Астролицей МФТИ 30 марта 2017 г.

Диссипация планетных атмосфер



В.И. Шематович

Институт астрономии РАН

Диссипация планетных атмосфер: содержание

Образование и эволюция атмосфер в Солнечной и внесолнечных планетных системах:

- Протопланетные диски и образование планет;
- Атмосферы:
- возможные сценарии образования первичных и вторичных атмосфер
- тепловые и нетепловые процессы, ответственные за
- образование и диссипацию (потерю) атмосферы
- математическое описание
- ранние атмосферы планет земной группы
- Заключение

Эволюция протопланетного диска (из Williams and Cieza, 2011)



Иллюстрация эволюции протопланетного диска и образования планет.

Эволюция протопланетного диска (из Williams and Cieza, 2011)

Иллюстрация эволюции диска и формирования планет:

а). Воздействие сильного звездного излучения в рентгене и крайнем ультрафиолете, а также звездного ветра, на газопылевой диск на ранней стадии эволюции;



b). Планетезимали и планетные эмбрионы образуются за счет столкновений, диск оседает к центральной плоскости, и продолжается его испарение.

с). Продолжается фотоиспарение диска, планетные эмбрионы и протопланеты на орбитах около родительской звезды становятся отделенными от испаряющегося газа туманности;

d). Через несколько миллионов лет, но не позже примерно 10 млн. лет, остается диск обломков (debris disc), и планеты продолжают формироваться (Williams and Cieza, 2011).

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.

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

Возможные пути образования планет

Иллюстрация эволюции протопланеты в различные конечные состояния, которыми могут быть: (а) подобные Венере или Марсу сухие или с обильным СО₂ льдом планеты с одним континентом; (б) геофизически активные, богатые водой подобные Земле планеты с континентам



и азотной атмосферой (CO₂ 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.



Экзопланета- газовый гигант на низкой орбите - горячий юпитер HD208458b



An ultraviolet image of Earth's dark hemisphere with the Sun behind it, taken from NASA's Dynamic Explorer I spacecraft at 19,700 km altitude above 13° N latitude, on February 16, 1982. The extended red glow around the planet comes from hydrogen atoms in the exosphere. A northern auroral oval and equatorial glow are due to emission from atomic oxygen and molecular nitrogen. Isolated points are stars that are bright in the ultraviolet. (Courtesy of NASA).



Atmospheres are found where gravity is high and solar heating low. We show this here by plotting heating from the parent star versus escape velocity for solar system bodies and extrasolar planets. The presence or absence of an atmosphere is indicated by filled or open symbols, respectively. The graph demonstrates decreasing atmospheric stability from lower right to upper left. To the lower right of the plot are bodies with substantial atmospheres. Those lying close to a diagonal between upper left and lower right, such as Triton, have thin atmospheres.

Атмосферы: *структура верхней атмосферы* Земли

Макрошкала –

шкала изменения плотности

по высоте

H(h)=kT(h)/mg(h)

Микрошкала – средняя длина свободного пробега λ(h)~(n(h)*σ)⁻¹

Число Кнудсена= λ(h)/H(h) Термосфера 100 km Kn<< 1 Экзосфера 500 km Kn>> 1 Переходная область – Kn~ 0.1 –1.0





Атмосферы: математическое описание



Figure 1. Regimes of validity for hydrodynamics and kinetic theory versus the Knudsen number, Kn = l/H. The hydrodynamic expansion of the atmosphere with radial velocity $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ is shown on the right. The collisionless exosphere [*Chamberlain*, 1963], characterized by different particle classes, is depicted on the left. Collisionless kinetic theory models are valid in the limit $Kn \to \infty$, whereas hydrodynamic models are valid when the mean free path is very small and $Kn \to 0$. The Boltzmann equation of kinetic theory is valid for the whole range of Knudsen number.

