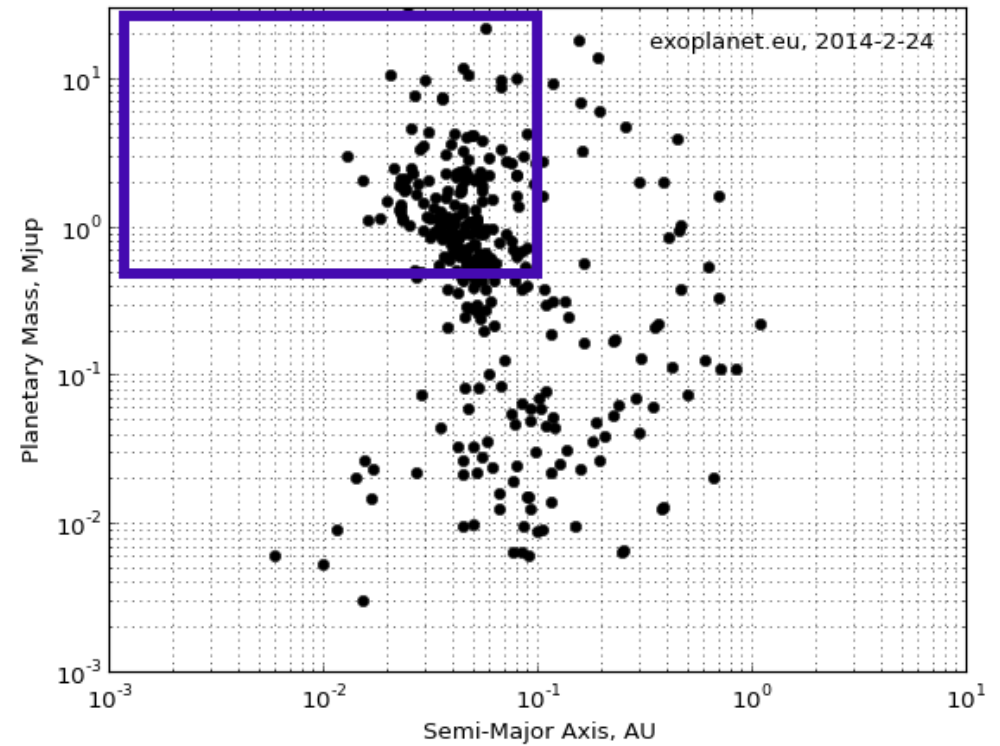
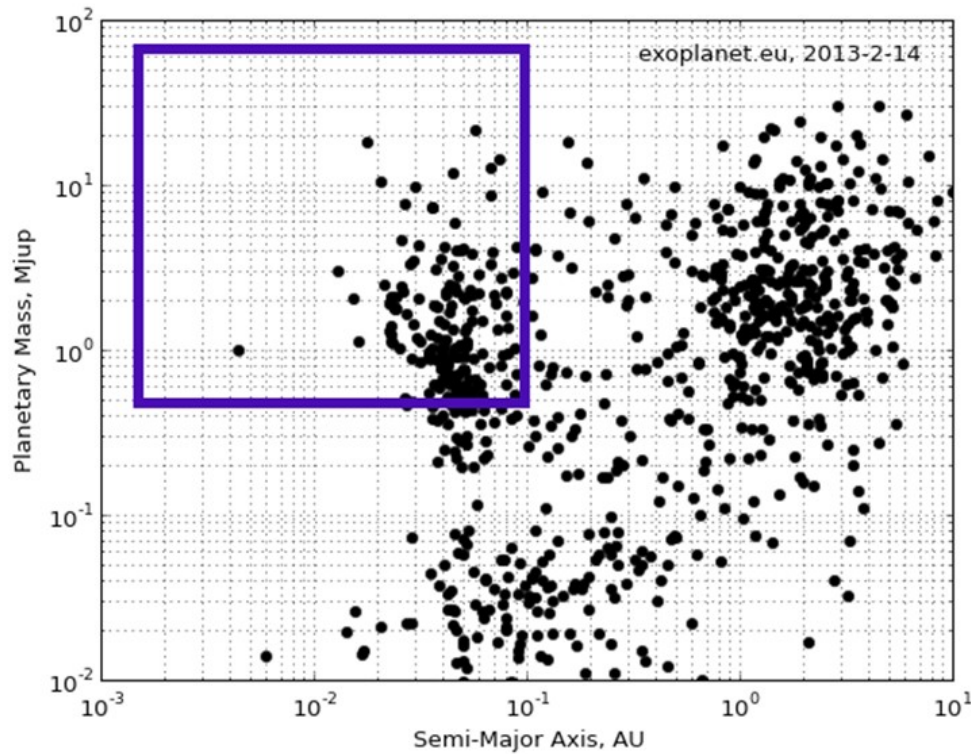


Наиболее перспективными для детального исследования являются планеты, у которых угол между орбитальной плоскостью и лучом зрения наблюдателя настолько мал, что мы можем наблюдать прохождение планеты по диску звезды. Это явление называется транзитом планеты. Сейчас нам **известны 437 транзитных планеты в 332 системах.**



Сопоставляя измерения радиальной скорости звезды со спектральными и фотометрическими наблюдениями транзита, мы **можем определить как массу планеты, так и ее радиус.**

Кроме этого, возможно получить спектры поглощения верхних слоев атмосферы планеты, что даст нам **информацию о ее структуре и составе.**



Распределение экзопланет и экзопланет-транзитов по массам и большим полуосям.

Синим прямоугольником обозначена зона «горячих Юпитеров», т.е. планет, имеющих массу, сравнимую с массой Юпитера, и большую полуось, не превышающую 0,1 а.е.

***Моделирование газовых
оболочек экзопланет,
относящихся к классу
«горячих Юпитеров»***

Работа ведется в сотрудничестве со следующими организациями:

- Институт астрономии РАН

В.И.Шематович, П.В.Кайгородов, Д.Э.Ионов, А.А.Черенков

- Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

H. Lammer

- Argelander Institut für Astronomie der Universität Bonn, Bonn, Germany

L. Fossati

- Institut d'Astrophysique de Paris, Paris, France

L.Ben-Jaffel

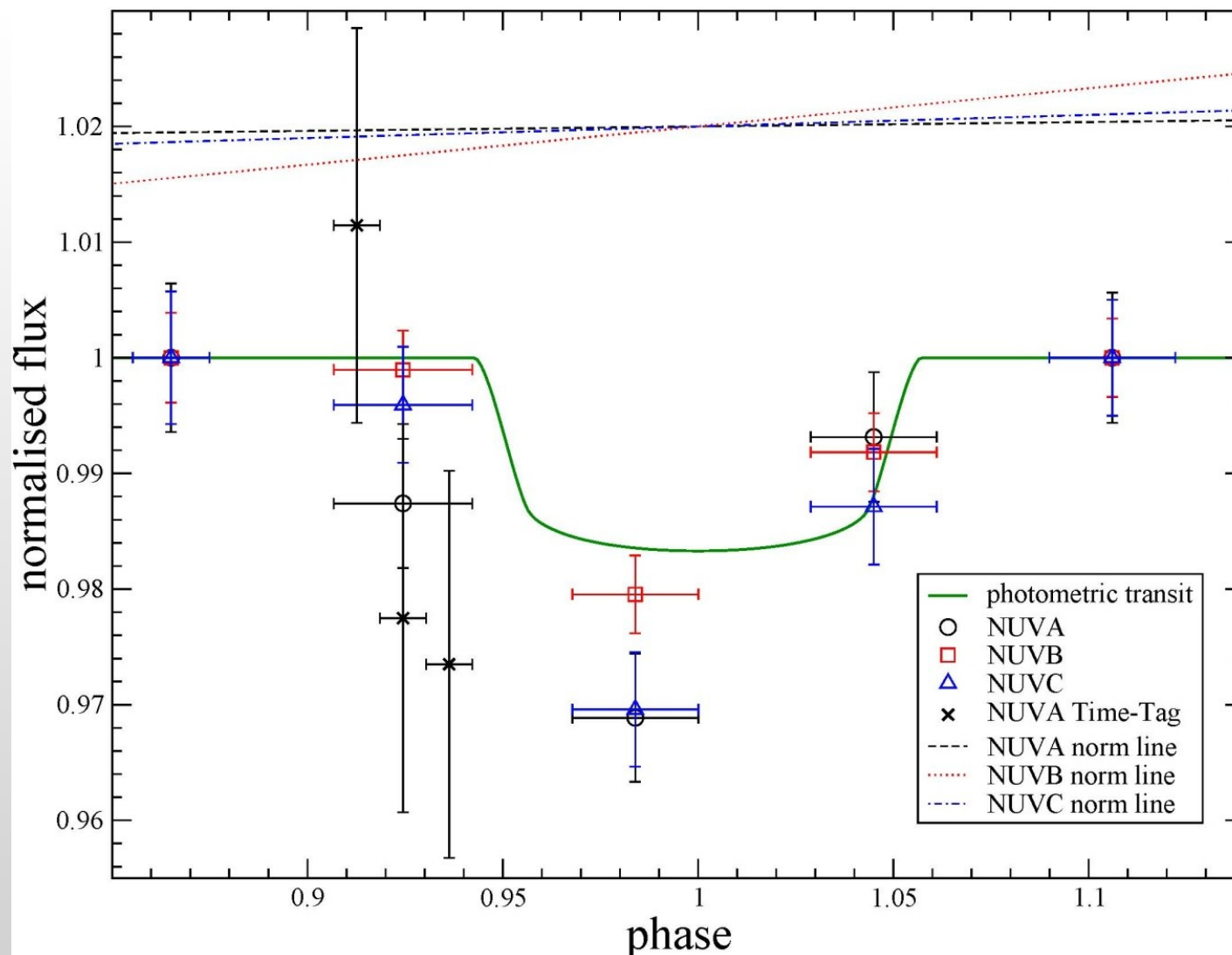
- University of Leicester, UK

J.Nichols

HD 209458b - первая открытая транзитная экзопланета, типичный "горячий Юпитер".

WASP-12 is a late F-type main sequence star [$M_* = 1.35M_{\odot}$, $R_* = 1.6R_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 6250 \pm 100K$, $\log g = 4.2 \pm 0.2$] (Fossati et al. 2010b) with a magnitude of $V \sim 11^m.6$. The star is at a distance of about 400 pc from the Sun (Fossati et al. 2010b). The star hosts a transiting “hot-Jupiter”, WASP-12b, with a mass of $M_{\text{pl}} = 1.41 \pm 0.1M_{\text{Jup}}$ and radius of $R_{\text{pl}} = 1.74 \pm 0.09R_{\text{Jup}}$ (Chan et al. 2011). WASP-12b revolves in a rather circular orbit (Campo et al. 2011) with the period of ~ 1.09 days (Hebb et al. 2009) at a distance of 0.0229 AU (~ 3 stellar radii) from its host star.

Наблюдения транзита планеты WASP-12b в ближнем УФ-диапазоне, проведенные в 2009 году с помощью спектрографа COS, установленном на HST (Fossati et al., 2010a) показали существование, так называемого, раннего начала транзита.



Анализ кривых блеска, полученных в УФ полосах, показывает, что транзит в двух полосах намного глубже, чем транзит в видимом диапазоне. Кроме того, в этих полосах было обнаружено раннее начало транзита. Это означает, что впереди планеты, на расстоянии $\sim 4\text{-}5$ ее радиусов, находится оптически толстый слой вещества.

THREE-DIMENSIONAL GAS DYNAMIC SIMULATION OF THE INTERACTION BETWEEN THE EXOPLANET WASP-12b AND ITS HOST STAR

D. BISIKALO¹, P. KAYGORODOV¹, D. IONOV¹, V. SHEMATOVICH¹, H. LAMMER², AND L. FOSSATI³

¹ Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; bisikalo@inasan.ru

² Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

³ Argelander Institut für Astronomie der Universität Bonn, Bonn, Germany

Received 2012 September 6; accepted 2012 December 10; published 2013 January 21

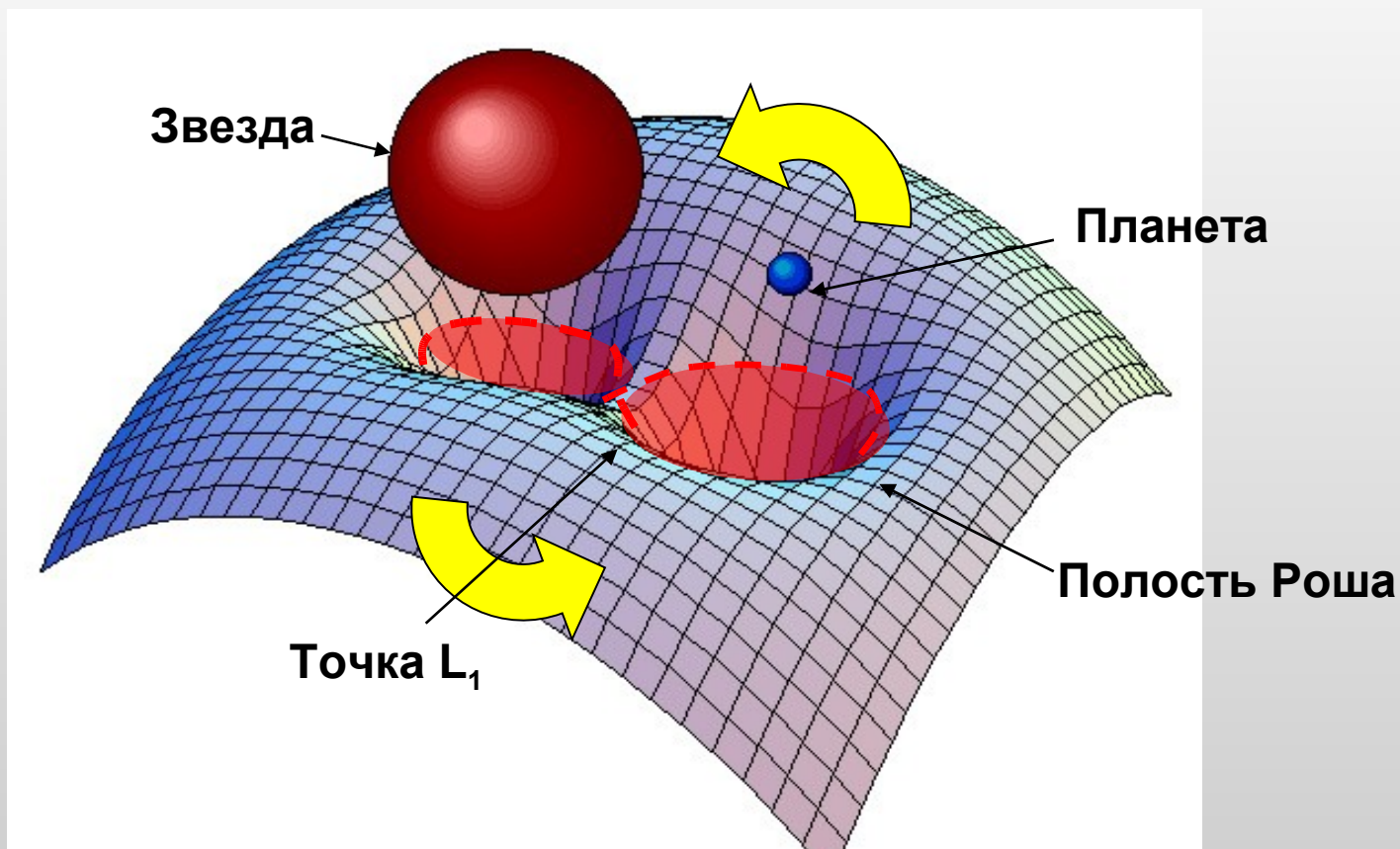
ABSTRACT

Hubble Space Telescope transit observations in the near-UV performed in 2009 made WASP-12b one of the most “mysterious” exoplanets; the system presents an early ingress, which can be explained by the presence of optically thick matter located ahead of the planet at a distance of $\sim 4\text{--}5$ planet radii. This work follows previous attempts to explain this asymmetry with an exospheric outflow or a bow shock, induced by a planetary magnetic field, and provides a numerical solution of the early ingress, though we did not perform any radiative transfer calculation. We performed pure 3D gas dynamic simulations of the plasma interaction between WASP-12b and its host star and describe the flow pattern in the system. In particular, we show that the overfilling of the planet’s Roche lobe leads to a noticeable outflow from the upper atmosphere in the direction of the L_1 and L_2 points. Due to the conservation of the angular momentum, the flow to the L_1 point is deflected in the direction of the planet’s orbital motion, while the flow toward L_2 is deflected in the opposite direction, resulting in a non-axisymmetric envelope, surrounding the planet. The supersonic motion of the planet inside the stellar wind leads to the formation of a bow shock with a complex shape. The existence of the bow shock slows down the outflow through the L_1 and L_2 points, allowing us to consider a long-living flow structure that is in the steady state.

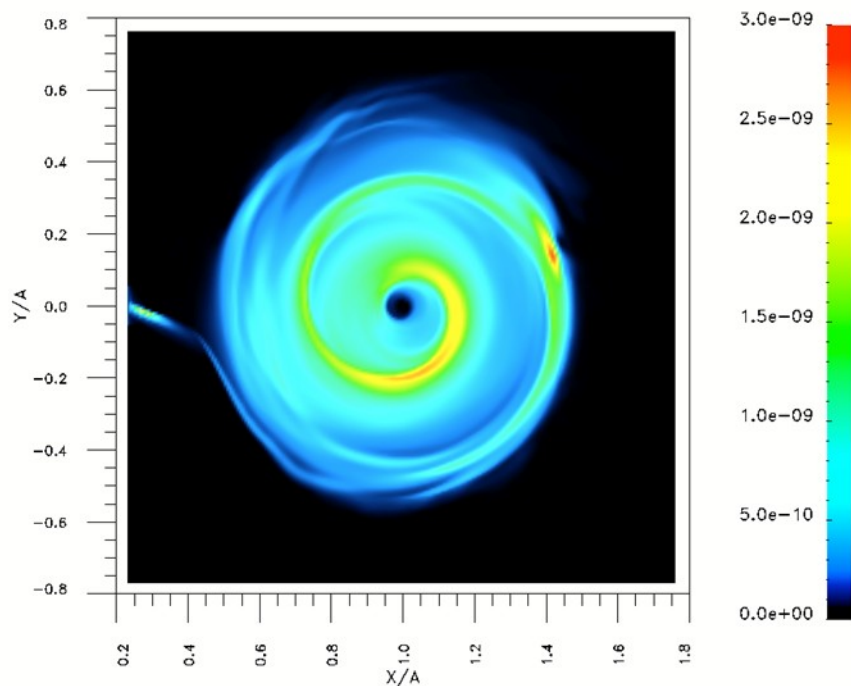
Key words: hydrodynamics – planet–star interactions – stars: individual: WASP-12

До нашей работы было предложено два объяснения наличия непрозрачного вещества впереди планеты.

Первое объяснение основано на возможном оттоке массы от планеты к звезде (Lai et al., 2010; Li et al., 2010).



Действительно, расстояние до точки L_1 составляет всего 1,85 радиуса планеты, а значит, верхние слои атмосферы находятся за пределами полости Роша. Естественным итогом истечения через точку L_1 будет образование аккреционного диска вокруг звезды, аналогично происходящему в тесной двойной системе.



Осесимметричный аккреционный диск не должен вызывать никакого заметного эффекта при транзите. Однако, там где струя сталкивается с диском образуется протяженная ударная волна (Bisikalo et al., 2002, 2003), которую можно наблюдать. Эта гипотеза изложена в работе Lai et al. (2010). Авторы предполагают, что струя из точки L_1 и область ее взаимодействия с диском вызывает появление раннего начала транзита.



