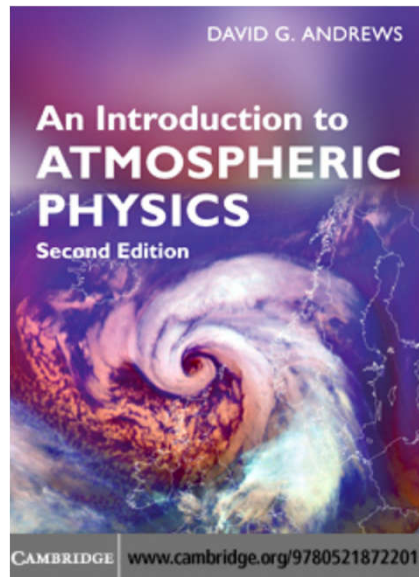
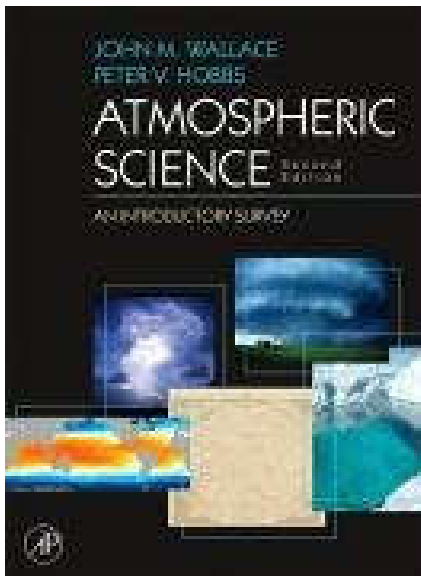


Fizyka i Chemia Atmosfery

Wykład 5: Struktura atmosfery

Część I - stratyfikacja

Grzegorz Karwasz



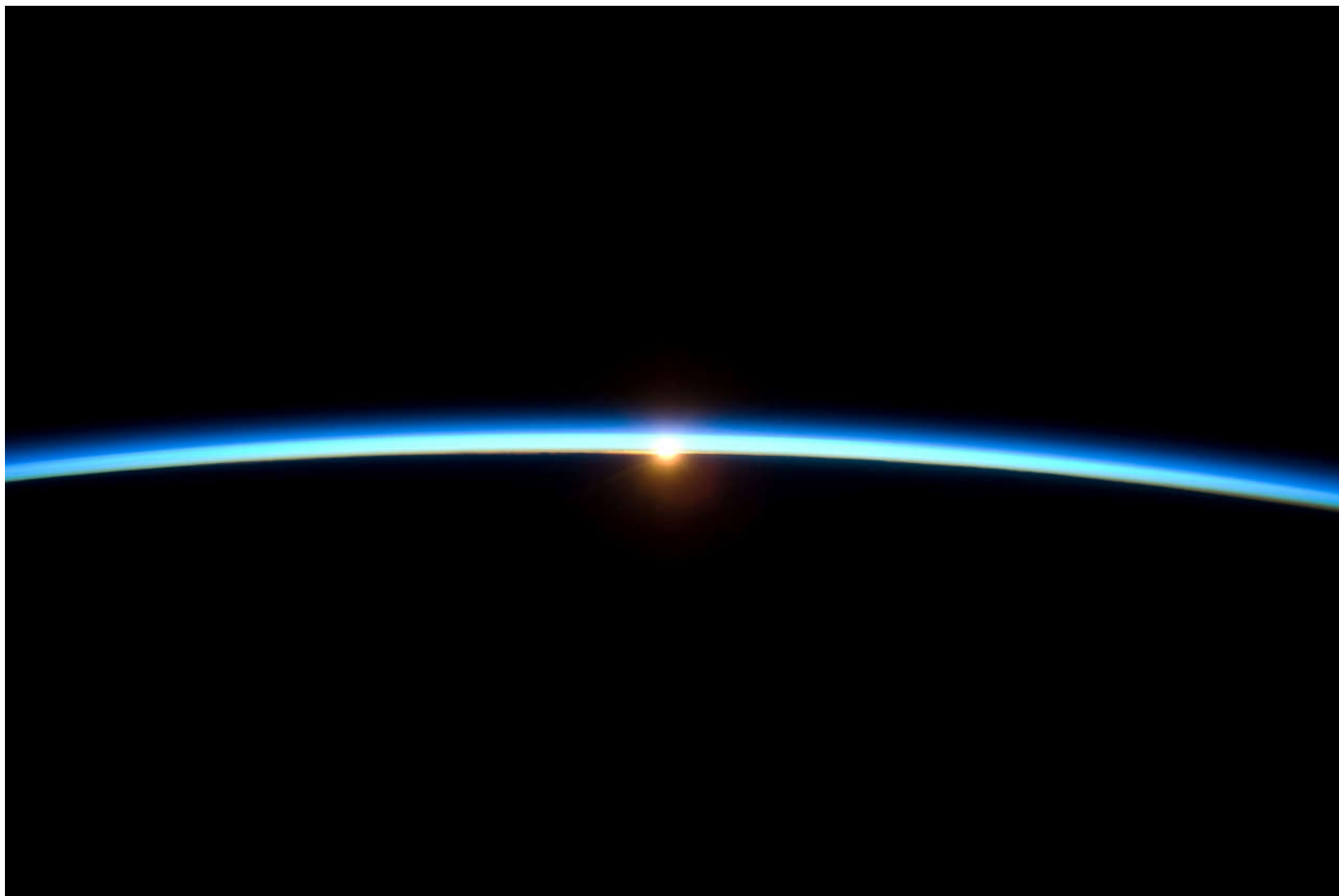
Kompetencje społeczne:

- Dlaczego na Everest wchodzi się w maskach tlenowych?
- Dlaczego pustynie nie są na równiku, gdzie jest najcieplej?
- Czy atmosfera kręci się z Ziemią, czy stoi?
- Dlaczego w Sopocie wieje zawsze z zachodu?
- A w ogóle, to dlaczego ta atmosfera jest tak skomplikowana?

Foto G. Karwasz, lądowanie na lotnisku w Malpensie
Można porównać wysokość Alp z grubością troposfery

Co powinniśmy zrozumieć:

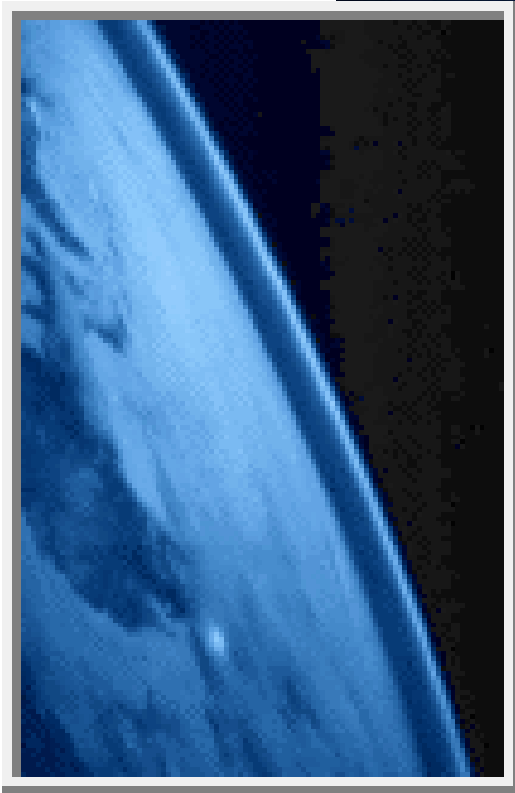
- Skład chemiczny
- Uwarstwienie (temperatura, ciśnienie, skład chemiczny)
- Siła Coriolisa
- Wiatry



Na zdjęciu cienka powłoka atmosfery (troposfera) widoczna dzięki zachodzącemu Słońcu 23.11.2009

Wyraźnie oddzielona górna, cienka warstwa, o innym kolorze: absorbująca inny zakres widmowy światła, padającego prawie równolegle

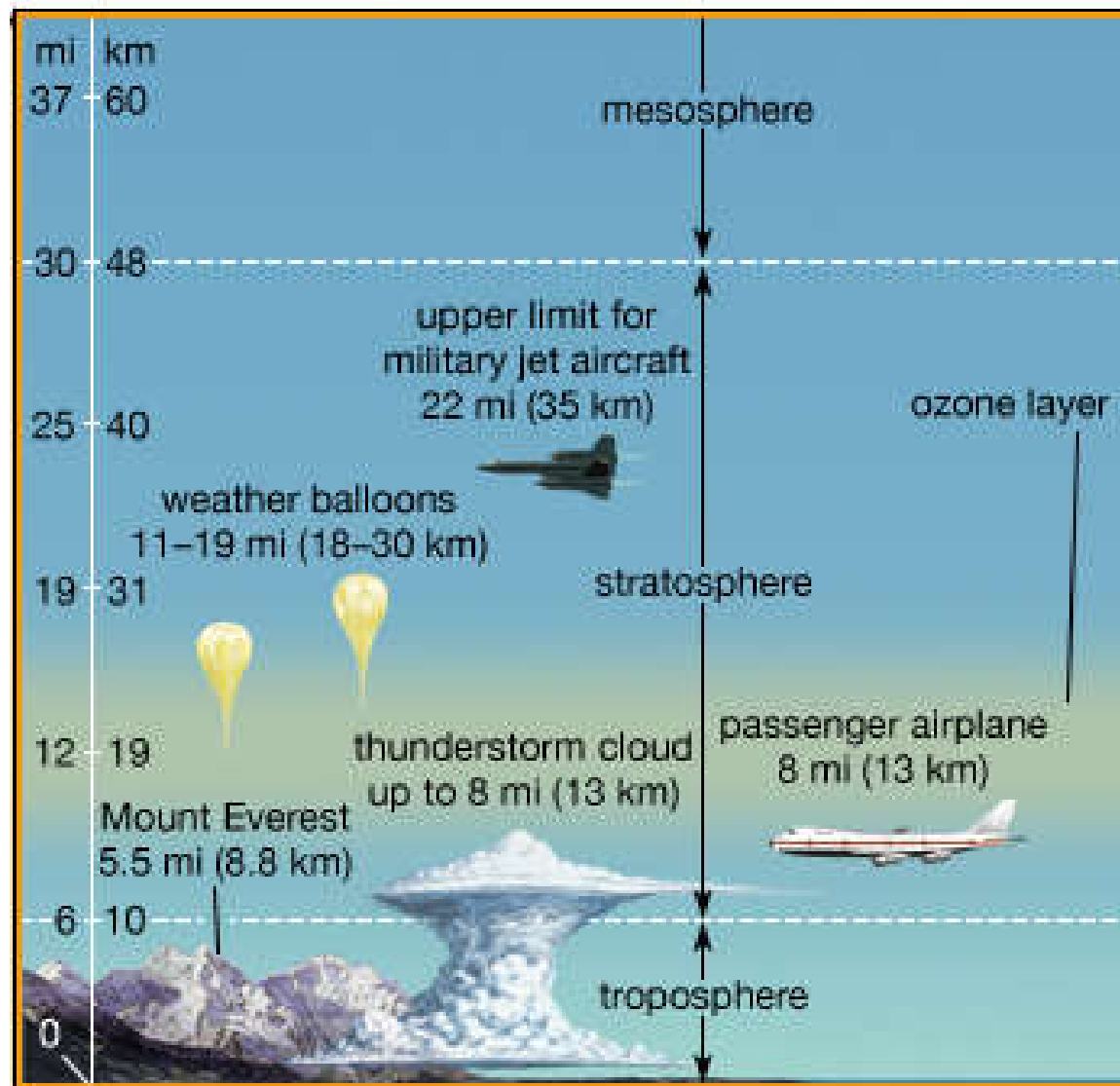
Atmosfera – miękka (i grzejąca) pierzynka



Te różne zdjęcia, pod różnymi kątami i przy różnym oświetleniu pokazują uwarstwienie atmosfery. Zajmiemy się tym w tej część wykładu



Troposfera (<10 km), Stratosfera (10-40 km), Jonosfera (40-100 km), Termosfera 100-1000



© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.

Mezosfera:

Obszar tworzenia się zórz polarnych

Stratosfera: max wysokość wznoszenia się balonów i lotów samolotów wojskowych

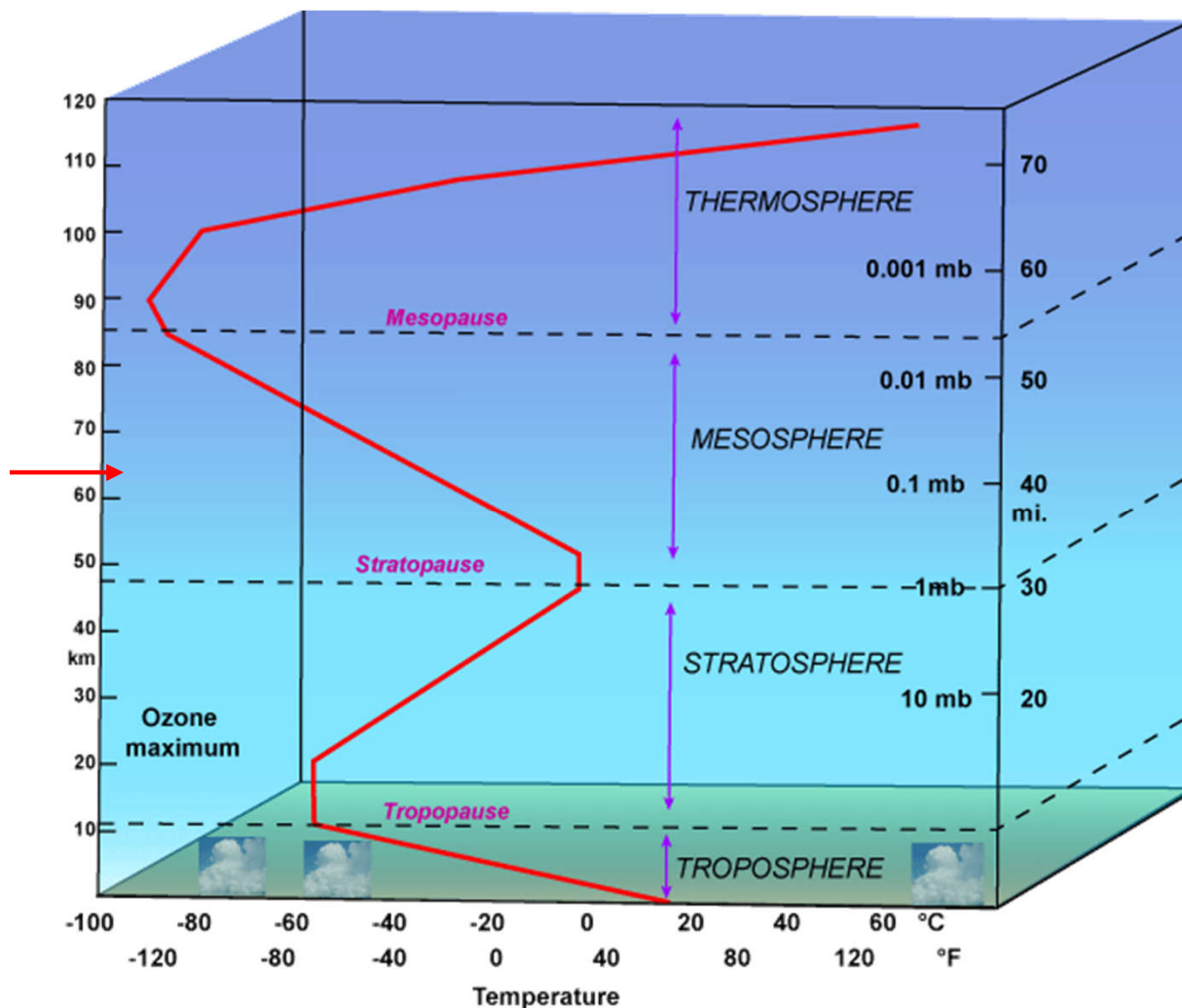
Troposfera:

Strefa wznoszenia się powietrza (od nagrzanej ziemi) i unoszenia się pary wodnej (chmur)
Termopauza – trasy odrzutowych samolotów pasażerskich

Troposfera (<10 km), Stratosfera (10-40 km), Jonosfera (40-100 km), Termosfera 100-1000

Zmiany temperatury są skutkiem dwóch głównych efektów:

1. Strumieniem energii promieniowania słonecznego
2. Absorpcją (selektywną) tego promieniowania



Termosfera:

przestaje obowiązywać pojęcie równowagi termodynamicznej

Jonosfera: (mezosfera)

znaczny udział (10^{-6}) jonów w stosunku do cząstek neutralnych: cząsteczek (O_2) i atomów N, O

Stratosfera: strefa uwarstwiona – temperatura rośnie z wysokością

Troposfera:

strefa mieszania się – odwrócony (nie-konwekcyjny) spadek temperatury z wysokością

Table 1.1 Fractional concentrations by volume of the major gaseous constituents of the Earth's atmosphere up to an altitude of 105 km, with respect to dry air

Constituent ^a	Molecular weight	Fractional concentration by volume
Nitrogen (N ₂)	28.013	78.08%
Oxygen (O ₂)	32.000	20.95%
Argon (Ar)	39.95	0.93%
Water vapor (H₂O)	18.02	0–5%
Carbon dioxide (CO₂)	44.01	380 ppm
Neon (Ne)	20.18	18 ppm
Helium (He)	4.00	5 ppm
Methane (CH₄)	16.04	1.75 ppm
Krypton (Kr)	83.80	1 ppm
Hydrogen (H ₂)	2.02	0.5 ppm
Nitrous oxide (N₂O)	56.03	0.3 ppm
Ozone (O₃)	48.00	0–0.1 ppm

^a So called *greenhouse gases* are indicated by bold-faced type. For more detailed information on minor constituents, see Table 5.1.

