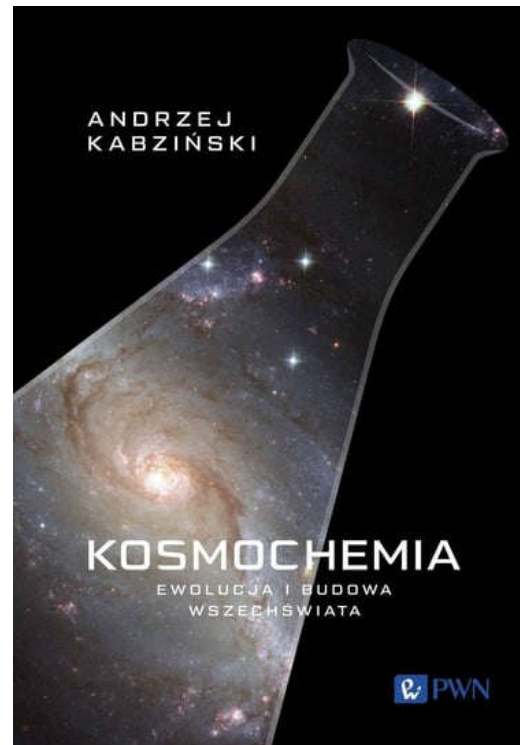
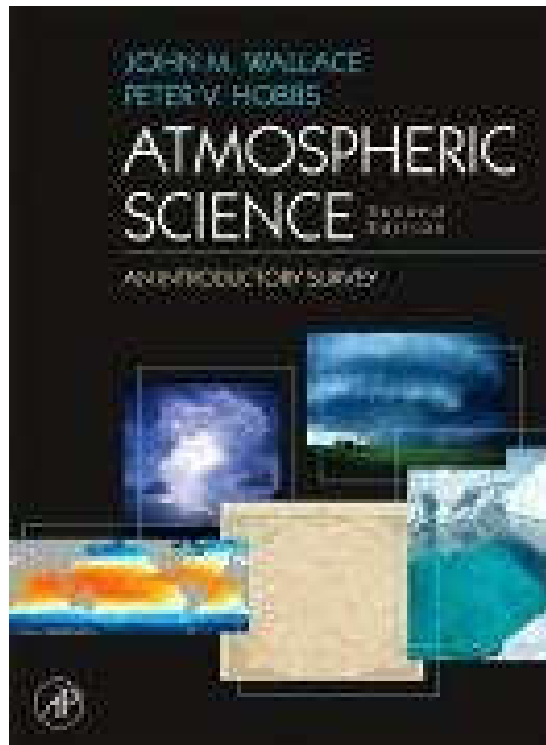
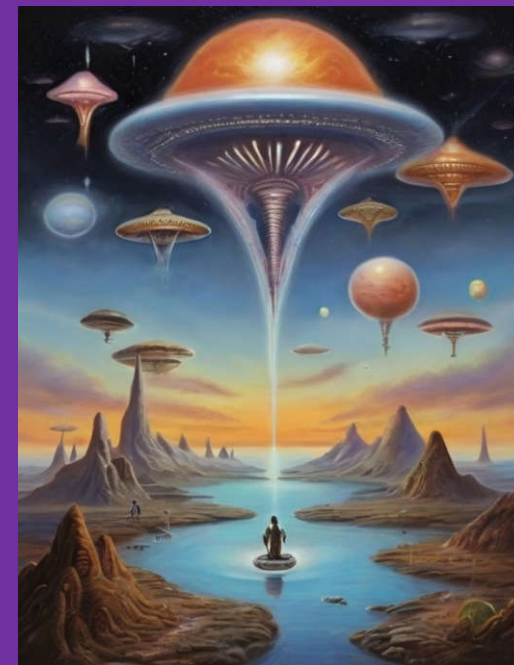


# Fizyka i Chemia Atmosfery

## Wykład 15: Atmosfery innych planet

Grzegorz Karwasz





Rys. Leonardo AI

# Czy istnieje życie na innych planetach?

Katedra Dydaktyki Fizyki i Pracowania Pokazów Fizycznych  
Instytut Fizyki, UMK Toruń  
02.2024 r.



Grzegorz Karwasz,  
Kamil Fedus, Mikołaj Karawacki, Andrzej Karbowski,  
Waldemar Krychowiak, Krzysztof Rochowicz



# „Strefa zamieszkania?”

**Table 4.1** Flux density of solar radiation  $F_s$ , planetary albedo  $A$ , and equivalent blackbody temperature  $T_E$  of some of the planets based on the assumption that they are in radiative equilibrium. Astronomical units are multiples of Earth–sun distance

| Planet  | Distance<br>from sun <sup>a</sup> | $F_s$ (W m <sup>-2</sup> ) | $A$  | $T_E$ (K) |
|---------|-----------------------------------|----------------------------|------|-----------|
| Mercury | 0.39                              | 8994                       | 0.06 | 439       |
| Venus   | 0.72                              | 2639                       | 0.78 | 225       |
| Earth   | 1.00                              | 1368                       | 0.30 | 255       |
| Mars    | 1.52                              | 592                        | 0.17 | 216       |
| Jupiter | 5.18                              | 51                         | 0.45 | 105       |

<sup>a</sup> Astronomical units are multiples of Earth–Sun distance.

# Ziemia – planeta mieszkalna



## 2.6 Earth: The Habitable Planet

Photographs of Earth and its neighbors in the solar system are shown in Fig. 2.36 and pertinent astronomical and atmospheric data are shown in Table 2.5. That Earth is the only planet in the solar system on which advanced life forms have evolved is due to a very special combination of circumstances.

- i. The range of surface temperatures on Earth has allowed for the possibility of oceans that have remained unfrozen throughout most of Earth's history. The oceans have provided (a) an essential pathway in the carbonate–silicate cycle that sequesters large amounts of carbon in the Earth system,

Earth is the only planet with an ozone layer, the heating of which produces the temperature maximum that defines the stratopause. Hence the vertical temperature profiles of the other planets consist of only of troposphere, an isothermal mesosphere and a thermosphere

(b) the medium in which simple life forms capable of photosynthesis were able to evolve, and (c) a thermal and chemical buffer that has served to reduce the amplitude of short-term climate variations.

- ii. Earth's distance from the sun and its planetary gravity are in the range that has allowed some, but not all, of its hydrogen to escape to space. The escape of hydrogen has led to oxidation of the minerals in the crust and upper mantle, a necessary condition for the accumulation of  $O_2$  in the atmosphere. It also liberated the oxygen required for the removal of  $CO_2$  from the atmosphere through the formation of carbonates. Yet it is also important that enough hydrogen remains in the Earth system to provide for an abundance of water.
- iii. Active plate tectonics has served to continually renew the atmosphere by injecting gases expelled from the mantle in volcanic eruptions.
- iv. An active hydrologic cycle sustains life on land.
- v. The massive outer planets (Jupiter, in particular) have tended to deflect comets away from Earth's orbit, reducing the frequency of catastrophic collisions.
- vi. The strong gravitational pull of the moon has tended to limit the range of obliquity of the Earth's axis. Had there been no such limit, harsh seasonal temperature contrasts would have occurred from time to time in the history of the Earth.
- vii. A rotation rate sufficiently rapid to prevent the occurrence of extreme daytime and nighttime temperatures.

# Atmosfery Układu Słonecznego

**Table 2.5** Astronomical and atmospheric data for Earth and neighboring planets<sup>a</sup>

| Parameter                           | Venus                  | Earth                 | Mars                   | Jupiter             |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| Radius (km $\times 10^3$ )          | 6,051                  | 6,371                 | 3390                   | 66,911              |
| Gravity (m s <sup>-2</sup> )        | 8.87                   | 9.80                  | 3.71                   | 24.79               |
| Distance from sun (AU)              | 0.72                   | 1.000                 | 1.524                  | 5.20                |
| Length of year (Earth years)        | 0.615                  | 1.000                 | 1.88                   | 11.86               |
| Length of day (Earth days)          | 117                    | 1.000                 | 1.027                  | 0.41                |
| Orbital eccentricity                | 0.0067                 | 0.0167                | 0.093                  | 0.049               |
| Orbital obliquity                   | 2.36                   | 23.45                 | 25.19                  | 3.13                |
| Dominant constituent (% by volume)  | CO <sub>2</sub> (96.5) | N <sub>2</sub> (78.1) | CO <sub>2</sub> (95.3) | H <sub>2</sub> (90) |
| Secondary constituent (% by volume) | N <sub>2</sub> (3.5)   | O <sub>2</sub> (21)   | N <sub>2</sub> (2.7)   | He (10)             |
| Surface pressure (hPa)              | 92,000                 | 997                   | 8 <sup>b</sup>         | >>10 <sup>6</sup>   |
| Surface temperature (K)             | 737                    | 288                   | 210                    |                     |
| Diurnal temperature range (K)       | ~0                     | 10                    | 40                     |                     |

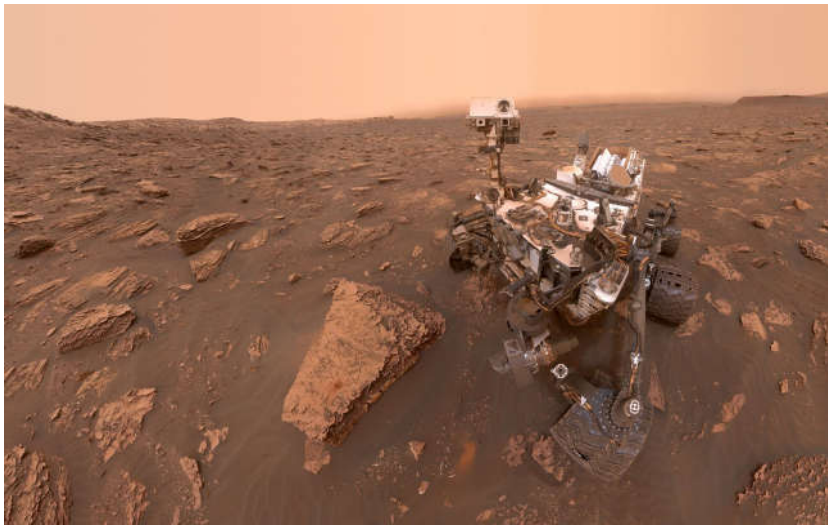
<sup>a</sup> Based on *Planetary Fact Sheets* on NASA Web site; Mars surface data based on records at the Viking 1 Lander site.

<sup>b</sup> Varies seasonally from 7.0 hPa during the austral winter, when Mars is farthest from the sun, to 9.0 hPa during the austral summer.

# Strefa życia wokół gwiazdy

W naszym układzie planetarnym, oprócz Ziemi tylko Mars znajduje się w strefie życia, ale na jej granicy. Tylko w najniższej położonych obszarach Marsa (poniżej 30% powierzchni planety) ciśnienie atmosferyczne i temperatura są wystarczające, aby woda istniała przez krótkie okresy w postaci płynnej.

W większości Mars to piaszczysta pustynia:



- wycieczka na Marsa z aplikacją AR?

