

Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

В.И. Шематович

Институт астрономии РАН



Солнечная система: *содержание*

Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.

Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.

Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды.

Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.

Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.

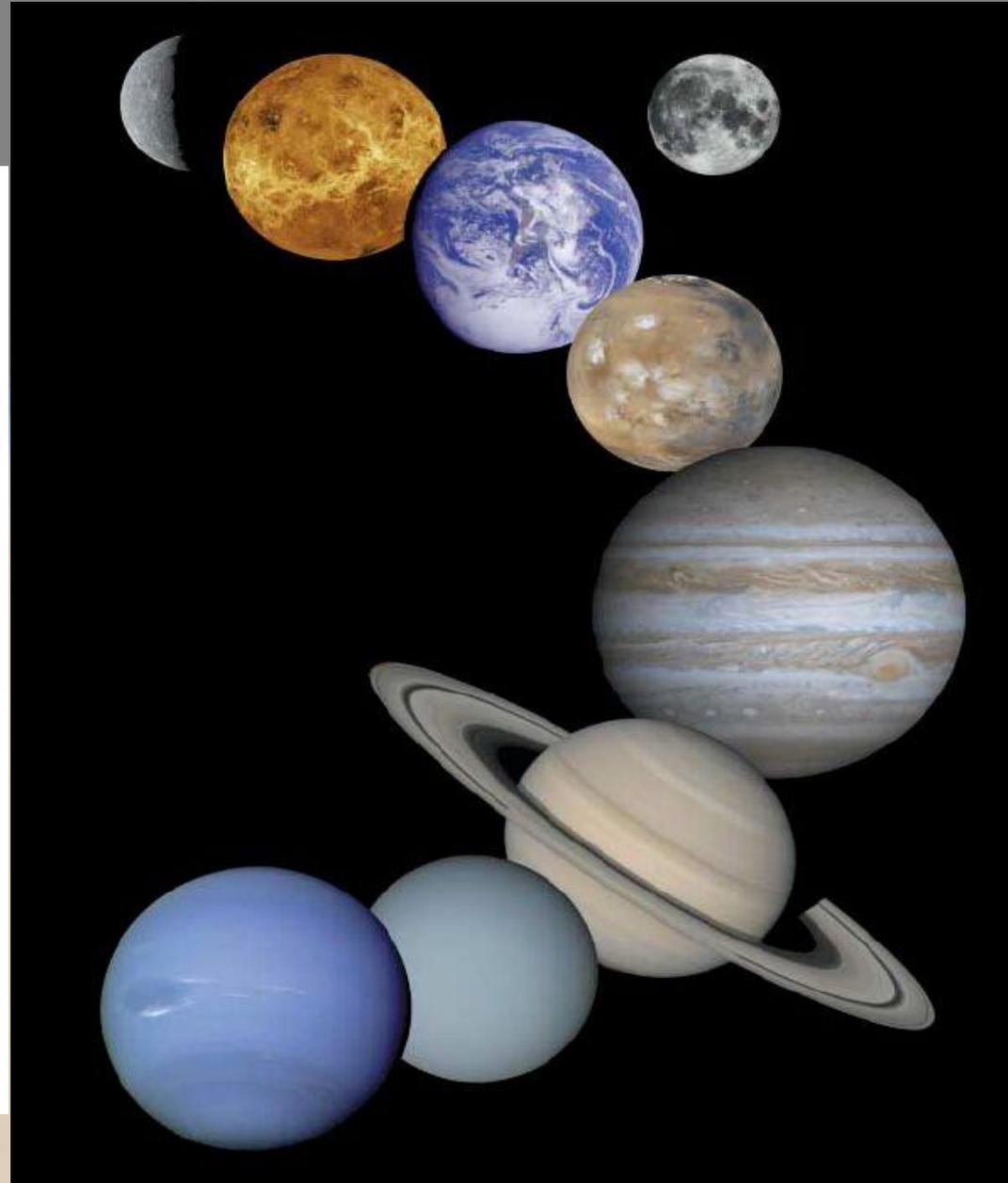
Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.

Надтепловые частицы в планетных атмосферах

- **Определения: надтепловые (горячие) атомы и молекулы, их кинетика и перенос в планетных атмосферах;**
- **Описание кинетики на молекулярном уровне;**
- **Метод Монте Карло прямого моделирования;**
- **Исследованные проблемы:**
 - **надтепловые атомы азота и кислорода в верхней атмосфере Земли;**
 - **горячие кислородные короны планет земной группы.**

Планетные атмосферы:

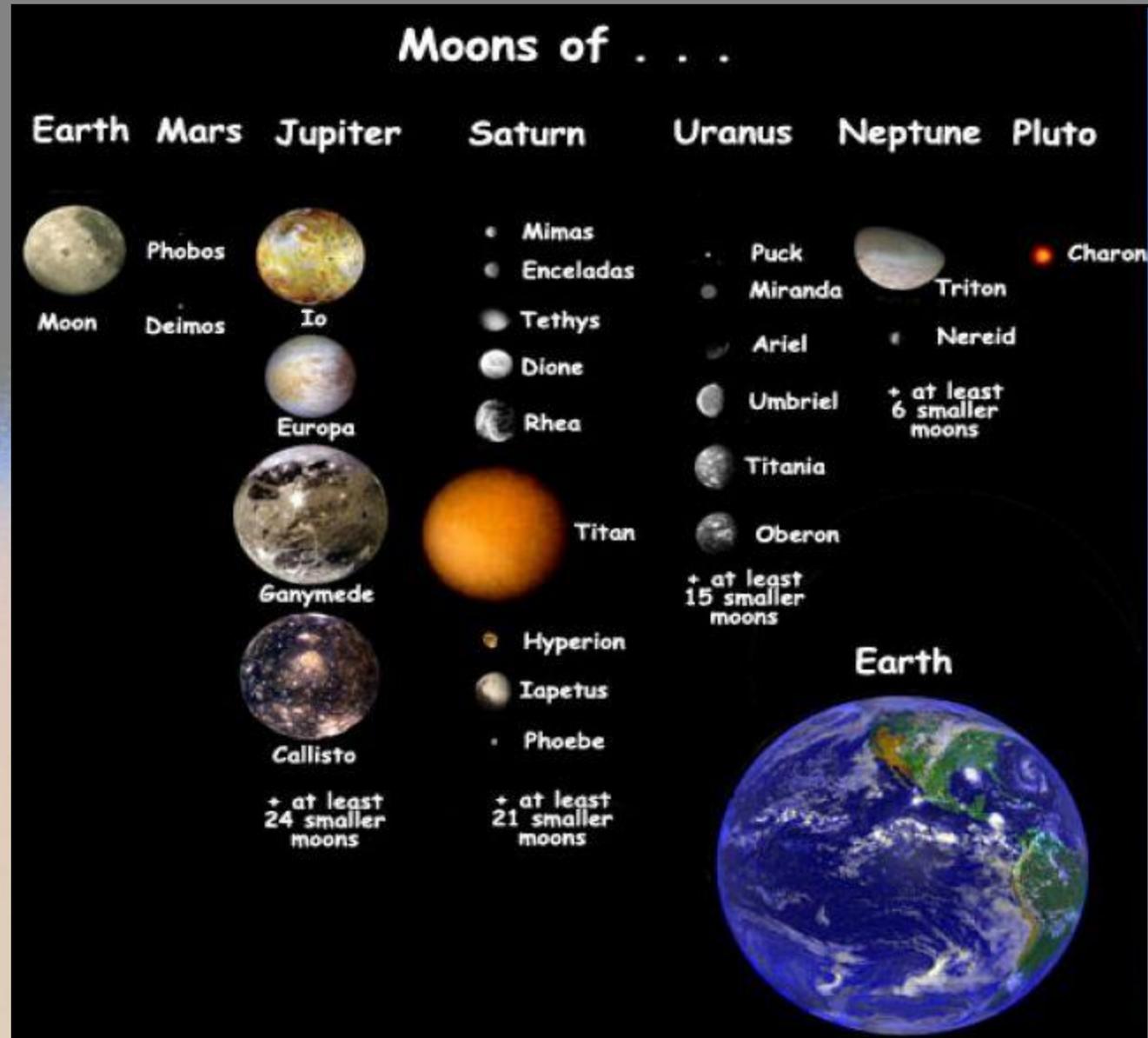
**Меркурий – VeriColombo,
MPO;**
Венера – VEX;
**Марс – MEX, MRO, Фобос-
грунт;**
**Система Юпитера – JUNO,
...;**
**Система Сатурна –
CASSINI;**
**Плутон-Харон и
объекты пояса Койпера –
New Horizons;**
Кометы - Rosseta



Спутниковые атмосферы

Ио
Европа
Ганимед
Энцелад
Титан
Харон

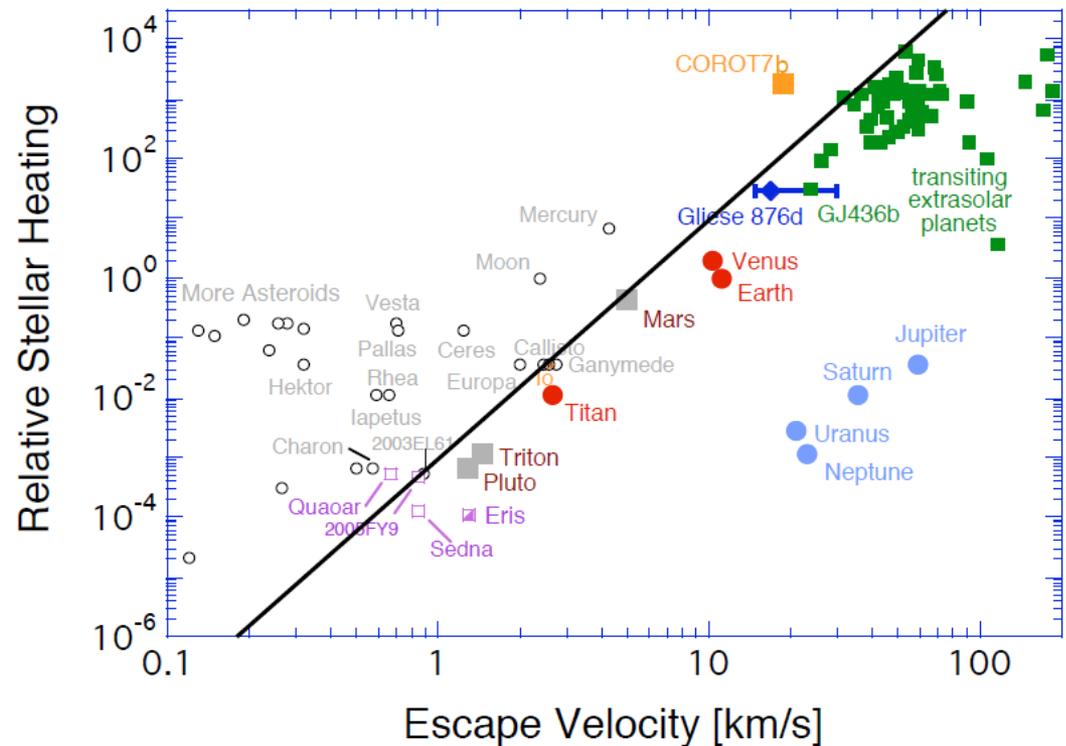
...



Атмосферы: диссипация атмосферы

$$v_{esc}(r_{exo}) = \left(\frac{2GM_p}{r_{exo}} \right)^{1/2}$$

Thermal (hydrodynamic escape) stability



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.

Типы планетных атмосфер

Тип	Имя	Масса (M_E)	Убегание (эВ/ m_p)	Давление (атм)	Температура (К)
H/He газовые шары	Юпитер	318	18	--	128
	Сатурн	95	6.5	--	98
	Уран	14.5	2.3	--	56
	Нептун	17.0	2.8	--	57
Земной группы	Венера	0.81	0.56	90	750
	Земля	1	0.65	1	280
	Марс	0.11	0.13	8 mb	240
	Титан	0.022	0.051	1.5	94
	Тритон	0.022	0.051	17 μ b	38
Убегающие	Ио	0.015	0.034	10 nb	130
	Европа	0.008	0.021	.02 nb	120
	Ганимед	0.024	0.024	.01 nb	140
	Энцелад	0.000013	0.00024		150?
	Плутон	0.002	0.008	1 μ b	36
	Кометы	малая	~ 0		
Бесстолк-новительные	Меркурий	0.053	0.093		
	Луна	0.012	0.029	и другие спутники	

Химический состав атмосфер

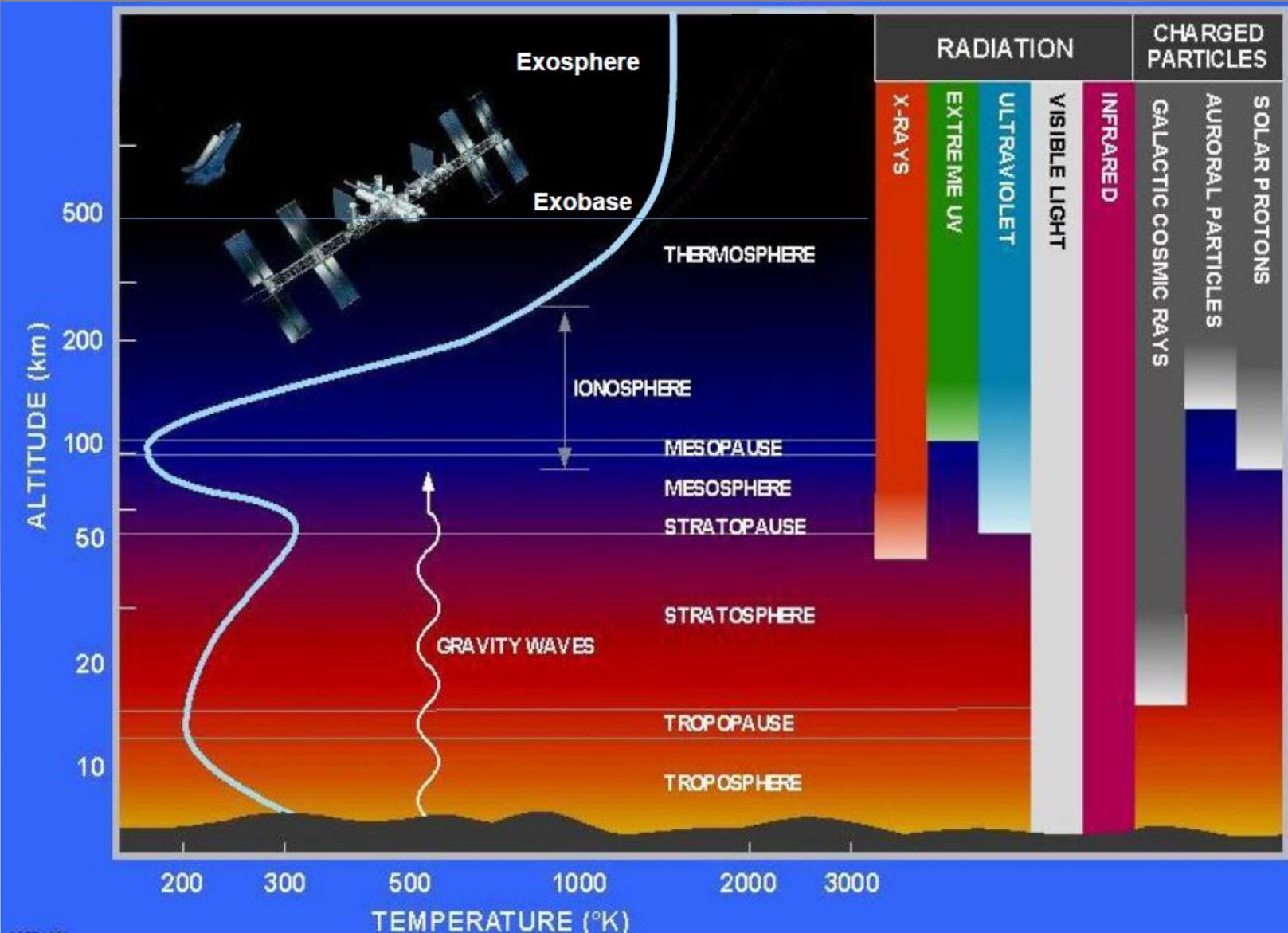
	H(H ₂)	He	O	C	N	Ne
Солнце	0.86	0.14	0.0014	0.0008	0.0004	0.0002

	H ₂	He	CH ₄	NH ₃
Юпитер	0.898	0.102	0.003	0.0026
Сатурн	0.963	0.0325	0.0045	0.0001
Уран	0.825	0.152	0.023	<10 ⁻⁷
Нептун	0.80	0.19	0.015	<6x10 ⁻⁷