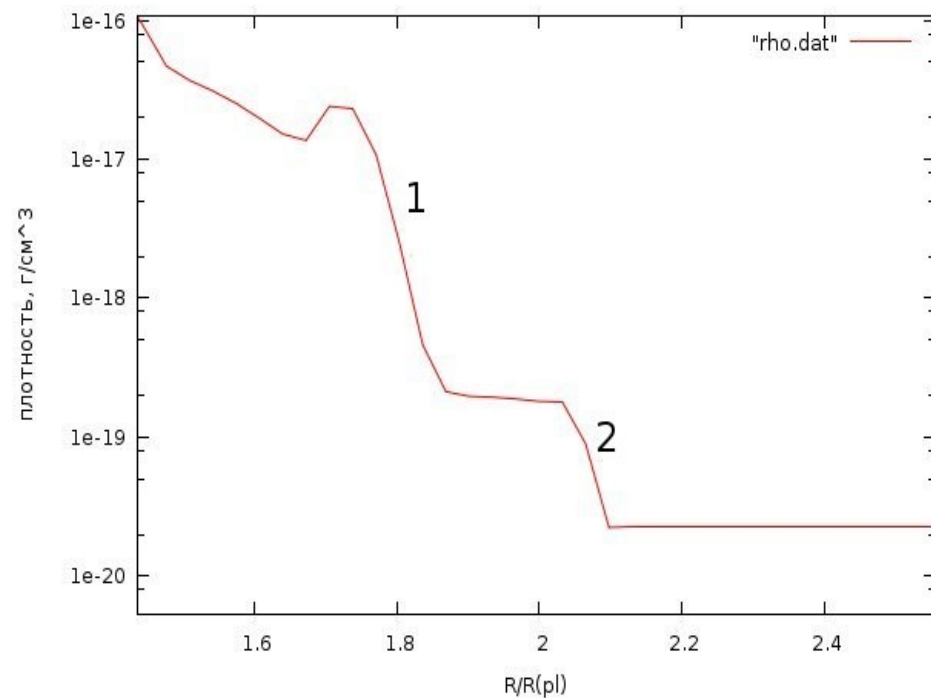
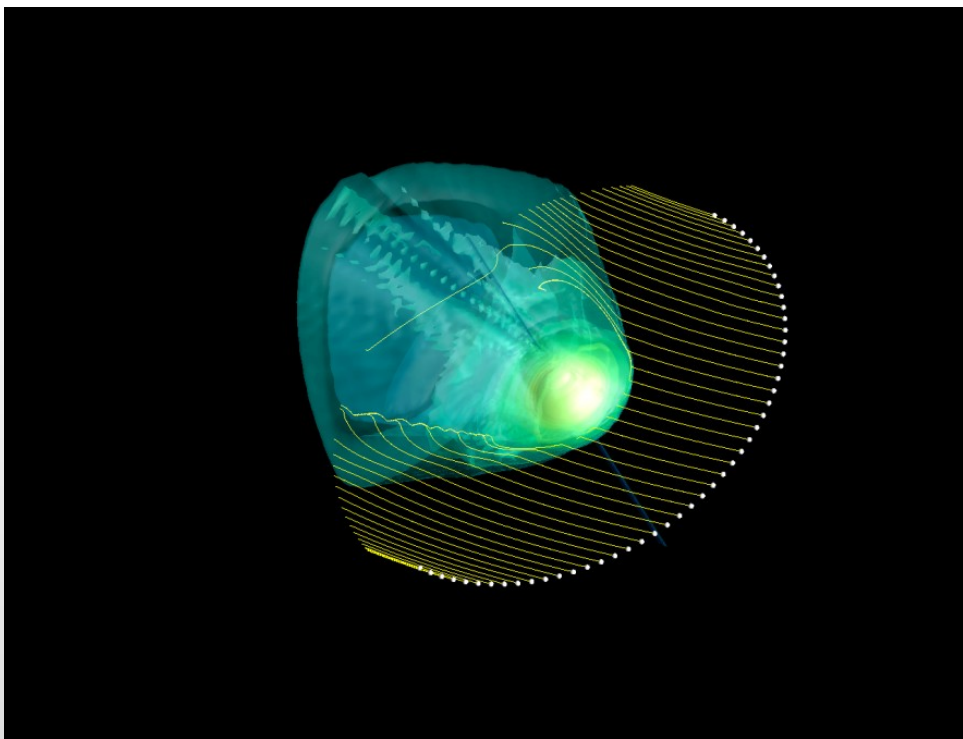
Эта идея вполне разумна. Однако более детальное изучение показывает, что в случае столь высокой степени переполнения полости Роша время жизни планеты будет очень малым. В самом деле, в соответствии с уравнениями, используемыми в теории тесных двойных систем, скорость оттока массы вычисляется как:

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

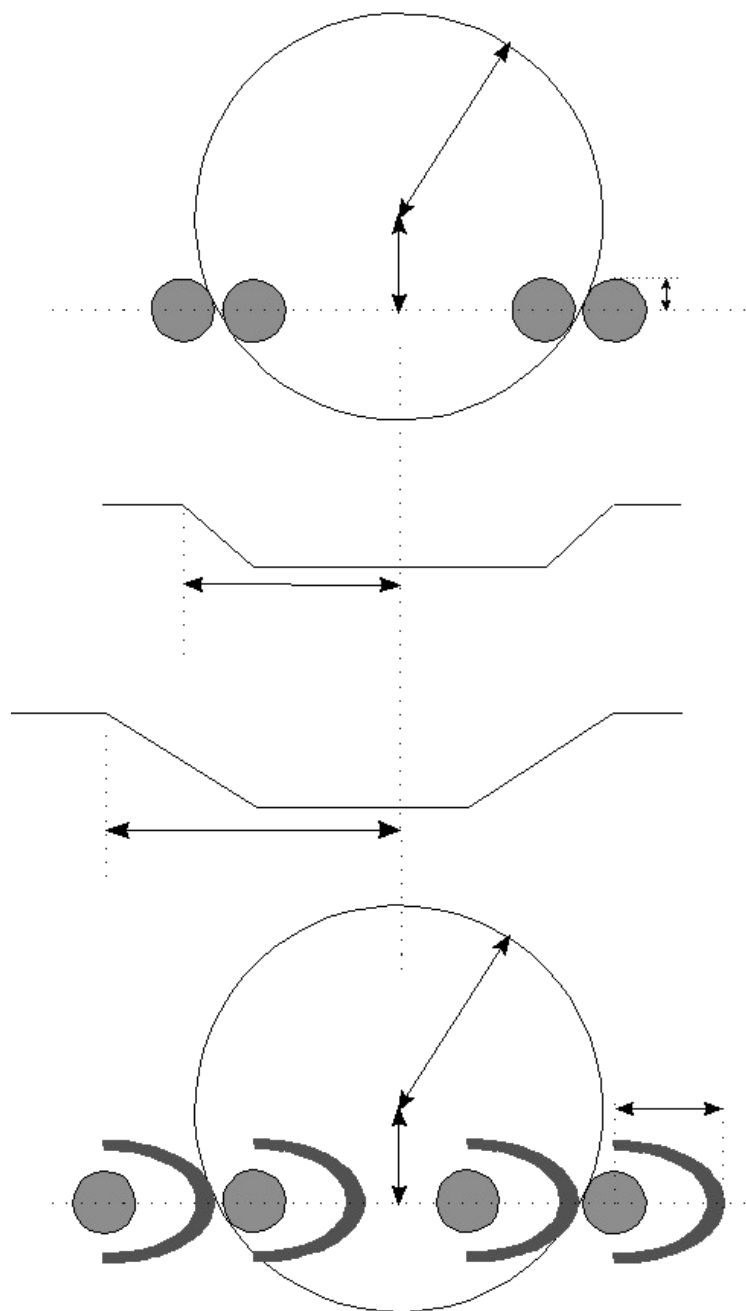
Размер плотной части атмосферы ограничен уровнем экзобазы. Для WASP-12b ($\rho_{\text{pl}} = 2.7 \cdot 10^{-14}$ г/см³ и $T_{\text{pl}} = 10^4$ K) в предположении сферического гравитационного потенциала высота экзобазы оценивается в $1.55 R_{\text{pl}}$. Объемный радиус полости Роша (т.е. радиус сферы, имеющей объем, равный объему полости Роша) составляет $1.37 R_{\text{pl}}$. Степень переполнения будет равна:

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

Время жизни атмосферы не превышает нескольких лет!



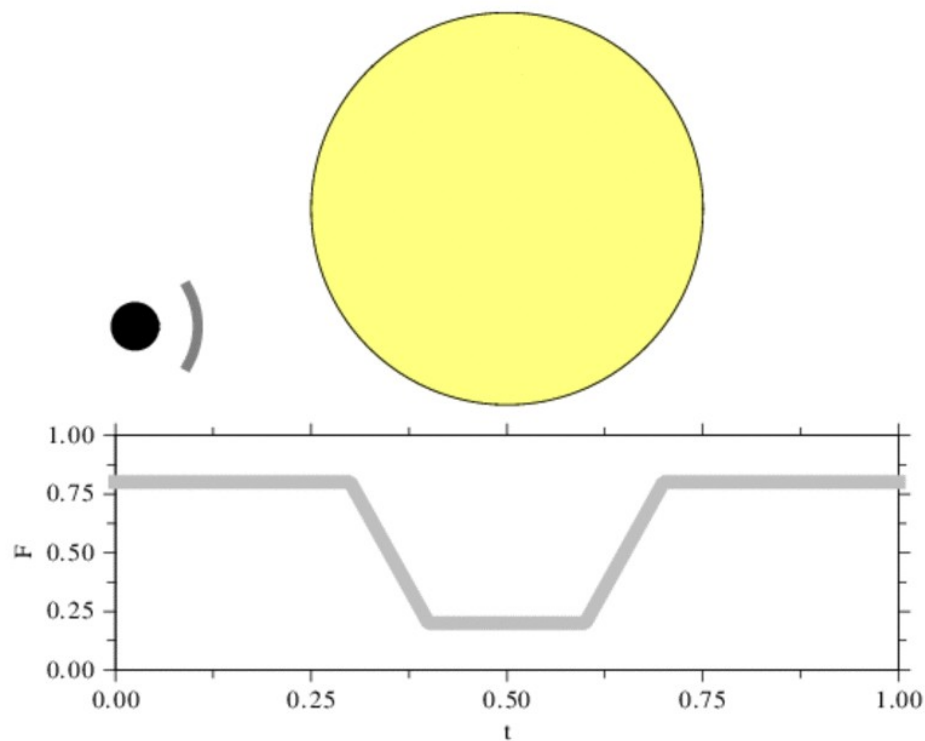
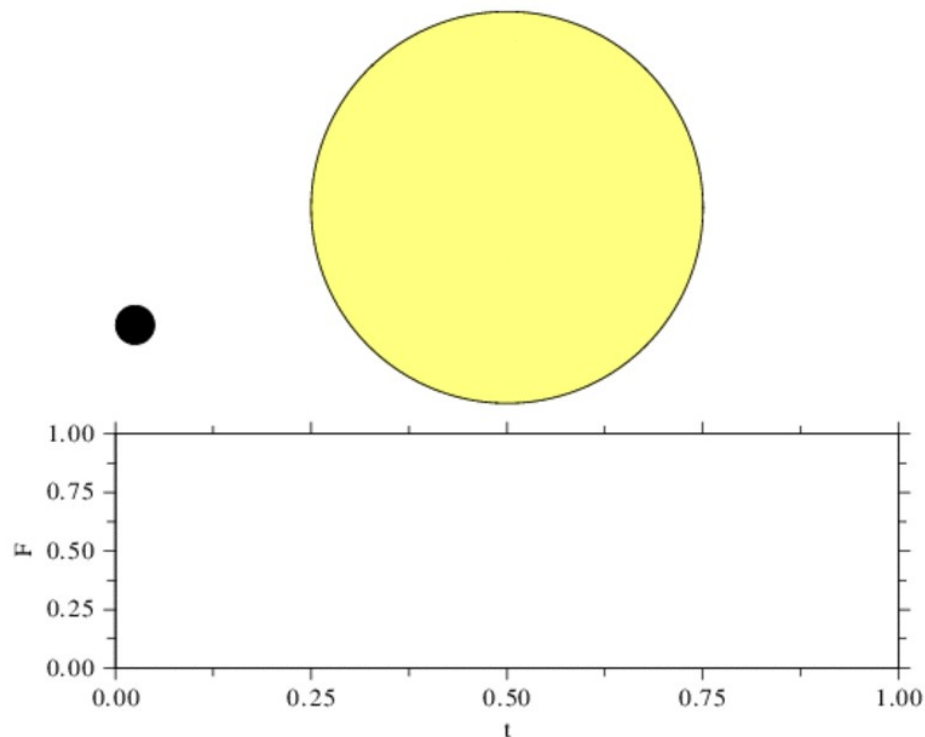
Второе возможное объяснение заключается в наличии оптически толстой области за отошедшей ударной волной впереди планеты. Типичный "горячий Юпитер" движется в среде звездного ветра **со сверхзвуковой скоростью**. Когда гравитирующее тело или тело, имеющее атмосферу, движется со сверхзвуковой скоростью, перед ним должна образовываться **отошедшая ударная волна**. Газ звездного ветра, проходя через фронт волны, сжимается и нагревается в соответствии с ударной адиабатой. После этого вещество звездного ветра взаимодействует с атмосферой, образуя контактный разрыв.



Vidotto et al. (2010, 2011 a, b) воспользовались идеей образования отошедшей ударной волны для объяснения результатов наблюдений. Однако, они предположили, что ударная волна возникает из-за наличия магнитного поля планеты.

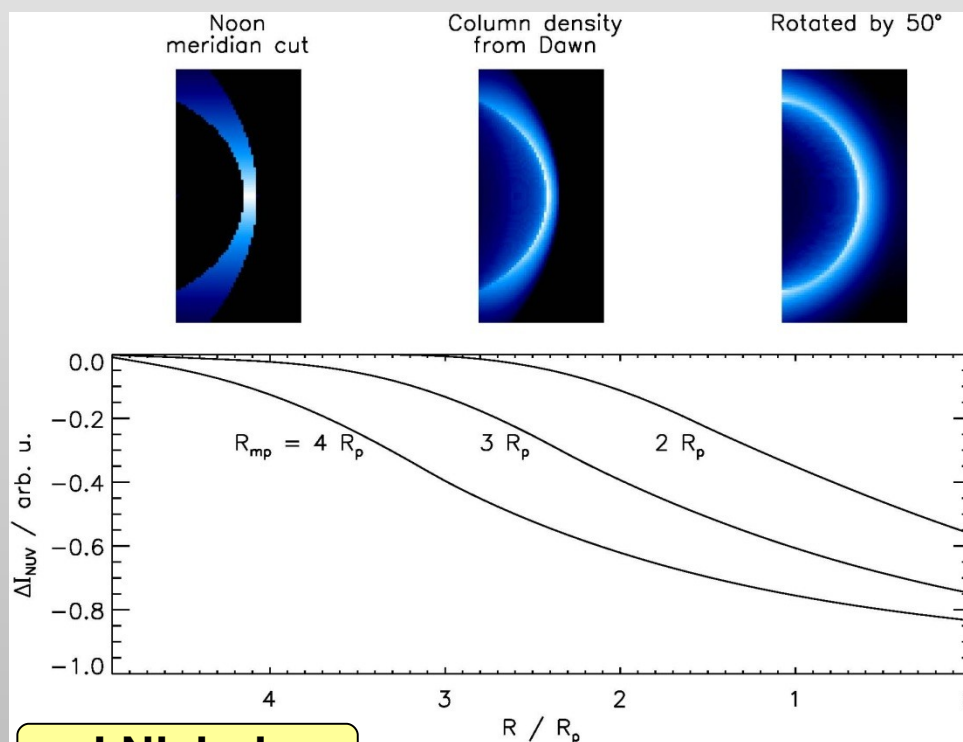
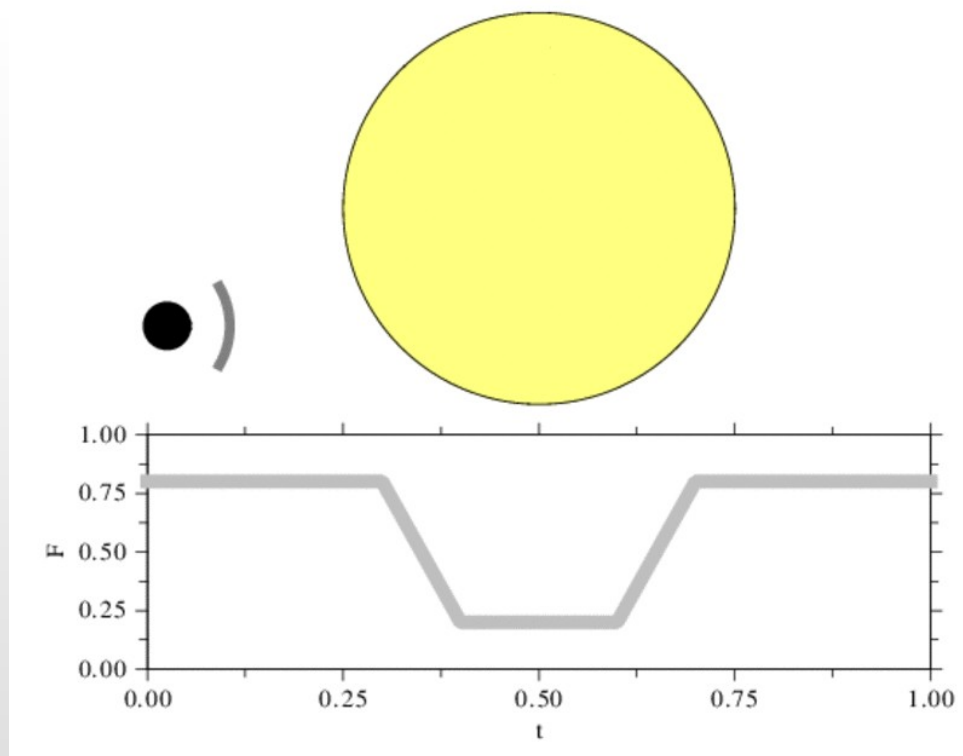
Исходя из этих предположений, они провели полуаналитическое рассмотрение и оценили напряженность магнитного поля планеты $B = 24$ Гс.

Наблюдения показывают, что планета синхронизована со звездой, т.е. у нее не должно быть заметного магнитного поля.



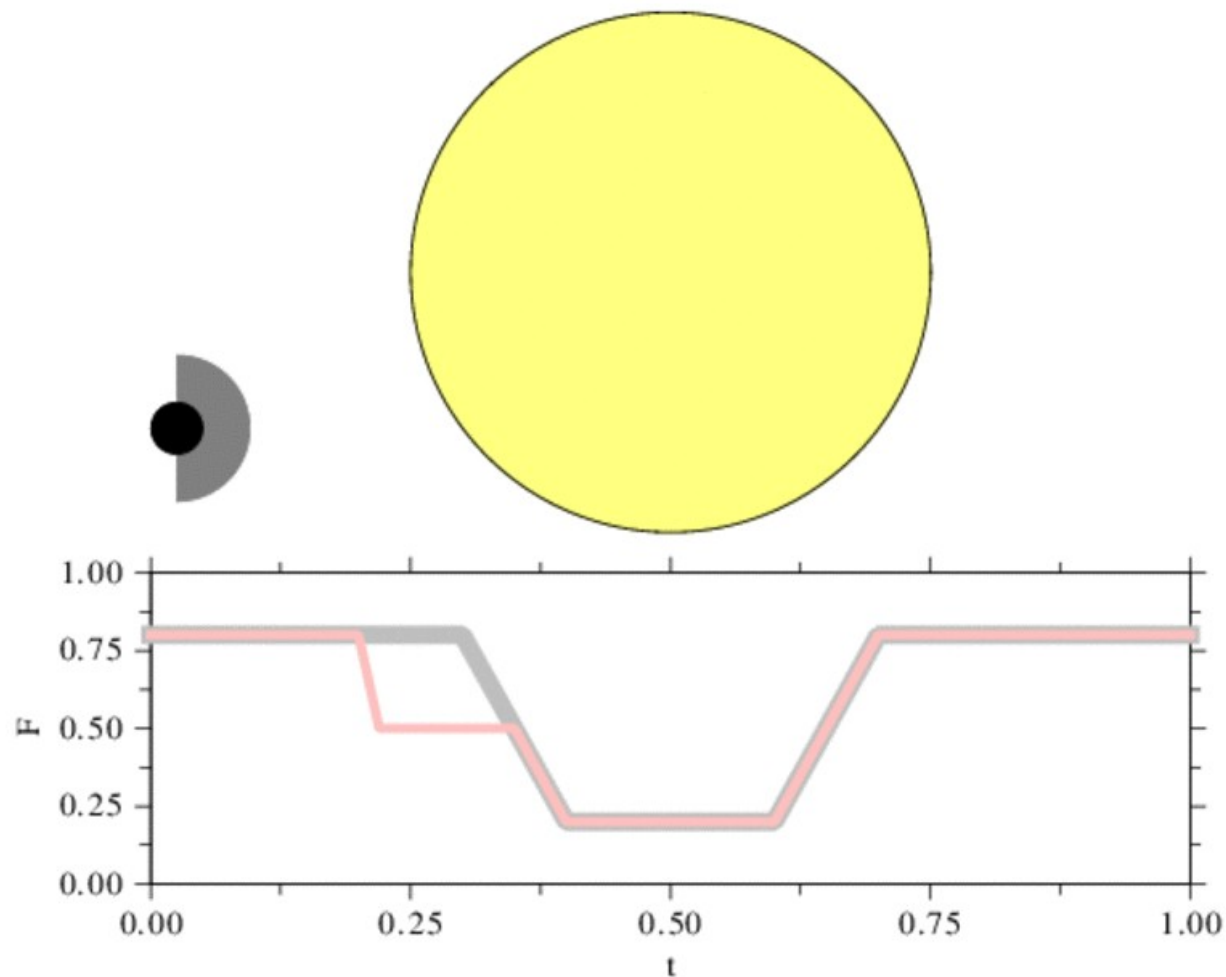
Если положение ударной волны и контактного разрыва определяется магнитным полем, то на кривой блеска должны наблюдаться характерные особенности. Мы должны видеть раннее начало затмения в коротковолновой части спектра из-за наличия нагретого сжатого вещества за фронтом ударной волны. Затем, в полости между магнитопаузой и атмосферой, где плотность вещества мала, глубина транзита должна оставаться постоянной, после чего начинается основное затмение.

Наблюдаемые кривые блеска имеют более простую форму.



Если положение ударной волны и контактного разрыва определяется магнитным полем, то на кривой блеска должны наблюдаться характерные особенности. Мы должны видеть раннее начало затмения в коротковолновой части спектра из-за наличия нагретого сжатого вещества за фронтом ударной волны. Затем, в полости между магнитопаузой и атмосферой, где плотность вещества мала, глубина транзита должна оставаться постоянной, после чего начинается основное затмение.

Наблюдаемые кривые блеска имеют более простую форму.



Для объяснения наблюдений естественно предположить, что отошедшая ударная волна расположена непосредственно перед атмосферой (Ionov, Bisikalo et al., 2012). Очевидно, что в этом случае мы можем пренебречь магнитным полем планеты.

В связи с этим, возникает вопрос, можно ли получить чисто газодинамическое решение, в котором отошедшая ударная волна воспроизводит результаты наблюдений?