Atmospheric Science.
An introductory survey
J.M. Wallace. P.V. Hobbs

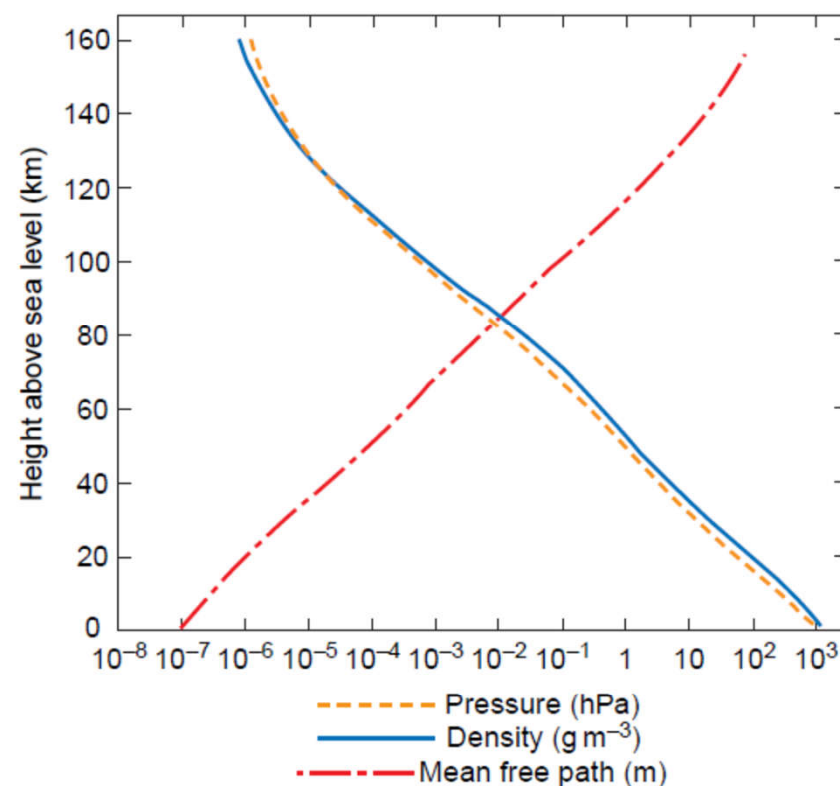
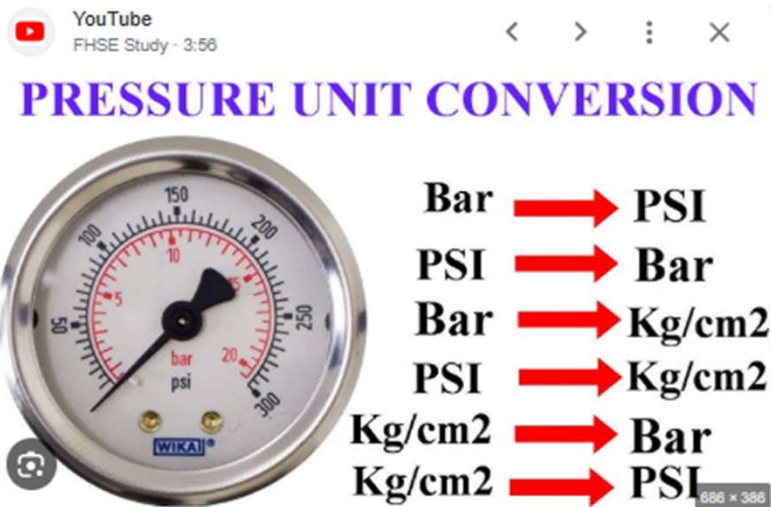


Fig. 1.8 Vertical profiles of pressure in units of hPa, density in units of kg m⁻³, and mean free path (in meters) for the U.S. Standard Atmosphere.

Ciśnienie spada w sposób eksponencjalny z wysokością (10 hPa na wysokości 40 km)

Jednostki miar



Molecular radius (by GK, EPJD 2006):

N_2 – 1.1 Å, Ar – 1.05 Å, H_2 – 0.65 Å, CO_2 – 1.5 Å
(„Do positrons measure molecular diameters?”)

Mean free path at 1 atm. (or better
– the distance between hard spheres – about 30 Å)

Mean molecular mass of air – 29 g

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

- Ciśnienie atmosferyczne „normalne” to 1013 hPa

$$1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mm słupa rtęci} = 760 \text{ torr} = 10 \text{ m słupa wody}$$

- 1 atm to mniej więcej *ciężar* 1 kg masy (przy $g=9.81$, czyli 9.81 N) na 1 cm^2
[=Kg/cm², jednostki bardzo nielegalne, ale obrazowe]

- 1 bar = 10^5 Pa, czyli około 1 atm

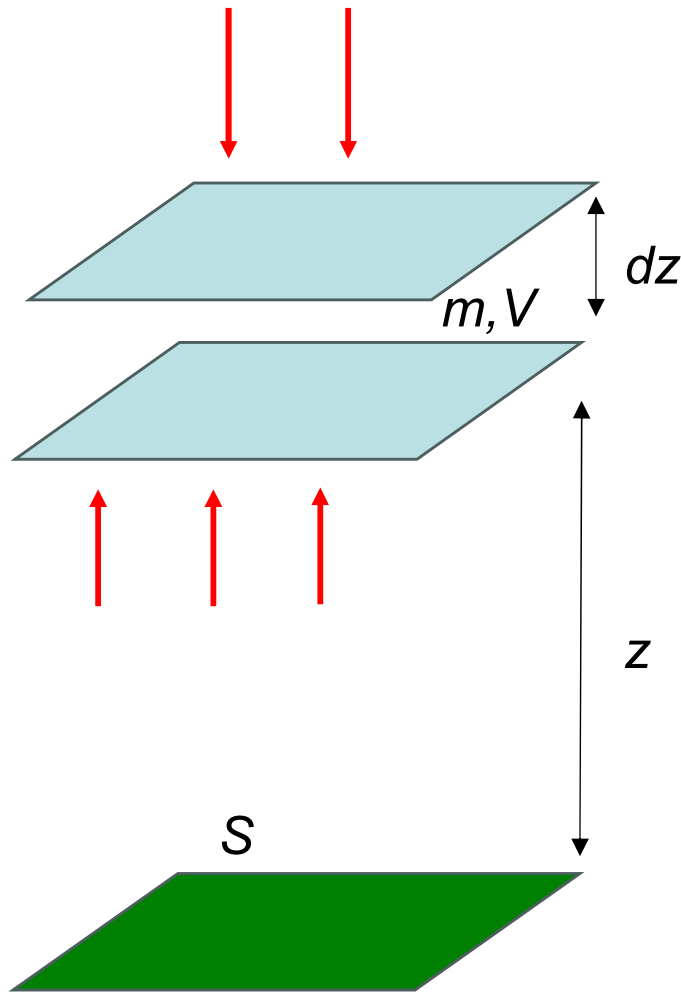
- 1 bar = 14.5 psi (pound/square inch)

- I jeszcze jedne „nielegalna” jednostka:

1 cal to ciepło niezbędne do ogrzania 1 g wody o 1° C (=4.19 J)

Ciepło topnienia lodu (w 0° C) = **80 cal/g**, ciepło parowania (w 100° C) = **540 cal/g**

Prawo Stevina: $p(z) = p_0 \exp -(z/H)$

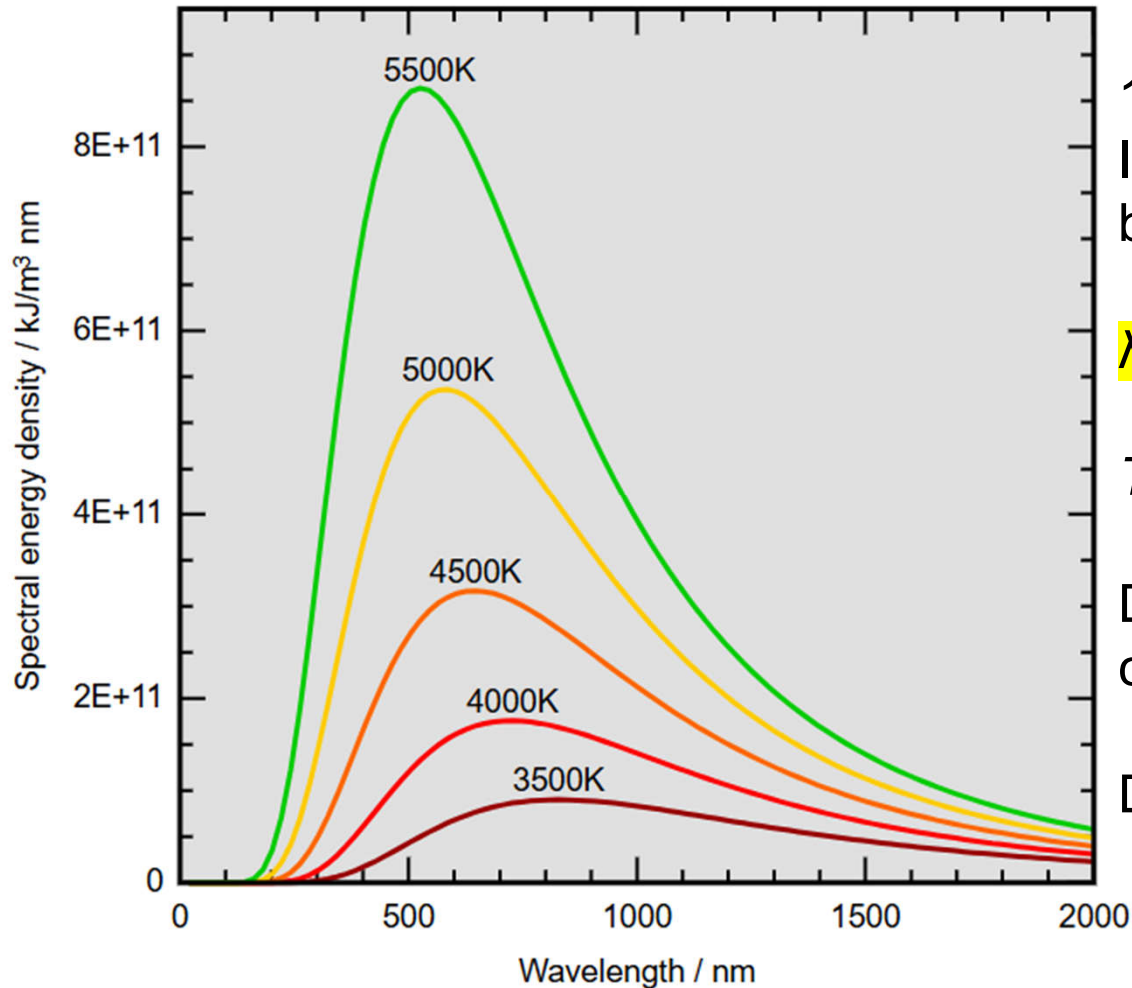


Based on measurements, the peak pressure of 251–253 Torr at the peak of Mt. Everest, the world's highest mountain, is around 1/3rd of sea level.

1. Zakładamy $T = \text{const}$, np. 270 K
2. Prawo gazu doskonałego:
 $pV = nRT$, gdzie n – ilość moli gazu w objętości V ;
 stąd $n = pV / RT$
3. Ilość moli $n = m / M$ (M - masa molekularna, tj. 29 g średnia dla powietrza)
4. Objętość $V = S(dz)$, a masa gazu $m = nM$
5. Różnica ciśnień wynika z ciężaru powietrza zawartego w objętości V i wynosi:
 $-dp = mg/S$ (ciśnienie spada z wysokością)
6. Mamy więc z (2,3,4)
 $-dp = (g/S) M [pS(dz)/RT]$
 po uproszczeniu $-dp = gMp(dz)/RT$
7. Równ. różniczkowe: $dp/p = - (gM/RT) dz$
8. Scałkowanie daje: $\ln(p) = - (gM/RT) z + C$
 czyli: $p(z) = p_0 \exp [-(z / (RT/gM))]$, gdzie $p_0 = \text{n.p.m.}$
9. wartość w nawiasie nazwiemy
 $H = RT/gM = 8.31 \cdot 270 / (9.81 \cdot 0.029) = 7.9 \text{ km}$

Na wysokości Mt Everest ciśnienie wynosi $\sim 1/3$ atm.

Widmo emisji ciała doskonale czarnego



1. Prawo przesunięć Wiena:

Im wyższa temperatura, tym podkova bardziej żółta

$\lambda_{\max} = b/T$, gdzie λ – długość fali w μm ,

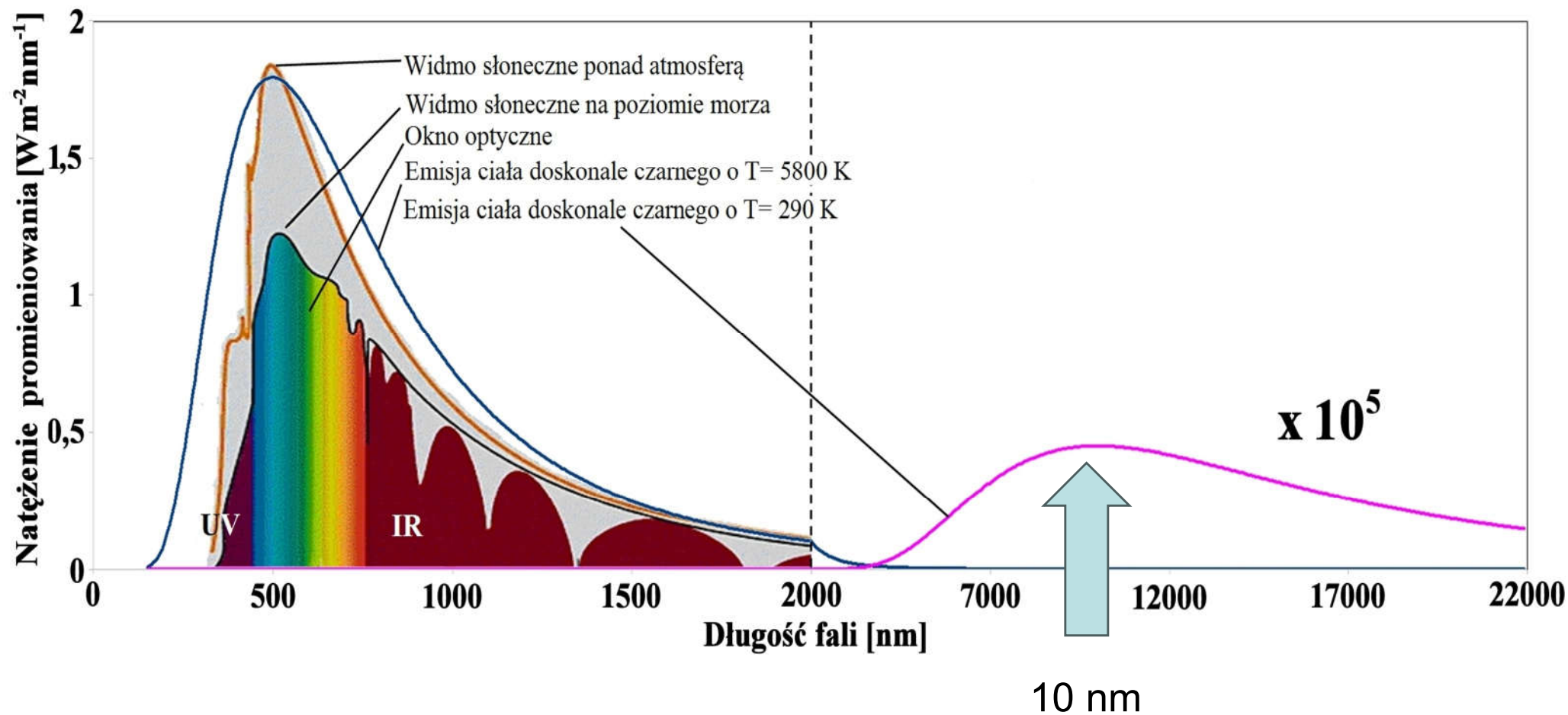
T w kelwinach, a $b = 2900 \mu\text{m/K}$

Dla $T = 5700 \text{ K}$ mamy $\lambda_{\max} = 510 \mu\text{m}$,
czyli kolor zielony

Dla $T = 290 \text{ K}$ mamy $\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$

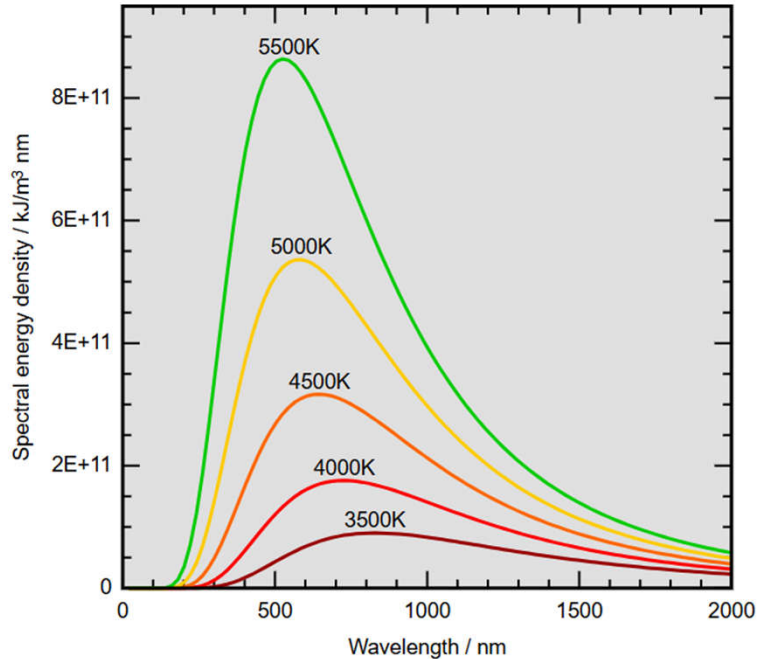
Rozkład Plancka dla różnych temperatur. Moc [kJ/s] promieniowania przez ciało o powierzchni 1 m^2 do pełnego kąta bryłowego w zakresie długości fal od 0 do $2 \mu\text{m}$.

Widmo Słońca vs widmo Plancka



Zob. G. Karwasz, K. Służewski, „Ziemia pod pierzynką” Foton 2013

Widmo emisji ciała doskonale czarnego



$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$$

2. Prawo Stefana-Boltzmann:

Moc promieniowana P (na m²) zależy od T^4

$$P = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

1 m² w $T=300$ K promieniuje 460 W

(!)

1 m² w $T=3000$ K, promieniuje ?

3.