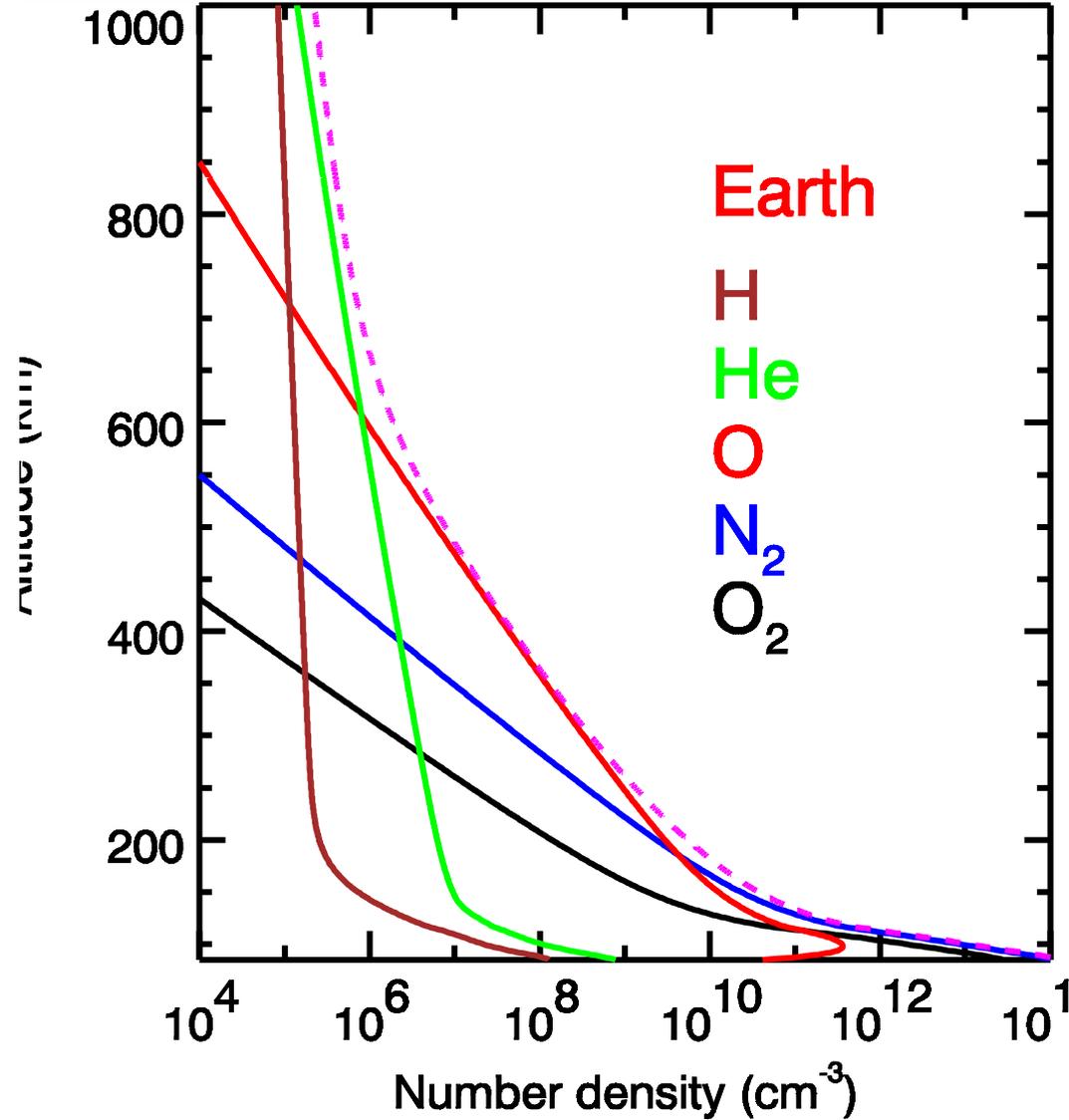
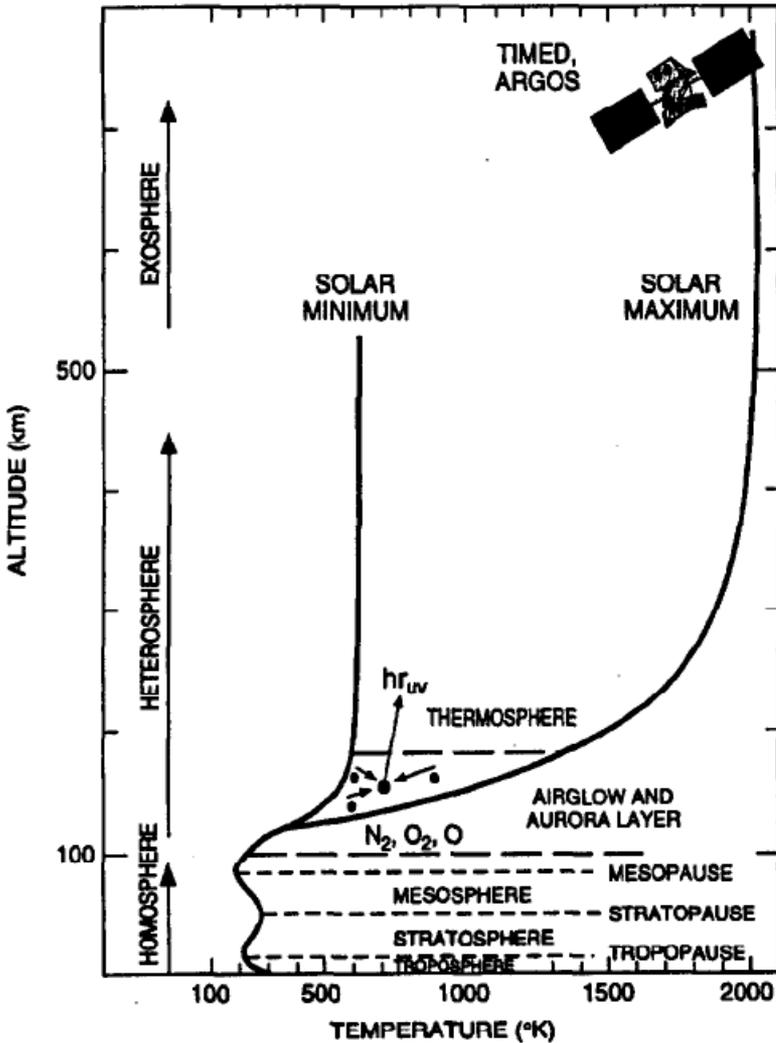
Химический состав атмосфер

	CO ₂	N ₂	O ₂	CH ₄	H ₂ O	Ar
Земля	0.0031	0.781	0.209	0.00015	0.01	0.009
Венера	0.965	0.035	0.00003		<0.0002	~0.0001
Марс	0.953	0.027	0.0013		0.0003	0.016
Титан		0.97		0.03		0.01?

Атмосферы: структура



Верхняя атмосфера Земли – распределение химического состава по высоте

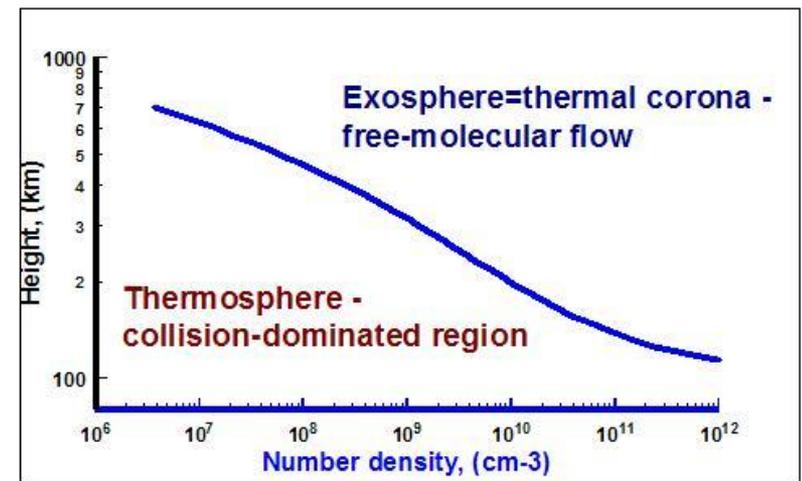
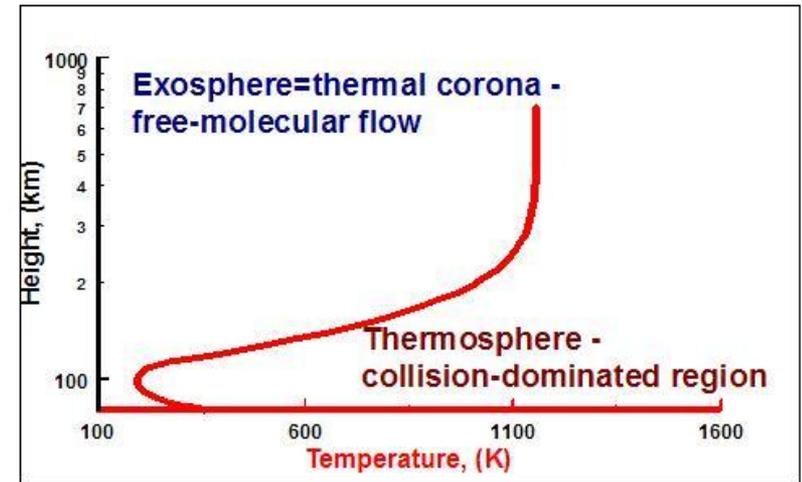


Верхняя атмосфера Земли – распределение по высоте

- Термодинамически открытая система – воздействие солнечного УФ излучения и плазмы солнечного ветра;
- Атмосферный газ находится в силовых полях – гравитационном и, возможно, магнитном полях;
- Режимы течения газа – от сплошной среды до свободномолекулярного.

Число Кнудсена = $\lambda(h)/H(h)$

100 km $Kn \ll 1$ $Kn \gg 1$ 500 km



Планетная атмосфера: описание

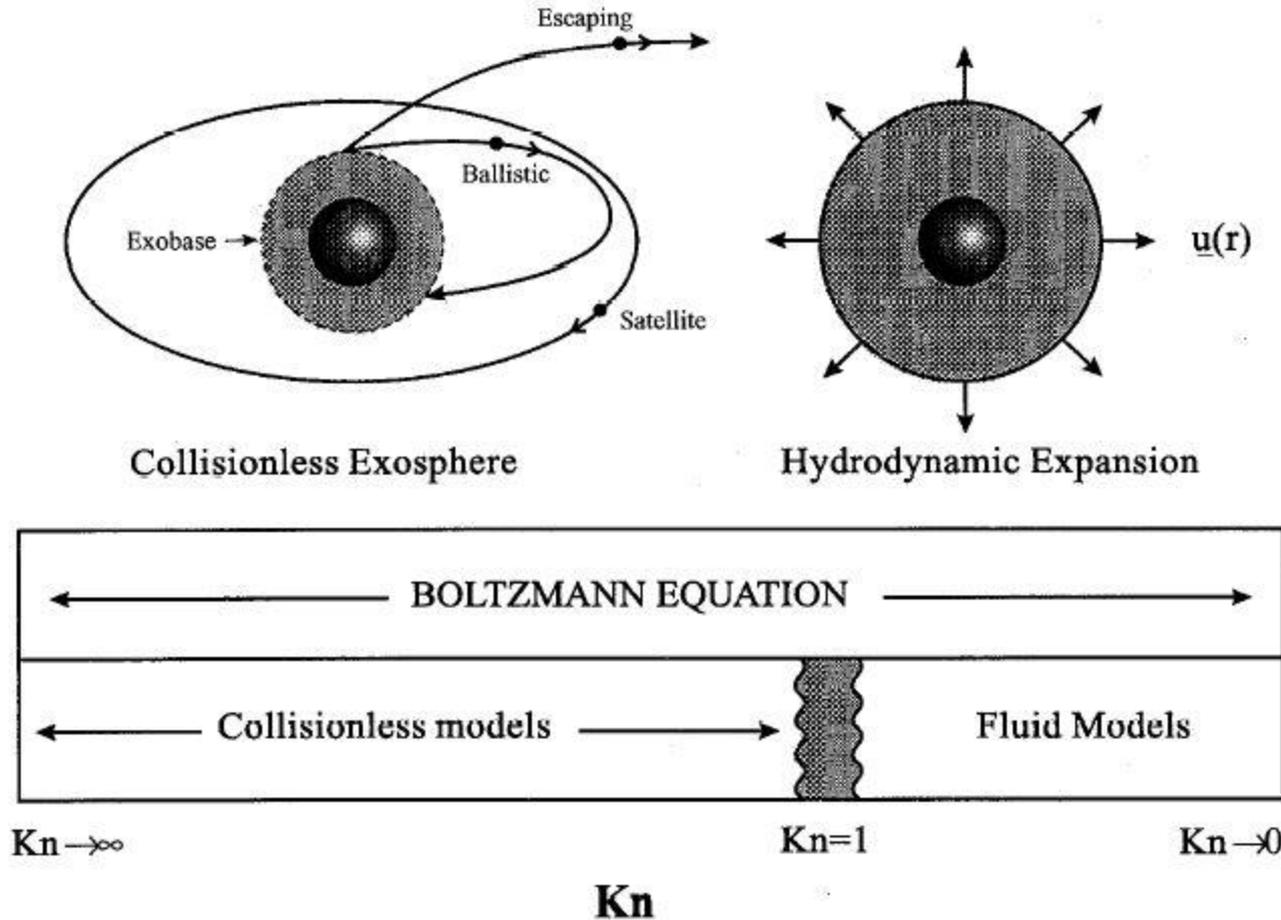


Figure 1. Regimes of validity for hydrodynamics and kinetic theory versus the Knudsen number, $Kn = l/H$. The hydrodynamic expansion of the atmosphere with radial velocity $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ is shown on the right. The collisionless exosphere [Chamberlain, 1963], characterized by different particle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

Горячая водородная корона Венеры

Холодная фракция –
тепловые атомы H со
средней энергией \approx
экзосферной
температуре
 $T=275$ К;

Горячая фракция -
надтепловые атомы H с
кинетической энергией
 ≈ 1020 К.

Надтепловые частицы –
 $E \geq (5-10) \times kT$

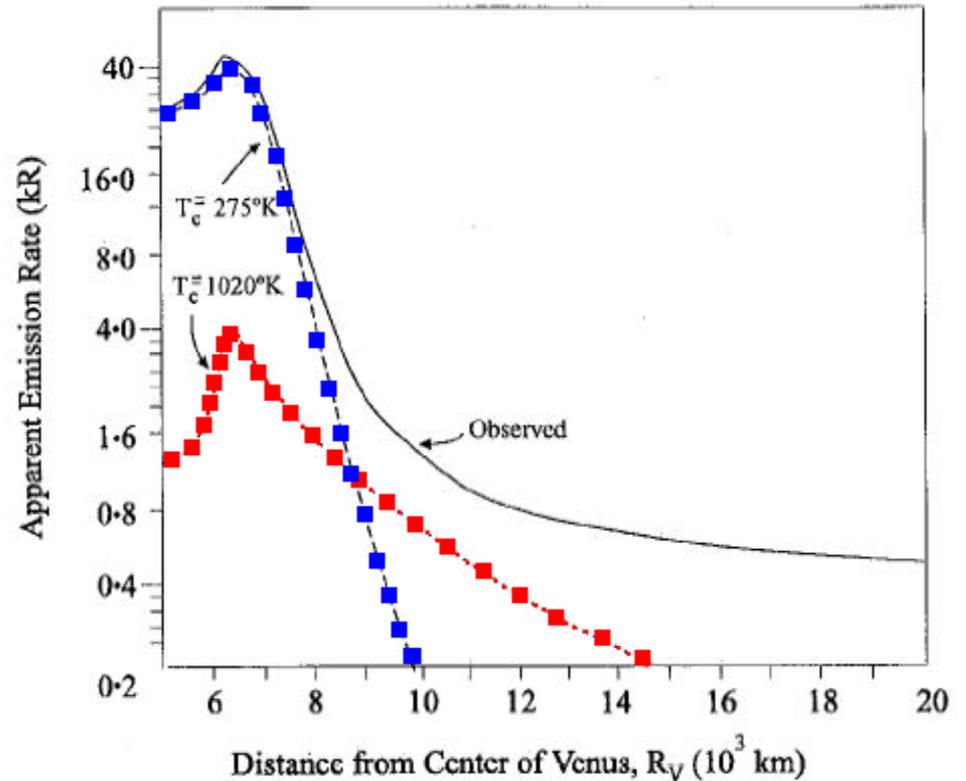
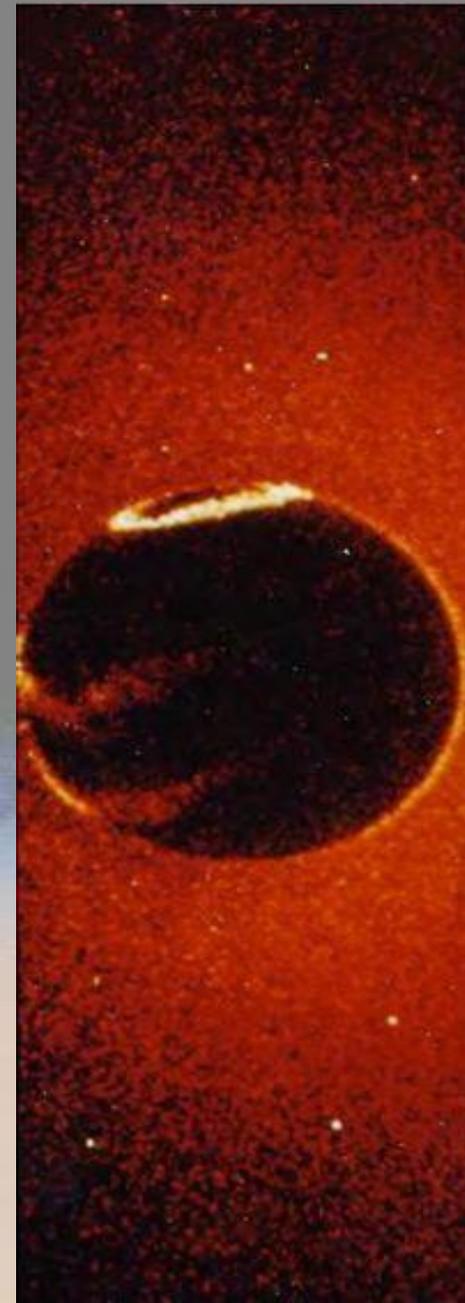


Figure 2. Dual hydrogen corona of Venus obtained by Mariner 5. The observed emission in kilorayleighs versus radial position is fitted to a thermal component at 275 K and a nonthermal component at 1020 K (adapted from Anderson [1976]).