Образование отошедшей ударной волны

Система уравнений трехмерной газовой динамики

Уравнение неразрывности:

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

Уравнения изменения 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 энергии:

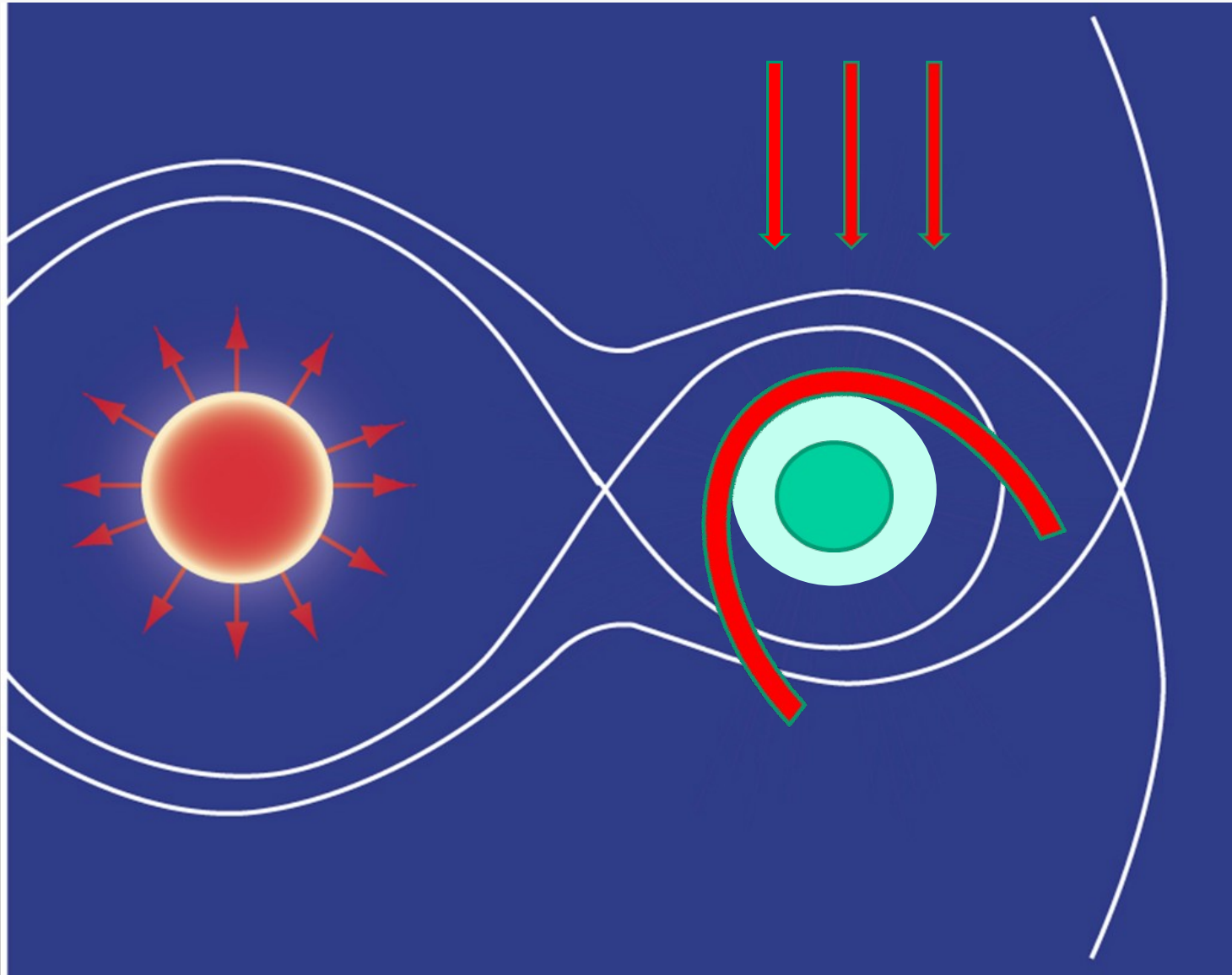
$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho uh}{\partial x} + \frac{\partial \rho vh}{\partial y} + \frac{\partial \rho wh}{\partial z} = -\rho u \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \rho w \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

Уравнение состояния:

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

Потенциал Роша:

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

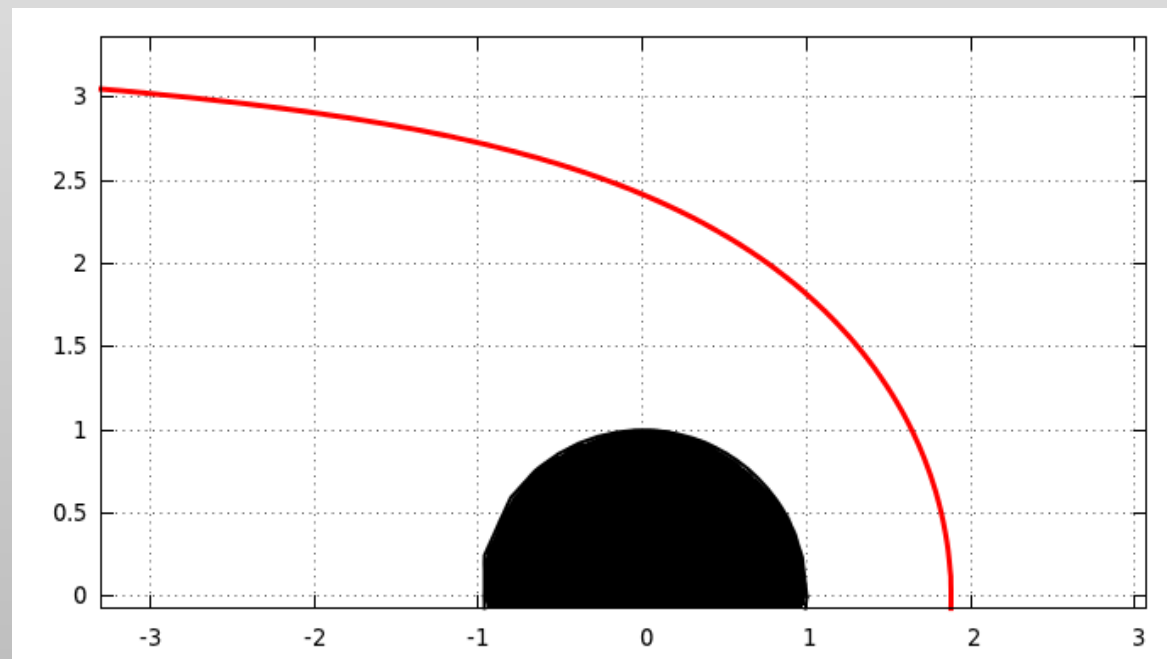


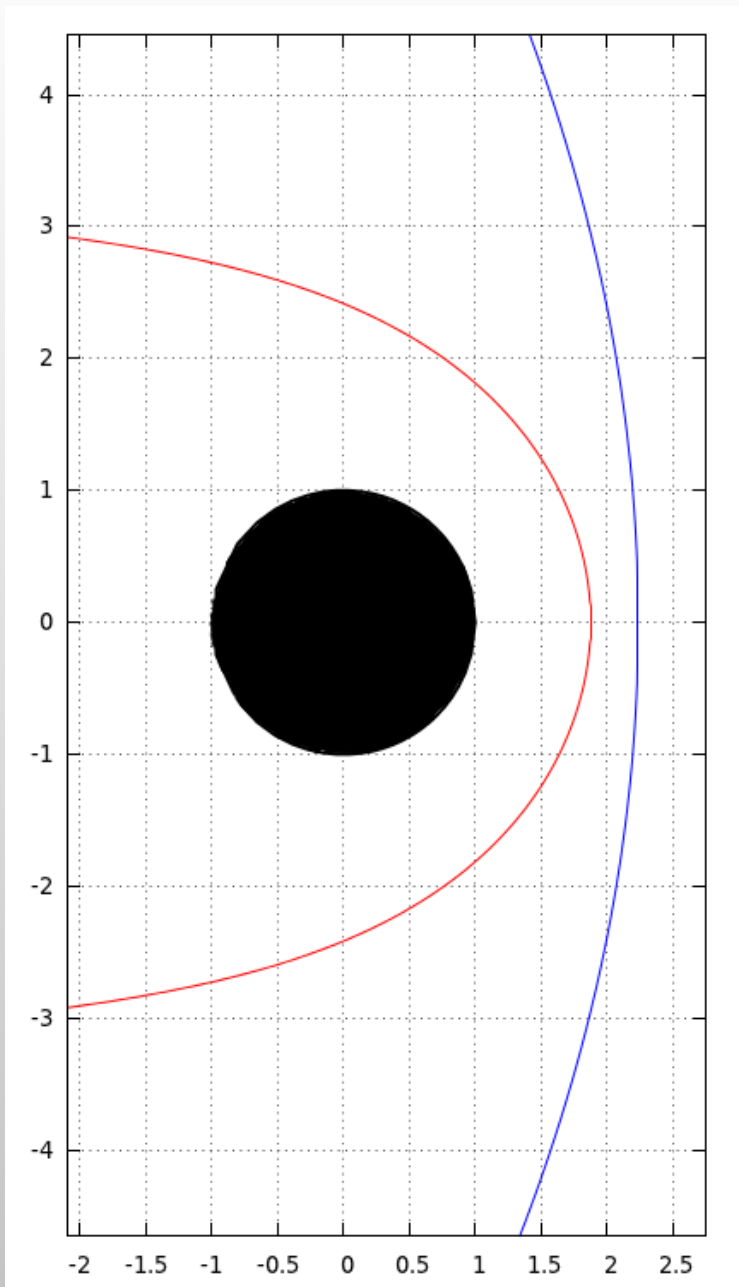
Положение и форма контактного разрыва определяются из равновесия динамического давления ветра и давления атмосферы (Баранов В.Б., Краснобаев К.В. «Гидродинамическая теория космической плазмы», 1977) .

$$\rho_w V^2 \cos^2 (\mathbf{n}, \mathbf{V}) = P_0 \exp \left(-\frac{GM_p}{R_g T_{atm} R_{atm}} \left(1 - \frac{R_{atm}}{r} \right) \right)$$

$$|\mathbf{V}| = \sqrt{\frac{GM_*}{A} + u_w^2}$$

$$r_{td} = R_{atm} / \left(\frac{R_g T_{atm} R_{atm}}{GM_p} \ln \left(\frac{\rho_w V^2}{P_0} \right) + 1 \right)$$





Положение отошедшей ударной волны аналитически не определяется, но можно воспользоваться полуэмпирическими формулами (Verigin et al., 2011).

Отхождение ударной волны:

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

Уравнение поверхности волны:

$$y^2(x) = 2R_0(r_0 - x) + b_0(r_0 - x)^2$$

M — число Маха,

r_0 — расстояние до контактного разрыва

R_0 — радиус кривизны контактного разрыва

b_0 — затупленность поверхности контактного разрыва

HD 209458b - первая открытая транзитная экзопланета, типичный "горячий Юпитер". Для этой планеты существуют самые подробные наблюдательные данные.

Параметры системы:

- $M_* = 1.1 M_{\text{sun}}$
- $R_* = 1.1 R_{\text{sun}}$
- $M_{\text{pl}} = 0.64 M_{\text{Jup}}$
- $R_{\text{pl}} = 1.32 R_{\text{Jup}}$
- $A = 0,045 \text{ a.u.}$
- $P = 3.5^{\text{d}}$

Параметры атмосферы:

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

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

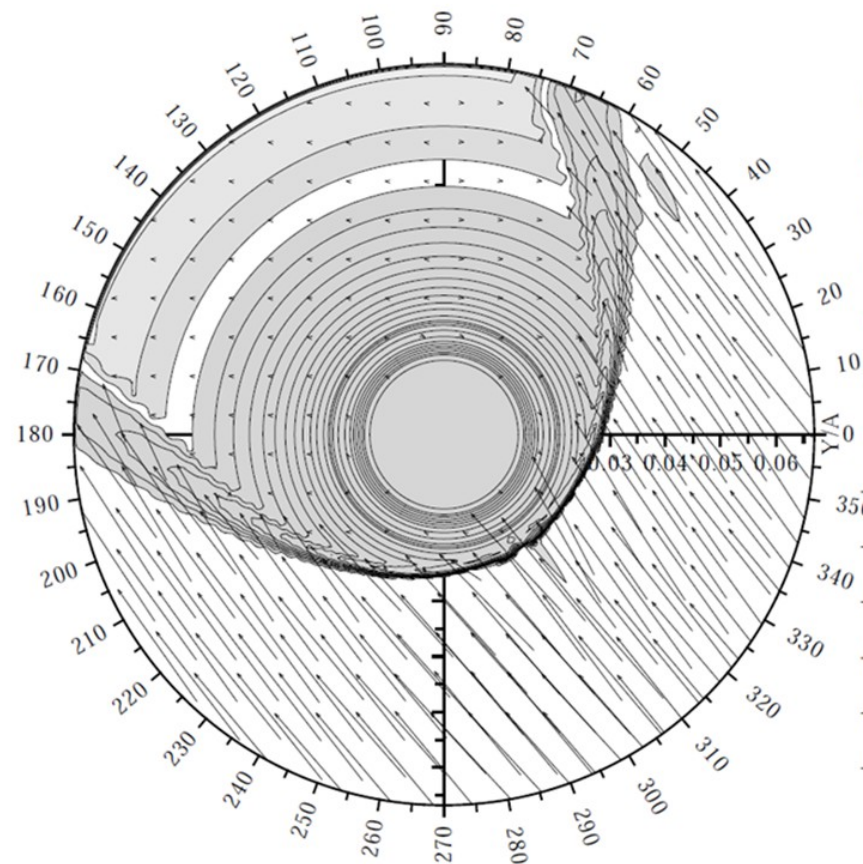
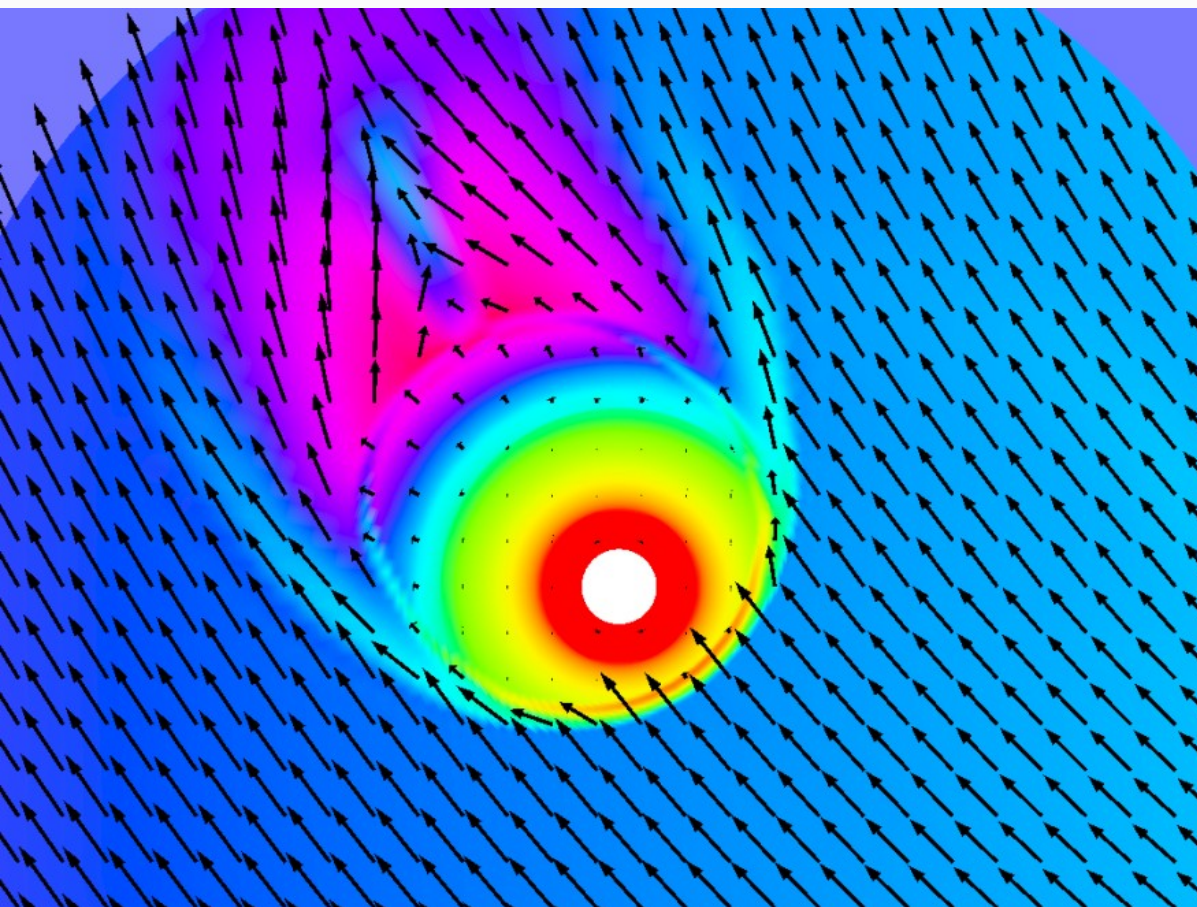
$$T = 5000 \div 10000 \text{ K}$$

Параметры звездного ветра:

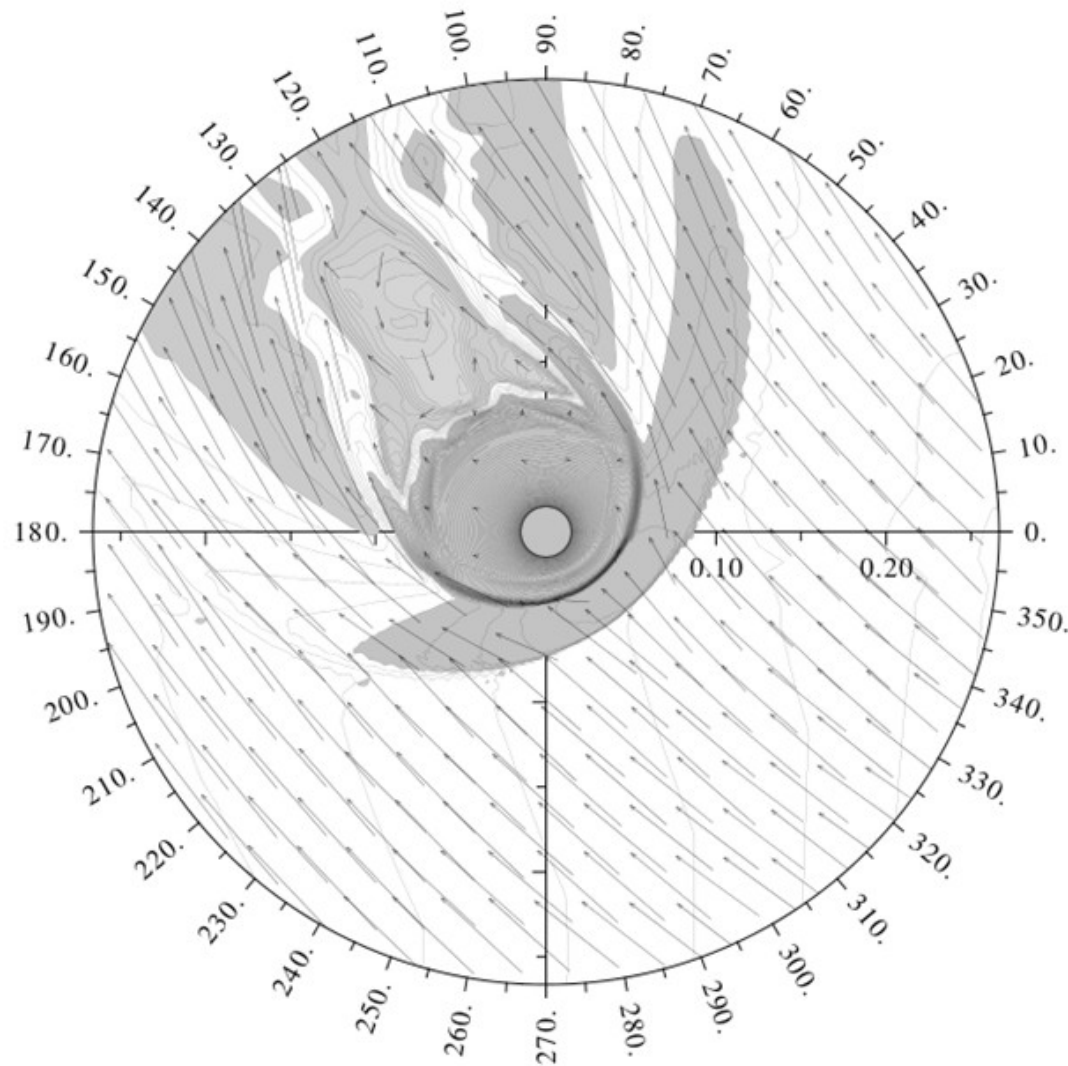
$$n = 1.4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

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

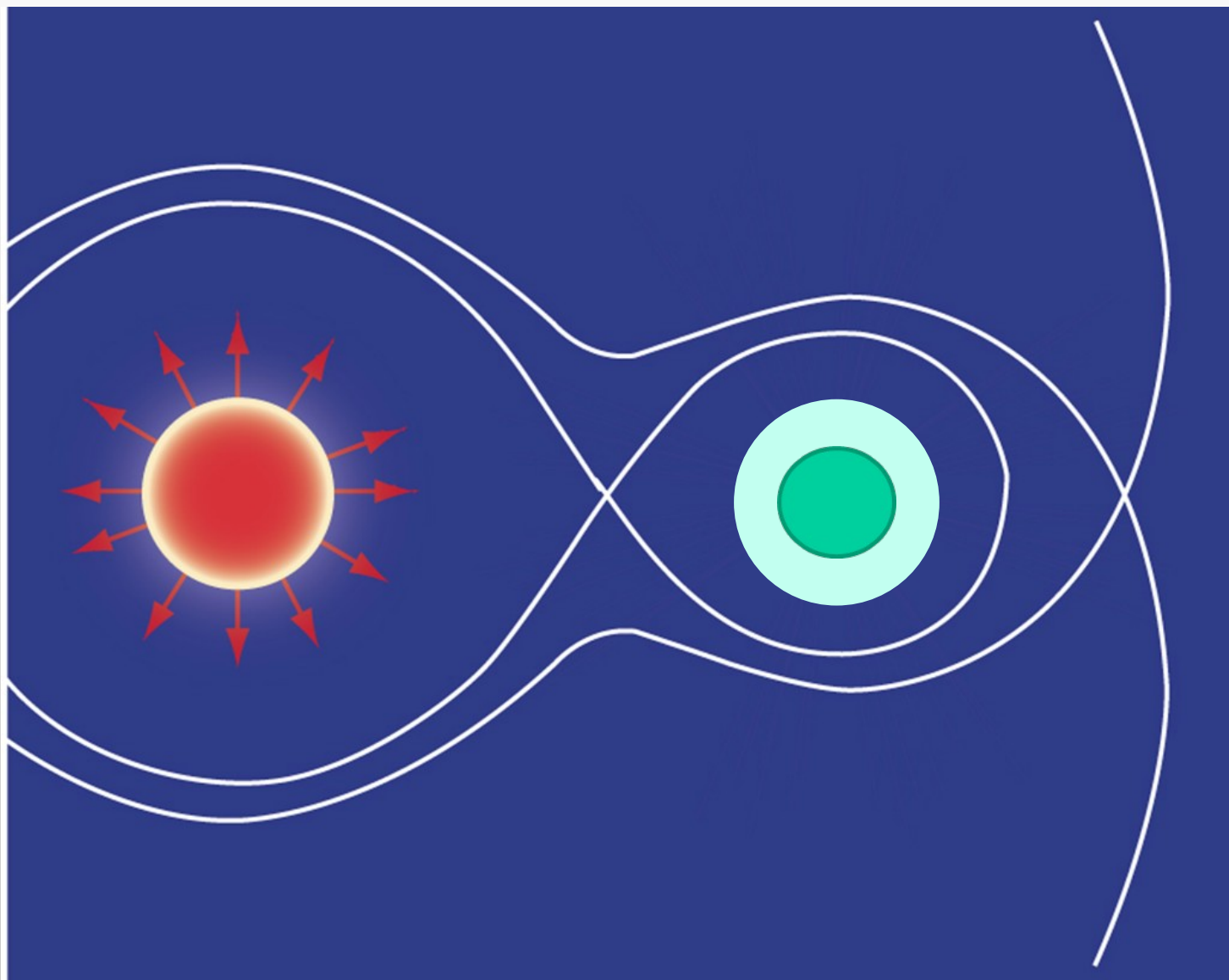
$$v = 100 \text{ km/s}$$



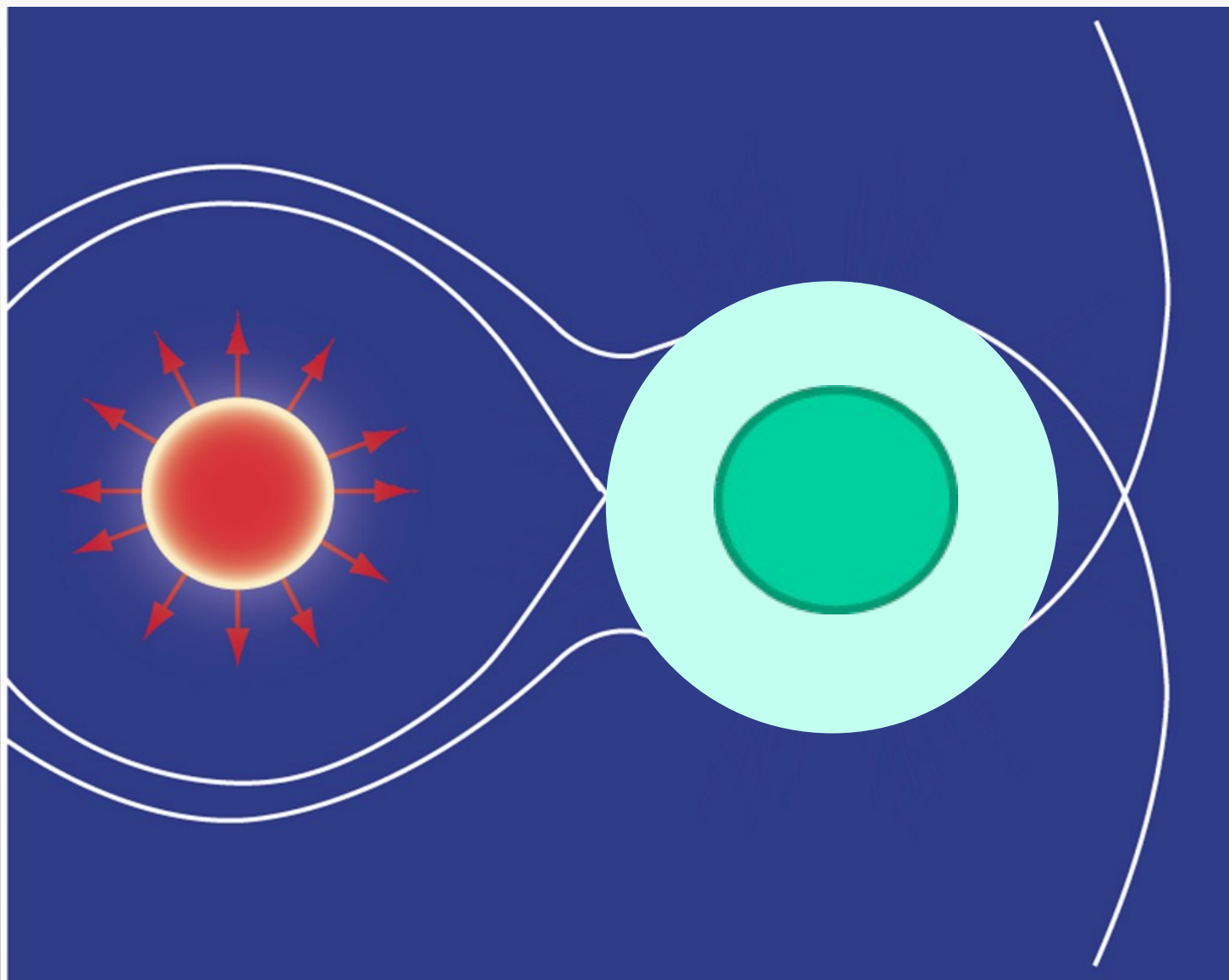
Результаты моделирования показывают образование отошедшей ударной волны вблизи планеты. Ее положение и форма находится в хорошем согласии с аналитическими и полуаналитическими оценками. Однако, они не согласуются с данными наблюдений.



