2 太阳辐射与行星大气

2.1 行星大气的组分

- 地球大气：
  - 海洋对大气的影响：地球大气因海洋变得复杂，海洋与空间之间有持续的物质、能量、动量的交换作用，大气与海洋耦合。
  - 组分：近地表的氮气大气组分不同，氧占 80%，剩下主要是氩，除了水汽、臭氧、二氧化碳外，大多数其他气体对地球大气的行为影响不大。
  - 水汽、臭氧、二氧化碳：含量少，但影响极大，因为吸收地面发射的红外辐射或是极紫外辐射，从而影响气的温度，水汽含量是一个变量，依据于温度以及海洋，考虑大气组分时不能忽略海洋的影响。
- 类地行星大气组分：火星和金星大气主要成分是二氧化碳，金星上二氧化碳含量比地球和火星高，表明表面有非常活跃的火山活动，同时进行大气层中存在硫酸云层，会增强金星上的温室效应。
- 类木行星大气组分：质量是够大且温度低，大部分都是轻的元素，氢是主要成分，剩下的是氦。
- 土卫六大气组分：与地球类似，主要是氮（98%）。甲烷含量极高，表面可能是液态甲烷海洋，但是无法直接探测。

	Venus	Earth	Mars	Titan
Carbon dioxide	0.96		0.0003	0.09
Nitrogen	0.035	0.770	0.027	
Argon	70ppm	0.0093	0.016	
Water vapour	~10ppm	~0.01	~0.0003	
Oxygen	trace	0.21	0.0013	
Sulphur dioxide	~150ppm	~0.2ppb	0	
Carbon monoxide	40ppm	0.12ppm	0.0007	
Neon	5ppm	18ppm	2.5ppm	

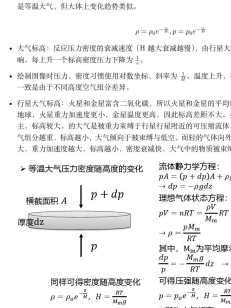
Solar fraction/f	Jupiter fraction/f	Saturn fraction/f	Uranus fraction/f	Neptune fraction/f
H_2 1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
He 0.1954	0.157	0.03	0.18	0.192
H_2O 1.352×10^{-3}	$<6.66\times10^{-4}$	$<6.66\times10^{-4}$	0.25	0.27
CH_4 6.623×10^{-4}	2.1×10^{-3}	4.5×10^{-3}	0.84	0.019
Ne 2.405×10^{-5}	$<2.66\times10^{-5}$	?	?	?
NH_3 1.664×10^{-4}	7.1×10^{-4}	$>3.66\times10^{-4}$	?	?
H_2S 3.170×10^{-5}	8.1×10^{-5}	2.56	?	?
Ar 5.024×10^{-3}	1.81×10^{-4}	?	?	?
PH_3 7.624×10^{-7}	6.94×10^{-6}	0.94	7.94×10^{-6}	0.93
GeH$_4$ 8.532×10^{-8}	8.1×10^{-10}	0.1	2×10^{-9}	0.23
Kr 4.083×10^{-9}	$<8.09\times10^{-9}$	2.13	?	?
Xe 2.938×10^{-9}	8.74×10^{-9}	2.95	?	?
AsH$_3$ 4.688×10^{-10}	8.1×10^{-10}	1.73	2.3×10^{-6}	4.27

2.2 行星大气的标高

- 大气压力密度随高度变化，可以压缩。等温大气中压力与密度随高度指数衰减，行星大气一般不是等温大气，但大体上也变化的较为缓慢。

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{z}{H}}, p = p_0 e^{-\frac{z}{H}} \tag{1}$$

- 大气标高：反应压力密度的衰减速度（即越大衰减越慢），由行星大气温度、组分和重力加速度影响，每上升一个标高密度压力下降为 $\frac{1}{e}$。
- 绘制围绕红矮星的行星，密度习惯使用对数坐标，斜率为 $\frac{1}{H}$，温度上升，标高增加，斜率减小，不完全一致是由于不同温度的压强变化方式不同。
- 行星大气标高：火星和金星富含二氧化碳，质量大且和金星的平均摩尔质量比地球高，但是相比地球，火星重力加速度更小，金星温度更高，因此标高差距不大，类木行星低温，且以氢和氦为主，标高较大，的大气及稳重力发现于行星引扰近的可压缩流体，因此重力加速度很重要，大气压力使用，标高较小，大气保存了较为薄与温度。固结的气体向外张散，最终逃逸，行星质量越大，重力加速度越大，标高越小，密度就越大，空气的密度就更难于抵达空间。



2.3 太阳对行星外 D 的影响

- 太阳是太阳系中所有行星的主要能源，行星与太阳的距离决定着行星接收到的太阳辐射的总量，从而决定着行星的平均温度。
- 行星上的季节：行星做太阳运行，季节每年重复，大气的行为随着季节变化，决定季节的两个量是行星轨道的自转的倾角和公转的偏心率。
  - 轨道倾角：$0°$：无季节，夏至点在北极点，北半球极昼，南半球极夜，春分秋分依然相等。季节变化非常剧烈，②尤小这半：类似地球，火星，一年中不同时段日照区域变动，只有在极地附近才会出现极昼或极夜的现象，季节变化也较为明显，$①0°$：未知，行星轨道处于不同位置表面日照情况基本不变，季节变化很微弱。
  - 偏心率：轨道偏离正圆，近日点太阳辐射较强，远日点较弱。辐射总量不同，大多数行星偏心率较小，因此对季节影响不大。有趣现象：火星走极近在北半球夏季在在。科南恢复在南半球夏季诱发。
- 自转：自转周期是讨论行星大气的另一个基本时间尺度，若自转周期与公转方向相同，则每年少一个昼夜变化，反之会多一个昼夜变化。若方向和速度都完全一样，则没有昼夜变化，当自转与公转周期差距不大时影响更加显著。
- 太阳对行星大气的影响：太阳风主要与大气最外层作用，电磁辐射最好行星辐射最强的主要形式，不同波长的辐射组合叠加在一起。

	Venus	Earth	Mars	Titan
Mean distance from Sun	1.082×10^8	1.496×10^8	1.524×10^8	1.426×10^8
Eccentricity	0.0068	0.0167	0.0934	0.0288
Obliquity (deg)	177	23.45	25.08	27
Year	0.615	1	1.88	29.41
Rotational period (hours)	5832	23.9345	24.6229	382.68
Solar day (days)	117	1	1.0287	16
Solar constant ($kW\,m^{-2}$)	2.613	1.368	0.594	0.016
Net heat input ($kW\,m^{-2}$)	0.367	0.842	0.499	0.012

类地行星

	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Distance from Sun (km)	7.78×10^8	1.43×10^9	2.87×10^9	4.50×10^9
Eccentricity	0.0489	0.0565	0.0457	0.0113
Obliquity (deg)	3.13	26.73	97.77	28.32
Orbital period (years)	11.857	29.42	84.01	164.79
Solar day (hours)	9.92	10.65	17.24	16.11
Solar constant ($W\,m^{-2}$)	50.5	14.9	3.71	1.51
Bond albedo	0.343	0.342	0.30	0.29
Total energy out/*Solar* energy input	1.67	1.78	1.06	2.52

