

**Коллоквиум
"Земля на ранних
этапах развития
солнечной
планетной
системы»,
28-30 ноября 2016
года, ГАИШ МГУ**

Old concept of the Hadean Earth



Updated reconstruction



РАННЯЯ АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ В СВЕТЕ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

В.И. Шематович

Институт астрономии РАН



Ранняя атмосфера Земли: *содержание*

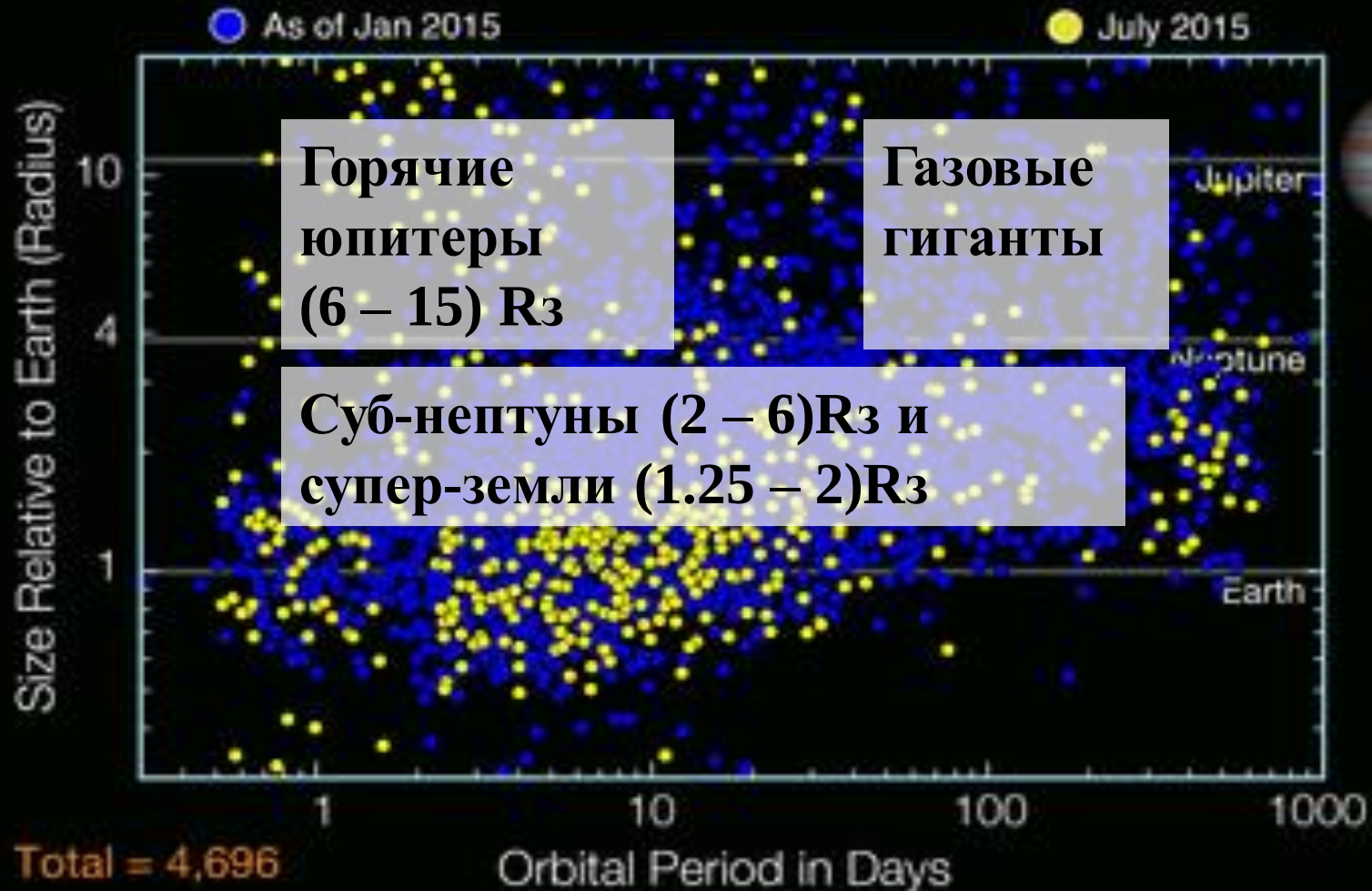
Ранняя атмосфера Земли в свете исследований образования и эволюции атмосфер в Солнечной и внесолнечных планетных системах:

- Протопланетные диски и образование планет;**
- Протоатмосферы (первые 500 млн. лет):**
 - возможные сценарии образования первичных и вторичных атмосфер**
 - процессы, ответственные за образование и потерю атмосферы**
 - ранние атмосферы планет земной группы**
- Заключение**

Внесолнечные планеты:

New Kepler Planet Candidates

As of July 23, 2015

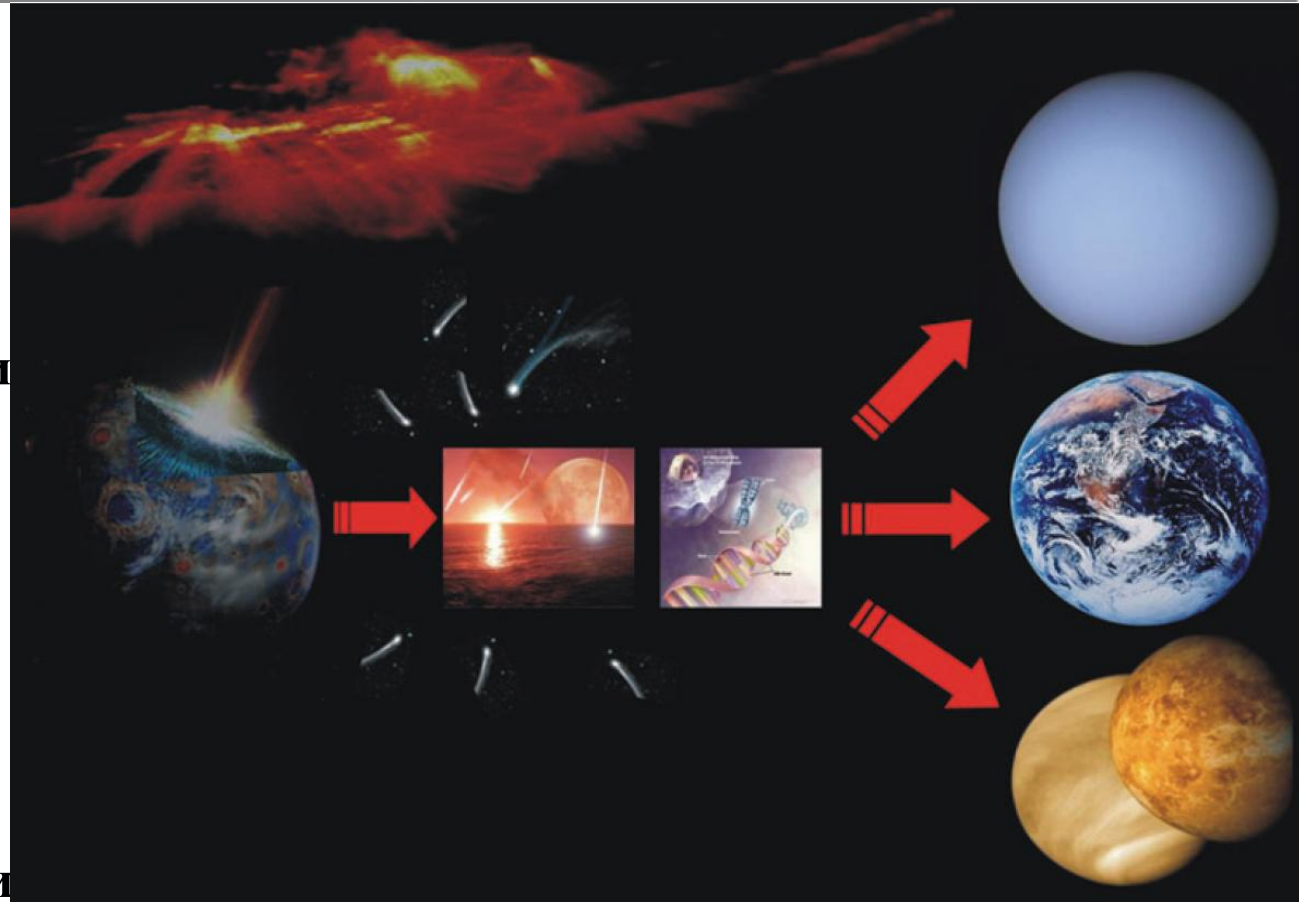


Возможные пути образования планет

Иллюстрация эволюции протопланеты в различные конечные состояния, которыми могут быть:

(а) подобные Венере или Марсу сухие или с обильным CO_2 льдом планеты с одним континентом;