Атмосферы: *диссипация атмосферы*

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).



Горячие атомарные короны Марса

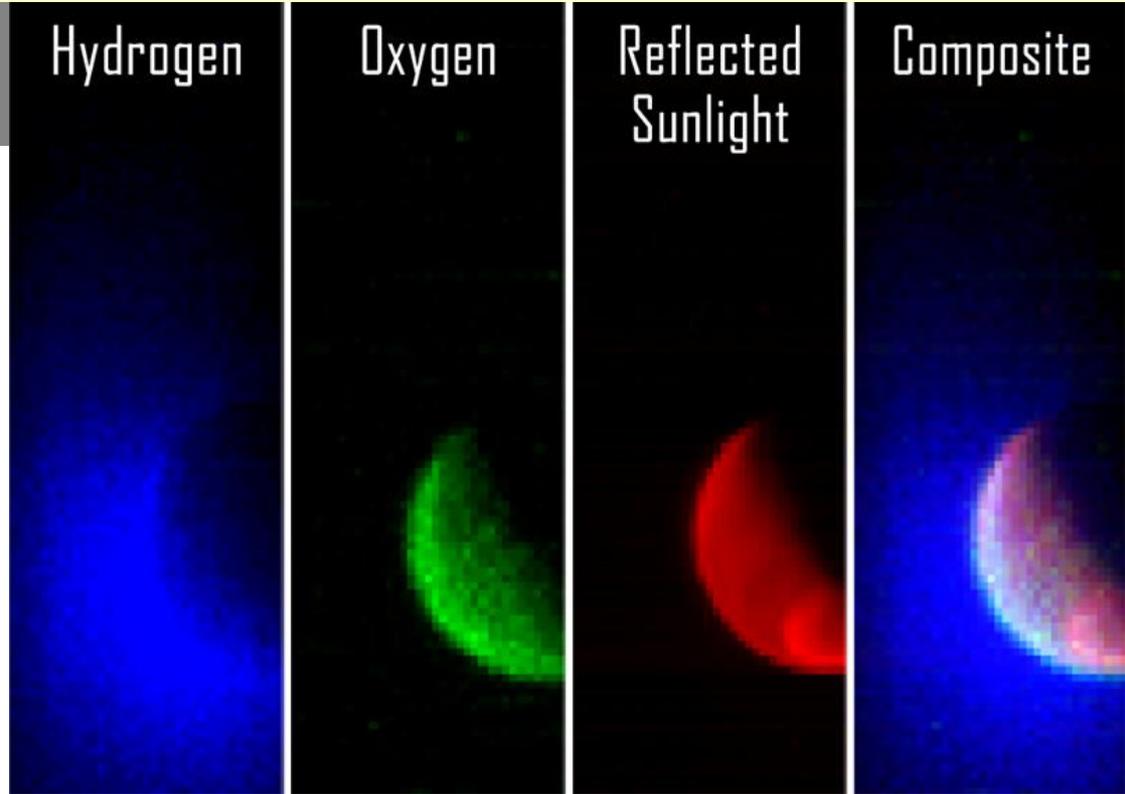
Hydrogen

Oxygen

Reflected
Sunlight

Composite

NASA's Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft has obtained its first observations of the extended upper atmosphere surrounding Mars with the Imaging UV Spectrograph (IUVS) instrument. The image shows the planet from an altitude of 36,500 km in three UV wavelength bands:



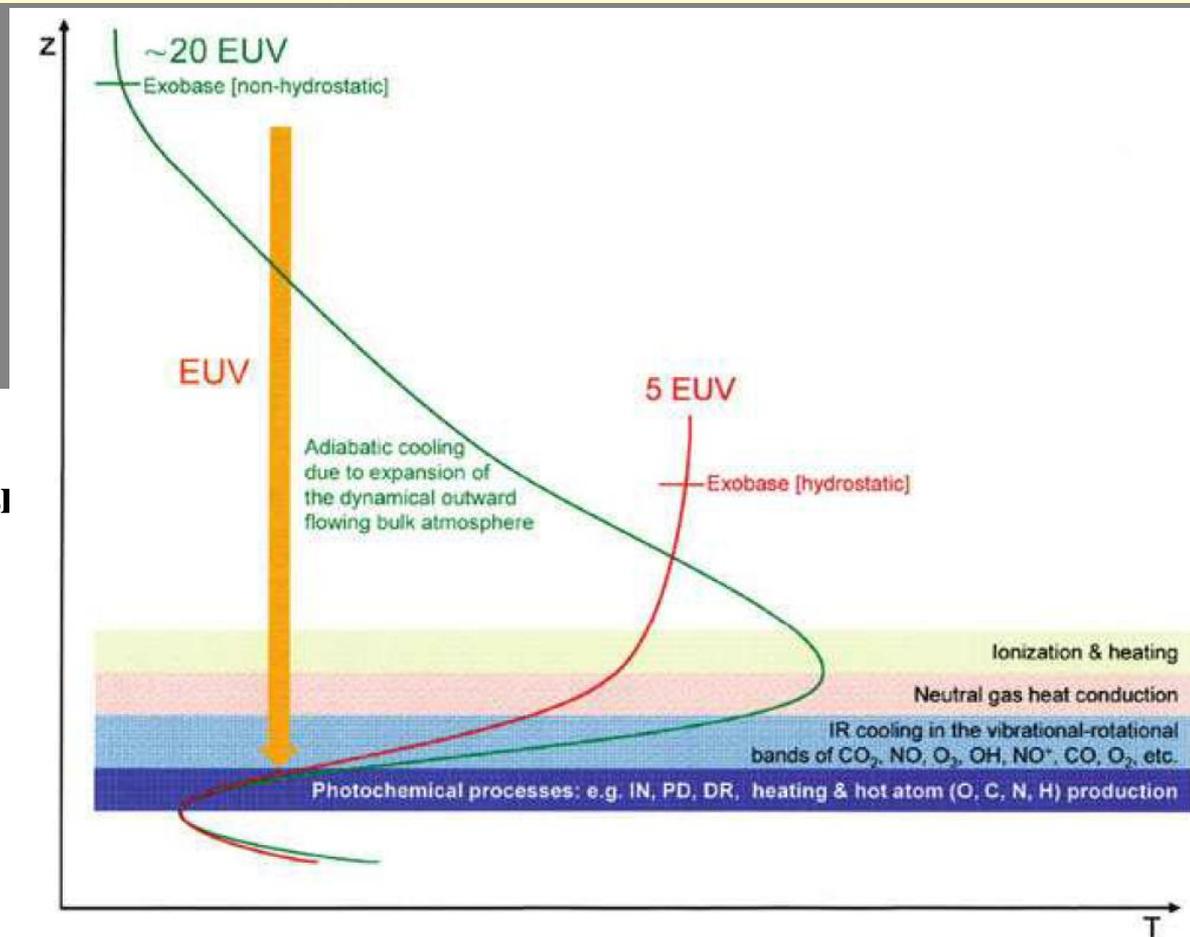
- Blue shows the UV light from the sun scattered from atomic hydrogen gas in an extended cloud that goes to thousands of kilometers above the planet's surface.

- Green shows a different UV wavelength light that is primarily sunlight reflected off of atomic oxygen, showing the smaller oxygen cloud.

- Red shows UV sunlight reflected from the planet's surface; the bright spot in the lower right is light reflected either from polar ice or clouds.

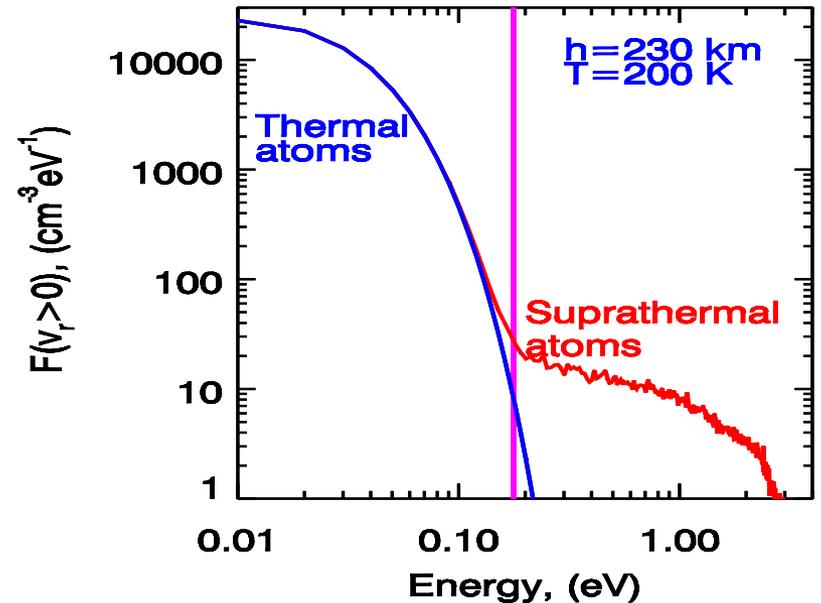
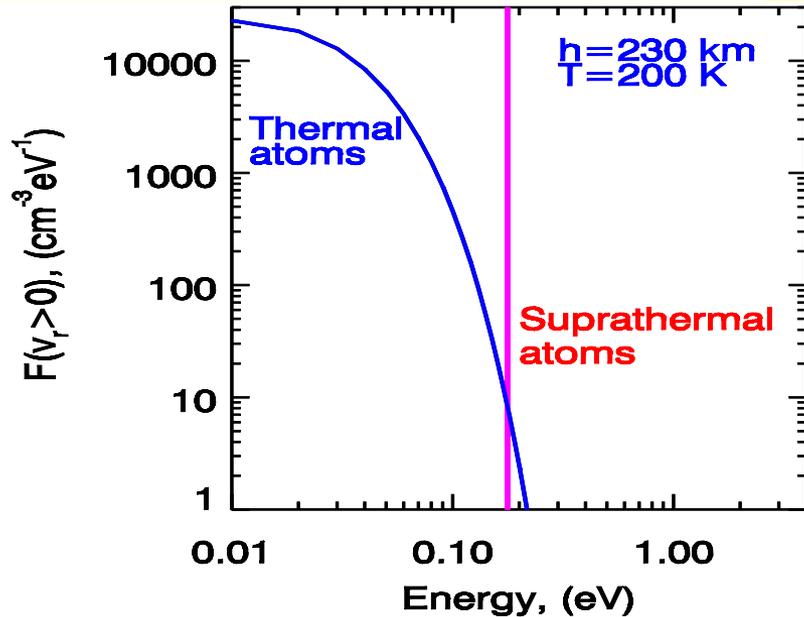
Атмосферы: *диссипация атмосферы*

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.



Горячие или надтепловые атомы

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.

Надтепловые частицы: *наблюдения*

Наблюдаемые проявления фракций надтепловых частиц в атмосфере:

- 1. приводят к локальным изменениям химического состава, так как неравновесные коэффициенты скорости химических реакций (особенно с высокими энергиями активации) между надтепловыми частицами и окружающим атмосферным газом намного выше, чем для химических реакций при тепловых энергиях;**
- 2. вызывают нетепловые атмосферные эмиссии;**
- 3. населяют горячие планетные короны и усиливают нетепловые атмосферные потери, определяя эволюцию атмосферы на астрономических масштабах времени.**

Горячие планетные короны

Горячие планетные короны образуются вследствие солнечного (или звездного) воздействия на планетную корону через процессы:

- экзотермической химии, инициируемой поглощением УФ излучения, - надтепловые атомы и молекулы с энергиями порядка нескольких эВ;**
- атмосферного разбрызгивания и перезарядки плазмой солнечного ветра и планетной магнитосферы – частицы с энергиями до сотен эВ.**

Горячие короны планет и спутников

Кислородная геокоорона (Yee et al. 1981; Hedin 1989; ..., Shematovich et al. 1994, 1999, 2005);

Н, С, О короны Марса и Венеры (Nagy & Cravens 1981; Ip 1988; Kim et al. 1998, Hodges 2000; ...);

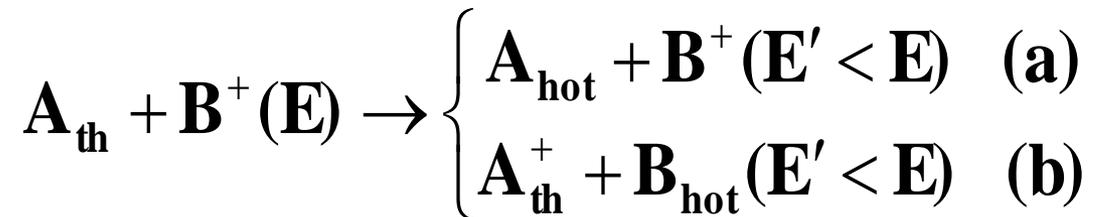
Кислородная корона Европы (Hall et al. 1995, 1998; Saur et al. 1998; Shematovich & Johnson 2001, Shematovich et al. 2005)

Азотная корона Титана (Shematovich et al. 2001, 2003; Michael et al. 2005; De LaHaye et al., 2007)

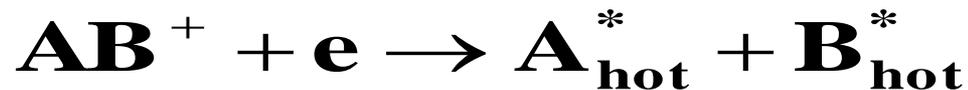
Надтепловые (горячие) частицы

Надтепловые частицы (т.е. частицы с кинетическими энергиями $E > 5 - 10$ кТ) образуются в нетепловых процессах:

- перезарядка и атмосферное разбрызгивание ионами с высокими энергиями*



- диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов;*
- диссоциация молекул; экзотермические химические реакции*



Кинетика надтепловых атомов:

Теряют избыточную энергию в упругих и неупругих столкновениях с окружающим атмосферным газом

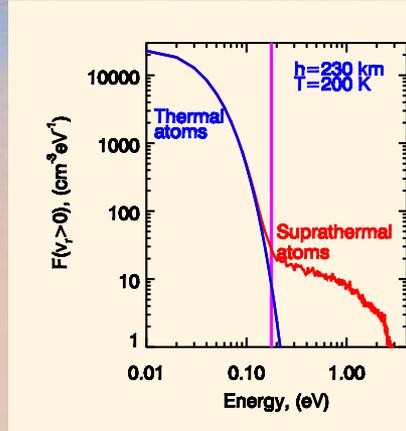


Эффективность переноса энергии от надтепловых частиц к тепловому газу существенно зависит от дифференциальных сечений рассеяния.

В случае $A = B$, возможно образование вторичных надтепловых частиц (с $E \gg kT$), столкновения которых с окружающим газом могут вызывать существенные отклонения от локального теплового равновесия.

Кинетические уравнения Больцмана:

Кинетика надтепловых атомов в разреженном атмосферном газе описывается на молекулярном уровне при помощи уравнений Больцмана с источниками горячих частиц



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 $G(\mathbf{r})$ 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.