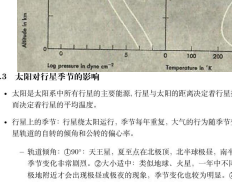
类木行星

2.4 太阳辐射特征

- 维恩位移定律：$\lambda_m T = b$，随黑体温度升高，黑体辐射的电磁波在经常波长的辐射通量增加，归是最大通量处减少。
- SB 定律：总辐射通量为 $W = \sigma T^4$
- 太阳辐射：波长 $10^{-9}-10m$，从 X 射线到无线电波，可见光和近红外辐射最强，长波和短波通量下降，主要来自大气中的水辐射，也有部分来自色球层和日冕，对比太阳辐射谱和黑体辐射谱，在可见光区域大体一致，太阳辐射在电子跃迁和振动转换从无线电区偏高，在紫外区偏低，偏离原因：①紫外区低于黑体温度由于光球发出的辐射被太阳大气中的原子电离过程吸收会使紫外区下降②黑体谱是由于黑体的温度处处相同而产生，太阳辐射是由于温度从光球无线电区高于黑体谱是由于自由电子和太阳磁场之间相互作用，这为太阳温度没有表现出黑体辐射与太阳活动有关。
- 冶金变化特征：可见光和红外区是太阳辐射的主要部分，来自核平稳的光球层。随时间变化不大：极紫外区和无线电区来自色球层和日冕，随时间显著变化，总辐射量相对稳定，随时间变化不大。
- 太阳活动对行星大气的影响：产生强烈的无线电，极紫外和 X 射线辐射，这些辐射对行星大气层发生作用：同时，太阳活动产生的太阳风轨道也会与行星大气场相互发生相互作用。

2.5 辐射结构行星大气化学变化

- 不同波长的太阳辐射与行星大气的相互作用机制：激发原初、激发振动、光离解、激发外层电子、光电离电离、行星的大气通过这些过程，吸收了太阳辐射中不同波段的光子，导致了行星大气中的化学变化。
- 参与化学变化的元素：氮比较稳定，主要与氧相关，地球大气中产生氮氧化物的反应。
- 光离解：光子能量足够高时，分子吸收光子，束缚原子的化学键裂开，产生的原子化学性质活泼，这些原子产生的一系列反应会产生新的生成物，分子氧的光离解原产生的新生成物：原子氧和臭氧，不是型它出现的，也不能长期存在。
  - 决定分子光离解准确的因素
    ①光子应起光离解的效率：效率取决于光子波长，与高度无关。光子波长太长能量不足无法离解，光子波长过短能量过高。
    ②参与反应的分子数：与高度相关，氧分子密度随高度而衰减，密度和氧气分子成分的大气标高给出，理论上低空应有更多的由氧分子的光离解产生的氧原子。但实际并非如此。
    ③给定区域大气：可以特定光离解的光子数：与高度相关，在大气中，射入的光子会被不断与大气相互作用辐射传入大气能量，辐射光子数减少。并非所有波段的光子数都会减少，某一波段的光子能减小能不能产生下这一波段的辐射在大气中能减的效率，而这个效率取决于辐射的波长，因此，大气中不同波长的辐射的衰减率不同，这就导致不同波长的辐射的通量随高度的分布曲线也不同，高空中大气稀薄，辐射通量几乎不变，随着光增加吸收变强，光子数快速下降，因此高度能吸收的光子数最多。
  - 垂直使用的大气：吸收光子的速率与参与反应的各种物质的密度成正比。
  - 变化分子率：每一高度的生成与消失率维持平衡，即臭氧密率（质量作用定律）与光离解率（在世界使用）相等。
  - 简化之外还有很多有影响的因素，如分子扩散等，如分子扩散分为对流层和平流层与自标高指数衰减的趋势分布，混合起源于风和气象过程，使得各种气体物质在每一部分区域中都有相同的相对浓度。
- 扩散的影响：使得大气中的每一种物质向着相对各自的标高指数衰减的分布趋势演化。当扩散是行星大气中的主要过程，始终气体标高大致维持，重的气体标高小衰减速，导致轻的气体所占比例随高度增加而增大。
- 扩散 vs. 光离解 vs. 混合：
  - ①光离解时间常数：达到光化学平衡所需时间，随高度增加而减小。②混合时间常数：形成均匀混合大气所需时间，较为复杂，不具有随高度的系统变化，与高度无明显关系。③扩散时间常数：各成分按标高指数衰减，形成分层大气所需要的时间，依据较难混合好互动起即较轻组分向上运动的速率，辐射诊断组扩散速率，因此高层扩散性，低空扩散慢，因此在 120 千米以下大气之中由主要由光离解和混合决定，随高度增加而减小。
  - 区分复合反应速率和光解离时间常数：反应速率为复合过程的发生率，而时间常数为一对 O 多长时间变回 O_2。
  - 低层大气的光离解 vs. 混合：
    ①存在一个大致的临界高度 $70km$，下方光离解时间常数小于混合时间常数，上方光离解时间常数大于混合时间常数。
    ②混合将低层于 O_3 大高空管到低空，这是由于 $100km$ 以上 O 所占的比例更高。
  - 扩散 vs. 混合：低层大气中大气不密度较高，分子间碰撞频繁，扩散速度较慢，因此混合影响更大，大多数气体组分完成混合，存在临界高度下方混合主导，上方扩散主导，扩散主导以不随重的气体分子倾向于分布于低处稚重明，越轻的气体分子分布于高空容易逃逸。



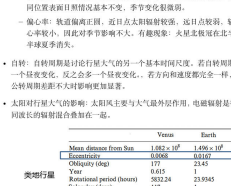
2.6 臭氧

- 臭氧可以吸收 $200-300nm$ 紫外辐射，这一辐射对于地球生物是致命的。
- 臭氧的形成：①分子氧光离解形成原子氧会氧原子与氧分子反应形成臭氧分子 $O+O_2+M=O_3+M$。
- 臭氧的消耗：①臭氧与原子氧复合 $O+O_3=O_2+O_2$，在高空密度要，因为原子氧在高空密度较高，②臭氧的光离解 $Photon+O_3=O+O_2$，在低时内没密都要要，这一过程吸收 $300-3000nm$ 要的辐射，臭氧的形成和消耗是分子氧光解和氧自由过程之一，但并不是主要的，最终臭氧也要空与生物光被的作用而消失，因此在对地面环境关含量很高。
- 臭氧随高度的分布：形成速率正比于（O 密度）×（O_2 密度），（大气分子 M 的总密度），消耗速率大体正比于（O 密度）×（O_3 密度）×（可吸收光子密度），臭氧密度正相关于 O_2 和 M 密度，可吸收光子密度。

高空中由于原子氧和 M 的密度低，光子多，因此臭氧密度低，高度降低，大气吸收光子，开正原子氧和 M 密度增高，臭氧密度升高，臭氧密度升高，吸收光子增加，光化学过程基本失效，无法有效产生臭氧，主要原因输运，因此在低空会臭氧。