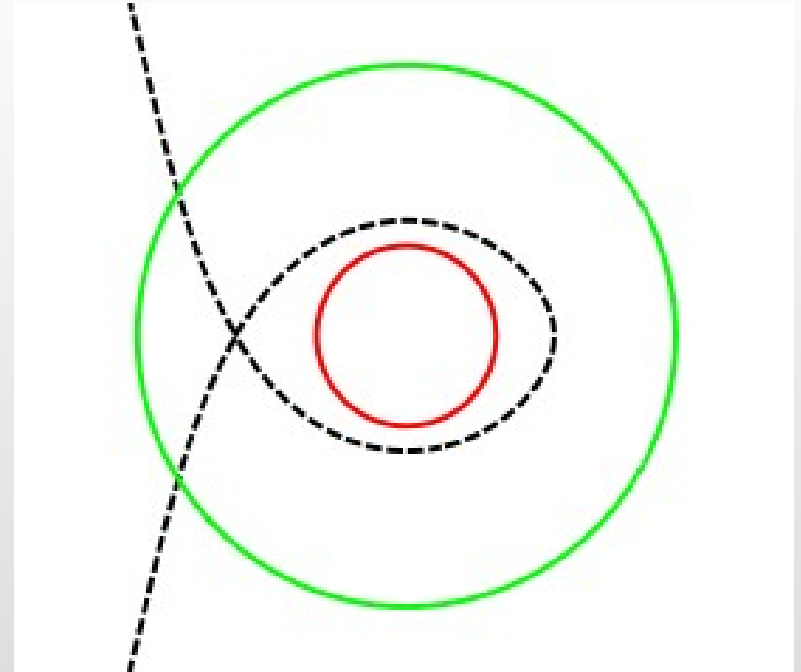
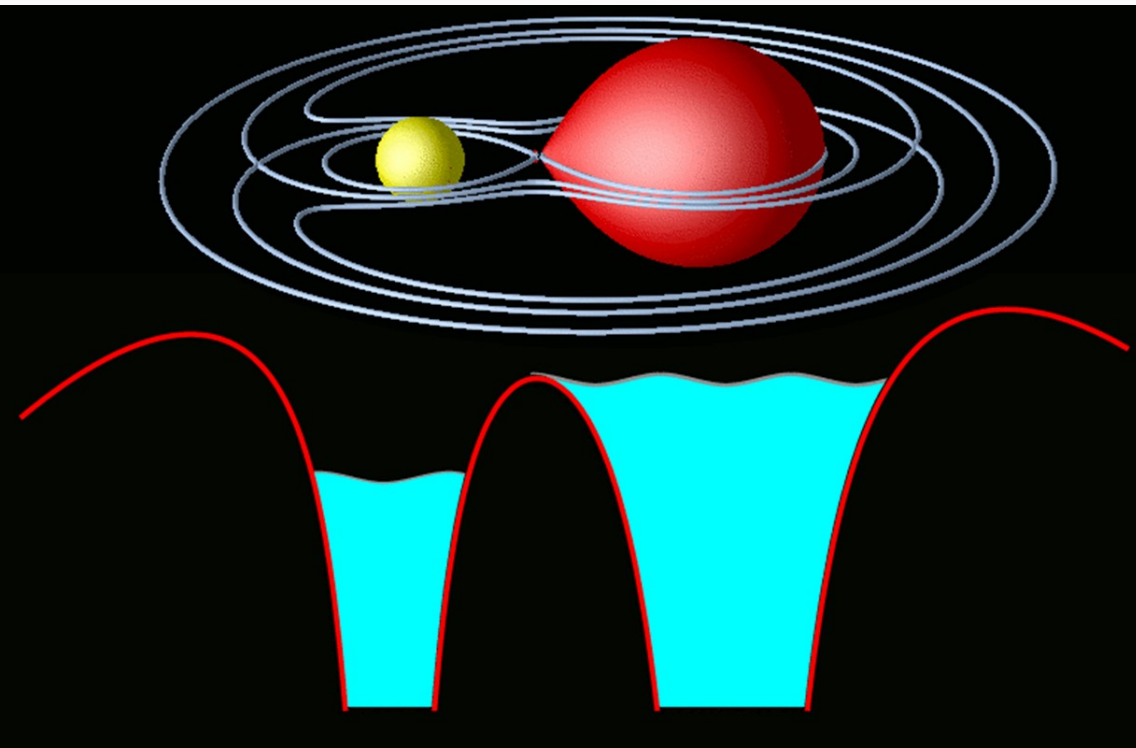
Более того, оказывается, что не существует разумных значений параметров атмосферы и звездного ветра, которые бы обеспечили расположение точки лобового столкновения на ~4-5 радиусах планеты, если оставаться в рамках исключительно газодинамического решения.



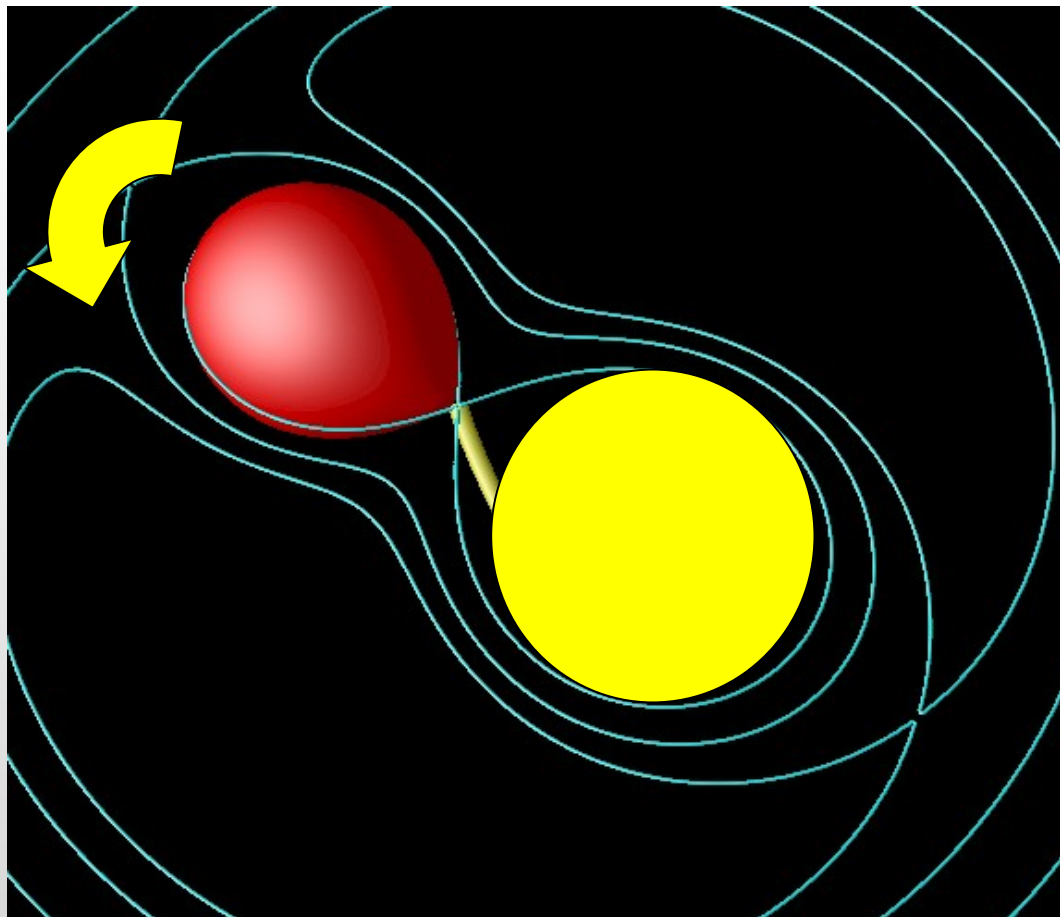
Какие возможные особенности WASP-12b могут определять столь странные наблюдательные проявления?



Оказалось, что WASP-12b, как и многие другие "горячие Юпитеры", имеет большой радиус, и ее атмосфера выходит за пределы полости Роша.



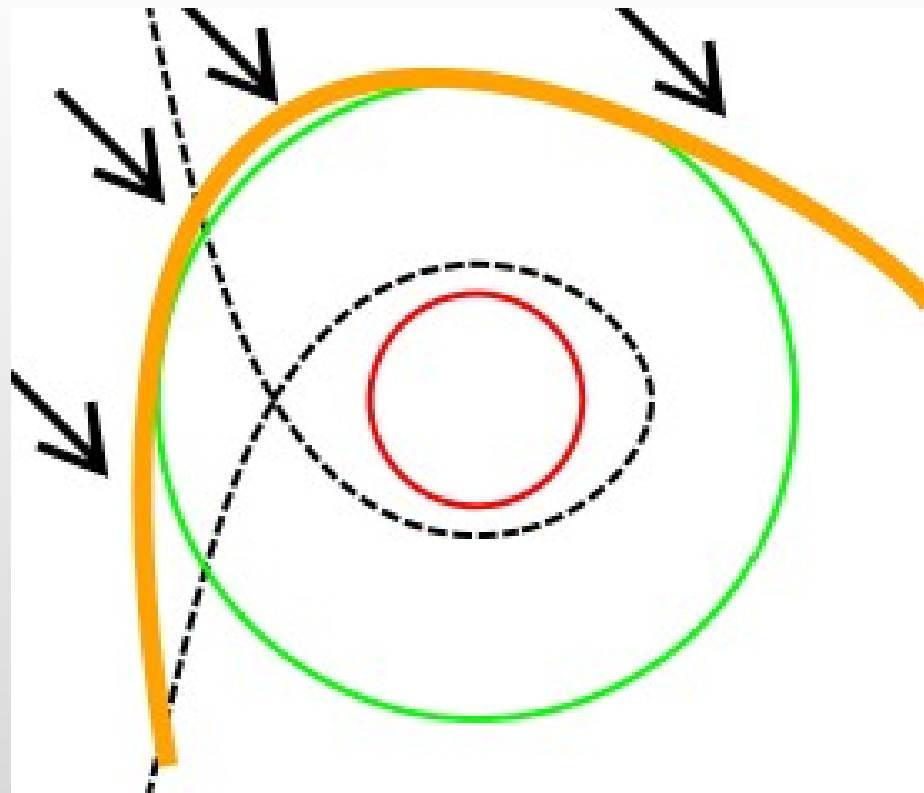
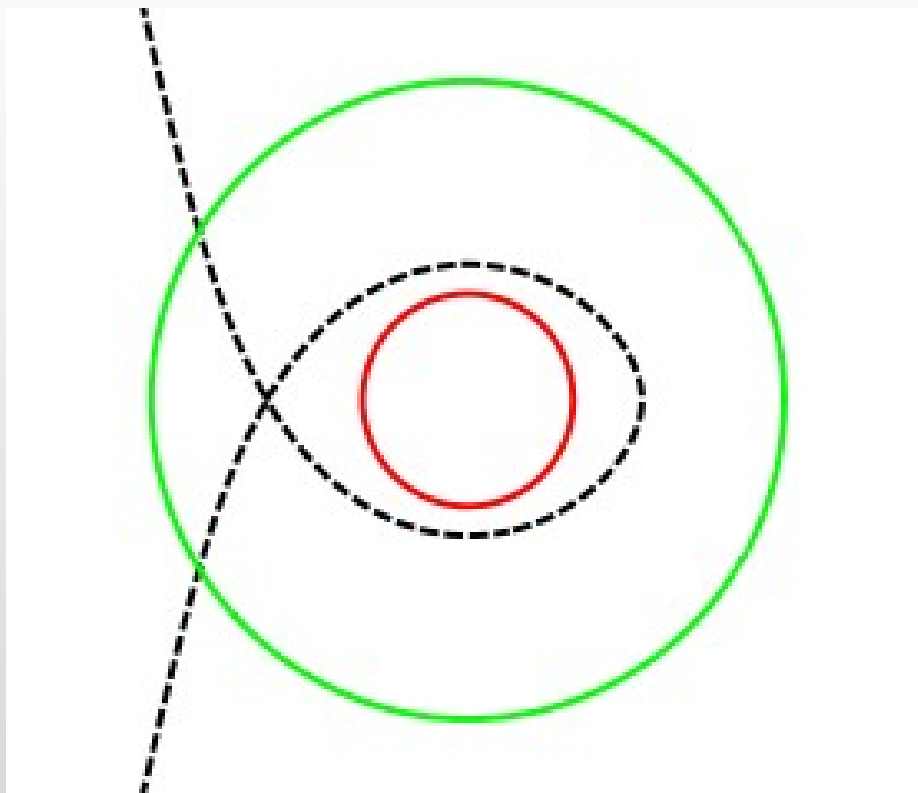
Размер атмосферы WASP-12b существенно превосходит полость Роша (верхняя граница атмосферы показана зеленым кружком на правой панели). Такая конфигурация с неизбежностью приводит к мощному оттоку атмосферы через точки Лагранжа L_1 и L_2 . Соответственно, атмосфера уже не будет симметричной.



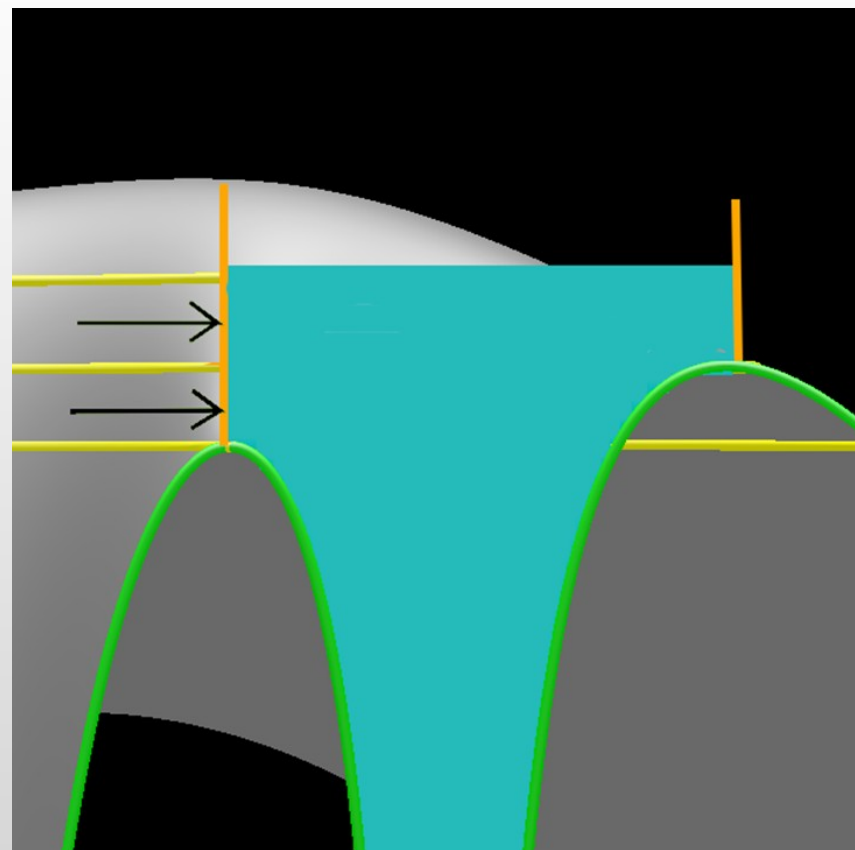
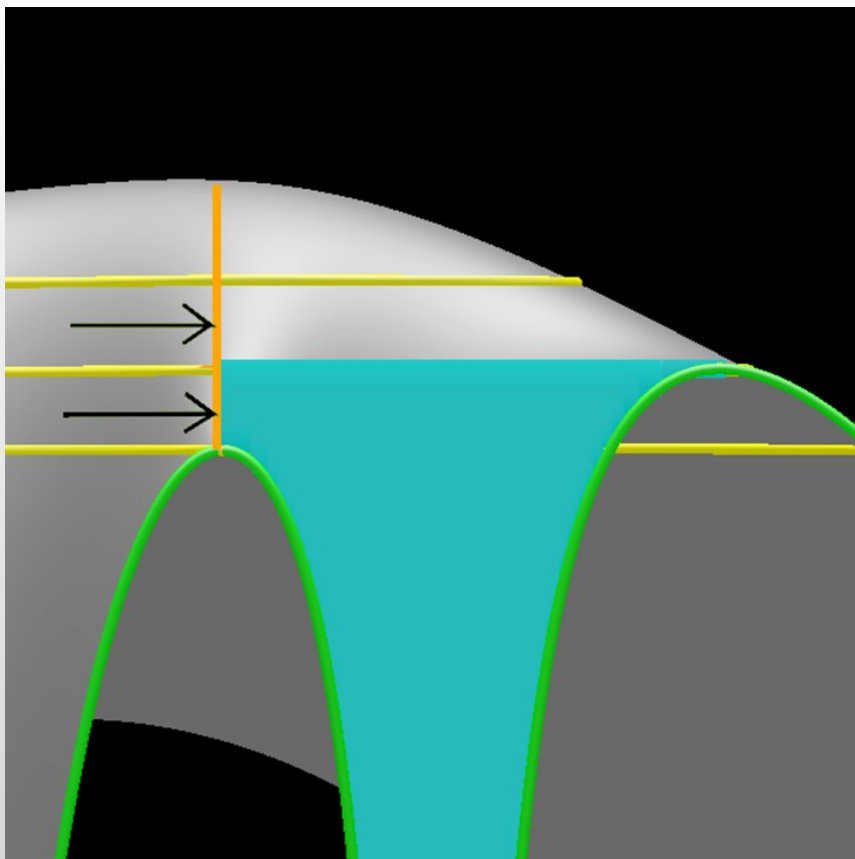
В простейшем случае, когда газодинамическими эффекты невелики, мы должны наблюдать образование струи из точки L_1 . Однако подобная структура течения не должны быть долгоживущей, так как скорость оттока атмосферы аномально высока:

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

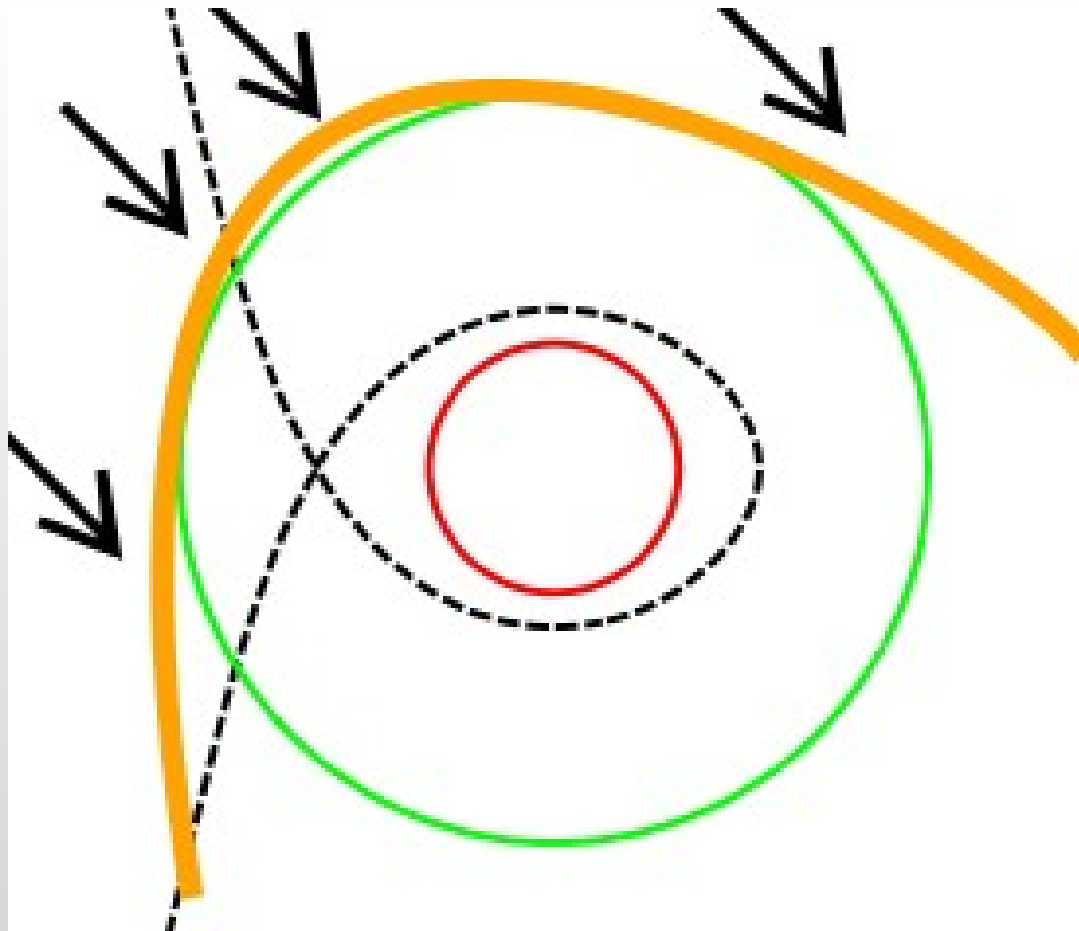
и время жизни атмосферы планеты не превышает нескольких лет.