Из обзора (Shizgal & Arkos, 1996)

Потери атмосферы Марса

Драйверы определяющие потери атмосферы:

- -Солнечное КУФ излучение; -Плазма солнечного ветра;
- Направление и интенсивность ММП;
- Потоки солнечных частиц с высокими энергиями (SEP).

Новые данные КА MAVEN!



Hot or suprathermal atoms

Suprathermal atoms are formally defined as atoms with kinetic energies E > 5 –10 kT – mean thermal energy of surrounding gas Oxygen on Mars at present time



Thermal processes

Nonthermal processes — induced by the stellar / solar energy deposition and suprathermals are important for: (a) atmospheric chemistry; (b) - UV emissions; (c) - atmospheric loss.

Kinetic Boltzmann equation:

Distribution of suprathermal atoms in the atmospheric rarefied gas is evaluated through the solution of Boltzmann-type kinetic equations with the source terms



Here Q_i^{β} are the source functions of the fresh suprathermals and J_{α} – integral terms for collisions with the ambient atmospheric gas in the region G(r) with a boundary surface $\Gamma(G)$. This system of kinetic equations for suprathermal heavy atoms is solved using the stochastic modeling (Marov et al., SSRs, 1996) with Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method.

Kinetic Boltzmann equation:

 $J_{\alpha}(F_{i,}F_{j})$ – integral terms for collisions of suprathermals with the ambient atmospheric gas in the region G(r) with a boundary surface $\Gamma(G)$.



Атмосферы: математическое описание



Figure 1. Regimes of validity for hydrodynamics and kinetic theory versus the Knudsen number, Kn = l/H. The hydrodynamic expansion of the atmosphere with radial velocity $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ is shown on the right. The collisionless exosphere [*Chamberlain*, 1963], characterized by different particle classes, is depicted on the left. Collisionless kinetic theory models are valid in the limit $Kn \to \infty$, whereas hydrodynamic models are valid when the mean free path is very small and $Kn \to 0$. The Boltzmann equation of kinetic theory is valid for the whole range of Knudsen number.

Из обзора (Shizgal & Arkos, 1996)

Jeans Equation



$$\Phi_J = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} N \exp(-\lambda)(1+\lambda)$$
$$\lambda = GMm/kTR$$



- Assumptions:
 - The exobase is a discrete level
 - The VDF at the exobase is MB
 - All constituents have the same temperature.
 - The escape in no way affects the characteristics of the atmosphere, in particular it does not alter the temperature of the atmosphere

Тепловое испарение атмосферы по Джинсу



- **Corrections to Jeans Escape**
 - If there is an escape flux, the \circ atmosphere is not static or isothermal.
 - Using standard kinetic theory we can calculate the changes in the distribution function due to these effects.
 - We can then calculate the flux of escaping molecules and compare to Jeans.
 - The temperature gradient has a dominant effect.

Возможные уточнения теплового испарения атмосферы (Shematovich & **Bisikalo**, 1989)



Тепловая диссипация – испарение атмосферы

Motivation: Validation of continuum models of thermal escape



- Thermal escape is the escape of molecules with thermal energies above the gravitational binding energy in the collision-free part of the atmosphere
- Following to Parker (1964), thermal escape has been described by continuum models
- Continuum models based on the Fourier law for thermal conduction can fail in the rarefied part of the atmosphere



Переходная область Kn ~ 0.1 - 1. Fig. 1.1 for Titan from (Shematovich et al.,

Summary: Hydrodynamic vs. Jeans regime at Kn₀ << 1

Hydrodynamic regime

 $\lambda_0 < 2 - 3$

Sonic point is in the dense part of the flow

Bulk gas velocity corresponds to the most probable velocity of molecules

Minor contribution of thermal conductivity to the energy transfer

Escape rate is independent of Jeans parameter

Energy escape rate is on the order of energy carried by molecules outgoing from the source surface

Jeans regime

 $\lambda_0 > 3 - 4$

Sonic point, if exists, is far above the exobase

Bulk gas velocity appears due to non-equilibrium velocity distribution

Determinant role of thermal conductivity in the energy transfer

At $\lambda_0 > \sim 6$, the escape rate is within a factor of 2 from the Jeans escape at the exobase