- 混合与光离解对比：臭氧分子在低空中基本不会发生光化学反应，只大气环流引起的混合过程参常强，因此混合过程主导。随高度增加，光化学过程增才能分析主导，高空中 0 的密度较高，可吸收光子密度很高，光离解时间很小，因此高空是光离解为主导。

- 空间分布随时间的变化：北半球大气中臭氧总量随月份与纬度变化，高纬臭氧总量更高，这是由于大气环流导致的，冬季极涡更为强烈，这同样是由于大气环流冬季更强。
- 臭氧的作用：臭氧对地球大气吸收紫外辐射十分重要，臭氧也会影响大气的热收支，并形成相应的温度垂直结构。

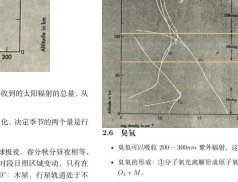


2.7 辐射传输：吸收、发射和散射的辐射

辐射传输：结合介质传播的辐射会经受到吸收、发射和散射的影响。通过分析辐射传输过程，讨论大气吸收辐射并向外发出新的辐射，从而实现辐射输即能的过程

辐射传输方程：$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu$

- 吸收：辐射通量密度 α_ν：吸收系数 j_ν：自发辐射系数
- 含义：辐射传输经过距离 ds，通量密度改变量 dI_ν，等于经过这段距离内因为吸收而减少的部分 $-\alpha_\nu I_\nu ds$，以及在这段距离内大气向外发出的自发辐射引起的增加量 $j_\nu ds$
- 吸收系数 α_ν：表示每个单位的分子截面密度，和分子的有效截面有关
- 如果只有辐射（$\alpha_\nu = 0$）：$I_\nu(s) = I_\nu(s_0) + \int_{s_0}^{s} j_\nu(s')ds'$
- 如果只有吸收（$j_\nu = 0$）：$I_\nu(s) = I_\nu(s_0)exp(-\int_{s_0}^{s} \alpha_\nu(s')ds')$



- 定义光学深度 τ_ν：$\mathrm{d}\tau_\nu = \alpha_\nu ds$，可得 $\tau_\nu(s) = \int_{s_0}^{s} \alpha_\nu(s')ds'$
- 斜辐射辐射方程可写为：

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu, \quad S_\nu = j_\nu/\tau_\nu$$

- 可得辐射辐射通量与光学深度的关系：

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} e^{-(\tau_\nu - t)} S_\nu(t)dt$$

光学厚与光学薄：考虑只有吸收的情况：$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu}$

- 若对应距离 s 所以小得到 $\tau_\nu \approx 1$，说明辐射经过距离 s，辐射通量密度衰减为 $1/e$，即辐射强度广泛等大的衰减
- 因此，我们可以把整个辐射传输路径分为 $\tau_\nu \approx 1$ 分质是光学厚的（不透明）
- 反之，若 $\tau_\nu \ll 1$，则介质是光学薄的（透明）

2.8 光致电离与行星电离层

- 地球电离层有大量的带电粒子与电子，会影响无线电波的传播，其来源是光致电离。大气分子或原子吸收辐射释放出电子。
- 波长小于约 $100nm$ 的辐射（极紫外辐射）才能够引起光致电离，主要发生于大气的高空，在约 $100-200km$ 的高度，是光致电离吸收入射太阳辐射最多的区域。
- 金星上的光致电离：金星大气 CO_2 最多，光致电离在 $140km$ 激发最大，过程为 $CO_2 + photon = CO_2^+ + e^-$，复合为 $CO_2^+ + e^- = CO + O$。
- 金星光离解：主要是 CO_2 的光离解，对应波长约为小于 $170nm$，离解 $CO_2 + photon = CO + O$，复合 $O + O + M = O_2 + M$，$CO + O + M = CO_2 + M$。与光致电离的区别：光致电离小于 $100nm$，光离解 $100-170nm$：光致电离会形成离的电子和离子，虽然复合会消耗，但是电子和离子会一定量被保存的带电粒子，进行的光致电离源不与电子密度分布具有较好的相符性。
- 地球上的光致电离源率与电子密度分布相符性一般：电离过程 $O + photon = O^+ + e^-$，复合过程开非直接 O^+ 与电子复合，而是先与氧分子形成氧气离子，再与电子复合，即可产生密度 $=O^+$ 密度正比于 O 的密度，反比于 O_2 或 N_2 密度，随高度上升，O 的密度相对为高，因此电子密度随高度增加而增大。
- 扩散过程影响导致电子密度高度分布，$300km$ 以下以光致电离产生主导，$300km$ 以上以扩散为主导，造成所有在扩展极电子密度随高度减少，$300km$ 处电离层电子密度的极大值，光致电离辐射来自光球和日冕，因此太阳爆发活动对能会影响电离层电子密度。

3 行星大气的温度

3.1 大气温度结构

- 行星大气的温度对于行星环境有重要影响：影响标高从而影响大气密度随高度分布；影响大气组分；宜居性。
- 太阳辐射影响行星大气温度。大气温度的主要来源和散失过程：
- 中性吸收地大气的温度分层结构
  - 对流层，平流层，中间层，热层
  - 不同波长的辐射有不同的辐射深度，极紫外（$<100nm$）透入热层；紫外（$200-300nm$）到达平流层，可见光和红外辐射能够到达对流层。
  - 三个温度极大：①热层：$300km$ 以上，温度可达 $1000K$。主要由于太阳辐射，高空大气通过光电离吸收极紫外辐射，所有行星的高空大气中都有各种各样的离子和电子，其主要热层，②平流层：$50-55km$，温度约为 $280K$，臭氧的光离解吸收紫外辐射，使温度升高，由于其他行星没有足够多的臭氧所以不会存在这样的温度极大，③地面：$288K$，主要是太阳辐射中的可见光和红外辐射被地面吸收。

3.2 行星的有效温度

- 行星处于相对稳定的状态：星星整体温度一般保持不变，不会出现明显波动，因此向太空中辐射出的能量速率，应与行星从各个热源接收能量的速率完全相等，即辐射平衡。
- 类地行星接收的能量：类地行星接收的能量完全来自于太阳，因此行星向外的辐射的能量速率由行星所接收的太阳辐射能量来决定。入射太阳辐射与行星截面积成正比，行星半径小入射太阳辐射会照射在，一部分会被反射，以行星反射率表征，向外辐射能量为 SB 定律，可以计算行星有效温度 T_e，即为平衡温度，与半径无关，只与反射率及太阳入射辐射有关。
- 类木行星的吸收与辐射不一定平衡，主要是因为类木行星表面的温度与内部的加热过程，这种加热过程主要是由于星球的内部加热过程，吸收的辐射量存在作用差异，而辐射量没有作用差异，可能行星大气内部存在有的热量分配机制，将在吸收的热量向外辐射的地方大体保持不变，有效温度是基于整个整行星的计算的温度，热辐射温度是基于行星的辐射温度计算的温度，由于内部热源的影响，热辐射温度明显高于有效温度。
- 海王星的热辐射温度也明显高于有效温度，但是对于天王星，吸收的太阳辐射与发出的行星辐射基本平衡，因此热辐射温度与有效温度不对称，海王星温热源来自内部，但是天王星的热源来自于天王星接近
- 行星有大气时表面温度与有效温度不同，行星表面向外产生辐射，会被行星大气吸收，然后大气再向外产生辐射，表面温度一般高于有效温度。
- 决定宜居带温度要就是恒星辐射量和星球行星距离大面的距离，表面温度与有效温度的差异表面行星大气吸对行星是否依据有重要影响。