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

gdzie $\nu = c / \lambda$

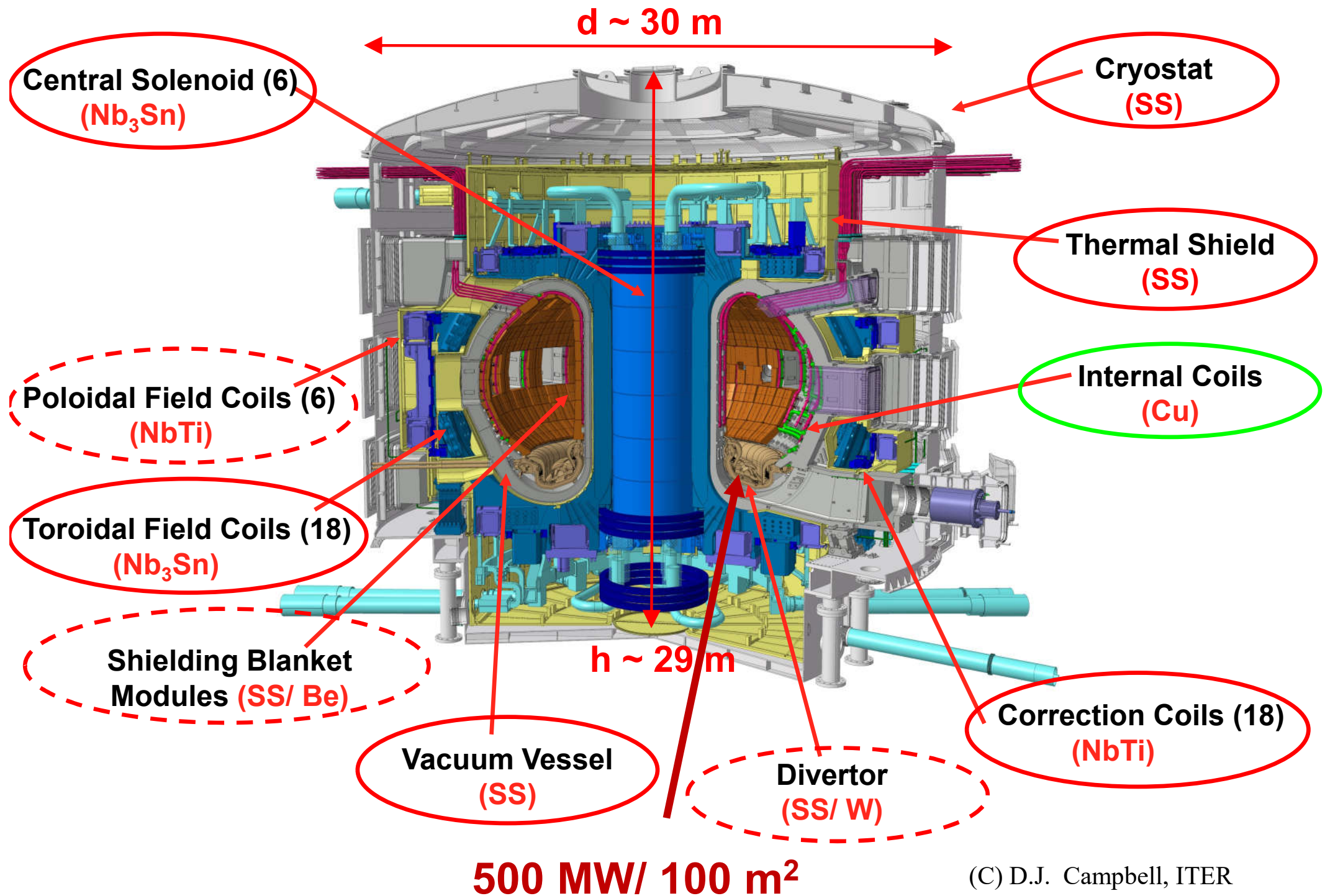
Dla $\lambda = 300$ nm, $\nu = 10^{15}$ Hz

Energia kwantu $E = h\nu$, gdzie $h = 6.67 \times 10^{-34}$ Js

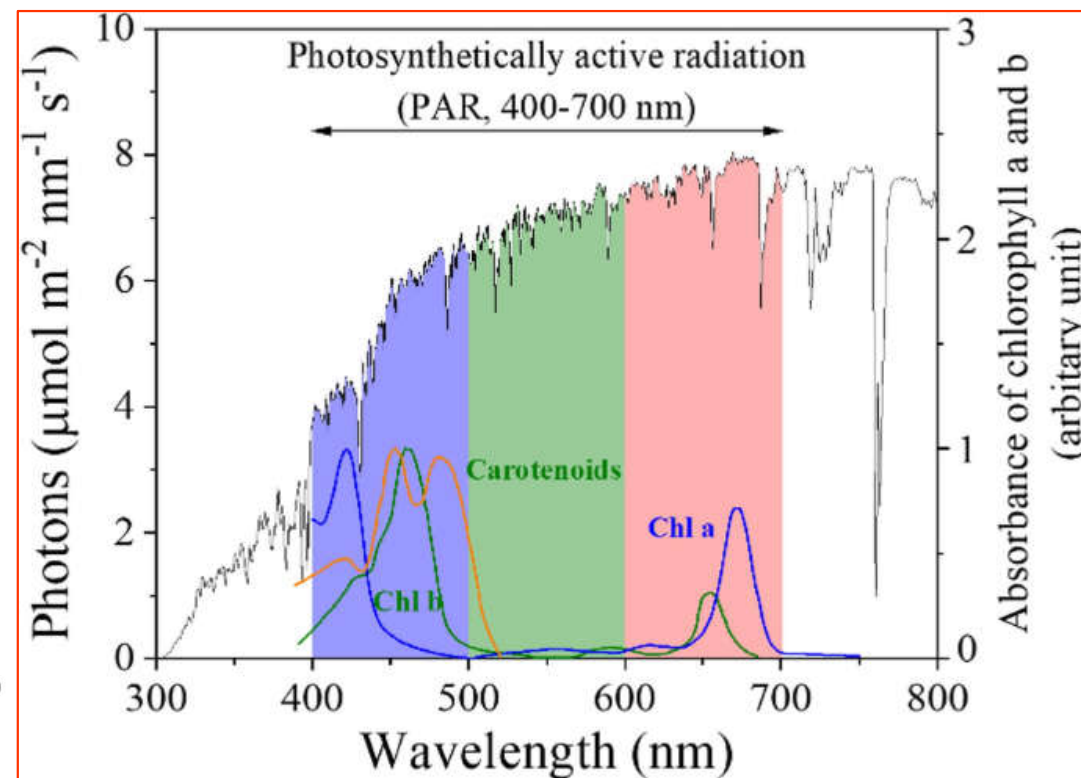
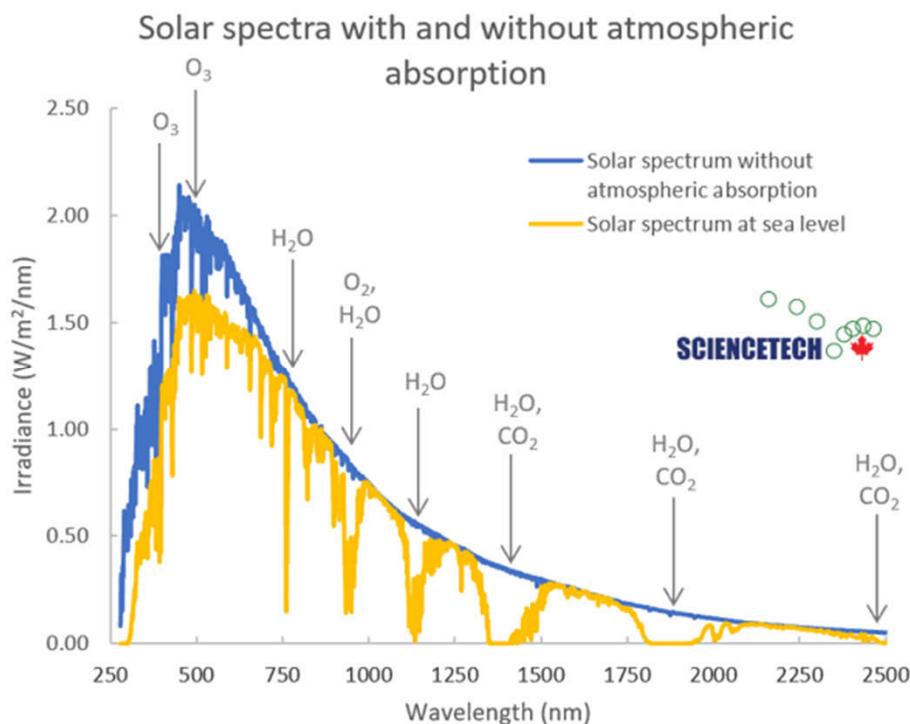
Widmo widzialne 380-760 nm, i.e. 1.65-3.3 eV

1 eV = 1.6×10^{-19} J

ITER – Tokamak Core Components



Widmo Słońca, poza atmosferą



Czy widmo Słońca zawsze było takie same?

Poza atmosferą przypuszczalnie od zawsze (tj. 4 mld lat) – tak.

Na powierzchni ziemi (a raczej oceanu) – pewno nie.

Świadczą o tym metaboliczne „skamieniałości”, w postaci dwóch form chlorofilu.

Ten bardziej niebieski (czyli siny, cyanowy) pochodzi z okresu, kiedy w atmosferze Ziemi nie było tlenu (tak mówi prof. GK)

Bilans energii słonecznej: 116% !

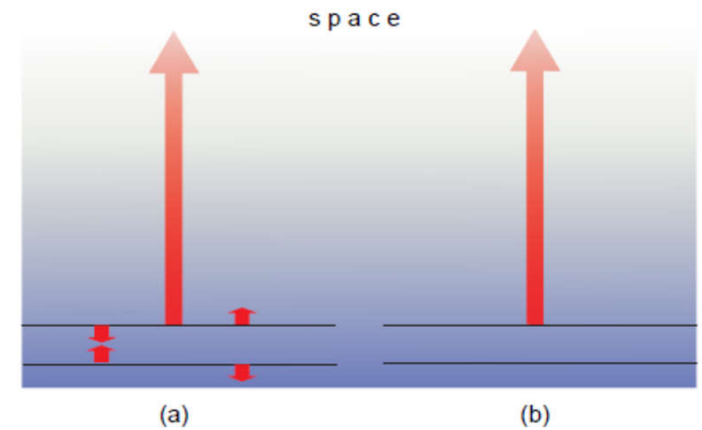
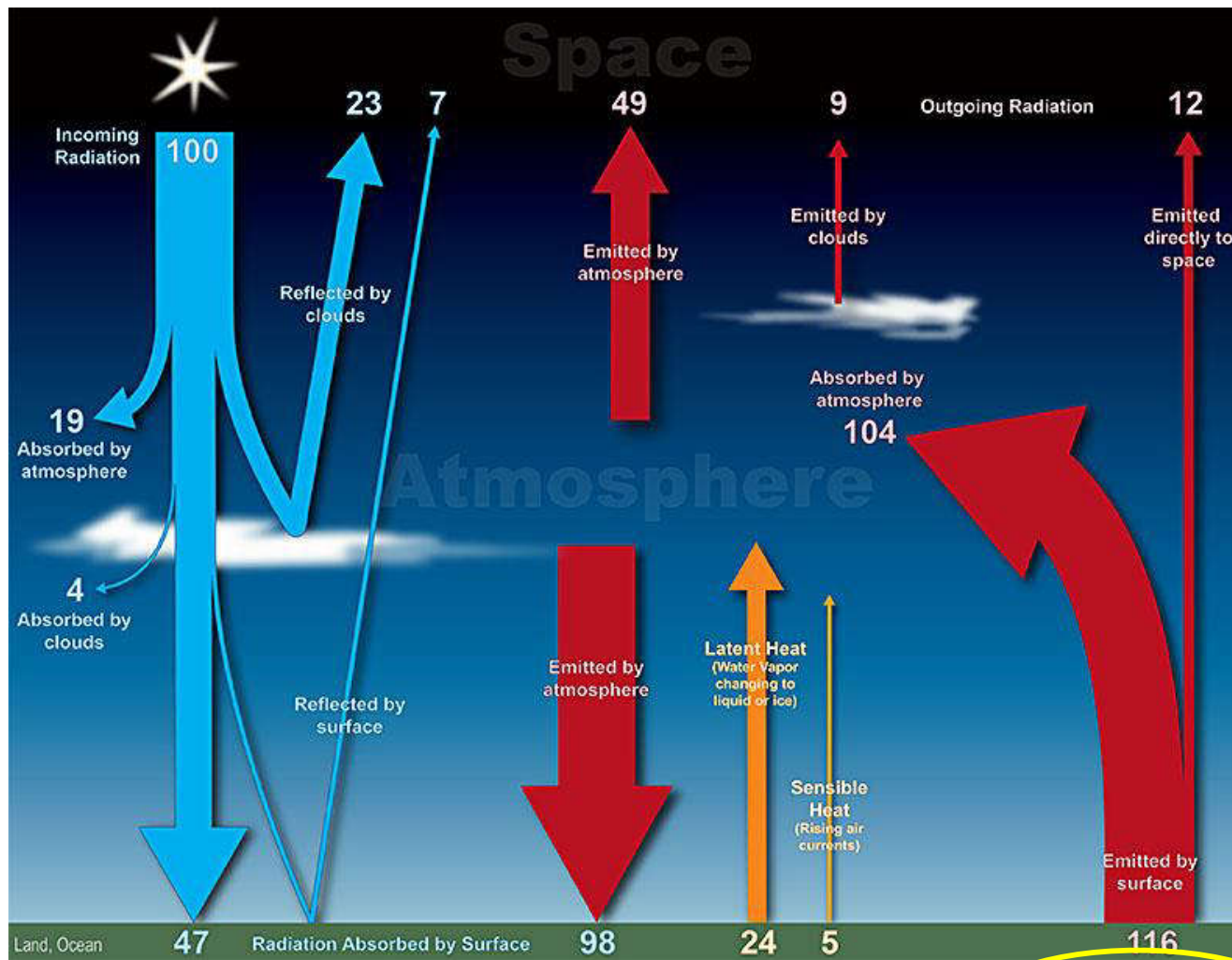
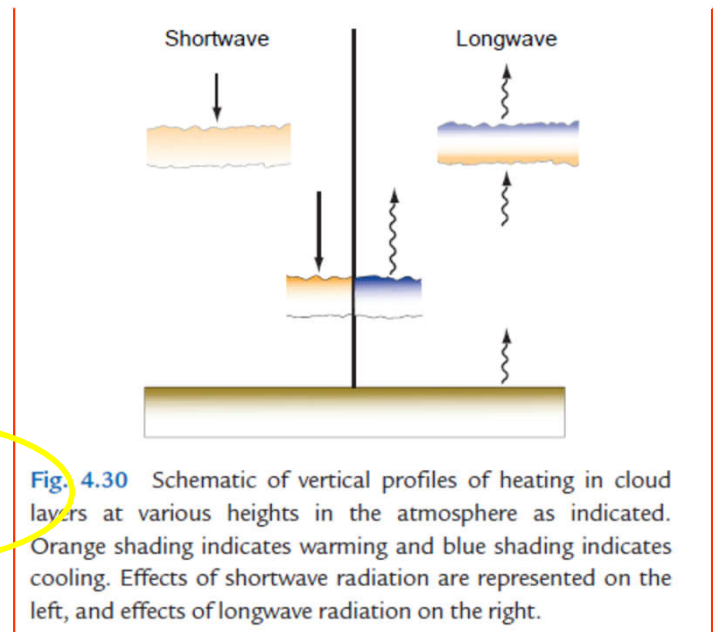


Fig. 4.28 Radiation geometry in cooling to space. (a) The complete longwave radiative balance for the layer in question (not drawn to scale) and (b) the simplified balance based on the assumption of cooling to space.



Uwarstwienie atmosfery – nie tylko zmiany ciśnienia i temperatury, ale również składu, czynią bilans ciepła bardzo skomplikowany: inny dla światła VIS przychodzącego (short), inne dla wychodzącego IR

Troposfera: tu jest para wodna, H_2O , główny nośnik (ukrytego) ciepła (przemiany fazowej = 540 cal/g)



Chmury burzowe u wybrzeży Brazylii: prądy konwekcyjne unoszą parę wodną aż do granic troposfery (gdzie *musi* się skroplić, czyli oddać ciepło)

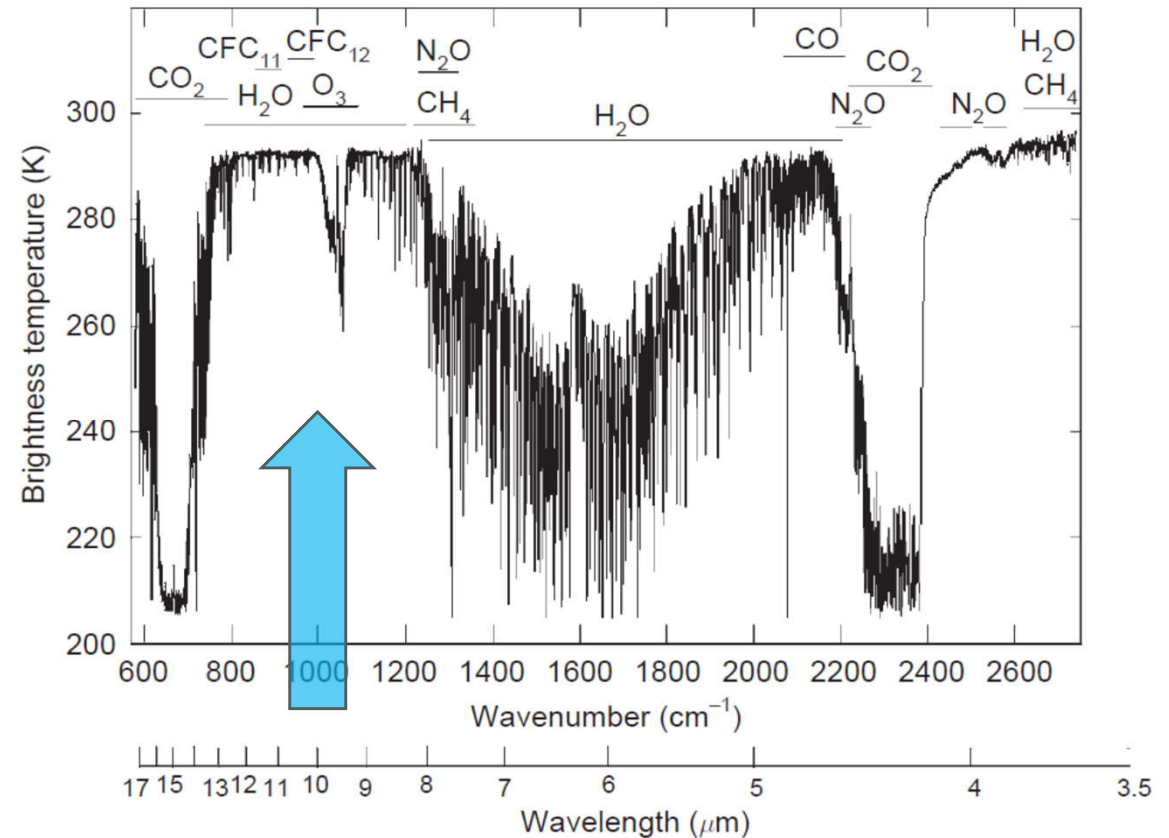
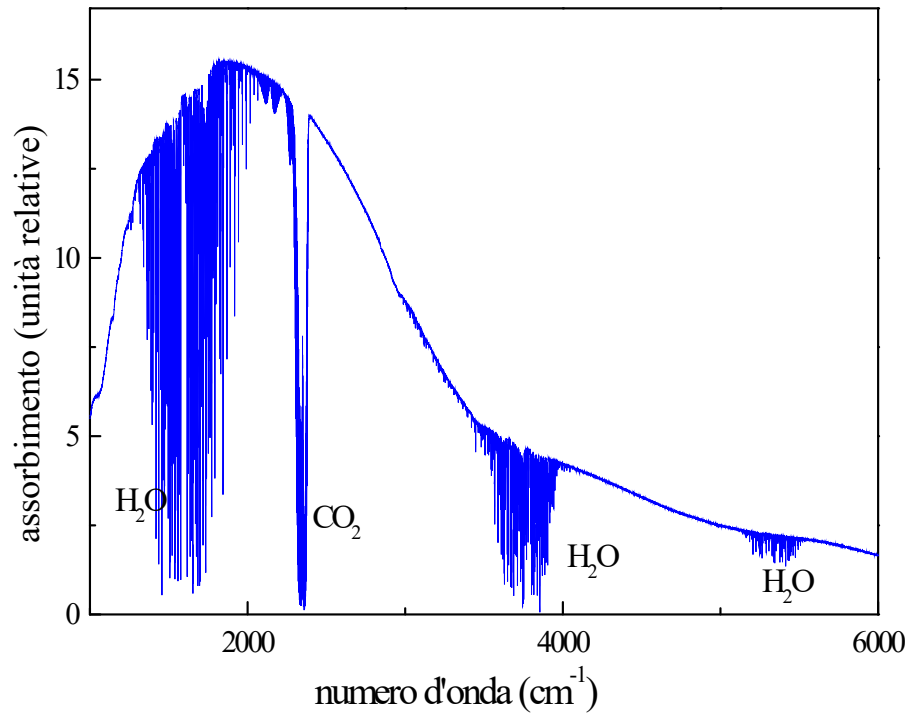
1 g (1/30 mola) suchego powietrza (N_2) unosząc się z powierzchni ziemi ($t=20^\circ C$) do tropopauzy ($t=-40^\circ C$) unosi ciepło $Q = 1/30 \times 8.31 \text{ J/mol}\cdot K \times 5/2 \times 60 \approx \mathbf{10 \text{ cal}}$