Energy escape rate is small, but has non-negligible effect on the flow structure



Atmospheres are found where gravity is high and solar heating low. We show this here by plotting heating from the parent star versus escape velocity for solar system bodies and extrasolar planets. The presence or absence of an atmosphere is indicated by filled or open symbols, respectively. The graph demonstrates decreasing atmospheric stability from lower right to upper left. To the lower right of the plot are bodies with substantial atmospheres. Those lying close to a diagonal between upper left and lower right, such as Triton, have thin atmospheres.

Атмосферы: основные механизмы диссипации атмосферы

PLANET	KEY GASES LOST	DOMINANT MECHANISMS
Earth	Hydrogen	Charge exchange, Jeans, polar wind
	Helium	Polar wind, charge exchange
Early Earth	Hydrogen and moderately light gases, including neon	Hydrodynamic escape and drag
Venus	Hydrogen, helium	Charge exchange, sputtering
Early Venus	Hydrogen and moderately light gases, including oxygen	Hydrodynamic escape and drag
Mars	Hydrogen	Jeans
	Carbon, oxygen, nitrogen, argon	Sputtering, photochemical
Early Mars	All gases	Impact erosion
	Hydrogen and many heavier gases, including carbon dioxide	Hydrodynamic escape and drag
Early Callisto, Ganymede, and Europa	All gases	Impact erosion, hydrodynamic escape and drag
Titan	Hydrogen	Jeans, photochemical
	Methane, Nitrogen	Photochemical, (hydrodynamic flow?), sputtering
Early Titan	Hydrogen, methane, nitrogen	Hydrodynamic escape and drag
Pluto	Hydrogen, methane, nitrogen	Hydrodynamic escape?
HD 209458b and similar 'Hot Jupiters'	Hydrogen and light gases, including carbon and oxygen atoms	Hydrodynamic escape and drag

Подробно в обзоре (Johnson et al., Space Science Reviews, 2008)

Атмосферы: диссипация первичной атмосферы



Экзопланета- газовый гигант на низкой орбите - горячий юпитер HD208458b

Внесолнечные планеты: эпоха характеризации

Planets, planetary systems and their host stars evolve

 \rightarrow Need to derive accurate planetary system age \rightarrow asteroseismology

life

Loss of primary, atmosphere

Stellar radiation, wind and magnetic field

Secondary

atmosphere

Cooling, differentiation

(plate)-

tectonics

Cooling, differentiation

Formation in proto-planetary

disk, migration

Атмосферы: молодое Солнце



Young Sun data from Ribas et al. (2005)

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.

Протяженная водородная корона планеты-транзита HD 458209b



Протяженная водородная корона планеты HD 458209b – открыта в наблюдениях на КТХ (STIS G140M)

Vidal-Madjar et al., Nature, 2003 **"An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b"**



Input of suprathermal photoelectrons into the atmospheric heating by the stellar soft X-ray and EUV radiation

Photolytic processes in the H₂/He/H atmosphere:

$$H_{2} + hv, (e_{p}) \rightarrow \begin{cases} H(1s) + H(1s, 2s, 2p) \\ H_{2}^{+} + e + (e_{p}) \\ H(1s) + H^{+} + e + (e_{p}) \end{cases}$$

H, He + hv, (e_{p}) → H^{+}, He^{+} + e + (e_{p})

XUV heating by the stellar radiation: photoelectron energy deposition

Kinetics of photoelectrons in the $H_2/He/H$ atmosphere results in the momentum transfer, excitation and ionization collisions:

$$e(E) + X \rightarrow \begin{cases} e(E') + X \\ e(E') + X^* \\ e(E') + X^+ + e(E_s) \end{cases}$$

Kinetics of photoelectrons in the $H_2/He/H$ atmosphere is described by the Boltzmann equation (Shematovich et al., JGRE, 2008):

$$\mathbf{v}\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}f_e + \mathbf{s}\frac{\partial}{\partial \mathbf{v}}f_e = Q_{e,photo}(\mathbf{v}) + Q_{e,secondary}(\mathbf{v}) + \sum_{M=H_2,H,He}J(f_e, f_M),$$

- $Q_{e,photo}$ term describes the formation rate of primary electrons due to photoionization;

- $Q_{e,secondary}$ term describes the rate of formation of the secondary electrons.