	Venus	Earth	Mars
Distance from Sun (Mkm)	108	150	228
Planetary Bolometric (Bond) albedo, A	0.76	0.4	0.15
Tropospheric Lapse Rate (K, km^{-1})	10.7	9.8	4.5
Radiative equilibrium temperature, T_E (K)	239	255	226
Surface temperature (K)	730	290	215

	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Solar flux ($W\,m^{-2}$)	50.8	15.2	3.76	1.52
Geometric albedo	0.274	0.242	0.215	0.215
Absorbed flux ($W\,m^{-2}$)	9.22	2.88	0.738	0.297
Emitted flux ($W\,m^{-2}$)	14.66	4.89	0.696	0.73
Internal source F_{int} ($W\,m^{-2}$)	5.44	2.01	0.042	0.433
Model 1: F_{int} or U/t^2 ($W\,m^{-2}$)	(5.440)	1.604	0.398	0.160
Model 2: $F_{int} \propto M\,(W\,m^{-2})$	(5.440)	1.600	0.250	0.293
Radiogenic heat flux ($W\,m^{-2}$)	0.005	0.006	0.025	0.025
Radiative equilibrium temperature (K)	164	84	60	48
Observed bolometric temperature (K)	127	96	59	60

- 大气温度随高度的衰减率 δ 不能超过 $\frac{g}{c_p}$ 太多，一旦 $\delta \gg \frac{g}{c_p}$，大气中开始发生对流，热量从底部转移至上层，降低 δ，抑制其进一步增加。当 $\delta < \frac{g}{c_p}$，下层大气吸收地面红外辐射，逐渐增加直到可以发生对流。这一调制作用使两者接近。
- 对流可以解释水蒸气辐射转移（2 层，计算两层中间温度，再计算高度，计算地面温度绘图）在 12km 以下与理论不符。

3.6 平流层温度结构

- 利用辐射转移分析平流层温度：对于平流层由于臭氧存在，大气对于太阳辐射不再透明。平流层中的辐射平衡为 $\mu\sigma T_s^4 + \epsilon\sigma T_e^4 = 2\epsilon\sigma T_p^4$，有 $(\frac{T_p}{T_e})^4 = \frac{\mu+\epsilon}{2\epsilon}$，$\mu$ 为平流层大气对太阳的辐射吸收率，ϵ 为对地球的红外辐射吸收率。
- 从平流层顶向上 μ 先增加，在臭氧峰值吸收高度处 50km 达到温度极大，再往上下降，吸收减弱，温度降低。
- 辐射转移不适用于 80k 以上的区域，因为太过于稀薄，虽然也会与辐射作用，但是强度有限，不满足辐射转移平衡。

3.7 其他行星对流层

- 金星大气浓密，温室效应强，对流层厚；火星温室效应弱，重力加速度小，温度衰减缓慢，所以对流层厚度与地球接近。
- 金星对流层：厚度 $50-60km$，理论与实际相差不大，差异可能是由于金星上的云层和雾霾对太阳辐射吸收导致的，没有臭氧层所以没有平流层顶的温度极大。
- 火星对流层：低层大气平均温度结构与地球类似，厚度 15km，在对流层以上，热的输送以热辐射为主，也没有臭氧层。昼夜温差很大，导致火星表面产生的红外辐射通量显著变化，进而使火星大气温度结构随时间明显变化。火星上吸收红外辐射主要是二氧化碳，大气温度对于红外响应更为迅速，因此活性的红外辐射涨落会引起行星大气温度结构的改变，低层大气对流特征出现波动。在夜晚，表面温度很低，处于逆温状态，不发生对流，且就算有对流也会因为下方缺乏热源导致很快停止。白天地面温度迅速升高，温度衰减率增加，开始出现对流。
- 粉尘对于火星对流层的影响：火星的绝热温度递减率是 $4.5km/K$，表面的温度随高度衰减率约为 $2km/K$。，火星表面有大沙尘暴，造成火星大气中有大量的粉尘，这些粉尘也会吸收和发射辐射，从而改变了火星大气的绝热温度递减率（组分改变，c_p 增大）。
- 木星对流层：内部热源很强，注入的能量与吸收的太阳辐射量接近，木星大气中应有对流存在，因此木星低层大气的温度随高度变化也应大体接近绝热温度递减率。可采用与地球类似的方法计算理论温度分布。

3.8 热层温度结构

- 高度很高，100km 以上。紫外和极紫外被光致电离吸收，峰值吸收高度为 200km。密度很低导致比热容很低，对于温度变化更敏感，一天内变化可达 300K。$250km$ 以下温度随高度变化率很大，以上温度基本保持不变。
- 高温是因为比热容低，且缺乏有效的热量转移出去的机制。
- 热辐射：温度升高，产生更多的屏东能，当气压足够大分子大量碰撞，平动能大量转化为振动能和旋转动能，产生热辐射。但是由于热层气压低，碰撞很不频繁，因此无法以热辐射有效热量转移。
- 热对流，温度随高度增加而增加，不发生对流，因此无法以热对流金星热量转移。
- 热传导：通过高温区的分子与低温区的分子直接碰撞金星热量转移，是平动能间的直接转换，效率非常低，需要很大的温度差才能将热层中所吸收的少量的热传导出去。
- 热层的热平衡：：热层吸收的太阳紫外和极紫外辐射，与通过热传导过程向低温区域传输出去的热量间的"平衡"。
- 虽然峰值是在 200km，但是由于高度越高，碰撞越少，热传导效率越低，再加上密度比较小，热容较小，因此是温度随高度增加而增加的。热层更高处没有新的热源，所以 250km 以上，温度变化越来越慢，趋于热传导达到平衡。从 200km 开始，随着高度降低，大气密度上升，碰撞逐渐加快，使得热传导效率提高，并且热辐射开始逐渐发挥作用，即大气转移热量的效率逐渐提高，因此温度逐渐下降，且降速加快。

4 行星大气中的环流

4.1 行星大气的运动

行星大气的环流：行星尺度的对流运动与相应的横向的大气运动耦合，形成较为稳定且长期存在的环流

大气环流的本质：能量和物质传输的形式

地球大气环流的成因：地表冷热源的不均匀分布

4.2 平均风

4.3 地球的平均风场

4.4 大气环流与扰动过程

4.5 热环流

行星表面温度差异引起的低空和高空压力差

-高空：温度的差异造成标高不同，导致高温位置的高空压力更大

-低空：高空环流导致低温位置上方大气物质更多，低空压力更大

温度差异引起的大气环流——热环流

-温度差异引起水平环流，在高空从高温到低温，在低空相反

-考虑流体连续性，高温位置会有上升气流，低温位置有下降气流

-热环流本质上就是由于行星表面不同位置的温度差异所引起

-热环流的驱动力是不同位置温度差异所引起的气压梯度力

-低温位置和高温位置在高空的压力差可以很大，是热环流的主要驱动，考察整个环流区的绝热温度递减率，即高温位置与低温位置的高空温度，低温位置高空温度是够低才能发生热环流