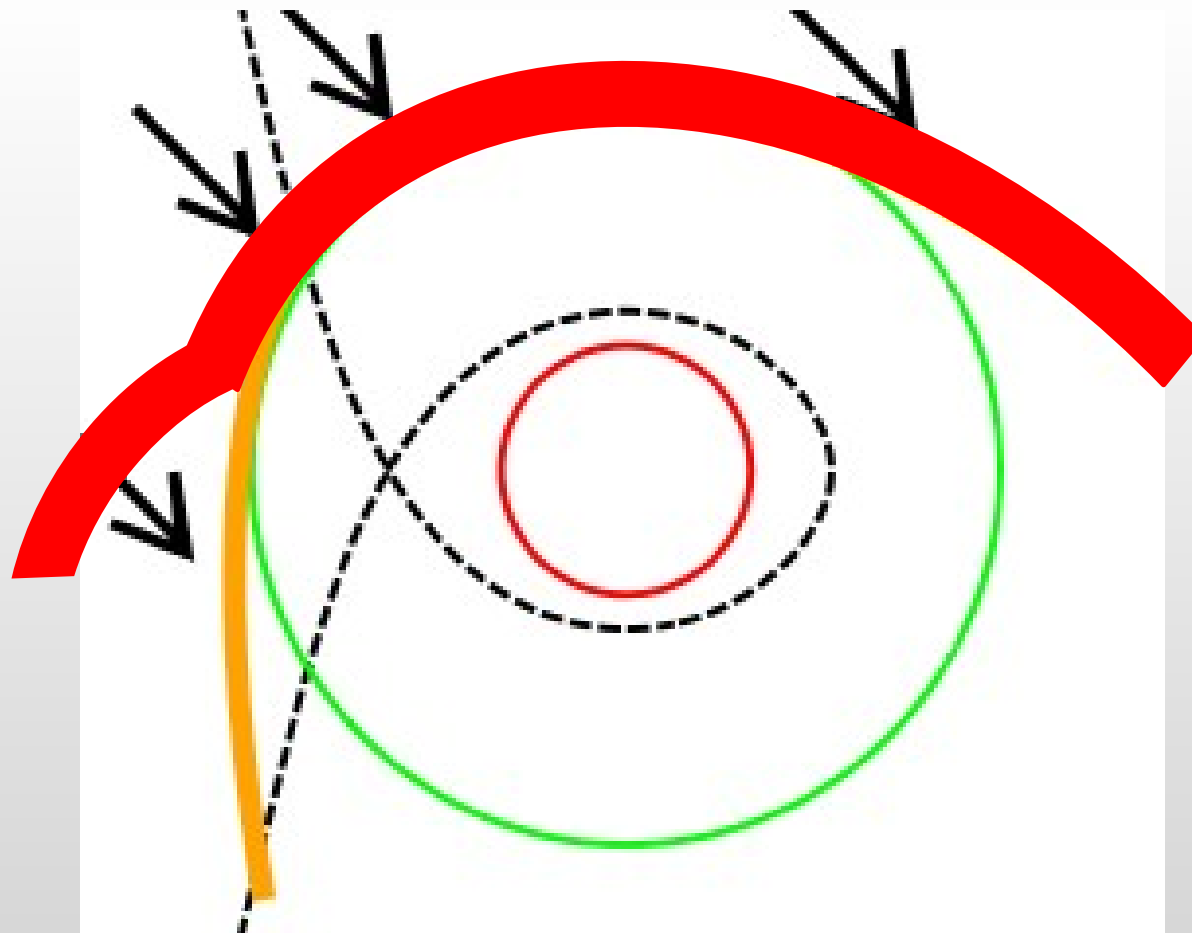
Отошедшая ударная волна помогает исправить ситуацию. Действительно, взаимодействие атмосферы с веществом за фронтом ударной волны может перекрыть истечение через точки L_1 и L_2 .



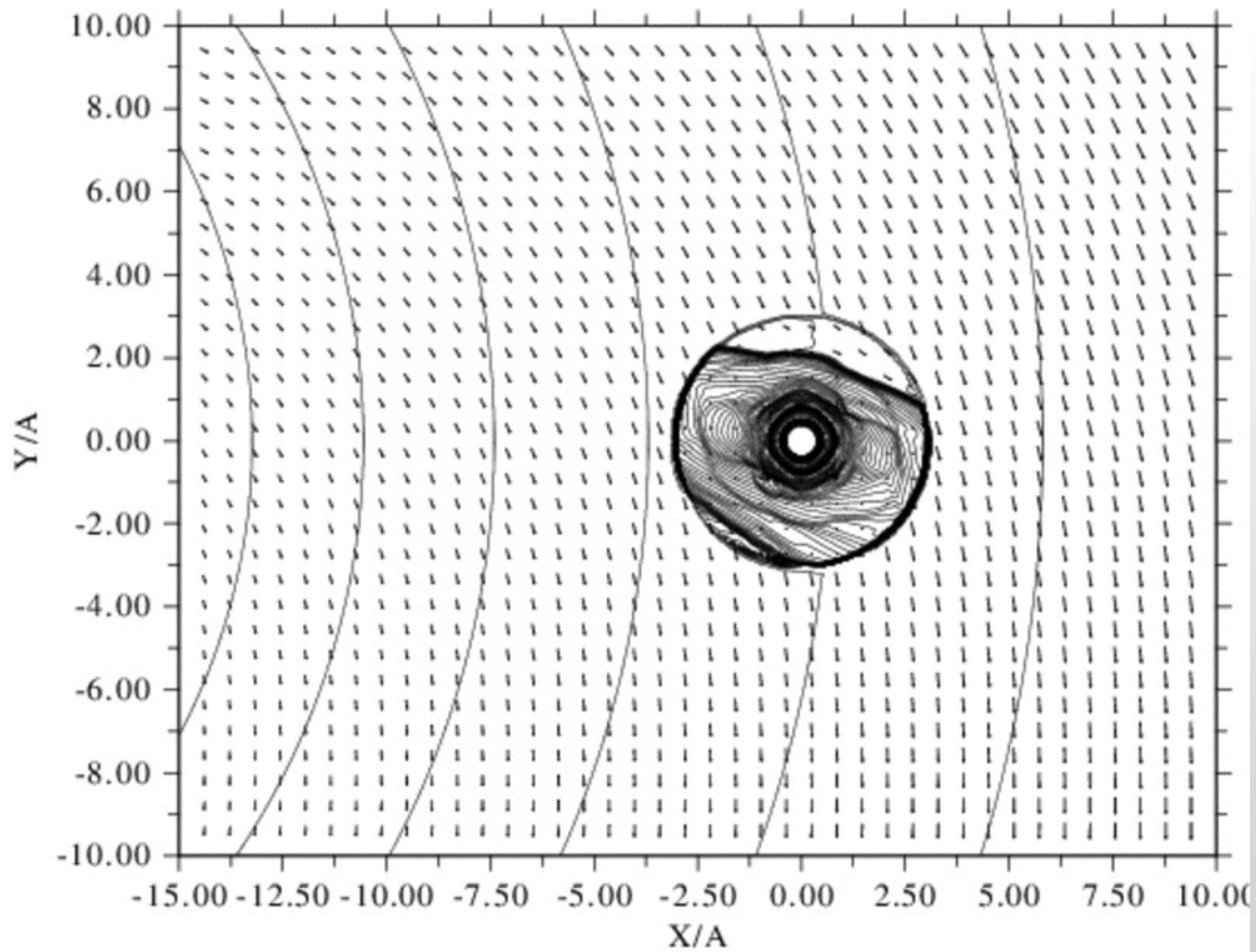
Отошедшая ударная волна помогает исправить ситуацию. Действительно, взаимодействие атмосферы с веществом за фронтом ударной волны может перекрыть истечение через точки L_1 и L_2 .



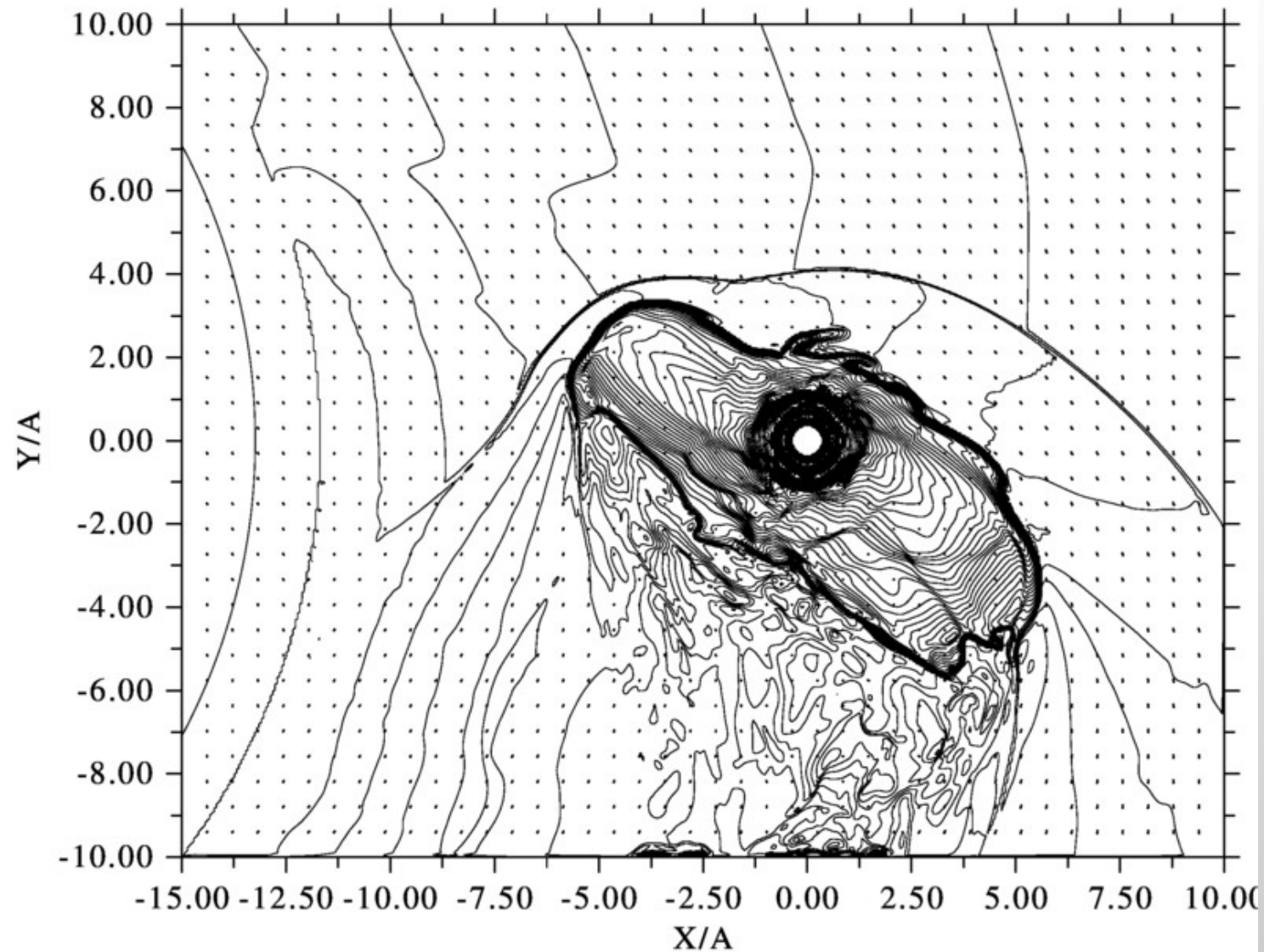
В случае сильного истечения атмосферы мы должны наблюдать более сложную геометрию отошедшей ударной волны. Мощная струя из внутренней точки Лагранжа, изогнутая в направлении движения планеты, должна не только отодвигать отошедшую ударную волну, но и изменять ее форму.



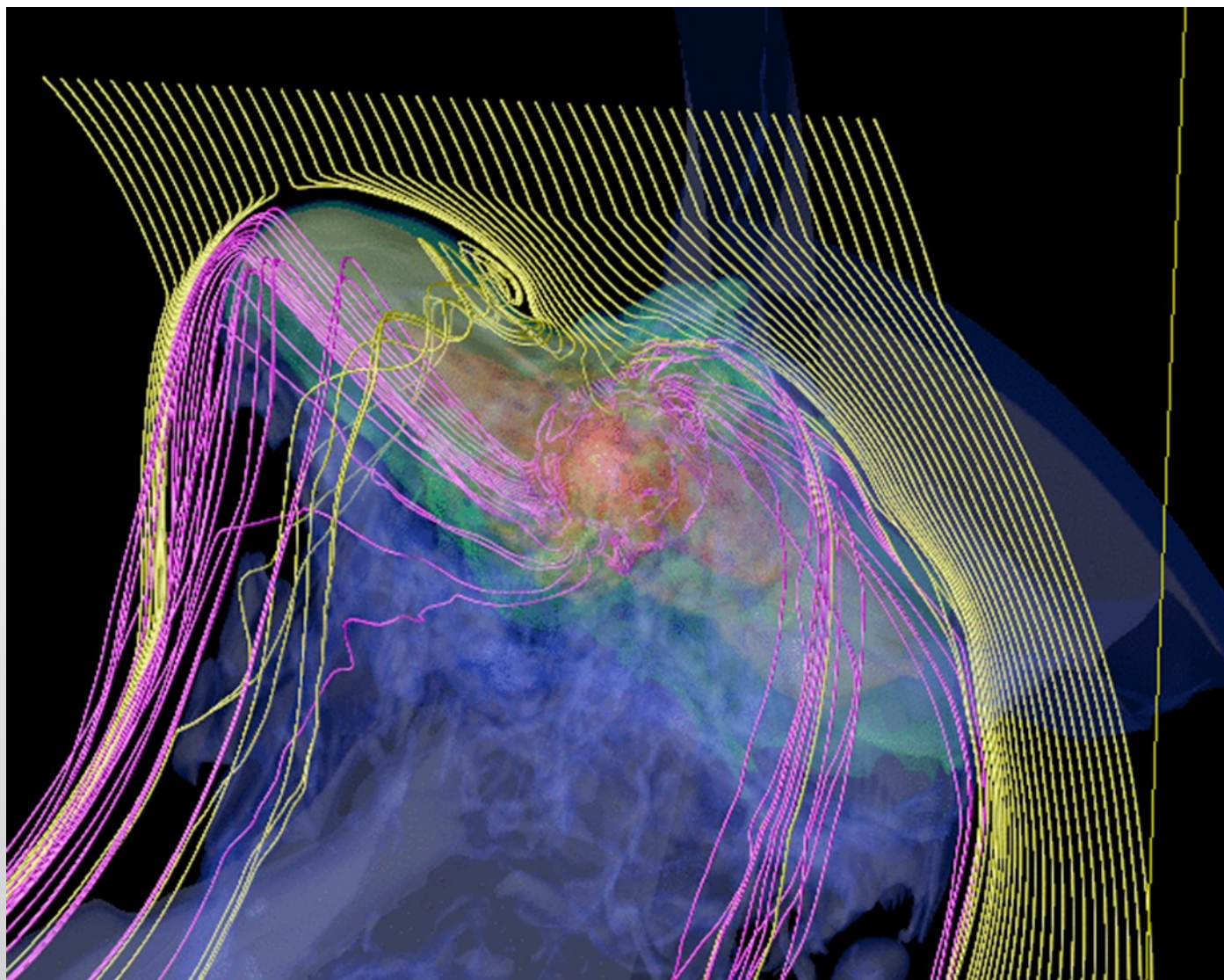
В случае сильного истечения атмосферы мы должны наблюдать более сложную геометрию отошедшей ударной волны. Мощная струя из внутренней точки Лагранжа, изогнутая в направлении движения планеты, должна не только отодвигать отошедшую ударную волну, но и изменять ее форму.



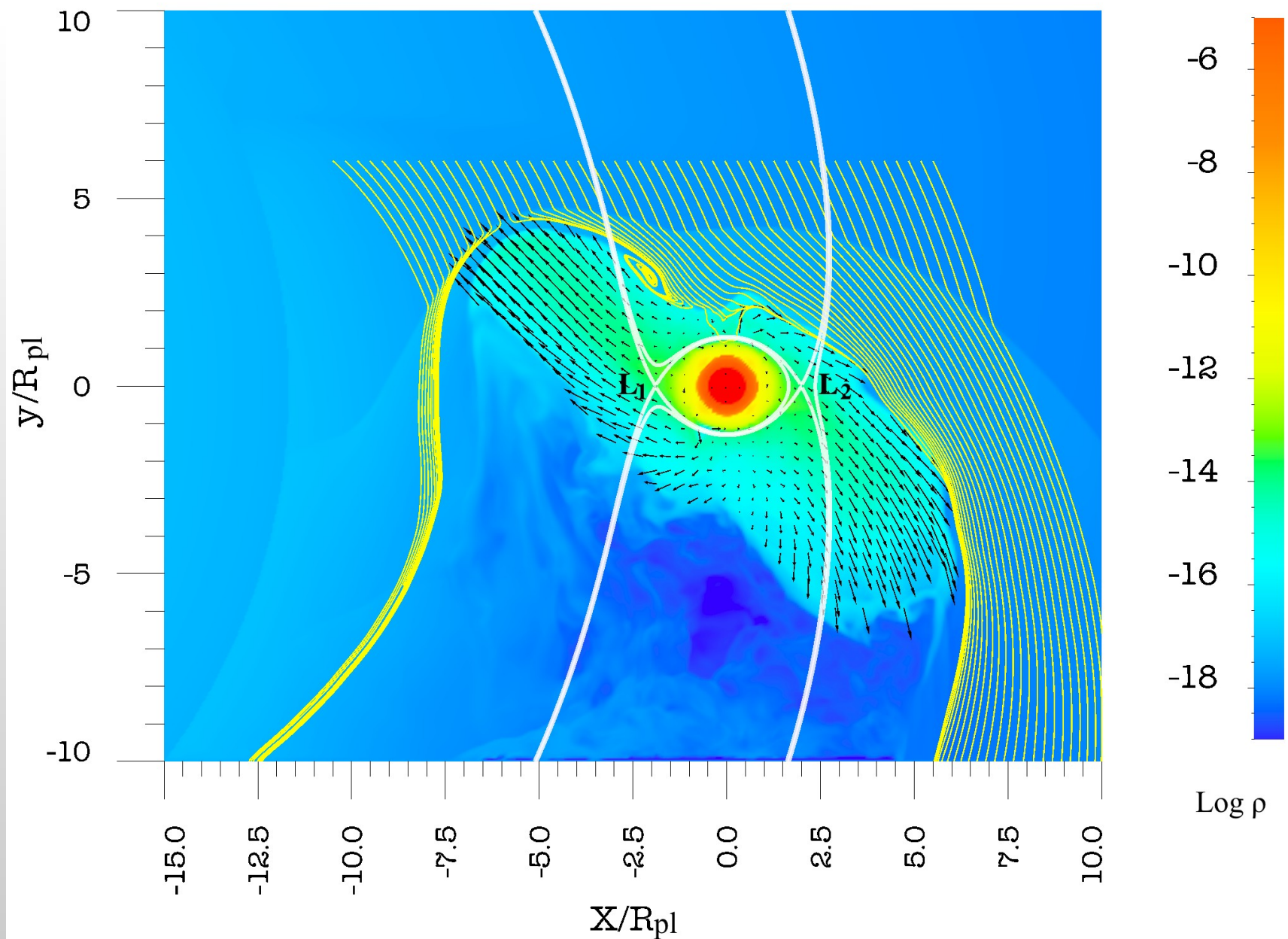
Расчеты подтвердили, что оболочка WASP-12b имеет сложную форму. Вдобавок к центральной сферической атмосфере появляется два выступа в направлении точек Лагранжа. Эти потоки, покидая планету, изгибаются: один - в направлении орбитального движения планеты, другой - в противоположном направлении.



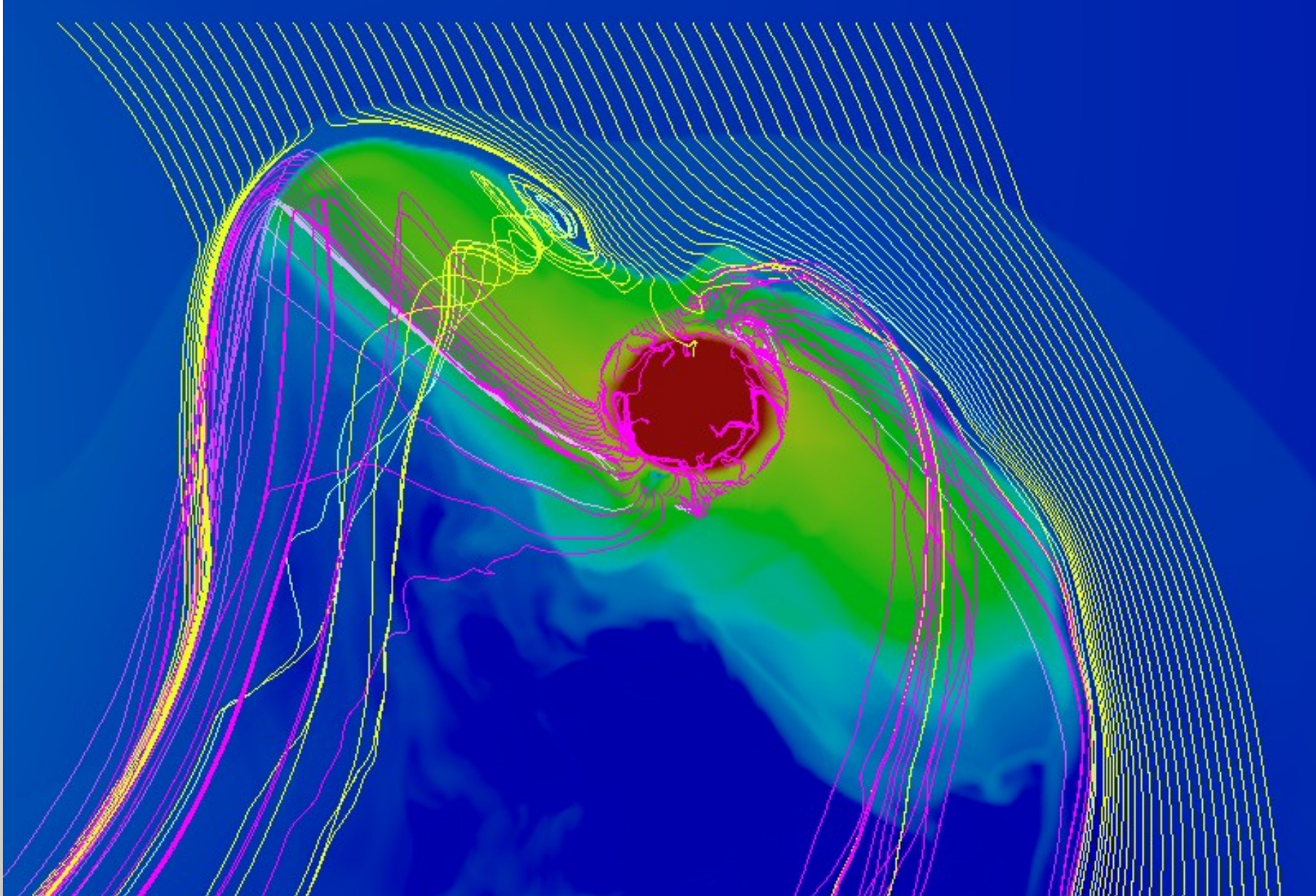
Под влиянием динамического давления звездного ветра струя из L_1 замедляется и в конце концов останавливается на расстоянии ~ 6 радиусов планеты, считая от ее центра. При этом вокруг планеты формируется стационарная оболочка.