Кинетические уравнения Больцмана :

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

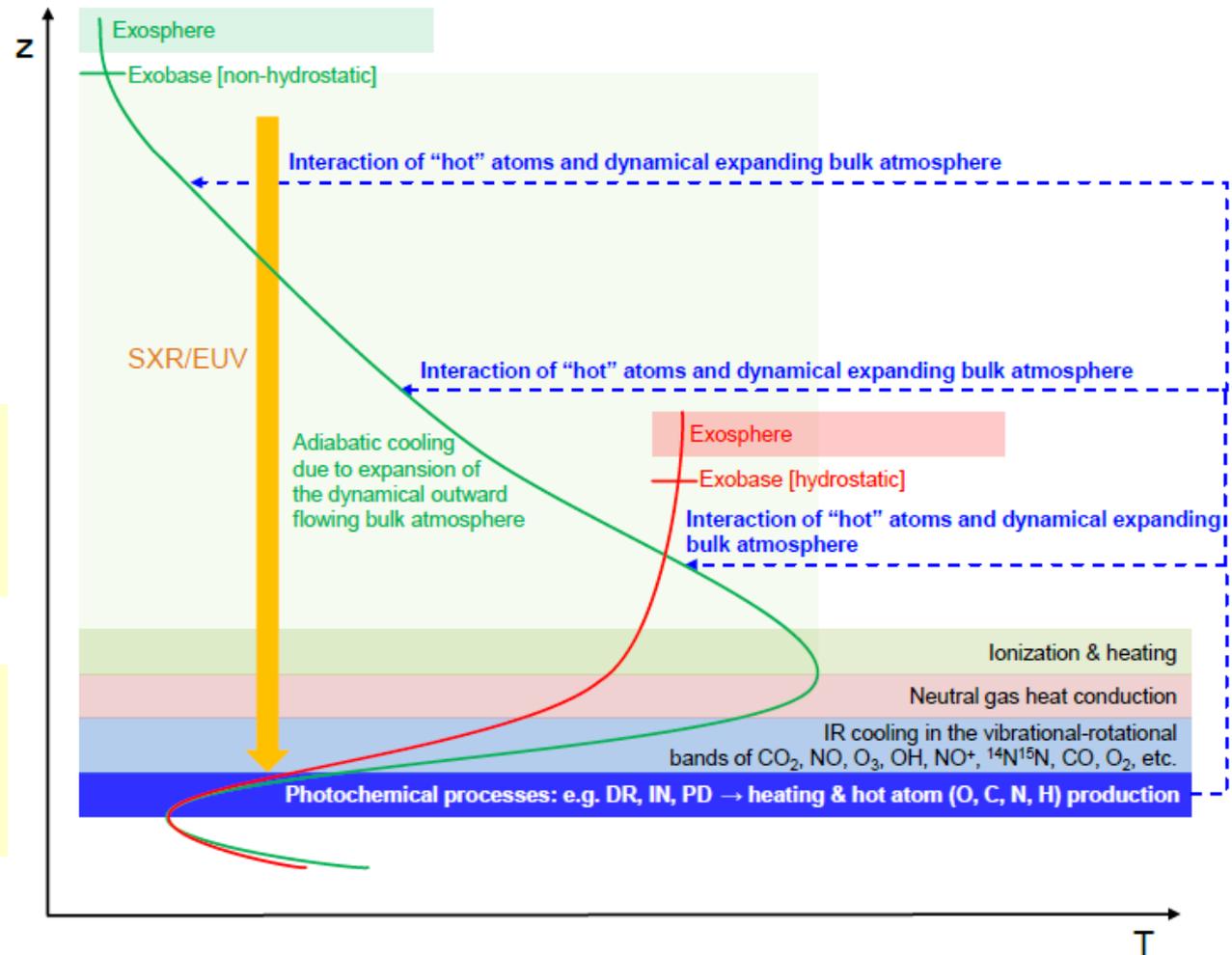


Transition region

$$J_\alpha \sim Q_\alpha$$

Collision-dominated

$$\text{region } J_\alpha \gg Q_\alpha$$



Метод Монте Карло прямого моделирования (DSMC):

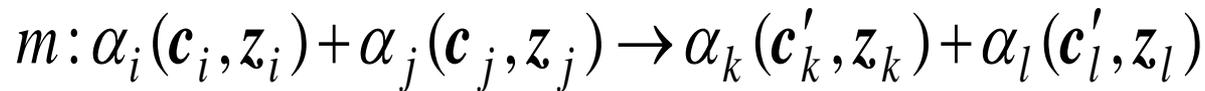
Стохастическая модель исследуемой кинетического объекта строится как последовательность следующих операций:

- а) атмосферный газ представляется системой из конечного числа модельных частиц;**
- б) определяется случайный процесс, описывающий изменения состояния заданного множества модельных частиц;**
- в) вероятностное описание численной модели задается при помощи управляющего уравнения, аппроксимирующего исходное кинетическое уравнение;**
- г) алгоритмическая реализация осуществляется при методов Монте Карло.**

Метод Монте Карло прямого моделирования (DSMC):

Особенности стохастической модели:

а) перечисляются все возможные в системе столкновительные процессы – упругие и неупругие столкновения, химические реакции и т.д.:

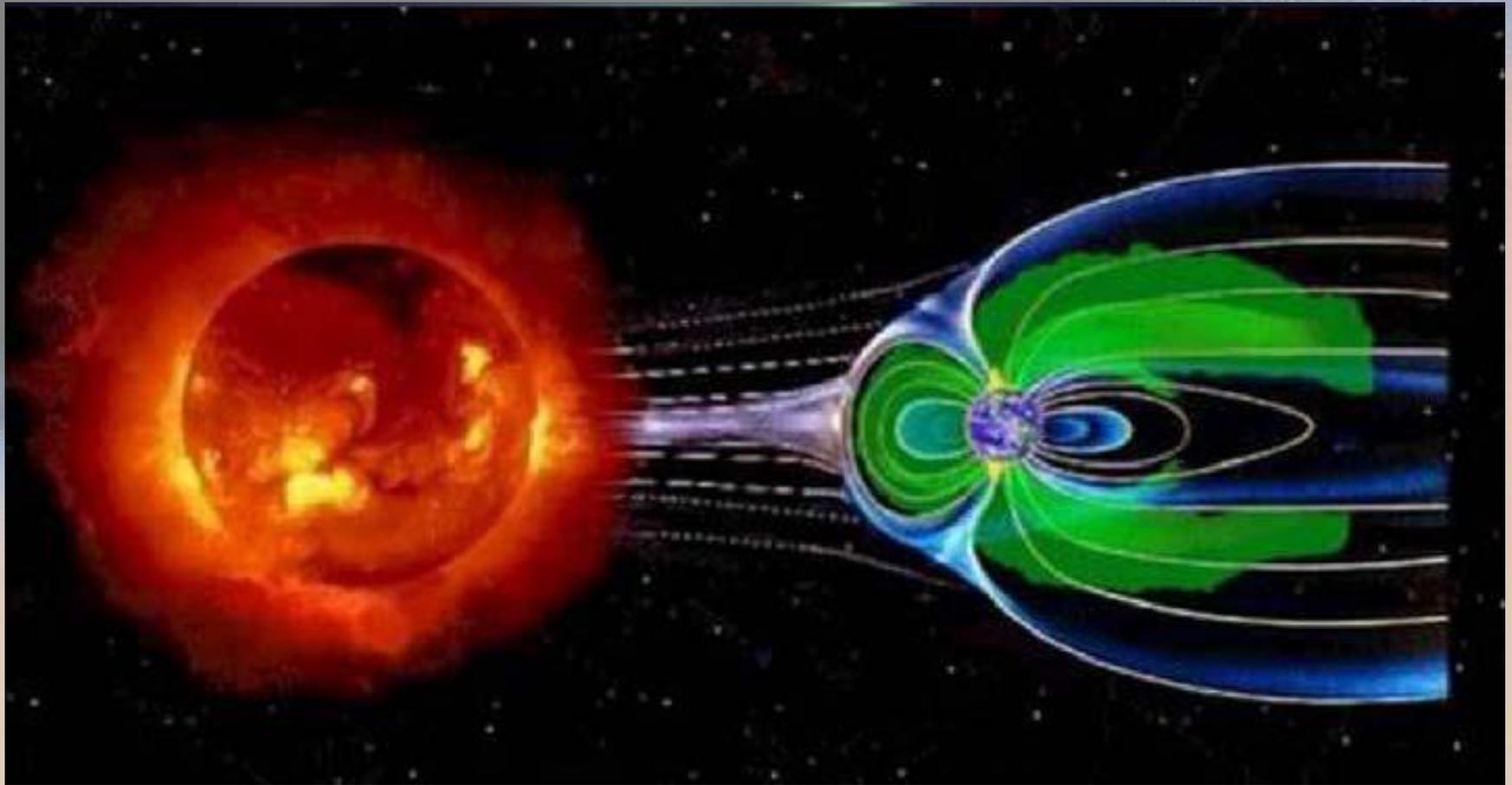


б) вероятности столкновений и скорости частиц после столкновения определяются с использованием функций рассеяния

$$g_{ij} d\sigma_m = |\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j| d\sigma_m(|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j|, \Omega) d\Omega$$

$$\sigma_m = \sigma_m^{(el)} + \sigma_m^{(in)} + \sigma_m^{(r)}$$

Источники надтепловых частиц в верхней атмосфере Земли: *атомарный кислород*



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *функции источников в уравнении Больцмана*

Функция источника горячих атомов кислорода в реакции диссоциативной рекомбинации:

$$Q_{Oh}(r, c) = k^{(dr)}(E) f_{Oh}^{(dr)}(r, c)$$

Включает:

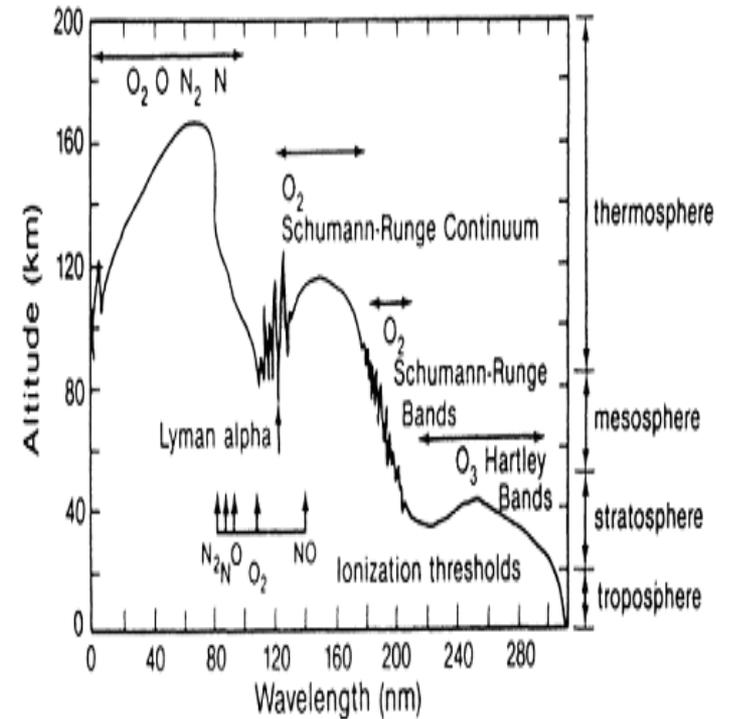
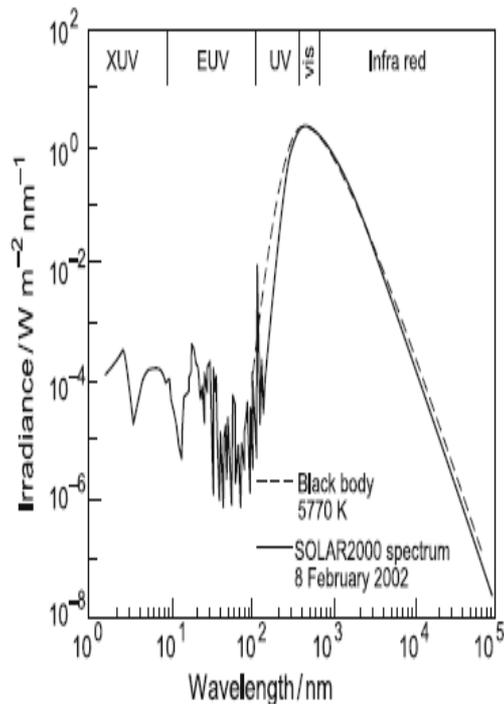
а) $k^{(dr)}(E) = \langle |c_{O_2^+} - c_e| \sigma^{(dr)}(E) \rangle$ - коэффициент

скорости диссоциативной рекомбинации;

б) $f_{Oh}^{(dr)}(r, c)$ - распределение свежих атомов по скорости.

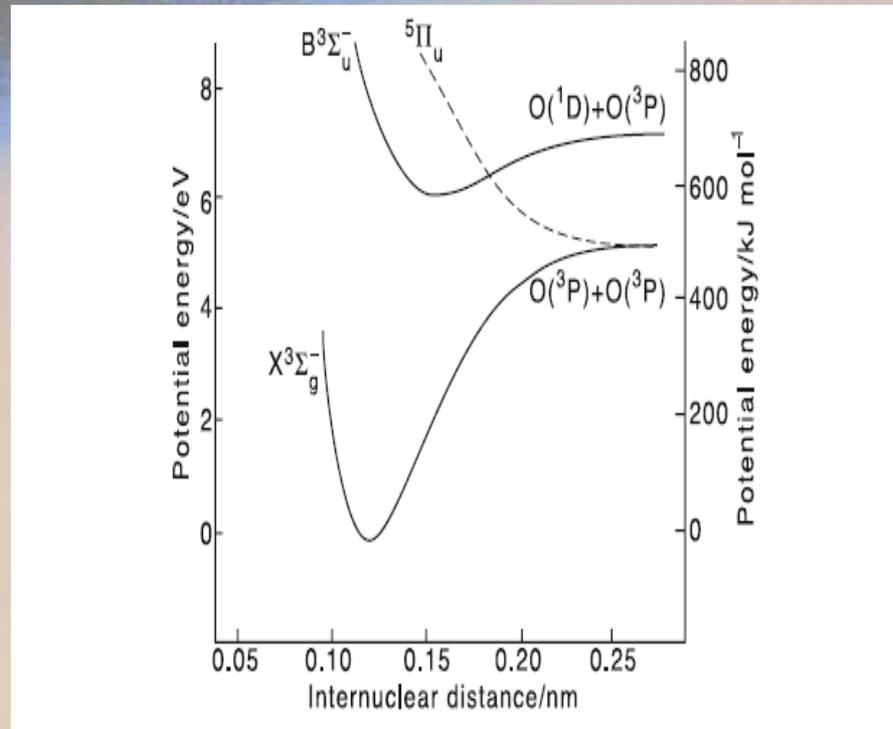
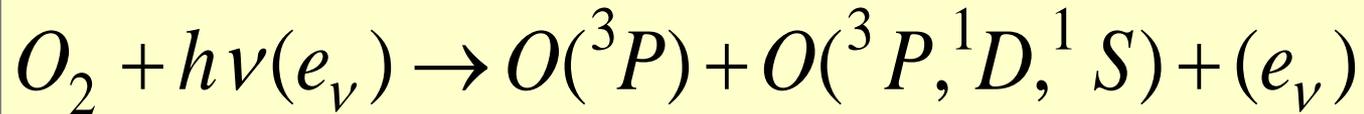
Надтепловой кислород в планетных атмосферах: *источники энергии*