(б) геофизически активные, богатые водой подобные Земле планеты с континентами

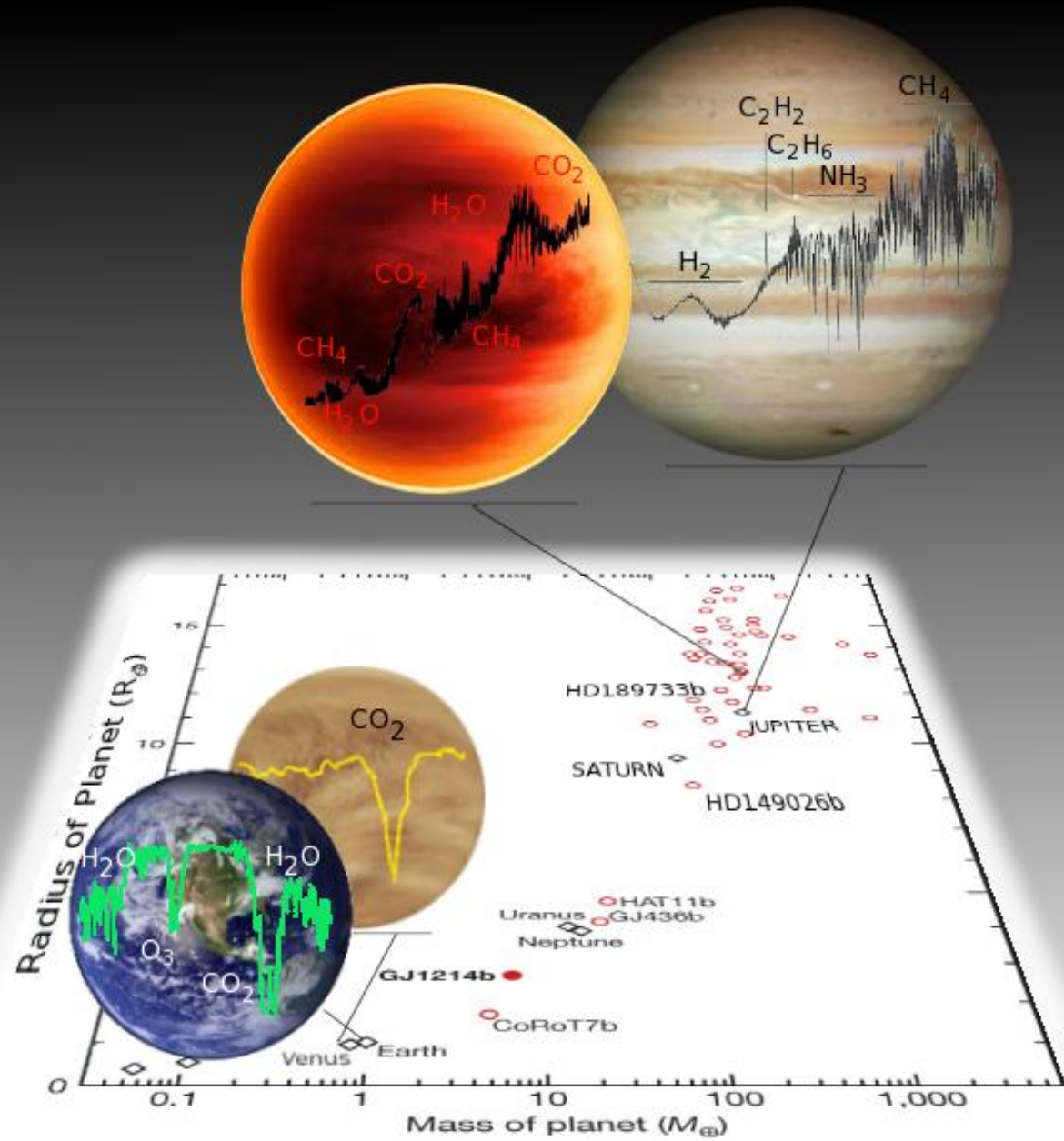


и азотной атмосферой (CO_2 связан в карбонатах);

(в) мини-нептуны или "водные миры", окруженные водородной короной, в случае если такие планеты успели накопить слишком много газа из туманности или слишком много летучих веществ, которые не были потеряны из первичной атмосферы за счет тепловой диссипации, вызванной поглощением энергии излучения и плазмы от родительской звезды.

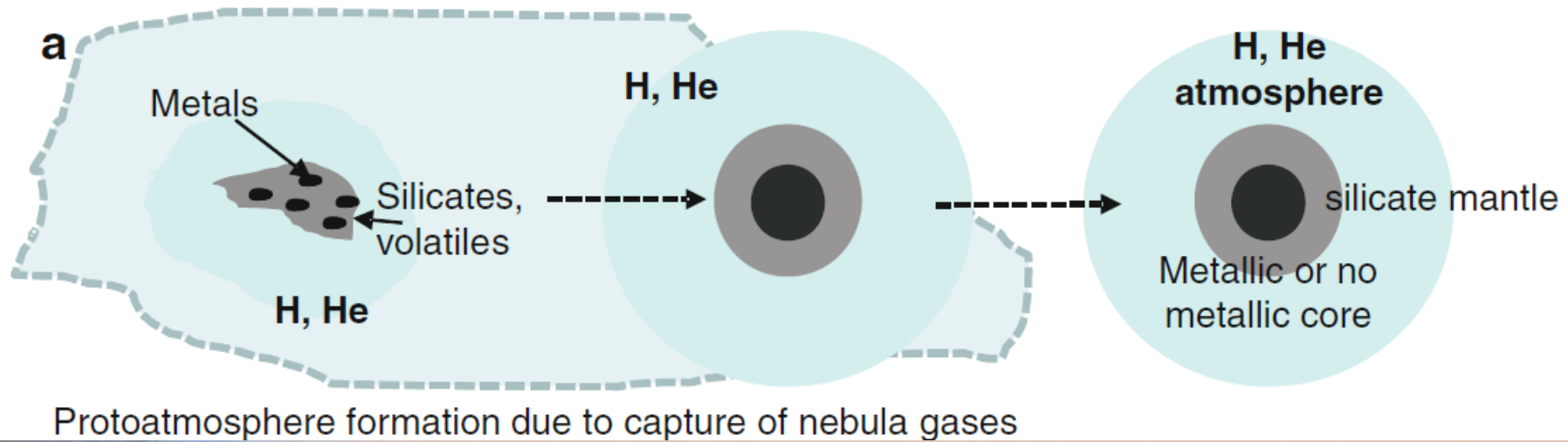
Протоатмосферы: *образование и диссипация*

Planets can be very similar in mass and radius and yet be very different worlds, as demonstrated by these two pairs of examples. A spectroscopic analysis of the atmospheres is needed to reveal their physical and chemical identities.



Протоатмосферы планет: *Первичная атмосфера*

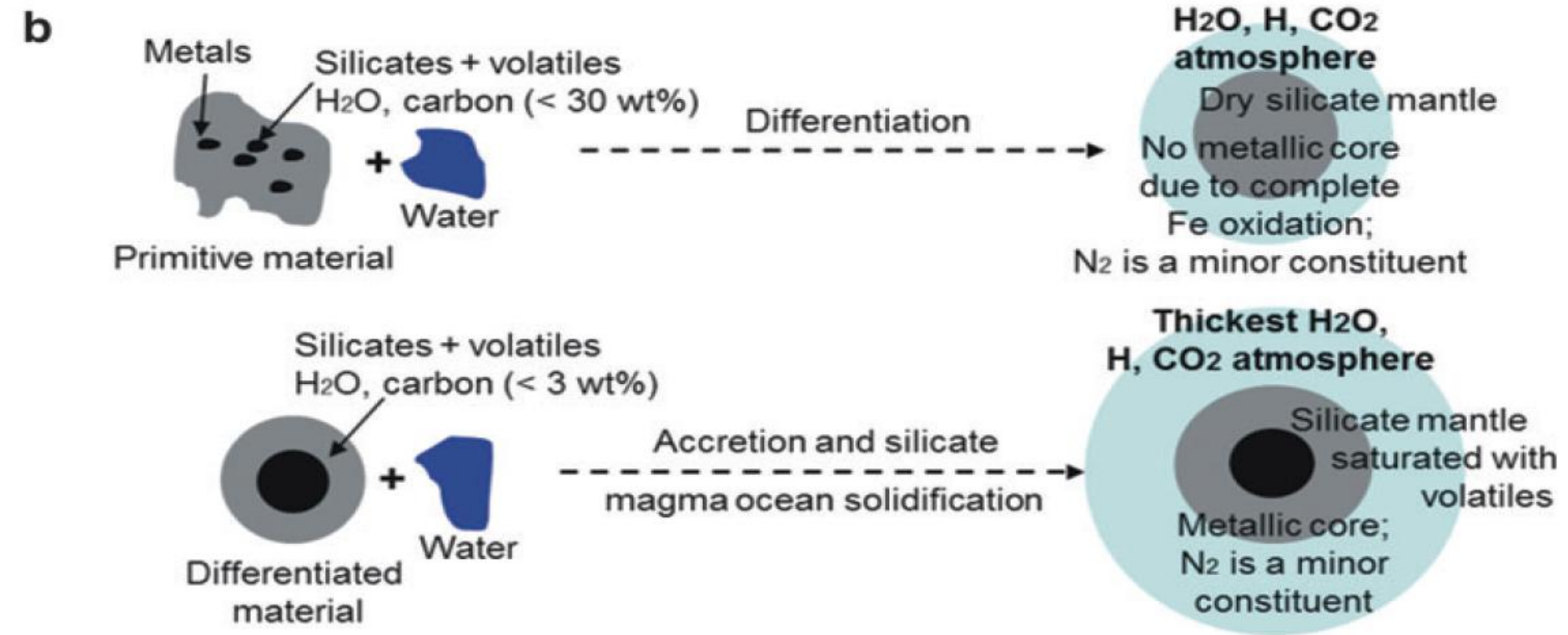
Захват H-He оболочки ([Hayashi et al., Earth Pl. Sci. Lett. 1988](#); [Matsui and Abe, Science, 1986](#); [Ikoma and Genda, Icarus, 2006](#); [Rafikov et al., 2006](#)]



Имеется несколько различных сценариев образования протоатмосферы у планет земной группы. Обычно рассматриваются три источника вещества для образования протоатмосфер:

- (а) Захват газа из туманности и накопление богатой водородом и гелием первичной оболочки вокруг скалистой планеты;
- (б) за счет ударной дегазации во время аккреции и затвердевания океана магмы;
- (в) за счет дегазации вследствие тектонической активности.

Протоатмосферы: *Вторичная атмосфера*



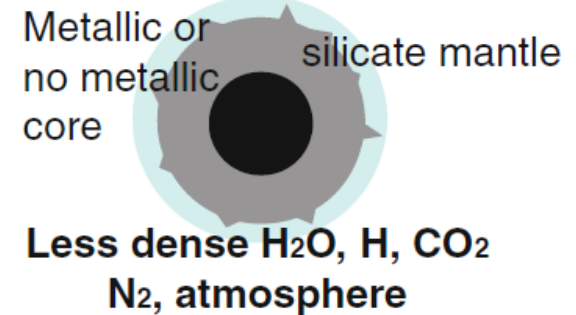
(b) As soon as planetary accretion ends, depending on the interior structure and initial volatile (H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 , etc.) content of the bodies involved in the formation of a protoplanet, huge amounts of H_2O and CO_2 can be released during the magma ocean solidification into the surrounding environment (e.g., Elkins-Tanton and Seager, 2008; Elkins-Tanton, 2011; Lammer, 2013). The amount of outgassed volatiles depends also on the water and carbon contents of the growing protoplanet as well as on differentiation stages and magma ocean depths. In such an outgassed steam atmosphere, the high X-ray and EUV flux of a young host star

Протоатмосферы: *Вторичная атмосфера*

Образование вторичной атмосферы за счет дегазации вследствие тектонической активности [e.g., Grott et al., Earth Planet. Sci. Lett., 2011]

с

Secondary atmosphere formation due to degassing from subsequent tectonic activity (i.e., volcanos, etc.)



(в). Образование вторичной атмосферы, связанной с тектонической активностью скалистой планеты земного типа, которая сопровождается дегазацией и насыщением атмосферы газами H₂O, CO₂, N₂, и других примесных газов. Если потоки дегазации из недр планеты выше, чем потоки диссипации летучих веществ, образуется вторичная атмосфера.

