

Astrofizyka Układów Planetarnych

6

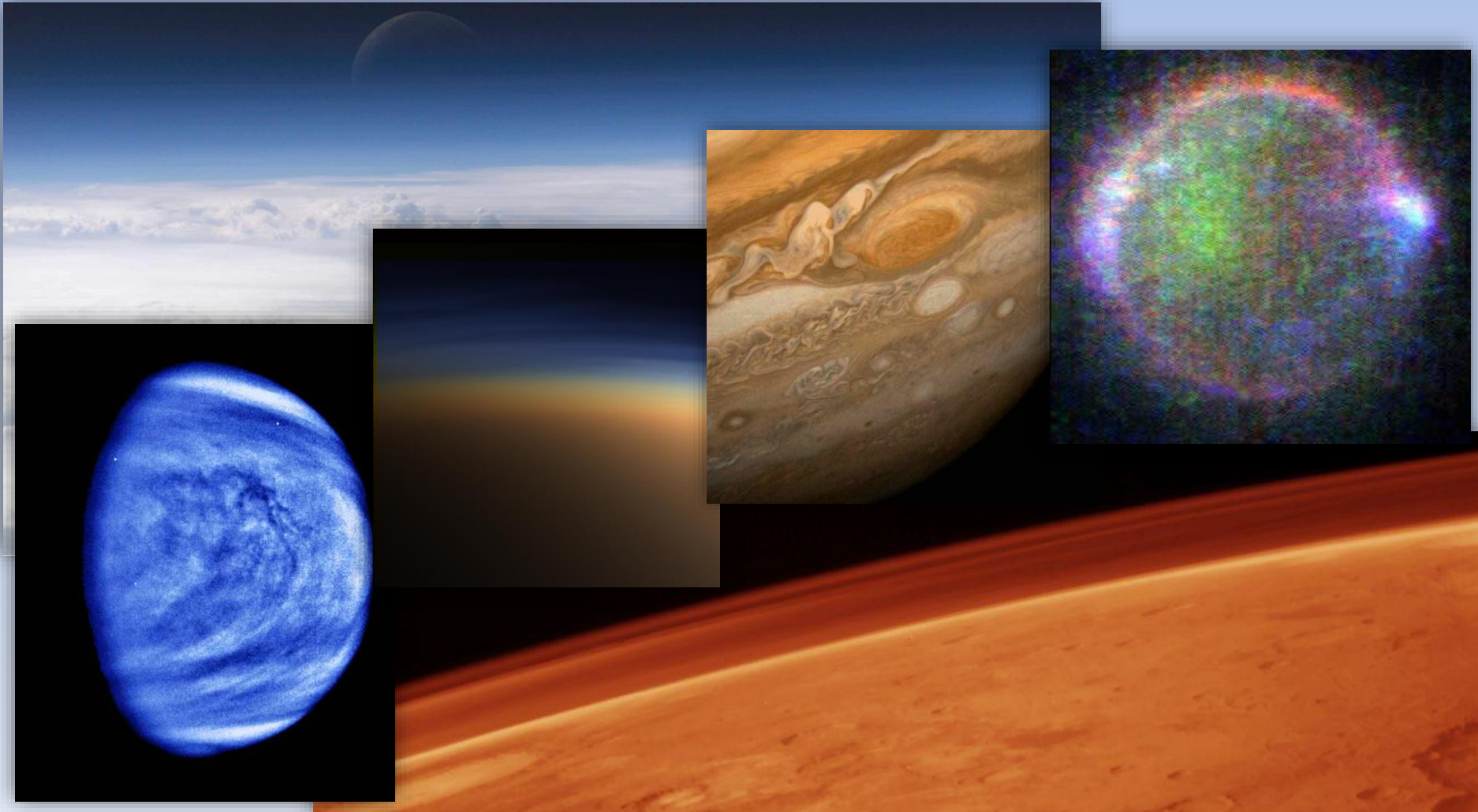
ATMOSFERY
CIAŁ PLANETARNYCH



Atmosfery

Atmosfery – twory unikalne

Wszystkie planety i niektóre z księżyców posiadają atmosfery. Każda z nich jest inna. Podstawowe różnice to gęstość, skład chemiczny, warunki fizyczne. Jednak każda z nich działa na bazie tych samych procesów chemicznych i fizycznych.



Atmosfera

Ciśnieniowa skala wysokości

W pierwszym przybliżeniu atmosfera znajduje się w równowadze hydrostatycznej – warunki fizyczne w niej panujące będą określane m.in. przez równowagę grawitacji i ciśnienia.

$$\frac{dP}{dz} = -g(z) \cdot \rho(z)$$

Dołączając równanie stanu (gaz doskonały; μ_a - ciężar cząsteczkowy, m_u - jednostka masy atomowej):

$$P = NkT = \frac{\rho kT}{\mu_a m_u}$$

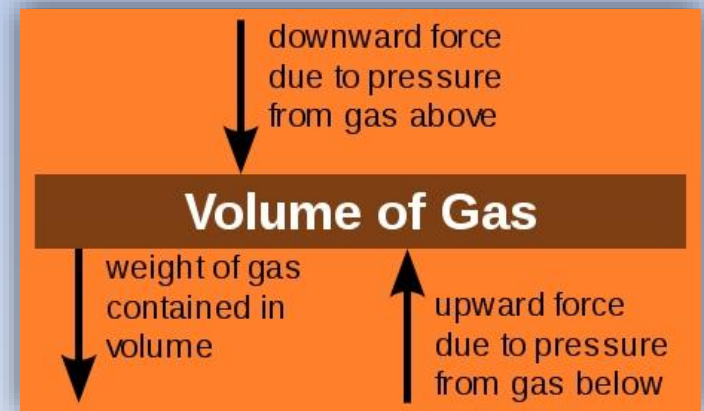
Otrzymamy:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{dz}{H(z)} \quad H(z) = \frac{kT(z)}{g(z)\mu_a m_u}$$

Po scałkowaniu:

$$P(z) = P(0) \exp\left(-\int_0^z \frac{dz'}{H(z')}\right)$$

H to **ciśnieniowa skala wysokości**, która określa jak atmosfera szybko zanika z wysokością. Jest to jeden z podstawowych parametrów określających atmosferę. Najczęściej podawana jest $H(z=0)$.

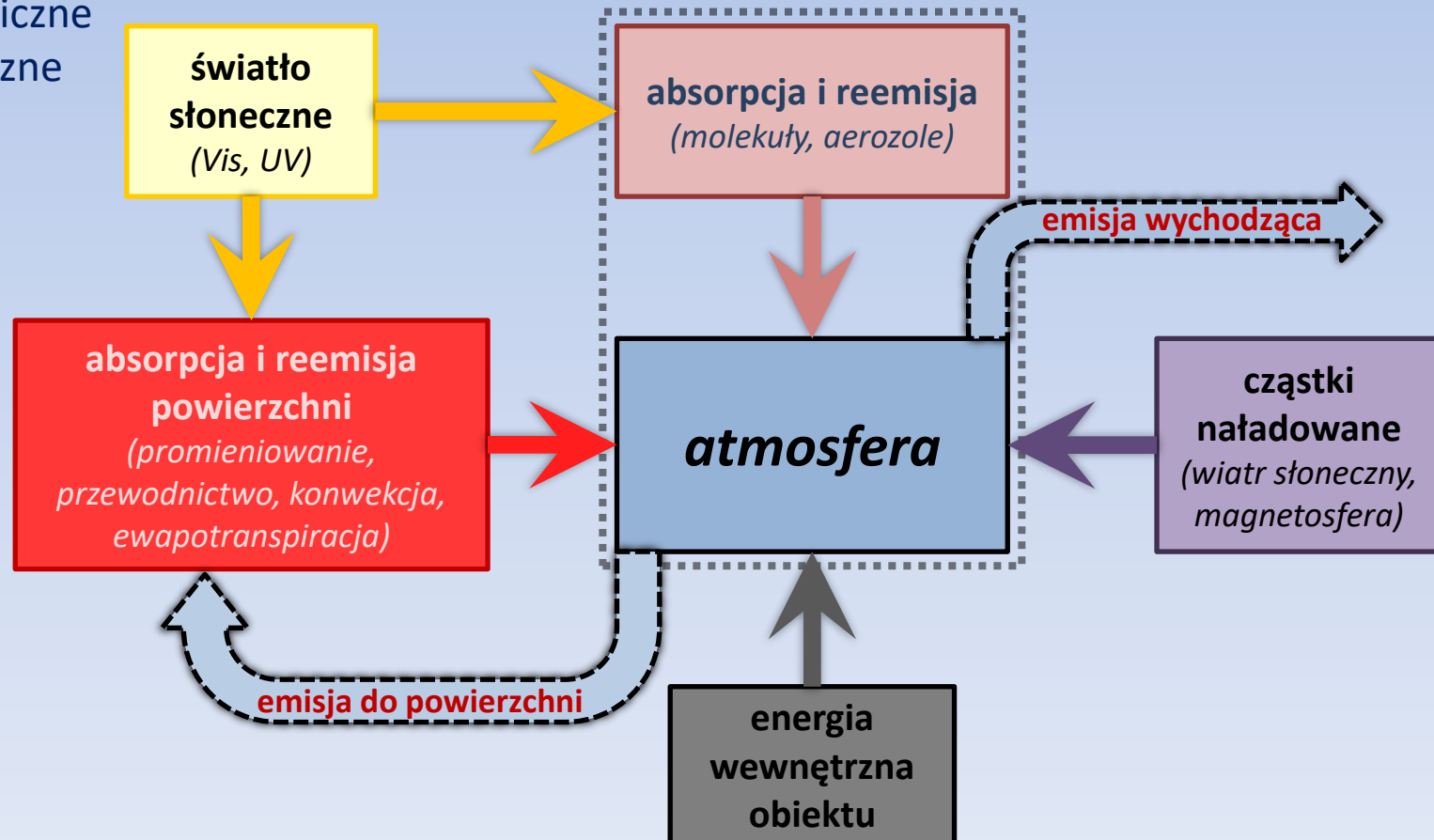


Atmosfera

Struktura termiczna

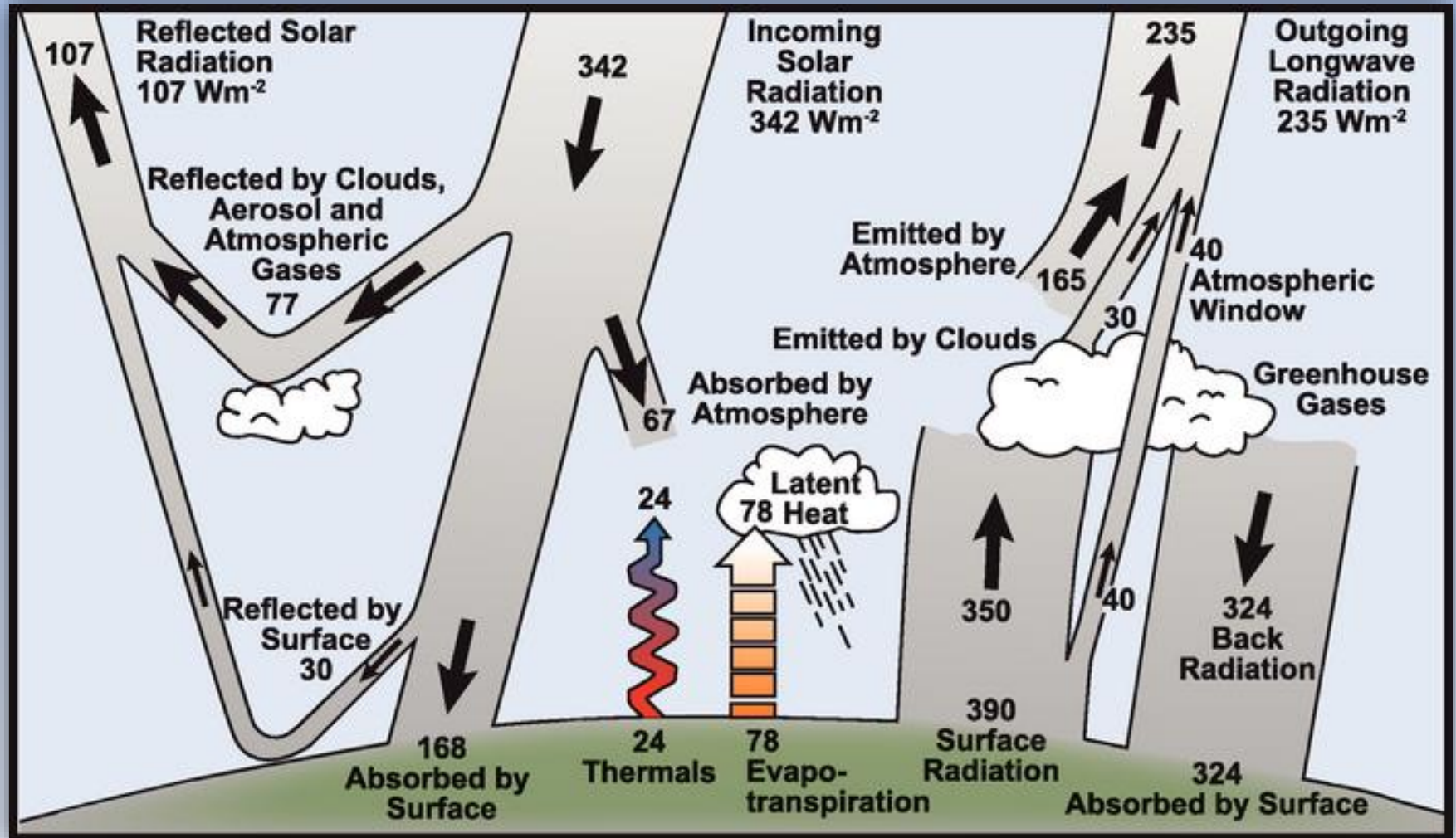
Struktura termiczna atmosfery zależy od źródeł energii termicznej i efektywności procesów jej przenoszenia/utraty. Na strukturę termiczną ma wpływ też:

- reakcje chemiczne w atmosferze i między atmosferą a powierzchnią
- obecność chmur i mgieł
- aktywność wulkaniczna
- procesy biologiczne i antropogeniczne (Ziemia)