# Dlaczego niebo jest „niebieskie”



**Bo zachodzące słońce jest czerwone!**

GK <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/bluesky.html>

By optick - <https://www.flickr.com/photos/optick/112909824/>,

CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10653821>

# Kolory nieba (São Paulo, Brazylia)



Foto: Carmen Busco Sao Paol

# I colori del cielo (San Paolo, Brasile)



Foto: Carmen Busco Sao Paol



**Sempre i colori complementari: viola/giallo, blu/arancione**

# I colori del cielo (San Paolo, Brasile)

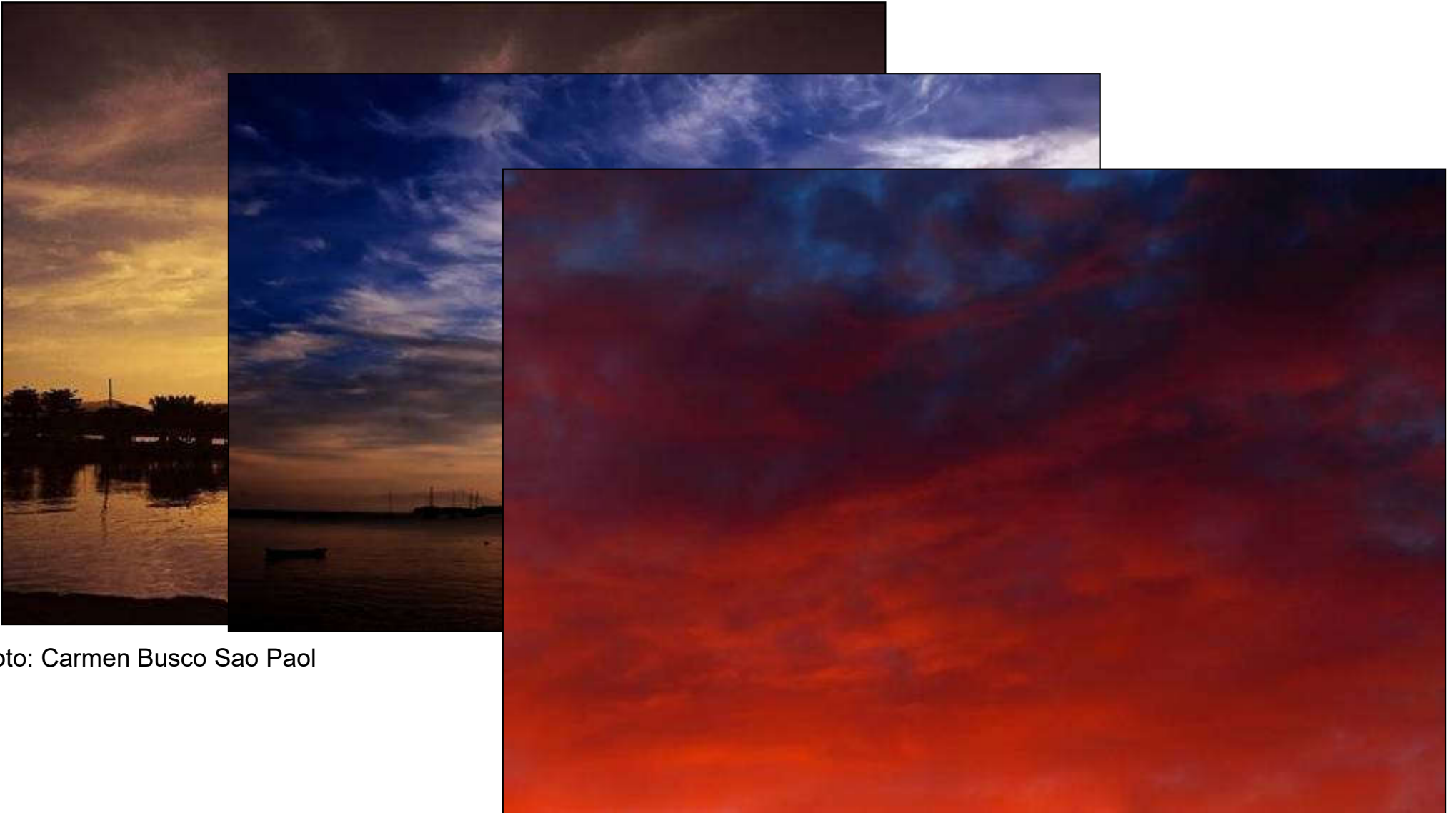


Foto: Carmen Busco Sao Paol

# Kolory nieba (zachód słońca na Rodos)

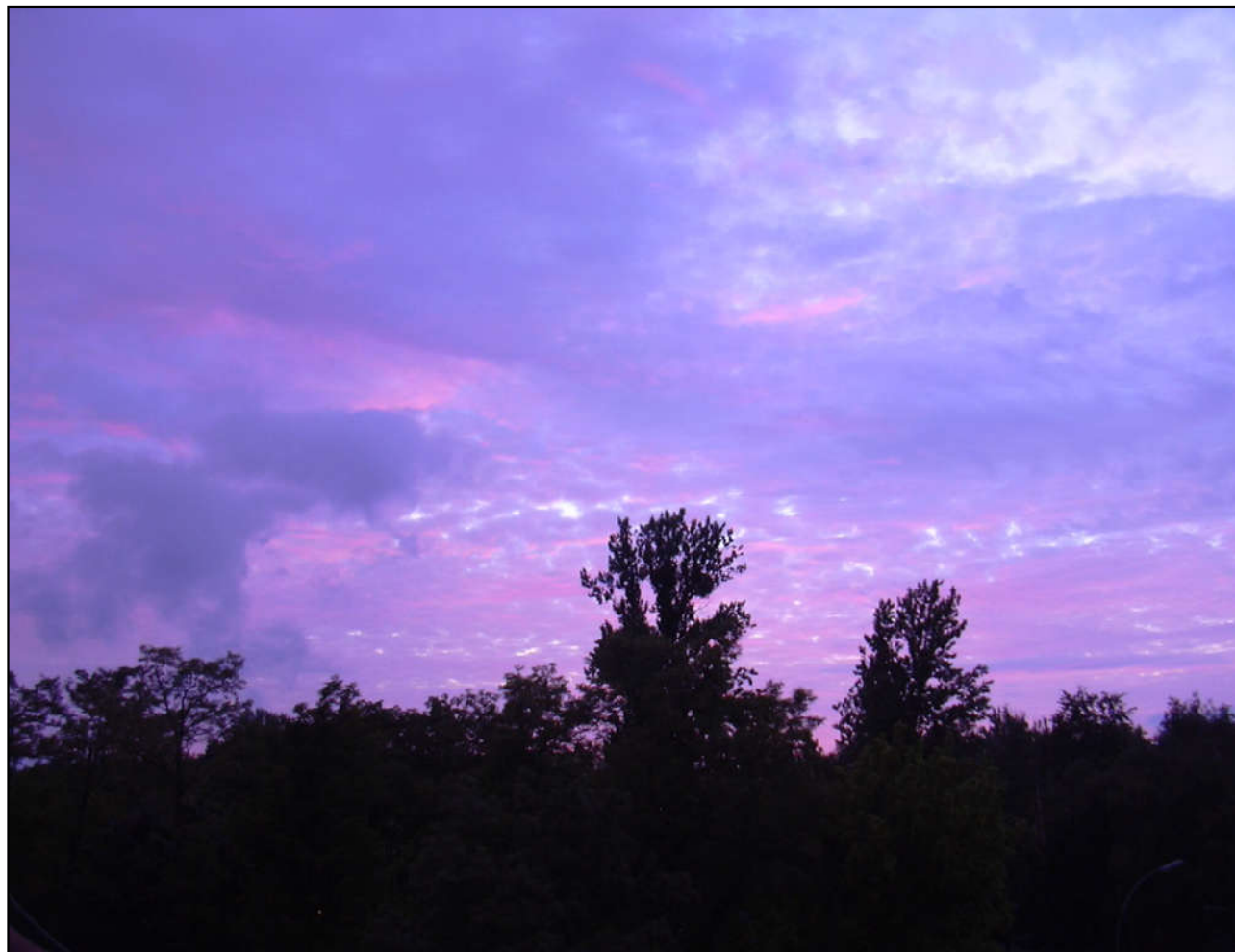


Rosso di sera – bel tempo si spera:  
Czerwony zachód słońca wróży dobrą pogodę

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2$$

Rayleigh scattering: più forte per le onde corte  
(colore blu)  
Ma sulla Terra c'è l'ossigeno nell' atmosfera

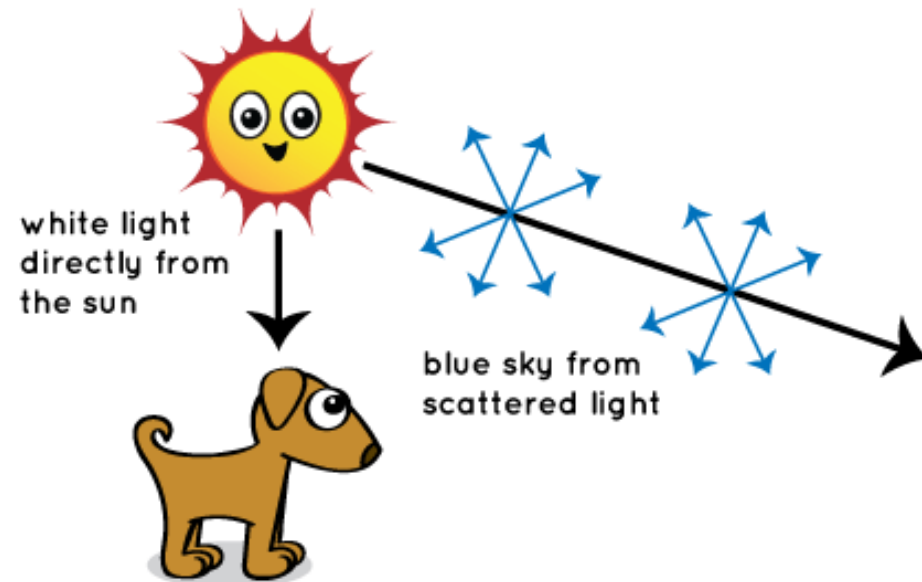
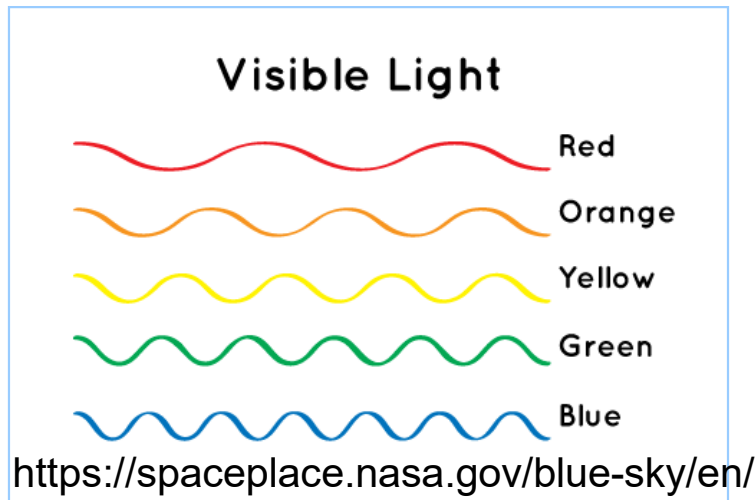
# Kolory nieba (po letniej burzy w Berlinie)



Berlin, 24.06.2009

Różowy zachód słońca zimą - nadchodzi silne zimno  
Czy kolor nieba odzwierciedla skład powietrza?

# Dlaczego niebo (na Ziemi) jest niebieskie?



Na Marsie (dużo pyłu i CO<sub>2</sub> w atmosferze)  
Zachody słońca są fioletowe, a niebo w południe jest czerwone



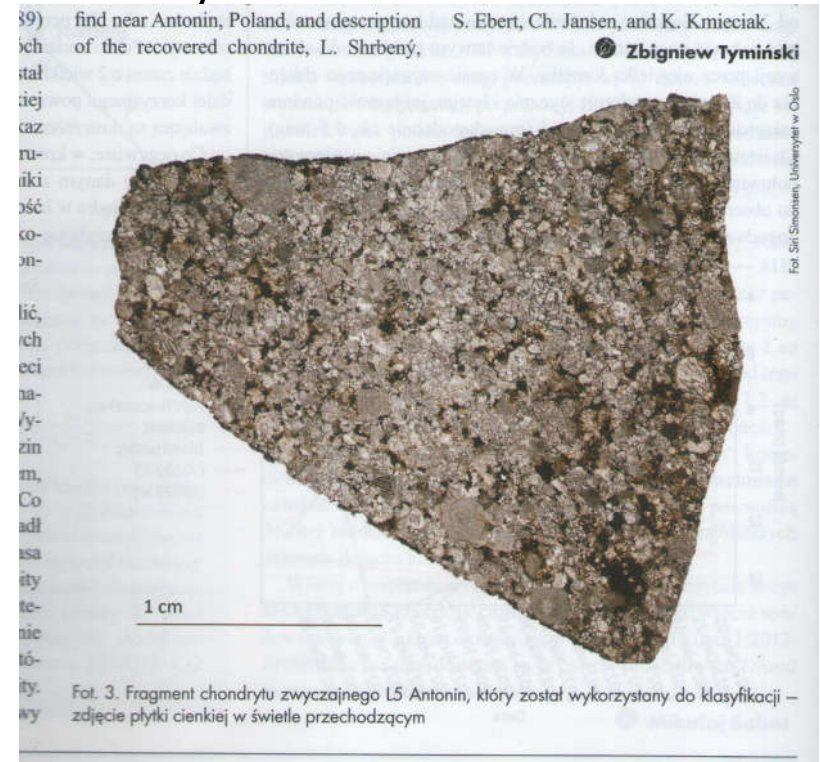
# Meteoryty

[https://pl.wikipedia.org/wiki/Chondryty\\_oliwinowo-bronzytowe](https://pl.wikipedia.org/wiki/Chondryty_oliwinowo-bronzytowe)

- Oliwin 25% – 40%
- Piroksen rombowy 20% – 35%
- Plagioklaz 5% – 10%
- Stop żelazowo-niklowy 16% – 21%
- Troilit ok. 5%
- Bronzyt ( $\text{MgFeSiO}_3$ )

Dating using  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  gives an estimated age of  $4,566.6 \pm 1.0$  Ma,<sup>[6]</sup> matching ages for other chronometers

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



# Wulkany na Wenus i Europie

**15.03**

Krążąc wokół Wenus, sonda Magellan wykonała w latach 1990–1992 radarową mapę topograficzną prawie całej jej powierzchni. Niektóre miejsca zobrazowała parokrotnie. Dopiero teraz, po 30 latach, porównując pary map wykonanych w odstępie kilku miesięcy, odkryto, że krater jednego z wulkanów, Maat Mons, w tym czasie się poszerzył, a jego dno pociemniało (fot. obok). Mamy silny dowód



# Jonosfera Venus

## **[HTML] Modeling the structure of the dayside Venusian ionosphere: Impacts of protonation and Coulomb interaction**

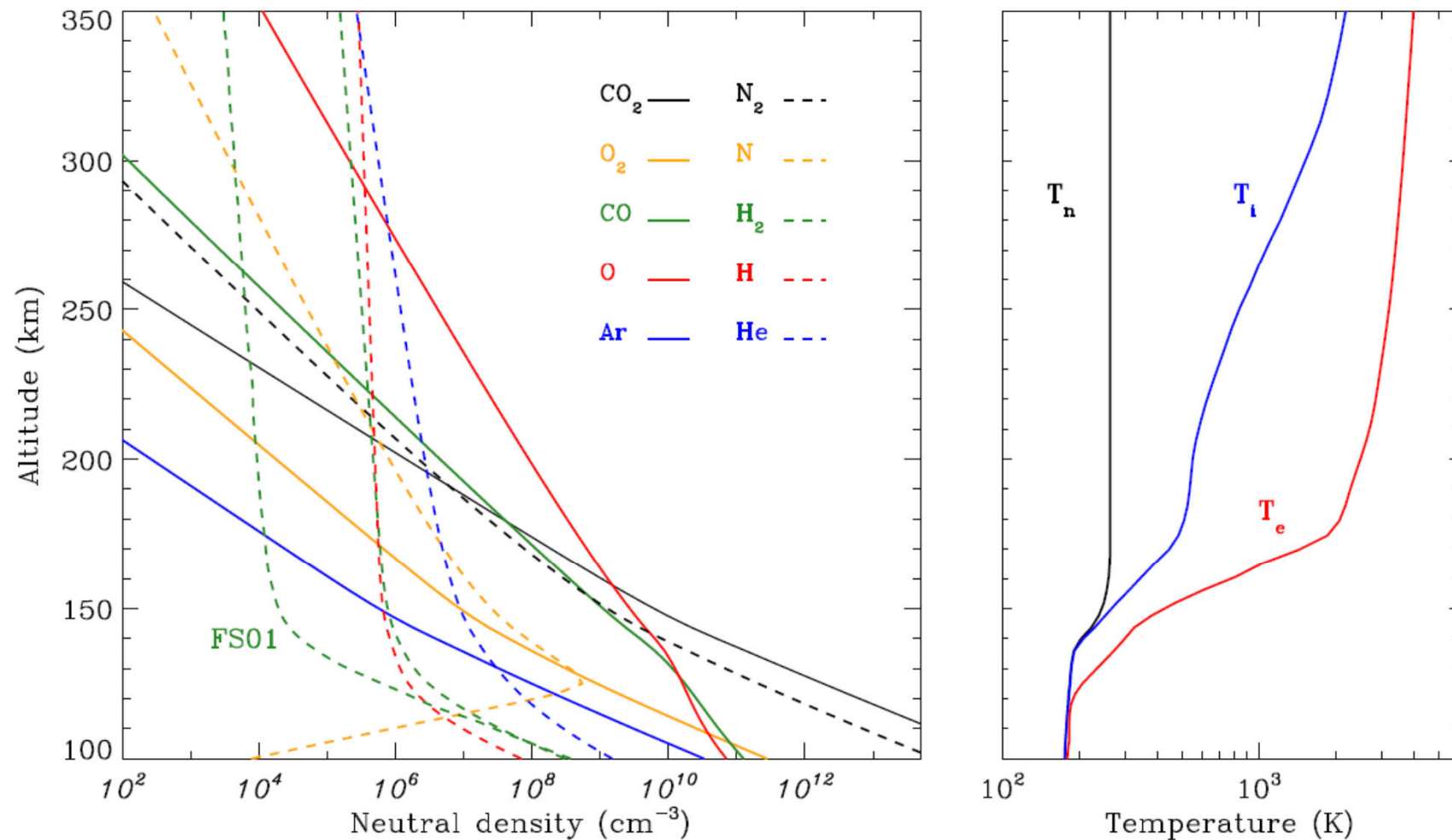
X Wu, J Cui, S Wu, H Gu, Y Cao, W Liang, S Liao - Astronomy & Astrophysics, 2024  
Context. The CO<sub>2</sub>-dominated thick atmosphere of Venus coexists with an ionosphere that is mainly formed, on the dayside, via the ionization of atmospheric neutrals by solar extreme ultraviolet and soft X-ray photons. Despite extensive modeling efforts that have reproduced the electron distribution reasonably well, we note two main shortcomings with respect to prior studies. The effects of protonation and Coulomb interaction are crucial to unveiling the structure and composition of the Venusian ionosphere.

incorporating a small amount of O (1% at the homopause), CO<sub>2</sub><sup>+</sup> could be rapidly converted to O<sub>2</sub><sup>+</sup> via  $\text{CO}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$ , making O<sub>2</sub><sup>+</sup> significantly more abundant than CO<sub>2</sub><sup>+</sup> at all altitudes.