1 g mokrego powietrza (wilgotność absolutna 4%) unosi **dodatkowo** $0.04 \text{ g} \times (540+80) \approx \mathbf{25 \text{ cal}}$ (para wodna nie tylko skropli się, ale zamarźnie)

To konwekcja pary wodnej jest głównym motorem termicznym troposfery

Efekt podwójnej pierzynki = para wodna + dwutlenek węgla

Wallace & Hobbs, str. 141



10 nm, czyli max promieniowania IR z Ziemi

CO_2 „zamyka okno” pozostawione przez H_2O

H_2O : $-18^\circ\text{C} \rightarrow +15^\circ\text{C}$

CO_2 : $+15^\circ\text{C} \rightarrow +???$

Efekt podwójnej pierzynki = para wodna + dwutlenek węgla

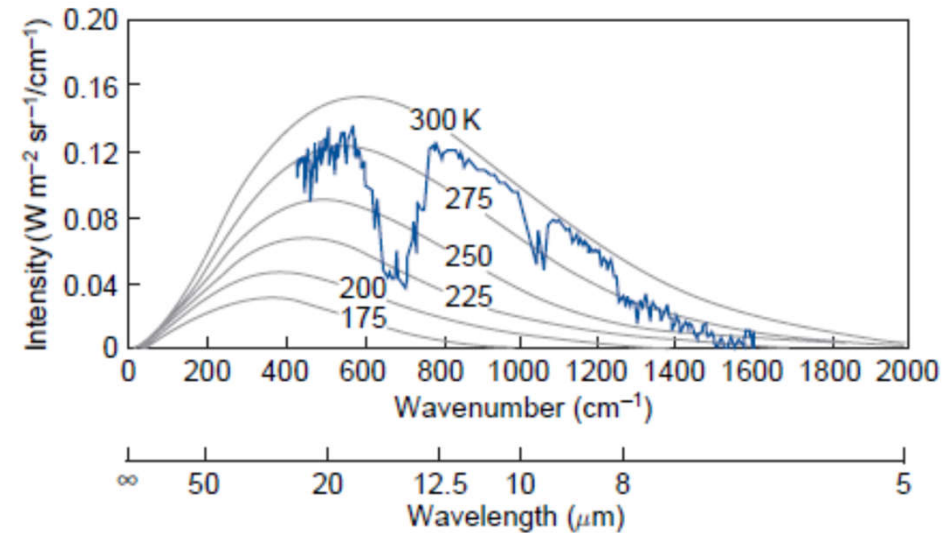
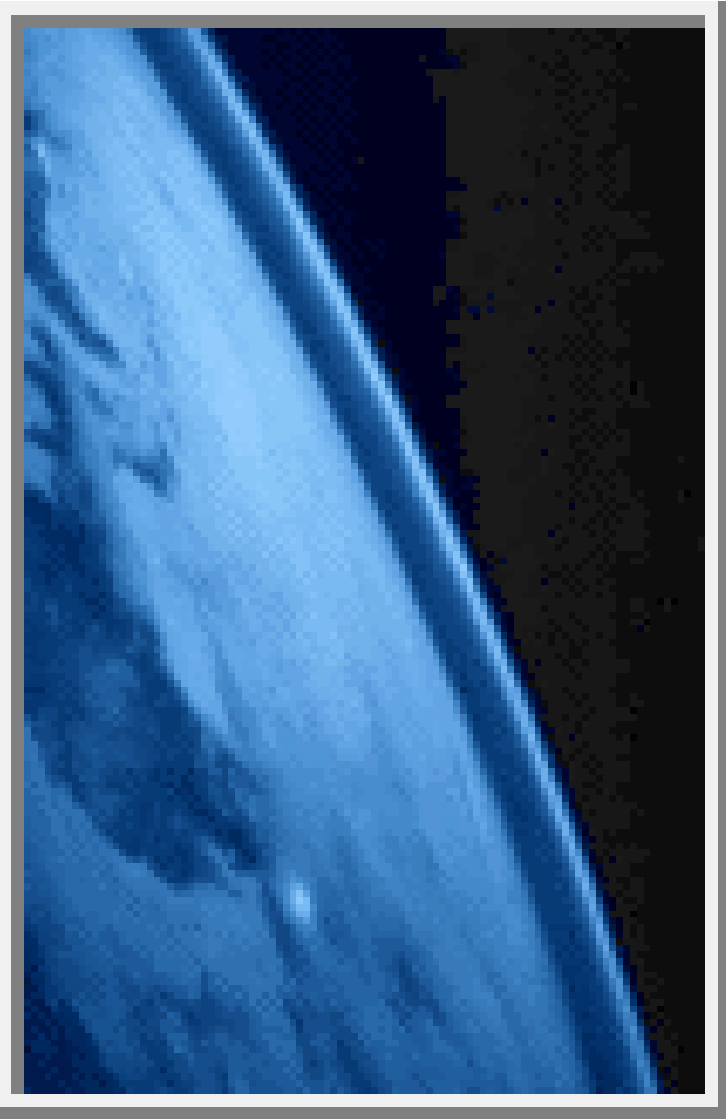
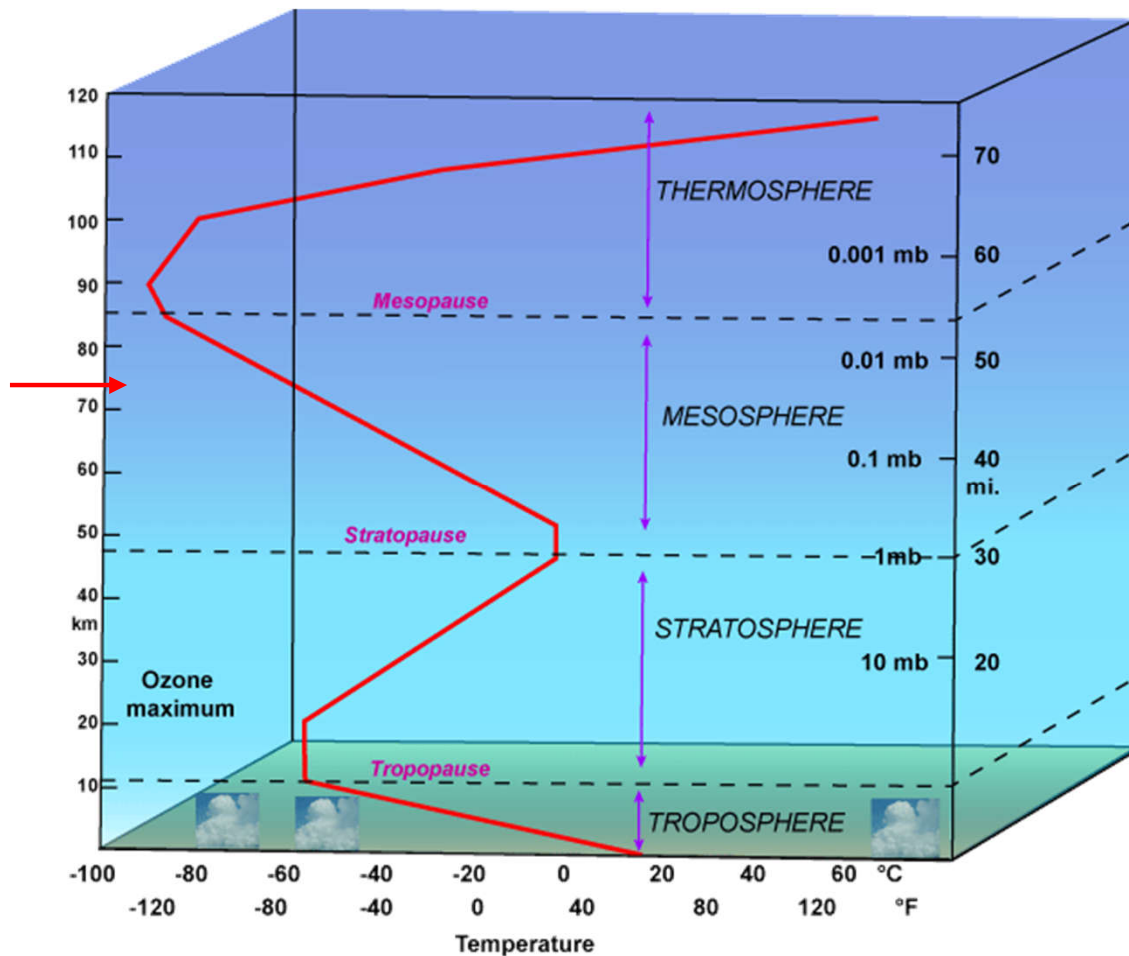


Fig. 4.31 Monochromatic intensity of radiation emitted from a point on the Earth measured by an infrared interferometer spectrometer carried aboard a spacecraft. The gray curves are blackbody spectra computed from Eq. (4.10). The monochromatic intensity of the radiation at any given wavelength is indicative of the temperature of the layer of the atmosphere from which that radiation is emitted (i.e., the level of unit optical depth for that wavelength), which can be inferred from the blackbody spectra. [Adapted from K. N. Liou, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Academic Press, p. 117, Copyright (2002), with permission from Elsevier.]

Pomiary z kosmosu pokazują, że w widmie IR wychodzącym z powierzchni ziemi brakuje tych składowych, które są w widmie *absorpcyjnym* CO₂ i H₂O: bilans się zgadza. Co oznacza, że troposfera absorbuje (i odsyła w dół) sporo ciepła. Tropopauza (widoczna tutaj) staje się więc *ostrą* granicą warstw.

Troposfera (<10 km), Stratosfera (~10-40 km), Jonosfera (40-100 km), Termosfera 100-1000

Stratosfera – czyli uwarstwiona: nie płynie strumień ciepła od nagrzanej ziemi, ustaje więc (turbulentna) konwekcja: układ temperatury jest „normalny” – cieplejsze warstwy są u góry.
Nie ma mieszania się jak w troposferze.



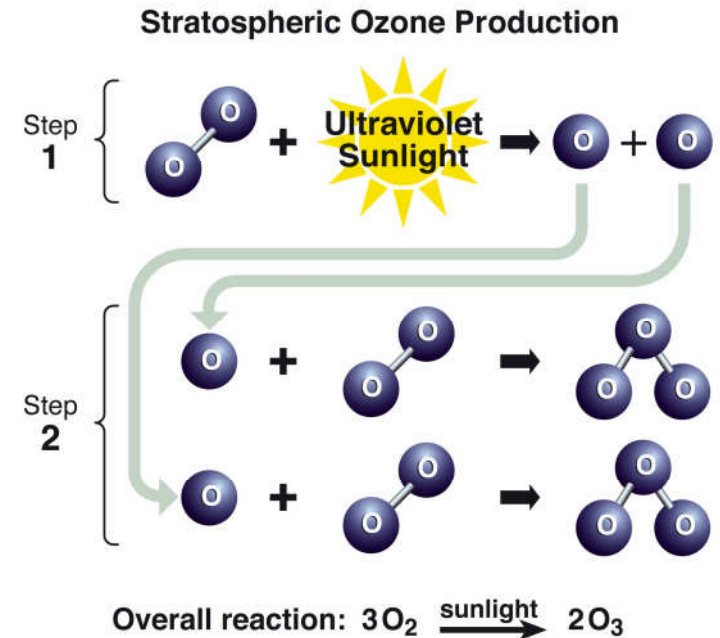
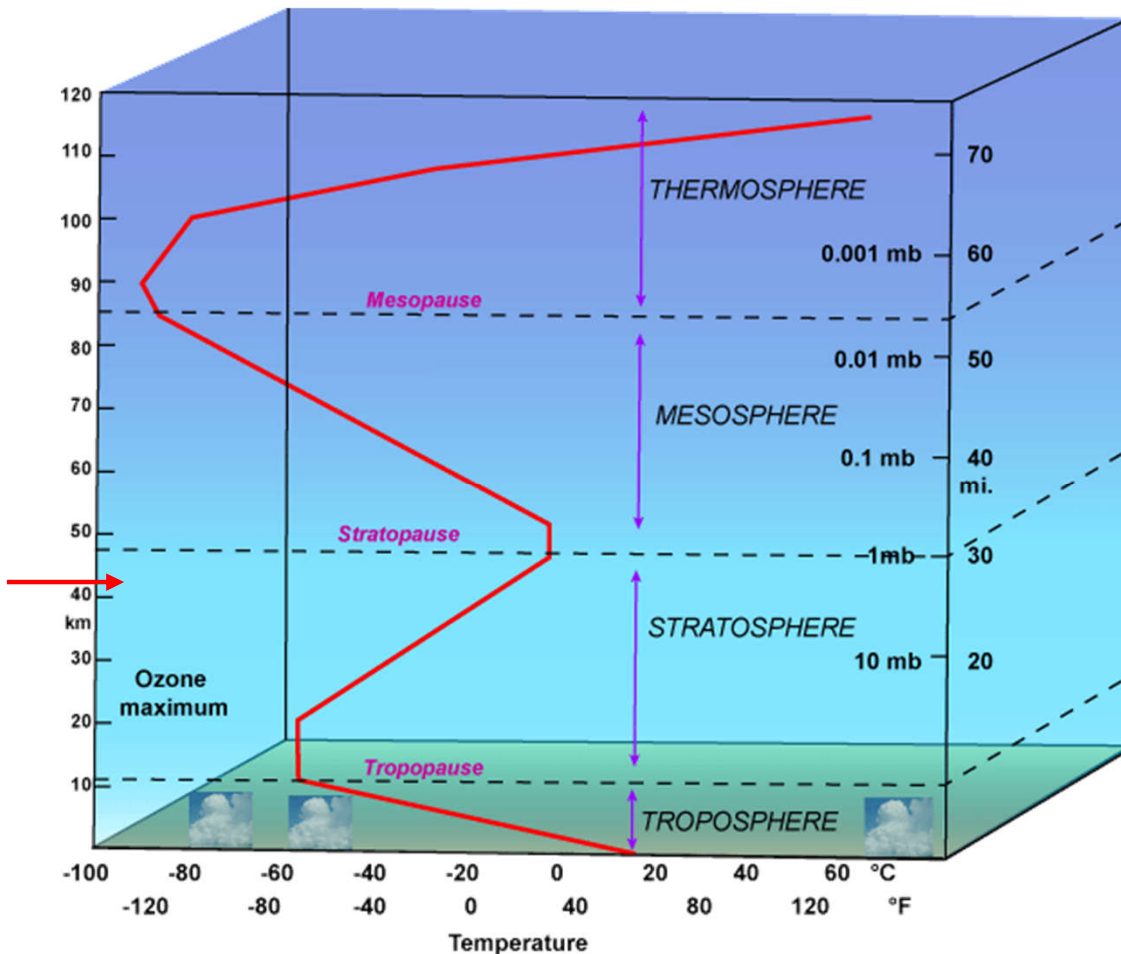
August 30, 1984



August 8, 1991

Fig. 4.36 In these views of the limb of the Earth from space, the upper atmosphere shows up blue, while the lower atmosphere exhibits an orange hue. The lower photo, taken 2 months after the eruption of Mt. Pinatubo, shows layers of sulfate aerosols in the lower stratosphere. [Photographs cour-

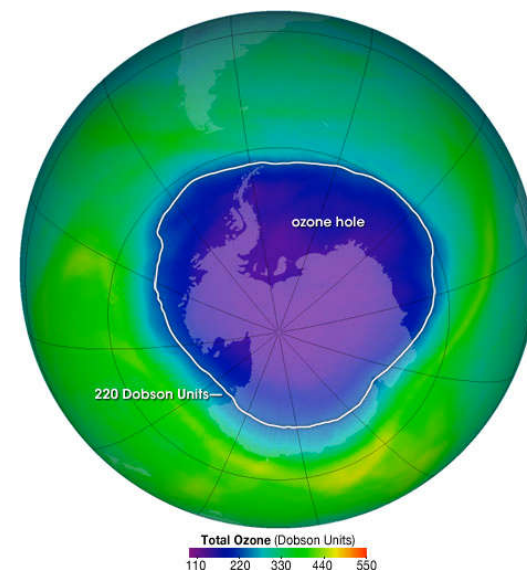
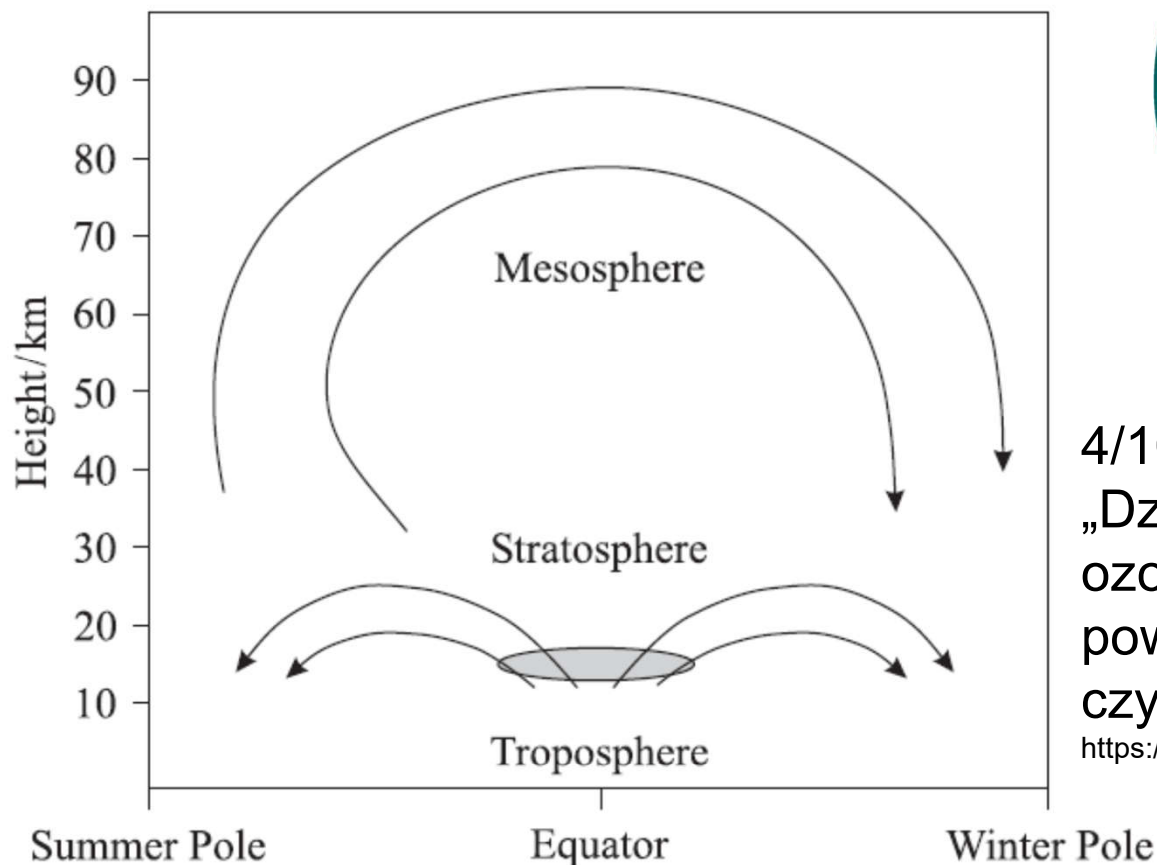
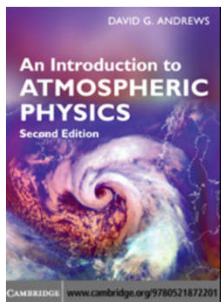
Troposfera (<10 km), Stratosfera (~10-40 km),
Jonosfera (40-100 km), Termosfera 100-1000



Energia niesiona przez promienie UVB (~5eV) nie wystarcza do jonizacji N_2 (15 eV) ani O_2 (13 eV), ale wystarcza do *dysocjacji* O_2 na atomy O.