- Солнечный поток УФ излучения

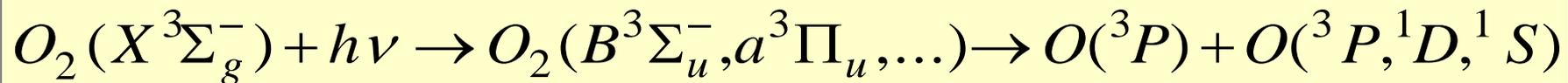


Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники*

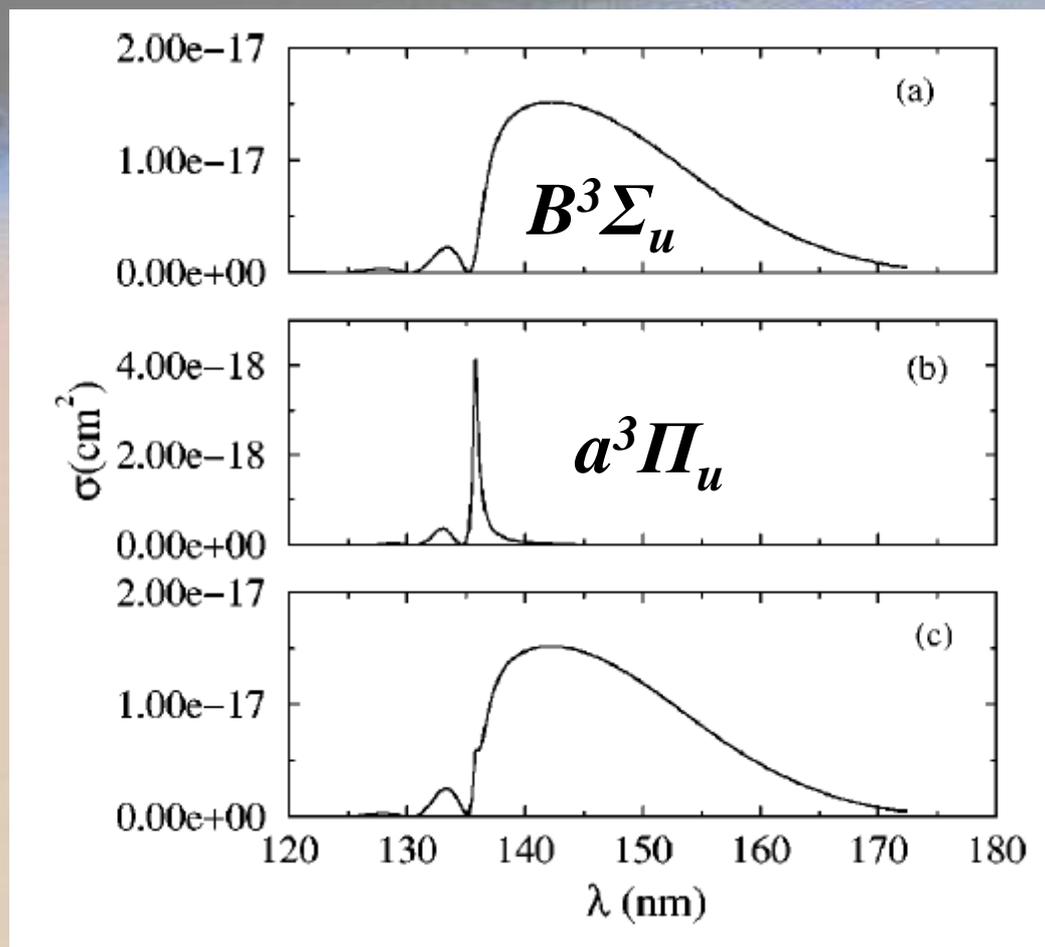
- O_2 диссоциация УФ-фотонами и электронами



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники - O2 диссоциация УФ-фотонами*

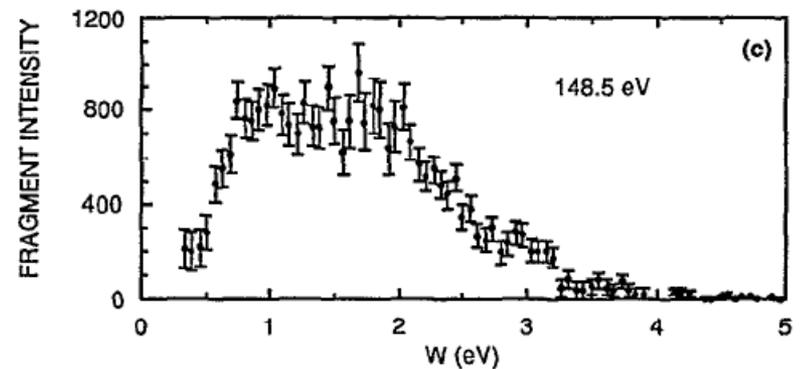
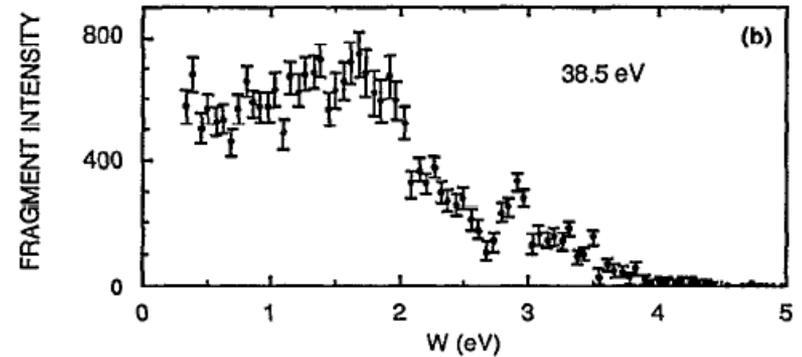
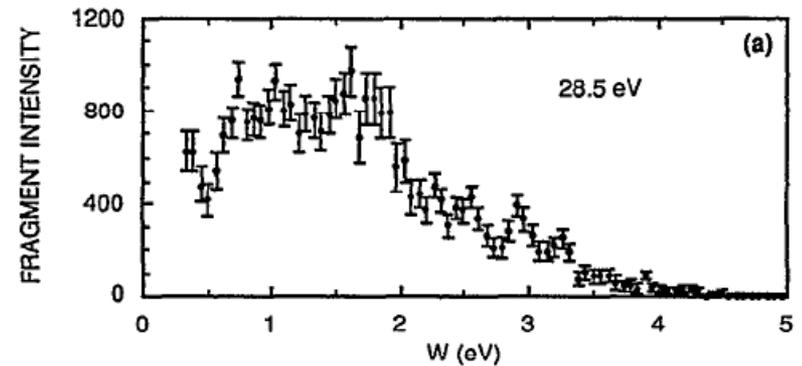
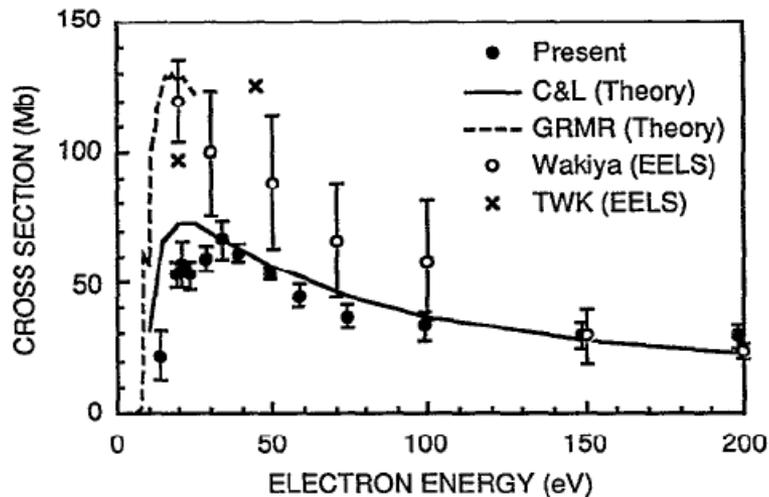


Сечения из
Balakrishnan et al.,
J. Chem. Phys., 2000)



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: Источники - O₂ диссоциация электронами

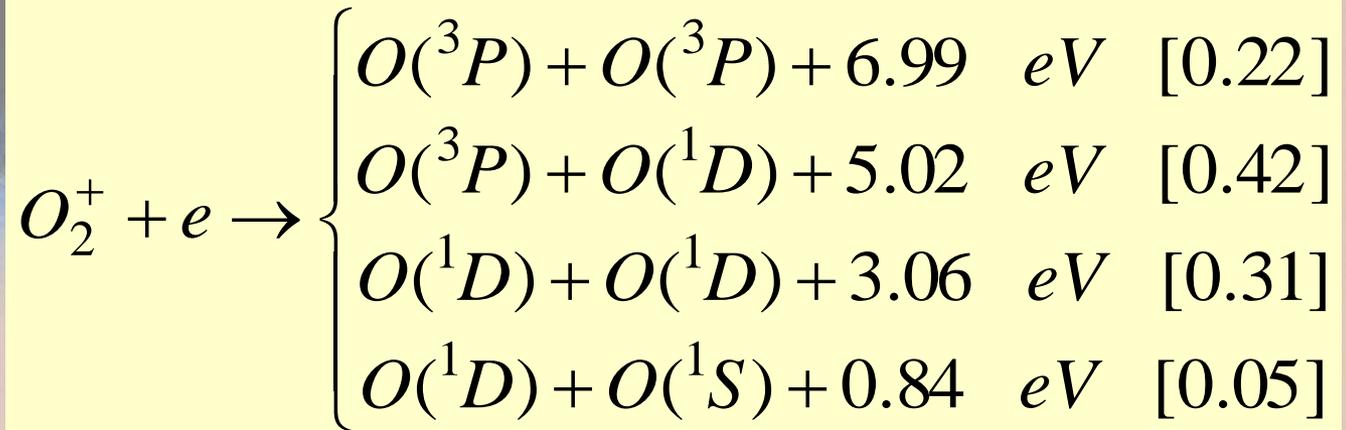
Сечение и распределение
продуктов по кинетической
энергии из (Cosby,
J. Chem. Phys., 1992).



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники*

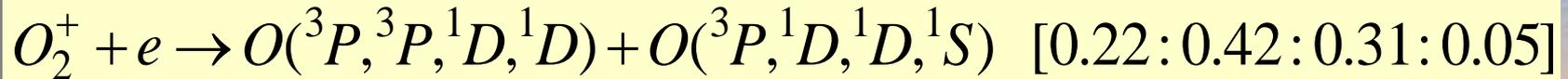
- Диссоциативная рекомбинация O_2^+

Каналы и квантовые выходы (Kella et al., *Science*, 1997):

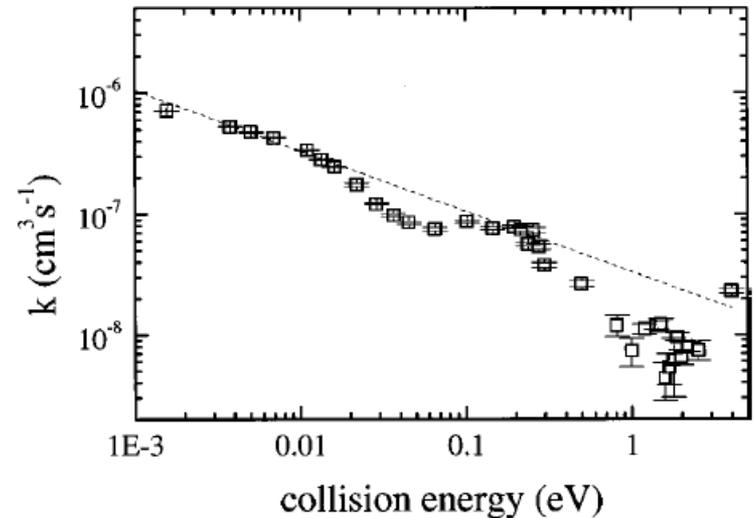
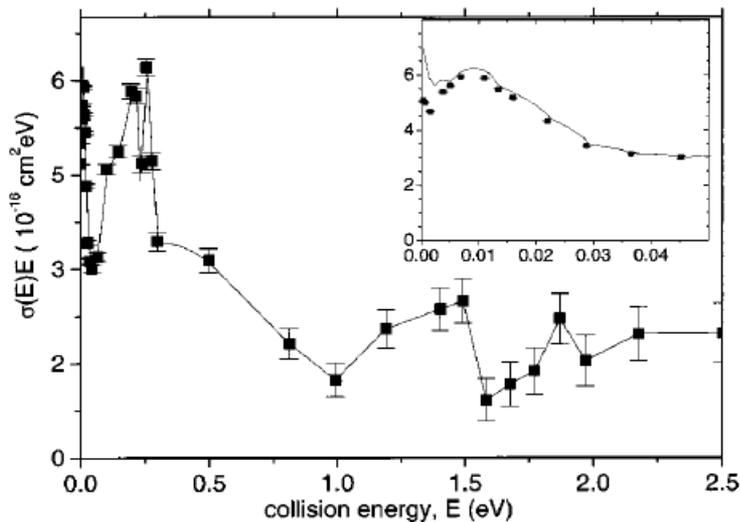


Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники*

- Диссоциативная рекомбинация O_2^+

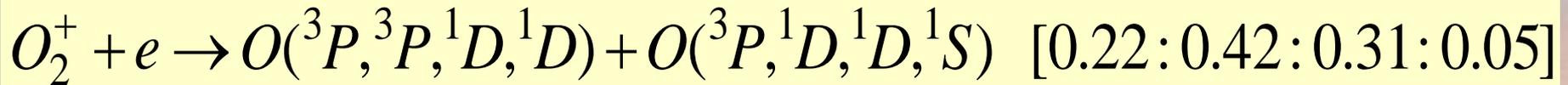


Сечение и коэффициент скорости в зависимости от энергии столкновения (Reverall et al., *J. Chem. Phys.*, 2001)

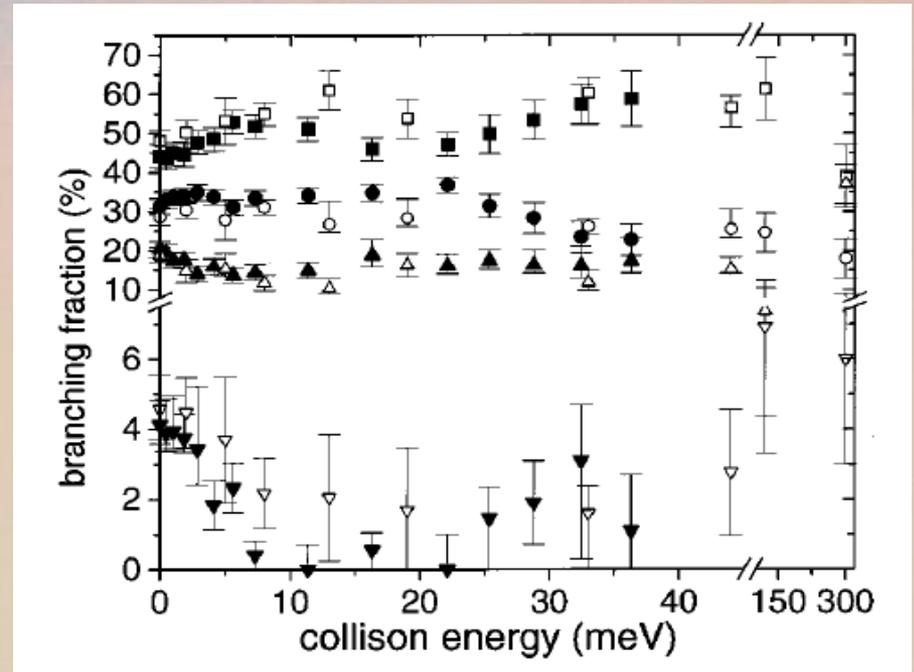


Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники*

- Диссоциативная рекомбинация O_2^+

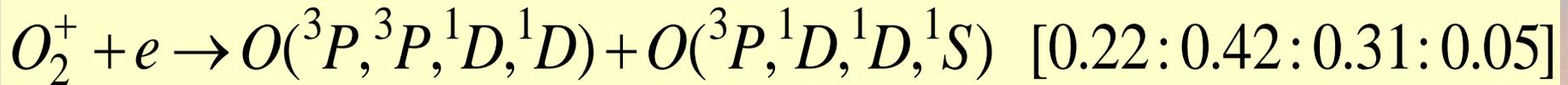


**Выходы каналов
в зависимости от энергии
столкновения (Reverall et al.,
J. Chem. Phys., 2001).**

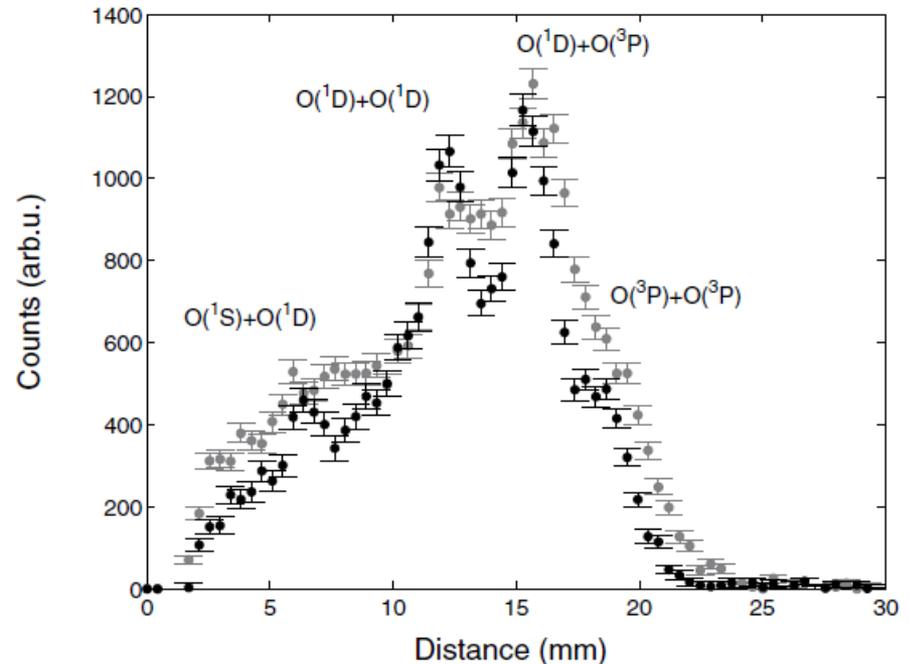


Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *источники*

- Диссоциативная рекомбинация O_2^+



**Выходы каналов
в зависимости от уровня
колебательного возбуждения
иона кислорода (Petrigiani et
al., J. Phys., 2005).**