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2024/05/aa47925-23/aa47925-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2024/05/aa47925-23/aa47925-23.html)

Cytuje: Cross sections for electron collisions with NO, N<sub>2</sub>O, and NO<sub>2</sub>

# Venusian atmosphere: neutrals

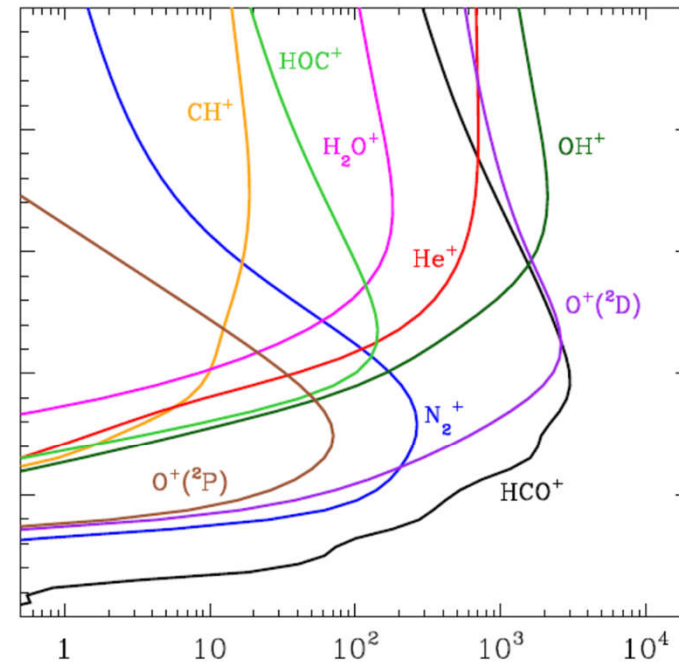
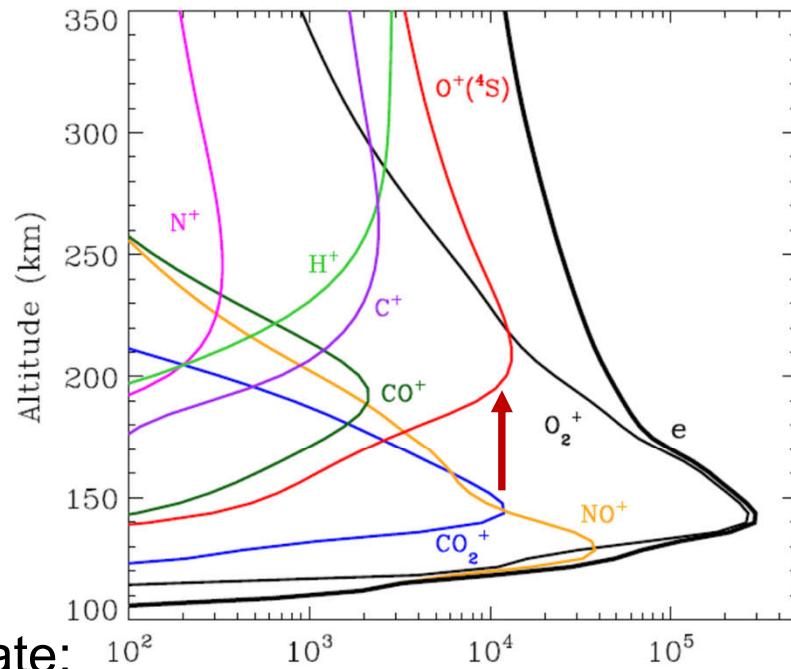


Structure of the underlying Venusian upper atmosphere used in our model calculations, appropriate for the dayside averaged condition at solar minimum.

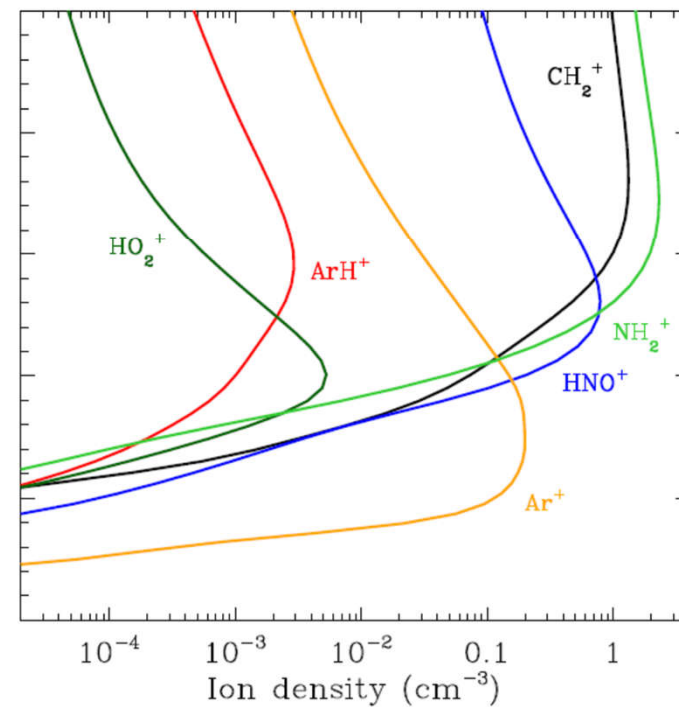
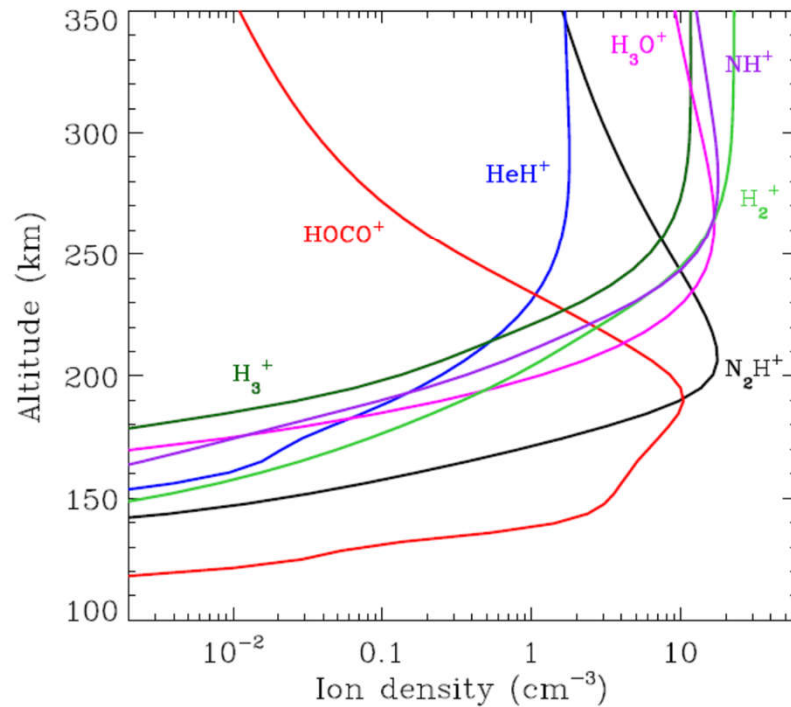
Left: density profiles of 10 background species (CO<sub>2</sub>, O, CO, N<sub>2</sub>, N, He, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H, and Ar).

Right: neutral, ion, and electron temperature profiles (denoted as  $T_n$ ,  $T_i$ , and  $T_e$ , respectively).

# Venusian atmosphere: ion densities



Ionization rate:  
 $<10^{-6}$



# Mars: dlaczego nie ma życia?

In 1993, three French mathematicians demonstrated that the Moon plays a stabilizing role for the Earth. Without the Moon, the Earth axis would have undergone strong oscillations, up to differences of  $30^\circ$  in a few million years, with serious consequences for the stability of the climate, what would have prevented the development of life. The role of the Moon can be compared to a rod, light but long, which the tightrope walker holds so as not to fall, see fig. 4.4b.

J. LASKAR, F. JOUTEL, PH. ROBUTEL, “*Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon*”, «Nature» 361 (1993), p. 615.

The axis of Mars is tilted in a similar way ( $25^\circ$ ) to the Earth axis, but in the absence of the heavy moon (Mars has only two small satellites) the inclination is subject to strong variations (from  $10^\circ$  to  $60^\circ$ ) over long periods. As the prestigious scientific journal ‘Science’ comments, these oscillations caused strong climate changes and contributed to the loss of most of the planet's atmosphere, leaving Mars "in the state of a dry desert to the last bone", as it appears today.

«That caused huge climate variations that in turn could have contributed to the loss of most of the planet's atmosphere, leaving Mars the bone-dry desert world that it is now. Since then, most astrobiologists have assumed that Earth-like planets in other solar systems would need a comparatively large moon to support complex life over long periods of time.»

[http:// www.sciencemag.org/news/2011/05/who-needs-moon.](http://www.sciencemag.org/news/2011/05/who-needs-moon)

# 08/06/2018 Życie na Marsie?

SHARE

REPORT



0



0

## Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars

Jennifer L. Eigenbrode<sup>1,\*</sup>, Roger E. Summons<sup>2</sup>, Andrew Steele<sup>3</sup>, Caroline Freissinet<sup>1,†</sup>, Maëva Millan<sup>4,‡</sup>, Rafael Navarro-Gon...

+ See all authors and affiliations

Science 08 Jun 2018:

Vol. 360, Issue 6393, pp. 1096-1101

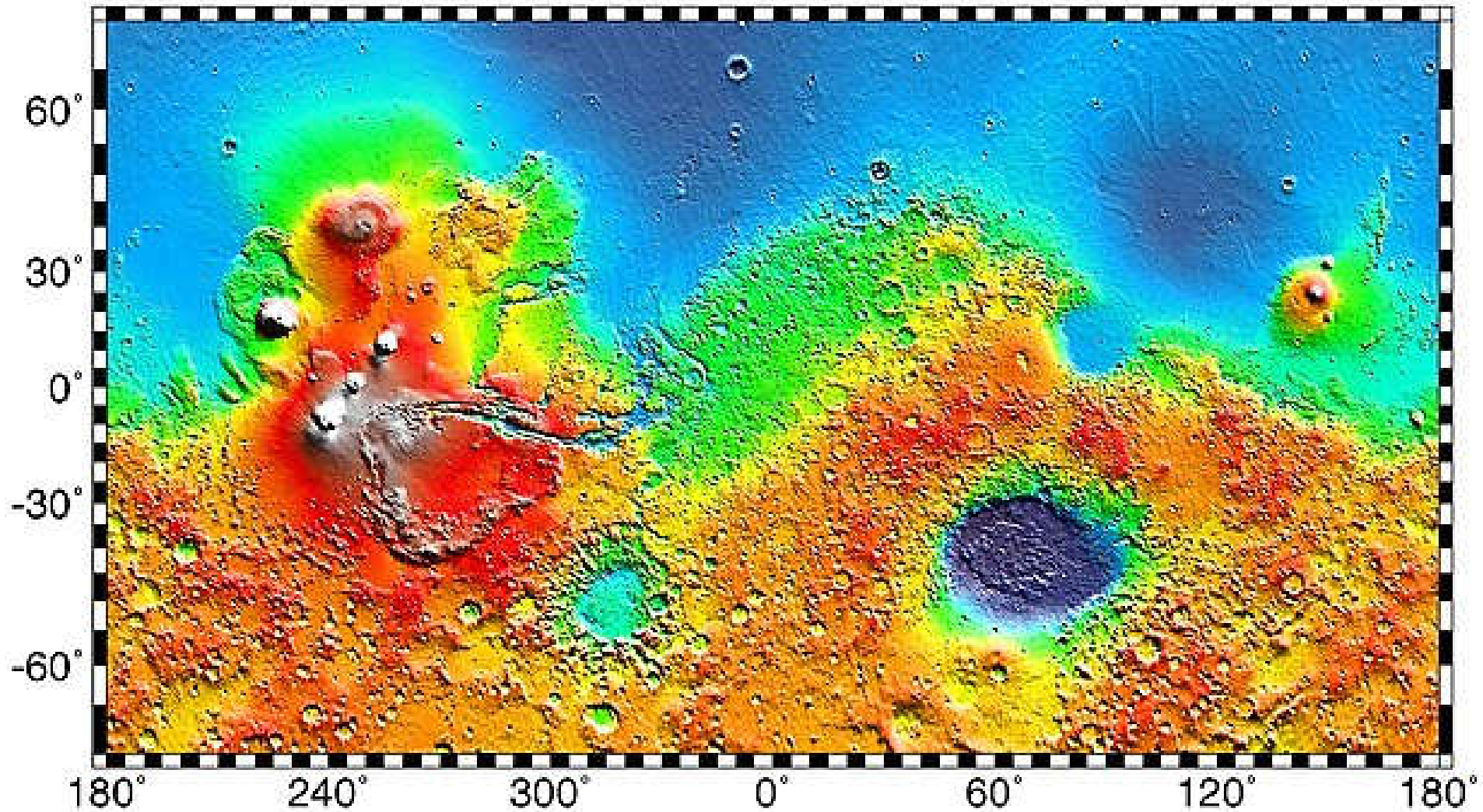
DOI: 10.1126/science.aas9185

<http://science.sciencemag.org/content/360/6393/1096.full>

Po kilku latach jeżdżenia po kraterze Gale, łazik Curiosity wreszcie odkrył w sposób bezsprzeczny występowanie na Marsie cząsteczek organicznych, m.in. tiofenów. Znalazł je w błotnych osadach sprzed 3 miliardów lat.

Mars jest mniejszy od Ziemi i nieco dalej od Słońca, więc szybciej ostygł i wcześniej zaistniały na nim warunki takie, jak w czasie powstawania na Ziemi pierwszych stromalotytów – piaskowców sklejonych śluzem prymitywnych „glonów” (*archeonów*).

# Wulkan na Marsie



[https://en.wikipedia.org/wiki/Olympus\\_Mons](https://en.wikipedia.org/wiki/Olympus_Mons)

Data from the [Mars Orbiter Laser Altimeter](#) on NASA's [Mars Global Surveyor](#). Whites and browns indicate the highest elevations (+12 to +8 km); followed by pinks and reds (+8 to +3 km); yellow is 0 km; greens and blues are lower elevations (down to -8 km).



# 08/06/2024 Rzeki na Marsie?

## Spatial patterns of valley network erosion on early Mars

Timothy A. Goudge<sup>a,b,\*</sup>, Alexander M. Morgan<sup>c,d</sup>, Gaia Stucky de Quay<sup>e</sup>, Caleb I. Fassett<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA

<sup>b</sup> Center for Planetary Systems Habitability, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA

<sup>c</sup> Planetary Science Institute, Tucson, AZ, USA

<sup>d</sup> Center for Earth and Planetary Studies, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution, Washington, DC, USA

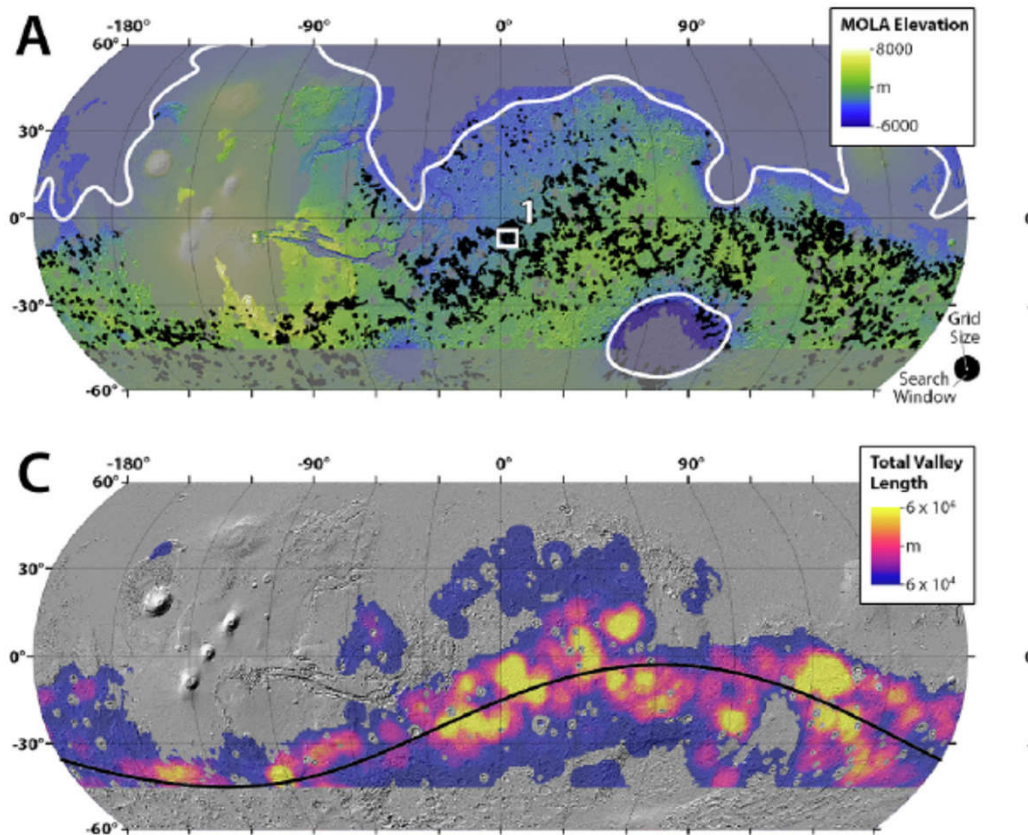


Fig. 2. (A) Global distribution of valley networks (black lines). Grey shaded region i