Atmosfery

Bilans energetyczny dla atmosfery ziemskiej

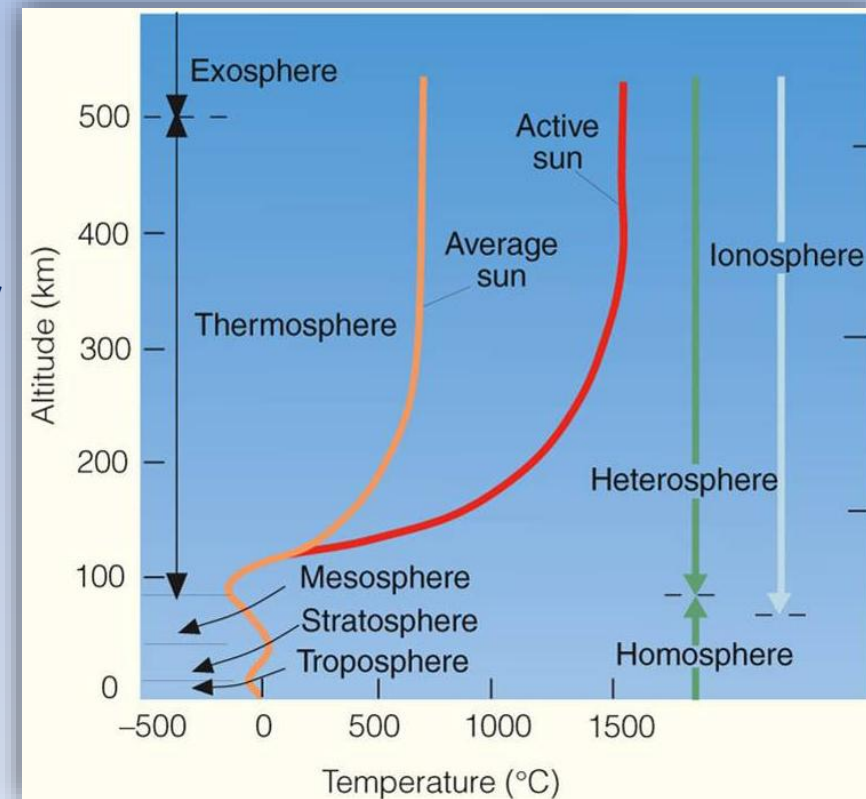


Atmosfera

Struktura termiczna

Struktura termiczna atmosfery w ogólny zarysie wygląda następująco (na przykładzie Ziemi):

- **troposfera** – warstwa najniższa; temperatura spada z wysokością; obszar występowania chmur; przenoszenie energii: konwekcja, przewodnictwo
- **tropopauza** – temperatura osiąga lokalne minimum
- **stratosfera** – temperatura rośnie z wysokością (absorpcja UV przez O_3), przenoszenie energii: promieniowanie (aż do górnej termosfery)
- **stratopauza** – lokalne maksimum temperatury
- **mezosfera** – druga warstwa spadku temperatury
- **mezopauza** – drugie minimum temperatury
- **termosfera** – temperatura ponownie rośnie (absorpcja światła przez rzadki gaz)
- **egzosfera** – średnia droga swobodna cząsteczek gazu przewyższa ciśnieniową skalę wysokości (cząsteczki mogą łatwo uciekać w przestrzeń międzyplanetarną); dolna granica egzosfery to **egzobaza**; przenoszenie energii: przewodnictwo

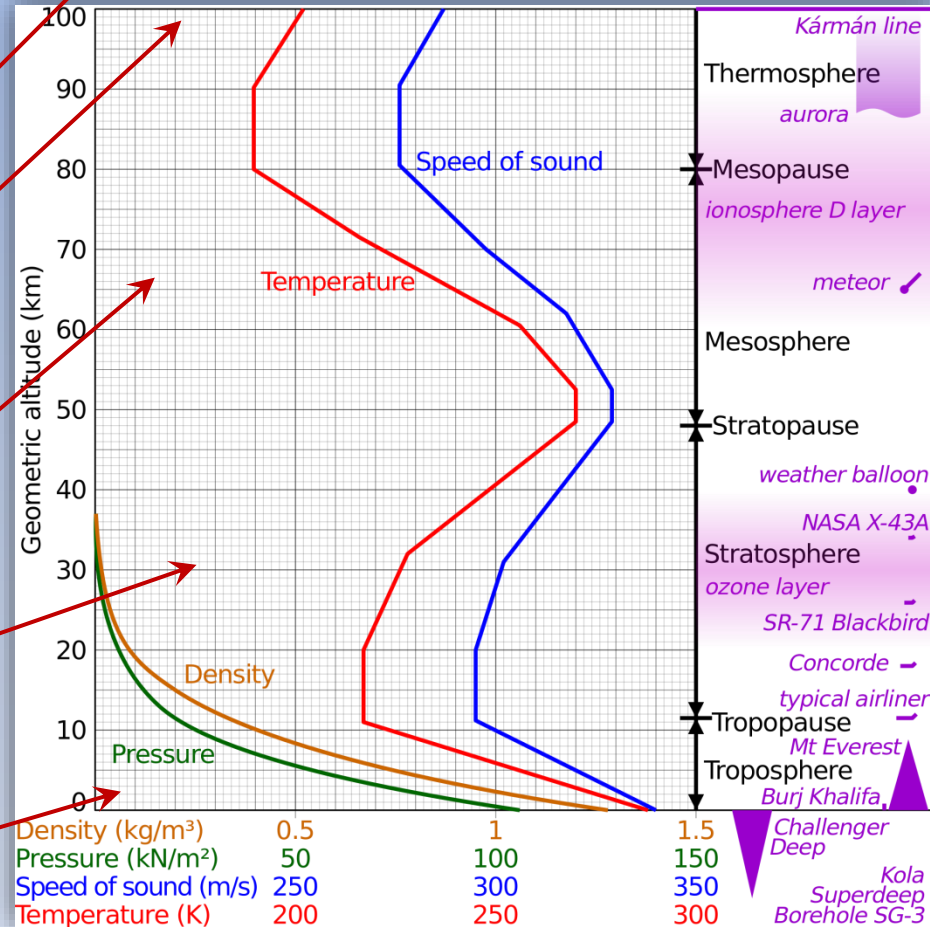


Strukturę termiczną znamy z pomiarów na różnych dł. fali, zakryć gwiazd i lądowników.

Atmosfera

Inne warstwy atmosfery ziemskiej

- *strefa ciszy* – obszar powyżej około 160 km, gdzie zbyt mała gęstość atmosfery uniemożliwia przenoszenie słyszalnych dźwięków.
- *homosfera i heterosfera* – obszary jednorodnego i niejednorodnego składu chemicznego, granica między nimi leży na około 100 km (*turbopauza*)
- *jonosfera* – warstwa zjonizowana (powyżej 80 km)
- *ozonosfera* – warstwa zwiększonej koncentracji ozonu (20 – 30 km)
- *planetarna warstwa graniczna* – warstwa przyziemna będąca pod wpływem powierzchni (0.1 – 2 km)

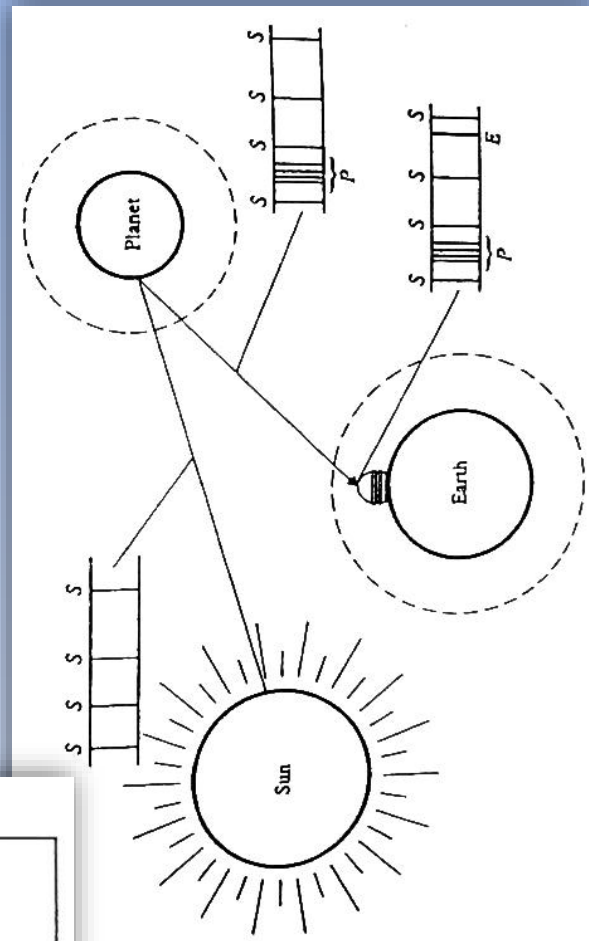
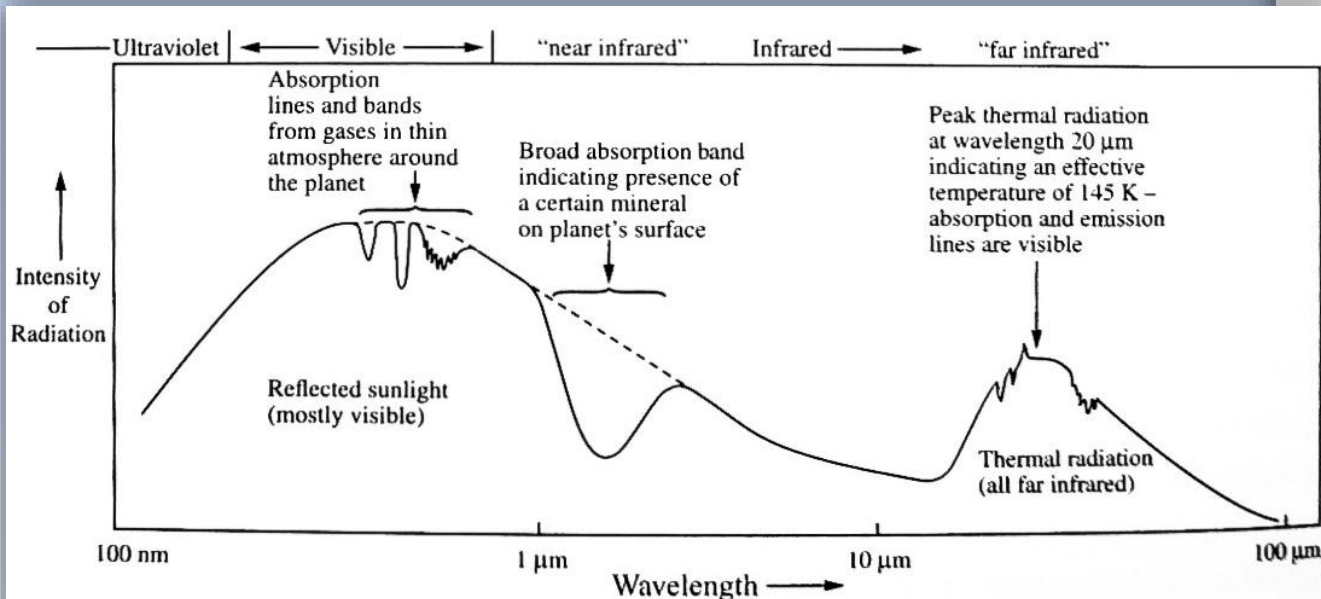


$$H(z) = \frac{kT(z)}{g(z)\mu_a m_u}$$

Atmosfera

Skład chemiczny

- Skład chemiczny atmosfery można zbadać na miejscu (lądownik) lub obserwując widmo planety/księżyca (odbite światło słoneczne, własne promieniowanie ciepłe).
- Położenie, głębokość i kształt linii widmowych niosą informacje nie tylko o składzie chemicznym, ale też o warunkach fizycznych i ruchach w atmosferze.
- Widmo planety/księżyca mierzone na Ziemi zawiera też linie słoneczne i atmosfery ziemskiej.



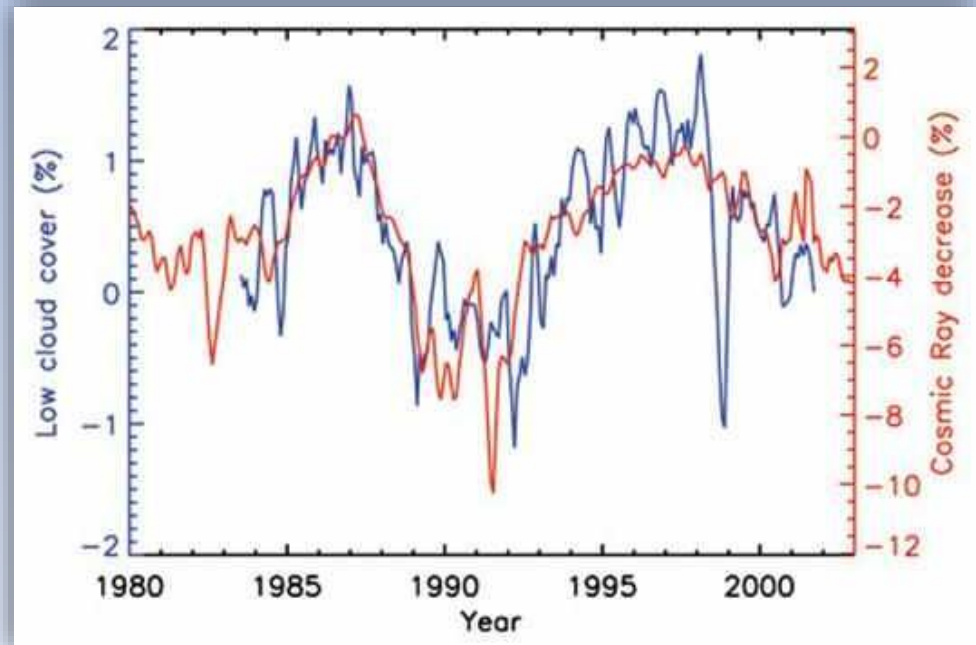
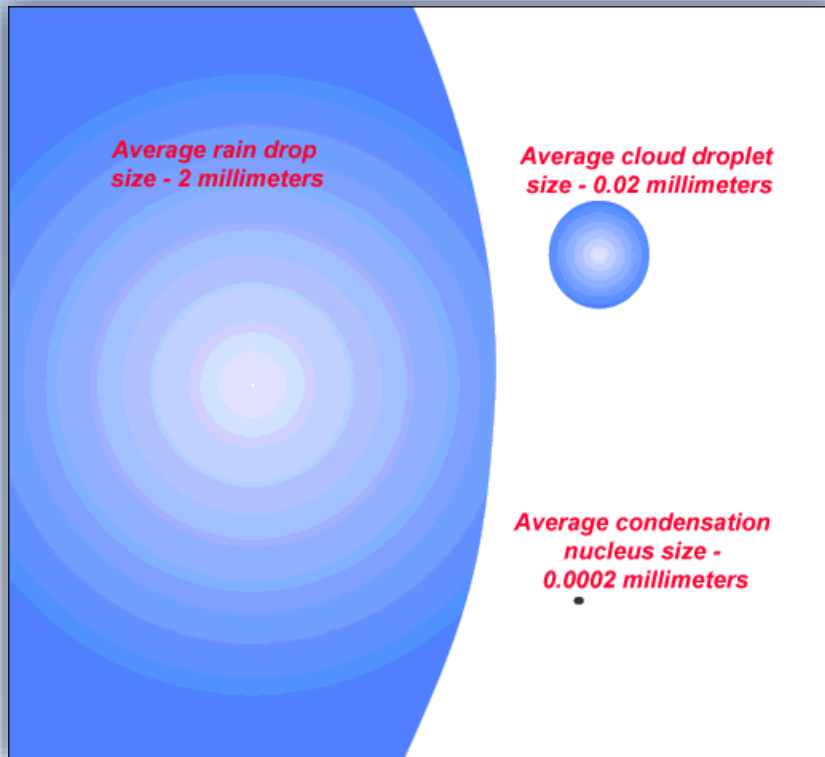
(górze) Schematyczne przedstawienie formowania się widma planety (S – linie widmowe absorpcyjne słoneczne, P – planetarne, E – atmosfery ziemskiej).