Образование скалистых планет (Elkins-Tanton)

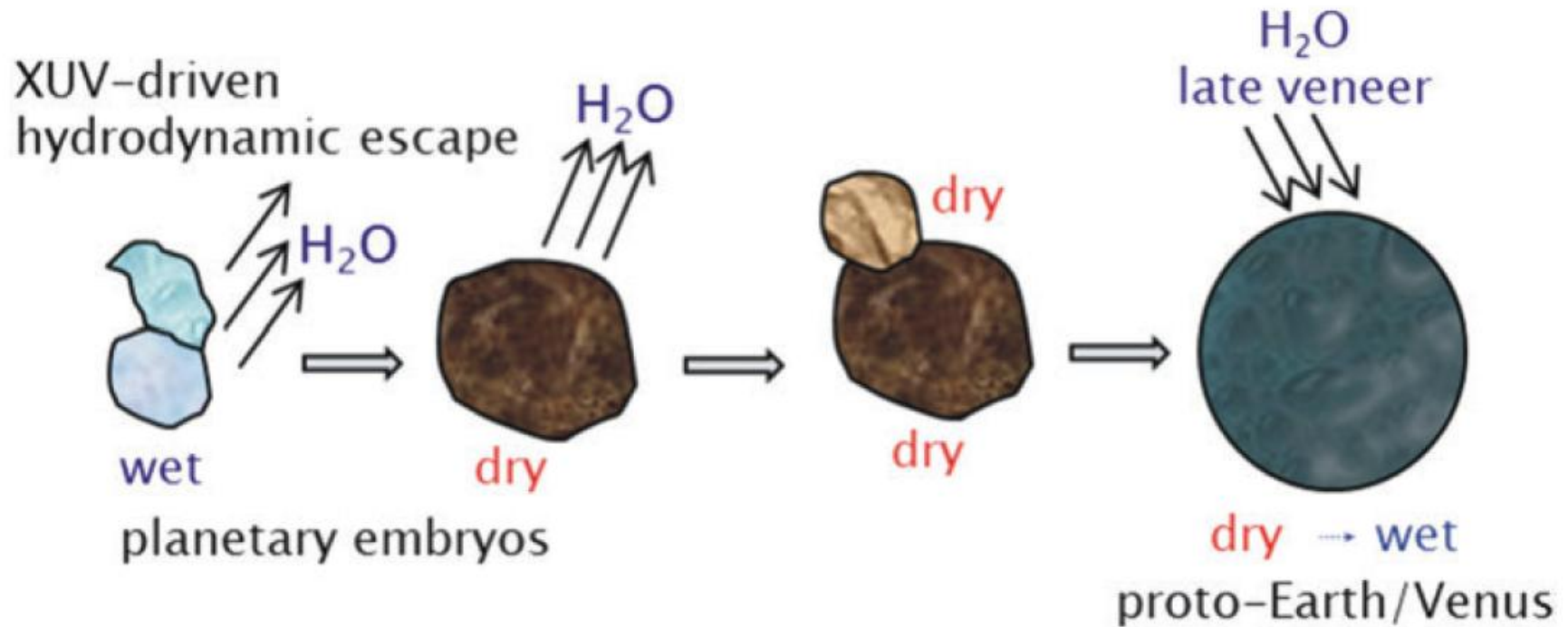
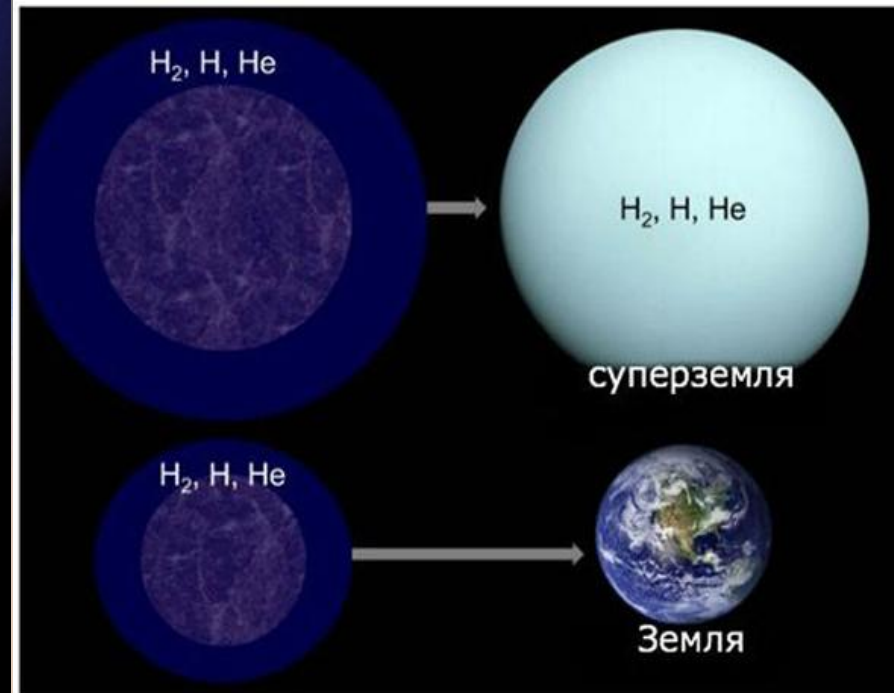
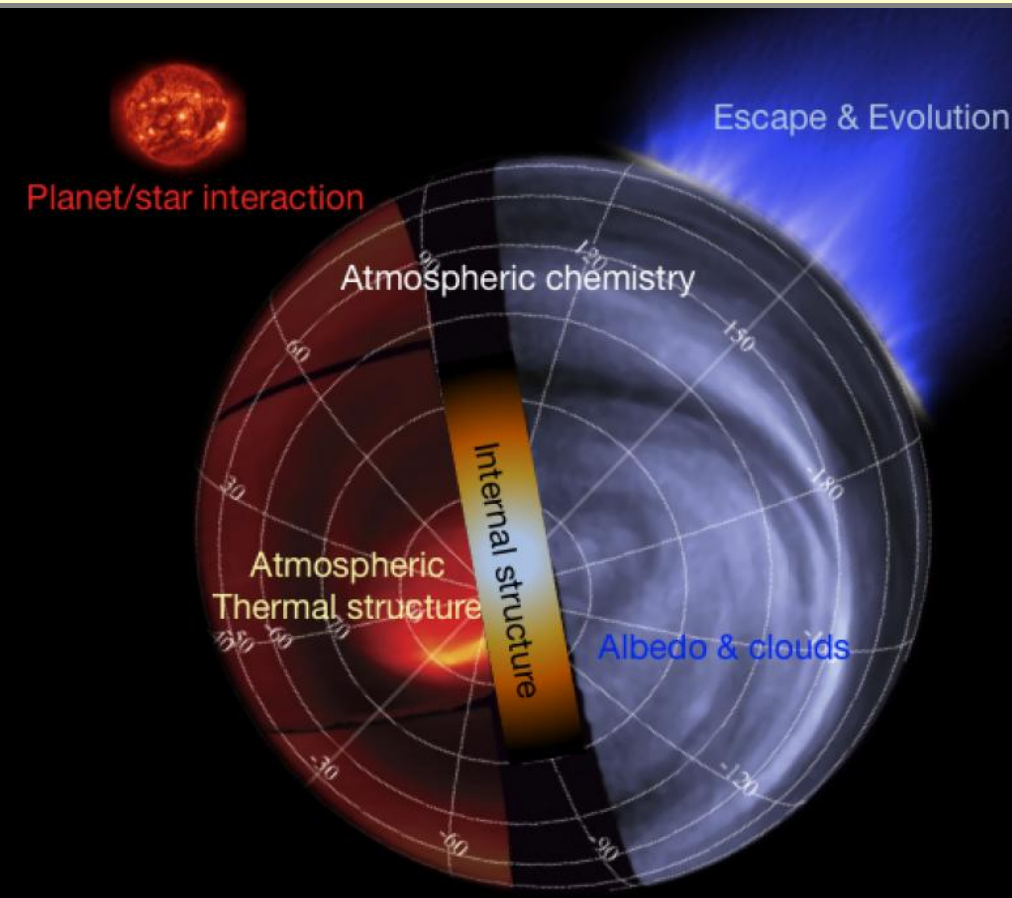


Иллюстрация сценария роста планеты на поздней стадии, который можно ожидать для Венеры и Земли. Планетные эмбрионы размером с Марс потеряют летучие вещества, возникшие за счет дегазации, и их первоначальные водные запасы во время столкновений и роста в более крупные протопланеты. В итоге, останется мало H₂O на образовавшейся планете, и океаны должны быть накоплены на более поздней стадии за счет выпадения богатого водой космического вещества.

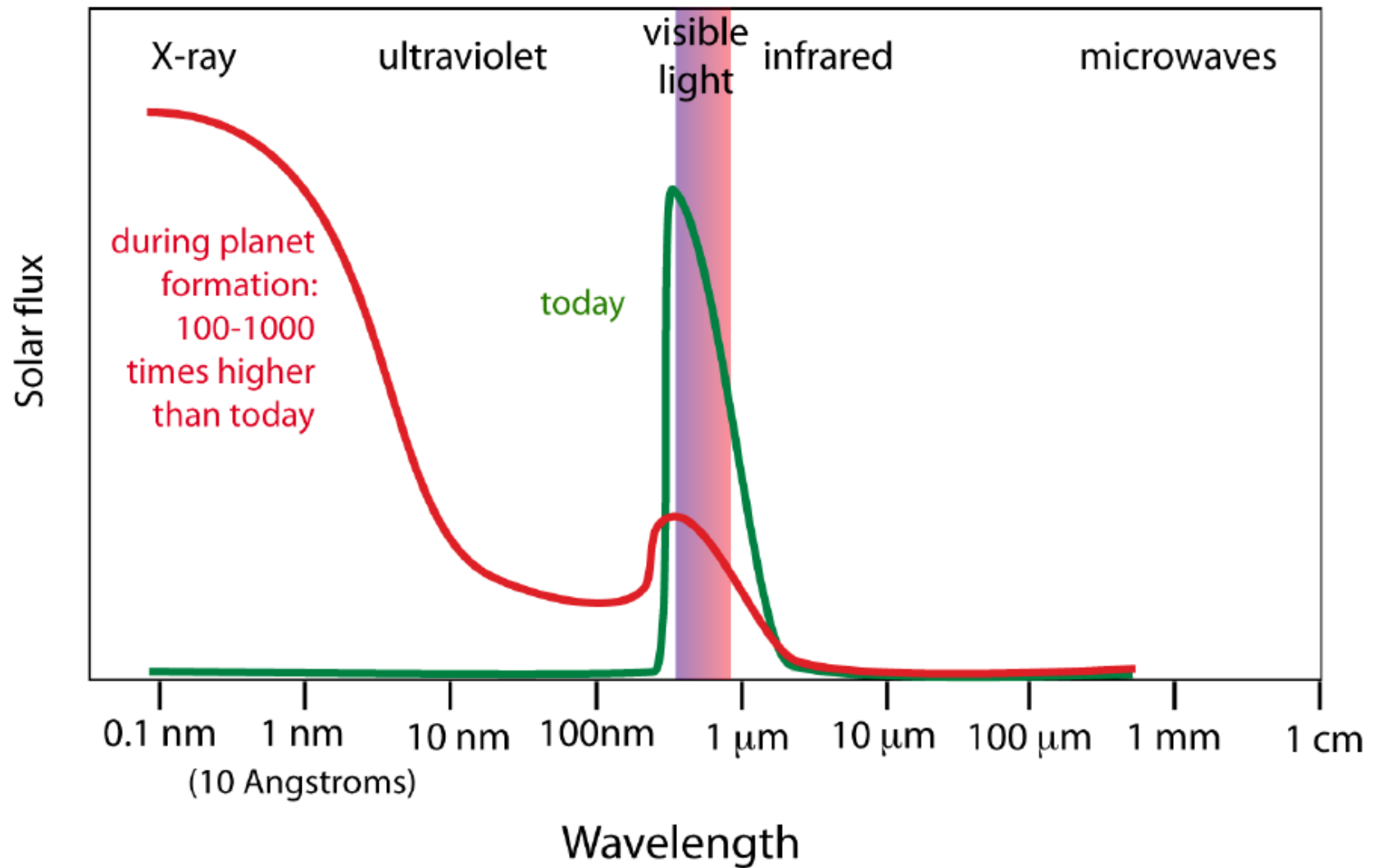
Протоатмосферы: *образование и диссипация*



