

Вопрос по выбору

Диссипация атмосфер планет

Автор:
Докучаев Кирилл Витальевич
Б01-404

Долгопрудный 2025

1 Введение

В следствии ряда причин таких как: тепловое движение, солнечный ветер, ускорение частиц электрическим полем частицы в верхних слоях атмосферы могут получить скорость большую второй космической скорости. Верхние слои атмосферы сильно разряжены, поэтому начиная с некоторой высоты длина свободного пробега частиц становится сравнимым с высотой атмосферы, так что частицы могут покинуть гравитационное поле Земли. Потеря атмосферой газов вследствие этого механизма называется диссипация атмосферы. В вопросе по выбору будет подробно рассмотрен термальный механизм диссипации.

2 Термальная диссипация

2.1 Модель

Будем считать, что атмосфера состоит из смеси идеальных газов, скорости молекул которых подчиняются распределению Максвелла, атмосфера заполняет пространство между двумя концентрическими сферами радиусами $R_e = 6400 \text{ km}$ и $R_a = 10000 \text{ km}$.

2.2 Оценка высоты

Для начала оценим высоту, на которой длина свободного пробега становится сравнимой с высотой атмосферы, ожидается, что мы попадем в экзосферу (выше 690 km), поэтому оценим температуру $T \sim 10^3 \text{ K}$:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n} \sim 10^6 \text{ m} \Rightarrow n = \frac{P}{kT} \sim 10^{14} \text{ 1/m}^3 \Rightarrow P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu g H}{RT}\right) \sim 10^{-6} \text{ Pa}$$
$$\exp\left(-\frac{\mu g H}{RT}\right) \sim 10^{-11} \Rightarrow H \sim \ln(10^{11}) \frac{RT}{\mu g} \approx 740 \text{ km}$$

Здесь используется барометрическая формула, то есть оценивается длина свободного пробега для атмосферы, которая имеет одинаковую температуру равную 10^3 K по всей своей высоте, что очевидно не похоже на настоящую атмосферу. Тем не менее полученное число согласуется с реальностью, согласно [2], на высоте 750 km длина свободного пробега $\lambda = 1.0311 \cdot 10^6 \text{ m}$. Но ошибка в давлении и концентрации в 2 порядка.

2.3 Поток частиц

Выделим конус от α до $\alpha + d\alpha \Rightarrow$ соответствующий телесный угол $d\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$ (молекулы между α и $\alpha + d\alpha$ вылетают под углом α к горизонту), $dN = N \cdot \frac{d\Omega}{4\pi} = N \sin \alpha d\alpha$

$$dj_\alpha = dn_\alpha \cdot v_\alpha = \frac{n \sin \alpha d\alpha}{2} v \cos \alpha$$
$$dj_{\alpha,v} = \frac{1}{2} n \sin \alpha d\alpha \cdot v \cos \alpha \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv$$
$$j = 2\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \int_{v_{II}}^{\infty} v^3 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha$$
$$j_{\text{escape}} = n \sqrt{\frac{kT}{2m\pi}} \left(1 + \frac{mv_{II}^2}{2kT}\right) \exp\left(-\frac{mv_{II}^2}{2kT}\right)$$

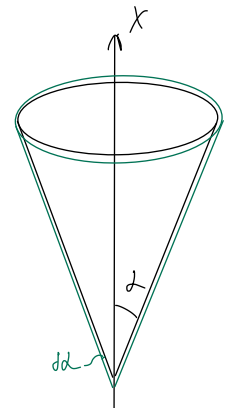


Рис. 1: Телесный угол

2.4 Время улетучивания

С помощью распределение Больцмана оценим соотношение концентраций различных составляющих атмосферы Земли на высоте 740 km , учитывая молярные доли каждого газа

$$\beta = 10^8 \cdot \exp\left(\frac{-\mu g H}{RT}\right)$$

газ	N_2	O_2	Ar	CO_2	Ne	Kr	CH_4	He	H_2
β	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-10}$	$8.7 \cdot 10^{-13}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-30}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	9.6

Видно, что уже на высоте H атмосферу можно приблизить смесью гелия и водорода, так как молярные массы остальных элементов слишком большие и большая часть газов сосредоточены в нижних слоях атмосферы. Возьмем концентрацию из [2] $n_0 = 1.6 \cdot 10^{12} / m^{-3}$. Тогда получим оценки для расхода водорода и гелия. $S_0 = 4\pi H^2 = 6.88 \cdot 10^{12} m^2$, $v_{II} = 11.2 \cdot 10^3 m/s$

$$\Phi_{escape}^{H_2} = 0.98 n_0 S_0 \sqrt{\frac{RT}{2\mu_{H_2}\pi}} \left(1 + \frac{\mu_{H_2} v_{II}^2}{2RT}\right) \exp\left(-\frac{\mu_{H_2} v_{II}^2}{2RT}\right) = 1.9 \cdot 10^{22} 1/s$$

$$\Phi_{escape}^{He} = 0.02 n_0 S_0 \sqrt{\frac{RT}{2\mu_{He}\pi}} \left(1 + \frac{\mu_{He} v_{II}^2}{2RT}\right) \exp\left(-\frac{\mu_{He} v_{II}^2}{2RT}\right) = 3 \cdot 10^{14} 1/s$$