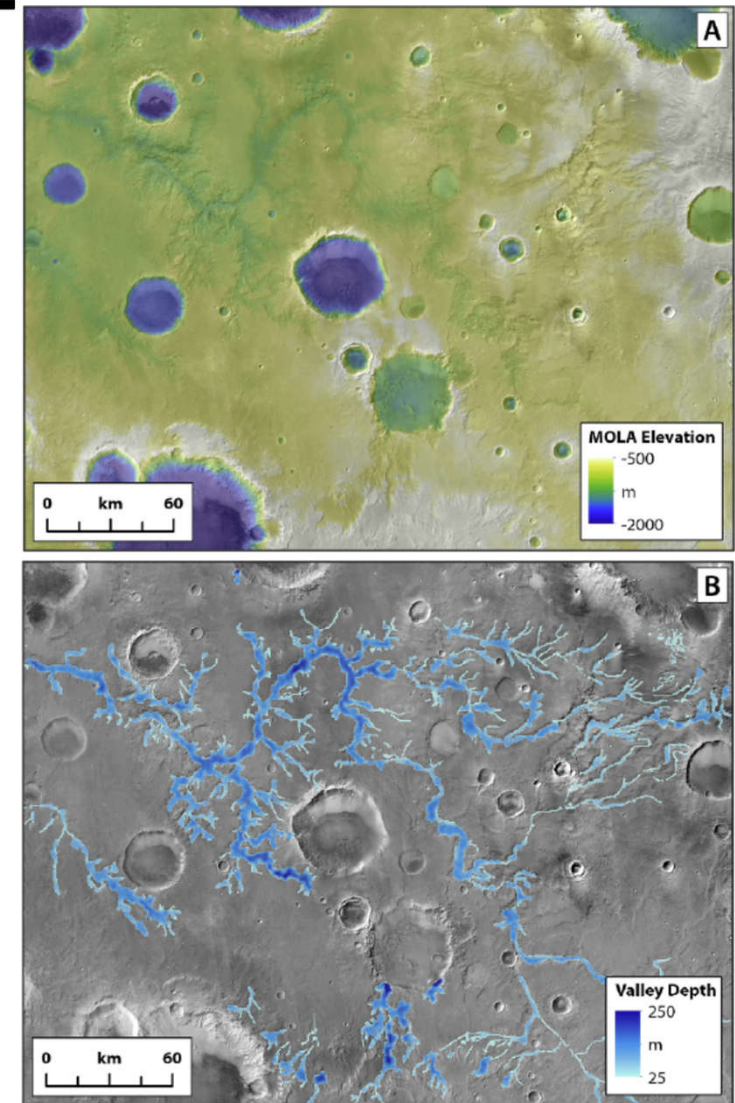


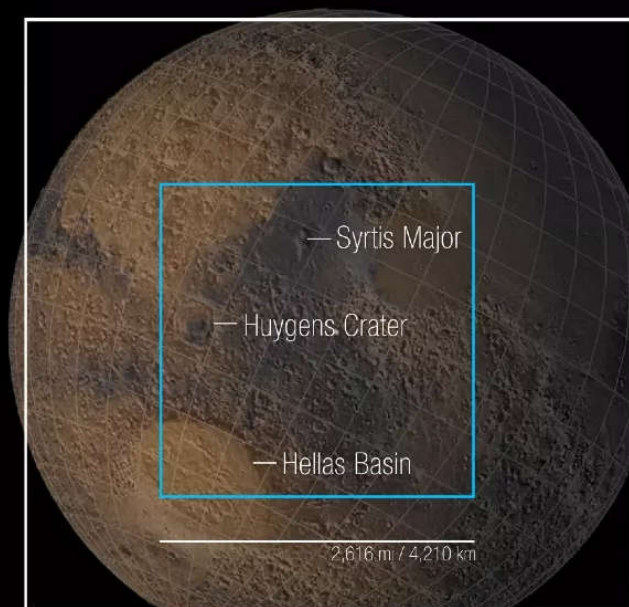
Fig. 1. Example incised valley network system in Noachis Terra. Image is centered at  $-7.3^{\circ}\text{N}$ ,  $2.8^{\circ}\text{E}$ . (A) MOLA gridded topography overlain on the global mosaic (Dickson et al., 2023) of Context Camera (CTX; Malin et al., 2007) images. (B) Progressive black top hat-derived valley depth (Luo et al., 2015, 2017; Goudge et al., 2021) overlain on the global CTX mosaic.

# Webb patrzy na planety (w IR)

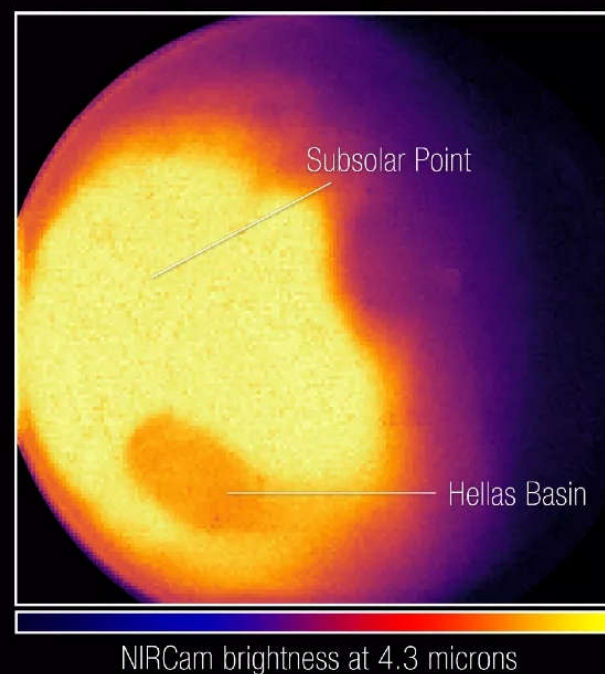
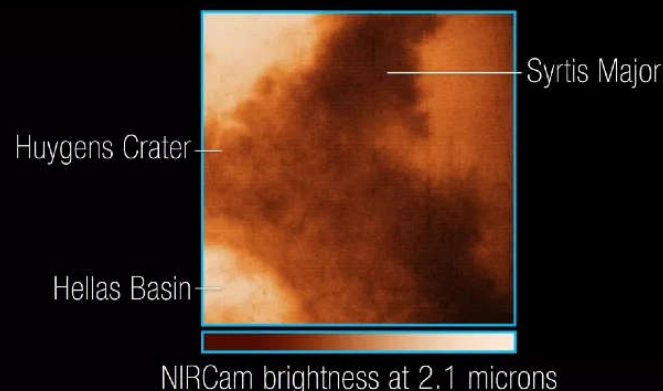
## Mars

James Webb Space Telescope

NIRCam - September 5, 2022



Simulated Mars image with base maps  
from NASA and MOLA data



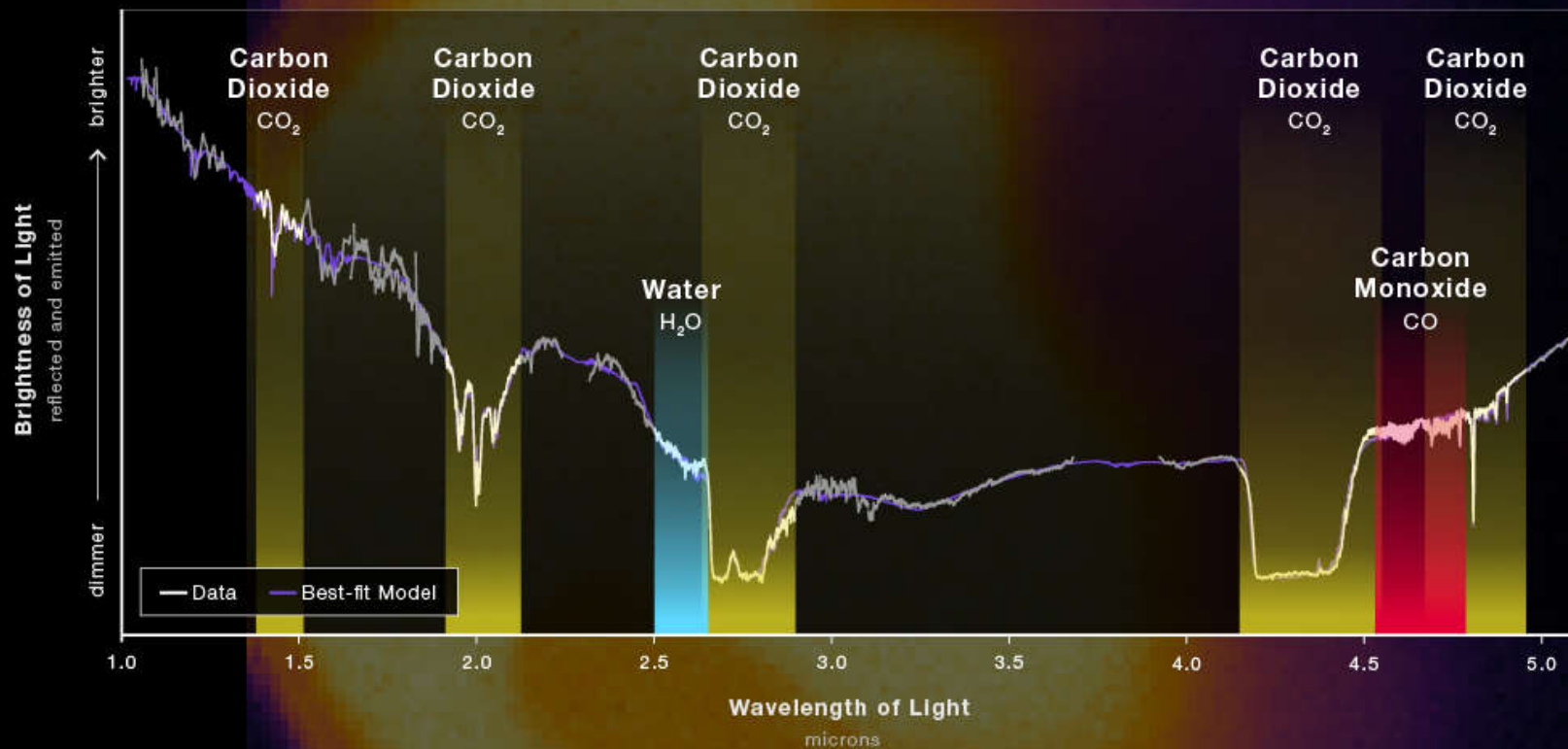
NASA, ESA, CSA, STScI, MARS JWST/GTO team

Emisja IR z  $\text{CO}_2$  w atmosferze Marsa (2.1 micron & 4.3 micron) „Urania” 6/2022  
„Zdjęcia te ukazują emisję termiczną rzadkiej atmosfery Marsa, czyli ciepło wychwycone [oddane?] przez dwutlenek węgla obecny w atmosferze. © Aleksandra Hamanowicz

# Mars: skład atmosfery (stratosfery?)

## MARS ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRSpec | Fixed Slit Spectroscopy



**WEBB**  
SPACE TELESCOPE

<https://webbtelescope.org/contents/media/images/01GCW1EQ0GNDYECND5NPKGQN27?Type=Spectra&page=1>

## Key Points:

- Remotely sensed CO densities retrieved from 130 to 160 km for the first time are  $\sim 45\%$  lower than MCD 6.1 predictions for similar conditions
- Mean retrieved Ar, N<sub>2</sub>, and O densities from 130 to 160 km are lower than MCD 6.1 and NGIMS by 10%–15%,  $\sim 75\%$ , and 35%–45%, respectively
- High spectral resolution observations by EMM EMUS show the first detection of C I 119.3 nm emission blended with N I 120 nm emission

## Supporting Information:

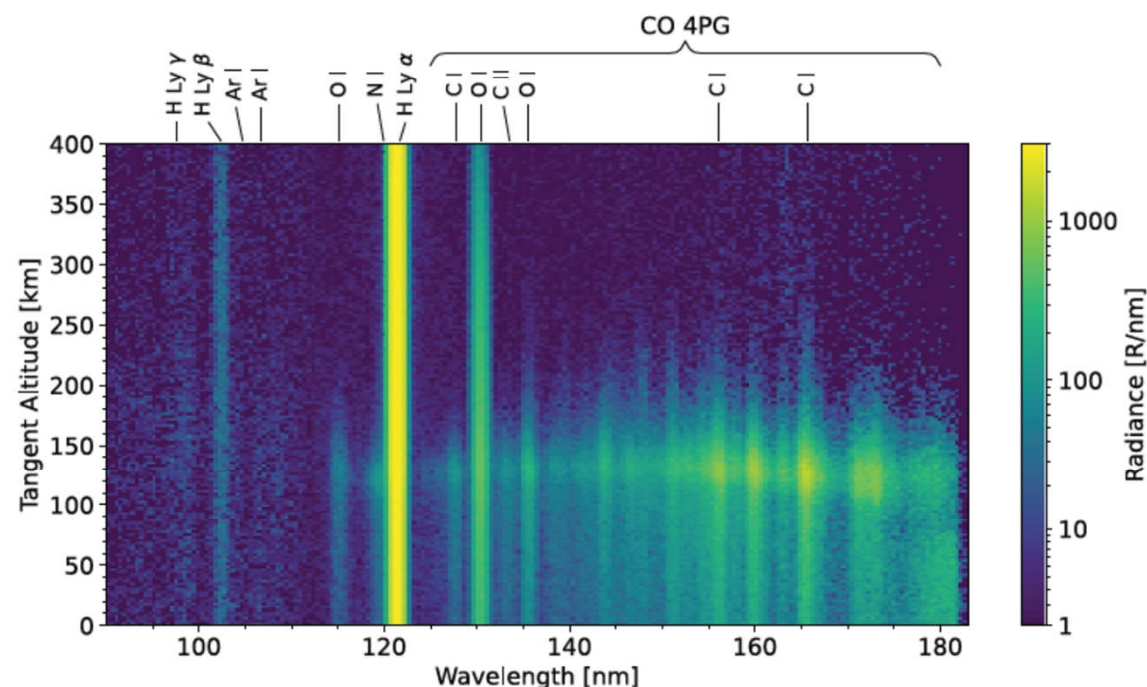
Supporting Information may be found in

# Retrieval of Ar, N<sub>2</sub>, O, and CO in the Martian Thermosphere Using Dayglow Limb Observations by EMM EMUS

J. S. Evans<sup>1</sup>, J. Deighan<sup>2</sup>, S. Jain<sup>2</sup>, V. Veibell<sup>1</sup>, J. Correia<sup>1</sup>, H. Al Matroushi<sup>3</sup>, H. Al Mazmi<sup>4</sup>, M. Chaffin<sup>2</sup>, S. Curry<sup>2</sup>, N. El-Kork<sup>5,6</sup>, S. England<sup>7</sup>, F. Eparvier<sup>2</sup>, M. Fillingim<sup>8</sup>, G. Holsclaw<sup>2</sup>, M. Khalil<sup>9</sup>, R. Lillis<sup>8</sup>, F. Lootah<sup>3</sup>, S. Mahmoud<sup>5</sup>, T. Plummer<sup>2</sup>, E. Soto<sup>1</sup>, J. Tennyson<sup>10</sup>, E. Thiemann<sup>2</sup>, and S. N. Yurchenko<sup>10</sup>

<sup>1</sup>Computational Physics, Inc., Springfield, VA, USA, <sup>2</sup>Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, Boulder, CO, USA, <sup>3</sup>Mohammed Bin Rashid Space Center, Dubai, UAE, <sup>4</sup>United Arab Emirates Space Agency, Abu Dhabi, UAE, <sup>5</sup>Physics Department, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, <sup>6</sup>Space and Planetary Sciences Center, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, <sup>7</sup>Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, <sup>8</sup>Space Sciences Laboratory, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA, <sup>9</sup>Mechanical Engineering Department, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, <sup>10</sup>University College London, Physics and Astronomy, London, UK

**Abstract** The Emirates Ultraviolet Spectrometer (EMUS) onboard the Emirates Mars Mission (EMM) Hope probe images Mars at wavelengths extending from approximately 100 to 170 nm. EMUS observations



**Figure 1.** Spectrogram showing unbinned HR slit data taken during insertion orbit observation by EMUS on 25 February 2021 ( $L_s = 8.7^\circ$ ). The motion of the instrument slit is from top to bottom. At the peak of the emission layer ( $\sim 130$  km) the solar zenith angle is  $\sim 34^\circ$ , latitude  $\sim 19^\circ$ N, and local time  $\sim 14$  hr. Prominent emission features and the spectral range of the CO 4PG band system are identified at the top of the figure.