季风环流的成因：陆地和海洋温度差别引起的季节变化的热环流

4.6 行星大气中的热环流

行星表面温度的温度波动

热输入量 $Q = \pi R^2 S(1-A)t_d$，R 为行星半径，S 为太阳辐射通量密度，A 为反射率，t_d 为一个昼夜变化周期的时间

$Q = \frac{p_0}{g}4\pi R^2 c_p \Delta T$，$p_0/g$ 为行星表面单位面积上方大气质量

温度分布的影响因素：

（1）行星表面不同纬度太阳辐射输入的差异

-在某一纬度接收到的太阳辐射输入总量取决于 2 个因素：

- 该纬度处日与夜的相对长度
- 该纬度处行星表面单位表面积所接收到的太阳辐射通量

-与行星的自转倾角有关

a. 不同纬度单位面积接收到的太阳辐射通量的差异

b. 不同纬度的日照时间的差异

（2）行星表面不同位置反射率的差异

- 雪与冰，以及云层都具有较高的反射率
- 大角度斜入射的太阳辐射，更容易被行星的大气散射

地球表面的温度分布

- 入射太阳辐射从夏季极区边缘向冬季极区逐渐减少；
- 中高纬度反射率大，低纬热带地区吸收太阳辐射最多，温度最高
- 夏季极区会吸收一定太阳辐射；冬季极区的日照少，温度最低
- 夏季极区温度高于冬季极区，导致冬季半球的热环流更强

4.7 科里奥利力与地转平衡风

科里奥利力 $F = -2\omega \times v$

北半球向右偏转，南半球向左偏转；上升气流东风，下降气流西风

地球上的地转平衡风与三圈环流

- 高空气流从高压的赤道上空出发向极区运动，并逐渐偏转，在 20~35 纬度地转偏向力与气压梯度力平衡，转变为平衡风并不再扩展，形成最终的 Hadley 环流与副热带高压区域

- 低空气流从高压的极地出发向赤道运动，到 60 纬度左右转为平衡风，形成极区环流与副极地低压

- Ferrel 环流在副热带高压与副极地低压之间形成

- 原始驱动力是气压梯度力，没有气压梯度力就没有环流

- 三圈环流是由地球自转产生的科里奥利力产生的

三圈环流与实测中高纬度高空的西风带不相符

4.8 大气环流的其他驱动力

惯性离心力与梯度风

-大气中存在圆形闭合气压场，形成旋转的风场，即为梯度风

-大气旋转时受到惯性离心力，大小为 $m\omega'^2 r$，方向与指向曲率中心的方向相反；受到地球自转引起的离心力，但是可以近似忽略

- 科氏力指向高压，与气压梯度力的合力与离心力平衡

-中心低压时的梯度风：北半球逆时针旋转，南半球顺时针旋转

-中心高压时的梯度风：北半球顺时针旋转，南半球逆时针旋转

摩擦力

-近地表运动的空气与地面之间产生的阻碍空气运动的力，与运动方向相反，与空气运动速度和摩擦系数成正比，随高度的上升而减弱

-中心低压时，摩擦力会降低近地面层的风速，科氏力减弱，气压梯度力与科氏力合力向内，大气运动向低压中心偏转

4.11 火星的大气环流

火星的大气和自转

-自转轴倾角和自转速度与地球类似，因此表面温度分布的季节变化较大，且大气运动会明显受到科氏力的影响

-火星大气较为稀薄，温度分布和风场会出现较为明显的昼夜差异

-火星的云很少而且很薄，并且在火星表面缺少雪和冰，所以火星表面不同纬度的反射率并差异不大

火星的大气环流模型

-温度分布：夏季半球极区温度最高，向冬季半球极区逐渐递减

-南半球夏季时整个火星的高空气压梯度力都是从南向北，因而产生的热环流在高层大气从南向北，低层大气从北向南

-南半球温差小，大气运动速度慢，科氏力作用下形成微弱的东风

-北半球温差大，大气运动速度快，科氏力作用下形成强劲的西风

-在高空中由于热环流形成的由南向北的大气运动，先在南半球缓慢向东偏转（可能未形成地转平衡风），然后在北半球快速向西偏转，形成西风带

-在北半球较高纬度，气压梯度力与科氏力平衡形成地转平衡风

-火星的 Hadley 环流是跨赤道的，而且显然会随着季节变化

-在北半球更高纬度区域，形成 Ferrel 环流

-北半球较大的温差形成复杂的气压结构，并形成气旋和反气旋

4.12 类木行星的大气环流和运动

-大气组分与类地行星有差异，木星、土星、海王星存在内部热源

-类木行星距离太阳更远，大气非常浓密，大气整体温度变化较小

-类木行星自转速度更快，大气运动时受到的科氏力更大

木星的环流模型

-温度分布较为复杂：不同纬度吸收太阳辐射总量存在差异，行星内部热源的南北分布也存在差异，导致大气温度分布差异，驱动热环流

-木星快速自转产生的很强的科氏力会导致热环流非常不稳定，形成多个环流的形态，以东西纬向运动为主

4.13 土卫六的大气运动

-自转周期较为缓慢，相对土星潮汐锁定

-存在超自旋现象，高层大气的主要温度差异来自不同纬度吸收的辐射差异，从而形成南北经向的热环流。同时由于科氏力作用，在高层大气形成很强的东西纬向风场

-倾角 26.7 度，因此大气温度分布以及大气运动存在季节变化

-有甲烷云和霾等结构

4.9 行星波（Rossby 波）

行星波：气旋与反气旋耦合在一起之后形成的大尺度空间波动现象

1. 表面温差引起的气压梯度力形成热环流
2. 自转产生的科氏力导致地转平衡风形成全球尺度的三圈环流
3. 局部的闭合气压场中，在惯性离心力和摩擦力作用下形成气旋和反气旋
4. 气旋和反气旋耦合在高空形成行星波

行星的风场的一般规律

-行星大气风场的驱动因素：表面太阳辐射分布不均引起的温差，行星的自转；温差越大自转越快，行星大气越不稳定，大量的（反）气旋以及复杂的行星波

4.10 金星的大气环流

金星自转特点

-自转轴倾角很小：推测表面温度分布的季节变化较小

-自转速度很慢：理论上大气运动基本不会受到科氏力的影响

-昼夜变换周期较长：金星大气的总量很大，实际昼夜温差不大

金星高层大气的环流（从金星表面约 100km 以上）

-金星昼夜变换周期较长，向阳面温度高，背阴面温度低，引起热环流：高层大气下层从低温背阴侧到高温向阳侧，上层从向阳侧到背阴侧，主要沿南北经向跨极区；因自转慢科氏力很弱，基本没有东西风场