Оценим с помощью барометрической формулы количество частиц гелия и водорода в верхних слоях атмосферы и оттуда за сколько времени из атмосферы улетит весь водород и гелий. $g(R_a) = 1.5 m/s^2$, $g(H) = 7.8 m/s^2$, тогда для учета изменения ускорения свободного падения при интегрировании поставим их среднее арифметическое $g^* = 4.65 m/s^2$

$$N_{H_2} = \int_H^{R_a} n(h) \cdot 4\pi h^2 dh = 4\pi n_0 \int_H^{R_a} \exp\left(\frac{-\mu g^* h}{RT}\right) h^2 dh = 4\pi n_0 \cdot \left(\frac{RT}{\mu_{H_2} g^*}\right)^3 \cdot 1.89 = 2.7 \cdot 10^{31}$$

$$N_{He} = 0.02 \cdot 4\pi n_0 \cdot \left(\frac{RT}{\mu_{He} g^*}\right)^3 \cdot 1.5 = 4.3 \cdot 10^{29}$$

Тогда время полного улетучивания:

$$\tau_{H_2} = \frac{N_{H_2}}{\Phi_{escape}^{H_2}} = \frac{2.7 \cdot 10^{31}}{1.9 \cdot 10^{22}} = 1.4 \cdot 10^{10} s = 450 \text{ years}$$

$$\tau_{He} = \frac{N_{He}}{\Phi_{escape}^{He}} = \frac{4.3 \cdot 10^{29}}{3 \cdot 10^{14}} = 1.4 \cdot 10^{15} s = 45 \cdot 10^6 \text{ years}$$

Но водород и гелий постоянно обновляются за счёт диссоциации воды и поступления этих газов из земных недр. В то же время кислород практически не улетучивается, и роль диссипации в создании кислородной атмосферы Земли могла быть существенной с момента появления фотосинтеза.

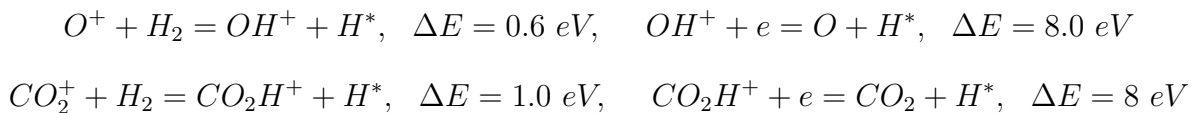
3 Нетермальная диссипация

Строгое описание нетермальные причины диссипации выходит за рамки курса общей физики за второй семестр, поэтому далее будут качественно описаны механизмы диссипации и приведены данные скорости истечения для Венеры из [3]. Также нужно отметить, что магнитное поле Венеры намного слабее магнитного поля Земли.

3.1 Солнечный ветер

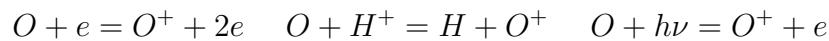
Магнитное поле Венеры намного слабее магнитного поля Земли. Магнитное поле заставляет солнечный ветер отклоняться вдоль своих линий, поэтому оно защищает атмосферу Земли от солнечного ветра. Атмосфере Венеры повезло меньше.

В верхних слоях атмосферы в присутствии фотонов с высокой энергией могут происходить фотохимические реакции, в результате которых образуются горячие атомы, которые могут улечься из атмосферы. Реакции, в результате которых образуется горячий водород H^* , слева приведена энергия горячего водорода



Пороговая энергия, чтобы покинуть гравитационное поле Венеры для атомов водорода, равна 0.56 eV . Аналогично для атомарного кислорода. Таким образом мы получаем поток горячих нейтральных атомов водорода и кислорода

Также солнечный ветер создает поток ионов. В верхних слоях атмосферы Венеры происходят реакции(ионы водорода от солнца):



Аналогичные реакции проходят и для водорода. Эти реакции происходят в результате столкновения атомов кислорода с частицами солнечного ветра, поэтому полученные в результате ионы обладают большой скоростью, так что могут покинуть гравитационное поле планеты

3.2 Ускорение электрическим полем

Легкие электроны намного мобильнее, чем тяжелые ионы, поэтому электроны из верхних слоев атмосферы чаще улечают в космос, тем самым формируется слабое электрическое поле, которого тем не менее достаточно для того, чтобы ионы H^+ достигли пороговой энергии и смогли покинуть атмосферу

3.3 Значения потоков

Планета	Венера	Марс
Процесс	Φ , 1/s	Φ , 1/s
Тепловое движение H_2	$2.5 \cdot 10^{19}$	$1.5 \cdot 10^{26}$
Фотохим. реакции H^*	$3.8 \cdot 10^{25}$	
Фотохим. реакции O^*		$2.8 \cdot 10^{24}$
Поток ионов H^+	$1 \cdot 10^{25}$	$1.2 \cdot 10^{25}$
Поток ионов O^+	$7.5 \cdot 10^{24}$	$3 \cdot 10^{24}$
Электрическое поле H^+	$7 \cdot 10^{25}$	

4 Вывод

Из атмосферы Земли каждую секунду улетают молекулы водорода и гелий, но естественный прирост этих газов компенсирует этот поток. Масса Земли достаточно большая для того, чтобы удерживать тяжелые молекулы в нижних слоях атмосферы, при этом магнитное поле Земли достаточно сильное, чтобы практически исключить диссипацию из-за солнечного ветра. Атмосферам Венеры и Марса повезло намного меньше. Атмосферы Венеры и Марса в значительной степени подвержены диссипации из-за влияния солнечного ветра

Список литературы

- [1] G. Gronoff, P. Arras, S. Baraka *Atmospheric Escape Processes and Planetary Atmospheric Evolution*
- [2] ГОСТ 4401-81 *Атмосфера стандартная. Параметры*: дата введения 01.07.1982
- [3] H. Lammer, H.I.M. Lichtenegger, H.K. Biernat *Loss of hydrogen and oxygen from the upper atmosphere of Venus*