Модели образования протоатмосфер – первичные и вторичные атмосферы: в работах J. Casting, D. Catling, K. Zahnle, L. Schaefer, B. Fegley, H. Lammer, C. Hayashi, K. Hamano, M. Ikoma, E. Chassefiere, L. Elkins-Tanton, ... и многих других авторов.

Lammer et al., Formation and Evolution of Protoatmospheres. Space Sci. Reviews, 2016

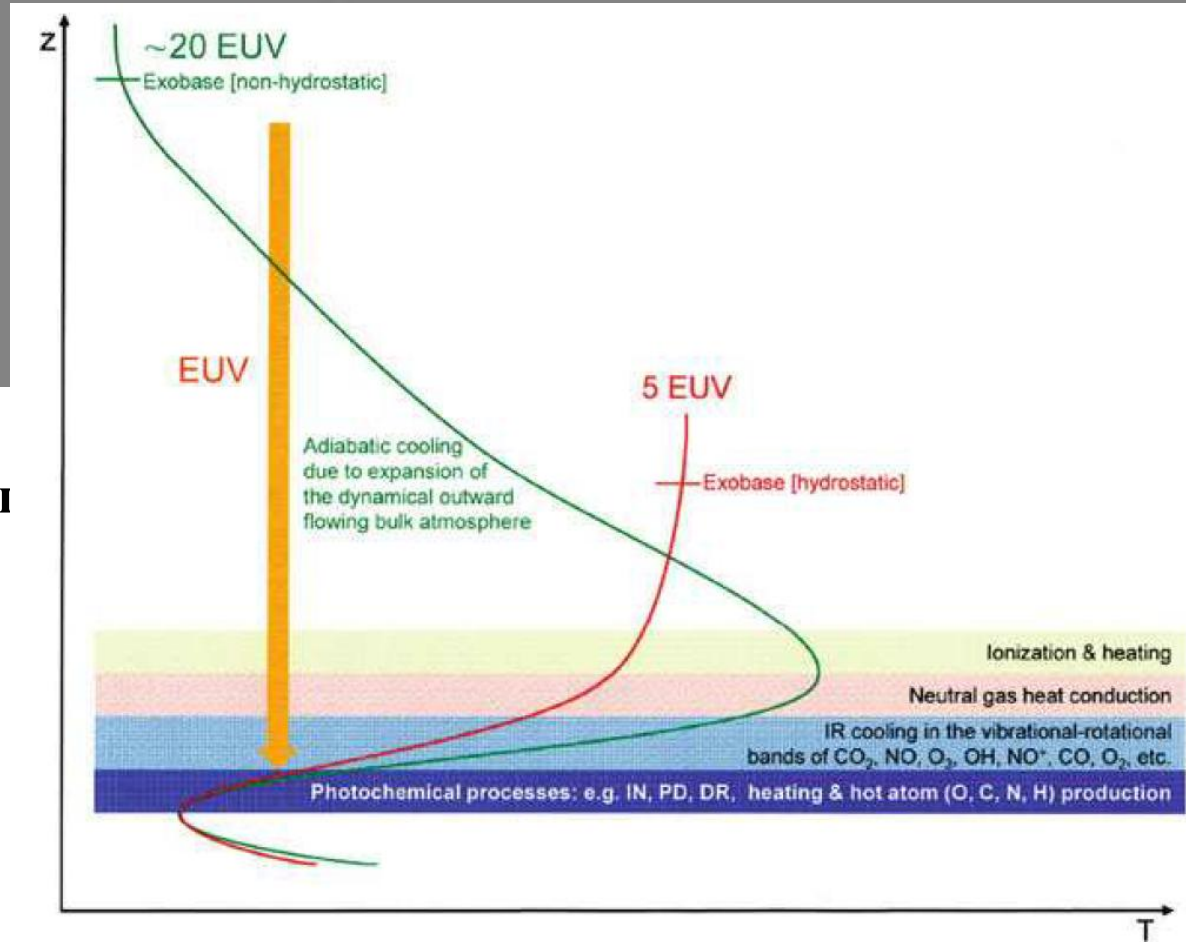
Протоатмосферы: *молодое Солнце*



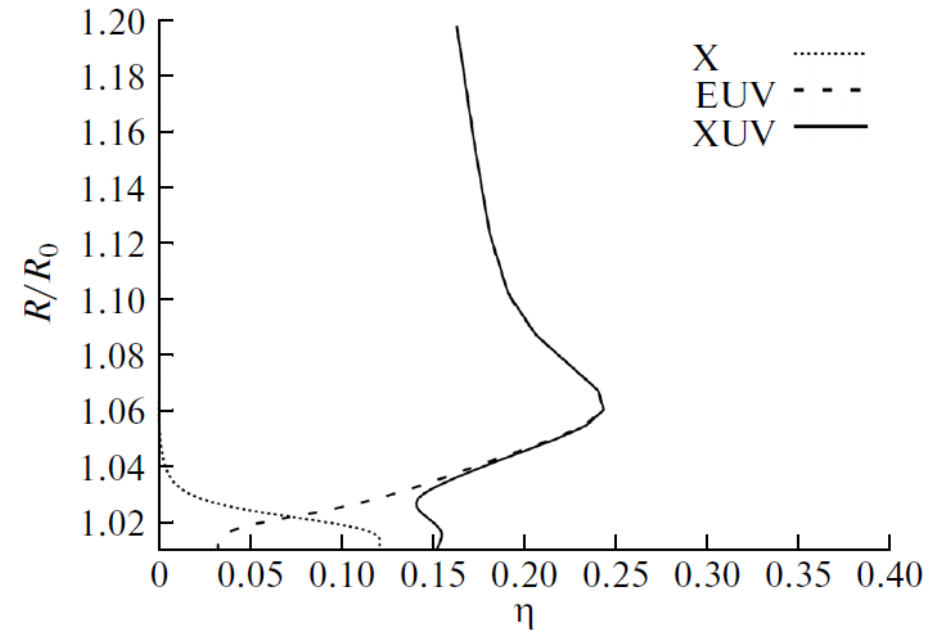
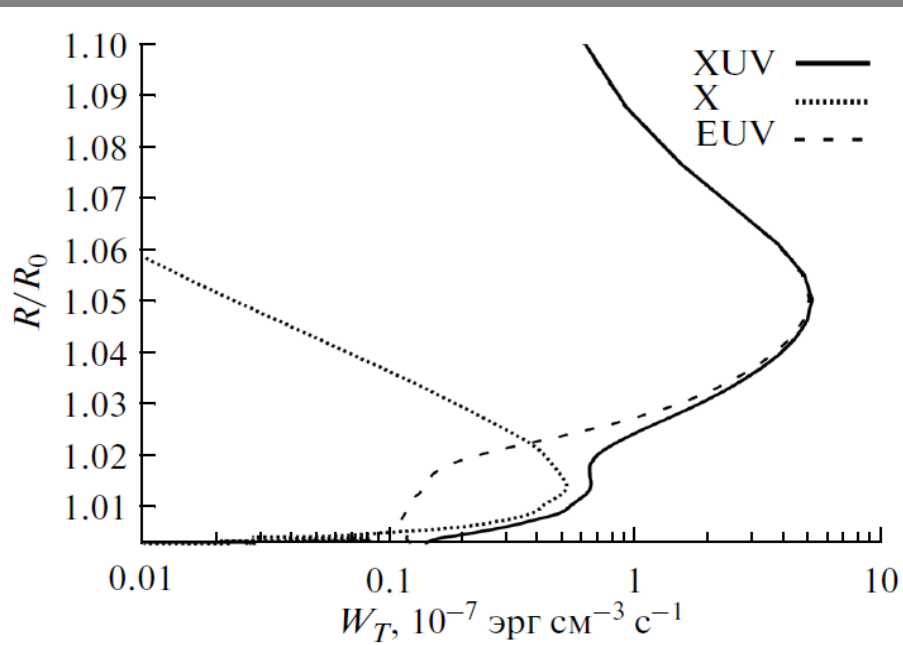
Young Sun data from Ribas et al. (2005)

Протоатмосферы: *диссипация атмосферы*

Иллюстрация изменения распределения температуры атмосферы вследствие высокого потока крайнего УФ солнечного/звездного излучения. Высокие скорости ионизации и фотохимии в конечном итоге приводят к нагреву и последующему расширению верхних слоев атмосферы и к образованию надтепловых атомов, которые также могут влиять на энергетический баланс в термосфере планеты. В зависимости от состава атмосферы и эффективности нагрева состояния верхних атмосфер могут меняться от гидростатического к гидродинамическому режимам.



Протоатмосферы: *эффективность нагрева*



(а) Профиль интенсивности нагрева атмосферы горячего юпитера HD209458b излучением звезды, рассчитанный для солнечного спектра и отдельно для рентгеновского и крайнего УФ диапазона. Пунктирной линией показана интенсивность нагрева рентгеновским излучением.

(б) Общая эффективность нагрева для базовой модели XUV (сплошная линия) и ее составляющие – модель EUV (штриховая линия) и модель X (мягкий рентгеновский диапазон, пунктирная линия).

Из работ Shematovich et al., A&A, 2014; Ионов & Шематович, АВ, 2015.