Планета вместе со своей оболочкой движется в среде звездного ветра со сверхзвуковой скоростью, причем число Маха $M=2.14$. Поэтому динамическое давление звездного ветра не только вызывает образование замкнутой оболочки планеты, но и ведет к формированию отошедшей ударной волны и контактного разрыва, которые определяют границы оболочки. Волна имеет сложную двугорбую форму.

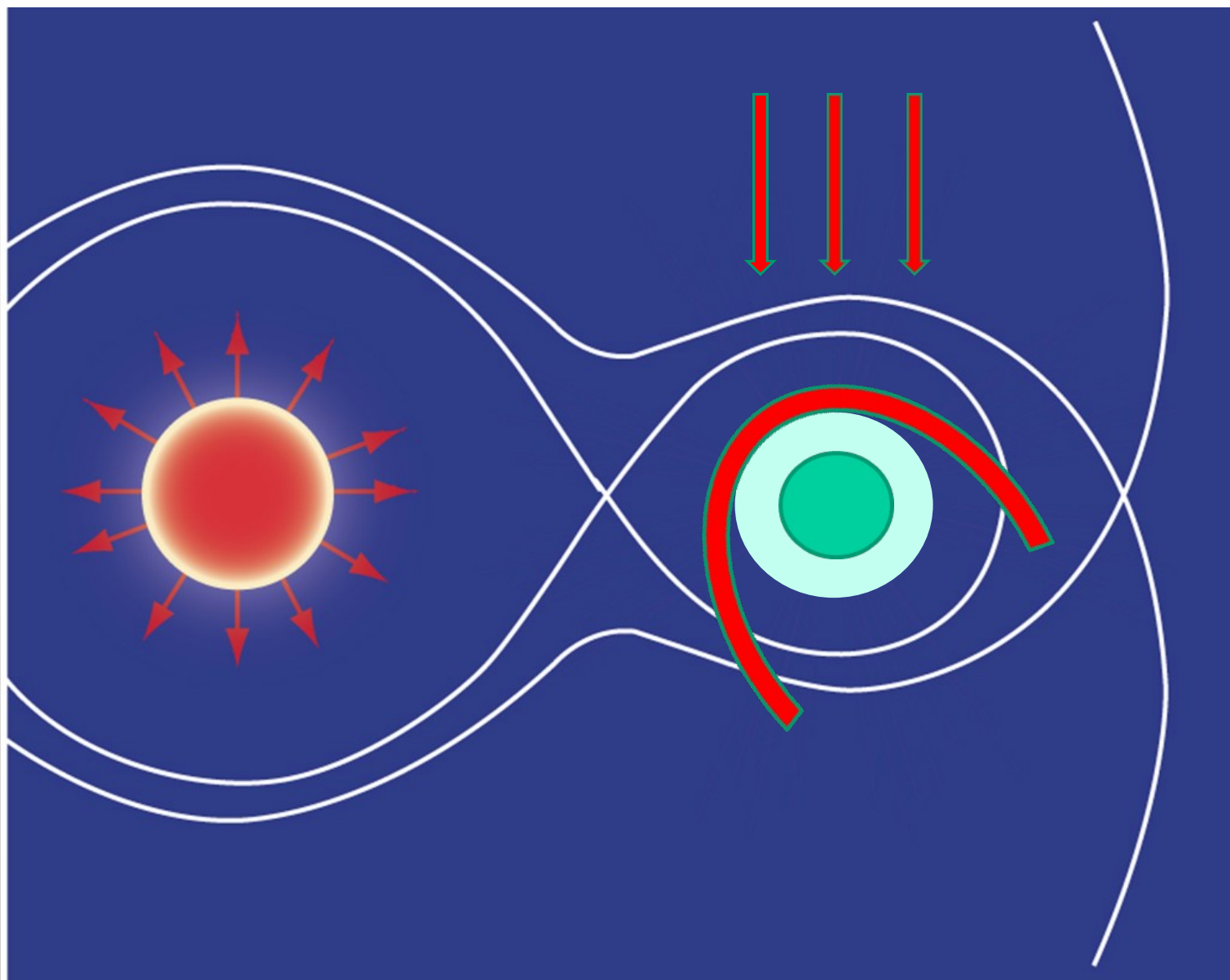


Точка лобового столкновения, найденная из расчетов, находится на конце струи из точки L_1 . Расстояние от планеты до точки лобового столкновения в проекции на диск звезды составляет ~ 4 -5 радиусов планеты. Это позволяет объяснить наблюдаемое раннее начало транзита.

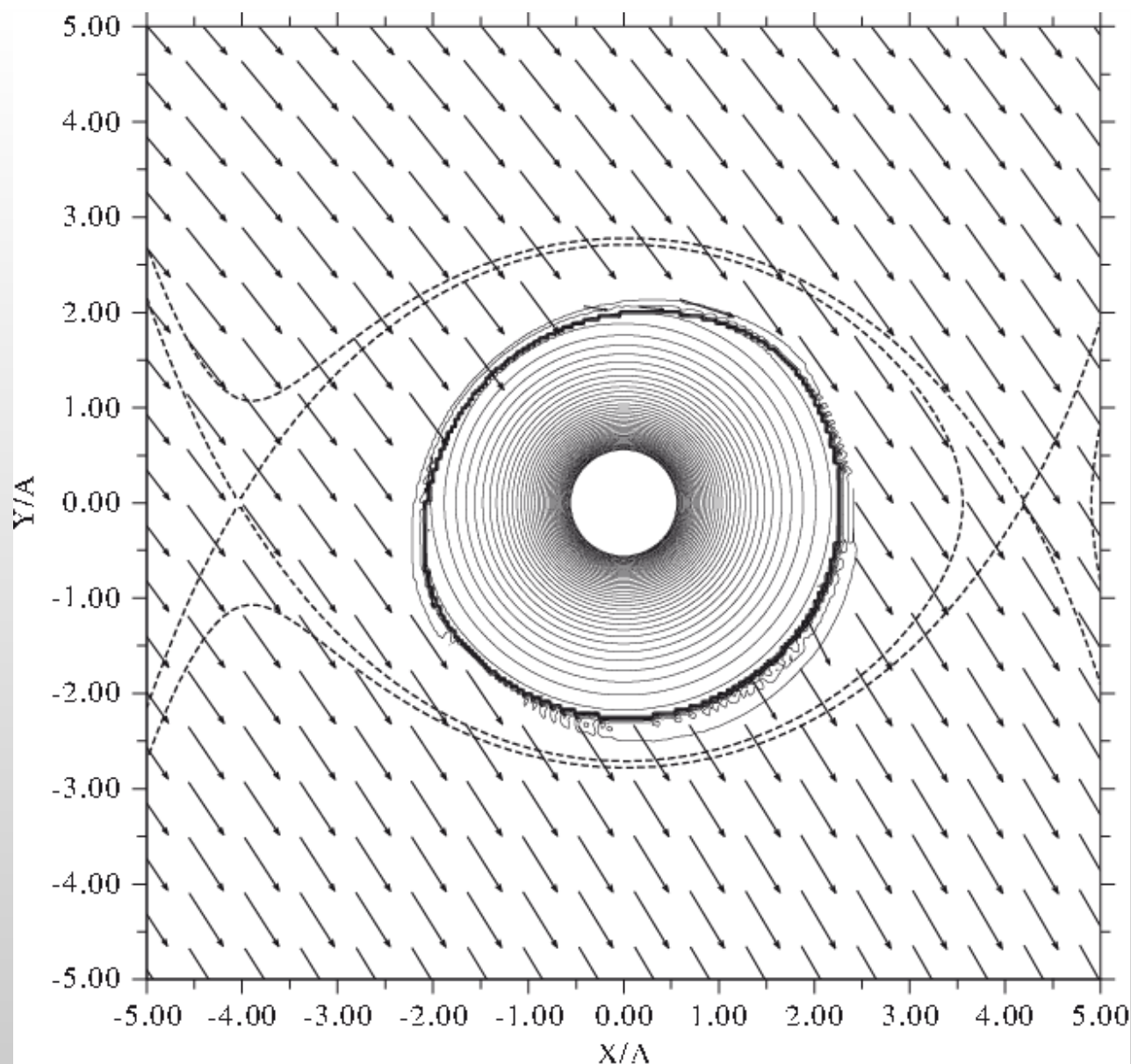


Наличие ударной волны приводит к нагреву оболочки планеты, что, в частности, позволяет объяснить и наблюдаемое более глубокое (в 2 раза!) затмение в ультрафиолетовых полосах.

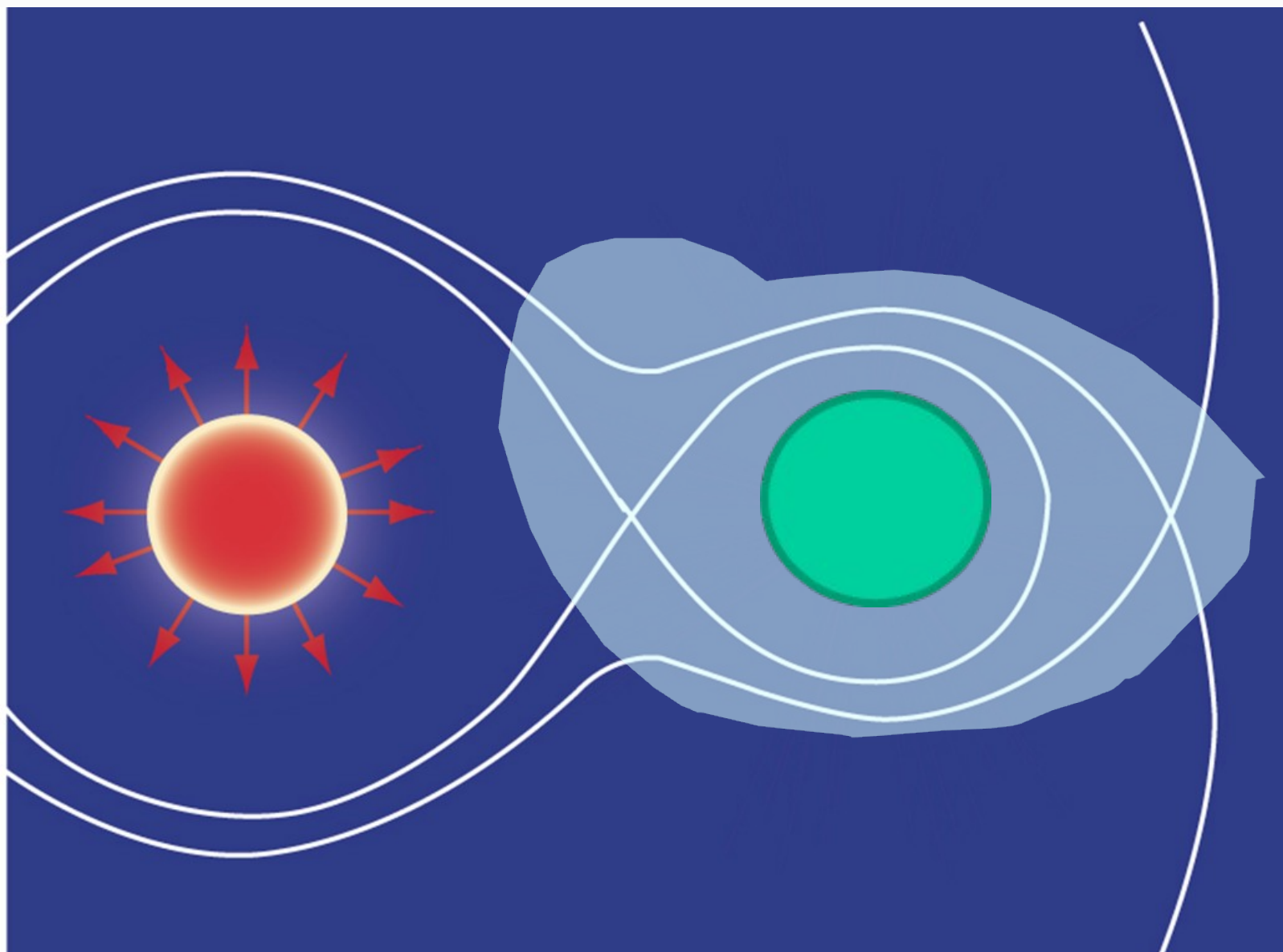
Типы газовых оболочек ЭКЗОПЛАНЕТ



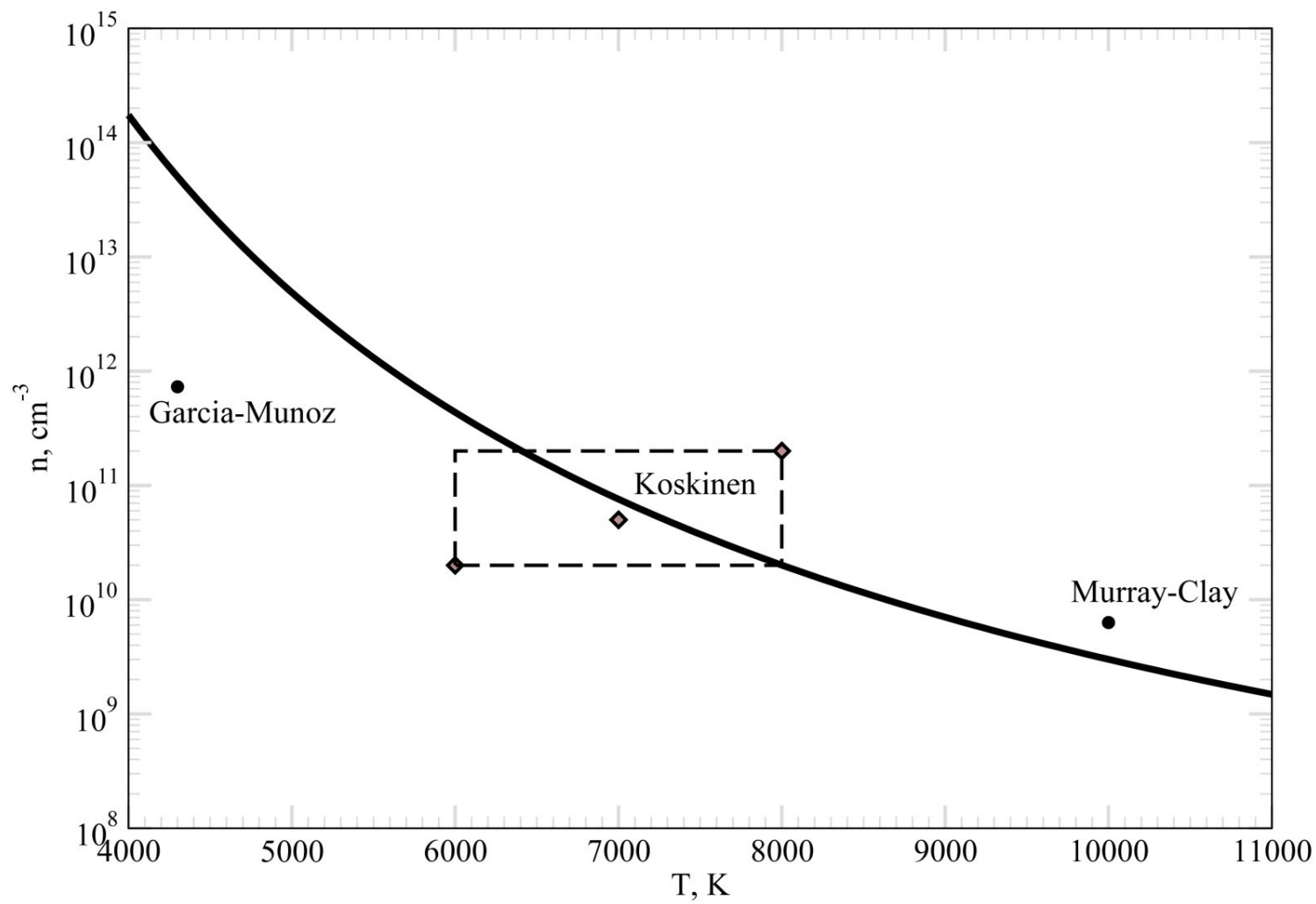
Все газовые оболочки вокруг <<горячих юпитеров>> можно разделить на три типа. Прежде всего, нужно выделить замкнутые оболочки, формируемые в системах, у которых точка лобового столкновения с потоком звездного ветра лежит под поверхностью полости Роша.



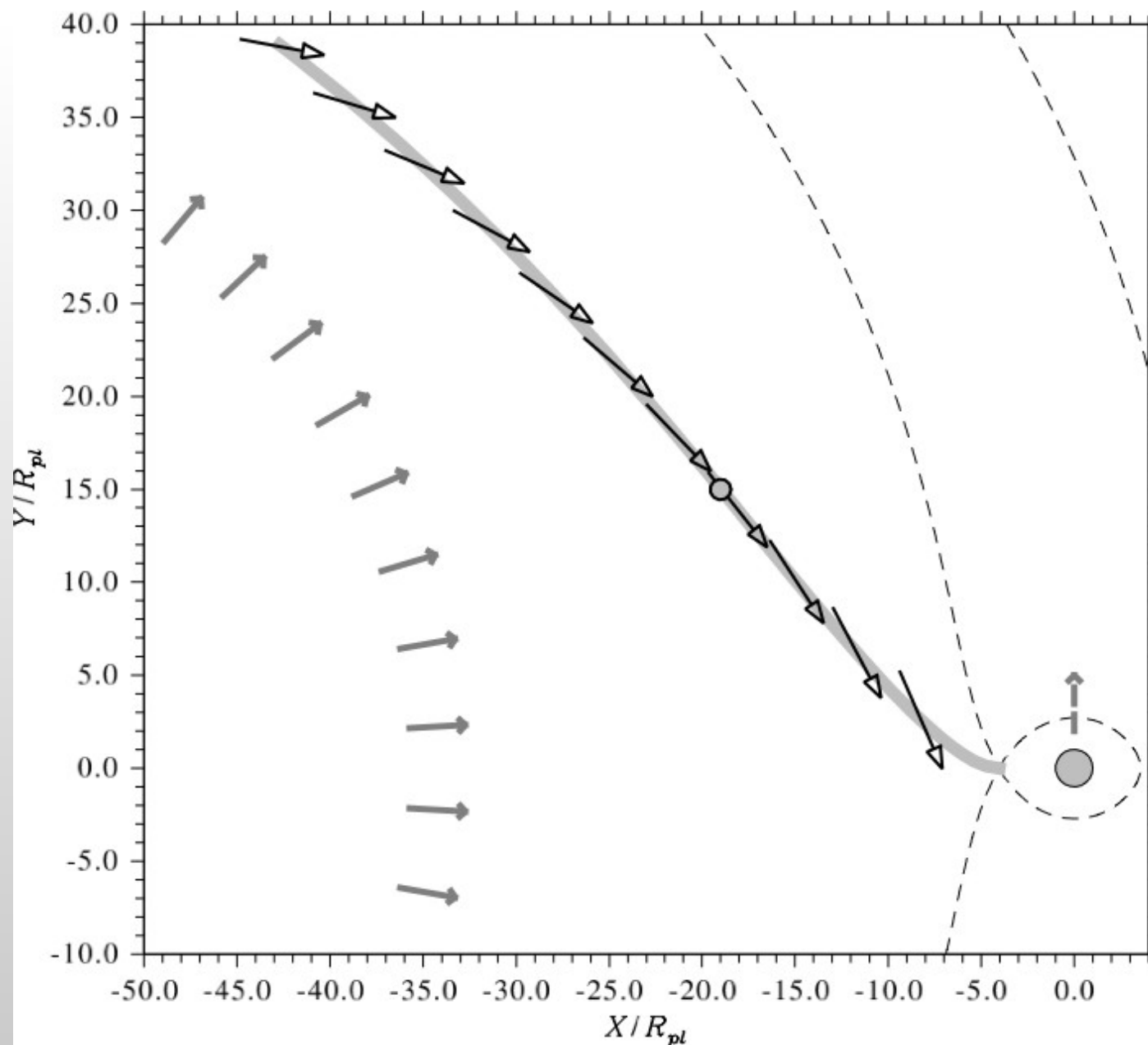
В зависимости от степени заполнения полости Роша эти оболочки могут отклоняться от сферической формы, но их несомненным отличием является отсутствие существенного оттока вещества.