金星中低层大气的环流（80km 以下），Hadley 环流不适用

-纬向超自旋：行星大气层旋转速度超过行星本身旋转速度

-超自旋系数：赤道处大气旋转速度除以行星表面的自转速度

-超自旋会导致东西纬向较为快速的热量交换和传输，因此金星中低层大气中向阳侧和背阴侧的温度差异很小

-赤道和高纬度间的温度差异导致气压梯度力，形成热环流

- 太阳辐射在中低层大气产生的温差很小，地转平衡风相比超自旋也很小，因此金星中低层大气环流以超自旋产生的东西纬向风为主

- 可以认为太阳辐射在金星云层顶端全部被吸收；地球大气中的加热与冷却来自大气底部，而金星大气中的过程来自大气上空云层顶部

- 纬向超自旋在极区很弱，并且在上空比近地面更强，因此 Hadley 环流会将角动量带到极区，从而形成极区涡旋

5 凝结与云

5.1 云与辐射平衡

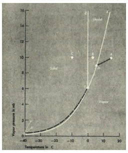
- 地球上云的运动反映着大气环流的运动特征。木星：浓密且复杂的带状云。金星：厚度极大，表面难以探测。火星：少且稀薄。地球：三族十属，本质是液滴和冰晶。
- 大气分子由于固液气等不同状态，物理性质也不同。对于同一个分子，处于不同状态对相互作用有很大差异。例如水蒸气对太阳辐射透明，强烈吸收地球红外辐射；云对于红外辐射吸收更强，温室效应更强，同时会反射太阳辐射：地表的水会吸收大部分入射的太阳辐射；雪和冰会强烈反射。
- 云对太阳辐射的散射和反射：云会散射更多入射的能量回太空中去，影响地球反射率，会显著的影响行星的有效温度。
- 云与行星大气环流的耦合过程：云是可见液滴和冰晶集合体，会不断落向地面，因而云是随时产生和消失的；云的产生过程主要来自于大气的运动，云一旦形成，会影响大气的温度，从而反过来又会影响大气的运动。

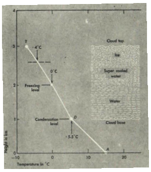
5.2 饱和气压与过饱和

- 水面和冰面上方是地球大气，水分子从水面或冰面分离而进入大气，分离的速率取决于分子的热运动速度，因此温度决定着水、冰变成气体的速度。地球大气温度下，能够发生较为快速的蒸发、升华、凝结和凝华过程，速度由大气中的水汽分压决定。
- 饱和气压：在给定的温度下，一种物质的气态与其凝聚态（固态或液态）之间会在某一个压强（分压）下存在动态平衡。大气的饱和气压与大气的温度有关。（理解三相图）
- 湿度与温度的关系：温度越低，对应的饱和空气中的水汽分压越低，即空气中能包含的最大水分总量越低，因此冬天空气更干燥。
- 过饱和：当空气迅速冷却，水汽将全部变为液态水，这一过程并非立刻完成，可能存在过渡状态，在过渡状态，水汽的气压比同温度饱和水汽压更高。如果存在液态水，则水分子会立刻吸附上去；但如果此时空气中没有液态水和凝结核，则水分子可以存在相当一定时间内仍维持气态，此时称空气为过饱和的，是一种亚稳态。
- 过冷：若液态水迅速冷却至低于凝固点，液态水最终会全部变为冰。这一过程并非总是很快完成：在没有任何冰面的情况下，水分子仍然可以在相当一段时间内维持液态，也是一种亚稳态。虽然冰能量比过冷水低，但是不存在过热冰，不是亚稳态。过冷水与大气中的云、雨、雪等天气现象密切相关。

5.3 水汽的凝结

- 地球大气一般是处于不饱和状态，未饱和空气充分冷却，就会达到并超过饱和气压的两项平衡线，从而发生凝结或凝华。
- 湿空气的上升，温度降低，上升阶段：①初始阶段空气温度的下降速率等于绝热递减率，随温度降低达到饱和（D 点），开始凝结。这一高度称为凝结高度，是云层的底部。②此后由于发生相变，还要考虑相变潜热的影响，绝热上升过程中温度的衰减率也会相应变化，相同的温度变化幅度，如果发生了凝结凝华，则单位质量气体会释放更多的热量，相当于 c_p 增大，绝热递减率变小，温度随高度的衰减相比上升初始阶段变慢。高度进一步上升时，温度随高度的衰减又会逐渐加快。如果到达对流层上部，因为温度很低，无论相对湿度如何，温度随高度的衰减都接近于绝热温度递减率。③上升至约 2km 高度，温度降至 0 度，称此高度为凝固高度，随高度继续增加降低至一定温度后，冰晶数量足够多使得过冷水变为冰。最终湿空气的上升到约 3km 高度时停止，对应的位置为 T，将这一高度称为云层顶。
- 对于地表不同位置，温度不同，因而在地球不同位置湿空气上升的温度高度曲线不同，形成的云层厚度和结构不同：大气运动形式不同，在地球不同位置不规律的分布着上升或下降空气，因此不同位置上空云的分布也是不规律，并且处于高度动态变化中。





- 云层中云滴的形成：如果液滴是由汽所形成，则应当首先由少量气体分子聚集形成小的云滴，然后小的云滴聚集逐步形成大的云滴。云滴越小饱和气压越大，这也就意味着形成小的云滴需要更高的饱和气压，否则蒸发过程会使得小的云滴迅速消失。如果没有小云滴，那么大的云滴如果存在，也只能依靠分子偶然的聚集，则形成的概率就会更低；因此最终就会导致大气中几乎无法形成云滴，此时大气即使处于过饱和状态，但是还是不满足形成小云滴所需要的水汽分压，因而大气将长期处于过饱和状态，与地球大气的实际不符。
- 凝结核与云滴的形成：在大气中存在着大量的细微固体质点，提供了很多半径大于 0.01 m 的核，这样就很容易形成大的云滴，，这些细微质点是初始的凝结形成云滴过程所必须的，称之为凝结核。
- 云的类型：① 卷云：纤维状结构为主，是温暖干燥的空气上升形成，冰晶组成。②积云：云底基本为水平，多垂直向上发展，横向尺寸很小，温热空气上升形成，垂直风速较快。③层云：横向尺寸很大，可达 1000km，几乎完全没有结构，由细小的水珠组成，通常在气象系统中上升很慢的空气中形成。
- 不同尺寸云滴的成因和演化：①凝结核不同，凝结形成的云滴大小不同，凝结核的大小与化学成分决定着通过凝结过程所形成的云层中的初始云滴的大小，如果凝结核很小且不溶解于水，则凝结形成的云滴半径较为均匀，接近前面估算的 7 微米；如果凝结核很大，则凝结形成的云滴尺寸也很大。②不同的云滴间会发生偶然的接触，使得小的云滴合并，从而形成较大的云滴，始终在发生，但是发生的频率并不高。③不同尺寸云滴饱和气压差异：小云滴蒸发大于凝结，因而小云滴会进一步减小，大云滴凝结大于蒸发，大云滴会逐渐增大，倾向于从比较小的云滴向比较大的云滴迁移。
- 云滴在云层中的运动和演化：由于重力的缘故，凝结形成的初始云滴会在云层中不断下落，这种运动也会导致云滴的长大。不同尺寸云滴的沉降速度与云滴半径平方成正比，较小的颗粒遵循 Stokes 定律，凝结核可以认为没有沉降，凝结形成的初始云滴也可认为处于悬浮。如果云层中云滴没有发生沉降，则不同云滴之间偶然接触的概率很低，一旦发生沉降，云滴间接触概率大大提升。
- 云滴沉降：①静止空气的云滴沉降：小尺寸云滴沉降速度很小，基本处于悬浮状态，大云滴沉降过程中，会与其扫过的小尺寸云滴接触并融合在一起，可见云滴的沉降过程会引起的大云滴的长大。②上升气流中的沉降：，几乎所有云中都有上升气流，因为只有这样，才能发生水汽的凝结从而形成云，上升气流的存在使得大云滴在沉降时扫过的区域更长，合并的小云滴更多，因此上升气流会导致云滴长大得更大。
- 大云滴在云层中停留的时间越长，扫过的小云滴越多，则长大得越大，具体包括两方面的影响因素：①云层厚度：大云滴在云层中停留的时间是它降落到云底所需要的时间，云层厚度越大，相同初始沉降速度的大云滴在云层中停留时间越长。②云层中上升气流的速度：上升气流速度越大，大云滴沉降速度绝对值越小，在云层中停留的时间越长。因此，云层越厚，上升气流越强，云层中的云滴也就会越大。因此层云多是潮湿云雾而积云有更大尺寸的水滴。