Протоатмосферы: *модель атмосферы*

Radial profiles of gas temperature for model atmosphere of hot jupiter HD209458b with (M+) and without (M-) photoelectron kinetics and transport. Comparison with recent hydrodynamical models of Yelle (2004), Koskinen et al. (2013) and Shaikislamov et al. (2014) is also shown.

Темп потери атмосферы:

Estimate from HST

observations

$\sim 10^{10}$ g/s;

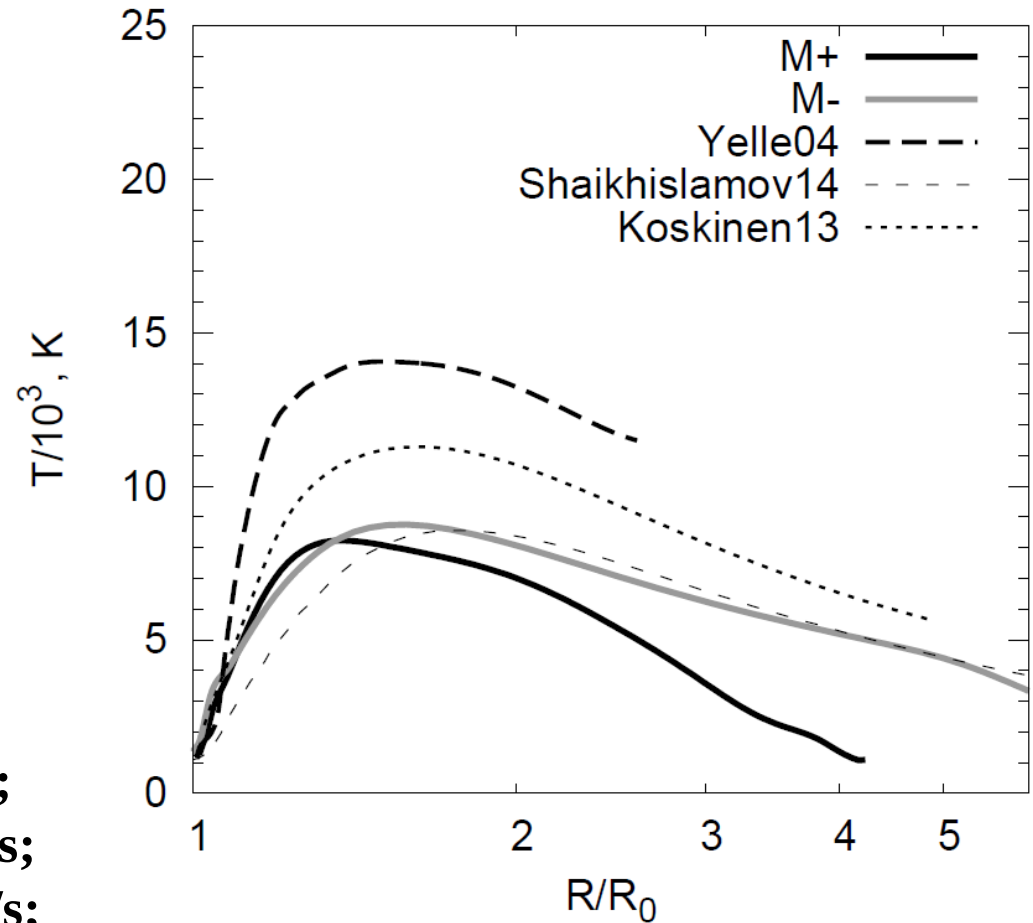
Koskinen et al. (2013) - 4×10^{10} g/s;

Shaikislamov et al. (2014) – 7×10^{10} g/s;

Model M- - 4×10^{10} g/s;

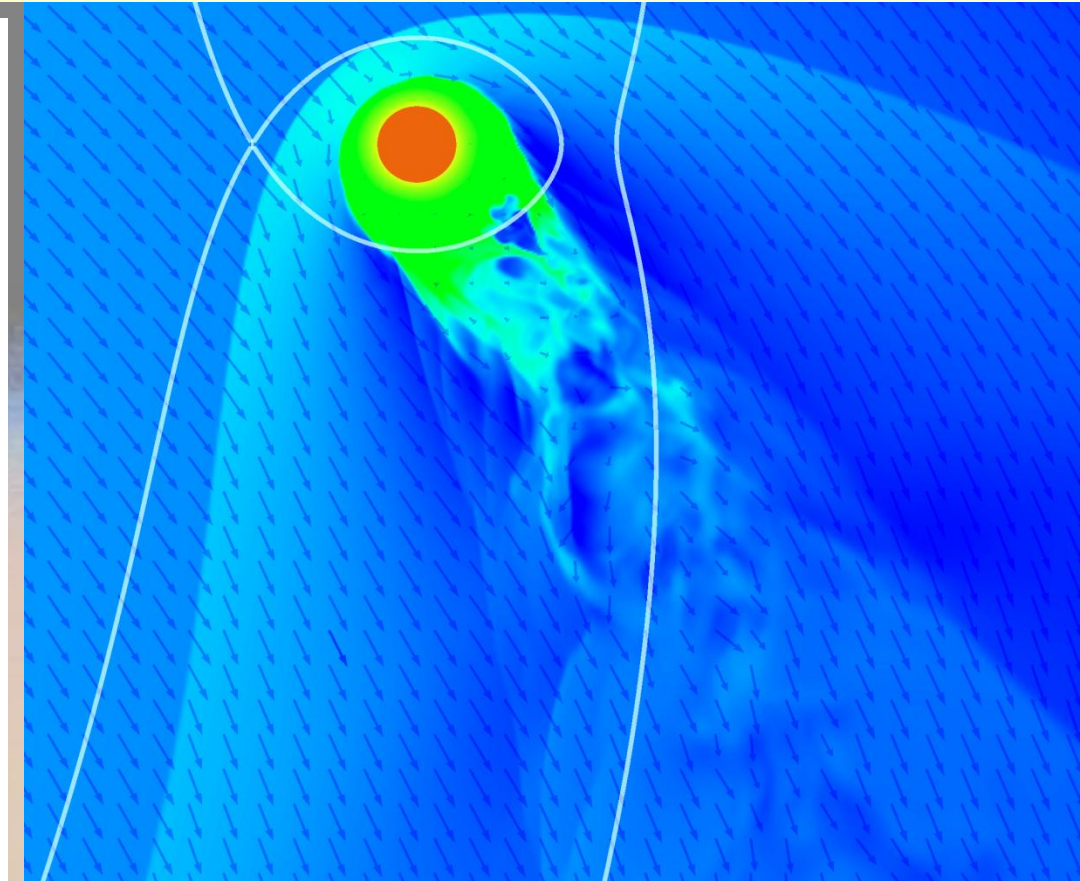
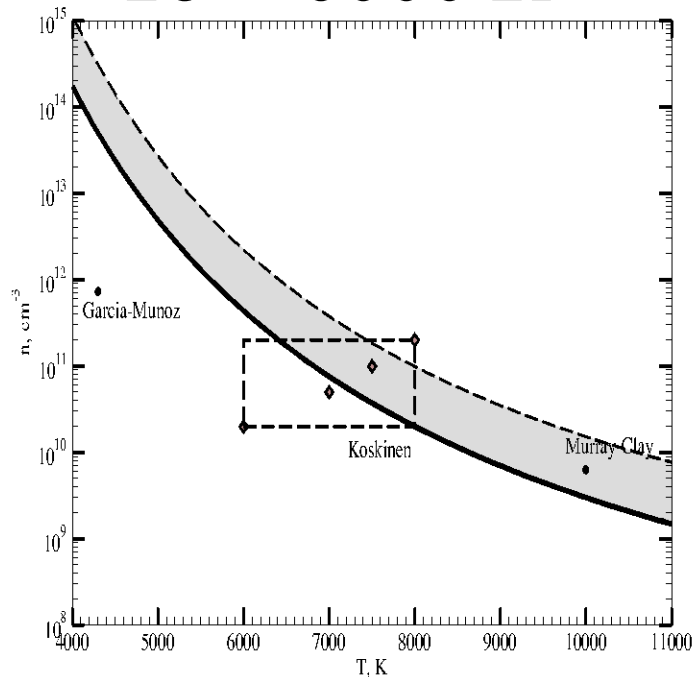
Model M+ - 8×10^9 g/s;

.....



Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b ($a=0.045$ а.е.)

$T_3 = 6000$ K

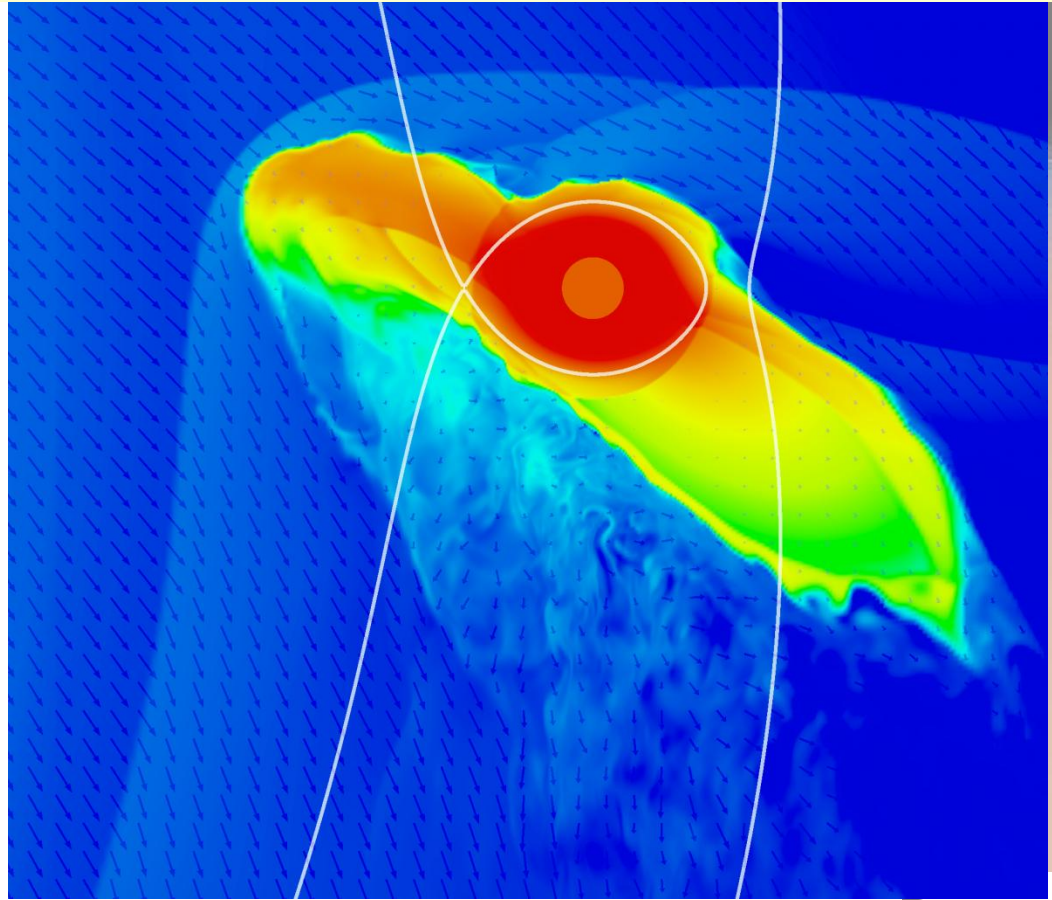
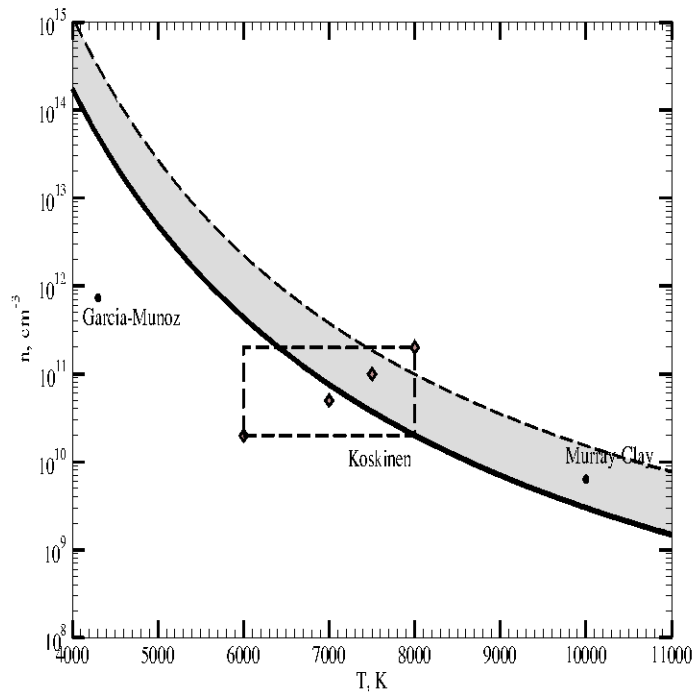