(lewo) Schematyczne przedstawienie ogólnego widma planetarnego

Atmosfera

Chmury

- W atmosferze mogą występować masy skondensowanych związków chemicznych (zwykle śladowych) składające się z kropli i/lub kryształków lodu, czyli chmury.
- Powstawanie kropli/kryształków rozpoczyna się od jąder kondensacji (CCN) – jąder na których skrapla się/resublimuje substancja tworząca chmury. Rolę CCN spełniają: pyły (mineralne), sadza, sól morska, smog, naładowane elektrycznie cząsteczki.
- **Chmury odgrywają ważną rolę w bilansie energetycznym powierzchni i atmosfery.**
- Promieniowanie kosmiczne może stymulować powstawanie chmur poprzez tworzenie CCN.



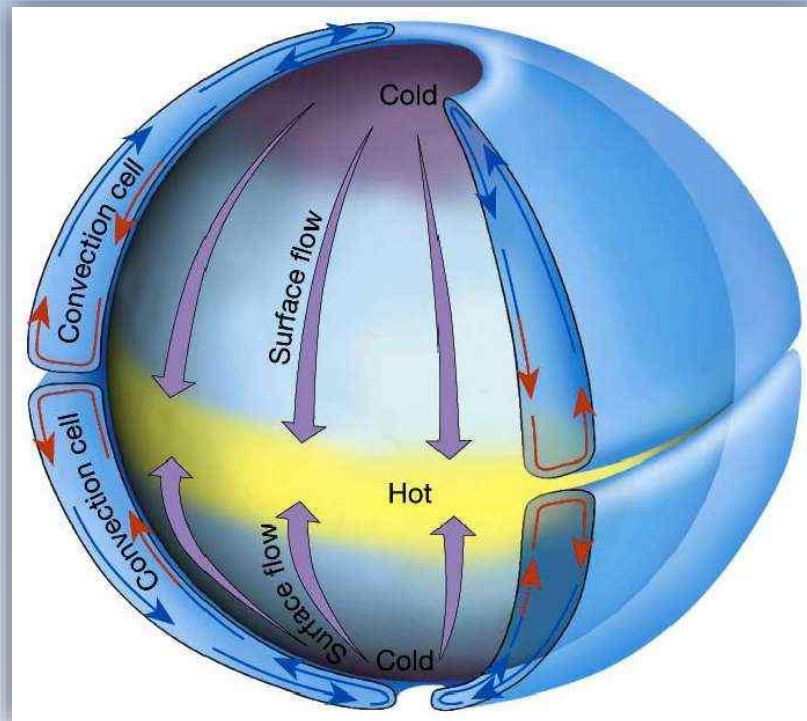
Korelacja między intensywnością promieniowania kosmicznego a ilością chmur niskich obserwowana w latach 1983-2002.

Atmosfera

Globalne ruchy atmosfery

Planeta/księżyc otrzymuje energię od Słońca nierównomiernie przestrzennie (równik – bieguny, strona dzienna – nocna). Powstają gradienty ciśnienia w atmosferze, napędzające ruchy mas powietrza (wiatr). Przykładami globalnych układów wiatru napędzanych energią słoneczną są:

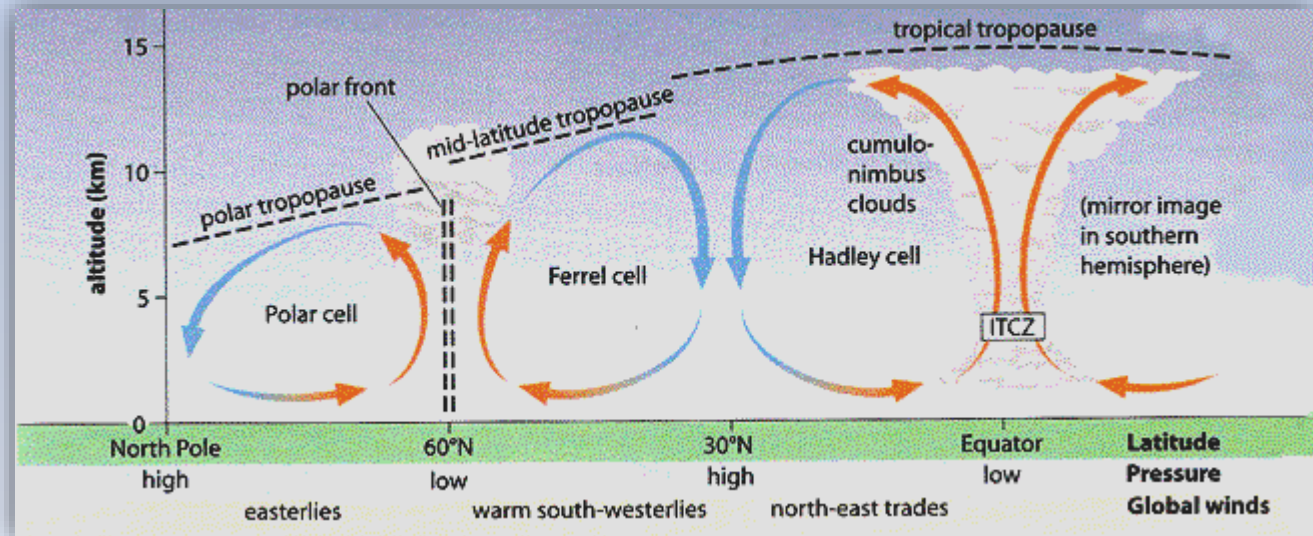
- **cyrkulacja Hadley'a** – powodowana różnym oświetleniem po szerokościach planetograficznych
- dla ciała wolno rotującego o nachyleniu osi obrotu do orbity 90° występują dwie komórki cyrkulacyjne Hadley'a



Atmosfera

Globalne ruchy atmosfery

- **cyrkulacja Hadley'a** – powodowana różnym oświetleniem po szerokościach planetograficznych
- jeśli ciało rotuje szybko, południkowa cyrkulacja jest odchylana w kierunku E-W (siła Coriolisa) a komórki cyrkulacyjne rozpadają się na mniejsze; dla Ziemi jest ich po 3 na każdej półkuli:
 - **komórka Hadley'a** – 0° a 30°N/S . Napędzana bezpośrednio ciepłem powierzchni. Wiatry wracające do równika to pasaty.
 - **komórka Ferrela** – 30°N(S) - 60°N/S . Zależy od cyrkulacji w komórkach sąsiednich. Przy powierzchni przeważają wiatry zachodnie.
 - **komórka biegunowa** – 60°N(S) - 90°N/S . Działa podobnie jak komórka Hadley'a. Wiatry płynące przy powierzchni tworzą strefę wiatrów wschodnich.



Atmosfera

Globalne ruchy atmosfery

Przykłady globalnych układów wiatru napędzanych energią słoneczną:

- *plywy termiczne* – powstają przy dużych różnicach temperatur między dniem a nocą. Wiatry wieją ze strony dziennej cieplej na nocną zimną. Są istotne w rzadkich atmosferach (Mars, termosfera).
- *przeptywy kondensacyjne* – napędzane są cykliczną sublimacją i resublimacją gazu w obszarach polarnych. Na Marsie tym gazem jest CO_2 – resublimuje w zimie na obszarach biegunowych i sublimuje z nastaniem wiosny, powodując zmiany ciśnienia na poziomie 20%.



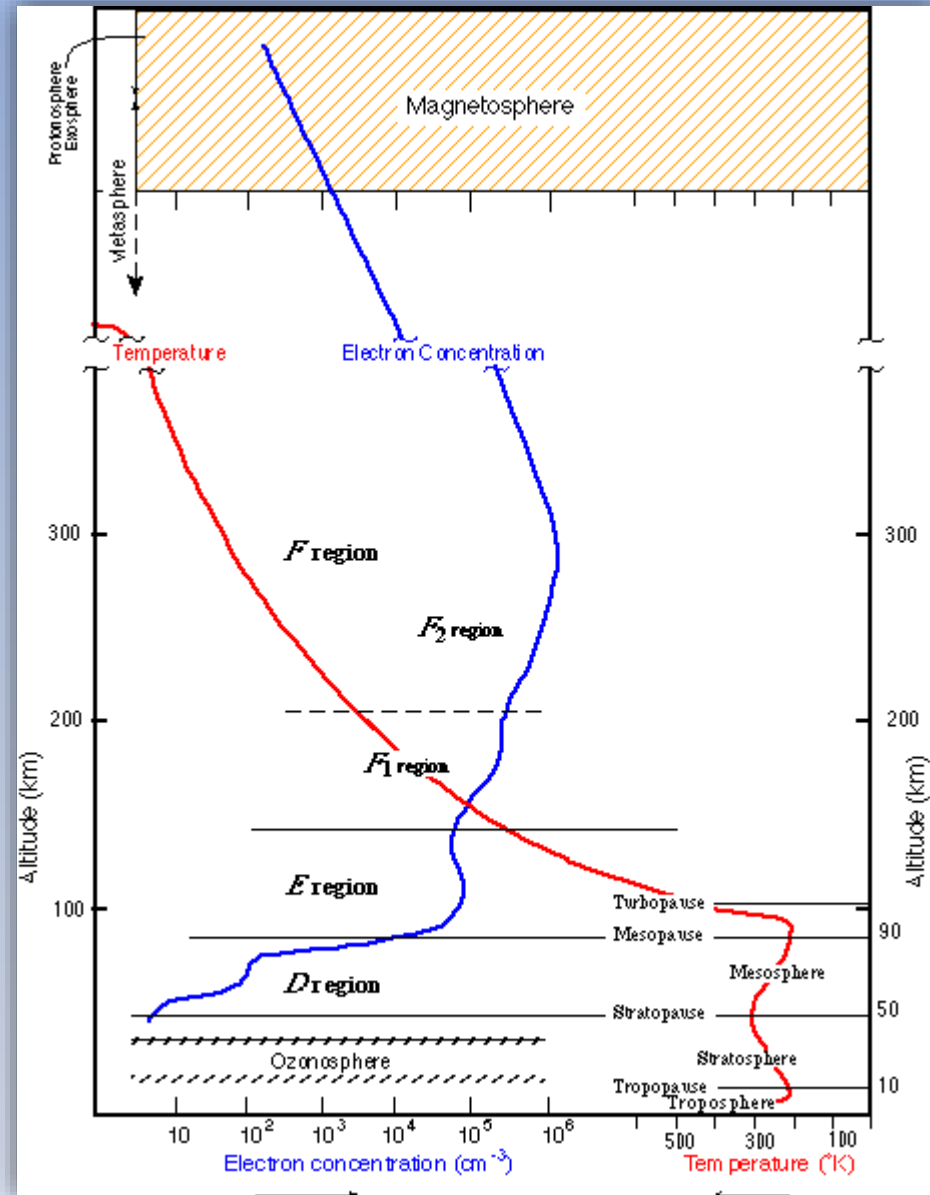
Północna czapa polarna Marsa na koniec zimy (lewo) i w lecie (prawo)

Atmosfera

Jonosfera

Jonosfera to warstwa atmosfery, w której występują wolne elektrony. Ich obecność związana jest z jonizacją atmosfery głównie przez słoneczny UV (<100 nm; inne czynniki: słoneczne prom. X, wiatr słoneczny, promieniowanie kosmiczne, mikrometeoryty, UV od gwiazd) . Jonosfera dzieli się na kilka warstw – efekt zmian składu chemicznego i właściwości absorpcyjnych atmosfery z wysokością. Na przykładzie Ziemi są to:

- **warstwa D** (50 - 90 km) – koncentracja elektronów wynosi $10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$; warstwa zanika zwykle w nocy (z wyjątkiem silnej aktywności słonecznej); powoduje zaburzenia w przesyłaniu fal radiowych

