

Приближенный расчет тепловой потери атмосферы горячей экзопланеты на низкой орбите с учетом эллиптичности

Симонова А.А.¹, Шематович В.И.¹
¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассматривалась модель системы желтого карлика спектрального класса G и экзопланеты типа горячий суб-нептун, т.е. экзопланеты на низкой орбите:

- обладают твердым каменистым ядром (обычно до $4R_{\oplus}$);
- окружены протяженной водородно-гелиевой оболочкой с относительно большой массой (вплоть до массы Земли);
- эффективные температуры $\sim 700\text{—}1200$ К.

Из-за своей малой массы и близкого расположения относительно родительской звезды подвергаются воздействию приливных сил, которые могут заставить экзопланету мигрировать в сторону светила, выводя ее в зону потенциальной обитаемости.

Метод расчета

Подсчет осуществлялся с помощью аппроксимационной формулы, записанной в рамках модели ограничения по энергии (Luger et al., 2015), предполагающей, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} , где оптическая толщина для звездных XUV-фотонов равна единице.

$$\frac{dM_p}{dt} \approx \frac{\epsilon_{XUV} \cdot \pi \cdot F_{XUV} \cdot R_p \cdot R_{XUV}^2}{G \cdot M_p \cdot K_{\text{tide}}(\epsilon)}$$

R_p – радиус планеты;

M_p – масса планеты;

R_{XUV} – радиус поглощения XUV-фотонов ($R_{XUV} = 1,2R_p$);

ϵ_{XUV} – параметр эффективности нагрева ($\epsilon_{XUV} = 0,2 \pm 0,1$);

F_{XUV} – поток излучения XUV-фотонов ($F_{XUV} = 10 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$);

$K_{\text{tide}}(\epsilon)$ – приливный параметр.