В зависимости от положения точки лобового столкновения все газовые оболочки вокруг горячих юпитеров можно разделить на два класса (Бисикало и др., 2013):

(а) если точка лобового столкновения лежит внутри полости Роша планеты, то оболочки имеют почти сферическую форму классической атмосферы, слегка искаженную воздействием звезды и взаимодействием с газом

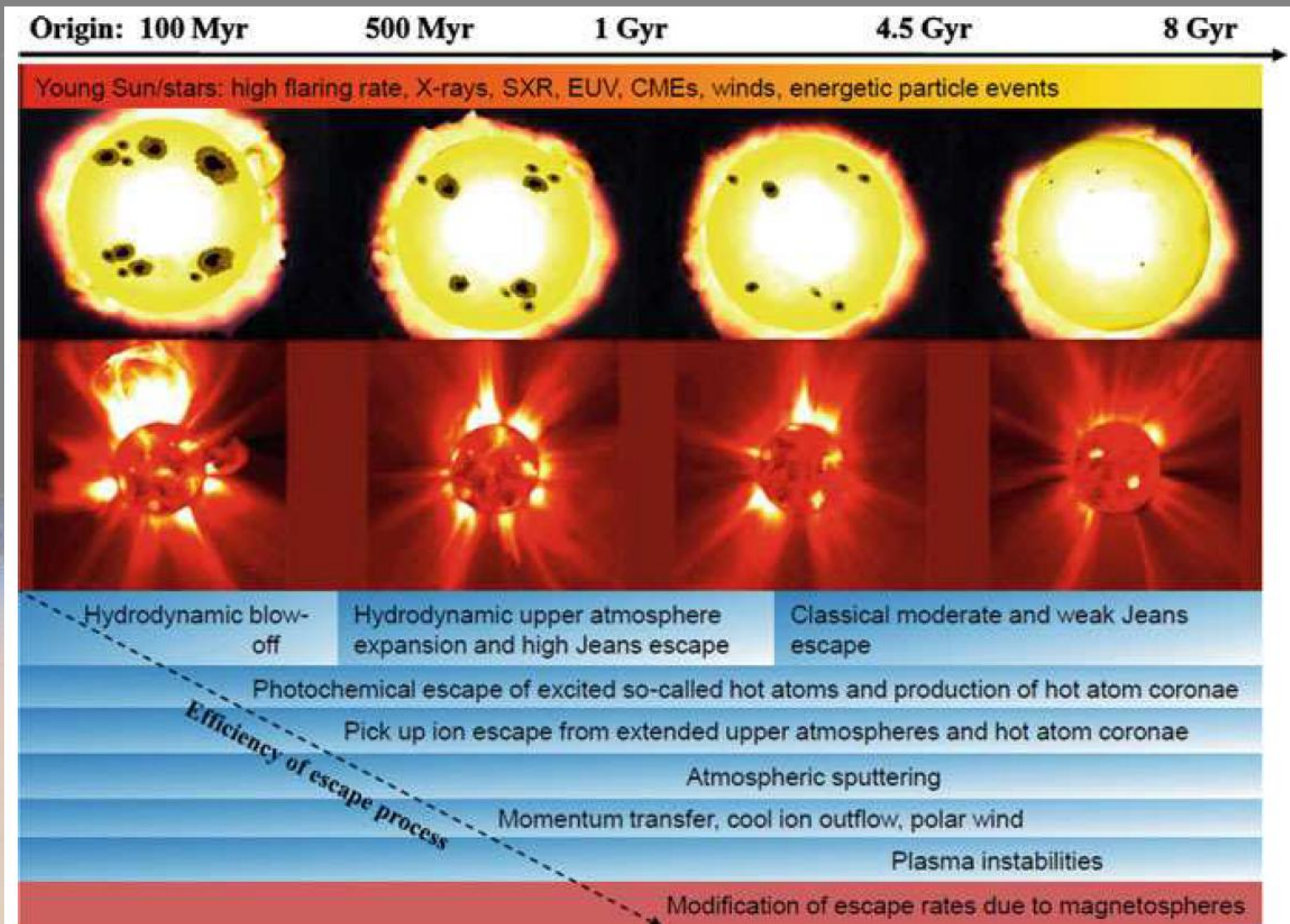
Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b

$$T_{\text{э}} = 8000 \text{ K}$$



(б) если точка лобового столкновения находится за пределами полости Роша, то начинается истечение через окрестности точек Лагранжа L1 и L2, и оболочка становится либо замкнутой, либо незамкнутой, и существенно несимметричной.

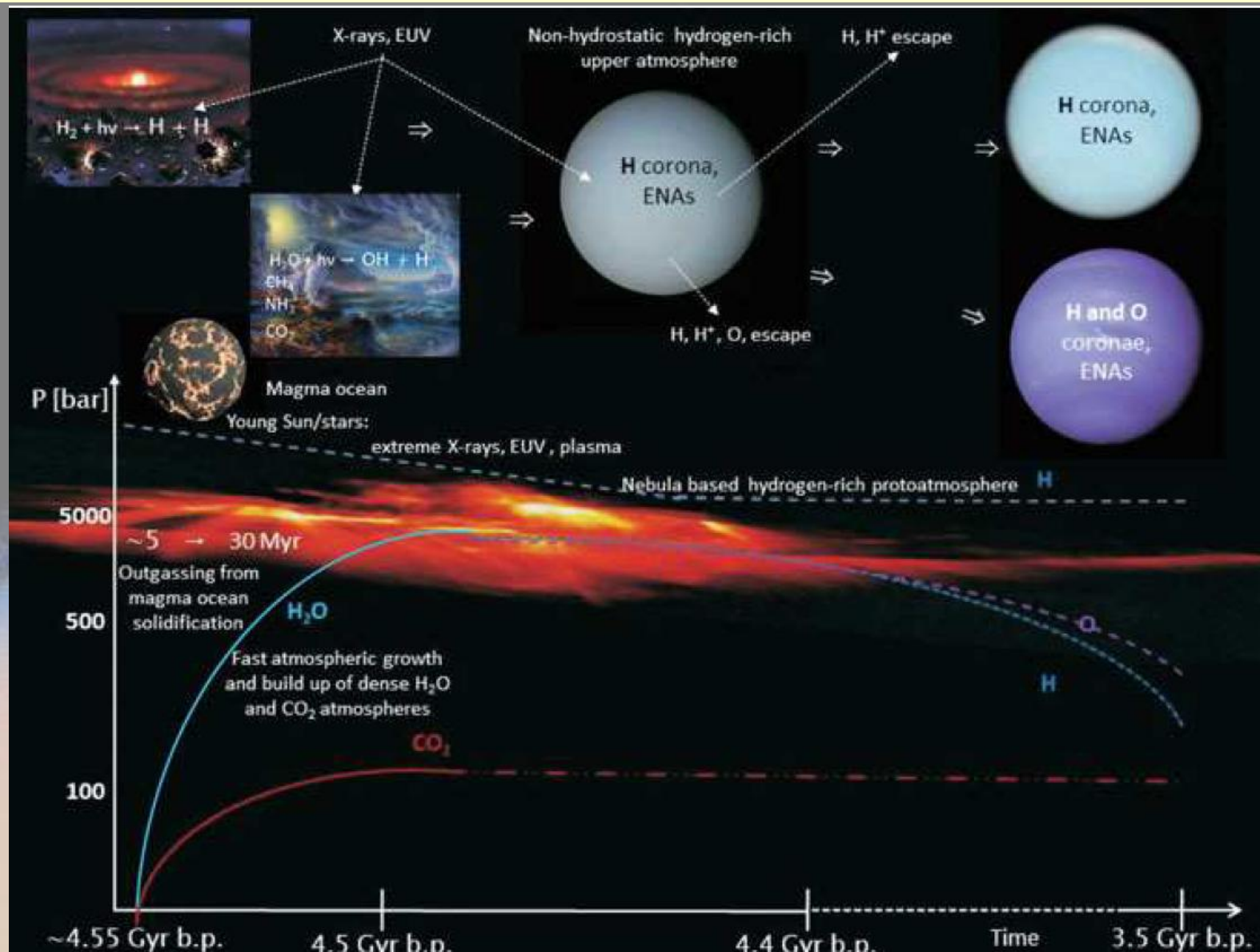
Протоатмосферы: *Процессы диссипации*



Протоатмосферы: *Процессы диссипации*

Схематическое представление различных тепловых и нетепловых процессов потери атмосферы и их эффективности для планет земного типа. Возраст звезды и планеты, а также активность звезды показаны в течение времени стрелкой слева направо. После образования планеты, происходит гидродинамический отток атмосферы, приводимый в действие вследствие поглощения и нагрева атмосферы крайним УФ излучением звезды. По мере уменьшения потока крайнего УФ излучения режим потери атмосферы меняется от гидродинамического расширения термосферы к испарению в гидростатическом режиме. Во время этого перехода, различные нетепловые процессы потери атмосферы начинают работать и вносить свой вклад в общие атмосферные потери. После того, как поток крайнего УФ излучения молодой и активной звезды уменьшается до умеренного уровня (< 5 current solar EUV) и газы CO₂ или N₂ становятся основной компонентой термосферы все процессы диссипации атмосферы будут способствовать атмосферным потерям, но с гораздо более низкими или даже незначительными последствиями для атмосферы по сравнению с ранней активной в диапазоне УФ фазой молодой звезды.