Monte Carlo model of the photoelectron kinetics: *numerics*

We had studied the absorption of solar XUV radiation and highenergy charged particles penetration into the upper atmospheres of the terrestrial planets. The following Monte Carlo codes were developed:(a) electrons (Shematovich et al., JGR, 2008, 2010); (b) protons and hydrogen atoms (Shematovich et al., JGR, 2011); (c) He⁺⁺ ions (Shematovich et al., JGR, 2013).

- To simulate the kinetics of photoelectrons in the $H_2/He/H$ atmosphere the earlier developed the Monte Carlo model (Shematovich et al., JGRE, 2008) was adapted.

-- In the numerical simulations the evolution of the system of modeling particles due to collisional processes and particle transport is calculated from the initial to the steady state. Region under study was fixed to $[R_0, 2.2R_0]$. The relative importance of the collisional processes is governed by their cross sections.

Molecular hydrogen: *dissociation by stellar UV radiation and by electron impact*

 $H_2 + hv(e_v) \rightarrow H(H^+) + H(2s, 2p, ...) + (e_v) + \Delta E_{dis}$

H atom distribution by kinetic energy after H₂ dissociation by electrons (Ajello et al. JGR, 1995) and after H2 dissociative ionization by electrons (Van Zyl&Stephen, Phys. Rev. A, 1994)



FIG. 4. Normalized H^+ energy distributions for dissociative ionization of H_2 by 75-eV electrons. The data points are from Van Brunt (Ref. [12]).

Suprathermal hydrogen: kinetics modeling

To calculate the distribution of the suprathermal hydrogen atoms in the transition region of the HD209458b the following codes were used:

a) MC code to calculate the production rates and energy spectra of the fresh suprathermal H atoms formed in the H₂ dissociation processes (Shematovich et al., JGR, 2008) $Q_s^H(\mathbf{r}, \mathbf{c}) = q_s^H(E) f_s^H(\mathbf{r}, \mathbf{c})$

b) DSMC code to calculate the kinetics of the suprathermal H atoms in the transition region (Shematovich, Sol. Sys. Res., 2004)

$$\boldsymbol{r}\frac{\partial F_{H}}{\partial \boldsymbol{r}} + \frac{\boldsymbol{G}}{m_{H}}\frac{\partial F_{H}}{\partial \boldsymbol{c}} = \sum_{s} Q_{s}^{H} + \sum_{m} J_{m}^{H}(F_{H}, F_{m})$$
$$J_{m}^{H}(F_{H}, F_{m}) = \int g_{ij}d\sigma_{m}d\boldsymbol{c}_{j}[F_{H}(\boldsymbol{c}_{i}')F_{m}(\boldsymbol{c}_{l}') - F_{H}(\boldsymbol{c}_{i})F_{m}(\boldsymbol{c}_{j})]$$

Suprathermal hydrogen: source rates due to photoand photoelectron impact dissociation

•Solar EUV flux for F_{10.7}=100 scaled to r=0.045 au

neutrals from models
Yelle (2004) or Munoz
(2007)

•No magnetospheric electron precipitation

•H₂→H transition region covers altitude range 1.05 – 1.15 Rp.



Suprathermal hydrogen: *energy distribution functions EDFs*

•Near the peak (~ 1.07Rp) of hot H production in the dissociation processes H EDFs (E> 2eV) are strongly nonequilibrium.



•Blue lines - local Maxwellian EDFs (E> 2eV) at temperatures from Yelle (2004).