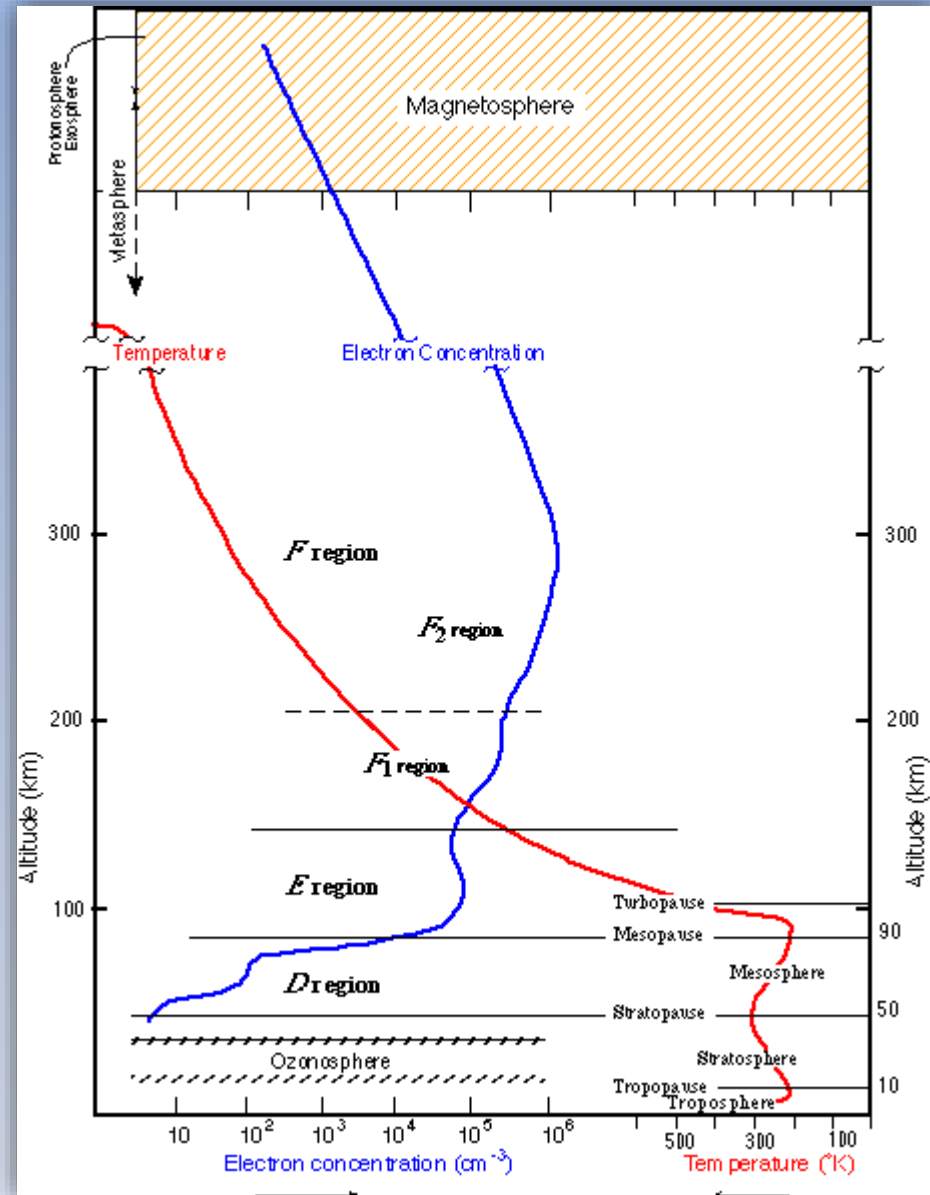


Koncentracja wolnych elektronów w atmosferze Ziemi (linia niebieska).

Atmosfera

Jonosfera

- **warstwa E** (90 - 140 km) – maksymalna koncentracja elektronów wynosi 10^5 cm^{-3} ; warstwa jest słabsza w nocy, ale nie zanika; obecne jony: O_2^+ i NO^+
- **warstwa F** (140 - >500 km) – koncentracja elektronów osiąga 10^6 cm^{-3} ; w ciągu dnia występują dwie warstwy F1 i F2, w nocy jedna - F2; obecne jony: O^+ , H^+ i N_2^+ ; w górnej części przechodzi w magnetosferę; ma decydujące znaczenie przy przesyłaniu fal radiowych na duże odległości

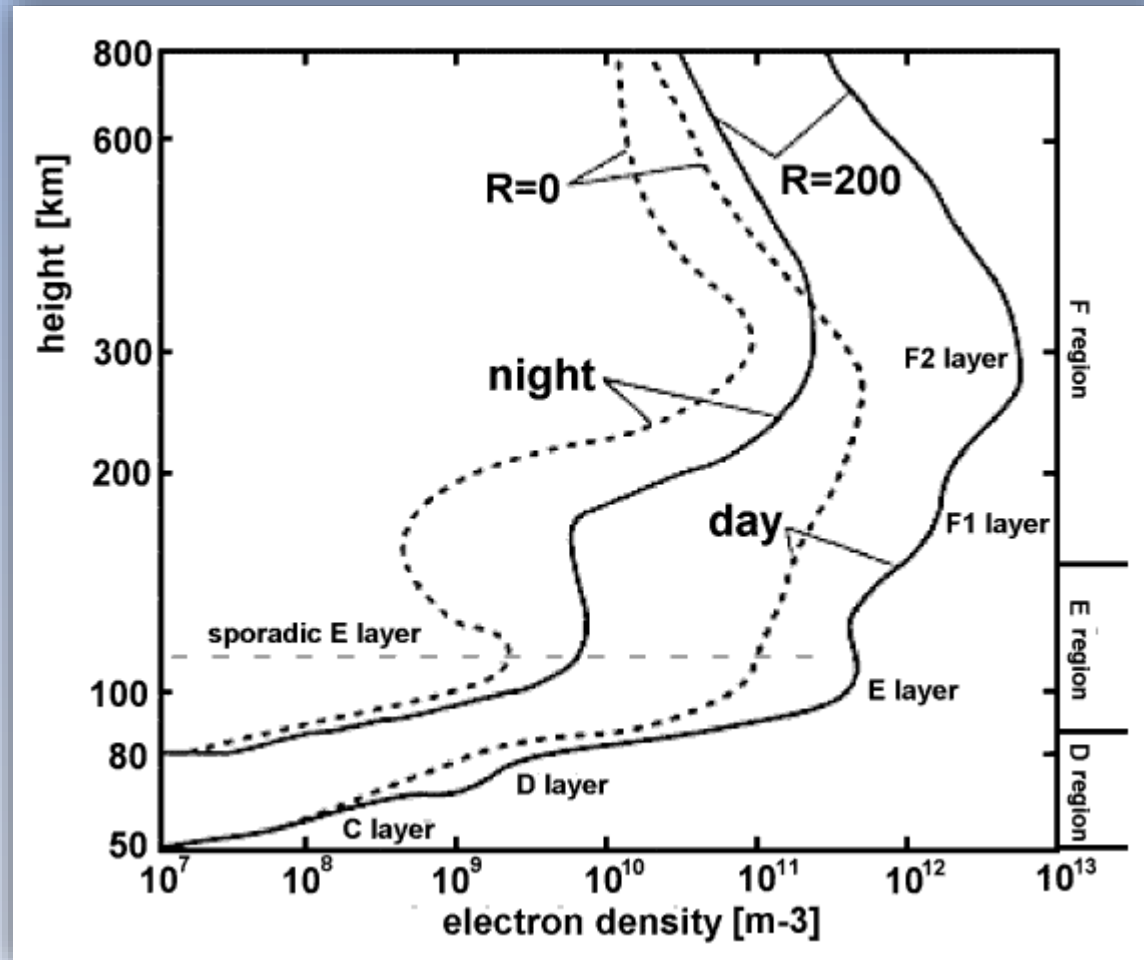


Koncentracja wolnych elektronów w atmosferze Ziemi (linia niebieska).

Atmosfera

Jonosfera

Jonosfera wykazuje zmiany dobowe, roczne i z cyklem słonecznym.



Zmiana liczby wolnych elektronów dzień-noc i z aktywnością Słońca. Aktywność wyrażona jest liczbą Wolfa (R).

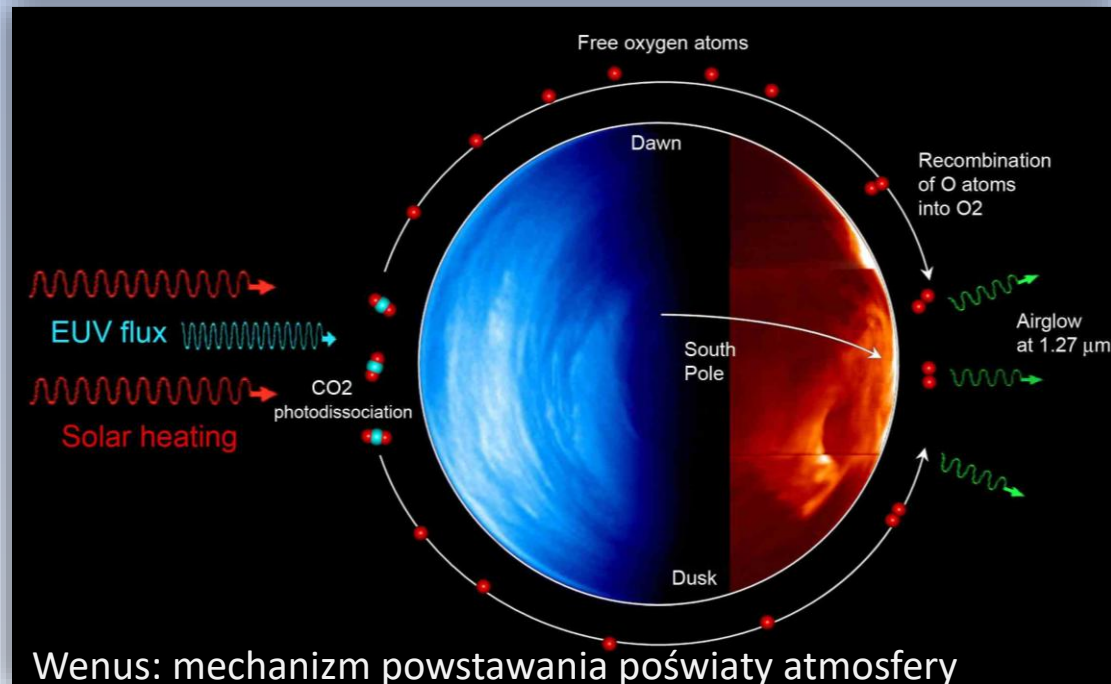
Atmosfera

Poświata atmosfery

Poświata atmosfery (airglow) to słabe świecenie atmosfery na dużych wysokościach. Źródłem są atomy/molekuły wzbudzone słonecznym UV, promieniowaniem kosmicznym lub chemiluminescencją. Zjawisko zaobserwowano też dla innych planet.

Ziemią poświatę atmosfery można dostrzec gołym okiem (ciemna noc). Jest to główny składnik naturalnej jasności nieba nocnego. Stanowi ograniczenie zasięgu astronomicznych obserwacji naziemnych.

Ziemia: poświata atmosfery i zorza, widok z ISS



Venus: mechanizm powstawania poświaty atmosfery

Atmosfery

Poświata atmosfery

Ziemia: poświata atmosfery (zielone światlenie)

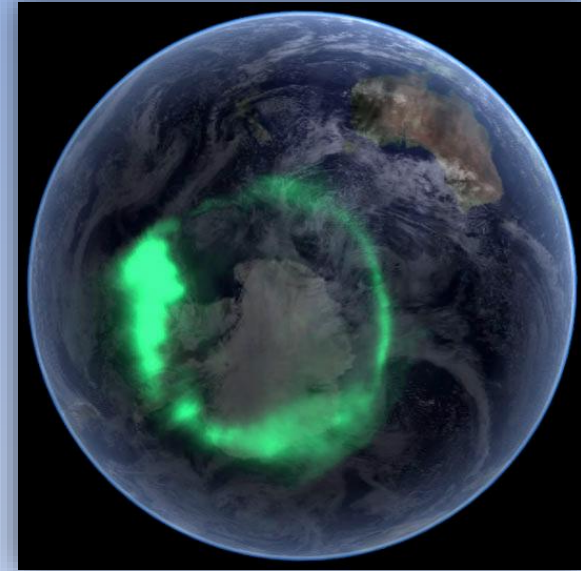


Aaron Watson

Atmosfera

Zorza polarna

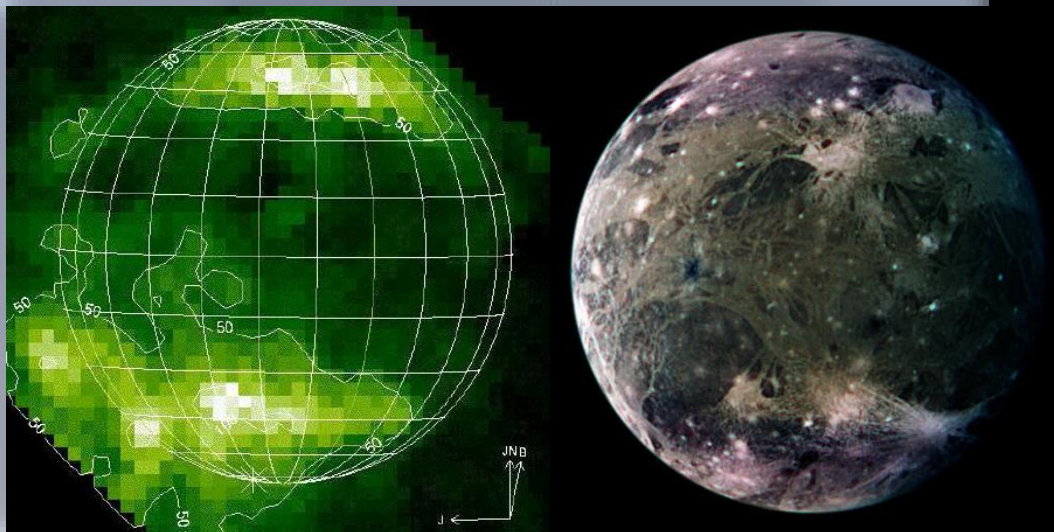
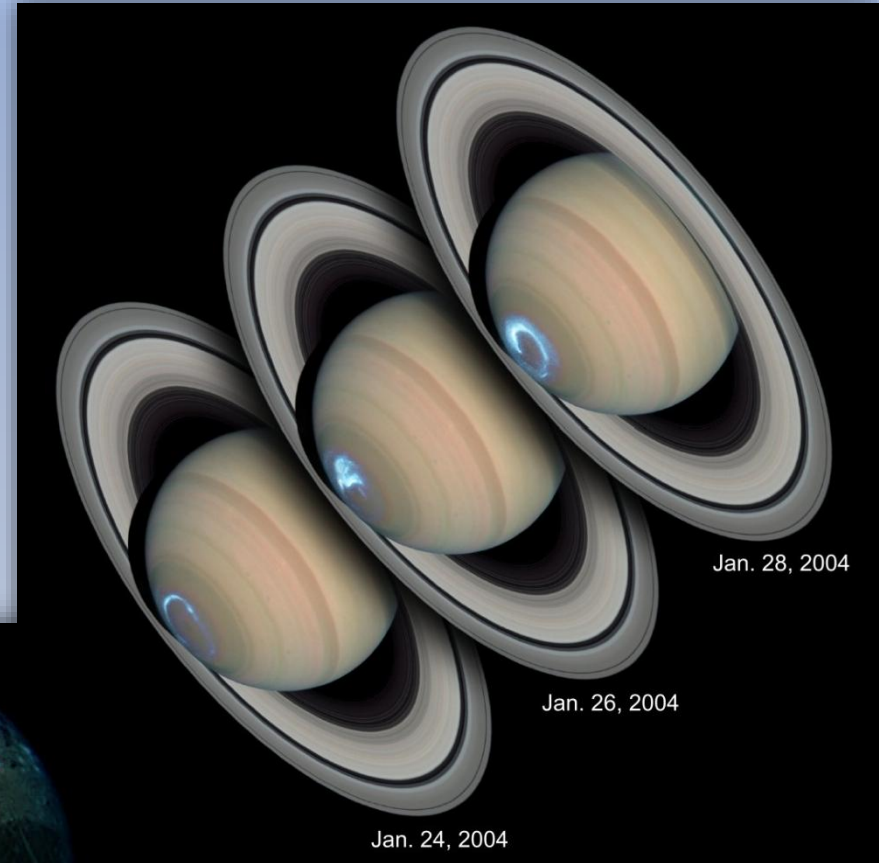
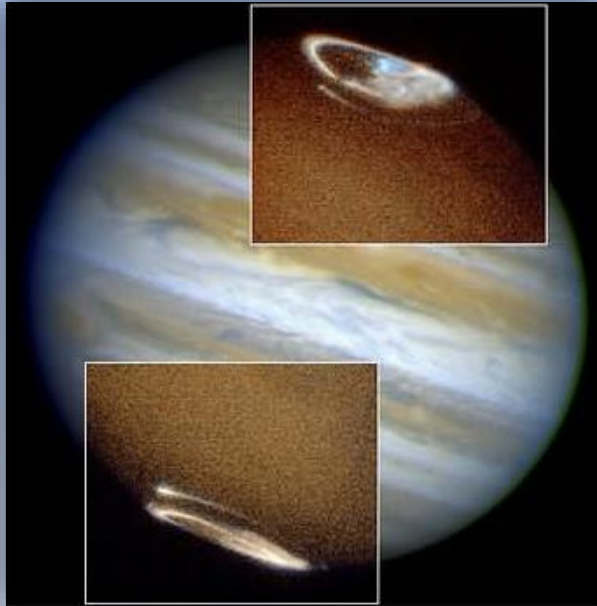
Jest świeceniem atmosfery na dużych wysokościach wywołane przez naładowane cząstki wiatru słonecznego. Cząstki te po uwięzieniu w magnetosferze planety zostają przez nią przyspieszone. W atmosferze powodują wzbudzenia zderzeniowe atomów atmosferycznych. Główna część zorzy ma kształt owalu ze środkiem położonym na biegunie magnetycznym. Widoczna jest od poczerwieni aż po promieniowanie X.