Te z kolei, bardzo reaktywne, łączą się z O_2 i tworzą niestabilny O_3 , który musi być natychmiast schłodzony, czyli przeniesiony ku biegunom.

Powstawanie i transport ozonu



4/10/2004

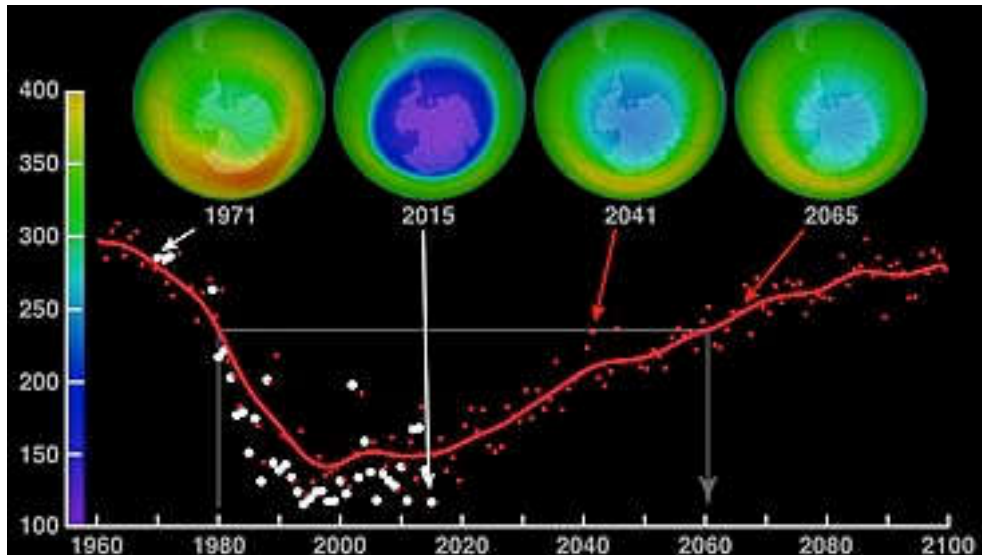
„Dziura” ozonowa oznacza, że ozonu jest mniej tam, gdzie powinien być jego rezerwuar, czyli nad Antarktydą

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/hole_SH.html

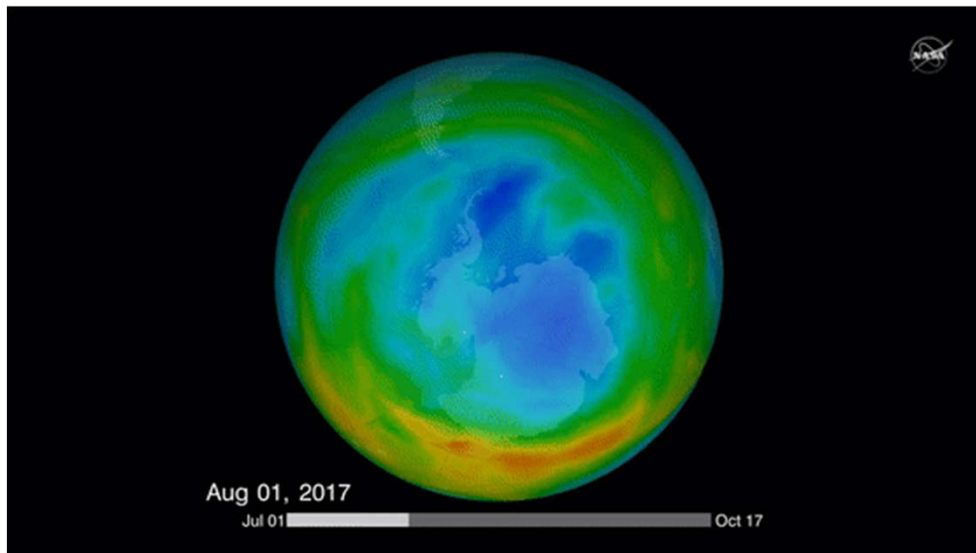
A schematic plot of the Brewer-Dobson circulation (lower four arrows, in the stratosphere) and the solstitial mesospheric circulation (upper two arrows). The shaded ellipse indicates the approximate position of the 200 K isotherm near the equatorial tropopause, i.e. the 'cold trap' identified by Brewer (1949).

Ozon, powstający w 200 K w dolnej stratosferze nad równikiem (pułapce) jest transportowany ku biegunom; poprzez mezosferę cyrkuluje między biegunami (pokazana cyrkulacja w czasie przesilenia letniego)

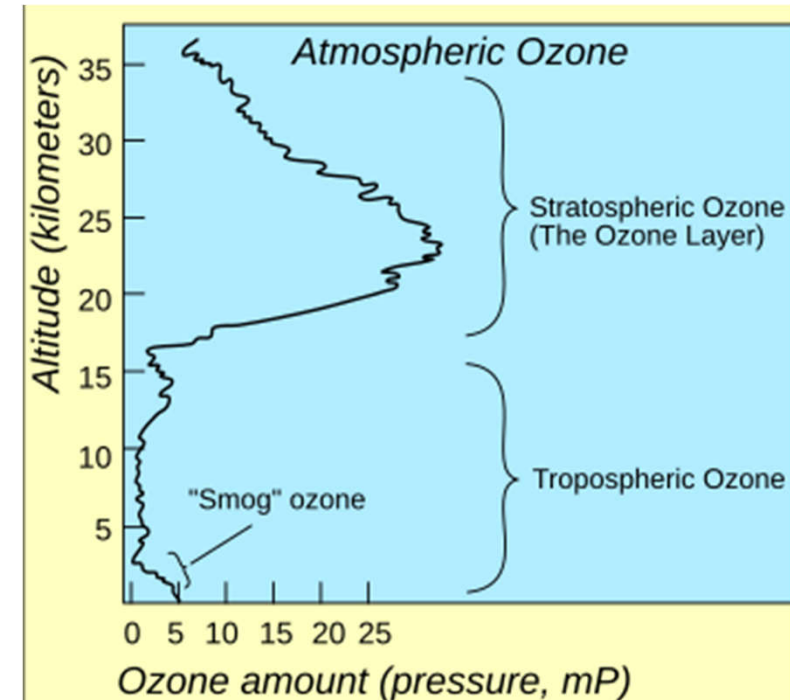
„Dziura” ozonowa nadal istnieje, ale powoli się zablężnia



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4d/Ozone_hole_recovery.jpg/555px-Ozone_hole_recovery.jpg



<https://www.nbcnews.com/mach/science/good-news-about-ozon-hole-even-better-you-think-ncna835971>

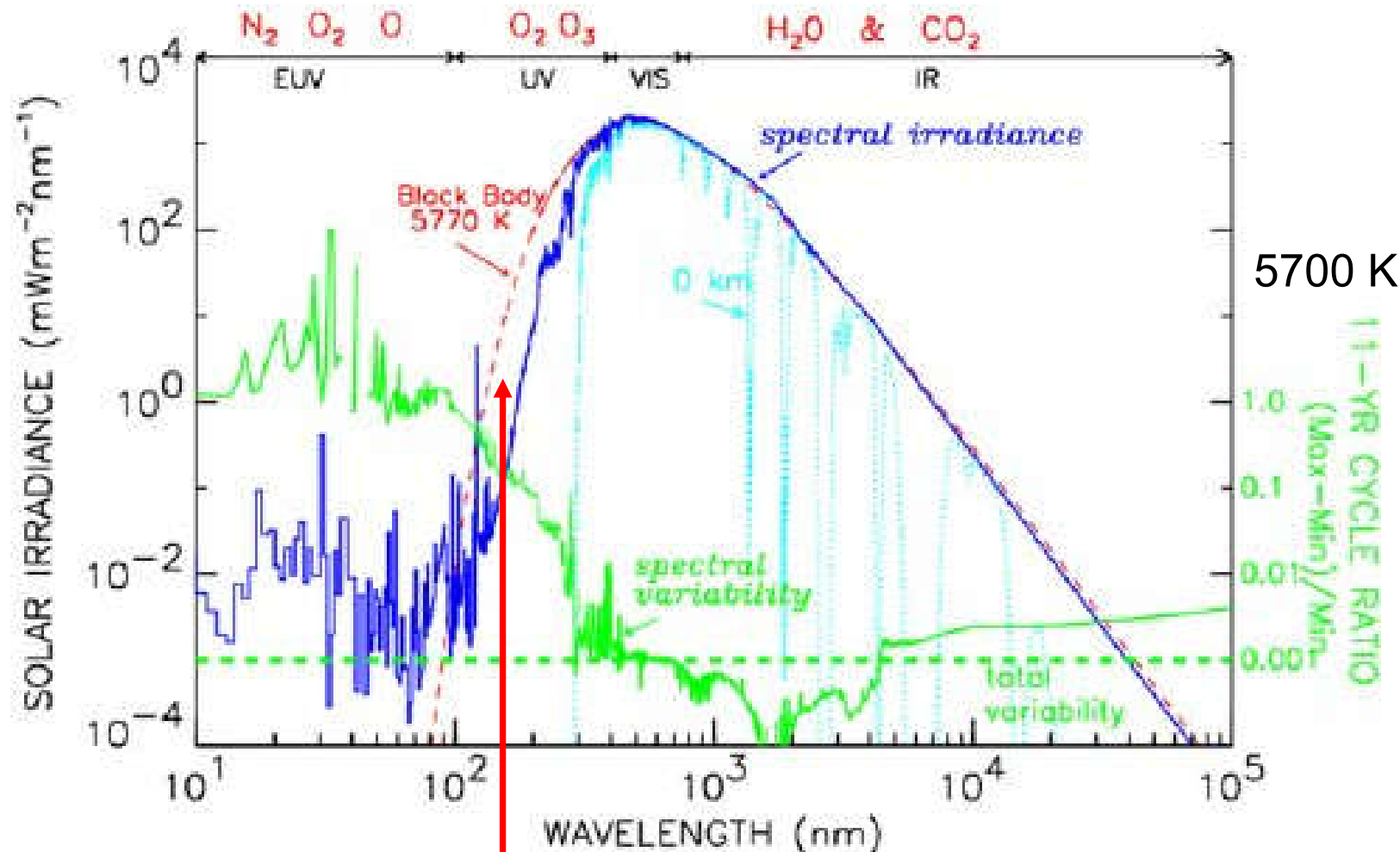


„Scałkowanie” ciśnienia parcjalnego ozonu (max 25 mPa) po grubości warstwy (ok. 10km) jest równoważne grubości warstwy około **2,5 mm** pod ciśnieniem atmosferycznym (10^5 Pa)



Kopuła Międzynarodowej Stacji Kosmicznej i wschodnie
wybrzeże Australii (15.09.2011): [jonosfera](#)

Widmo Słońca, poza atmosferą

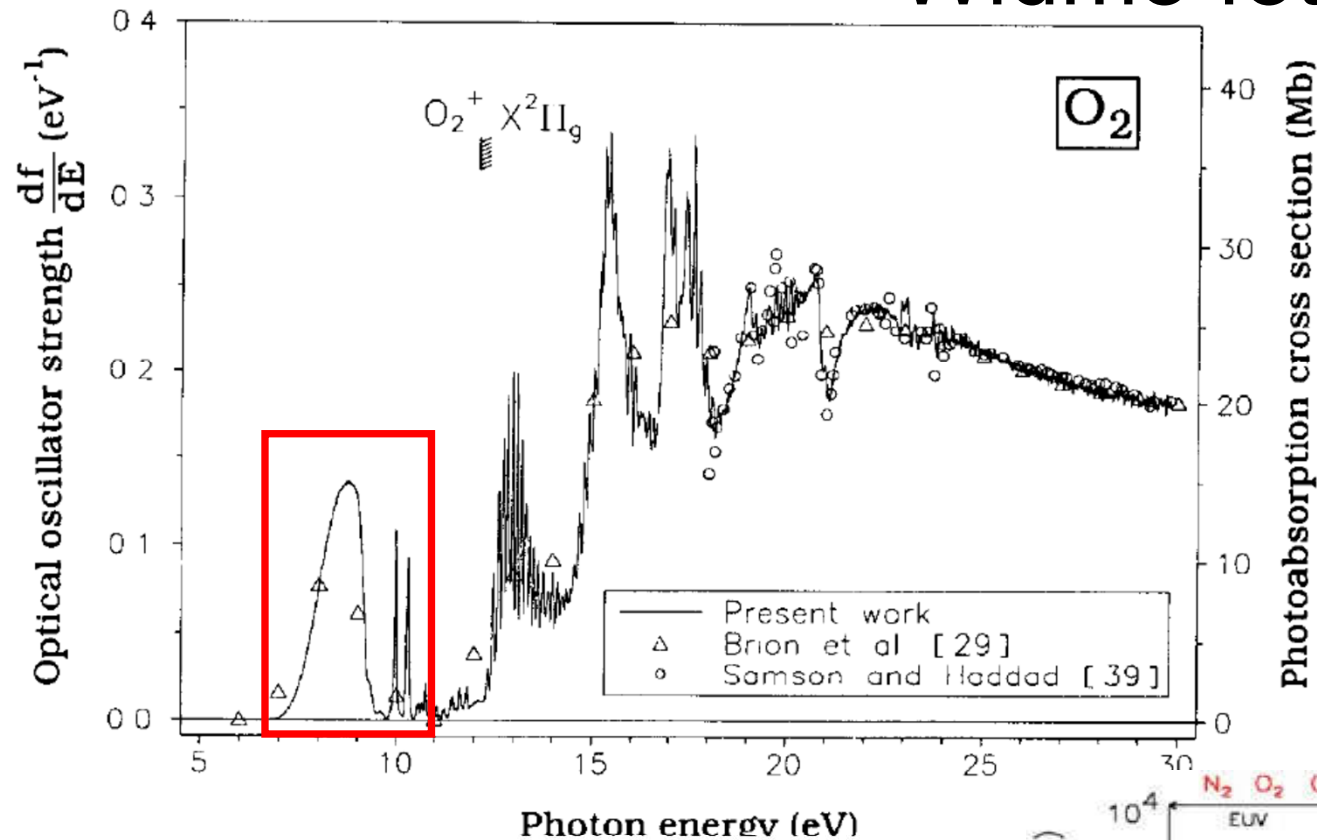


W jonosferze „znika” (czyli jest absorbowana) całość promieniowania UV.
To promieniowanie UV powoduje *jonizację* cząsteczek (i atomów), ale procesy są dość skomplikowane (kilkuetapowe) i są nadal przedmiotem badań naukowych (GK)
Wiosną jest znacznie więcej UV niż jesienią: latem powstaje ozon

Asta Juzeniene et al. , Solar radiation and human health

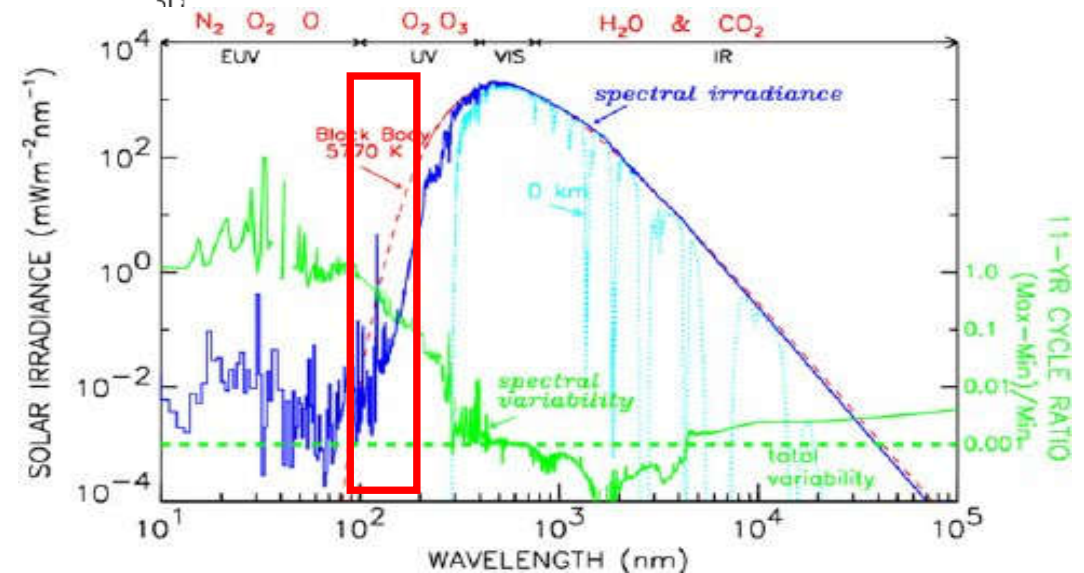
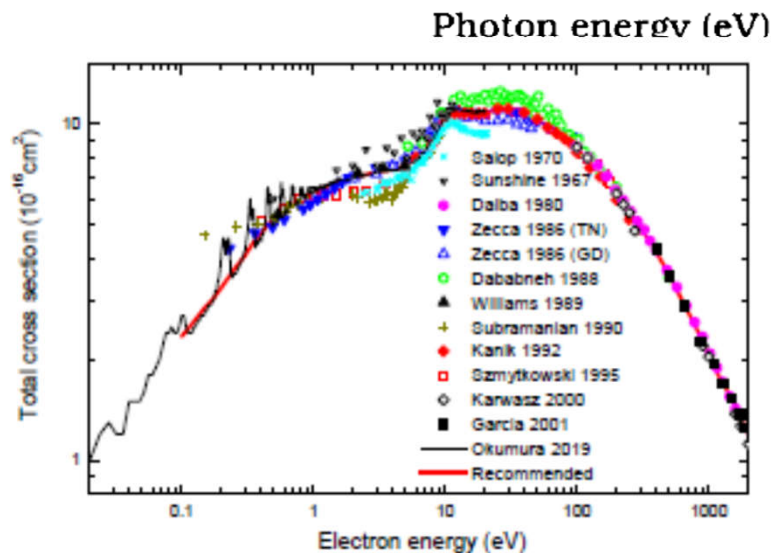
• [Reports on Progress in Physics](#) 74(6):066701.May 2011, DOI: [10.1088/0034-4885/74/6/066701](https://doi.org/10.1088/0034-4885/74/6/066701)