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: химические источники

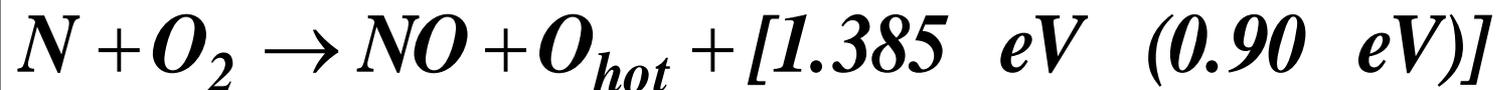
• Экзотермическая химия (Hickey et al., JGR, 1995)

Порядка 30 реакций, в которых образуются атомы кислорода с избыточными кинетическими энергиями 0.18 – 4.35 эВ

Table 1. Potential Sources of Hot Oxygen and Their Exothermicities (ΔE)

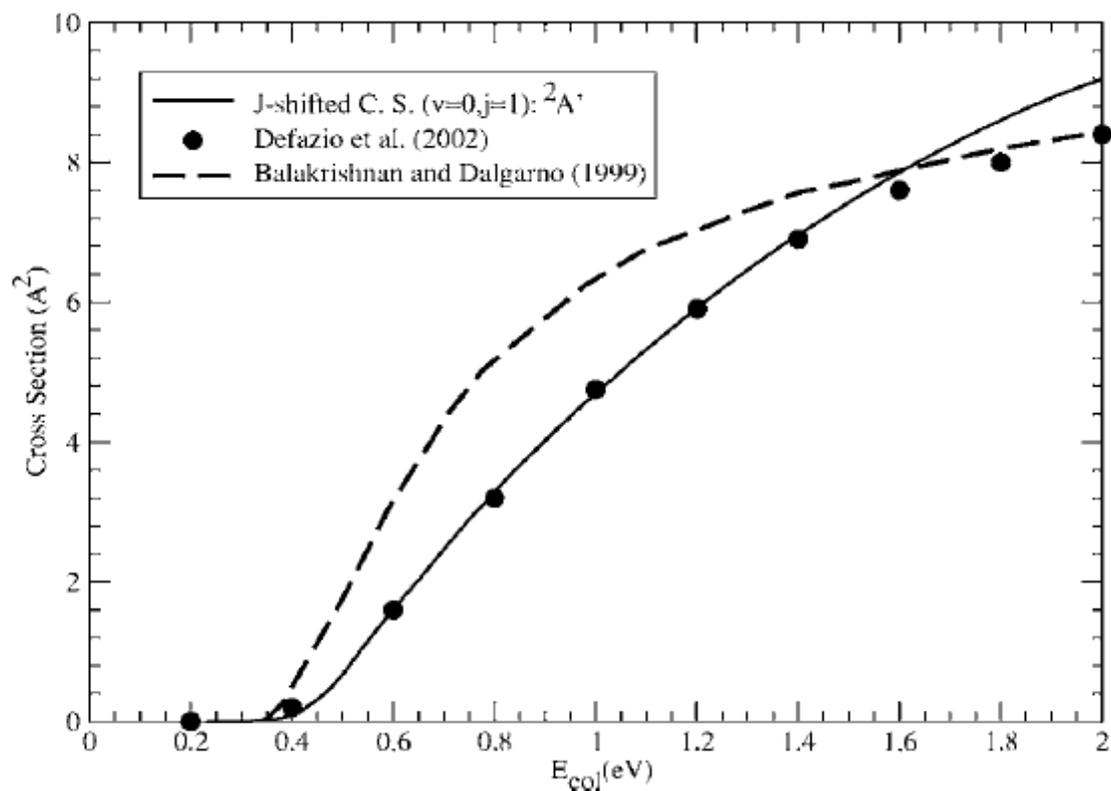
No.	Reaction	Reaction Rate ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	ΔE_{tot} (eV)	ΔE_{O} (eV)
(1)	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N}(^2D) + \text{O}$	$4.3 \times 10^{-7} (T/300)^{-1}$ (78%)	0.38	0.18
(2)	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$4.3 \times 10^{-7} (T^f/300)^{-1}$ (22%)	2.75	1.28
(3)	$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$1.6 \times 10^{-7} (300/T)^{0.55}$ (33%)	6.97	3.48
(4)	$\text{O}_2^{2+} + e \rightarrow \text{O}(^1D) + \text{O}$	$1.6 \times 10^{-7} (300/T^f)^{0.55}$ (21%)	5.02	2.51
(5)	$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O}(^1D) + \text{O}(^1D)$	$1.6 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.55}$ (42%)	3.05	1.52
(6)	$\text{O}^+ + \text{N}(^2D) \rightarrow \text{N}(^4S) + \text{O}$	$\sim 7 \times 10^{-13}$	2.38	1.11
(7)	$\text{O} + \text{O}(^1D) \rightarrow \text{O} + \text{O}$	8×10^{-12}	1.96	0.98
(8)	$\text{O} + \text{O}(^2P) \rightarrow \text{O}^+ + \text{O}$	4×10^{-10}	5.00	2.50
(9)	$\text{O} + \text{O}(^2D) \rightarrow \text{O}^+ + \text{O}$	5×10^{-12}	3.31	1.65
(10)	$\text{N}(^2D) + \text{O}^+ \rightarrow \text{N}^+ + \text{O}$	5×10^{-11}	1.46	0.68
(11)	$\text{O}_2 + \text{O}^+ \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$2.1 \times 10^{-11} \{T_n + 2T_i/3 \times 300\}^{-0.763}$	1.55	1.03
(12)	$\text{N}_2 + \text{O}(^2D) \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	8×10^{-10}	1.33	0.85
(13)	$\text{O}(^1D) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2.0 \times 10^{-11} \exp(107.8/T)$	1.31	0.84
(14)	$\text{N}(^2D) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	6×10^{-12}	3.76	2.45
(15)	$\text{N}(^2P) + \text{O} \rightarrow \text{N} + \text{O}$	1.7×10^{-11}	3.58	1.67
(16)	$\text{NO} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	3.4×10^{-11}	3.25	2.07
(17)	$\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	$4.4 \times 10^{-12} \exp(-3220/T)$	1.385	0.90
(18)	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	2×10^{-10}	6.67	4.35
(19)	$\text{O}(^2D) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	7×10^{-10}	4.865	3.24
(20)	$\text{O}(^2P) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	4.8×10^{-10}	3.02	1.92
(21)	$\text{O}(^1D) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	$2.9 \times 10^{-11} \exp(67.5/T)$	1.96	1.31
(22)	$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	1.2×10^{-10}	4.2	2.74
(23)	$\text{NO} + \text{N}(^2D) \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	7×10^{-11}	5.63	3.58
(24) - (27)	$\text{N}_2^*(v) + \text{O} \rightarrow \text{N}_2(v'=0) + \text{O}$	McNeal et al. [1974]	0.3v	0.19v

Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *химические источники*

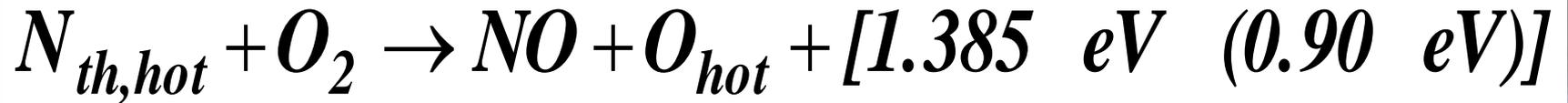


Энергетический
порог реакции
~0.3 эВ.

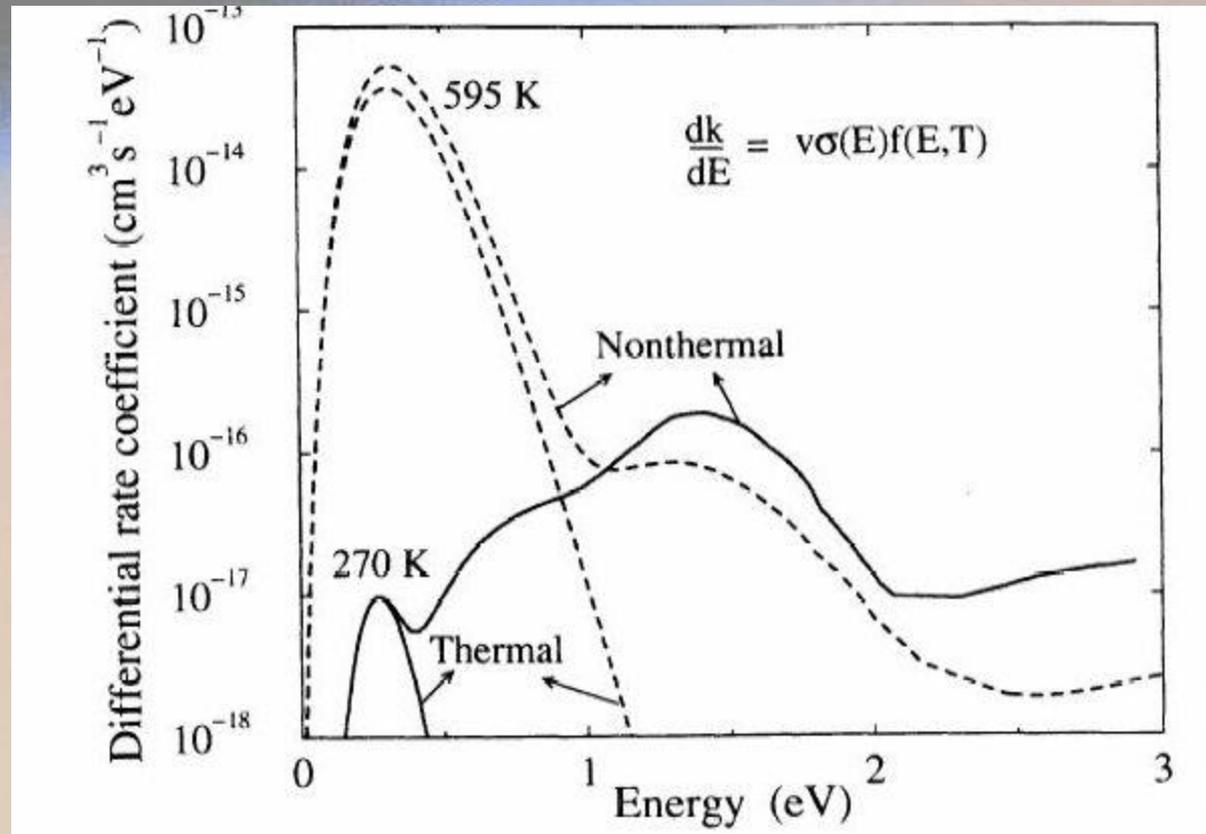
Сечение реакции в
зависимости от
энергии
столкновения
(Sultanov and
Balakrishnan,
J. Chem. Phys., 2006)



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *химические источники*

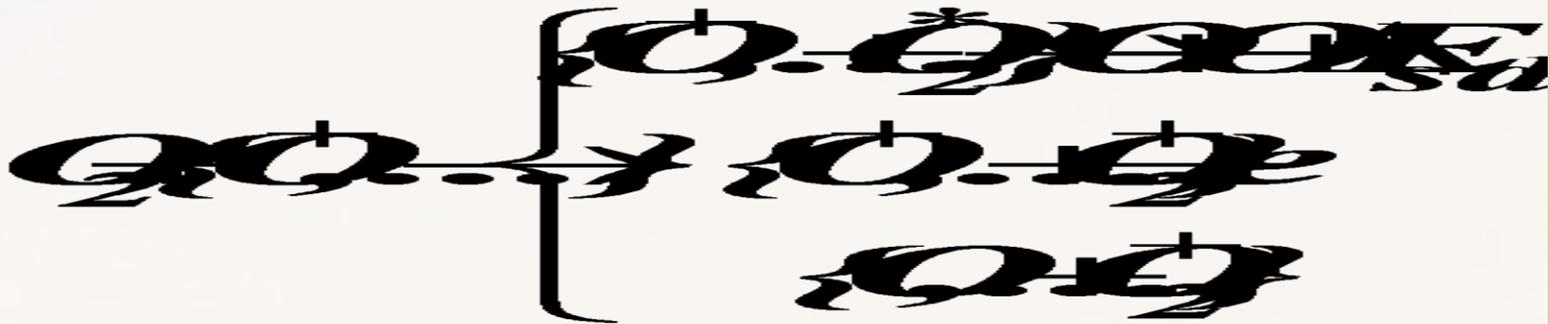
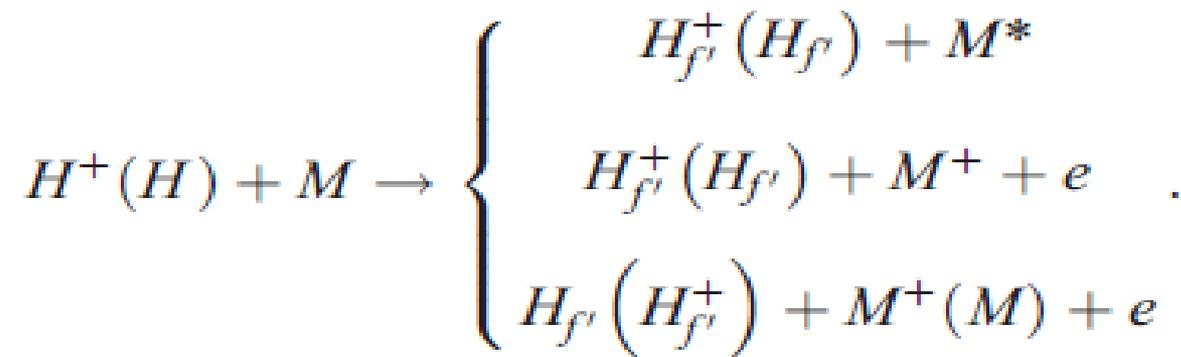


Дифференциальные
коэффициенты
скорости
(Balakrishnan et al.,
J.Geophys.Res., 1999)



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *атмосферное разбрызгивание*

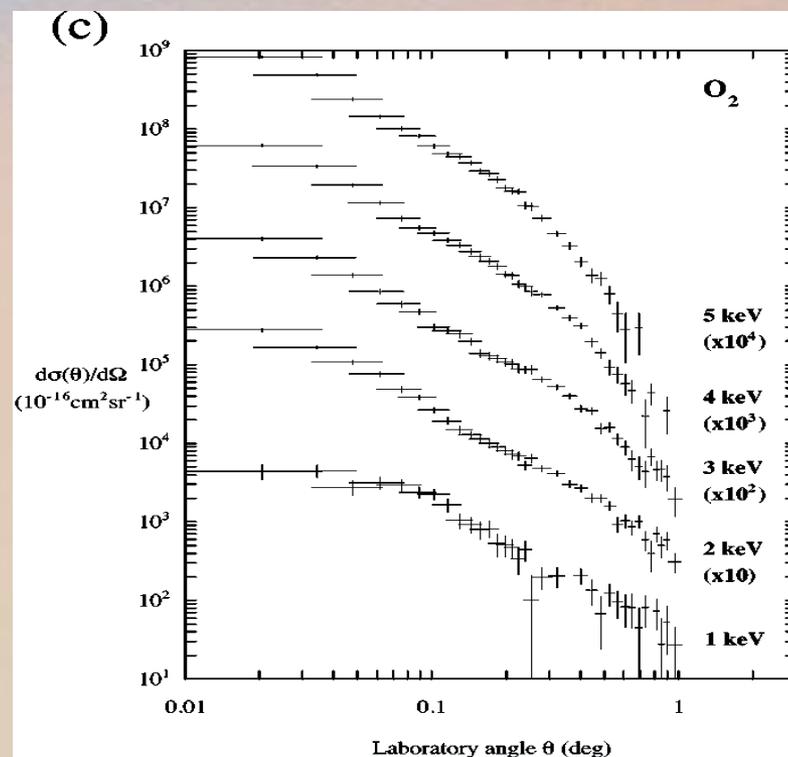
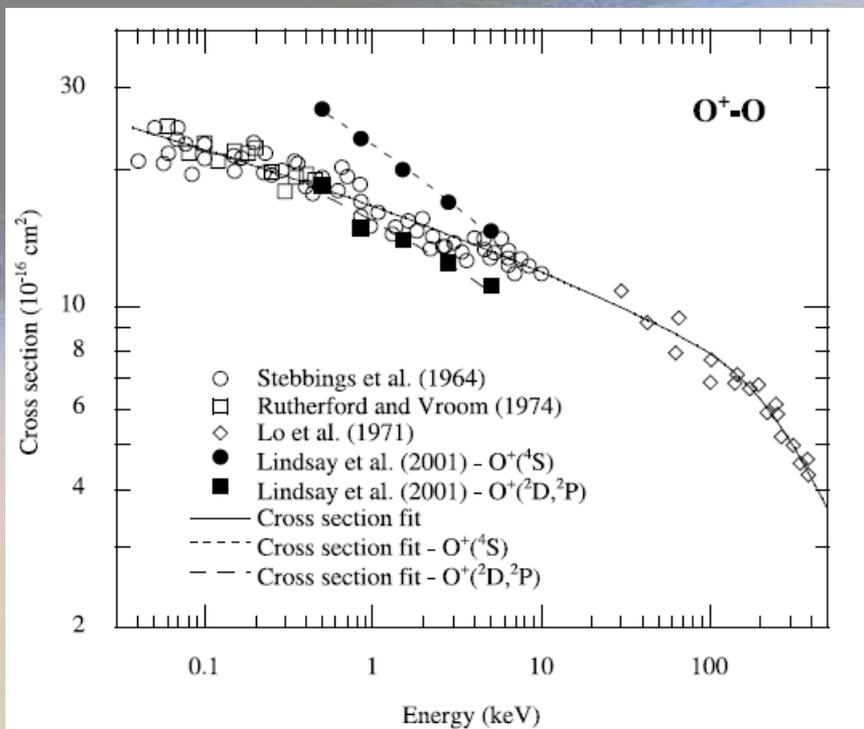
- Высыпание магнитосферных ионов (H^+ , O^+ , ...) с высокими кинетическими энергиями