# Mars: skład atmosfery – teoria i obserwacja

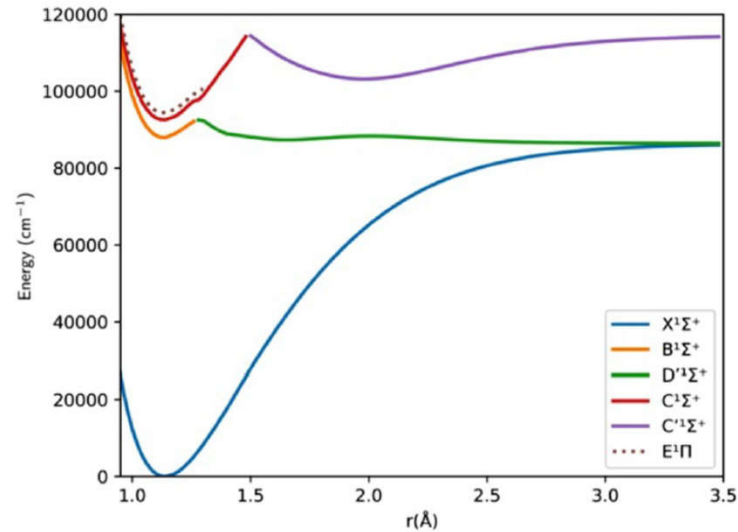


Figure A1. Selected CO singlet potential energy curves.

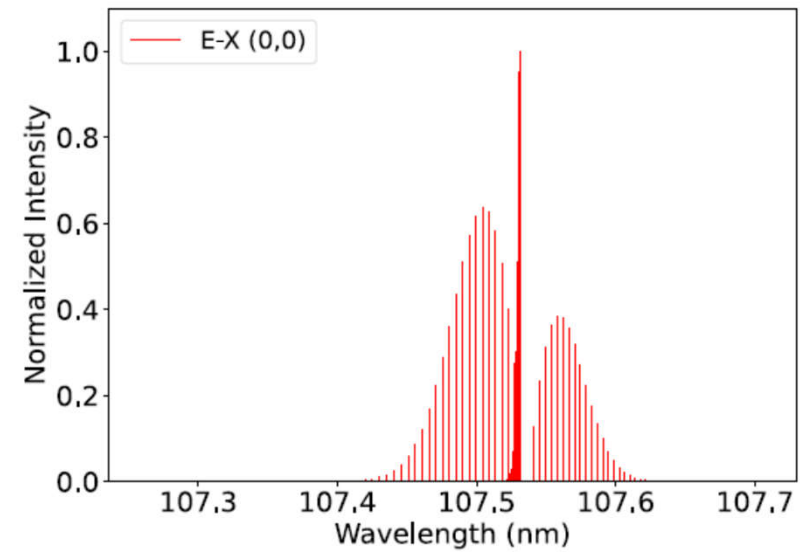
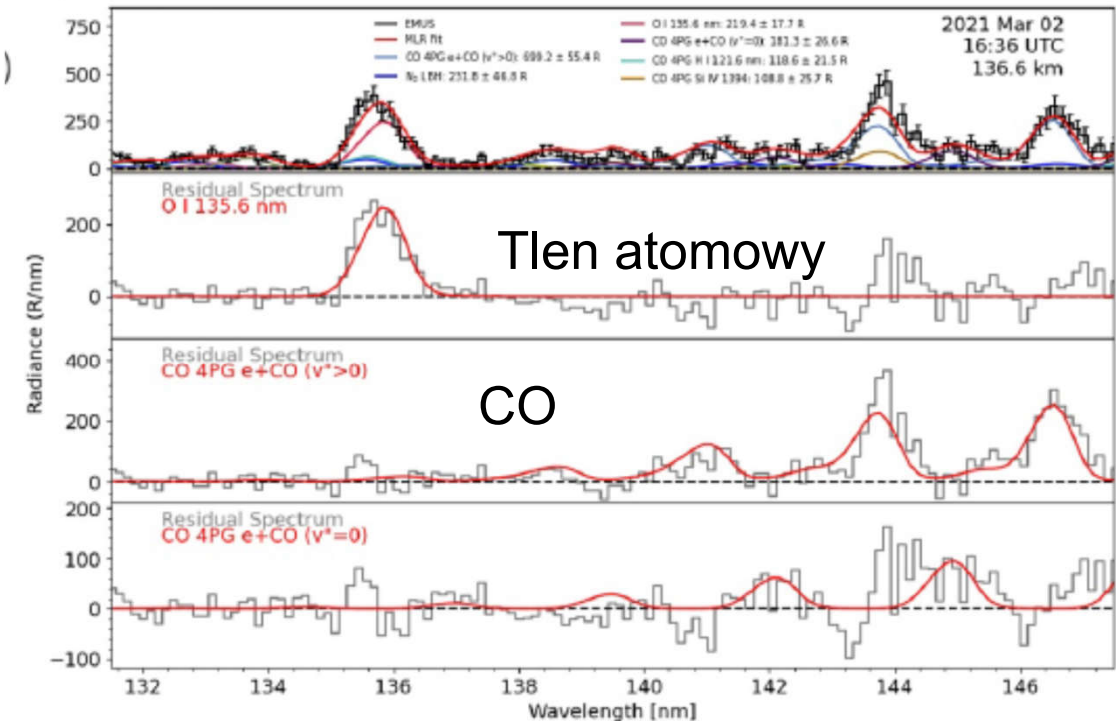
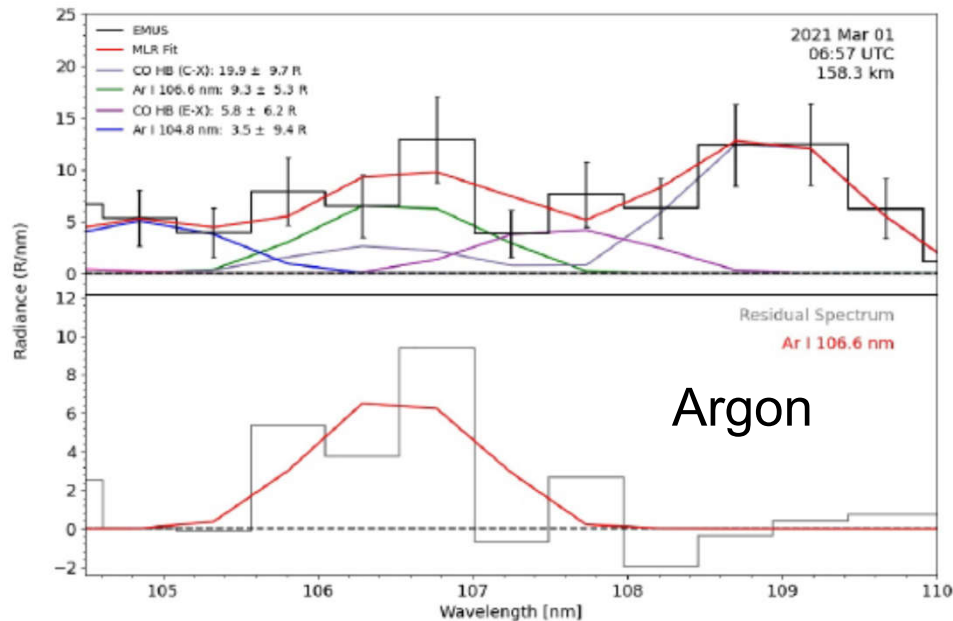
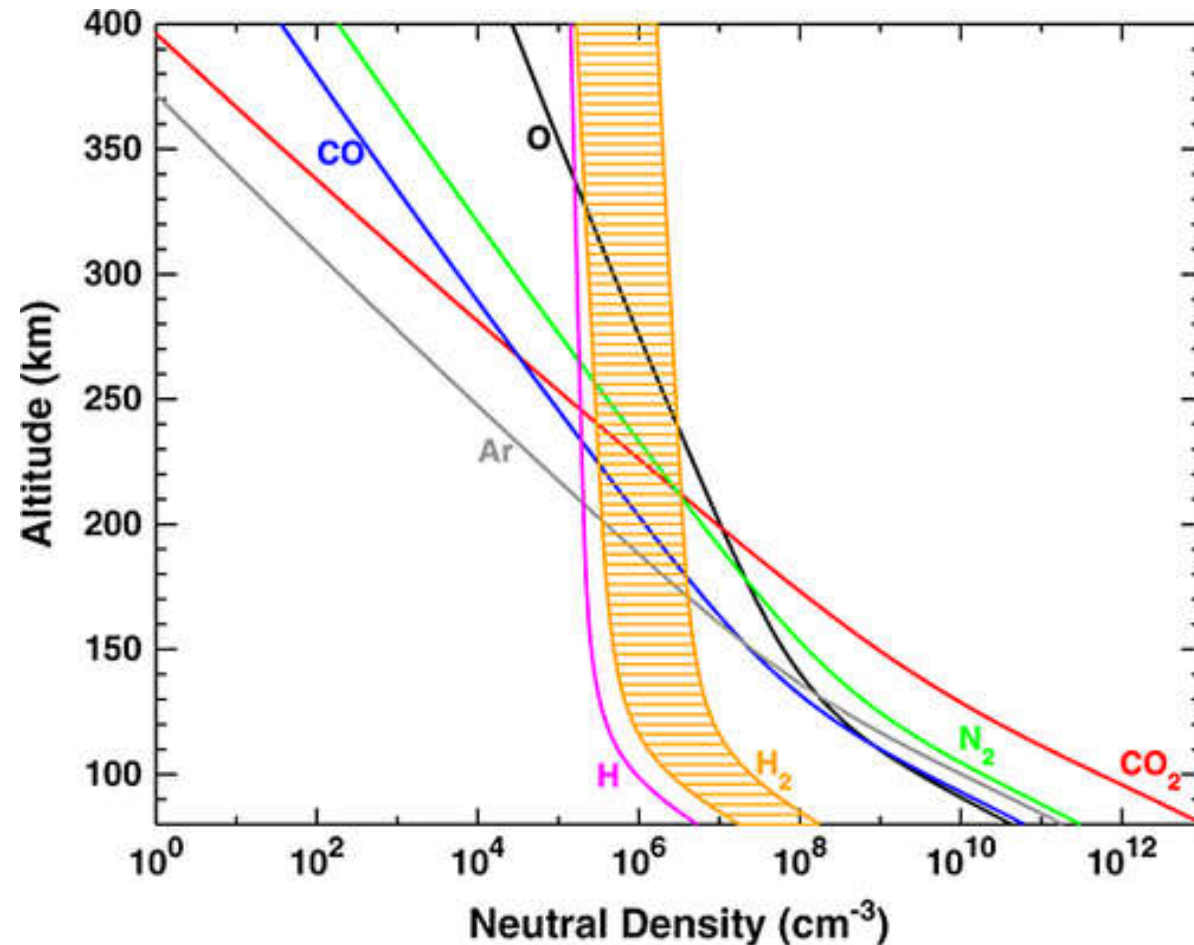


Figure A3. Simulated (0,0) band of the  $E^1\Pi - X^1\Sigma^+$  transitions for a temperature of 200 K.



# Mars: profil atmosfery



**Tlen w atmosferze Marsa pochodzi z dysocjacji jonów  $\text{CO}_2^+$**

The composition of Mars' topside ionosphere: Effects of hydrogen

[Majd Matta](#), [Paul Withers](#), [Michael Mendillo](#)

First published: 05 January 2013

<https://doi.org/10.1002/jgra.50104>

# Aurora na Jowiszu



Aurora (metan?)  
na Jowiszu

Silne pole magnetyczne Jowisza wzbudza intensywne zorze polarne. [...] Wielka Czerwona Plama wyraźnie odcina się od ciemniejszych, warstwowych chmur atmosfery.

# Jowisz? Wszystko do odkrycia



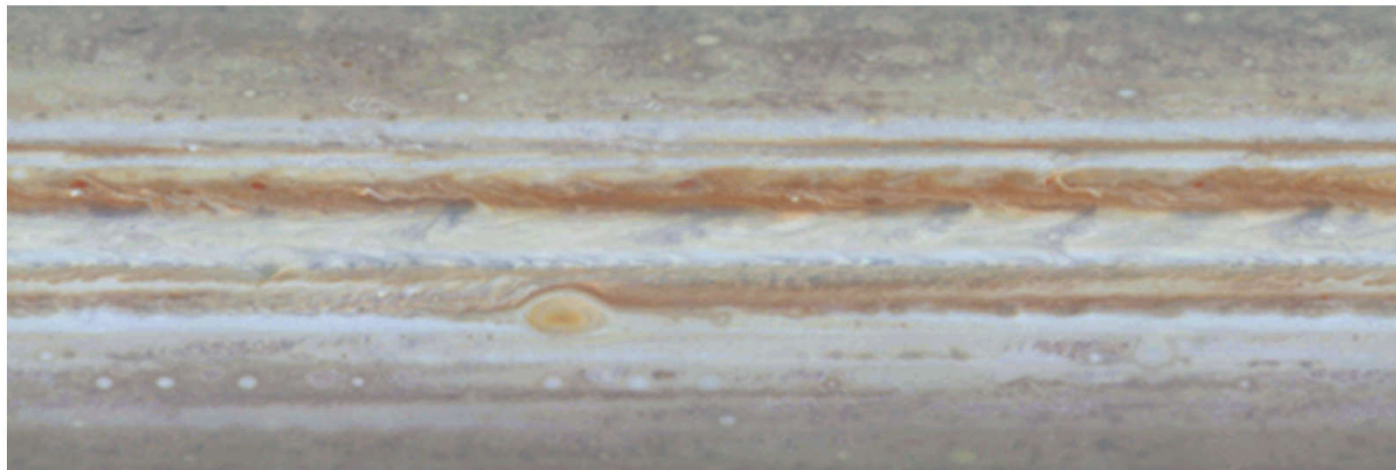
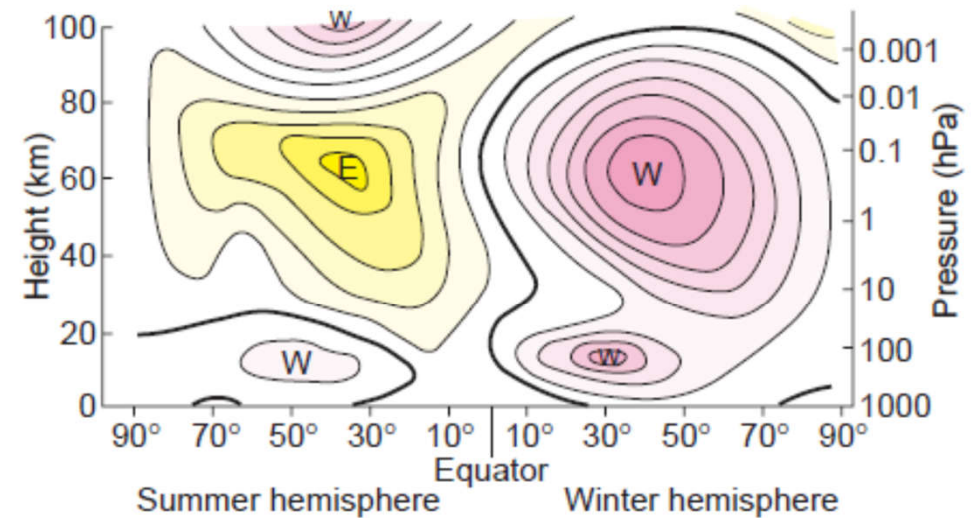
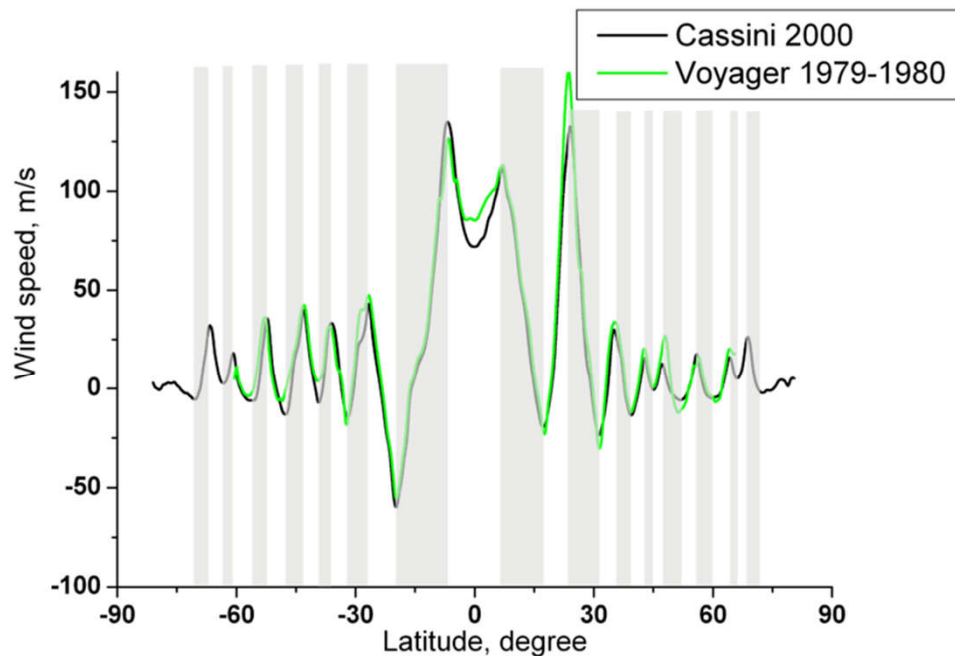
The **Great Red Spot** is a persistent high-pressure region in the atmosphere of Jupiter, producing an anticyclonic storm that is the largest in the Solar System. It is the most recognizable feature on Jupiter, owing to its red-orange color whose origin is still unknown. Located 22 degrees south of Jupiter's equator, it produces wind-speeds up to 432 km/h (268 mph). It was first observed in September 1831, with 60 recorded observations between then and 1878, when continuous observations began.<sup>[1][2]</sup> A similar spot was observed from 1665 to 1713; if this is the same storm, it has existed for at least 359 years,<sup>[3]</sup> but a study from 2024 suggests this is not the case.<sup>[4]</sup>