5.5 云的形成

- 大气上升过程中，水汽凝结成液滴，称为云滴，云滴分界面是凸面，曲面情况下，水冰与空气的接触面积更大，其中的水的蒸发速率更快，但是凝结凝华速率与表面形状无关，只与水汽的分压力有关。
- 云滴对应的饱和气压：要想蒸发速率与凝结凝华速率相同，需要更大的水汽分压力，因此云滴所对应的饱和气压相对更高，云滴越小，曲率半径越小，分界面弯曲程度更大，则对应的饱和气压更高。

5.4 其他行星上的凝结与云

- 其他行星，大气组分不同，发生凝结的成分也不同。即云的组成不同。
- 金星上的凝结过程：形成的云层非常浓密，吸收和反射了绝大多数入射的太阳辐射，但观测少，对底层大气中的大气分布演化、凝结过程以及云层的分布仍然未知。主要成分虽然是二氧化碳但是金星云层不是二氧化碳分子组成的，甚至可能二氧化碳凝结很微弱。在金星的最上层云层中，构成云的主要成分是硫酸液滴。
- 火星上的凝结过程：与金星不同，火星上大气较为稀薄，温度波动很大（$\omega = 38\%$），大气压约为 6mbar，大气降至 145K，二氧化碳可凝华。由于火星大气温度波动大，因此凝华温度较为容易达到，满足凝结条件。在火星极地，会出现固体二氧化碳组成的白色极冠（水冰 + 干冰）。极区二氧化碳凝华并释放潜热，由于火星二氧化碳是主要成分，因此气压会随季节变化，春分和秋分时，是火星大气气压的极小期。高层大气中温度较低，二氧化碳也能够发生凝华过程，形成蓝色薄雾状的干冰云，很不稳定，会在极区形成降雪直接变为极冠，高温区域的干冰云下落升华变为气体，总量较少。火星上可见光中云大多由水分子构成，由于水分含量低，云通常十分薄，类似地球上的卷云，也存在地形云。由于气压低，不会产生液态水云，只有水冰云，且分布不规则。
- 火星上的尘埃：由于火星气压低且温差大，根据气压梯度力引起的加速度 $\frac{p_{hot}-p_{cold}}{p_{cold}}$，可知火星大气中的风速很大，且重力加速度很低，因此尘埃很容易被卷入空中，从而形成沙尘暴。会影响大气对流层的垂直温度结构。凝结形成的云在掺杂沙尘后，就会形成尘埃云，由白色变为黄色。
- 木星上的云：木星自转快，所以其大气环流是多个环流元的形式，并且由于科氏力形成地转平衡风，大气运动主要是东西方向为主，观测到的木星云层顶也是沿着东西方向快速运动。木星的云层顶可分为十余条平行于赤道的带状云，被带状气流分隔，暗的云称为带，对应环流中的下降气流区，温度较低；量的云称为区，对应环流中的上升气流区，温度较高。云层顶是固态 NH_3 形成的云；云层顶下方，对流层上部是固态硫氢化铵形成的云；对流层中部是水汽凝华形成的水冰云。
- 土星：与木星类似，但是因为有效温度低，所以云层所需温度对应的高度更低。
- 天王星和海王星：大气的主要组分与木星相同都为氢和氦，但是大气的温度压强无法满足氢和氦的凝结条件。天王星和海王星上甲烷较多，因此主要是甲烷的凝结过程形成了天王星和海王星上的云层。

5.6 雨雪和冰雹

- 积云中的落雨：由地球大气环流模型可知，热带地区由较为强劲的上升气流，因而热带地区上空大部分的云都是积云；同时，热带的降水量在地球总降水量所占比重很大。积云所形成的降雨一般持续时间不长，因此多为阵雨。
- 大尺寸水滴的不稳定性：若上升气流速度很快，则会在云层下部形成半径大于 2500 微米的云滴，大云滴是不稳定的，会破裂成一些相对较大的碎块状云滴和许多较小的水滴，碎块的半径比 2500 小很多，因此碎块沉降速度并不大，因此会在上升气流作用下重新在云层中上升，从而吸附小云滴增大尺寸，而这些碎块状云滴，比凝结形成初始云滴又大很多，所以吸附小云滴速度很快。形成了一个类似于连锁反应的大云滴生成过程，相比单纯的从凝结形成的初始云滴出发再经过沉降过程而形成云层下的水滴的速度快得多，云层中的液态水快速聚集成大的云滴，并从云层中下落到地面形成强降雨。
- 冰的降落就会形成雪和冰雹，温度越低，冰晶数量越多，过冷水凝固成冰速度越快。大气相对于过冷水是不饱和，因此蒸发速度大于凝结速度，过冷水减少，大气相对于对于冰晶是过饱和的，因此凝华速度大于升华速度，冰晶增大，冰晶的成长速率都很快。
- 雪的形成：冰晶成长的时间较长，就会形成复杂的树枝状冰晶降落至地面，这就是雪花；不过此时的降雪并不强。形成强降雪的连锁反应：与形成强降雨的的连锁反应类似，雪花（大体积冰晶）破损，形成大量小冰晶，云层中过冷水与这些小冰晶的共存，会导致这些小冰晶快速成长，连锁过程使得云层中的过冷水快速转化为冰晶，形成强降雪。
- 冰雹：如果大气中相对低温并且存在较强上升气流，有很强的上升气流时，冰晶会在云层中停留足够长的时间，此时除了饱和气压差异会引起过冷水转化为冰晶外，冰晶还会与其在云层中经过区域的过冷水形成的云滴大量接触，过冷水滴在冰晶表面凝固，使得冰晶体积增大，达到一定程度，沉降速度超过上升气流速度，就会下落并到达地面。意冰晶与大云滴不同，破裂只是偶然的过程，如果上升气流很强，可以形成相当大的冰晶颗粒，这就是冰雹。