Suprathermal hydrogen due to H₂ **dissociation:** *escape rate and energy spectrum (Shematovich, SSR, 2010)*

•Escape rate of hot H atoms due to the H_2 dissociation processes: $\sim (2-4) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ which results in the loss rate of $\sim (2-6) \times 10^9 \text{ g s}^{-1}$

•Hot H atom velocities between 30 –60 km/s

• Rates estimated from HST observations ~10¹⁰ -10¹¹ g s⁻¹

Other dissociation processes?



XUV heating by the stellar radiation of the H₂/He/H atmosphere: *XUV deposition rates*



XUV heating by the stellar radiation of the H₂/He/H atmosphere: *heating efficiencies*

The heating efficiency η_{hv} with (red curve) and η_{pe} without (blue curve) taking into account the electron impact processes (4) in the H₂ \rightarrow H transition region.



Атмосферы: эффективность нагрева



(a) Профиль интенсивности нагрева атмосферы 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, AB, 2015.

Экзоатмосферы: модель атмосферы (Ионов+2017)



Рис. 1. Блок-схема используемой модели.

Ионов, Шематович, Павлюченков, АЖ, 2017

Экзоатмосферы: модель атмосферы (Ионов+2017)

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 Shaikhislamov et al. (2014) is also shown.

Темп потери атмосферы:Estimate from HSTobservations $\sim 10^{10}$ g/s;Koskinen et al. (2013) $- 4x10^{10}$ g/s;Shaikislamov et al. (2014) $- 7x10^{10}$ g/s;Model M- $- 4x10^{10}$ g/s;Model M+ $- 8x10^9$ g/s;



Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b (a=0.045 a.e.)





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

(a) если точка лобового столкновения лежит внутри полости Роша планеты, то оболочки имеют почти сферическую форму классической атмосферы,

Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b

 $\mathbf{T}\mathbf{\mathfrak{3}} = \mathbf{8000} \ \mathbf{K}$





(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.

Атмосферы: Процессы диссипации



Атмосферы: 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 атмосферное 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 будет 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.

Атмосферы: Процессы диссипации



Иллюстрация, показывающая потерю атомов водорода из атмосферы планеты земного типа в режиме гидродинамического оттока - (а) первичная атмосфера с доминированием Н и Не; (б) вторичная атмосфера из паров Н2О, CO2, N2. Благодаря высокому потоку крайнего УФ излучения молодого Солнца/звезды молекулы Н2 и Н2О диссоциируют и верхняя атмосфера будет заполняться атомами водорода. Более того, поток атомарного водорода может захватывать и переносить в планетном ветре тяжелые атомы, такие как Не или атомы кислорода.

Атмосферы: эволюция - Земля



Сходный сценарий изменения атмосферы для ранней Земли после образования плотной паровой атмосферы в течение процесса затвердевания океана магмы (Lammer, 2013).

Атмосферы: эволюция - Земля

Аналогично ранней Венере, после ударной (катастрофической) дегазации горячая паровая (Н2О/СО2) атмосфера подвержена воздействию сильного потока крайнего УФ излучения молодого Солнца, что приводит к образованию протяженной водородной экзосферы за счет диссоциации молекул Н2О.



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 СО2 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.

Атмосферы: первичная Н атмосфера



Образование, потеря и эволюция первичной водородной протоатмосферы.

Атмосферы: первичная Н 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 Н, либо из исходной туманности или за счет диссоциации мол 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 (Lammer, 2013).

Биомаркеры: будущие наблюдения атмосфер экзопланет



атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах!

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 особенности, на ранних стадиях. Детали таких исследований можно найти в обзорах:

- H. Lammer. Origin and Evolution of Planetary Atmospheres.
Implications for Habitability. Springer Briefs in Astronomy, 2013
-H. Massol, ..., V. Shematovich, H. Lammer, Formation and
Evolution of Protoatmospheres. Space Sci. Reviews, 2016

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!