Na Ziemi mechanizmem tropikalnych cyklonów jest parowanie ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ciepłego oceanu w atmosferze (ciężkiego)  $\text{N}_2$ .

Na Jowiszu, półkuli SH, jest to wyż, być może jako wynik kondensacji amoniaku ( $\text{NH}_3$ ) w atmosferze lekkiego  $\text{H}_2$ .

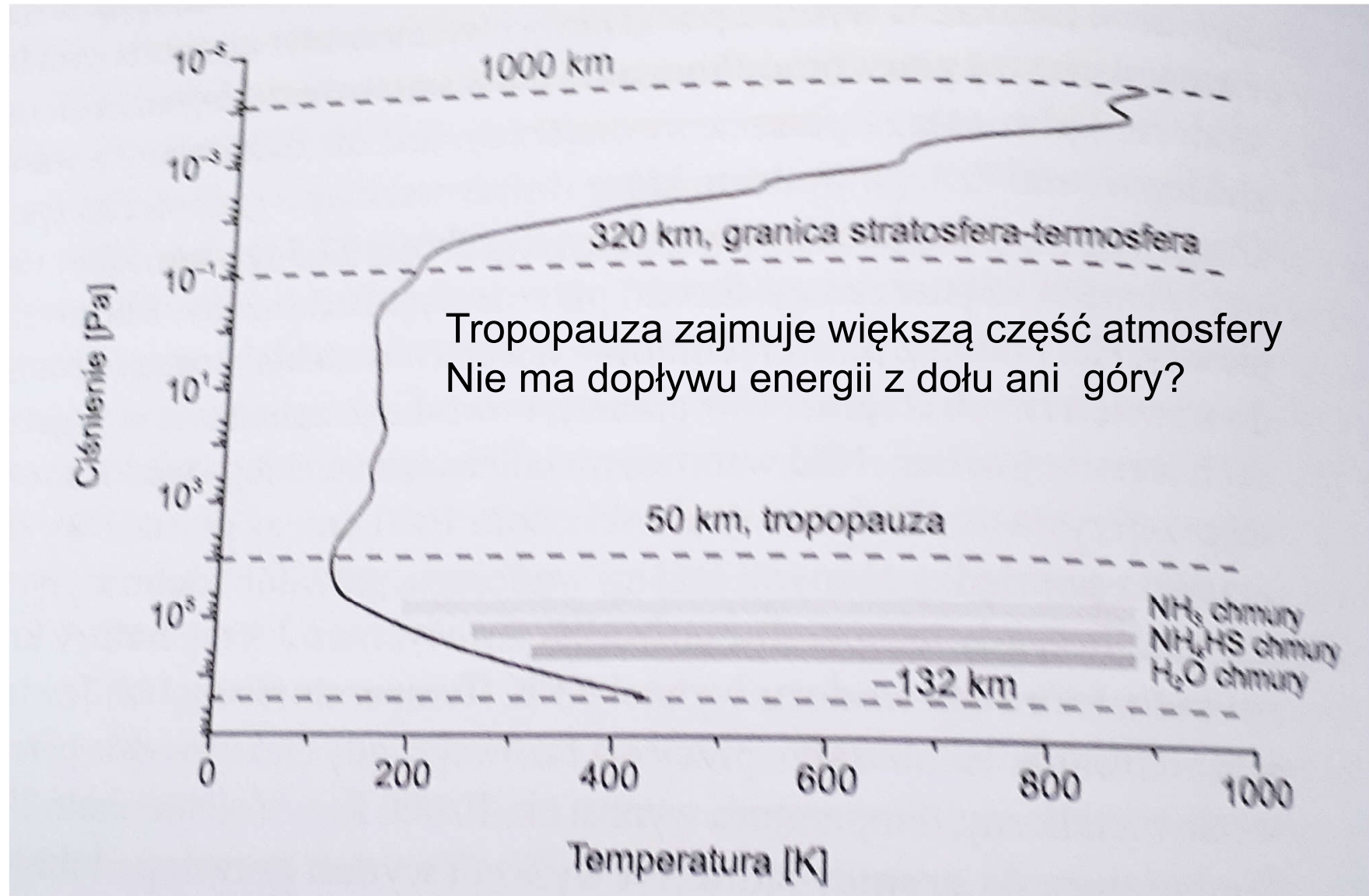
# Jowisz: atmosfera anty-passatów



Equatorial super-rotation: na równiku wiatr wieje z zachodu na wschód, odwrotnie niż passaty na Ziemi. Powód? ? Może inny mechanizm niż na Ziemi: nie konwekcja termiczna nad równikiem (parowanie  $H_2O$  z nagrzanej powierzchni oceany), ale kondensacja  $NH_3$  nagrzanego w górnej część chmur. **Do okrycia przez młodych astro-fizyko-chemików...**

[https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Jupiter](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Jupiter)

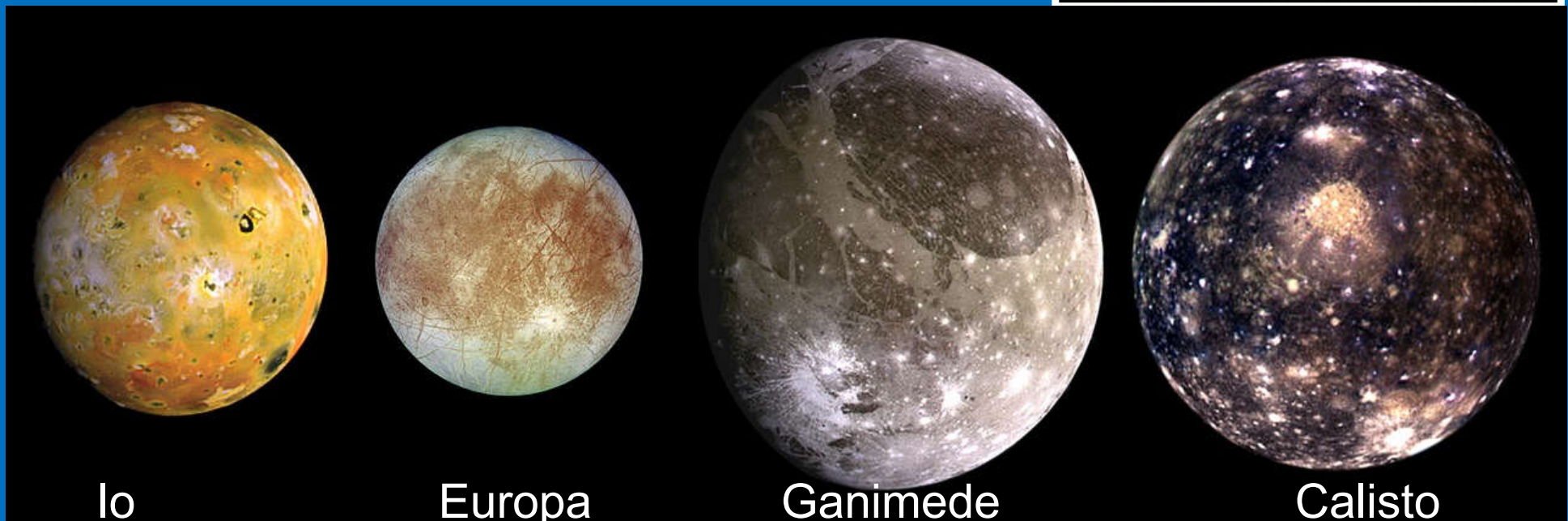
# Jowisz: skład i stratyfikacja atmosfery



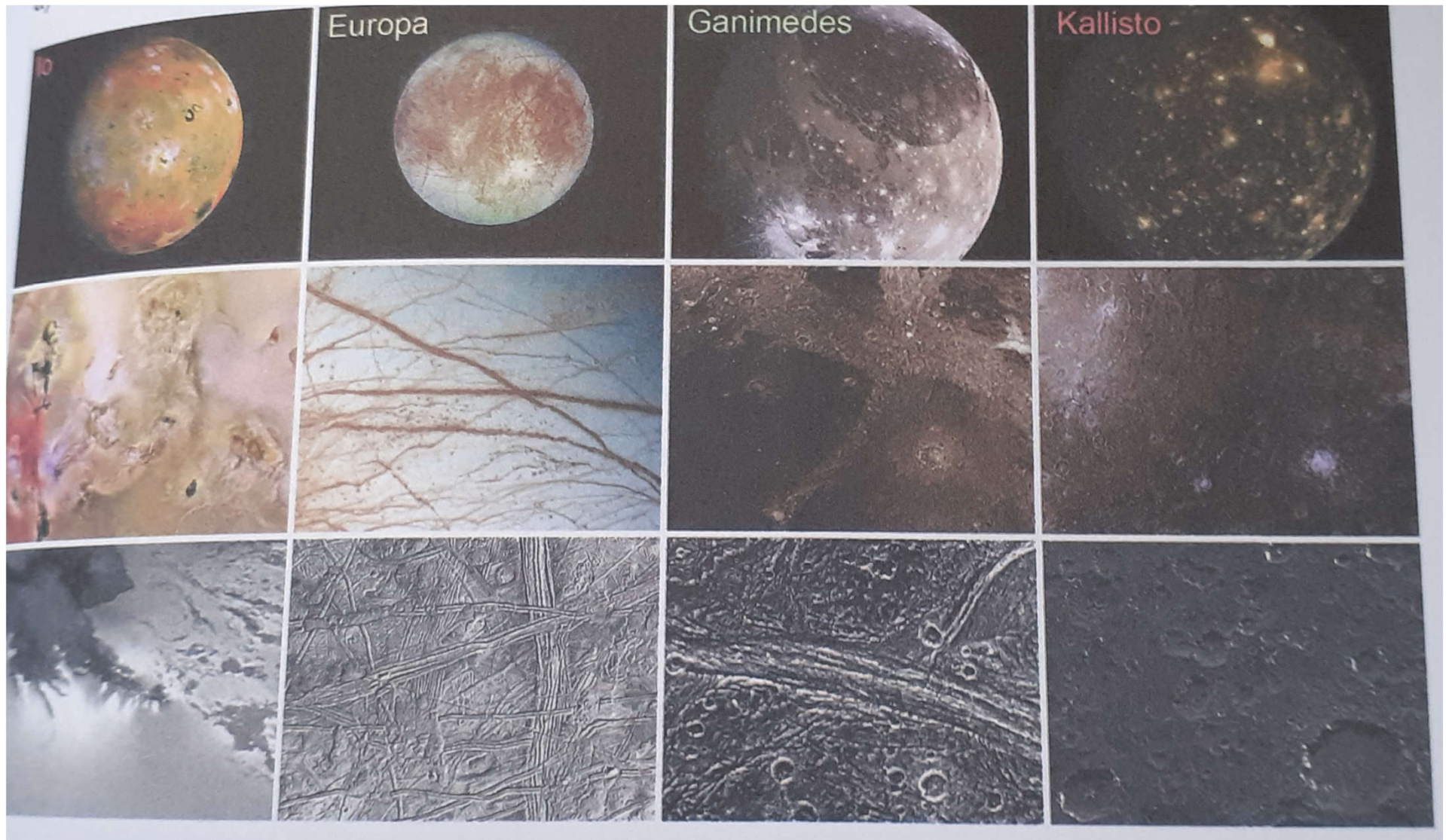
*Observationes Iovianae*  
1610

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 2. p. Jovis.<br>mar. H. 12 | ○ **      |
| 30. mar.                   | ** ○ *    |
| 2. Apr.                    | ○ ** *    |
| 3. mar.                    | ○ * *     |
| 3. Ho. 5.                  | * ○ *     |
| 7. mar.                    | * ○ **    |
| 6. mar.                    | ** ○ *    |
| 8. mar. H. 13.             | * * * ○   |
| 10. mar.                   | * * * ○ * |
| 11.                        | * * ○ *   |
| 12. H. 4. vesp.            | * ○ *     |
| 13. mar.                   | * ** ○ *  |
| 14. Apr.                   | * * * ○ * |

... Quin etiam impensius  
amavit Ganymedem  
puerum formosum, Trois  
Regis filium, adeo etiam  
assumptâ aquilæ figurâ,  
illum humeris impositum, in  
cœlum transportavit, prout  
fabulantur poetæ... à me  
vocatur... Tertius ob luminis  
Majestatem Ganymedes...  
[Io,] Europa, Ganimedes  
puer, atque Calisto, lascivo  
nimium perplacuer Jovi  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ganymede\\_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ganymede_(moon)).