Widmo fotoabsorpcji O₂

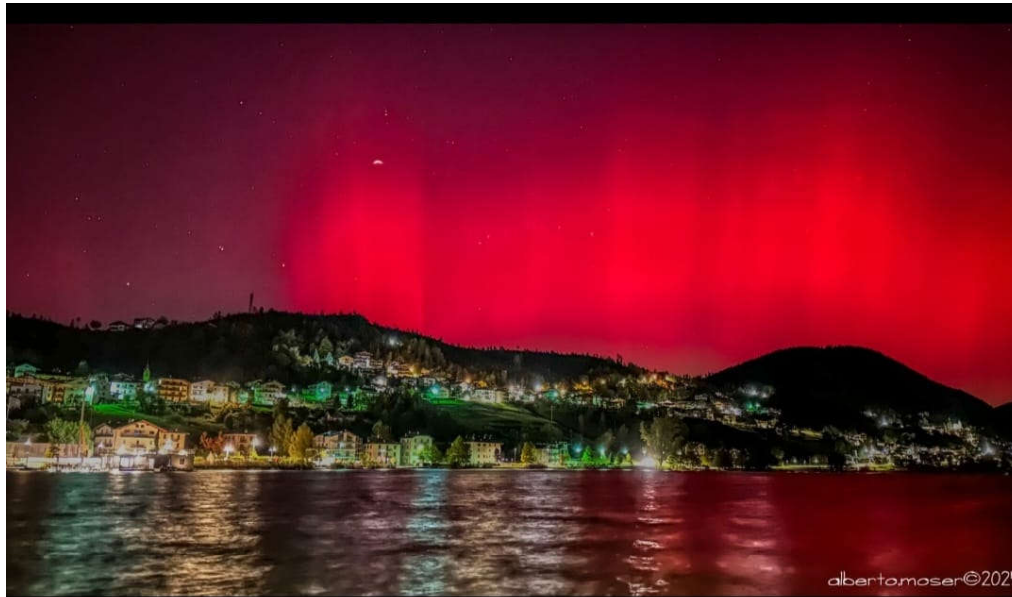


6.5 - 12 eV
tj. c.a. 100 – 200 nm

From Song, Karwasz,
work in progress



Jonosfera (~100 km)



Aurora, Lago di Garda (45N), 10.10.2024

ieri sera il lago di Serraià era uno spettacolo unico ed incredibile

Zorze polarne. Naładowane cząstki z promieniowania kosmicznego (głównie protony) zderzają się cząstkami powietrza zmuszając je do świecenia.



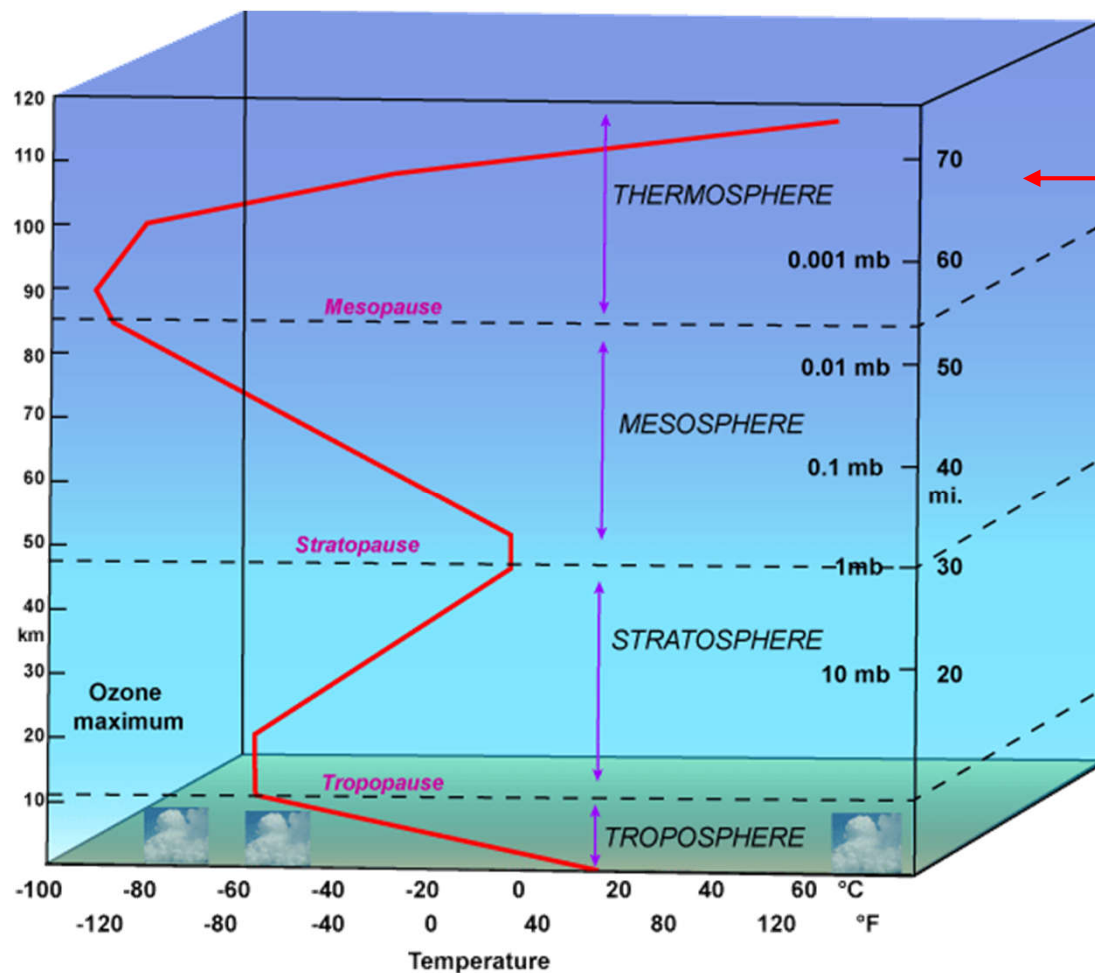
Na czerwono i na zielono świeci tlen, natomiast azot świeci w kolorach purpury i bordo.

Za zorzę polarną są „odpowiedzialne” atomy i jony O, O⁺, N, N⁺, a także cząsteczki NO, i jony NO⁺

Atomy, jony, cząsteczki są wzbudzane przez strumień protonów i elektronów z wiatru słonecznego

Ale tak naprawdę, specjaliści od zorzy polarnej czekają na dane od badaczy w temacie rozpraszania elektronów (=GK)

Termosfera



Ciśnienie 10^{-7} atm

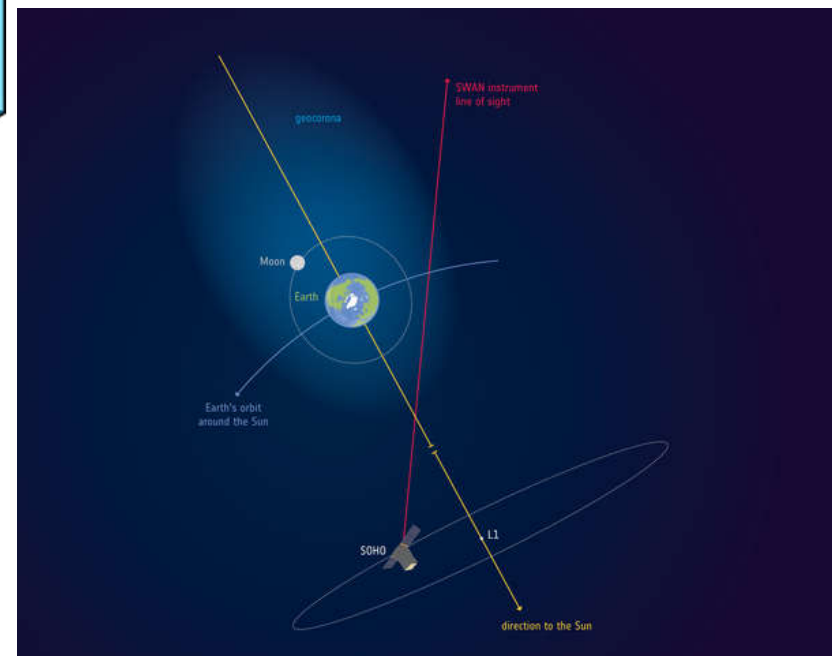
Średnia droga swobodna 1 m

Skład: O, N, N^+ , O^+

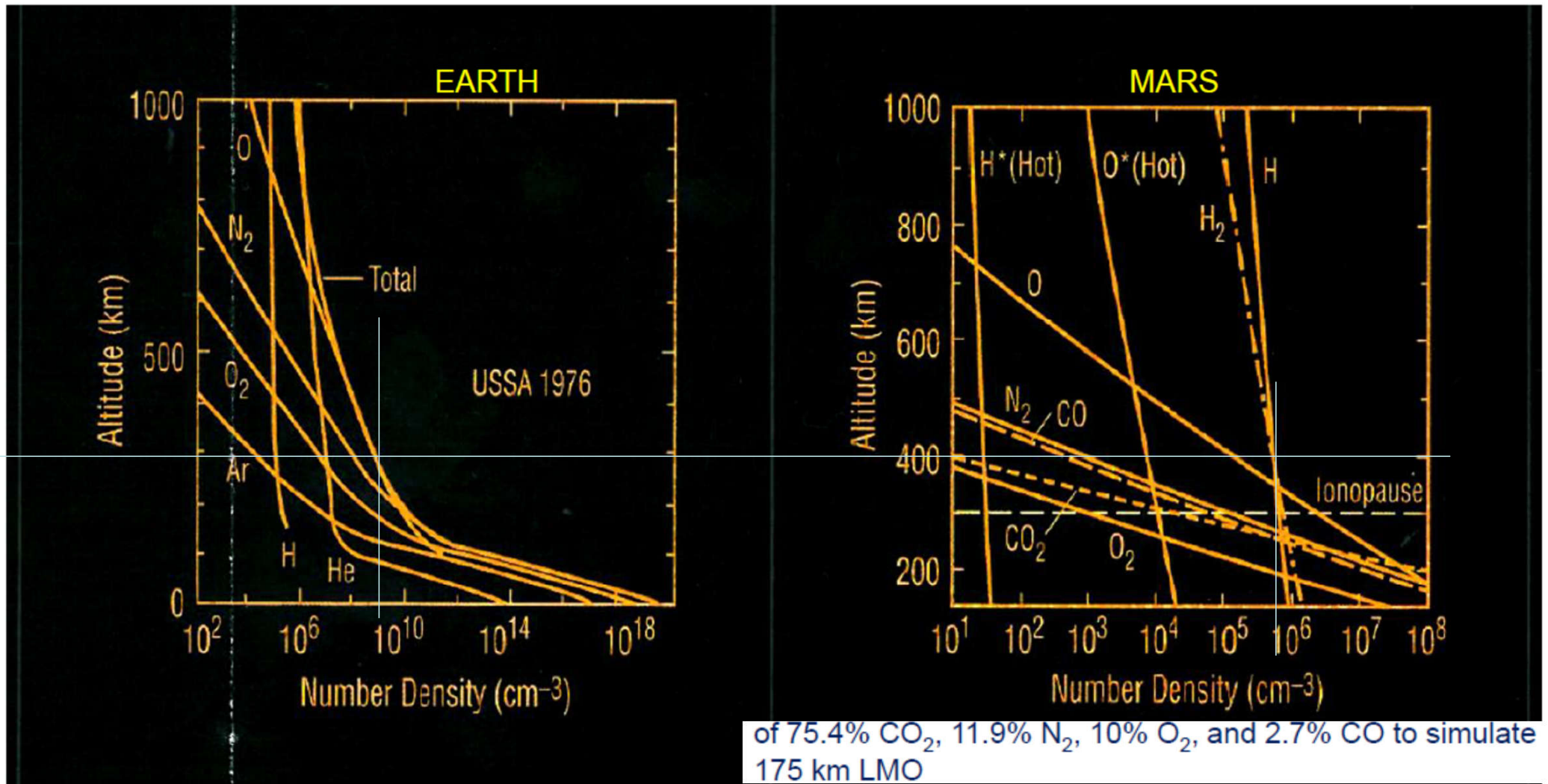
Absorpcja UVA

Temperatura, jako wielkość termodynamiczna nie może być określona.
Energia kinetyczna cząstek ~ 2.5 eV
(100 x większa niż $T=300K$)

Atmosfera ziemską (widziana jako emisja optyczna z atomów H) rozciąga się aż do orbity Księżyca (400 tys. km)

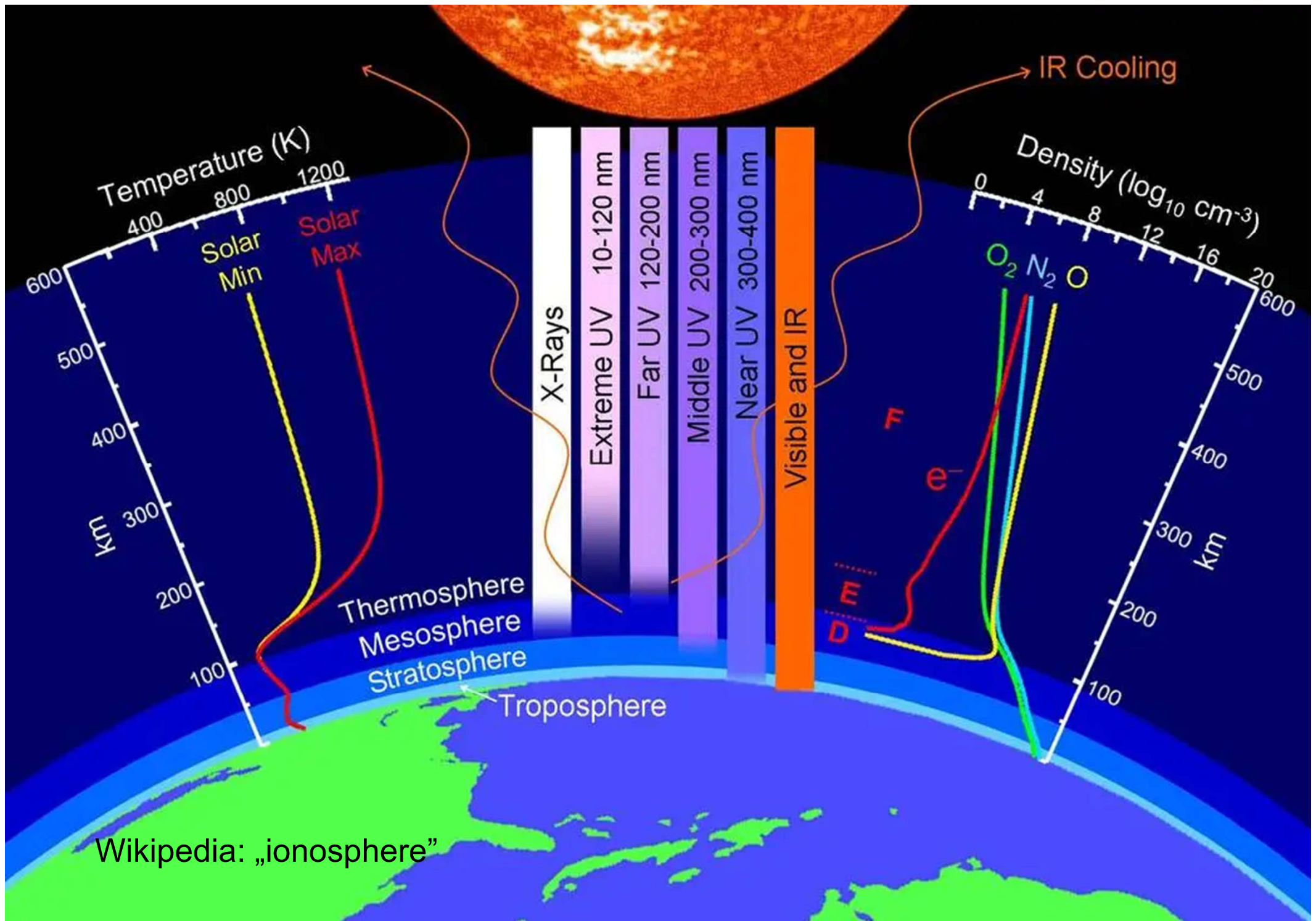


Atmospheric Composition Comparison Between Earth and Mars



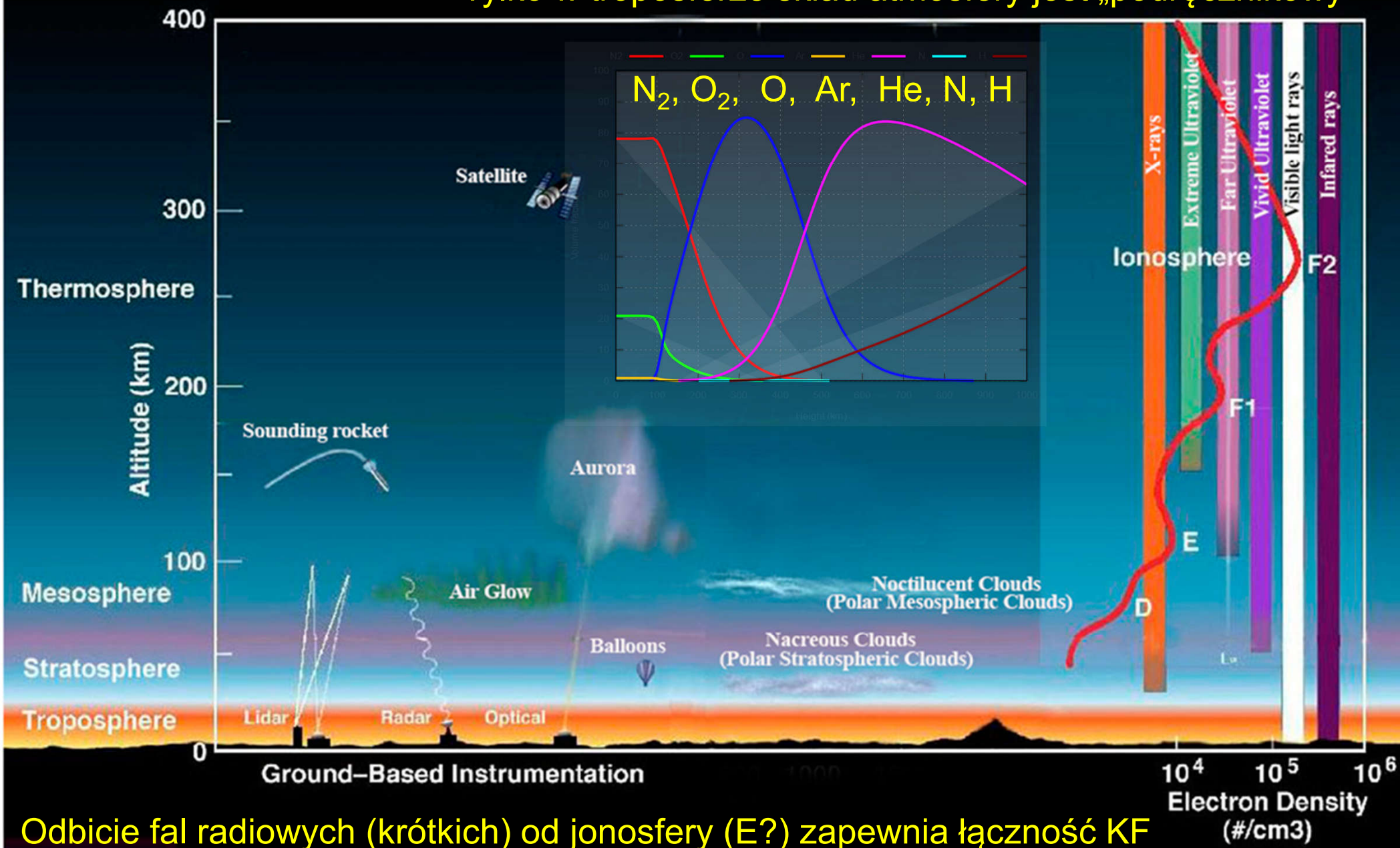
Graphs Courtesy of NASA JPL

Na wysokości 400 km atomowy tlen jest głównym (oprócz H i He, pochodzenia słonecznego) składnikiem atmosfery tak na Ziemi jak na Marsie