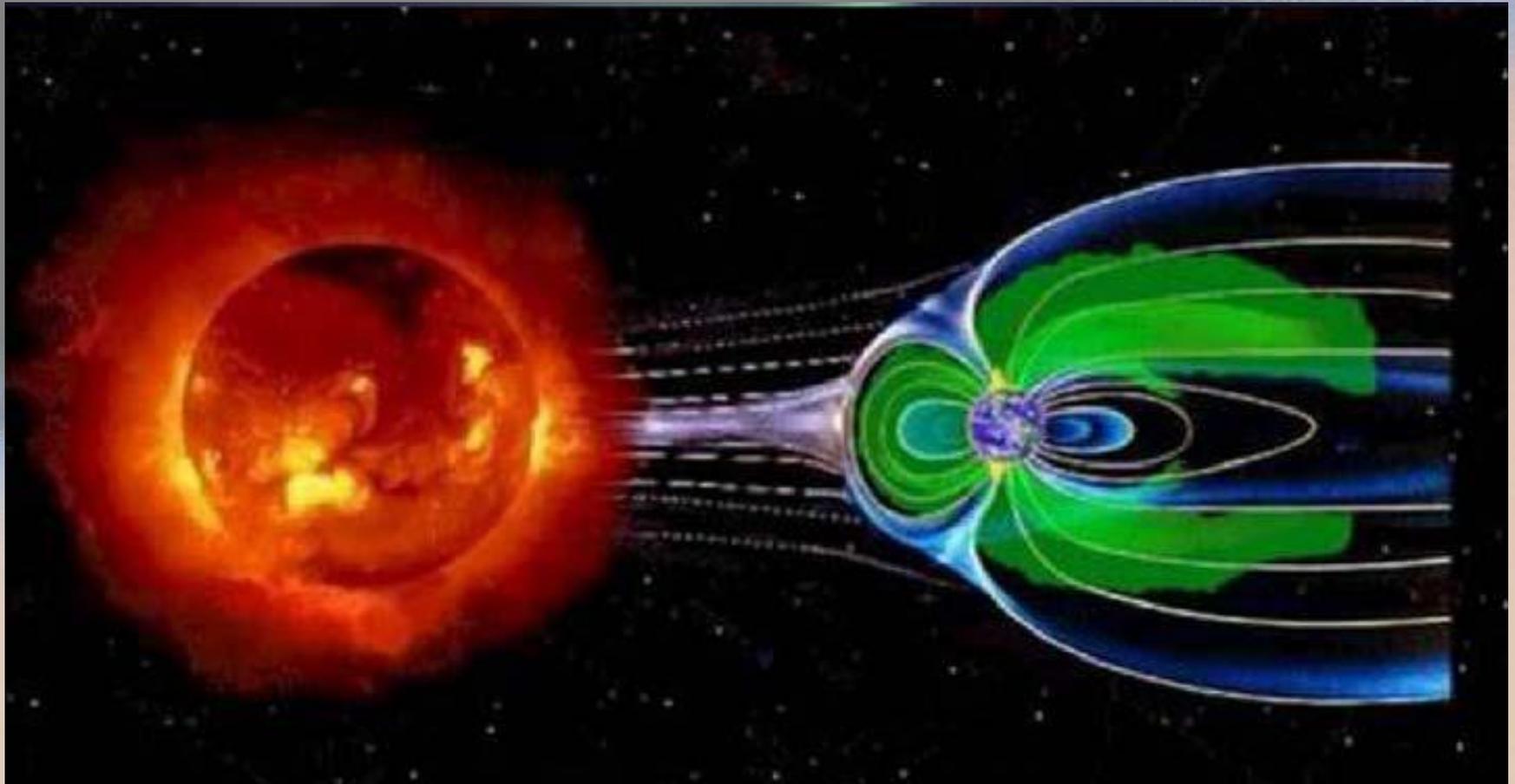
Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *атмосферное разбрызгивание*



Сечения обычно берутся из данных группы проф.
Стеббингса (Lindsay & Stebbings, J. Geophys. Res., (2005))



Надтепловой кислород в короне Земли: *Перенос энергии в солнечно-планетной системе*



Горячая кислородная геокоорона

Shematovich, V.I., Bisikalo, D.V., and Gerard, J.-C.

A kinetic model of the formation of the hot oxygen geocorona.

I. Quiet geomagnetic conditions.

J. Geophys. Res. 1994.

II. Influence of O⁺ ion precipitation.

J. Geophys. Res. 1995.

Gerard, J.-C., Richards, P.G., Shematovich, V.I., and Bisikalo, D.V.

The importance of new chemical sources for the hot oxygen geocorona.

Geophys. Res. Lett. 1995.

Shematovich V.I., Gerard J.-C., Bisikalo D.V., and Hubert B.

Thermalization of O(1D) atoms in the thermosphere.

J. Geophys. Res. 1999.

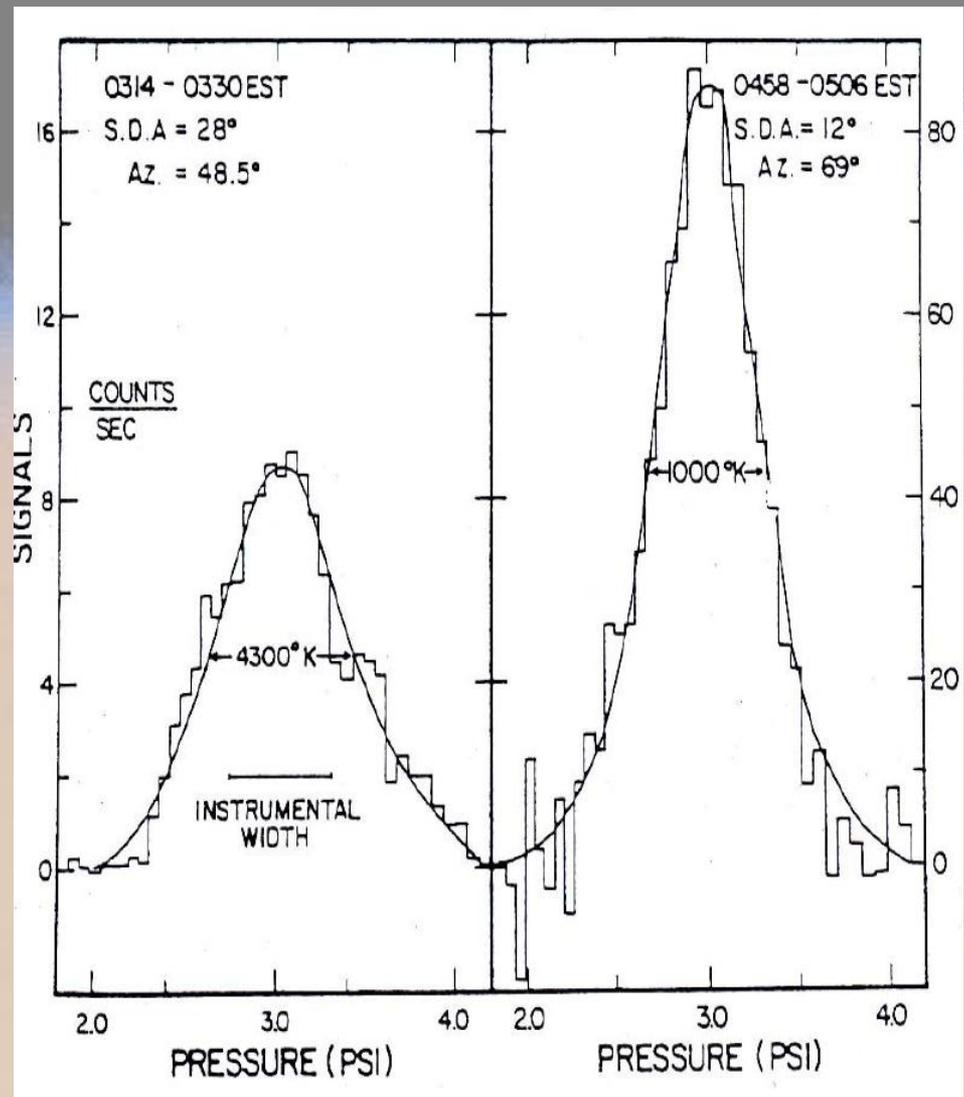
Shematovich V.I., Bisikalo D.V., and Gerard J.-C.

An auroral source of hot oxygen in the geocorona.

J. Geophys. Res., 111, 2006.

Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *наблюдения*

Наблюдения на ИСЗ свечения 73.3 нм O⁺ при интерферометра Фабри-Перо показали уширение линии, отвечающее эффективной температуре ~ 4300 К (Yee et al., J. Geophys.Res., 1980), в то время как температура окружающего атмосферного газа ~ 1000 К



Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *расчеты функций распределения (Shematovich et al., J. Geophys. Res., 1994;1999; 2005)*

Фотохимия приводит к заселению короны атомами O с $E < 10$ eV

O⁺ высыпание – горячими атомами O с $E < 10^3$ eV

Однако, высыпание ионов O⁺ наблюдается лишь при экстремально высокой солнечной активности!!!

Экзотермическая фотохимия

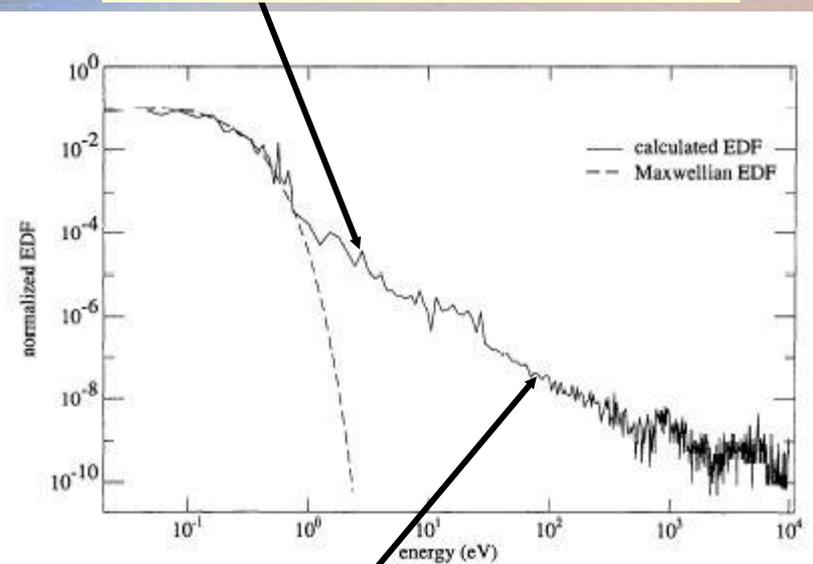


Figure 1. Energy distribution functions (EDF) for atomic oxygen in the transition region at 500 km. The solid line shows the calculated distribution and the dashed line represents the local Maxwellian distribution function ($T = 1170$ K).

O⁺ высыпание

Надтепловой кислород в атмосфере Земли: *Распределение по высоте*

Надтепловые атомы O

Тепловой O ~ 1110 К;
Надтепловой O ~ 4500 К.
Различие в характерных
шкалах подтверждено в
наблюдениях, см. например,
(Hedin, J. Geophys. Res., 1989)

Тепловые атомы O
из хвоста распределения
Максвелла с $E > 0.3$ эВ

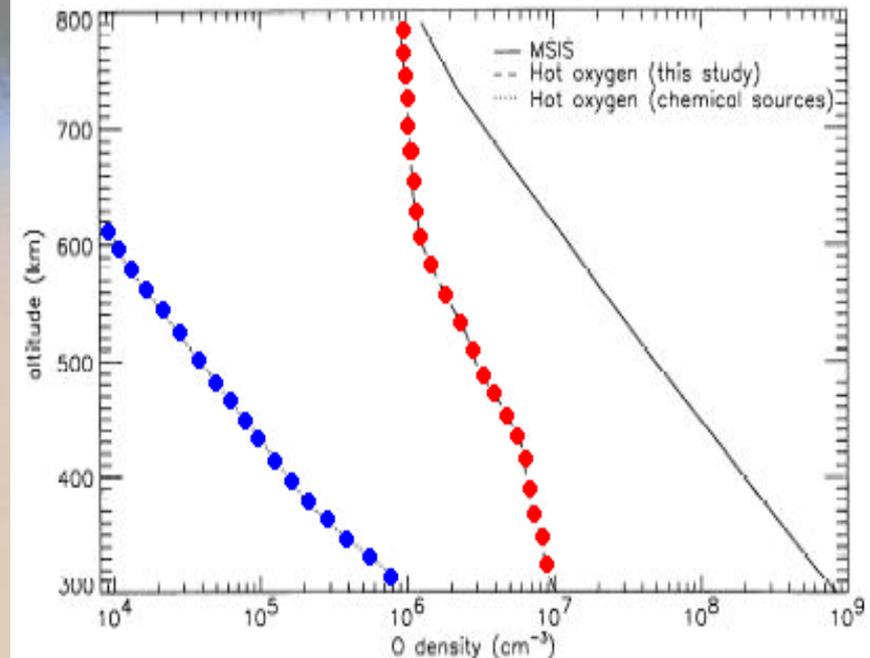


Figure 4. Vertical profiles of the hot and thermal fractions of atomic oxygen in the transition region. The dashed line is the hot fraction and the solid line is the MSIS density profile of thermal oxygen. For comparison, the hot O density produced by chemical sources (paper 1) (dotted line) is also presented.

Надтепловые атомы кислорода в состоянии $O(^1D)$: функции распределения

В модели учитывалась лишь экзотермическая химия метастабильного состояния $O(^1D)$ (Shematovich et al., J. Geophys. Res., 1999).

Энергия состояния $O(^1D)$ — 1.97 эВ. Время жизни — 110 с. Свечение 630 нм используется для оценки температуры атмосферы.

Расчеты выполнены для высот выше 200 км.

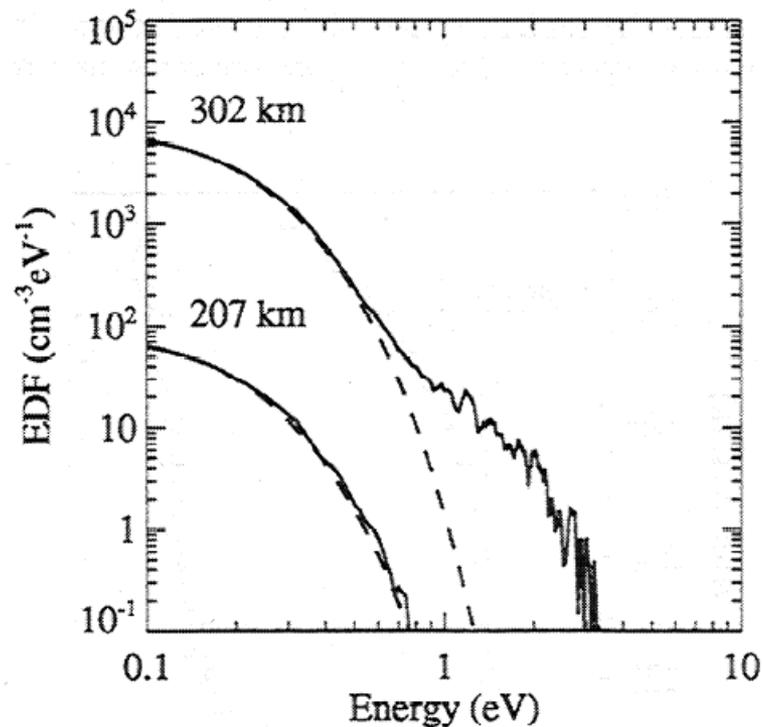


Figure 2. Energy distribution function of $O(^1D)$ atoms calculated at two altitudes with the stochastic Monte Carlo method for nighttime high solar activity conditions. The local Maxwellian distributions at the temperature of the background gas are also shown for comparison (dashed lines).