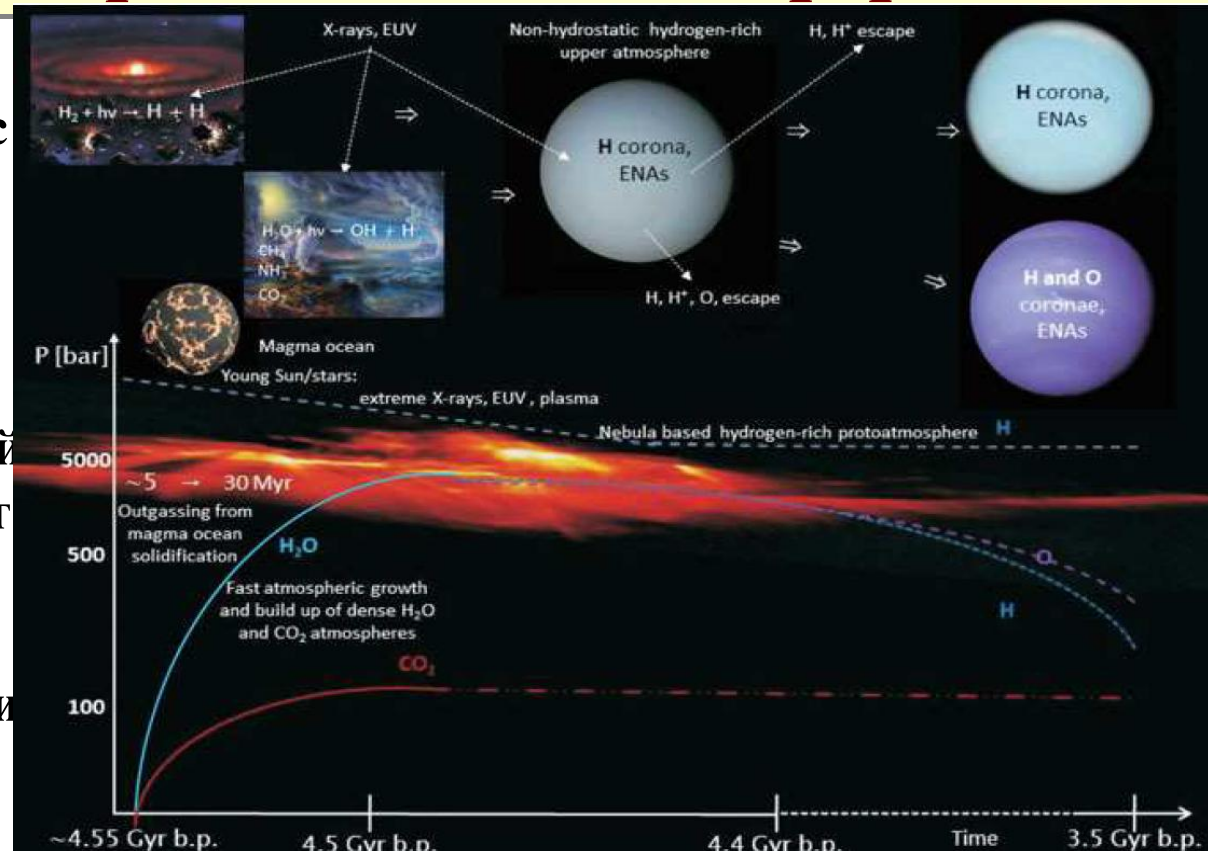
Протоатмосферы: *первичная H атмосфера*



Образование, потеря и эволюция первичной водородной протоатмосферы.

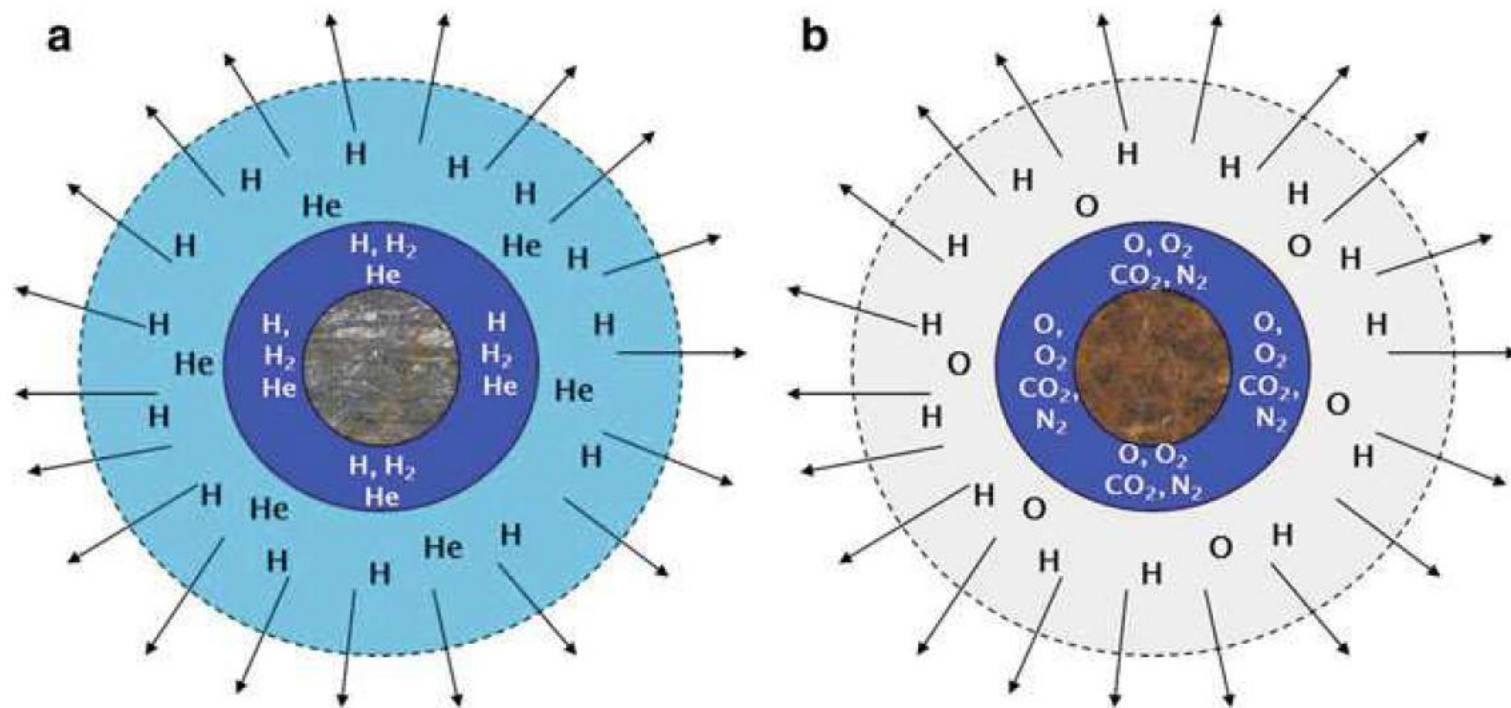
Протоатмосферы: *первичная H атмосфера*

Образование, потеря и эволюция протоатмосферы с преобладанием атомарного водорода, либо захваченного из туманности и/или океана магмы, либо связанного с плотной паровой атмосферой супер-Земли. Планеты могут захватывать и накапливать огромное количество H, либо из исходной туманности или за счет диссоциации молекул H₂O в паровой



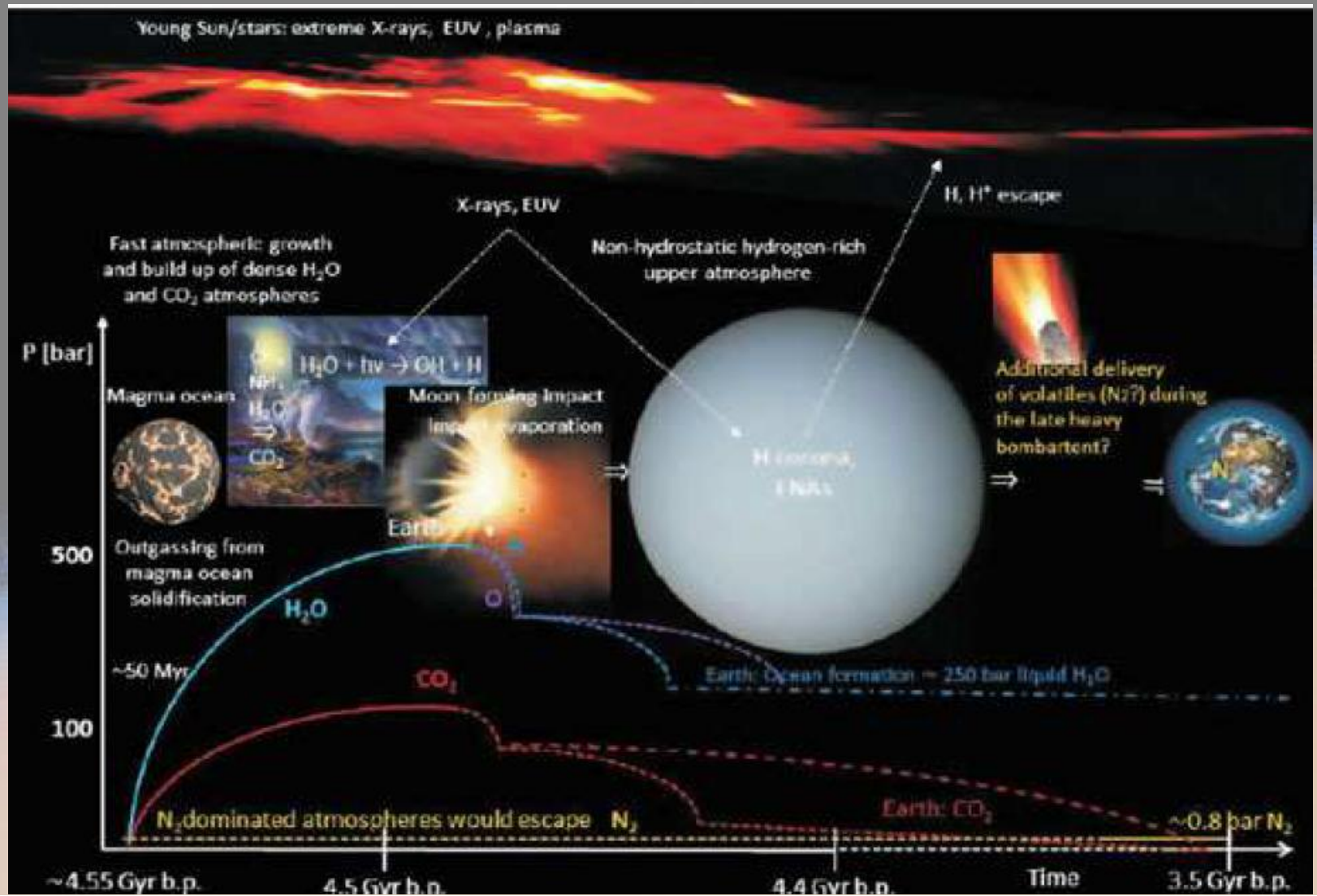
атмосфере. Эти плотные водородные оболочки не могут быть полностью потеряны из атмосфер массивных супер-Земель, особенно когда орбиты таких планет находятся в пределах зоны потенциальной обитаемости подобных Солнцу звезд классов G или F. Если на ранних стадиях планеты были окружены плотными паровыми атмосферами, то тогда огромное количество абиотического кислорода, который остается после диссоциации молекул воды, может также заполнять их верхние атмосферы.