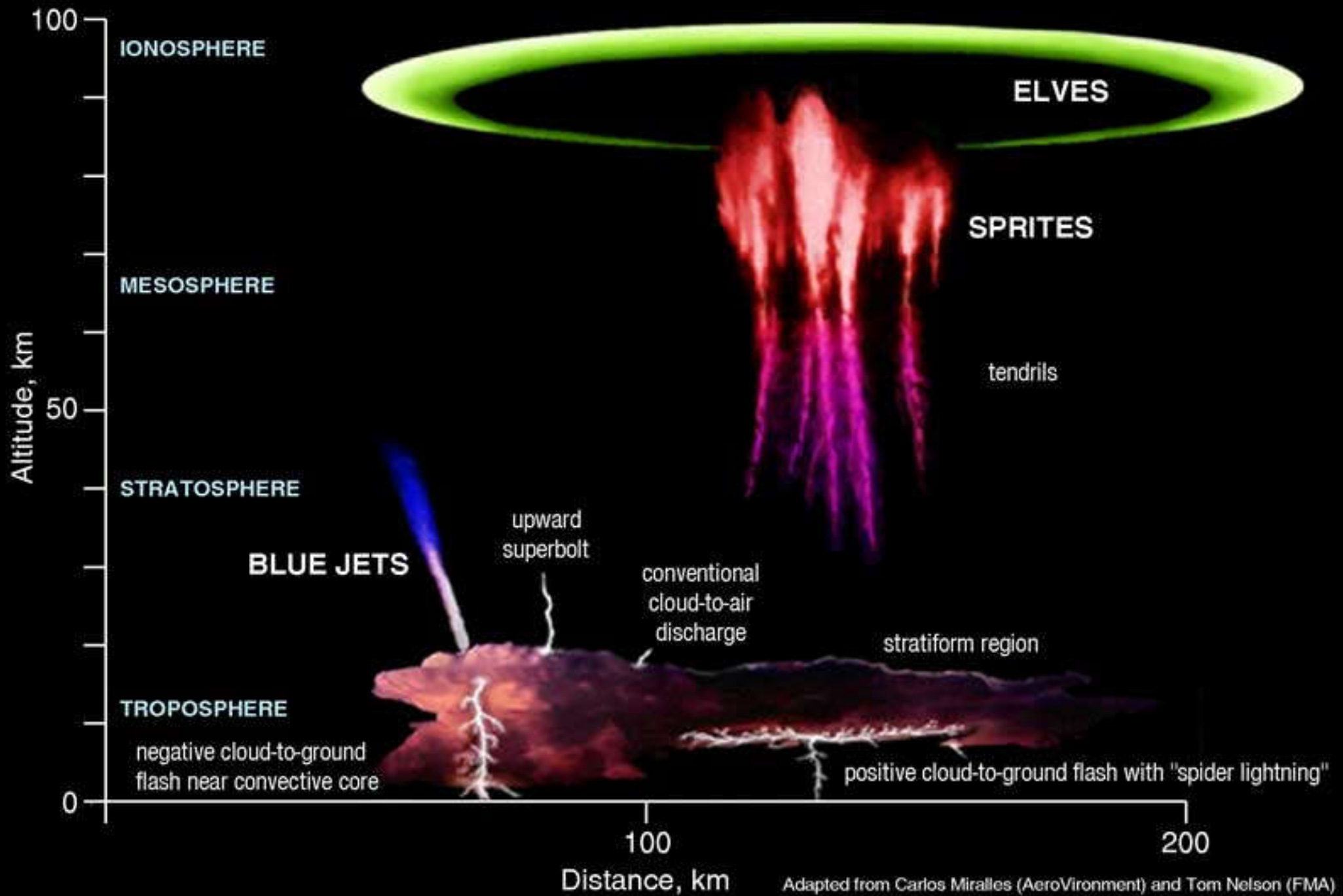


Exosphere

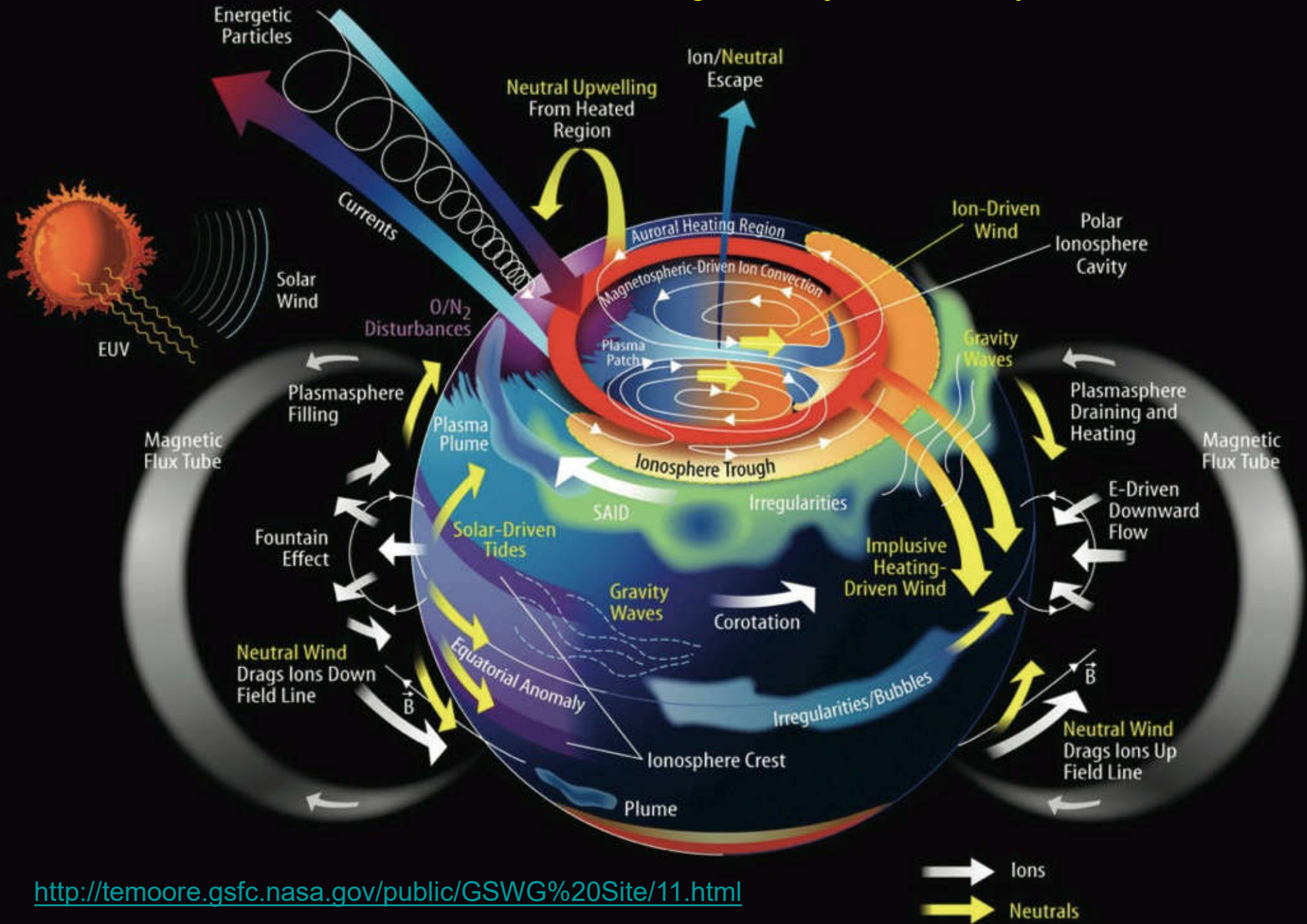
Tylko w troposferze skład atmosfery jest „podręcznikowy”

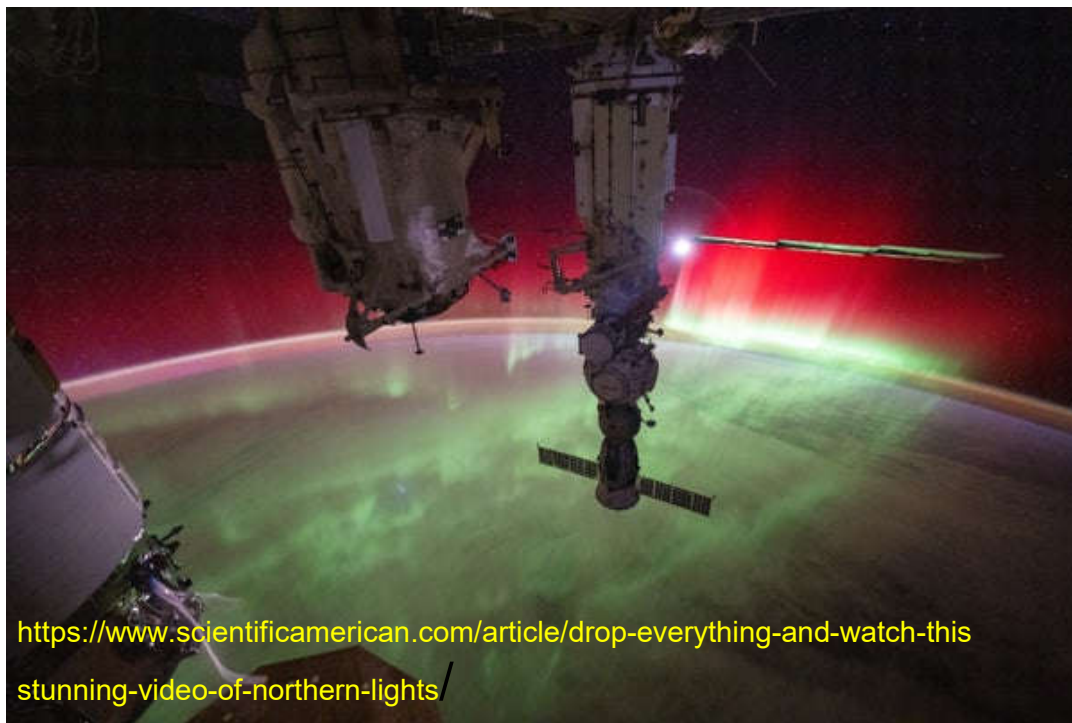


Odbicie fal radiowych (krótkich) od jonosfery (E?) zapewnia łączność KF



Nieskończone bogactwo zjawisk: nic, tylko studiować

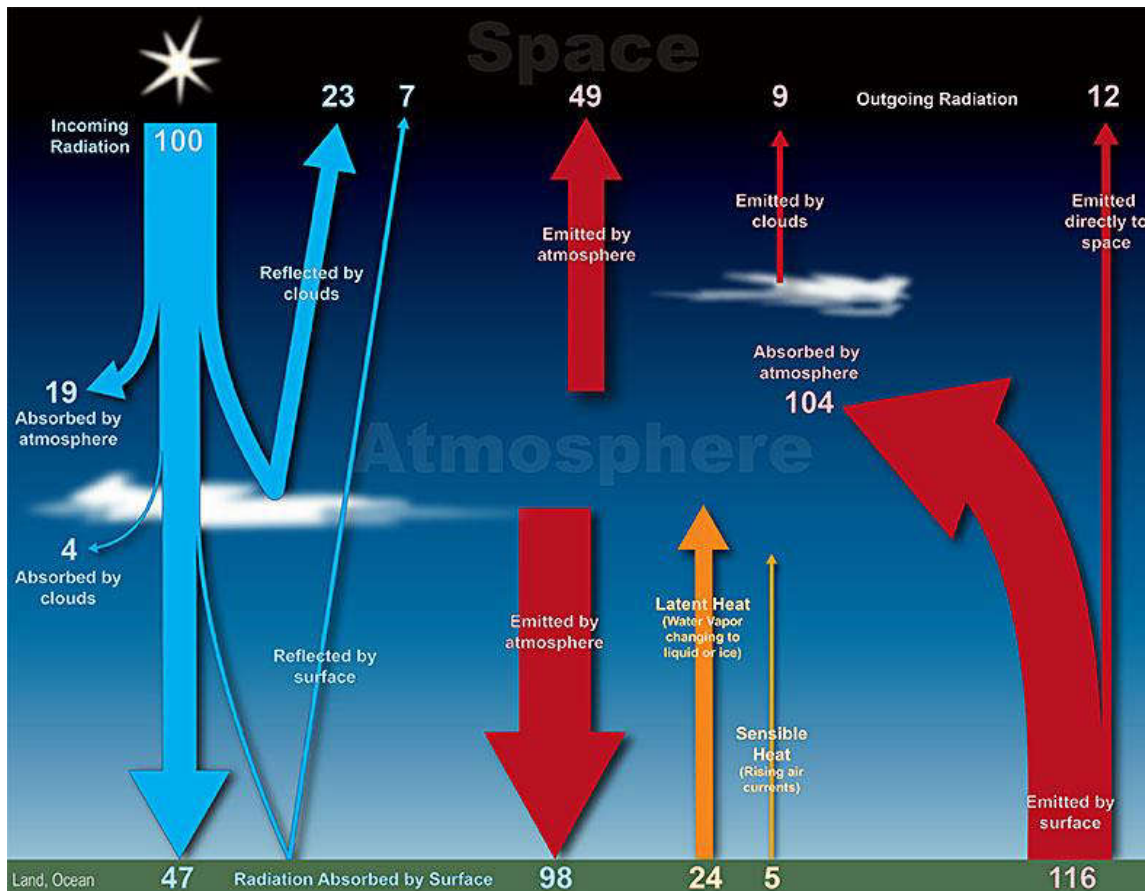
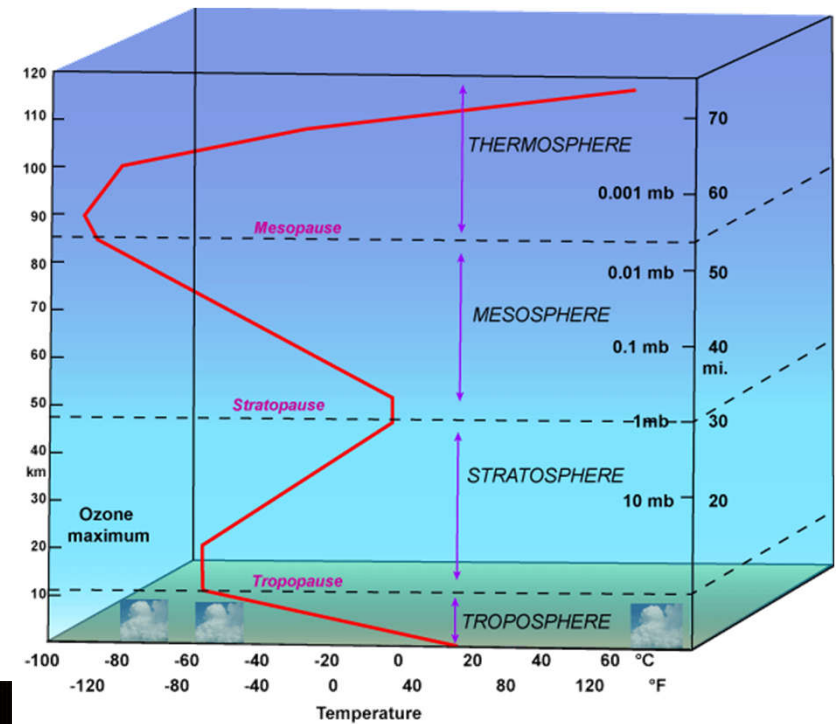
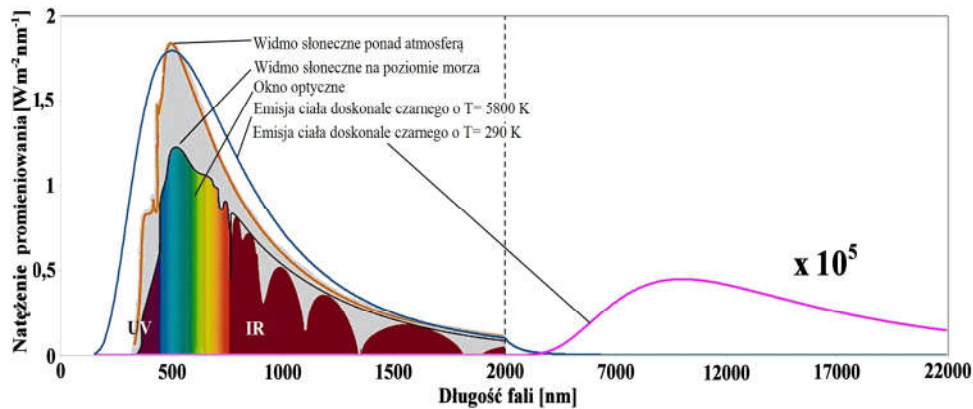




Skąd się biorą te piękne kolory?
Nad tym ciągle my (GK) pracujemy

Dziękuję za uwagę!