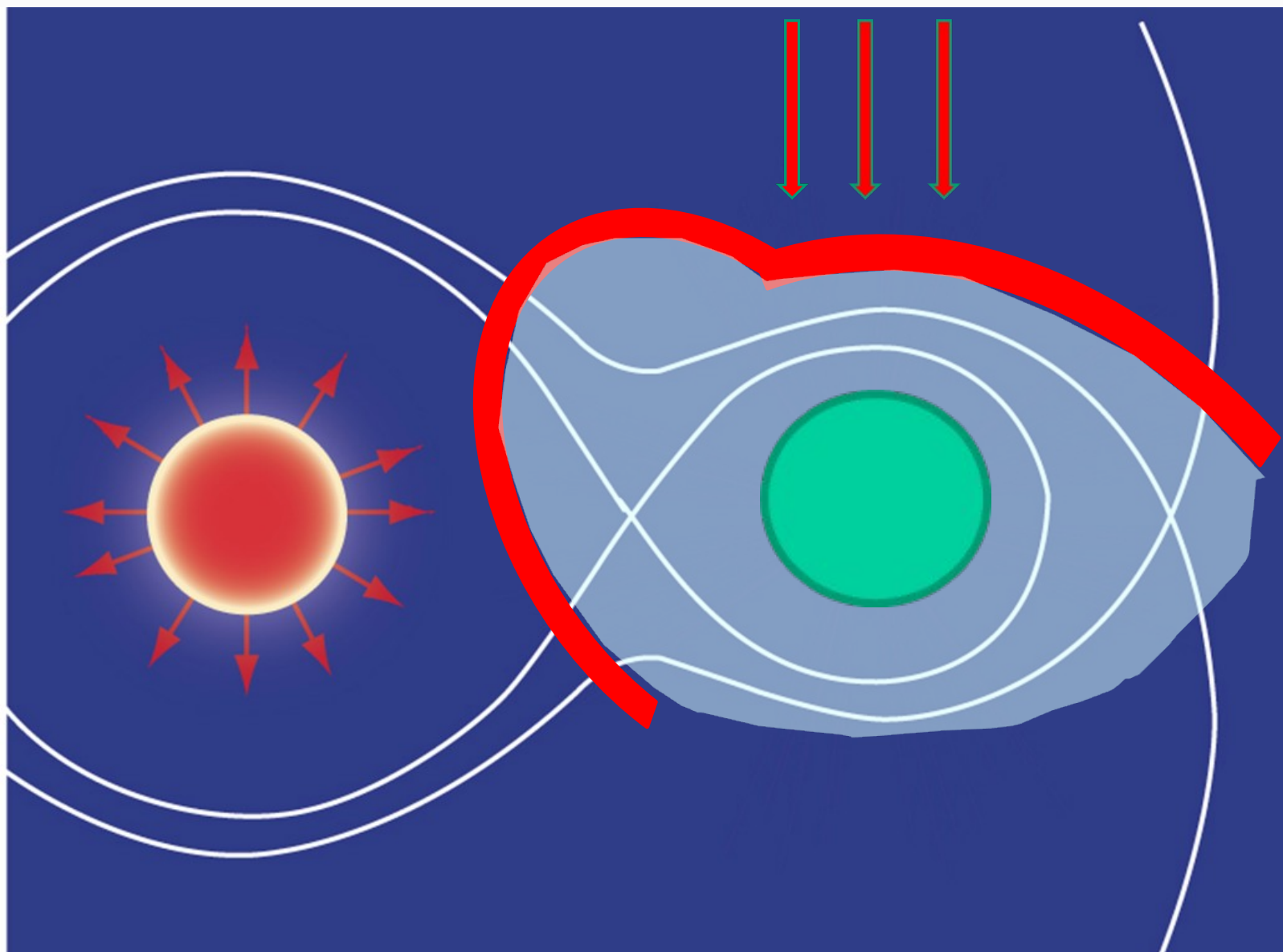
Если точка лобового столкновения, а, следовательно, и часть атмосферы лежат за пределами полости Роша, то начинается заметное истечение из окрестностей точек Лагранжа L_1 и L_2 .



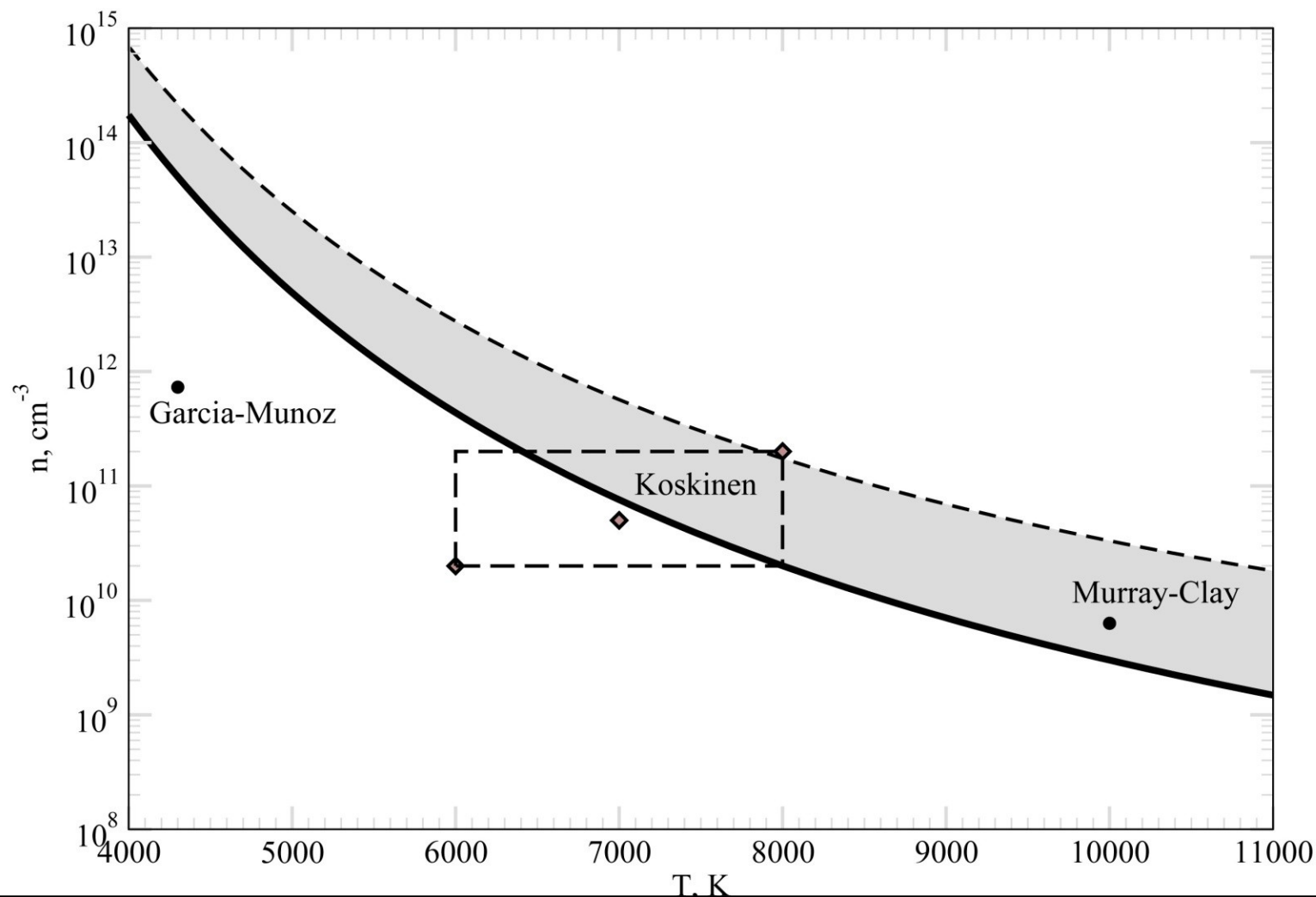
HD 209458b



Часть оболочек может иметь ограниченные размеры, так как распространение потоков, возникающих при переполнении полости Роша может быть остановлено звездным ветром.

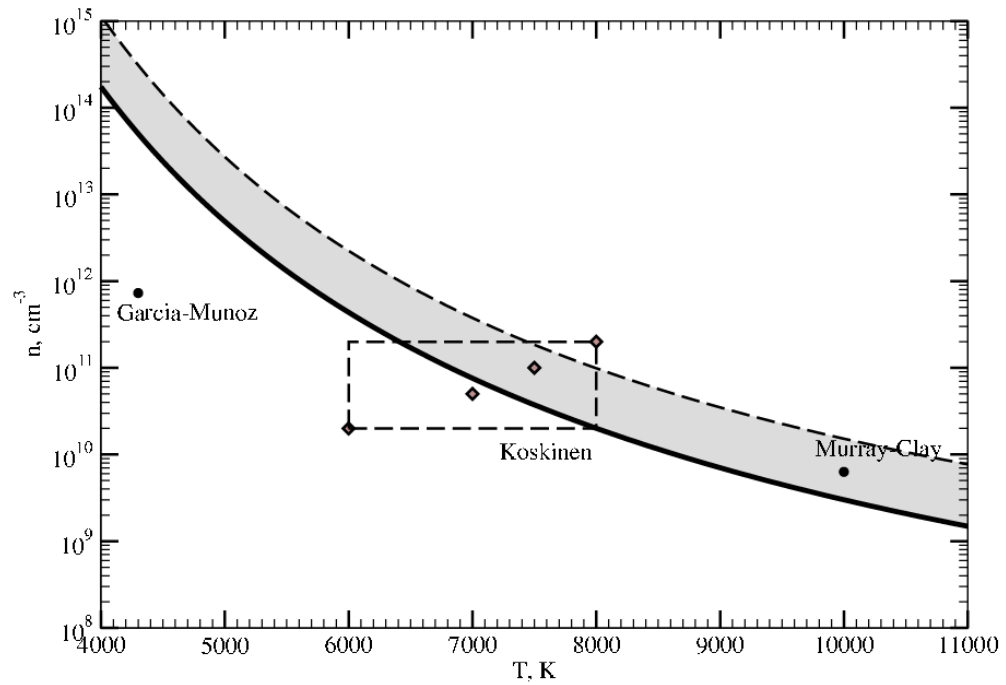


Как следствие, в системе формируются квази-замкнутые, стационарные и долгоживущие оболочки существенно несферической формы.

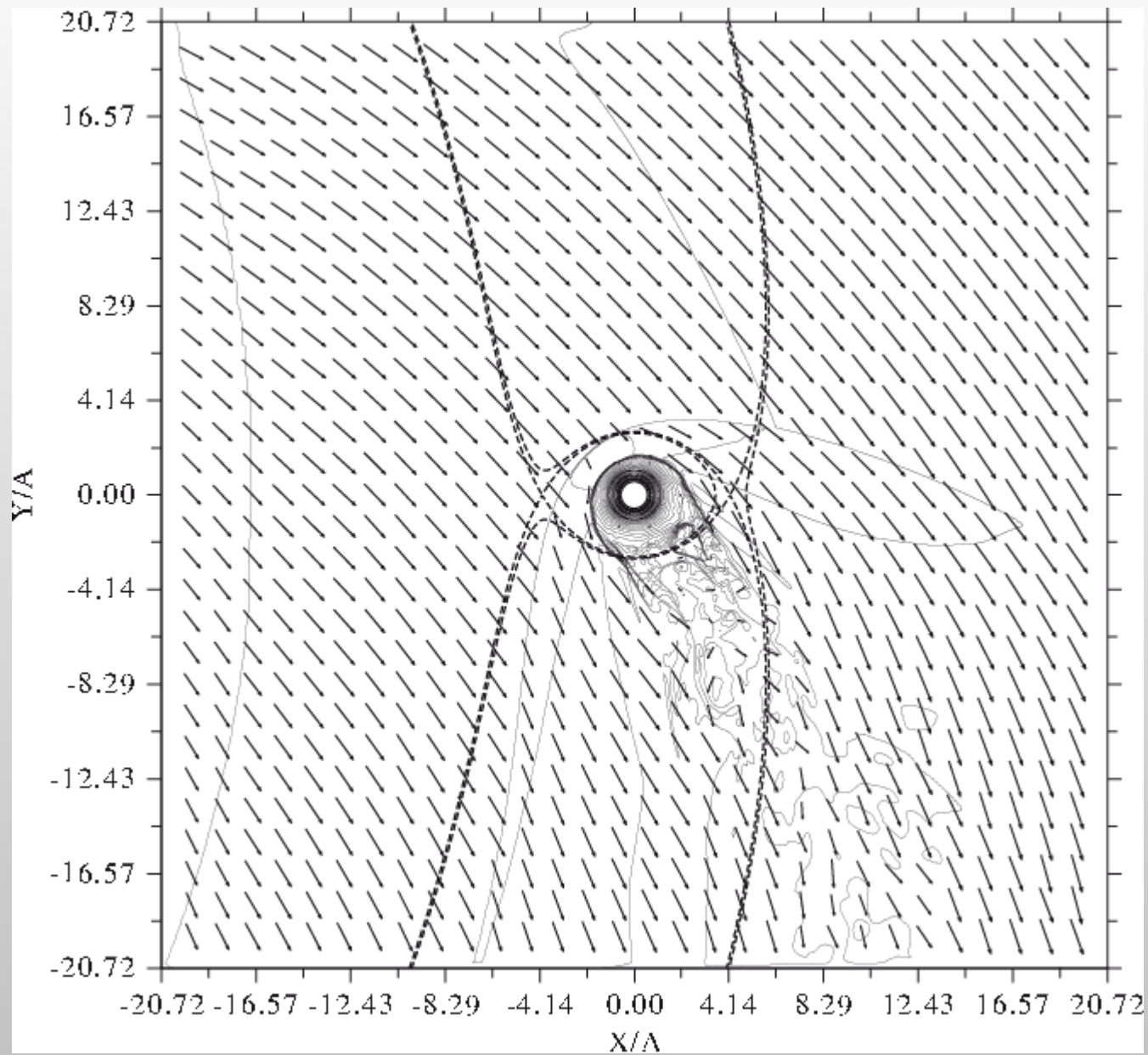


Представленный анализ показывает, что все газовые оболочки вокруг <<горячих юпитеров>> можно разделить на три типа: -- замкнутые, квази-замкнутые и полностью открытые.

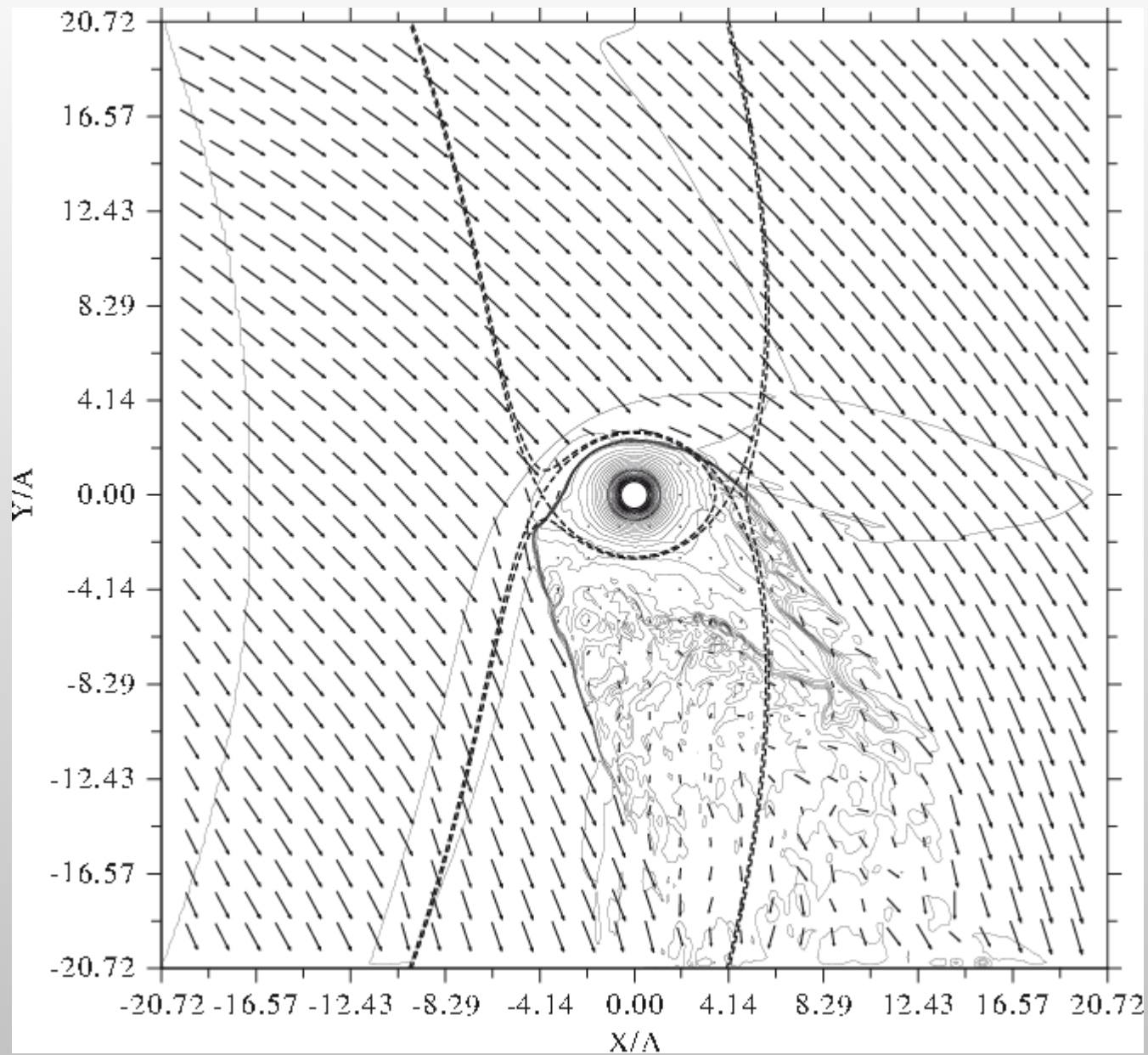
N (cm ⁻³)	Temperature (K)
2 · 10 ¹⁰	6000
5 · 10 ¹⁰	7000
1 · 10 ¹¹	7500
2 · 10 ¹¹	8000