Надтепловые атомы кислорода в состоянии $O(^1D)$ в верхней атмосфере Земли: *оценки температуры*

Оценки температуры газа в верхней атмосфере с использованием расчетных функций распределения тепловых и надтепловых атомов кислорода O :

- линии MSIS – по данным эмпирических моделей;
 - линии Calc – по расчетным ФР надтеплого кислорода в состоянии $O(^1D)$
- (Shematovich et al., JGR 1999).

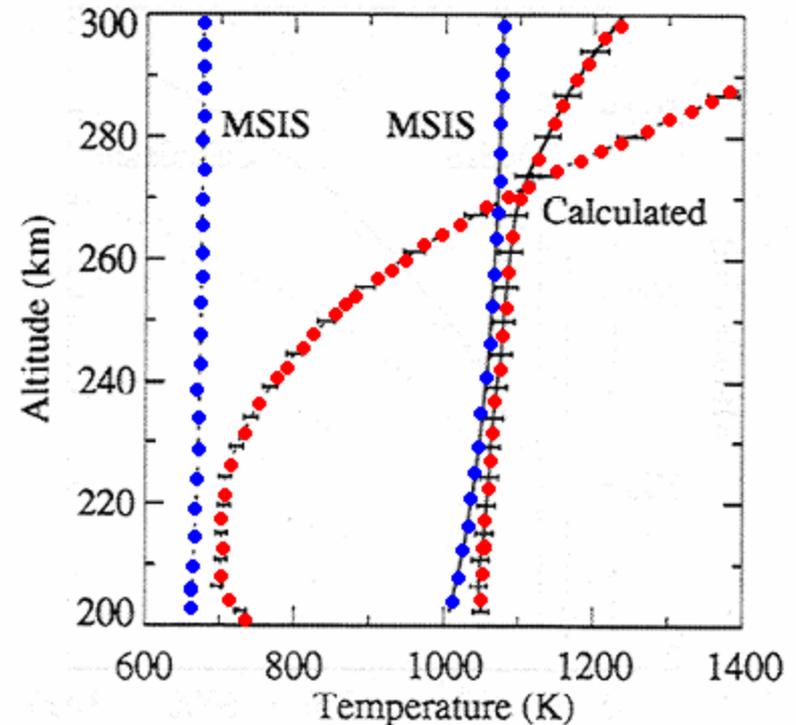


Figure 4. Detailed view of the temperature distribution shown in Figure 3 illustrating the persistence of an excess $O(^1D)$ temperature below 300 km. The error bars show the estimated statistical errors in the temperature calculations.

Наблюдения энергетичных нейтральных атомов (ЭНА) в геокороне: *инструмент LENA IMAGE*

Верхняя атмосфера Земли

является обильным источником ЭНА:

Слабо меняющийся источник —

горячая химическая корона;

Сильно меняющийся источник —

высыпание протонов в полярном овале.

Wilson et al., JGR 2003;

Wilson and Moore, JGR, 2005.

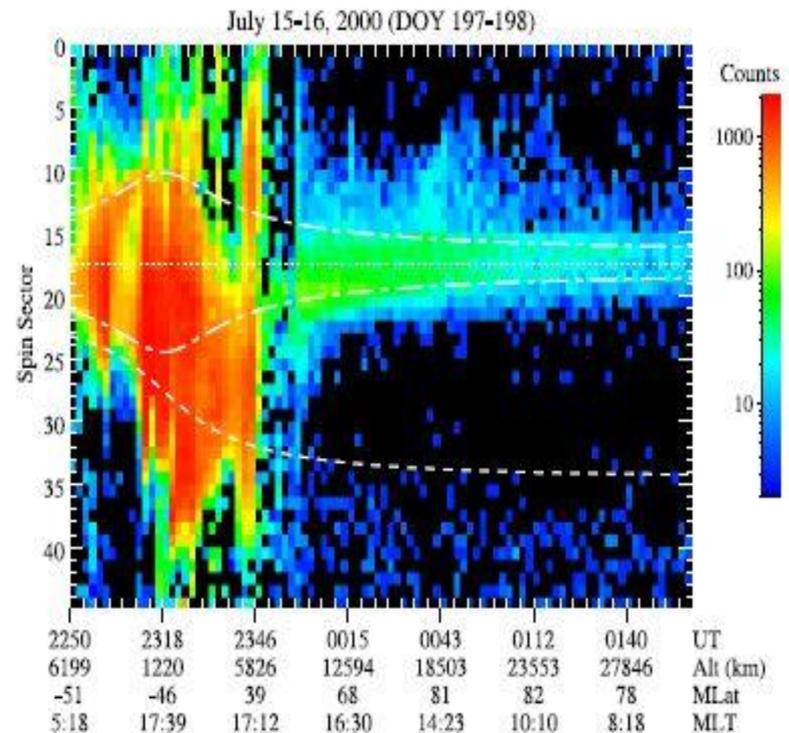
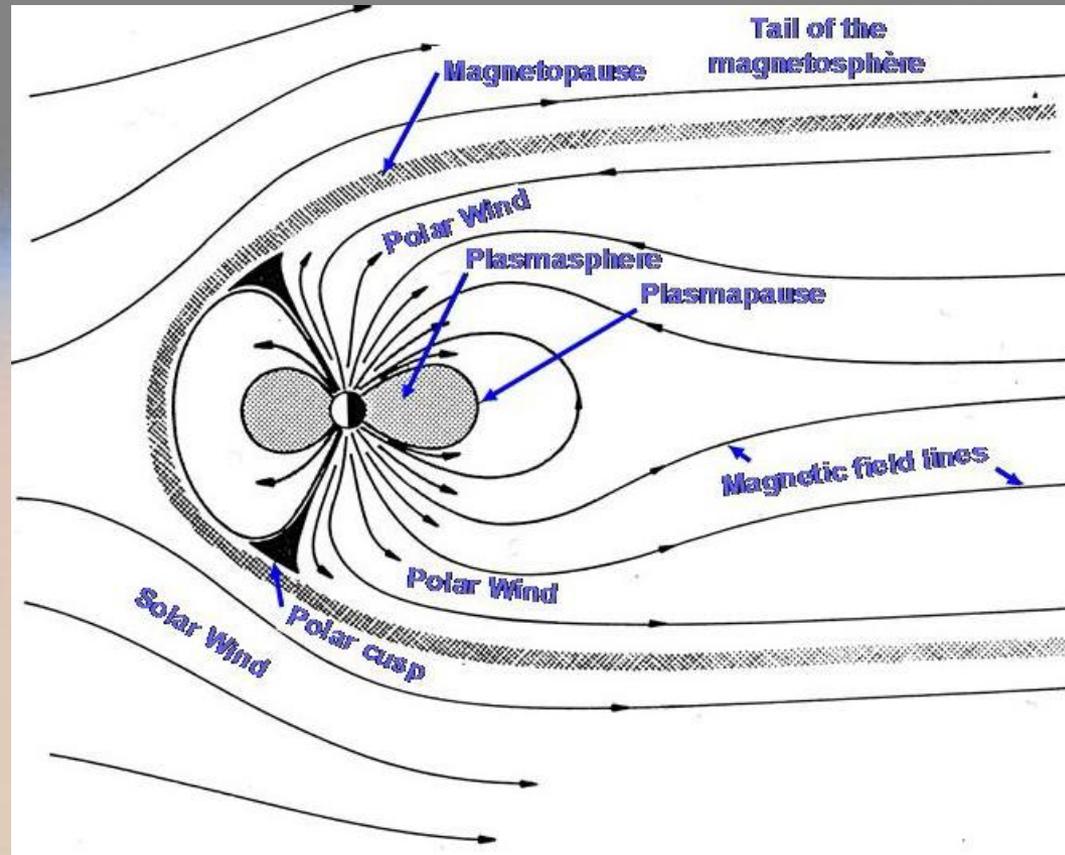


Figure 3. Spin time LENA spectrograms for the second perigee pass of 15 July 2000. The format is the same as Figure 1.

Околоземное космическое пространство: *магнитосфера*

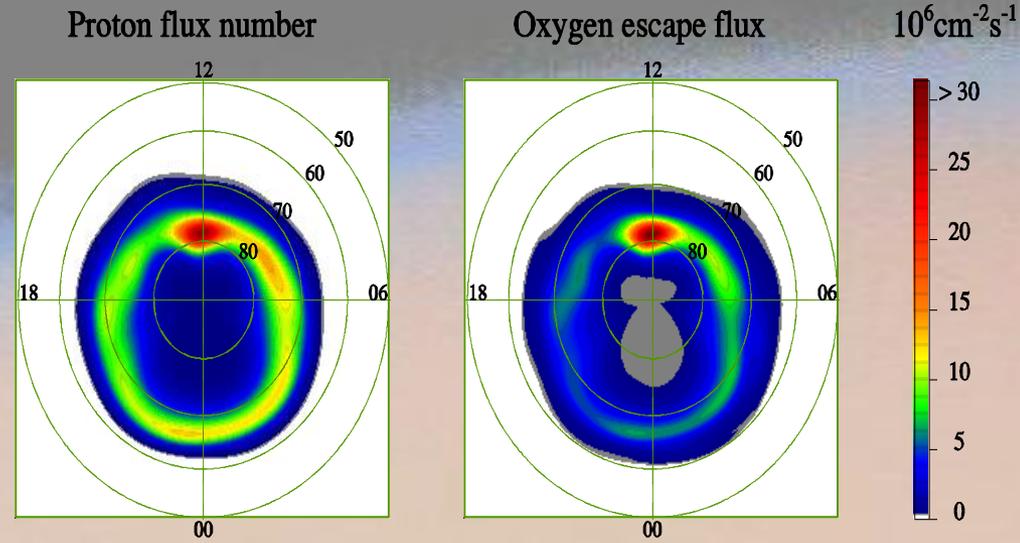
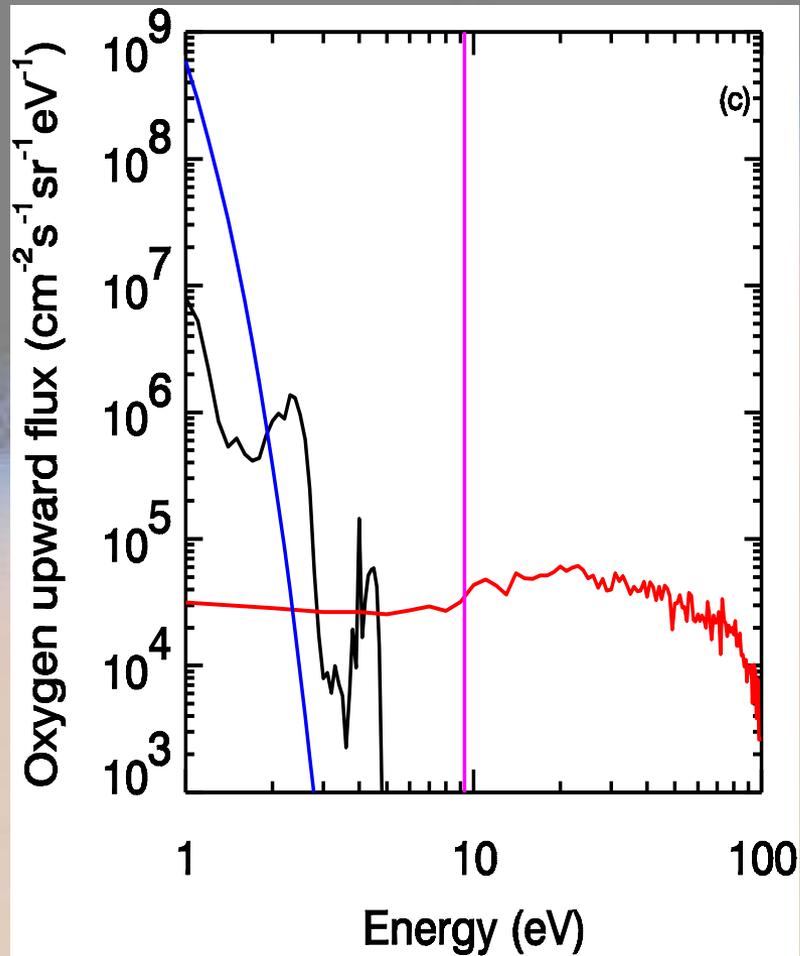
Нейтральный газ может убежать из атмосферы ($E \approx 10$ эВ) преимущественно из полярных областей, через которые происходит высыпание магнитосферной плазмы с высокими энергиями.



Кислородная геокоорона: *полярные источники*

Экзотермическая химия – черная линия;

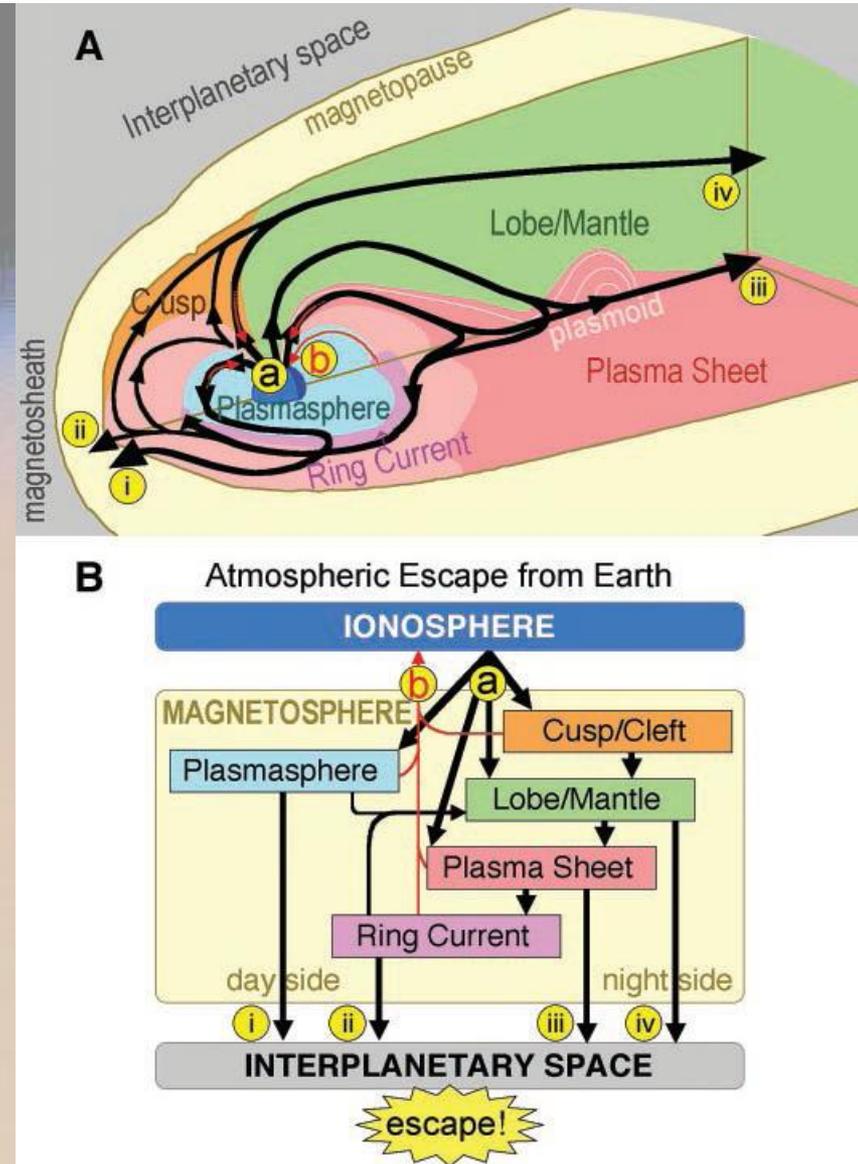
Атмосферное разбрызгивание протонами – красная линия.



- O атомы убегают из атмосферы с $E > 10$ эВ только при разбрызгивании (Shematovich et al., *Geophys. Res. Lett.*, 2005). Поток убегания порядка $Q \sim (5 \div 8) \times 10^{23}$ О/с.

Бюджет атомарного кислорода в земной магнитосфере

Из анализа данных измерений многих спутников в магнитосфере Земли следует, что для поддержания содержания атомарного кислорода требуется источник с мощностью $\sim 8 \times 10^{23}$ O/s (Seki et al., *Science*, 2001).



Кислородная геокоорона: Заключение

Расчитанные функции распределения надтепловых атомов кислорода по энергии используются для:

- интерпретации избыточных УФ эмиссий кислорода и оценок температуры верхней атмосферы из наблюдений эмиссии состояния O(1D) (Hubert et al., JGR, 1999, 2001), ионосферной энергетике (Oliver, JGR, 1997; Sipler & Biondi, JGR, 2003), оценки полярных источников нейтральных атомов (H и O) для магнитосферы Земли и анализа наблюдений ЭНА.

- Методы ДРГ (динамики разреженного газа) все более широко используются в планетной аэрономии.