Do zapamiętania



Ogólny kształt plus
po 5 charakterystycznych liczb
na każdym wykresie

Fizyków – wyprowadzenie $p(z)$

Astronomów: hasło

<https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere>

Dodatek : fotojonizacja atomowego O

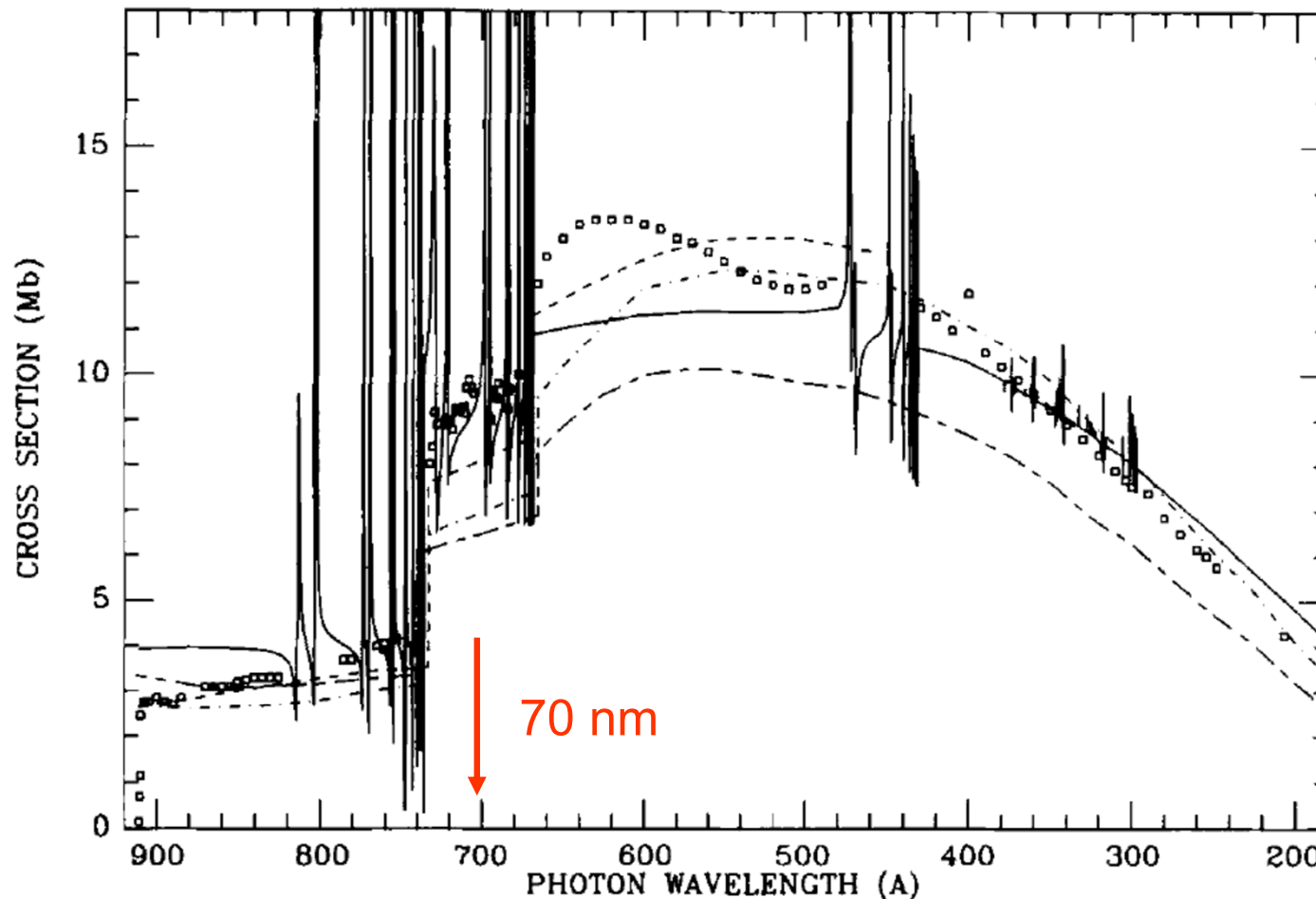


FIG. 1. Photoionisation cross section of oxygen in the ground state. Theory: — Bell *et al.* (1989); --- Bates and Seaton (1949); - · -, —, Dalgarno *et al.* (1964) (length and velocity values). Experiment: □ Angel and Samson (1988).

K. L. Bell, A.E. Kingston (1994)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1049250X08600075>

Widmo Słońca w EUV

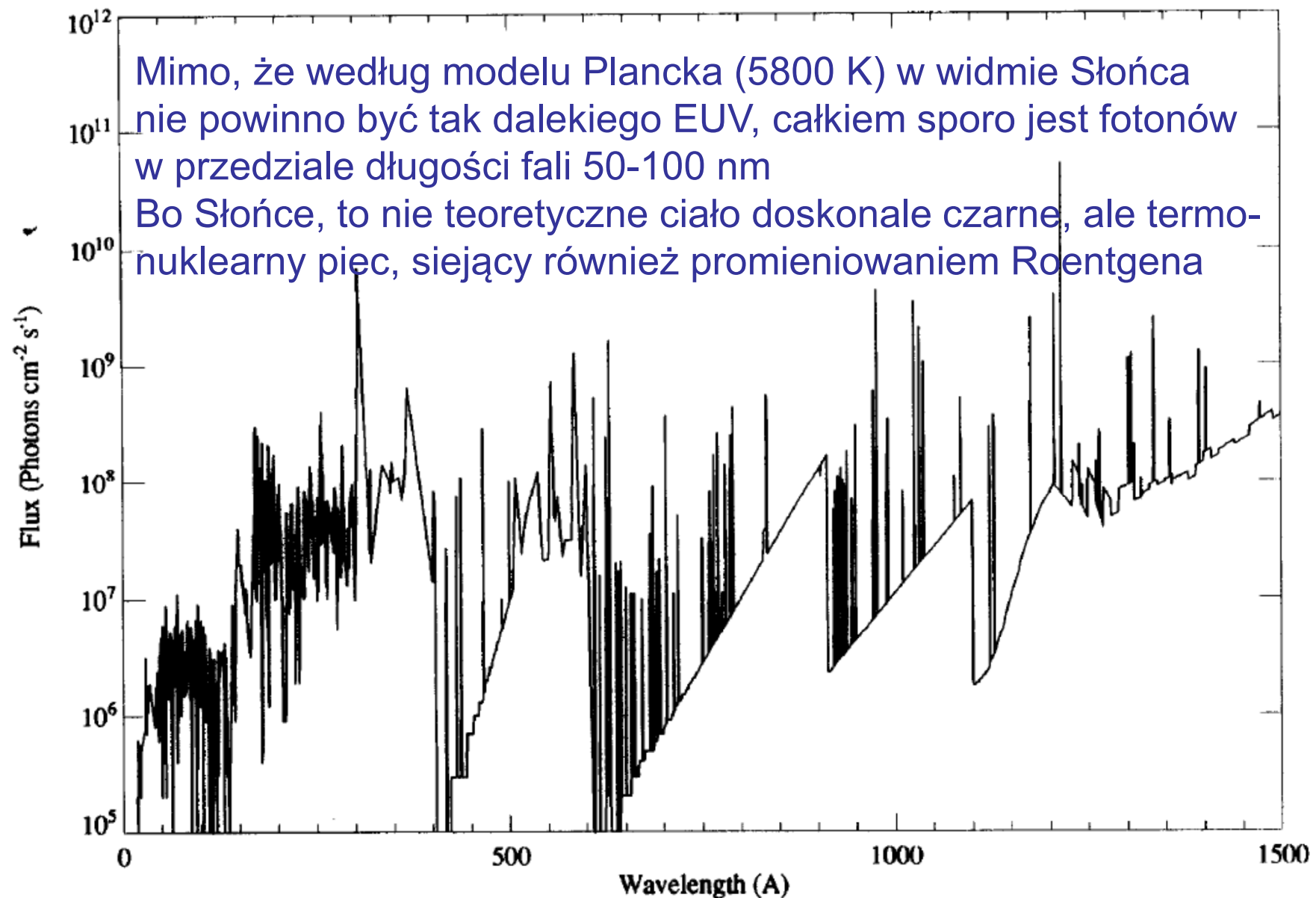


Figure 1. The F74113 EUV solar minimum reference spectrum.⁹ The fluxes above 250 Å were based on a rocket experiment flown on April 23, 1974. The fluxes below 250 Å were the estimated values for the solar condition of April 23, 1974.

Maksimum fotojonizacji tlenu O przypada na zakres 50-70 nm

J. A. FENNELLY and D. G. TORR

Photon Cross Sections for O, N₂, O₂, and N

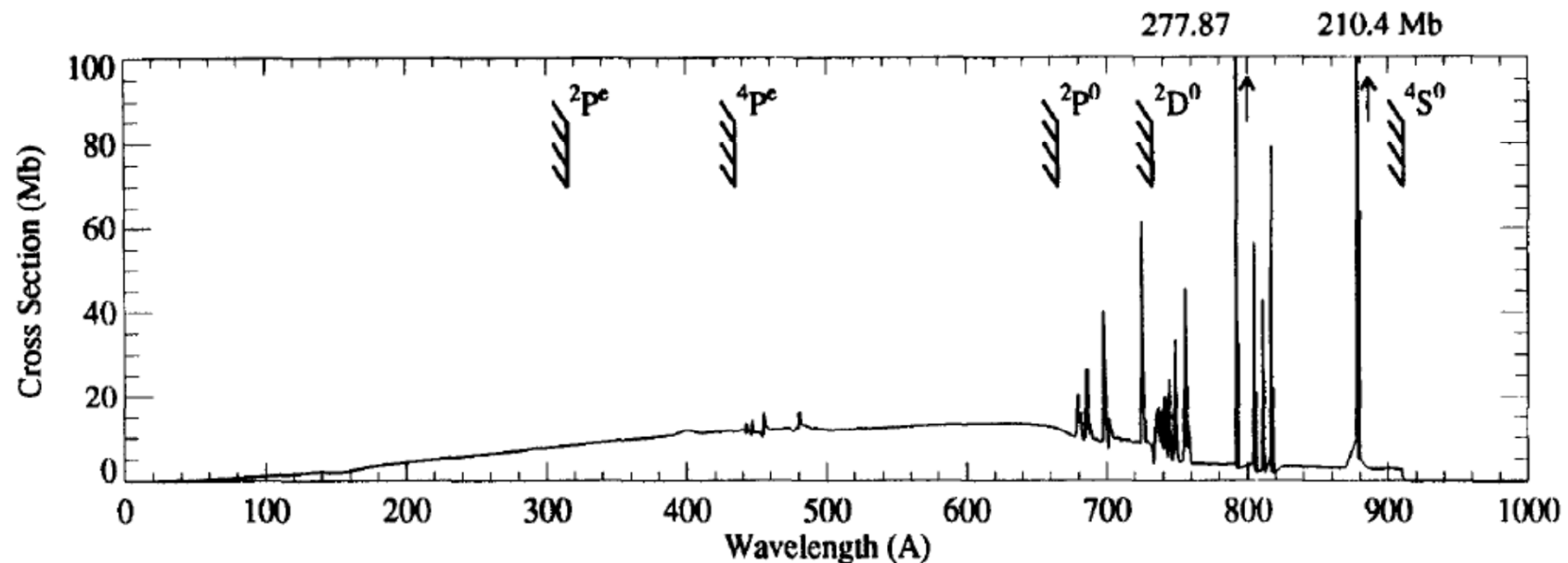
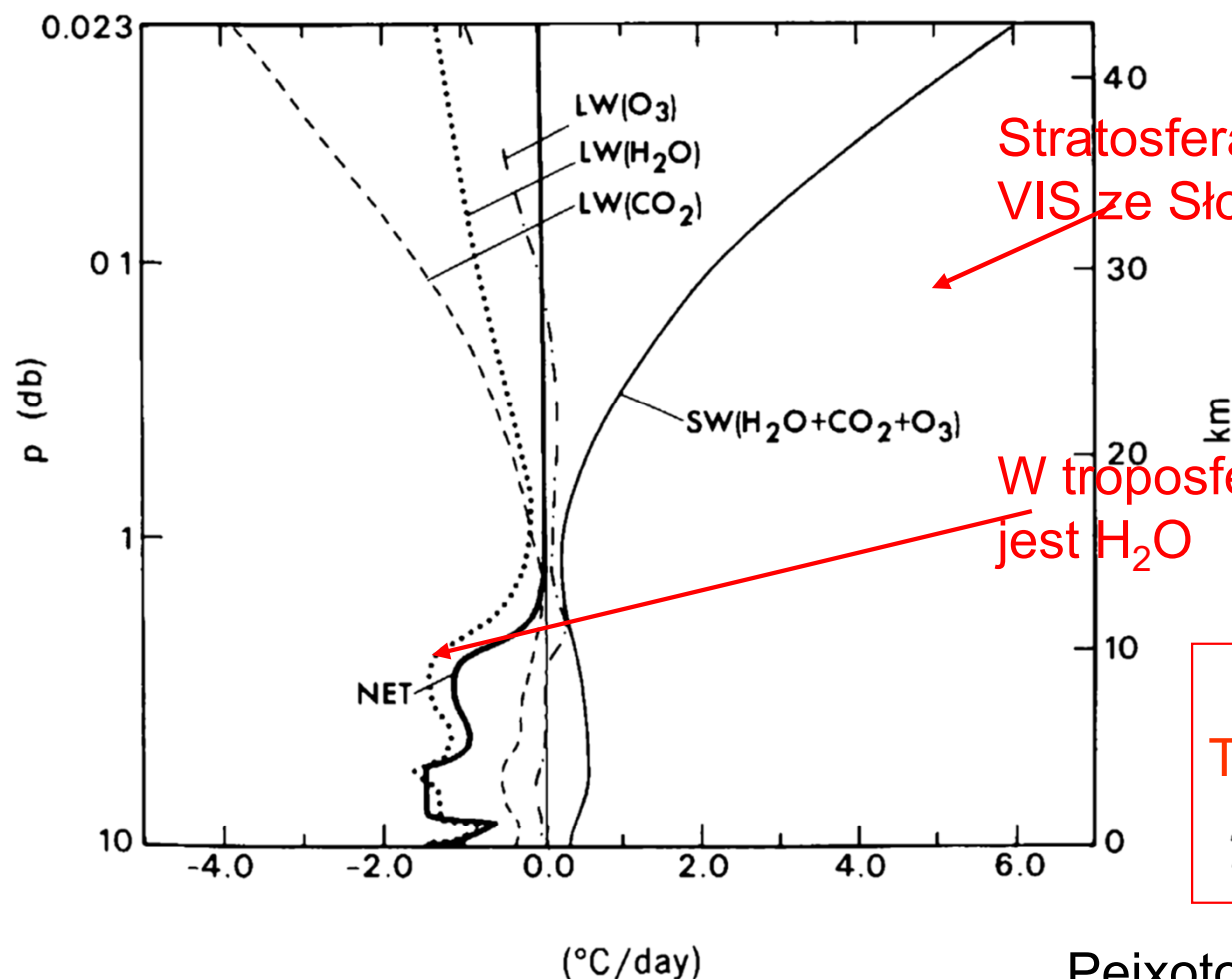


Figure 2. Atomic oxygen photoionization cross sections for the production of singly charged ions ($O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$) compiled in this study. The threshold of each ionic state is indicated.

Innymi słowy, zupełnie „przypadkowo”, atomowy tlen „wycina” z widma UVA UVB jest wycinane przez ozon O₃ (a UVA-B, również przez O₂)
Azot N₂ ma znacznie wyższy poziomy energetyczny foto-absorpcji.

Absorpcja w zakresie VIS i IR, przez H₂O, CO₂, O₃



Stratosfera się nagrzewa przez absorpcję
VIS ze Słońca, oraz IR przez cząsteczki CO₂

W troposferze głównym gazem cieplarnianym
jest H₂O

$$\sigma T_e^4 = 238 \text{ W m}^{-2}$$

Taką temperaturę daje prawo S-B

$$T_e = 255 \text{ K or } -18^{\circ}\text{C}.$$

FIGURE 6.7. Vertical distributions of the computed rate of temperature change in the atmosphere for thermal equilibrium due to various absorbers. $\text{LW}(\text{H}_2\text{O})$, $\text{LW}(\text{CO}_2)$, and $\text{LW}(\text{O}_3)$ show the rate of temperature change due to long-wave radiation emission and absorption by water vapor, CO_2 , and O_3 , respectively. $\text{SW}(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{O}_3)$ shows the rate of temperature change due to the absorption of solar radiation by these three gases. "Net" means the net rate of temperature change due to all components (adapted from Manabe and Strickler, 1964).

Peixoto and Oorts, *Physics of Climate*,
Springer, 1992 p. 115

[Heating, Excitation, Dissociation, and Ionization of Molecules by High-Energy Photons in Planetary Atmospheres](#)

A García Muñoz, E Bataille - ACS Earth and Space Chemistry, 2024

Photoionization by high-energy photons creates nonthermal electrons with a broad range of energies that heat and chemically transform the atmospheres of planets. The specifics of the interactions are notably different when the gas is atomic or molecular. Motivated by the idea that molecules survive to high altitudes in some exoplanets, we built a model for the energy transfer from nonthermal electrons to the H₂O, H₂, and O₂ molecules. Our calculations show that the primary electrons of ...

- Cytuje: Cross sections for electron collisions with H₂O

[Zapisz](#) [Twitter](#) [LinkedIn](#) [Facebook](#)

P.S. 08/12/2024

3 nowych cytowań do artykułów Grzegorz P. Karwasz

[\[PDF\] Streamer discharge simulations in humid air: uncertainty in input data and sensitivity analysis](#)

B Guo, H Malla, A Malagon-Romero, J Teunissen - arXiv preprint arXiv:2412.03861, 2024

We study how the choice of input data affects simulations of positive streamers in humid air, focusing on H₂O cross sections, photoionization models, and chemistry sets. Simulations are performed in air with a mole fraction of 0%, 3% or 10% H₂O using an axisymmetric fluid model. Five H₂O cross section sets are considered, which lead to significant differences in the resulting electron attachment coefficient. As a result, the streamer velocity can vary by up to about 50% with 10% H₂O. We ...

- Cytuje: Cross sections for electron collisions with H₂O

[Zapisz](#) [Twitter](#) [LinkedIn](#) [Facebook](#)

Adepci do pracy pilnie poszukiwani

[\[HTML\] Laboratory Studies on the Influence of Hydrogen on Titan-like Photochemistry](#)

MS Ugelow, ST Wieman, MCR Schwarz, V Da Poian... - ACS Earth and Space ..., 2024

Laboratory investigations of photochemical reactions in simulated Titan-like atmospheric systems provide insight into the formation of gas and aerosol products and the influence of different environmental parameters on the types of organic molecules generated. Studying the gas-phase products as a function of reaction time provides further insight into the reaction pathways that lead to organic production. The stable isotopes in the reactants and products serve as tracers and help to ...

- Cytuje: Cross sections for electron collisions with methane

[Zapisz](#) [Twitter](#) [LinkedIn](#) [Facebook](#)