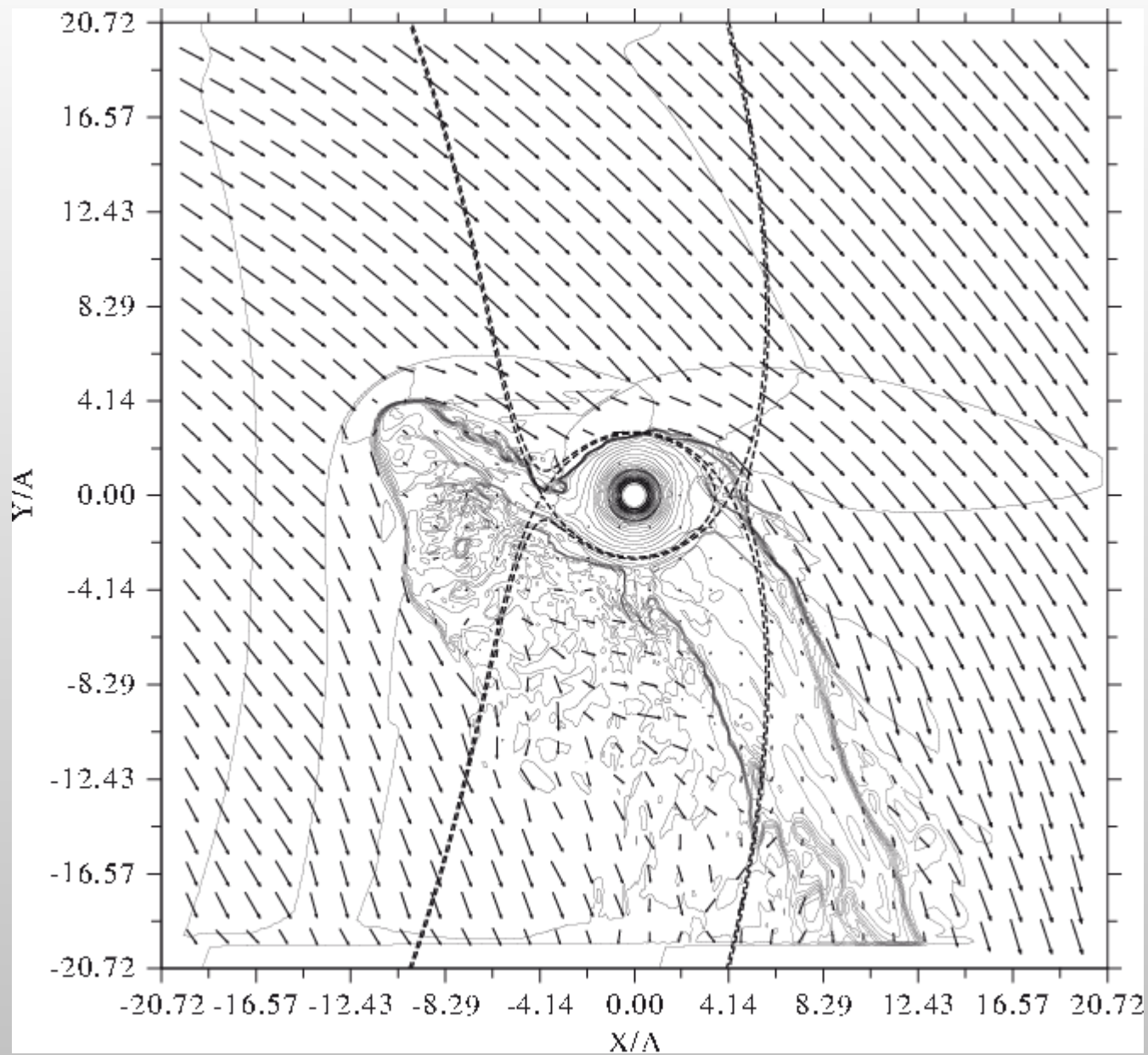
$$T = 6000 \text{ K}$$



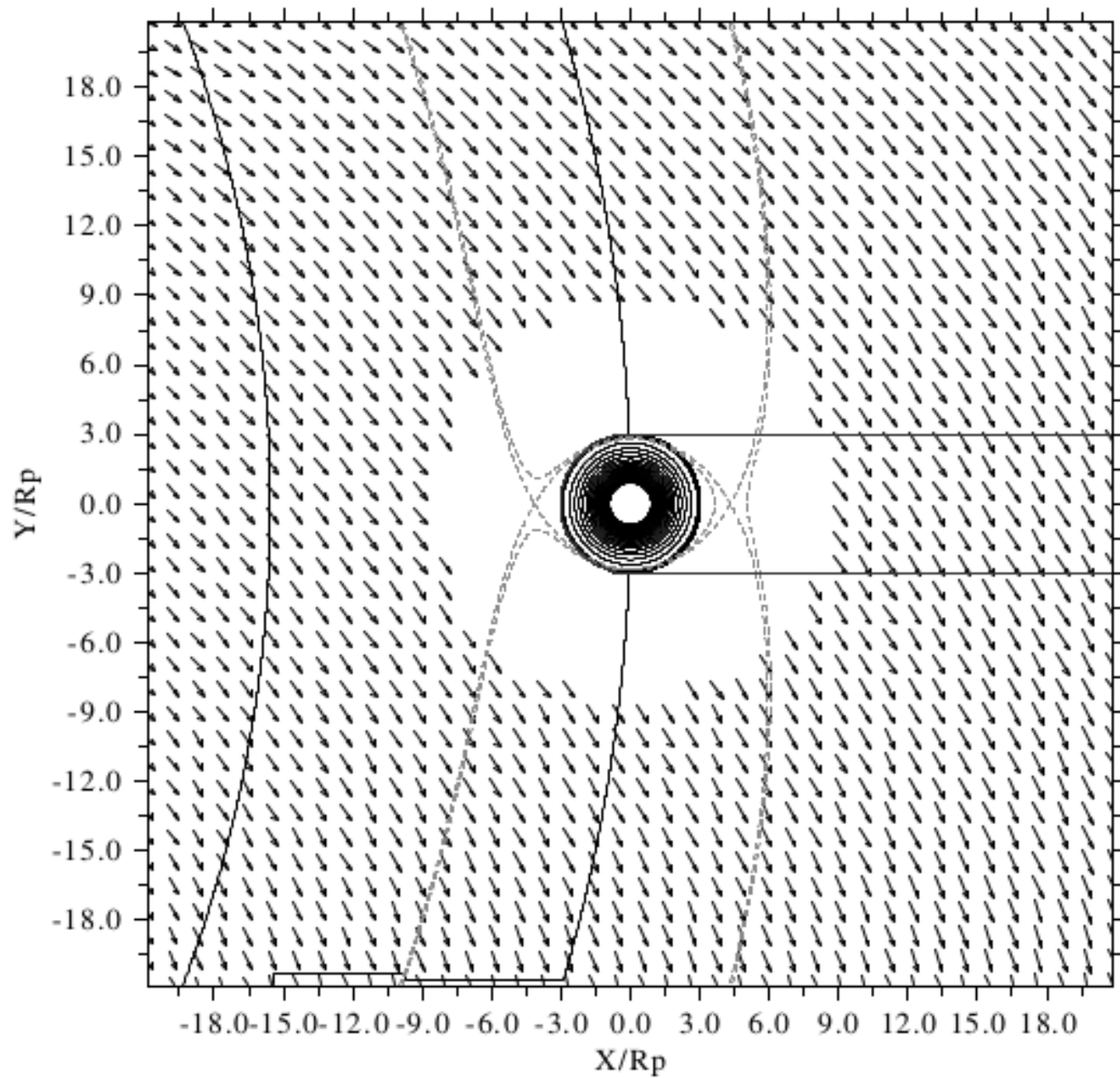
$$T = 7000 \text{ K}$$



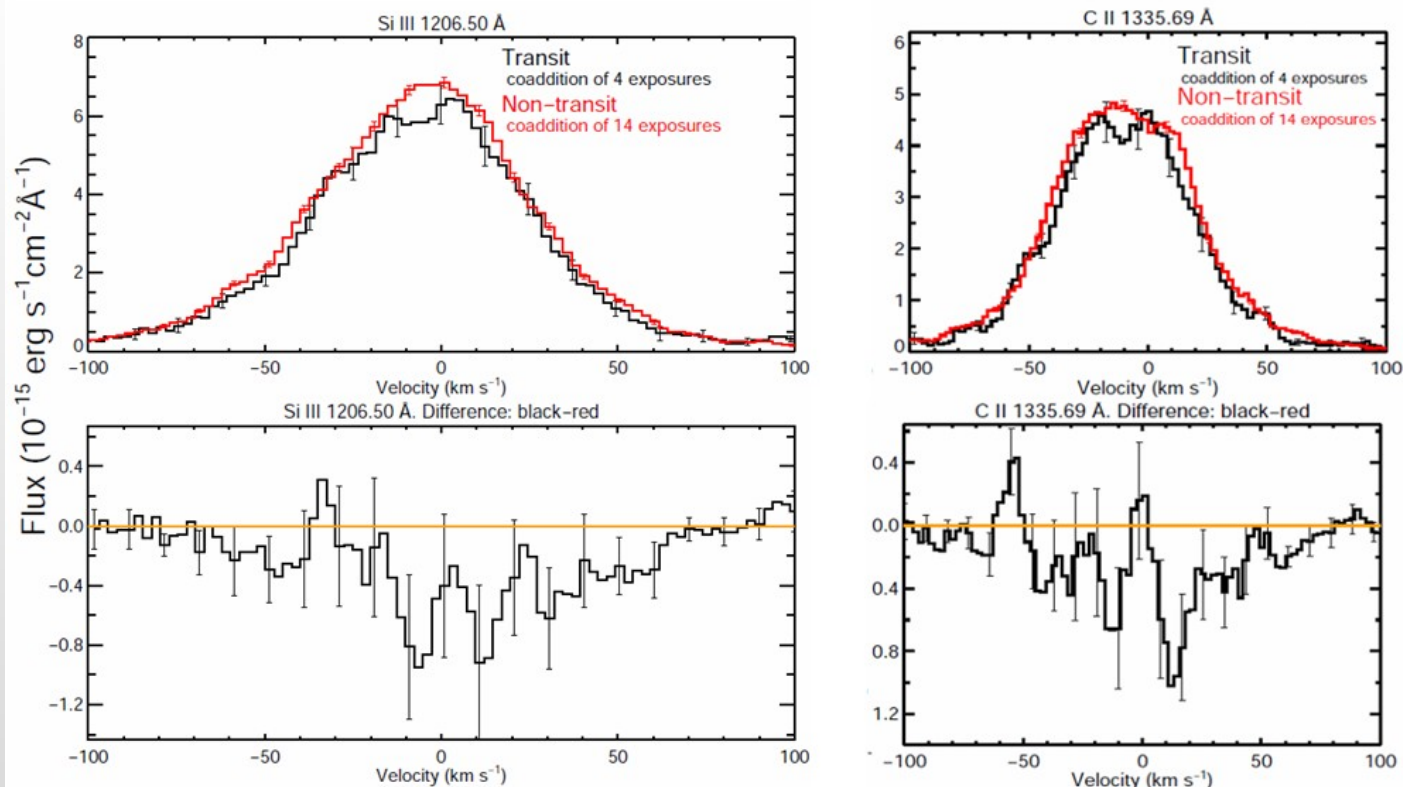
$$T = 7500 \text{ K}$$



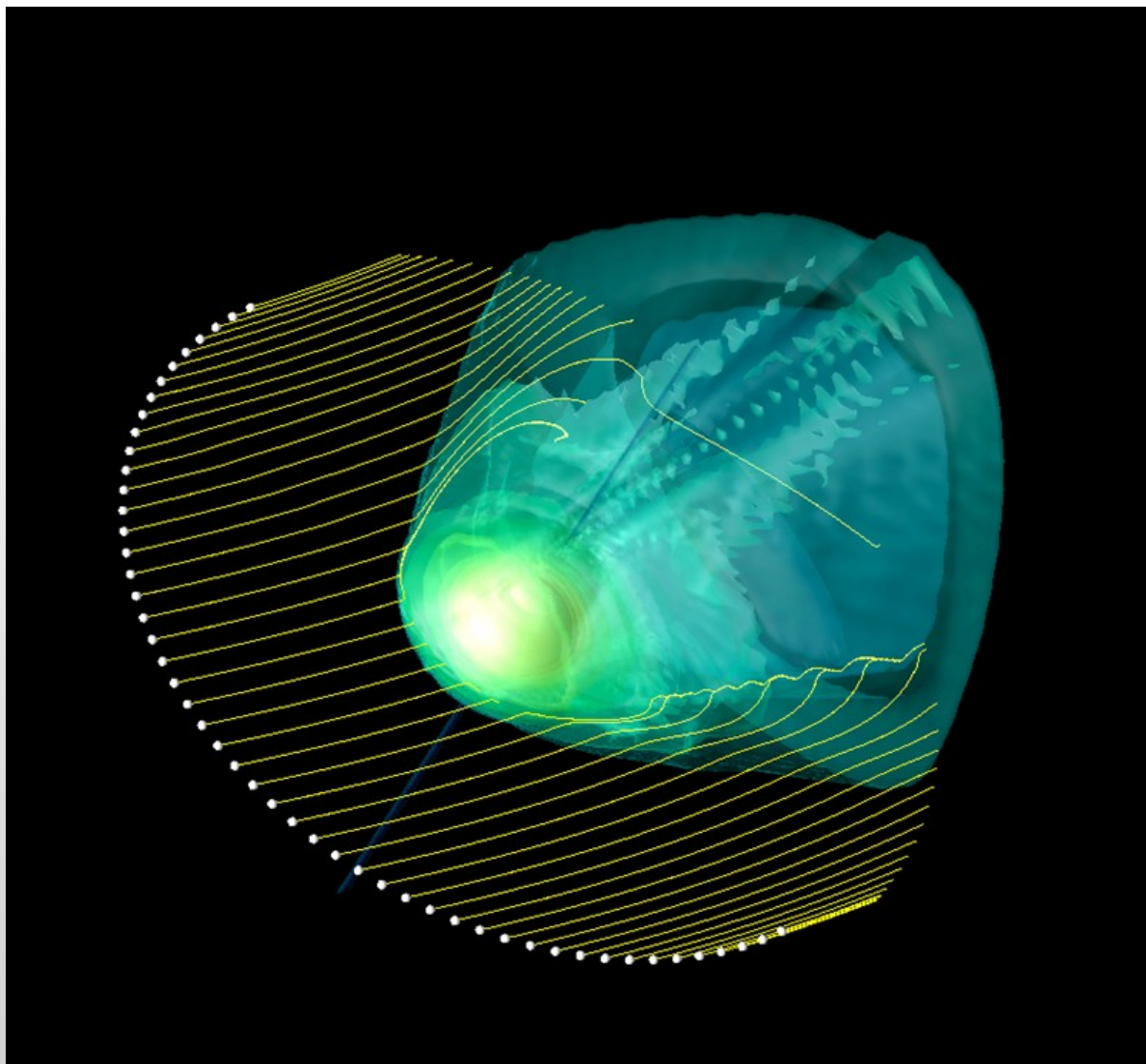
$$T = 8000 \text{ K}$$



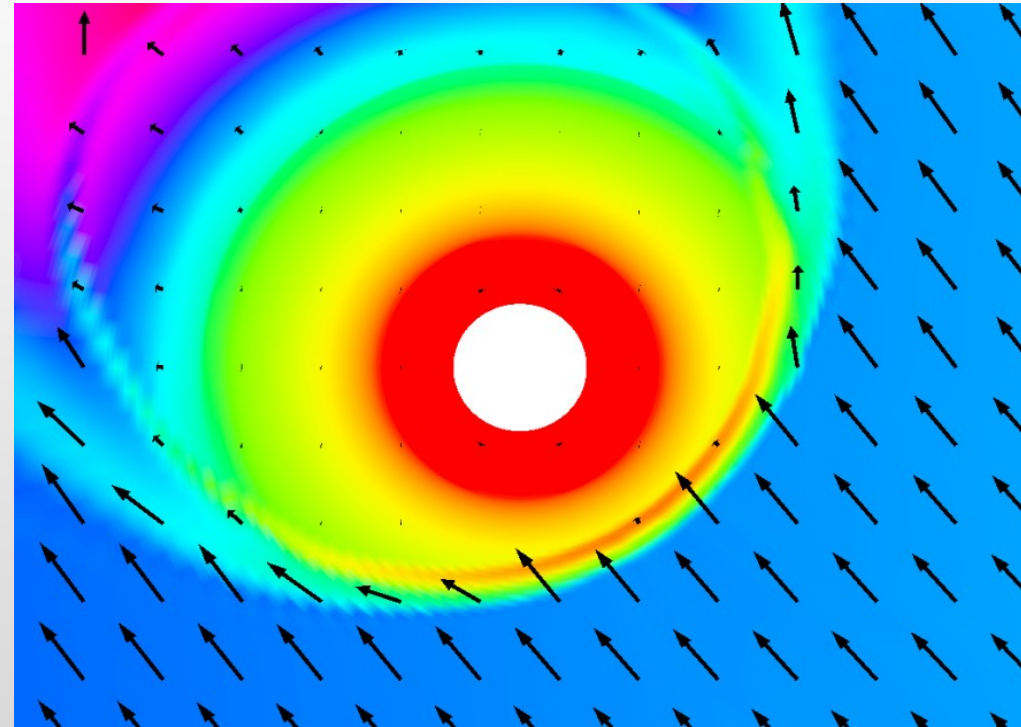
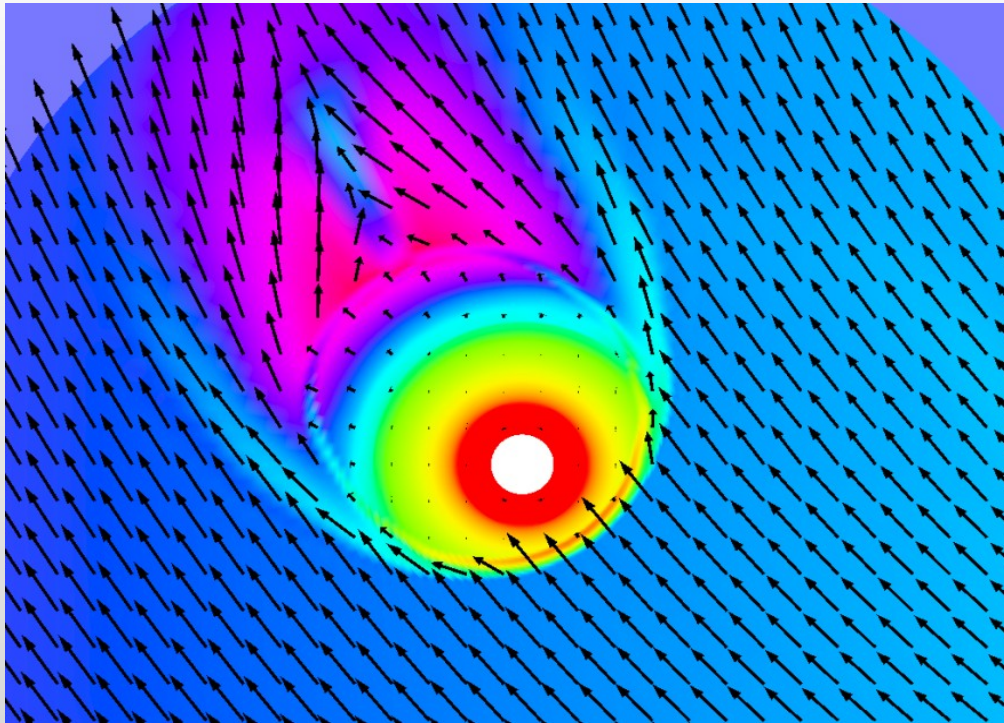
Наблюдательные проявления атмосфер экзопланет



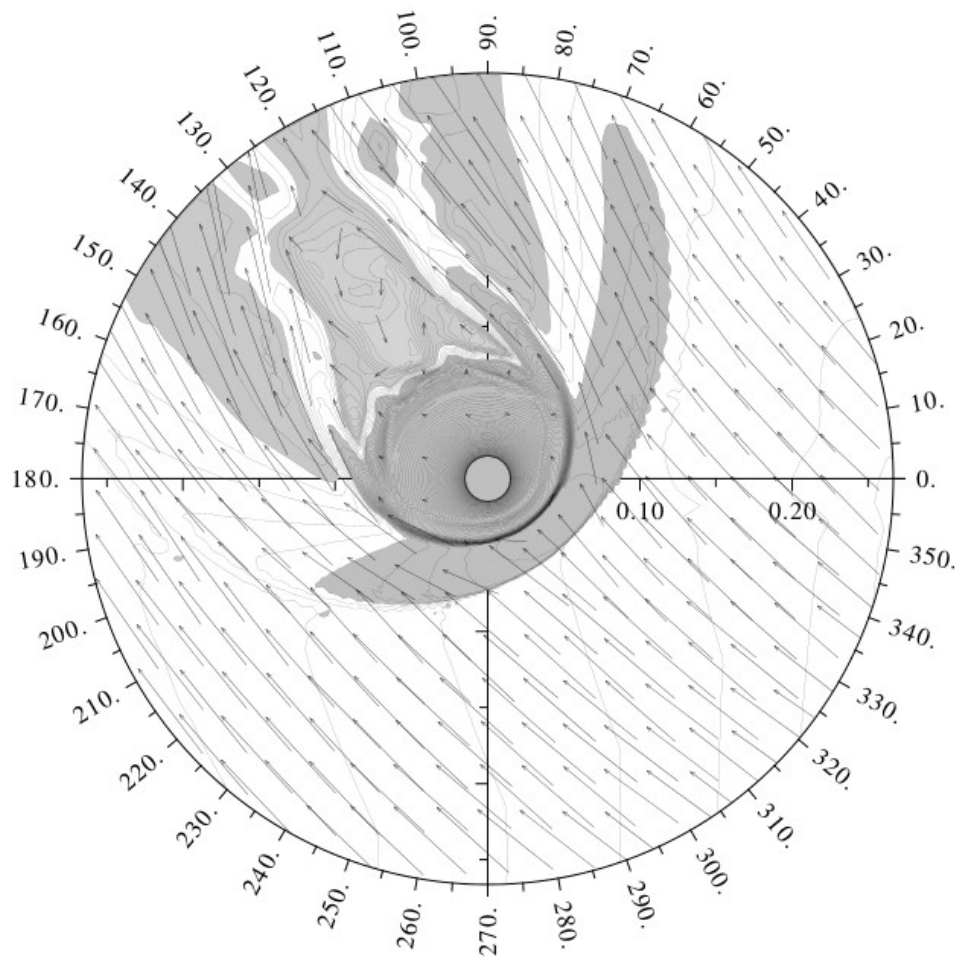
С помощью спектрографа COS, установленном на HST, в 2009 году были проведены наблюдения "горячего Юпитера" HD 209458b (Linsky et al., 2010). При этом исследовались линии Si III (1206 Å) и C II (1336 Å). Было обнаружено, что глубина транзита в этих линиях составляет 8%, в то время как диск планеты уменьшает яркость звезды не более чем на 1,8 %. Это означает, что область, в которой идет поглощение в этих линиях, намного превышает размеры планетной атмосферы.



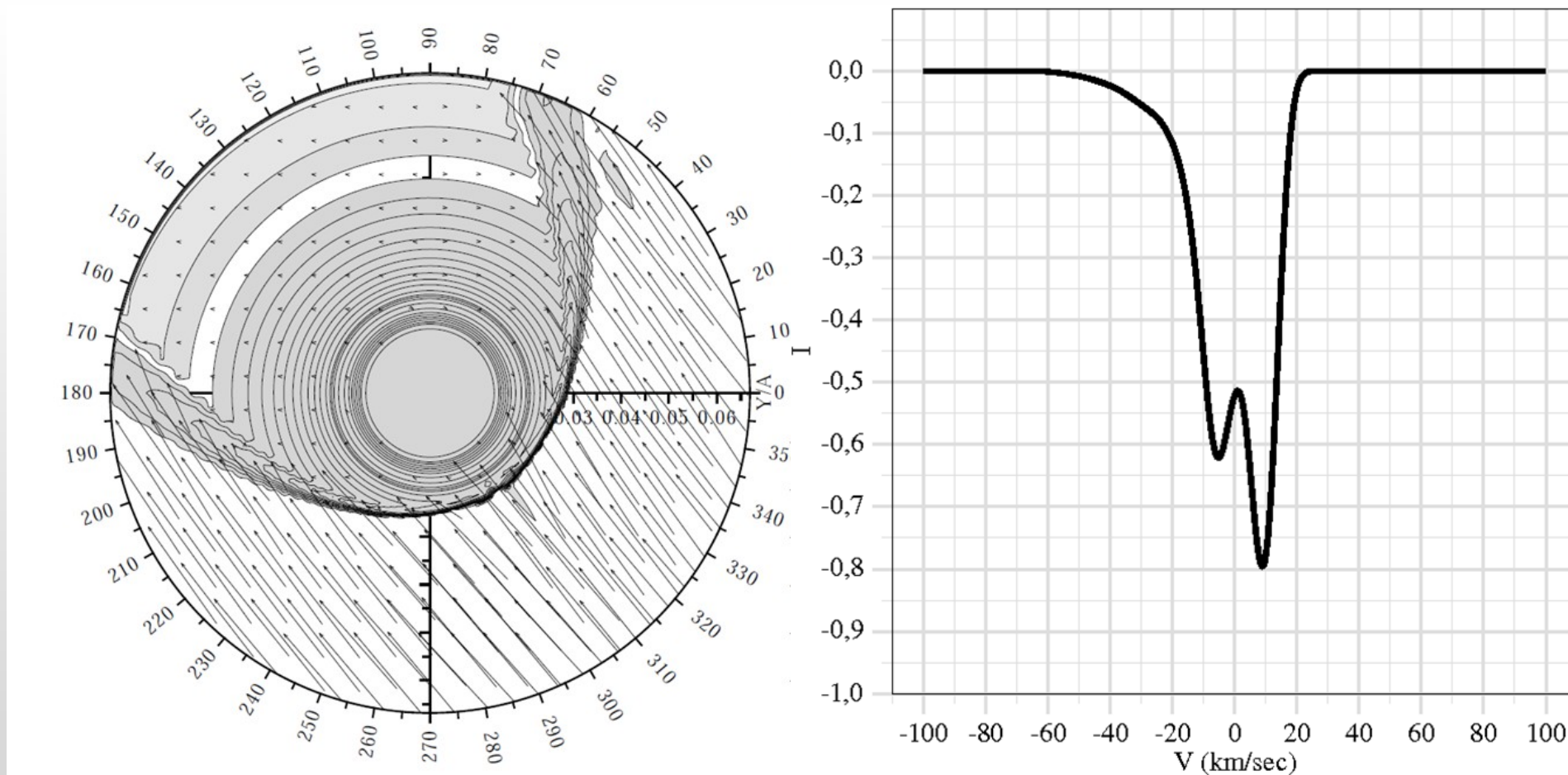
Оба этих факта могут быть объяснены в рамках исследуемой модели. В самом деле, взаимодействие звездного ветра и атмосферы приводит к возникновению газодинамической структуры вблизи планеты, включающей отошедшую ударную волну и контактный разрыв.



Область между ударной волной и контактным разрывом по площади в несколько раз больше диска планеты. Это приводит к наблюдаемому поглощению величиной в 8 %.



Двугорбая форма также может быть объяснена в рамках модели ударной волны. Когда газ звездного ветра проходит через фронт волны, тангенциальная компонента его скорости сохраняется. Вещество непосредственно за фронтом волны движется в противоположных направлениях от точки лобового столкновения, где набегающий поток имеет только нормальную компоненту скорости.



Такая конфигурация потоков приводит к образованию двугорбого профиля линий поглощения. Поскольку ось симметрии ударной волны не совпадает с направлением орбитальной скорости, линия асимметрична. Форма линии близка к результатам наблюдений.

Выводы

- *Моделирование структуры течения вещества экзопланет-гигантов показало, что для значительной их части возможно формирование асимметричных оболочек, окружающих планету.*
- *Сверхзвуковое движение планеты в среде звездного ветра приводит к образованию отошедшей ударной волны сложной формы. Ударная волна ограничивает истечение через точки Лагранжа, что делает оболочку стационарной и долгоживущей.*
- *Параметры оболочки, полученные из моделирования находятся в согласии с имеющимися результатами наблюдений. Однако выяснение даже принципиальных физических свойств таких оболочек требует новых наблюдательных данных.*