Atmosfera

Zorza polarna

Świecenie zorzowe zaobserwowano też na planetach olbrzymach, Marsie, Io i Ganimedesie.



Owale zorzowe na Jowiszu, Saturnie i Ganimedesie (złożenie zdjęć w świetle widzialnym i UV)

Atmosfera

Zmiany klimatyczne

Klimat to średni stan atmosfery w dłuższych przedziałach czasowych. Jakikolwiek zaburzenie w ilości energii:

- otrzymywanej od Słońca
- wypromieniowanej przez obiekt lub
- zmiana w dystrybucji otrzymanej energii na obiekcie

będzie miało wpływ na klimat

Przyczyny zmian klimatu można podzielić na dwie grupy:

- **zewnętrzne** („astronomiczne”): moc promieniowania Słońca, aktywność słoneczna, cykle Crolla-Milankowicza, eliptyczność orbity, nachylenie osi obrotu.
- **wewnętrzne** („planetarne”): albedo, skład chemiczny i przezroczystość atmosfery, gazy cieplarniane, cyrkulacja atmosferyczna i oceaniczna, wulkanizm, tektonika płyt, obecność organizmów żywych

Pomiędzy tymi mechanizmami występują złożone sprzężenia zwrotne.



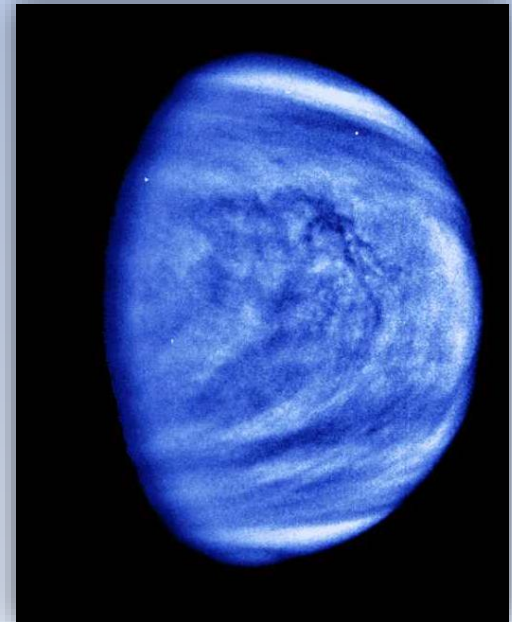
Atmosfery

Powstawanie i ewolucja atmosfer

Ze względu na historię powstania atmosfery dzielą się na:

- **pierwotne** – powstają w czasie formowania się obiektu z substancji lotnych dostarczonych razem z akreowanym materiałem stałym lub z gazu wychwyconego grawitacyjnie (obiekty o dużej masie)
przykłady: atmosfery planet olbrzymów (głównie H, He plus ślady C, N, O w postaci CH_4 , H_2O , NH_3)
- **wtórne** – powstają dzięki odgazowaniu stałego materiału zakreowanego na obiekt (podgrzanie uderzeniowe, formowanie jądra, wulkanizm)
przykłady: atmosfery planet skalistych, Tytan (głównie cięższe pierwiastki i ich związki: N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , CH_4)

Bardzo ważną rolę w tym podziale odgrywa grawitacja – mniej masywne obiekty nie mogą zakreować i utrzymać lekkich gazów.



Atmosfera

Utrata atmosfery

Atmosfery nie są tworami stałymi. Wolniej lub szybciej gazy atmosferyczne wyciekają w przestrzeń. Możliwe mechanizmy ucieczki:

- ucieczka Jeansa (termiczna)
- ucieczka hydrodynamiczna
- erozja zderzeniowa
- wymiana ładunku
- wiatr polarny
- ucieczka dysocjacyjna
- rozpryskiwanie



Atmosfera

Utrata atmosfery – ucieczka Jeansa

Atom/molekuła atmosfery może ją opuścić jeśli:

- jej energia kinetyczna przewyższa energię potencjalną jej związania z planetą oraz
- porusza się po torze w górę bez zderzeń z innymi cząstkami.

Obszar atmosfery, gdzie zachodzi to zjawisko nazywany jest *egzosferą* a jej dolna granica to *egzobaza*.

Energia kinetyczna cząstki związana jest z temperaturą (rozkład Maxwella):

$$E_K = \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{m}{2}\left(\frac{2kT}{m}\right)$$

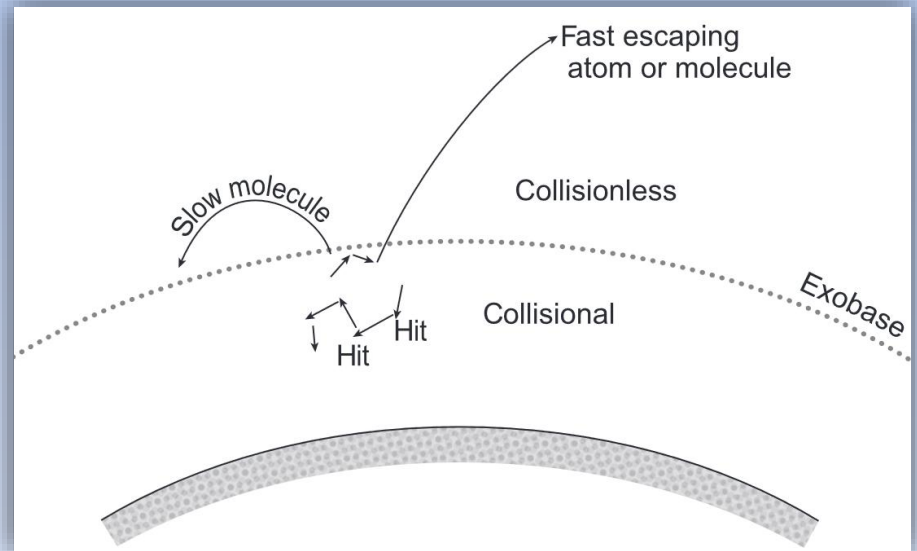
Energia potencjalna na wysokości z na powierzchnią wynosi:

$$E_P = -\frac{GMm}{R+z}$$

Iloraz tych dwu energii nazywany jest *parametrem ucieczki*:

$$\lambda_{esc} = \frac{GMm}{R+z} \cdot \frac{1}{kT} = \left(\frac{v_{esc}}{v_0}\right)^2 \quad v_{esc}^2 = \frac{2GM}{R+z} \quad v_0^2 = \frac{2kT}{m}$$

gdzie v_{esc} to prędkość ucieczki, a v_0 to prędkość najbardziej prawdopodobna rozkładu Maxwella.



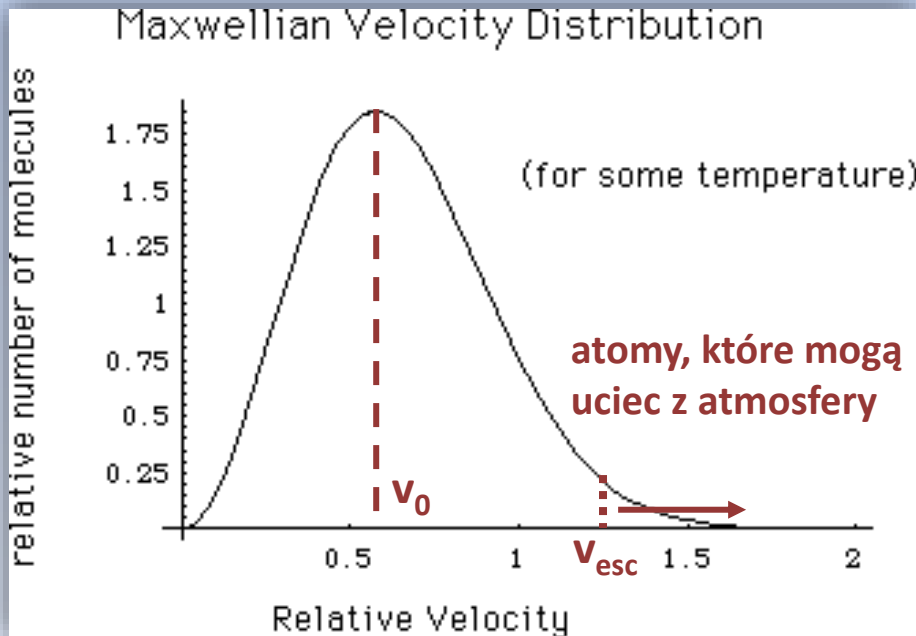
Atmosfery

Utrata atmosfery – ucieczka Jeansa

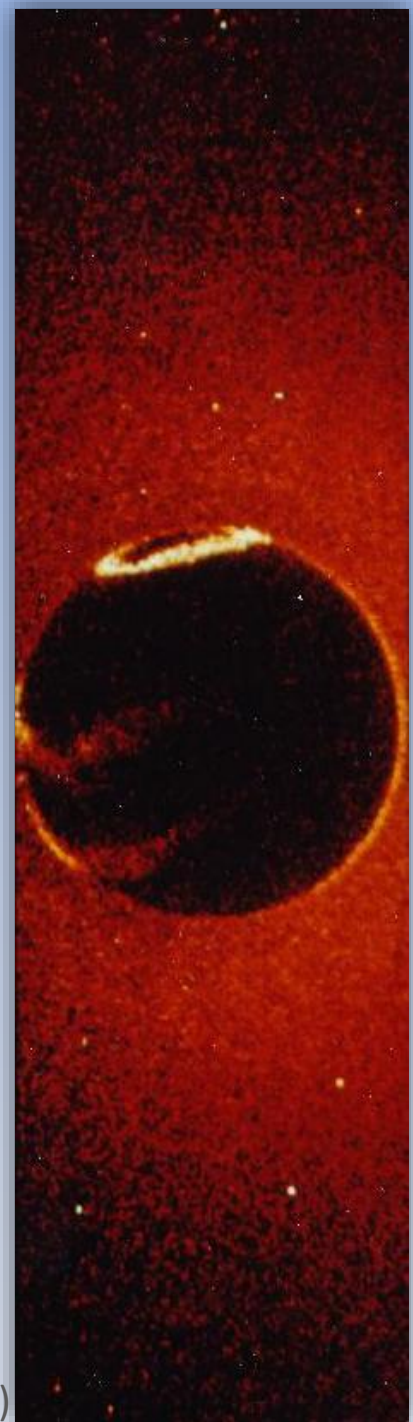
Relacja $v_{esc} > v_0$ nie oznacza, że cząstki nie mogą uciec z atmosfery. Rozkład prędkości sięga do wartości kilkakrotnie większych niż v_0 . Na ucieczkę mają szansę cząsteczki z dalekiego ogona rozkładu.