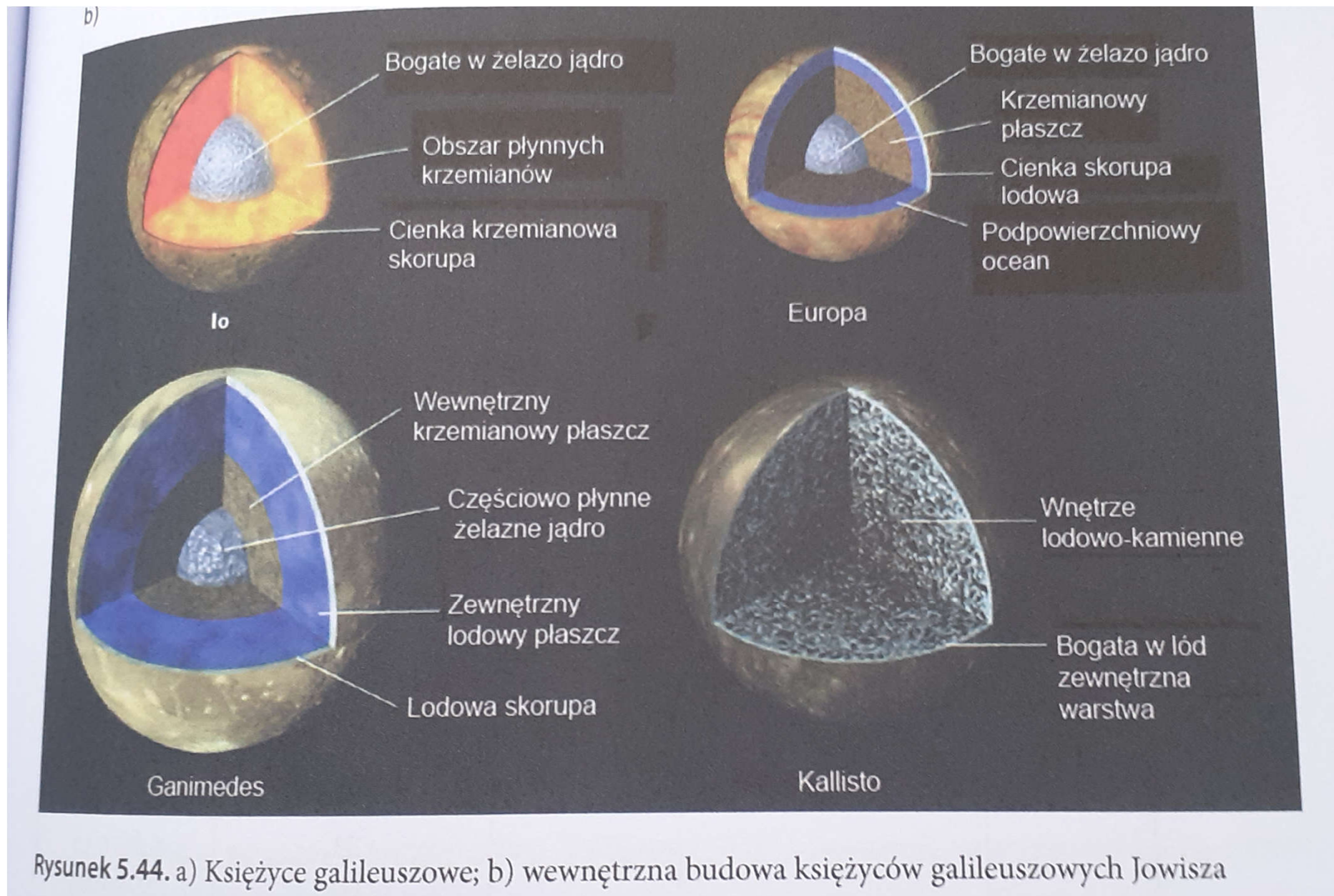


# Pianeti Medicei

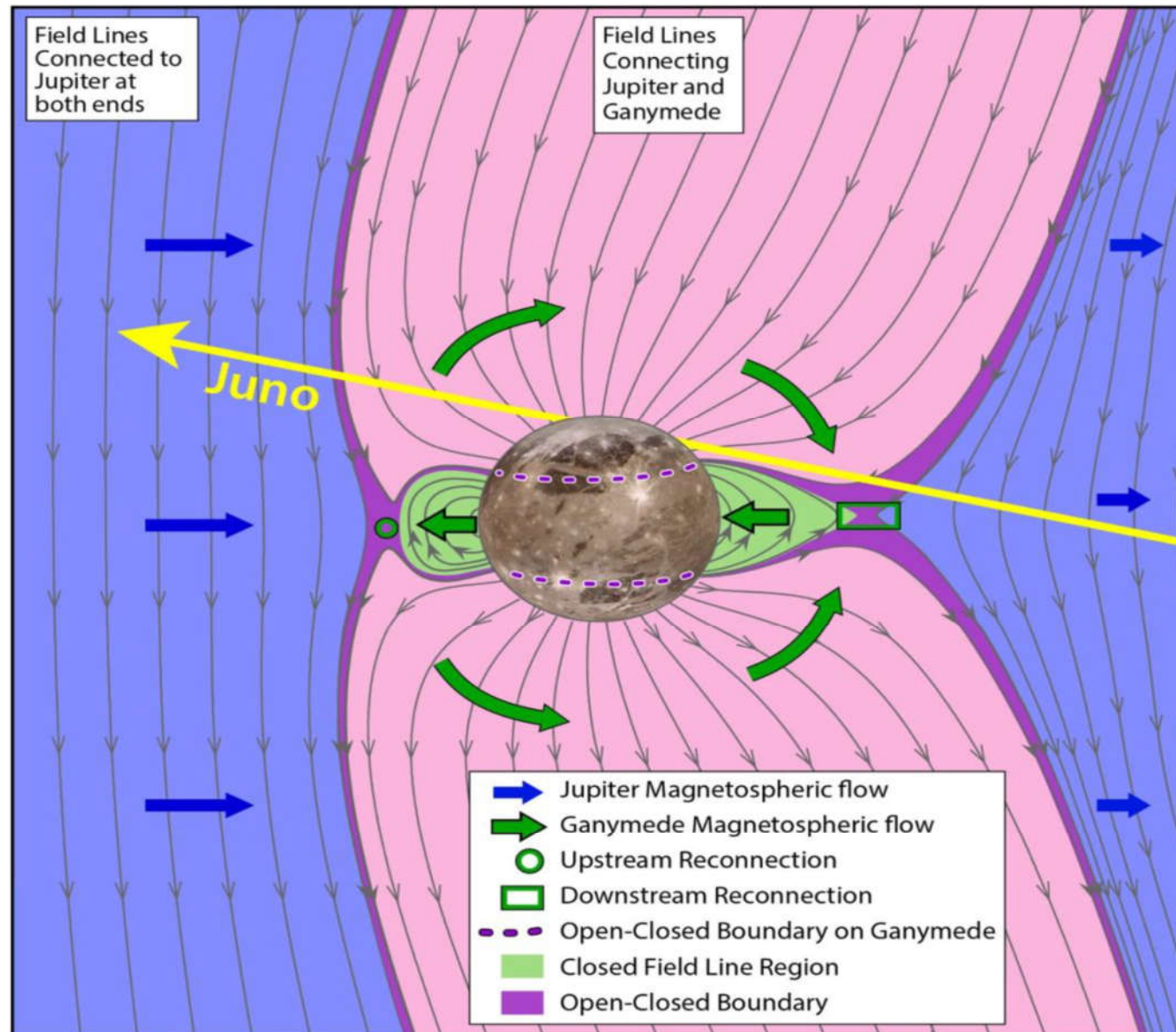


*Kosmochemia, op. cit.*

# Pianeti Medicei



# Ganimedes: magnetosfera



JGR Planets, 129 (4), 08  
April 2024,  
10.1029/2023JE007859

Magnetospheric-Ionospheric-Atmospheric Implications From the Juno Flyby of Ganymede

# **Ganymede's atmosphere as constrained by HST/STIS observations**

F. Leblanc<sup>1</sup>, Roth L.<sup>2</sup>, Chaufray J.Y.<sup>1</sup>, R. Modolo<sup>1</sup>, M. Galand<sup>3</sup>, N. Ivchenko<sup>2</sup>, G.  
Carnielli<sup>3</sup>, C. Baskevitch<sup>1</sup>, A. Oza<sup>4</sup> and A.L.E. Werner<sup>1, 5</sup>

<sup>1</sup> LATMOS/CNRS, Sorbonne Université, UVSQ, Paris, France

<sup>2</sup> Space and Plasma Physics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

<sup>3</sup> Department of Physics, Imperial College London, London, UK

<sup>4</sup> Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, USA

<sup>5</sup> Now at Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden

# Woda na Ganimedesie (2024)

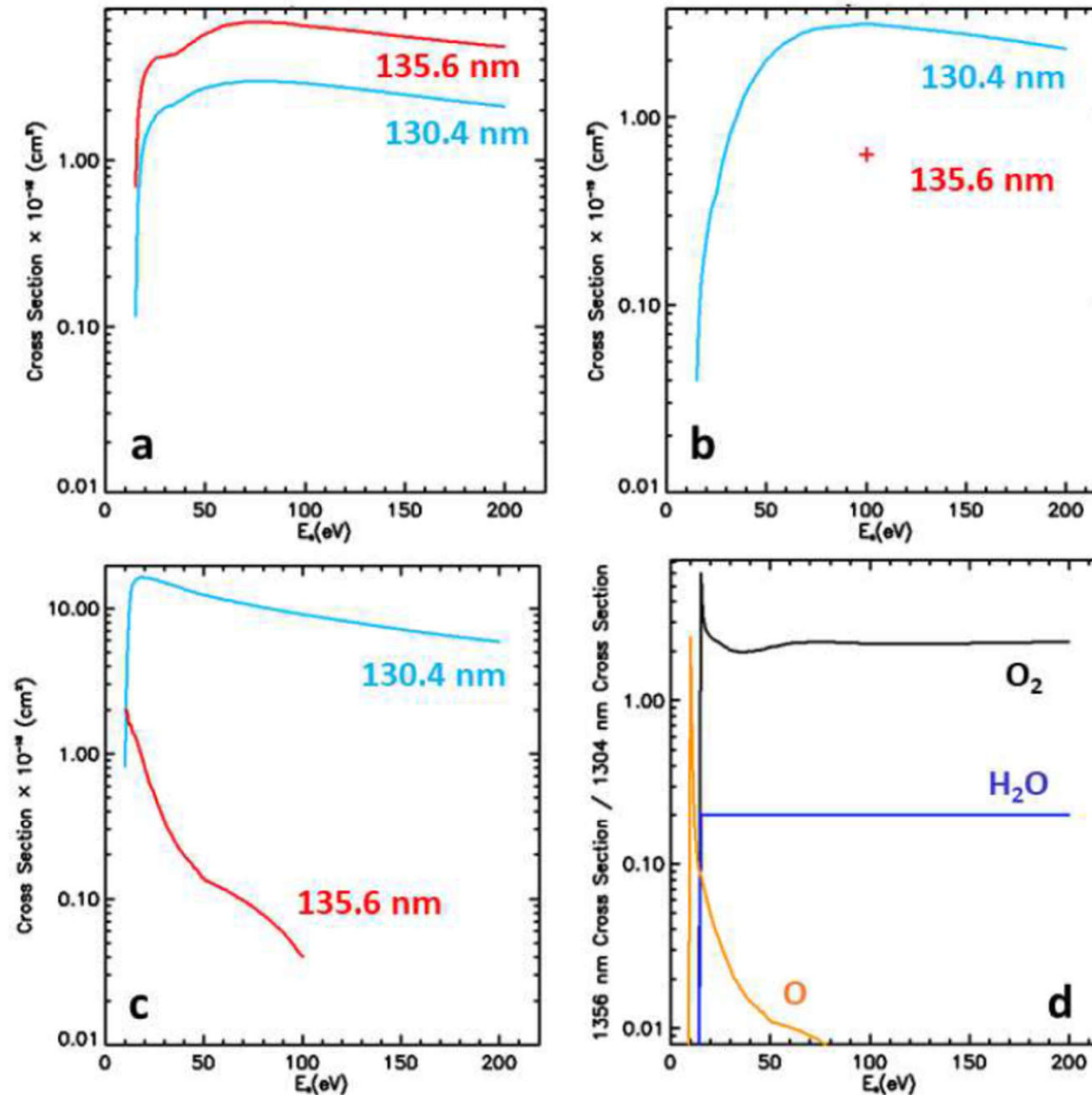
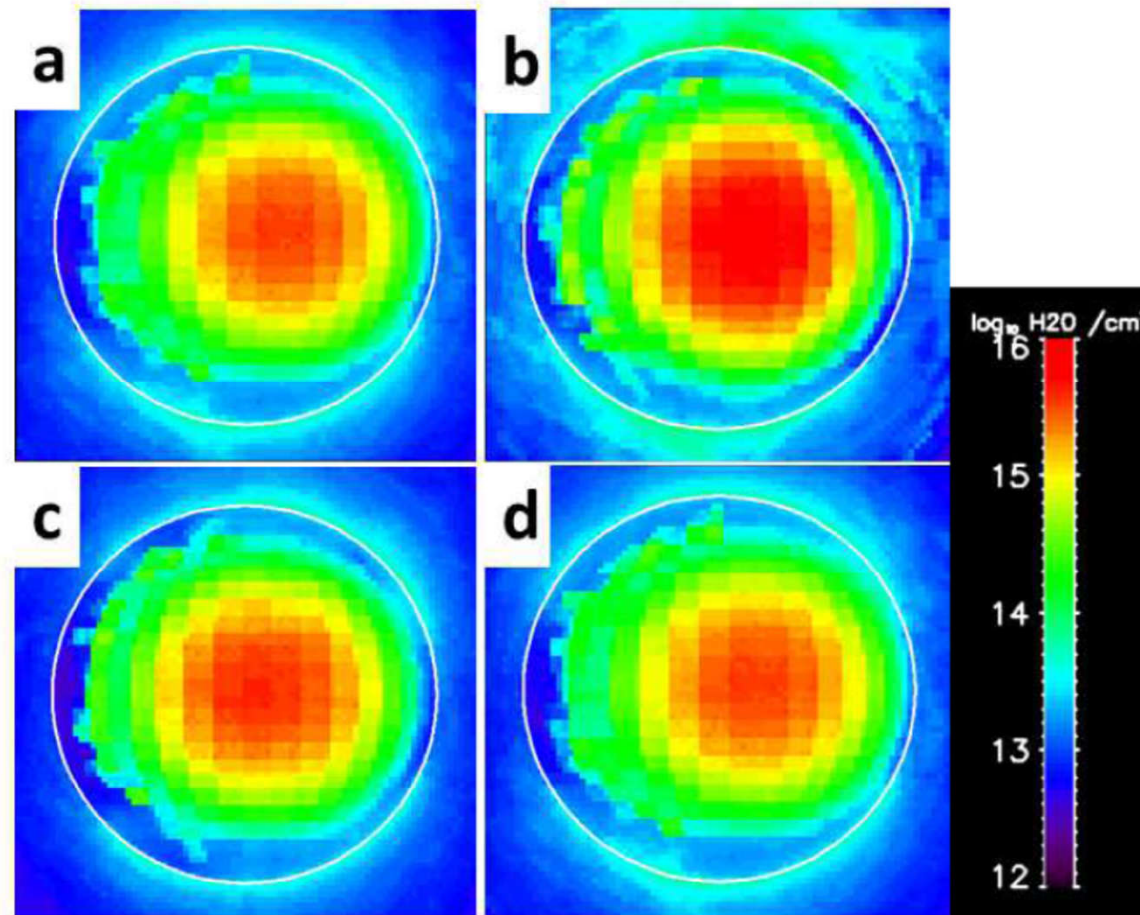


Figure 3: Emission excitation electron impact cross sections. a:  $O_2 + e$  (Kanik et al. 2003). b:  $H_2O + e$

# Woda na Ganimedesie (2024)



**Figure 4:** Simulated column densities of the H<sub>2</sub>O exospheric component (in  $\log_{10} \text{cm}^{-3}$ ) at the four positions of Figure 1 in the nominal simulation case. Panel a: phase angle of 98°-111°. Panel b: phase

# Nic, tylko wysyłać cysterny

## Saturn – planeta w kapeluszu

Po odkryciu księżyców Jowisza Galileusz skierował lunetę na ostatnią ze znanych wówczas planet – Saturna. Zauważył w jej wyglądzie coś dziwnego – coś przypominało uszy lub kapelusz. Dziś wiemy, że astronom zaobserwował pierścienie Saturna.



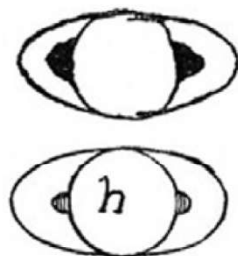
Pierścienie Saturna widać nawet przez niewielką lornetkę. Saturn zazwyczaj pokazuje swój „kapelusz” pochylony. Ale raz na 15 lat pierścienie jakby znikają, bo są ustawione do nas bokiem. Zdarzy się to dopiero w 2025 roku.