6.1 行星大气的形成与演化

- 太阳系起源：源自一团弥散的原始星云，内部发生了引力坍缩，大部分坍缩质量聚集在中心，剩下的气体和尘埃形成的圆盘状云为"太阳星云"，"太阳星云"吸积过程逐步形成太阳系统的行星。
- 早期的行星大气：形成了行星之后的残余物，被行星捕获，就形成了早期的行星大气。组分，应该与原始星云的组分较为类似可以通过分析外海王星天体及太阳系边际探测推断原始星云组分。
- 原始星云的组分与今天的大气的组分差异很大，例如惰性气体所占比例应较为固定。对于类地行星，质量较小而且距离太阳很近，在太阳和太阳系形成的早期，太阳不断增加的辐射会将类地行星大气中的氢和氦吹走，这可能导致了类地行星失去了最初的大气层，之后可能通过火山或行星内部的物理化学过程重新形成了各自的行星大气。对于类木行星，质量较大，且距离太阳远温度低，因此反而捕获了太阳吹拂过来的气体，大气组分与太阳的组分相对接近，可能保留了来自原始太阳星云的成分。
- 行星大气中各种化学组分不断进入或离开大气，形成演化过程如水循环、碳循环、氧循环，并不是静止孤立的。

6.2 循环

- 水循环：①地球上绝大部分的水是以液态水或固态冰的形式存在，水汽含量所占比例非常低，仅为 0.00093%。②与各种气象过程密切相关，起到重要的媒介作用。温度越高，水汽含量越多，水循环过程变快，极端天气事件就会越多。
- 碳循环：
  - 地球上的二氧化碳：①二氧化碳溶解于海洋以碳酸离子的形式存在使海洋酸化，同时海洋中的碳酸离子蒸发使二氧化碳逃逸到大气中。两者速率基本相等达到动态平衡，对 CO_2 有重要影响。二氧化碳溶于海洋的速率与大气中的分压成正比，但是返回大气不受影响。由于海洋总的碳含量很高，大气中增加的 CO_2 对海洋总的碳含量的影响很小。②沉积物中的碳酸盐，可以通过火山活动或是风化作用，转变成 CO_2 的形式返回大气，这一过程速度较慢，对地球上碳循环贡献很小。化石燃料的燃烧，会大量的将固态沉积岩中的碳转换，显著影响二氧化碳含量。大气中的二氧化碳无法直接转变为沉积岩中的碳，而是需要通过生物圈为媒介。二氧化碳被生物圈的速率基本等于返回速率，构成碳循环平衡。③海洋中的碳酸根离子发生内部循环过程沉积，形成水成沉积岩，碳从海洋中转化至沉积物中。水成岩并非总是在增厚，一旦被推升至海面上方，在风化和海洋的剥蚀作用下，沉积岩中的碳酸盐会再度溶解于海洋，碳交换速率基本是平衡的。
  - 碳循环过程：地球上的碳元素在大气（二氧化碳、甲烷）、生物圈（有机碳）、海洋（碳酸离子）、沉积物（碳酸盐、化石燃料、非生物有机材料）、地球内部间循环（地壳地幔）。
  - 碳循环不仅与生命密切相关，而且与温室效应和全球气候变化可能存在关联。CO_2 含量增加使温度略微增加，饱和蒸汽压增加，大气中会有更多水汽，可能明显增加大气光学厚度。
- 氧循环：①绿色植物通过光合作用，吸收二氧化碳向大气中释放氧气，是大气中氧气的最主要来源。有机体呼吸及死亡后腐烂会消耗氧气释放二氧化碳。地球上的氧循环与碳循环之间有着密切的联系，生物圈与大气之间的这两个循环互为逆过程。光合作用产生氧气的速率，与呼吸和腐烂过程消耗氧气的速率基本平衡。②少量有机物残骸在腐烂之前变为沉积物，相当于向大气中输入了氧气。化石燃料的燃烧，其中所含的碳会与大气中的氧气作用产生二氧化碳，构成大气与沉积物之间的氧循环。③大气中水分子光离解产生的氢原子会逃逸离开地球，因而会增加大气中氧元素的含量。
- 氧循环难以溶于水，因此没有类似海洋的蓄水池，氧气含量会有显著波动，富氧环境主要来自藻类贡献。

6.3 金星大气的演化

- 碳循环：不存在海洋，只有大气和岩石间的交换：金星大气中的 CO_2 与金星表面的硅酸钙相互作用，产生方解石（碳酸钙）和石英（二氧化硅）；金星岩石中的方解石和二氧化硅间会发生相互作用，从而向金星大气释放出 CO_2。二氧化碳含量大体平衡，两个过程平衡。大气中二氧化碳与硅酸钙的相互作用速率与二氧化碳分压有关，岩石向金星大气释放二氧化碳的过程与二氧化碳的分压无关。

金星大气各组分与岩石平衡：化学组分完全由固体表面性质决定。

对比：①地球上有光合作用，金星由于高温没有生命所以没有光合作用。光合作用于使得大气处于远离大气与岩石化学平衡的状态。②金星上的温度非常高，远高于地球，反应速度更快，更容易达到平衡。

失控的室温效应

6.4 大气逃逸

- 外逸层：大气层的最外层，大约 500km，大气密度非常低，以至于大气分子和原子的平均自由程非常大。可以近似认为大气分子原子能够直接进入太空而不会发生碰撞。
- 此外还需要速度超过第二宇宙速度，大气中大多数粒子的速度满足玻尔兹曼分布，大多数粒子的速度接近于各自的最可几速度 $\sqrt{\frac{2kT}{m}}$，总是会有一部分粒子的速度超过逃逸速度。温度越高，粒子质量越小，越容易逃逸。温度越高，密度随高度衰减越慢，高空分布相对越多。
- 金星高空水汽会在太阳紫外辐射的作用下，发生光离解分解成氢原子和氢氧根。由于金星温度高，而且氢原子的质量很低，所以标高很大，因此氢原子在外逸层中的含量较高。通过水分解形成的氢原子最终逃逸离开了金星，而剩下的氢氧根会与表面岩石作用而消耗，并最终导致金星上水的含量很低。
- 在地球上，水和冰雪是水分子的主要形态，大气中水汽含量所占比例很低，虽然也会发生类似的水汽逃逸，但是不会对地球总水量产生明显影响。
- 类木行星：重力加速度很大，因此类木行星外逸层中所对应的逃逸速度很高，温度很低，因此大气各组分的最可几速度都很低，因此各组分都难以逃逸。
- 水星和月球：重力加速度很小，逃逸速度很低，温度很高，最可几速率很高，因此只有非常稀薄的大气。
- 除了大气的逃逸过程外，太阳风的剥蚀作用也会使得行星大气的组分流失。地球具有较强的磁场，可以有效的屏蔽太阳风的剥蚀作用，而金星和火星磁场很弱，太阳风的剥蚀作用可以产生明显的大气损失。