Dla przykładu wodór ucieka z ziemskiej atmosfery chociaż dla $T=1000K$ (temp. egzosfery):

$$v_0 = 4.07 \text{ km/s} \quad v_{esc} = 10.8 \text{ km/s}$$



Geokorona – świecenie wodoru uciekającego z atmosfery ziemskiej (obraz w UV)



Atmosfery

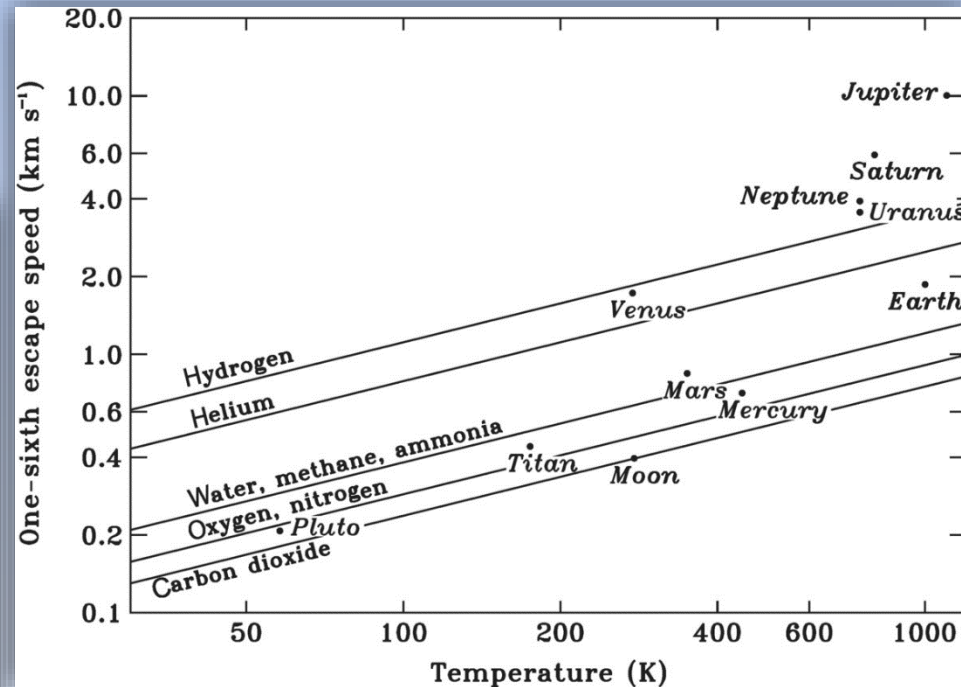
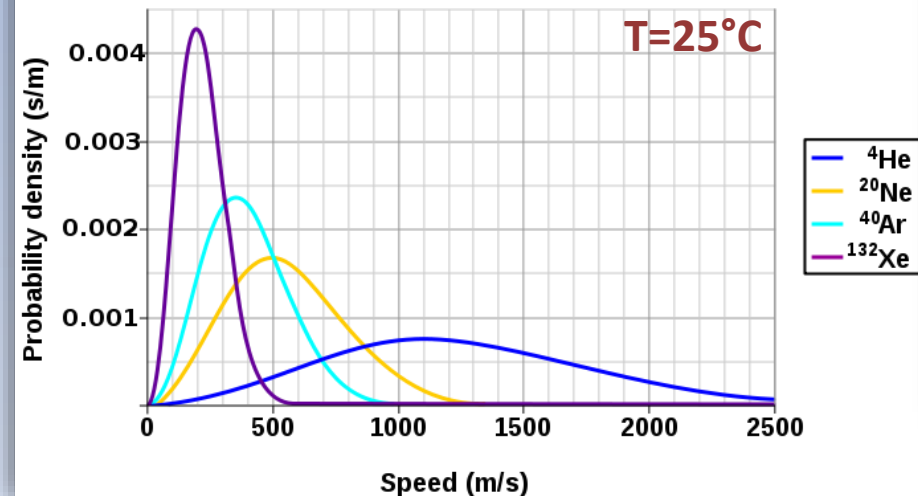
Utrata atmosfery – ucieczka Jeansa

Im lżejszy pierwiastek/związek tym łatwiej wycieka z atmosfery przy danej temperaturze (cecha rozkładu Maxwella).

Podatność na ucieczkę termiczną zależy od temperatury egzosfery i siły grawitacji obiektu.

Maxwell-Boltzmann Molecular Speed Distribution for Noble Gases

$T=25^{\circ}\text{C}$



Porównanie prędkości ucieczki z wybranymi obiektami z prędkością ruchów termicznych wybranych gazów. Temp. odnosi się do śr. temperatury egzosfery. Prędkość ucieczki jest podzielona przez 6. Ukośne linie pokazują śr. prędkość molekuł gazu w danej temperaturze. Dany gaz nie jest podatny na ucieczkę Jeansa, jeśli jego linia przebiega poniżej punktu planety.

Atmosfery

Utrata atmosfery – ucieczka Jeansa

Całkując rozkład Maxwella po prędkościach skierowanych do góry nad poziomem egzobazy otrzymamy strumień uciekających cząstek (**równanie Jeansa**):

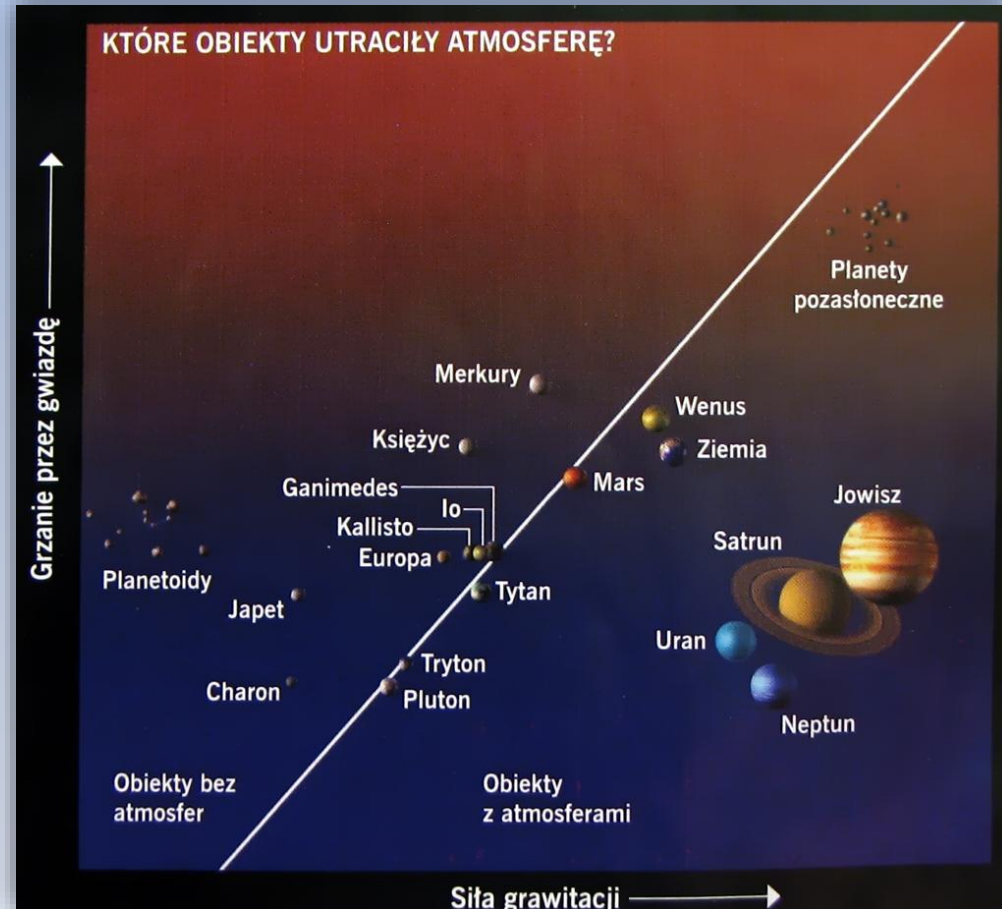
$$\Phi_J = \frac{N_{eg} v_0}{2\sqrt{\pi}} (1 + \lambda_{esc}) \exp(-\lambda_{esc})$$

N_{eg} – koncentracja cząstek na poziomie egzobazy. Równanie pozwala oszacować czy dany obiekt ma szansę utrzymać atmosferę.

Dla wodoru w ziemskiej atmosferze:

$$\lambda_{esc} \approx 8 \quad \Phi_J \approx 6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Wykres przyspieszenie grawitacyjne obiektu – strumień promieniowania słonecznego docierającego do obiektu. Obiekty bez i z atmosferami tworzą dwie rozdzielne grupy (oddzielone linią). Dzieje się tak, ponieważ w pierwszym przybliżeniu o utrzymaniu atmosfery decyduje grawitacja obiektu i temperatura atmosfery (prędkość cząstek atmosferycznych).

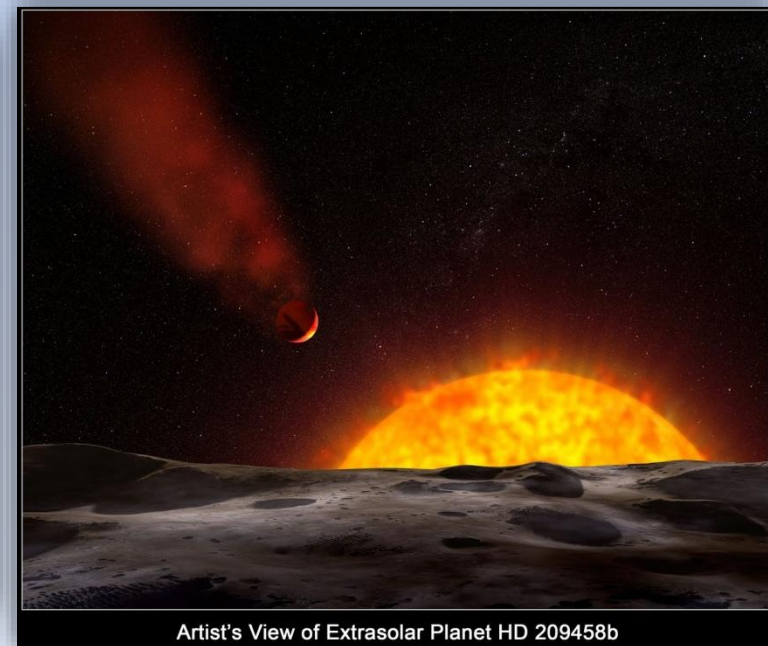
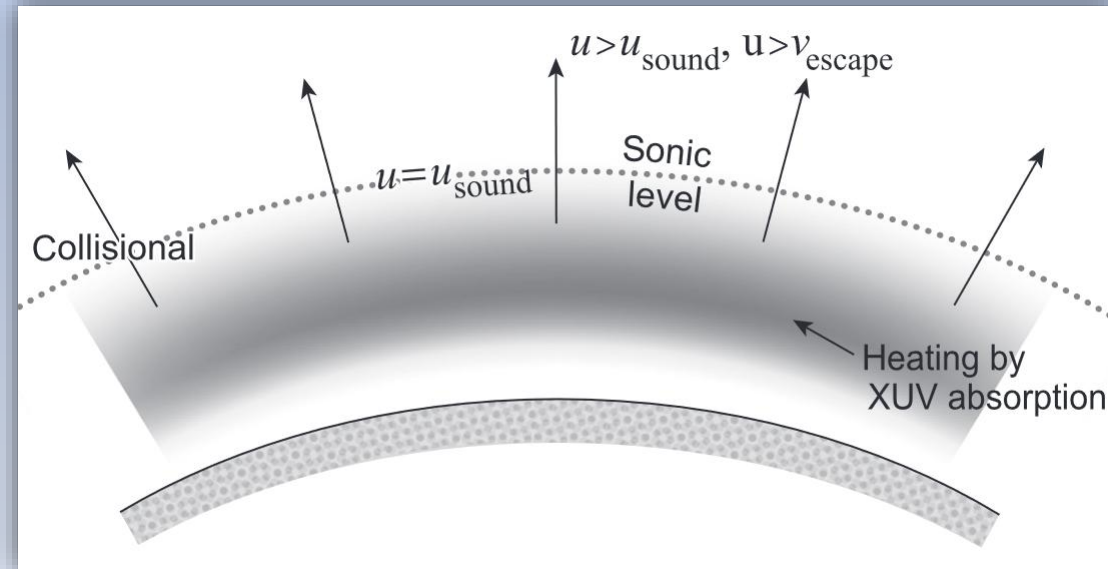


Atmosfera

Utrata atmosfery – ucieczka hydrodynamiczna

Jeśli atmosfera jest dostatecznie podgrzewana przez Słońce to zaczyna się ona zachowywać jak korona słoneczna – przestaje być w równowadze hydrostatycznej, rozpręża się w przestrzeń powodując powstanie wypływu zwanego wiatrem planetarnym. Najłatwiej temu procesowi podlega wodór. Jednak może on ze sobą unosić inne atomy/molekuły.

Obecnie w Układzie Słonecznym mechanizm ten (chyba) nie występuje. Miał duże znaczenie dla planet skalistych na początku ich istnienia (silniejsze UV Słońca). Jest ważny dla planet pozasłonecznych leżących blisko gwiazd macierzystych.



Atmosfery

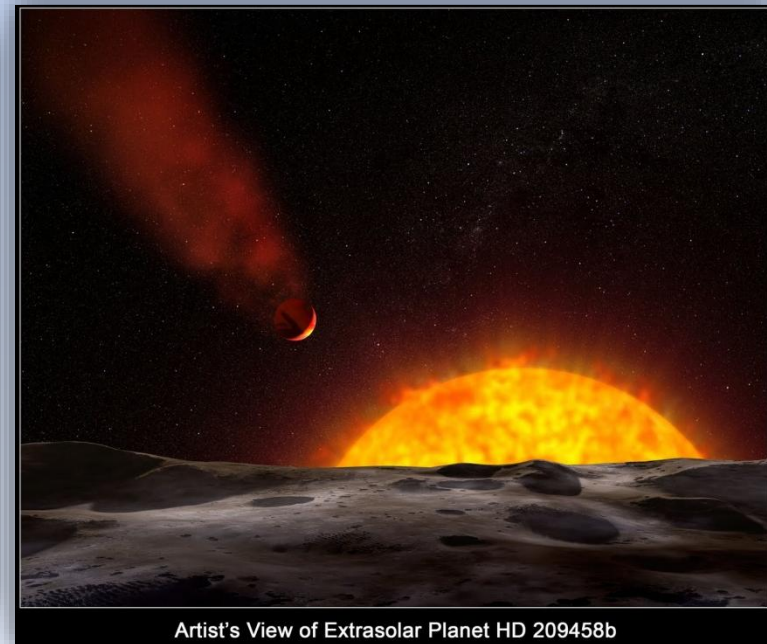
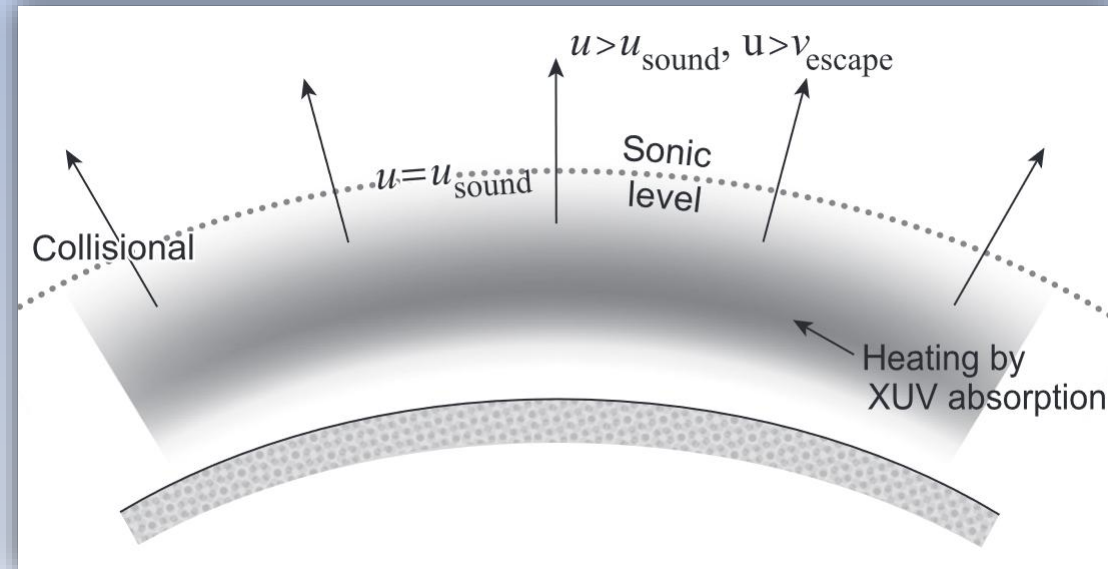
Utrata atmosfery – ucieczka hydrodynamiczna

Przyjmując pewne uproszczenia można oszacować strumień cząstek podlegających ucieczce hydrodynamicznej (Watson i in. 1981):

$$\Phi = \frac{F_{XUV} R_p R_{XUV}^2}{GM_p} \quad [\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

gdzie: F_{XUV} – strumień fotonów w zakresie fal silnie pochłanianych przez atmosferę, R_{XUV} – efektywny promień, na którym zachodzi absorpcja, R_p – promień planety, M_p – masa planety.