Протоатмосферы: *Планетные ветры*



Иллюстрация, показывающая потерю атомов водорода из атмосферы планеты земного типа в режиме гидродинамического оттока - (а) первичная атмосфера с доминированием H и He ; (б) вторичная атмосфера из паров H_2O , CO_2 , N_2 . Благодаря высокому потоку крайнего УФ излучения молодого Солнца/звезды молекулы H_2 и H_2O диссоциируют и верхняя атмосфера будет заполняться атомами водорода. Более того, поток атомарного водорода может захватывать и переносить в планетном ветре тяжелые атомы, такие как He или атомы кислорода.

Протоатмосферы: эволюция - Земля

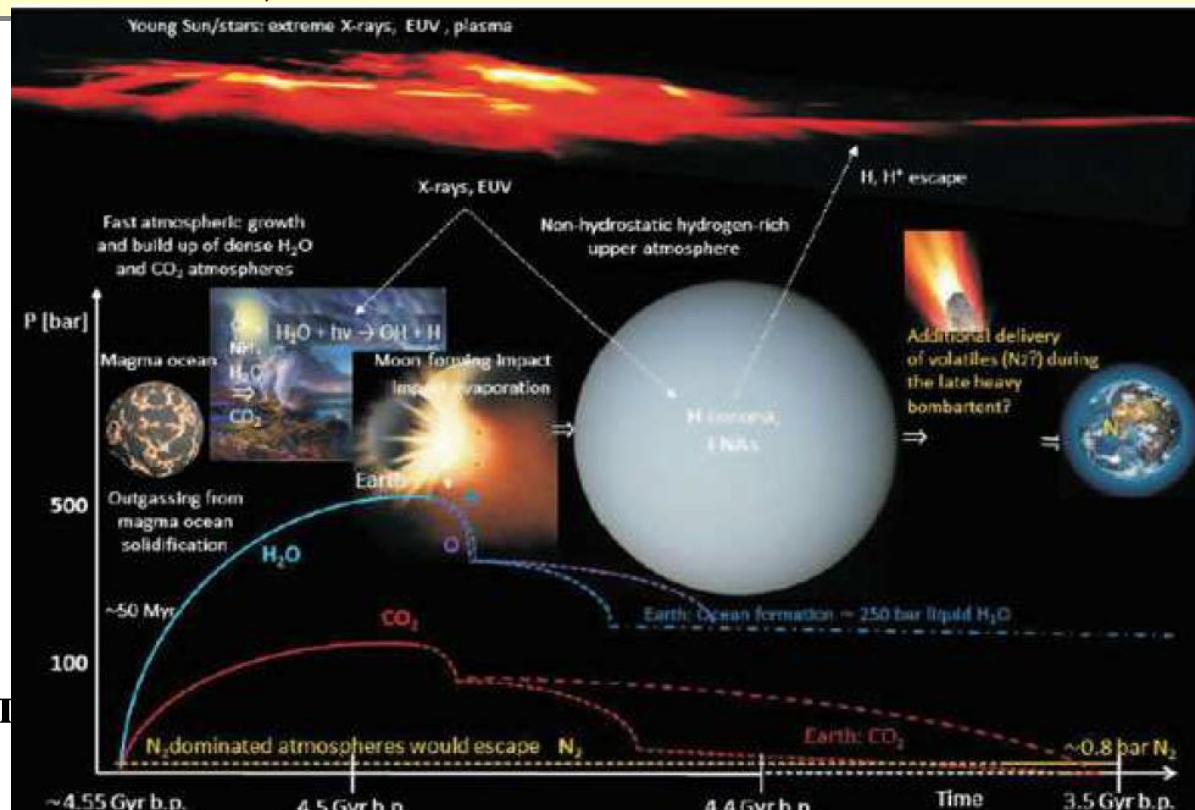


Сходный сценарий изменения атмосферы для ранней Земли после образования плотной паровой атмосферы в течение процесса затвердевания океана магмы.

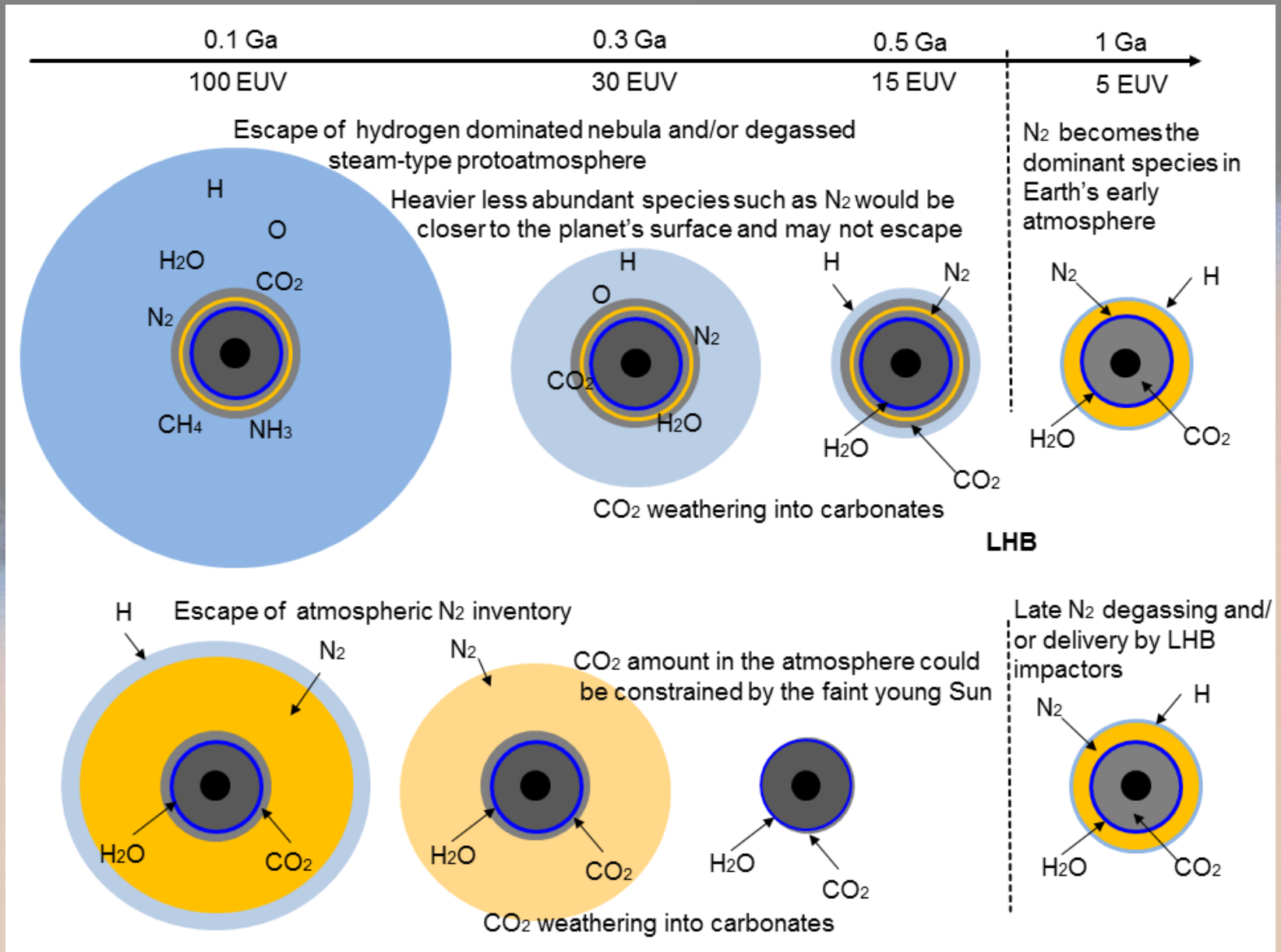
Протоатмосферы: эволюция - Земля

Аналогично ранней Венере, после ударной (катастрофической) дегазации горячая паровая ($\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$) атмосфера подвержена воздействию сильного потока крайнего УФ излучения молодого Солнца, что приводит к образованию протяженной водородной экзосферы за счет диссоциации молекул H_2O .

В отличие от Венеры, орбита которой ближе Солнца, солнечная светимость на Земле была слабее, так что атмосфера охлаждается быстрее до того состояния, когда оставшийся водяной пар может конденсироваться и приводить к образованию земного водного океана. Молекулы CO_2 осаждаются из атмосферы на ранние континенты и связываются в литосфере в виде известняков, а азот становится основным газом в атмосфере. Кроме газовыделения из вулканов, летучие вещества также могут поставляться в атмосферу в период поздней тяжелой бомбардировки.



Земля: образование ранней атмосферы



Заключение:

Наблюдения и теоретические модели атмосфер экзопланет, подверженных воздействию экстремальных потоков жесткого излучения родительской звезды, предоставляют замечательную возможность для проверки нашего теоретического понимания этих ключевых процессов - тепловой и нетепловой диссипации, влияющих как на эволюцию планеты, так и ее атмосферы, в частности Земли, на ранних стадиях. Но открытых вопросов еще много!

Детали таких исследований можно найти в обзоре:

- Massol et al., Formation and Evolution of Protoatmospheres. Space Sci. Reviews, 2016 (in press).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!