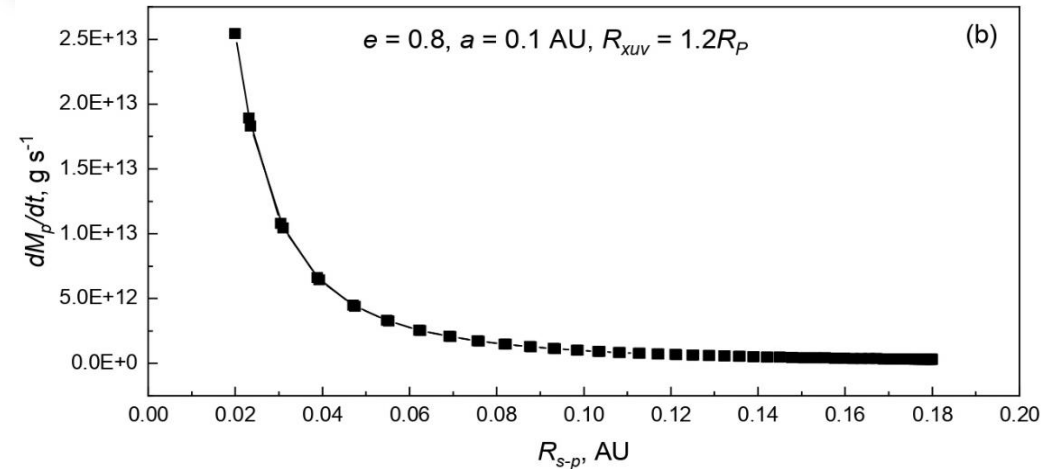
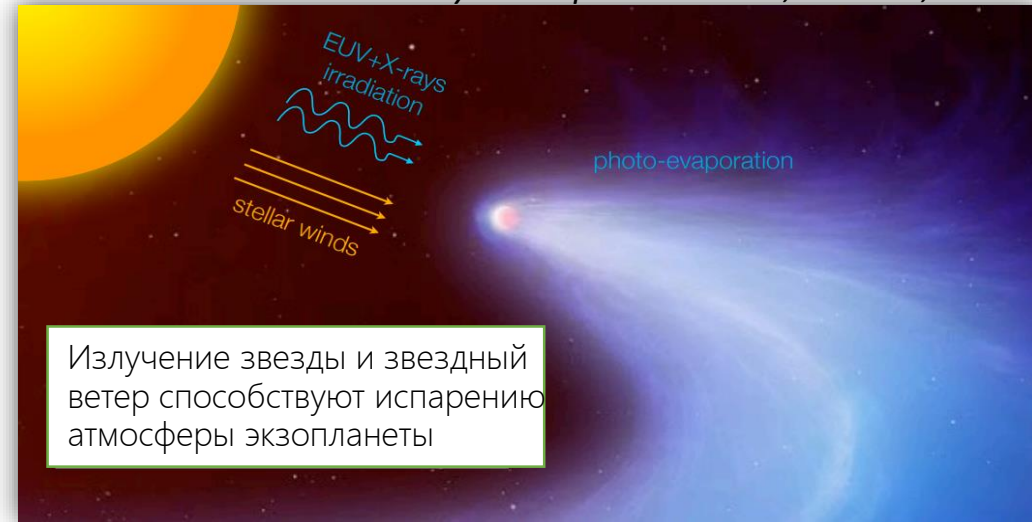
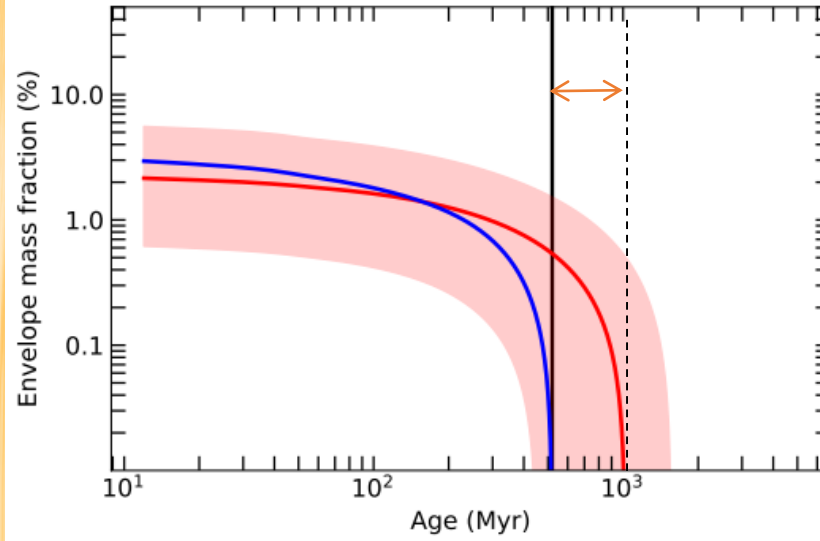
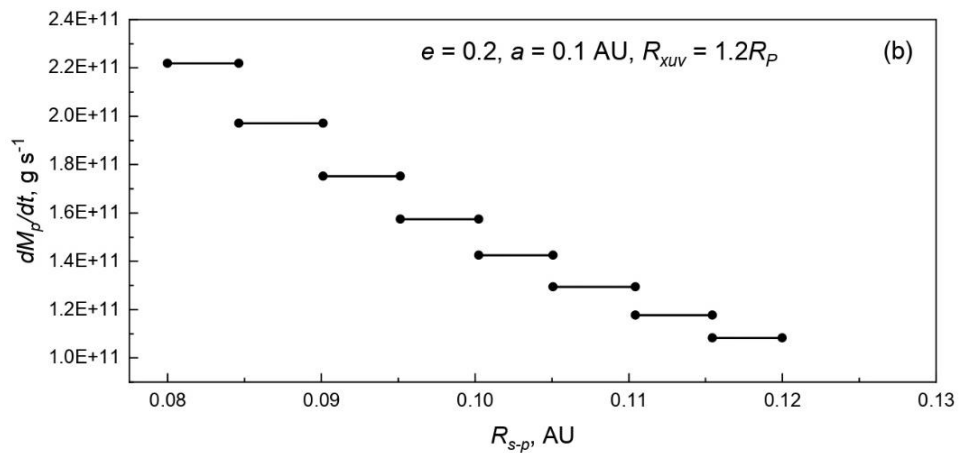
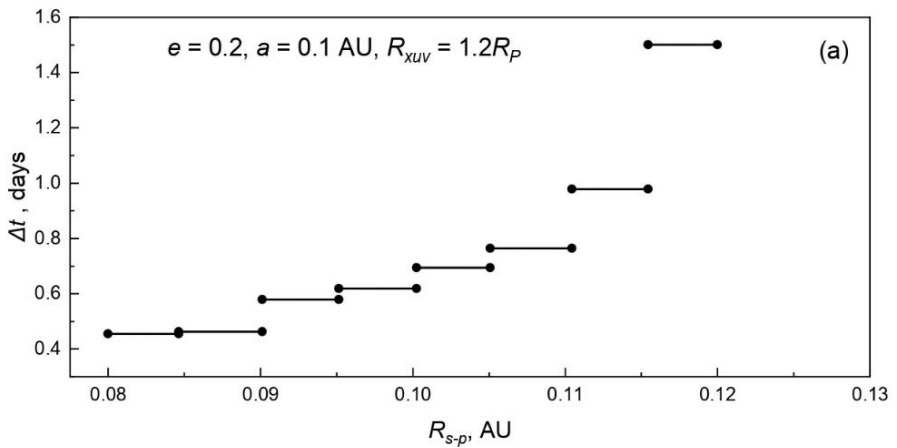


Рис. 1: Зависимость темпа потери массы атмосферы планеты от расстояния “звезда-планета” для значения эксцентриситета $e = 0.8$ (b).

Сравнение модели с результатами для HD 207496b



Транзитный суб-нептун HD 207496b обращается вокруг активной ($G = 8 \text{ mag}$) звезды-карлика типа K на низкой орбите с эксцентриситетом **0.231**.

Время полной потери атмосферы суб-нептуном составит \sim 500 млн. лет.

(Barros et al., 2023)

- Период обращения: $T \approx 6,^d 48$
- Потеря атмосферы за период: $\dot{M}_T \approx 5,8 \cdot 10^{15} \text{ г}$
- Время полной потери атмосферы: $t \approx 554 \text{ млн. лет}$

Итоги

Исходная эллиптичность орбиты горячей экзопланеты является важным фактором при оценке темпа потери первичной водород-гелиевой атмосферы для суб-нептунов и супер-земель.

Используемая модель достаточно хорошо согласуется с полученными данными о реальных экзопланетах, однако требует дополнений, так как не учитывает многие явления, которые также влияют на потерю планетой атмосферы (например, нетепловые процессы), что будет произведено в последующих исследованиях.

Рис. 2: Распределения времени движения по орбите (a) и темпа потери атмосферы (b) для горячего суб-нептуна в зависимости от расстояния “звезда-планета” для значения эксцентриситета орбиты $e = 0.2$.

- Период обращения: $T \approx 11,^d 57$
- Время полной потери атмосферы: $t \approx 0,3 \text{ млрд. лет}$
- Потеря атмосферы за период: $\dot{M}_T \approx 6,3 \cdot 10^{17} \text{ г}$