Dokładniejsze oszacowania pokazują, że powyższe należy traktować jako górną granicę.



Atmosfera

Utrata atmosfery – erozja uderzeniowa

Zderzenia z dużymi ciałami prowadzą do wyrzucenia w przestrzeń części atmosfery. Zderzenie powoduje lokalne podgrzanie atmosfery do wysokich temperatur i przekazuje cząstkom energię kinetyczną intruza. Materia wyrzucona z krateru może dodatkowo przyspieszyć gaz atmosferyczny (tylko największe zderzenia). Najgroźniejsze dla atmosfery są ciała o rozmiarze przekraczającym skalę wysokości atmosfery (brak hamowania intruza).

Masa wyrzucona przy zderzeniu:

$$M = \pi R^2 \frac{P_0}{g_p} \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{v_i^2}{v_e^2 (1 + \varepsilon_v)}$$

przekrój czynny intruza

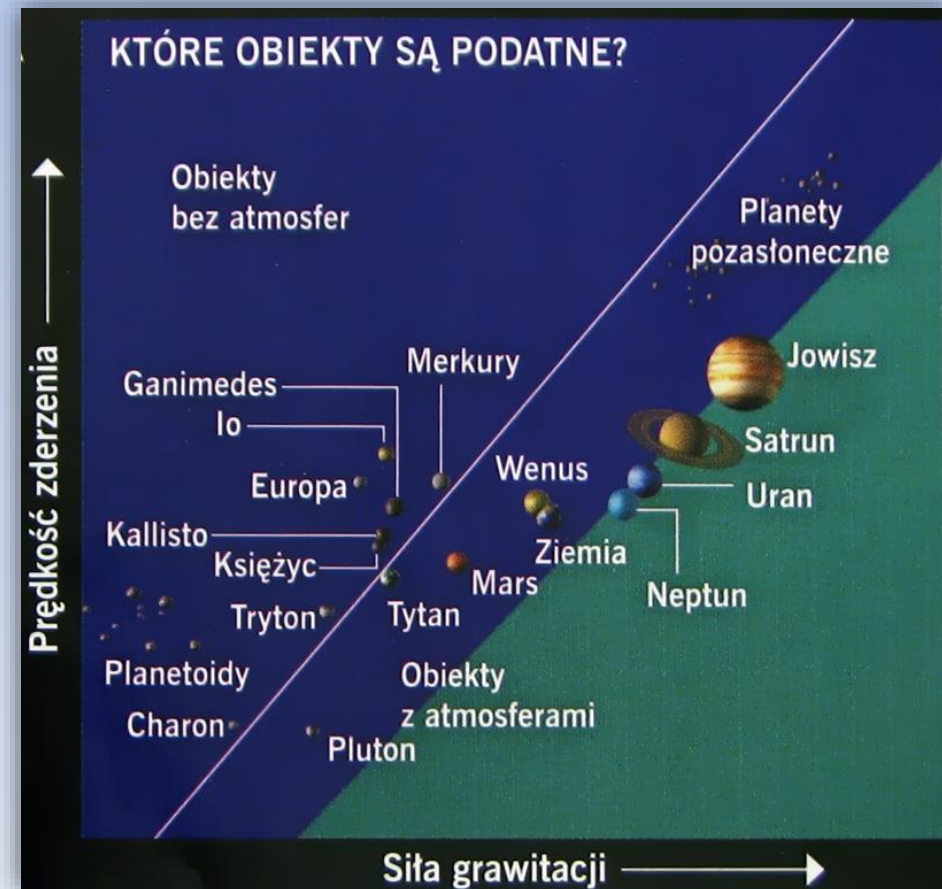
masa kolumnowa atmosfery

czynnik wzmacniający

prędkość zderzenia (v_i) oraz ucieczki (v_e)

obciążenie odparowaniem $\propto (\text{ciepło parowania})^{-1}$

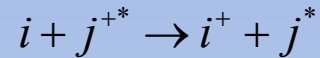
$\varepsilon_v \approx 20$



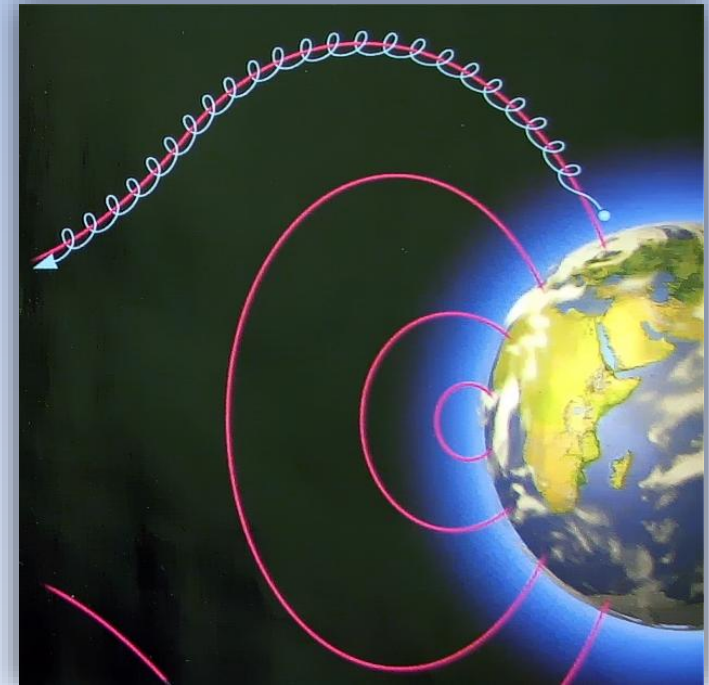
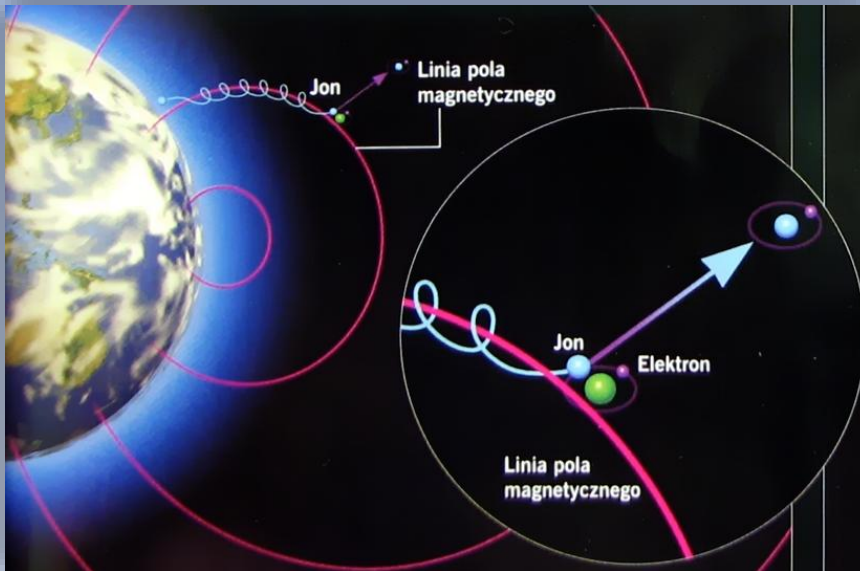
Atmosfera

Utrata atmosfery – wymiana ładunku

Proces polega na wymianie ładunku między cząstkami bez wymiany energii kinetycznej:



Umożliwia on ucieczkę szybkich jonów trzymanyh polem magnetycznym.



Utrata atmosfery – wiatr polarny

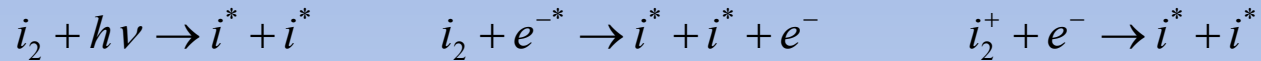
W jonosferze zachodzi proces separacji pionowej jonów i elektronów, co prowadzi do powstania wertykalnego pola elektrycznego przyspieszającego jony w górę. W okolicy biegunów jony te mogą swobodnie uciec (otwarte linie pola mag.) tworząc wiatr polarny.

i, j – atom neutralny i_2 – molekuła
 i^+, j^+ – jon e^- – elektron $h\nu$ – foton
 $*$ – jon, atom, elektron z większą energią kinetyczną

Atmosfera

Utrata atmosfery – ucieczka dysocjacyjna

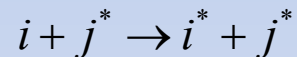
Zachodzi, gdy molekuła ulega dysocjacji po działaniem słonecznego UV, szybkiego elektronu lub przy rekombinacji:



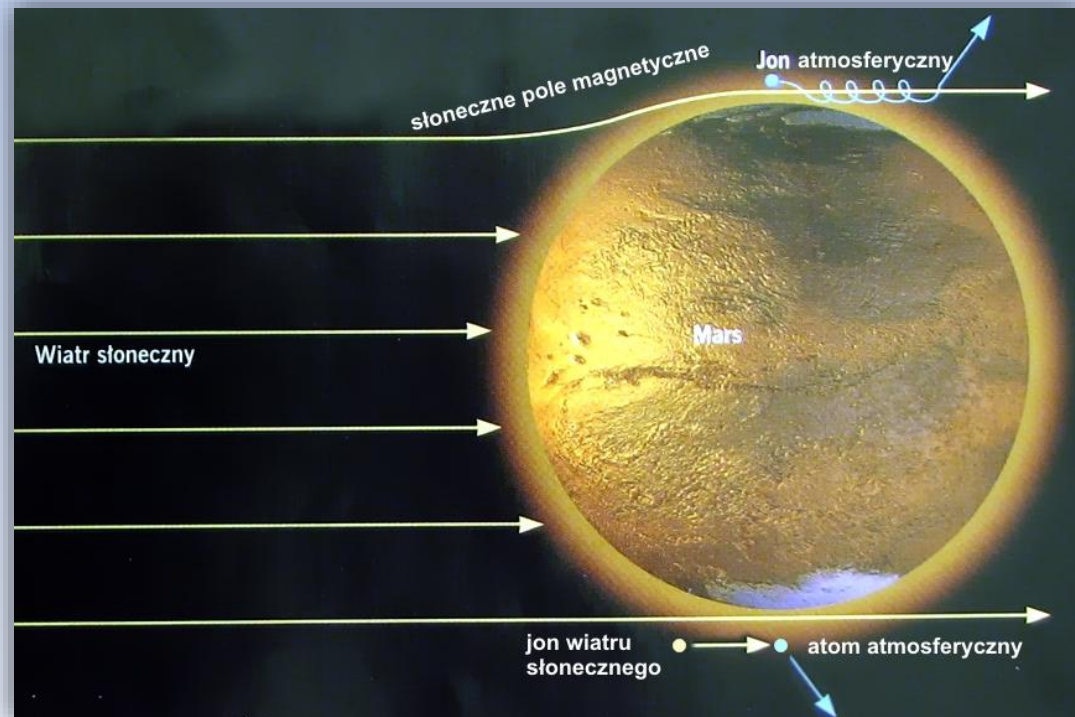
Końcowe produkty tych reakcji mogą uzyskać prędkość ucieczki.

Utrata atmosfery – rozpryskiwanie

Proces polega na przekazywaniu energii atomom atmosferycznym przez szybkie jony lub atomy:



Mechanizm ten działa wydajnie w atmosferach obiektów pozbawionych własnego pola magnetycznego – **rozpryskiwanie przez wiatr słoneczny**. Dodatkowo pole magnetyczne wiatru może unosić jony z atmosfery.



Atmosfera

Utrata atmosfery – różne obiekty

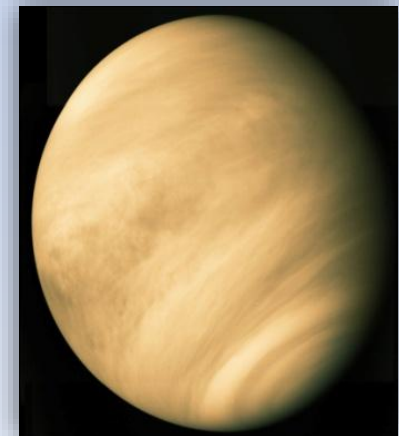
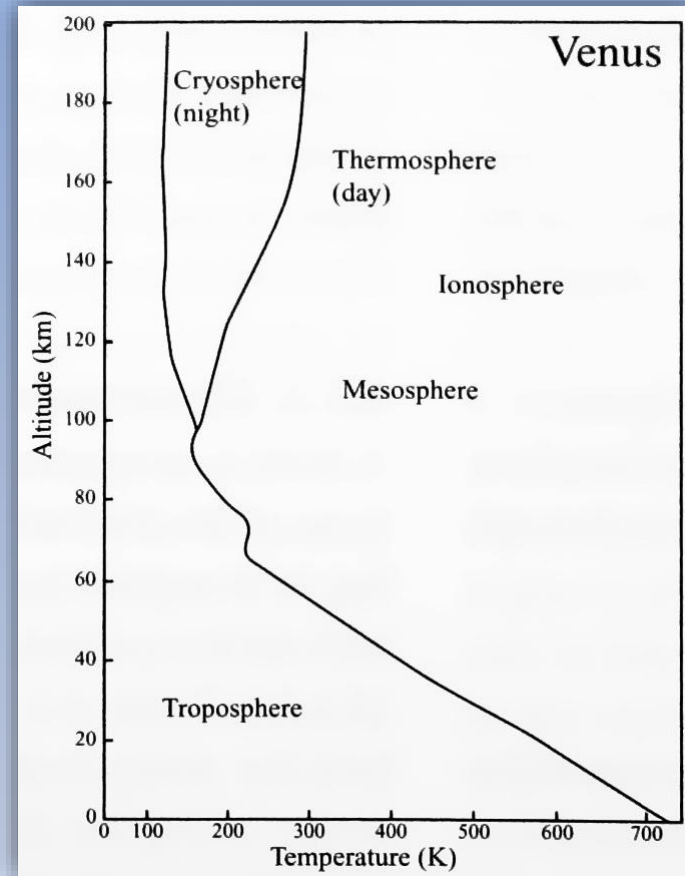
OBIEKT	OKRES	TRACONE GAZY	TERMICZNE		NIETERMICZNE				UDERZENIA
			UCIECZKA JEANSA	UCIECZKA HYDRO-DYNAMICZNA	WYMIANA ŁADUNKU	WIATR POLARNY	FOTOCHEMICZNE	ROZPRYSKIWANIE	
Ziemia 	Obecnie	Wodór	✓		✓	✓			
		Hel			✓	✓			
	Pierwotnie	Wodór, neon		✓					
Wenus 	Obecnie	Wodór, hel			✓			✓	
	Pierwotnie	Wodór, tlen		✓					
Mars 	Obecnie	Wodór	✓						
		Węgiel, tlen, azot, argon					✓	✓	
	Pierwotnie	Wszystkie gazy							✓
		Wodór, ditlenek węgla		✓					
Księżyc Jowisza 	Pierwotnie	Wszystkie gazy		✓					✓
Tytan 	Obecnie	Wodór	✓					✓	
		Metan, azot		?				✓	✓
	Pierwotnie	Wodór, metan, azot		✓					
Pluton 	Obecnie	Wodór, metan, azot		?					
HD 209458b	Obecnie	Wodór, węgiel, tlen		✓					

Atmosfera

Atmosfery ciał Układu Słonecznego

Wenus

- *ciśnieniowa skala wysokości H_0* : 16 km
- *struktura termiczna*: troposfera do 65 km, mezosfera do 90 km, powyżej termosfera (dzień) lub kriosfera (noc)
- *skład chemiczny*: CO_2 , N_2 i śladowe ilości Ar, H_2O , CO, SO_2 , H_2SO_4 (atmosfera wtórna)
- *chmury*: grube optycznie złożone z H_2SO_4 , położone na wys. 45 - 70 km, opad nie sięga powierzchni
- *globalna cyrkulacja atmosfery*: jedna komórka cyrkulacyjna Hadley'a na półkulę, na wyższych wysokościach silne pływy termiczne między termo- a kriosferą
- *jonosfera*: maks. koncentracja elektronów $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ na wysokości 140 km
- *ewolucja*:
 - wcześniej: utrata większości wody, gromadzenie CO_2 w atmosferze, wyrost efektu cieplarnianego
 - obecnie: powolna utrata H, He (wymiana ładunku, rozpryskiwanie)

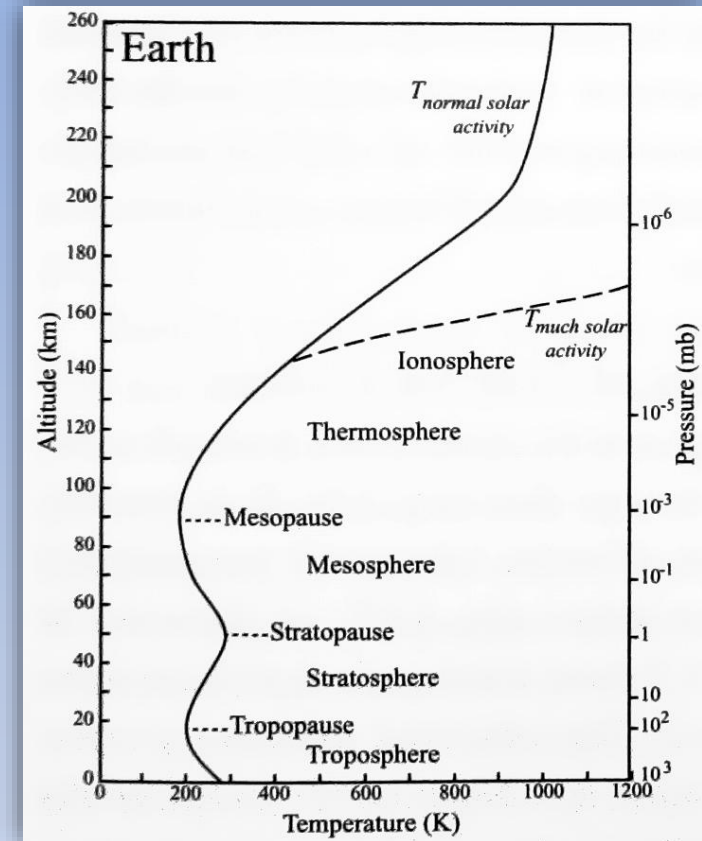


Atmosfery

Atmosfery ciał Układu Słonecznego

Ziemia

- *ciśnieniowa skala wysokości H_0* : 8.5 km
- *struktura termiczna*: troposfera do 15 km, stratosfera do 50 km, mezosfera do 85 km, powyżej termosfera
- *skład chemiczny*: O_2 , N_2 i śladowe ilości Ar, H_2O , CO_2 , Ne, CH_4 (atmosfera wtórna)
- *chmury*: złożone z H_2O , położone głównie w troposferze
- *globalna cyrkulacja atmosfery*: trzy komórki cyrkulacyjne na półkulę, prądy strumieniowe na granicy komórek na poziomie tropopauzy
- *jonosfera*: maks. koncentracja elektronów $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ na wysokości 300 km
- *ewolucja*:
 - wcześniej: biologiczny wzrost stężenia O_2 w atmosferze
 - obecnie: powolna utrata H, He (ucieczka termiczna, wymiana ładunku, wiatr polarny)

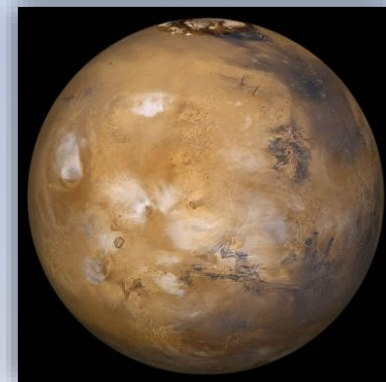
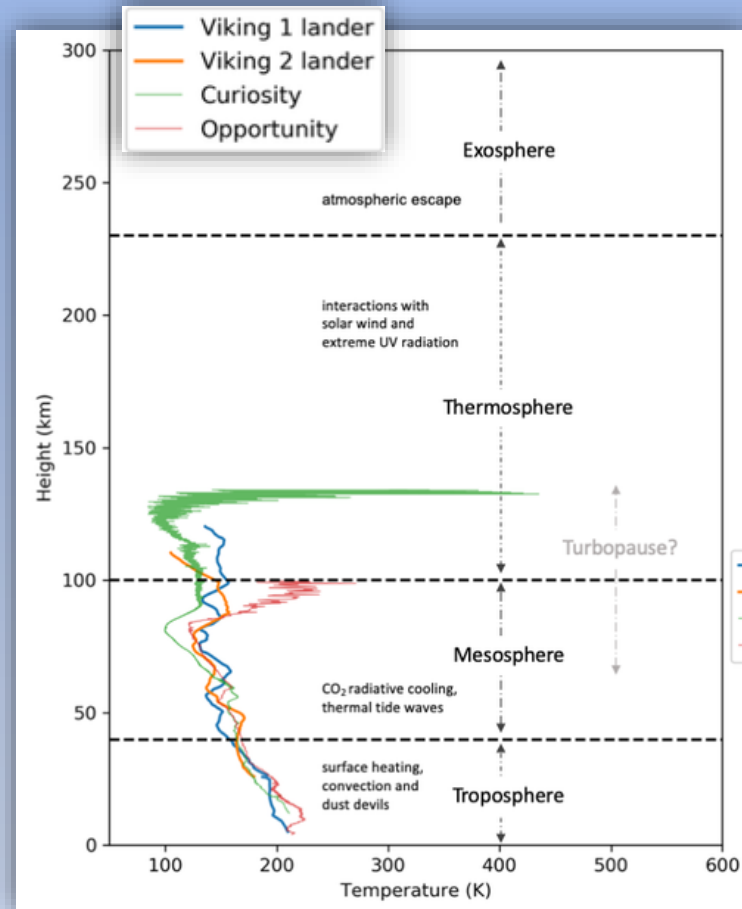


Atmosfera

Atmosfery ciał Układu Słonecznego

Mars

- *ciśnieniowa skala wysokości H_0* : 11 km
- *struktura termiczna*: troposfera, mezosfera do ~120 km, powyżej termosfera, znaczne wahania dobowe T w troposferze
- *skład chemiczny*: CO_2 , N_2 , Ar i śladowe ilości H_2O , CO, O_2 (atmosfera wtórna)
- *chmury*: cienkie optycznie złożone z lodu: H_2O na wysokości ~10 km oraz CO_2 na wysokości ~50 km
- *globalna cyrkulacja atmosfery*: cyrkulacja Hadley'a, pływy termiczne i przepływy kondensacyjne
- *jonosfera*: maks. koncentracja elektronów $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ na wysokości 140 km
- *ewolucja*:
 - wcześniej: znaczny ubytek atmosfery poprzez erozję zderzeniową
 - obecnie: dalsza utrata nawet cięższych pierwiastków (C, N, O; ucieczka dysocjacyjna i termiczna, rozpryskiwanie wiatrem słonecznym)

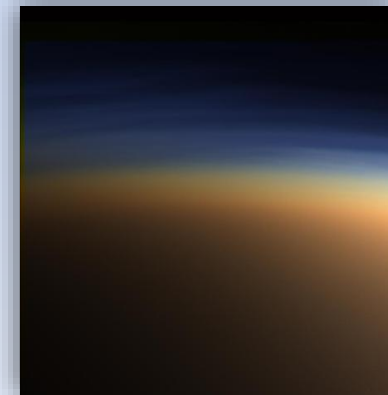
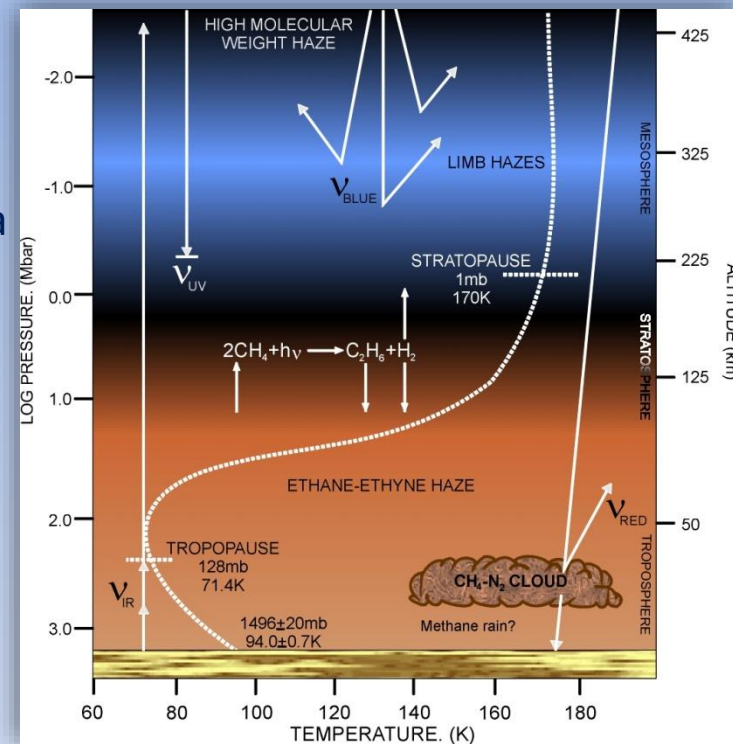


Atmosfery

Atmosfery ciał Układu Słonecznego

Tytan

- *ciśnieniowa skala wysokości H_0* : 20 km
- *struktura termiczna*: troposfera do 44 km, stratosfera do 250 km, mezosfera do 500 km, powyżej termosfera
- *skład chemiczny*: N_2 , Ne, H, CH_4 i inne węglowodory w ilościach śladowych (atmosfera wtórna)
- *chmury*: metanowe/etanowe w troposferze, mgła i smog węglowodorowy w strato- i mezosferze
- *globalna cyrkulacja atmosfery*: duża komórka cyrkulacyjna między biegunem letnim a zimowym
- *jonosfera*: jest, koncentracja elektronów $<10^4 \text{ cm}^{-3}$
- *ewolucja*:
 - wcześniej: ubytek atmosfery poprzez ucieczkę hydrodynamiczną
 - obecnie: utrata głównych składników atmosfery poprzez ucieczkę termiczną, rozpryskiwanie wiatrem słonecznym i erozję zderzeniową



Atmosfery

Atmosfery ciał Układu Słonecznego

planety olbrzymy

- *ciśnieniowa skala wysokości H_{1bar}* : 25 - 45 km
- *struktura termiczna*: troposfera od poziomu 50 - 200 mbar, stratosfera do ~ 1 mbar, powyżej izotermiczna mezosfera i termosfera ze wzrostem T
- *skład chemiczny*: H, He, w ilościach śladowych lody astrofizyczne, węglowodory, gazy szlachetne (atmosfera pierwotna)
- *chmury*: złożone z lodów astrofizycznych, kilka warstw; górna widoczna to NH_3 (J, S) i CH_4 (U, N)
- *globalna cyrkulacja atmosfery*: wiatry strefowe o wysokiej prędkości
- *jonosfera*: maksymalna koncentracja elektronów $10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ na wysokości 1000 – 2000 km na poziomie 1 bar