### Ile pierścieni ma Saturn

Współczesne obrazy z teleskopów i sond kosmicznych ukazują przepiękne, bładoniebieskie i żółte pierścienie – szerokie, ale płaskie jak pizza. Jest ich całe mnóstwo – węższe i szersze, z przerwami w środku, nieco podobne do kręcącej się płyty CD. Sonda Cassini, wysłana w kierunku Saturna w 1997 roku, naliczyła 10 tysięcy takich pierścieni. Rozciągają się na 120 tysięcy kilometrów, ale ich grubość wynosi tylko 20 metrów: są jak rondo gigantycznego kapelusza.

### Olbrzym z ciekłych gazów

Saturn znajduje się dwa razy dalej od Słońca niż Jowisz. Wielkością niewiele się od niego różni, ale za to jest dziewięć



Saturn na rysunkach Galileusza

razy większy niż Ziemia. Mimo że ogromny, nie jest zbyt ciężki. Waży tylko 100 razy więcej od Ziemi, chociaż według rozmiarów powinien być prawie tysiącrotnie cięższy. Planeta składa się głównie z lekkich substancji – wodoru i helu. W atmosferze Ziemi są one gazami, ale na Saturnie, w temperaturze minus 200 stopni Celsjusza stają się płynne. W środku Saturna są zapewne skały i metale. Saturn obiega Słońce raz na 30 lat, ale wiruje z podobną szybkością jak Jowisz – raz na 11 godzin. Z tego powodu dość mocno się spłaszczył. Kolorem przypomina kawę z dużą ilością mleka. I tak jak mleko wlane do kawy wirujący Saturn tworzy jaśniejsze i ciemniejsze smugi. Te pasma to prze-

rażliwe wiatry – ich prędkość dochodzi prawie do 2 tysięcy kilometrów na godzinę! Muszą wydawać świst jak wiele odrzutowych samolotów jednocześnie. Od czasu do czasu pojawiają się na Saturnie trwające po kilka lat ogromne huragany. Największy z nich, widziany z Ziemi jako wielka biała plama, zdarza się co 30 lat. Prawdopodobnie następny będzie w 2020 roku. Kto go pierwszy zobaczy?

### Sonda Cassini i lodowaty księżyc

Pierścienie Saturna są zbudowane z lodu – wody, węglowego pyłu i niewielkich głazów. Większych pierścieni, widocznych z Ziemi jako rozdzielone, jest osiem. W przerwach między nimi krążą niewielkie księżyce. A dużych satelitów ma Saturn siedem. Największy z nich, Tytan, jest większy od naszego Księżyca.

Dookoła Saturna krąży od 2004 roku sonda Cassini. Leciła siedem lat, ale teraz śmiało przecina pierścienie, śledzi burze na Saturnie i przysyła mnóstwo wyników naukowych. A próbnik, który ze sobą przyniosła, osiadł w 2005 roku na Tytanie. Po raz pierwszy urządzenie wytworzone przez ludzi przesłało komunikaty ze straszliwie dziwnego, skalisto-lodowatego świata. Łączność z lądowiskiem trwała zaledwie dwie godziny, po czym zamarzł. Nie dziwnego, temperatura na Tytanie wynosi minus 180 stopni Celsjusza. Księżyc ten jest pokryty lodowymi głazami, ale atmosfera składa się



Lodowa powierzchnia Tytana sfotografowana przez lądownik Huygens – widoczne kry to przypuszczalnie zamrożony metan

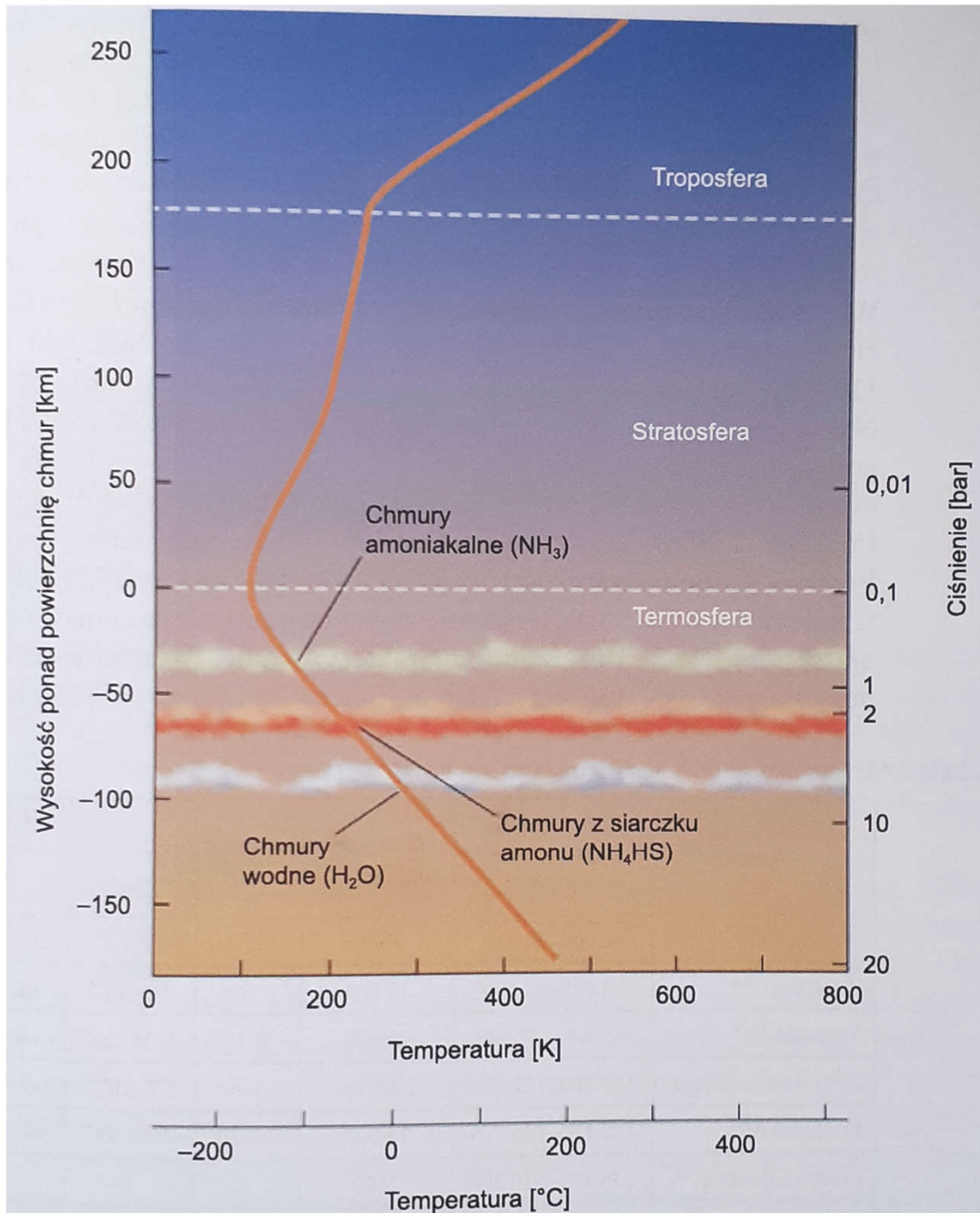
głównie z azotu, tak jak ziemska. Tylko że zamiast tlenu jest w niej metan, który na Ziemi znajduje się... pod ziemią.

### WARTO WIEDZIEĆ

- Metanowe chmury i metanowy śnieg są nie tylko w atmosferze Tytana.
- Wydaje się, że na jego powierzchni występują wręcz całe jeziora nie tyle ciekłego metanu, ale może nawet czystej benzyny: wystarczyłoby pośłać tam kosmiczne cysterny!

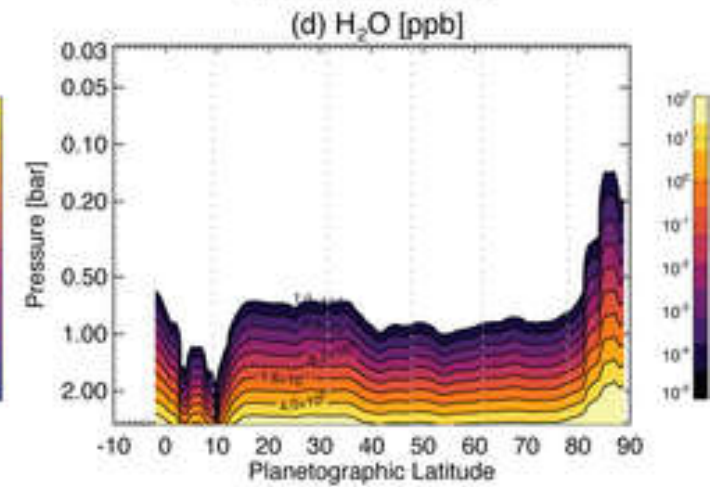
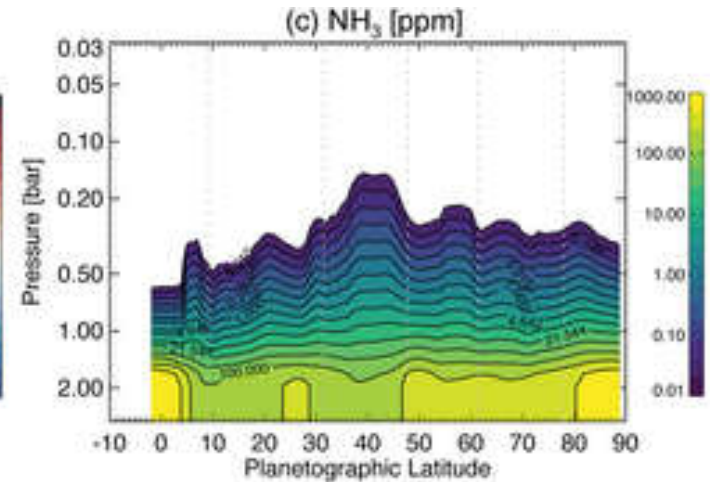
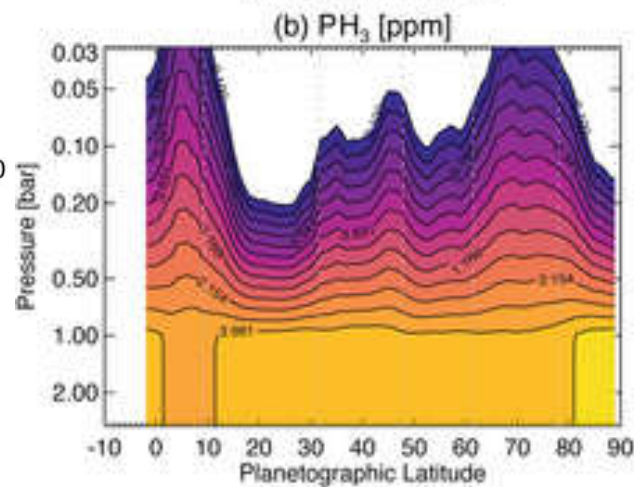
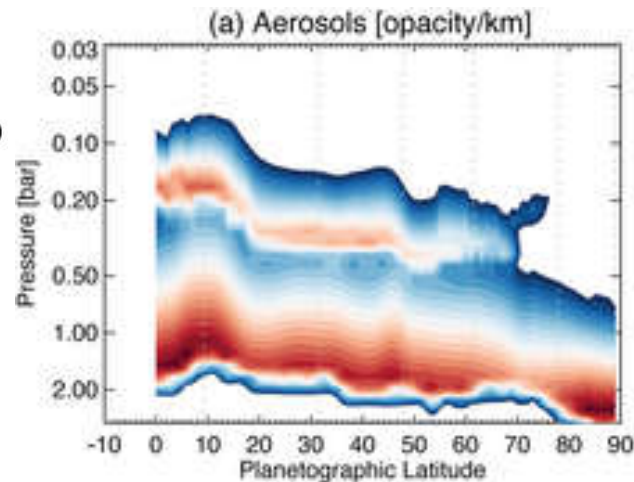
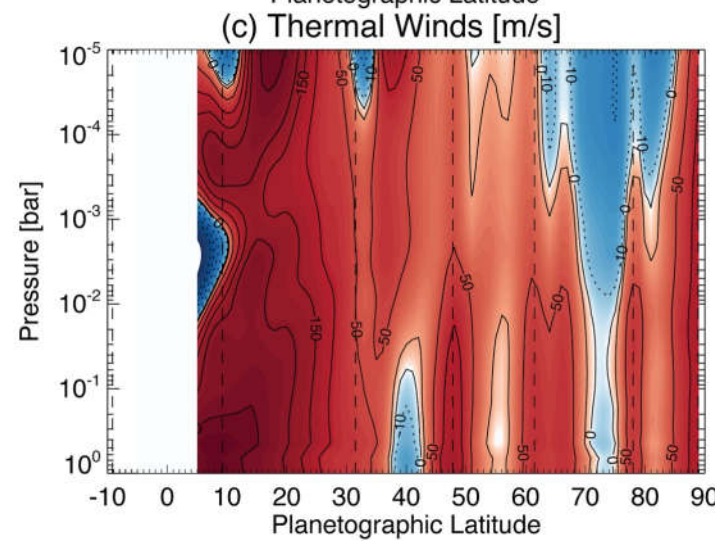
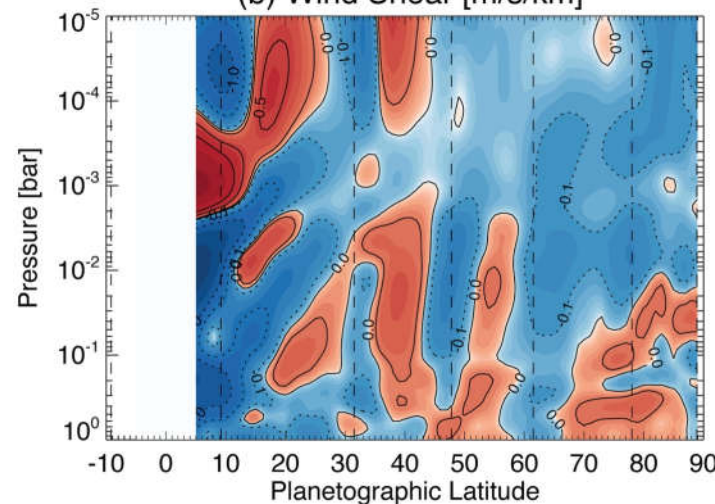
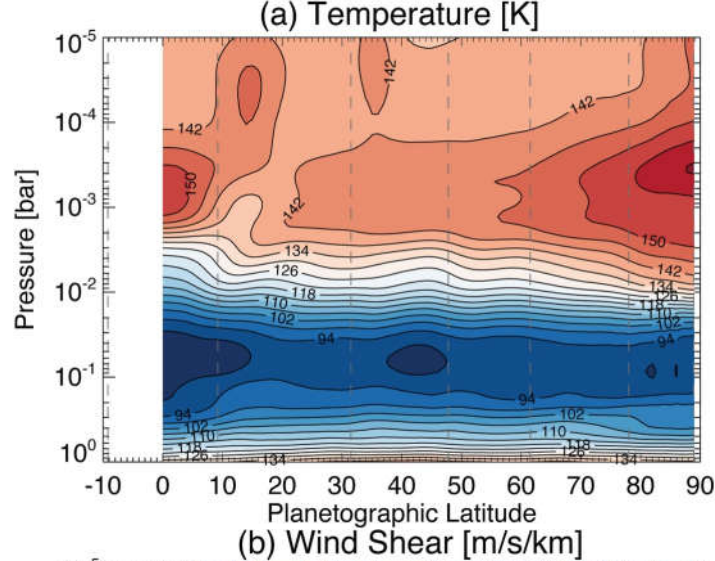
# Saturn: skład i stratyfikacja atmosfery

Tak naprawdę, to ani tropopauzy, ani stratosfery, ani stratopauzy

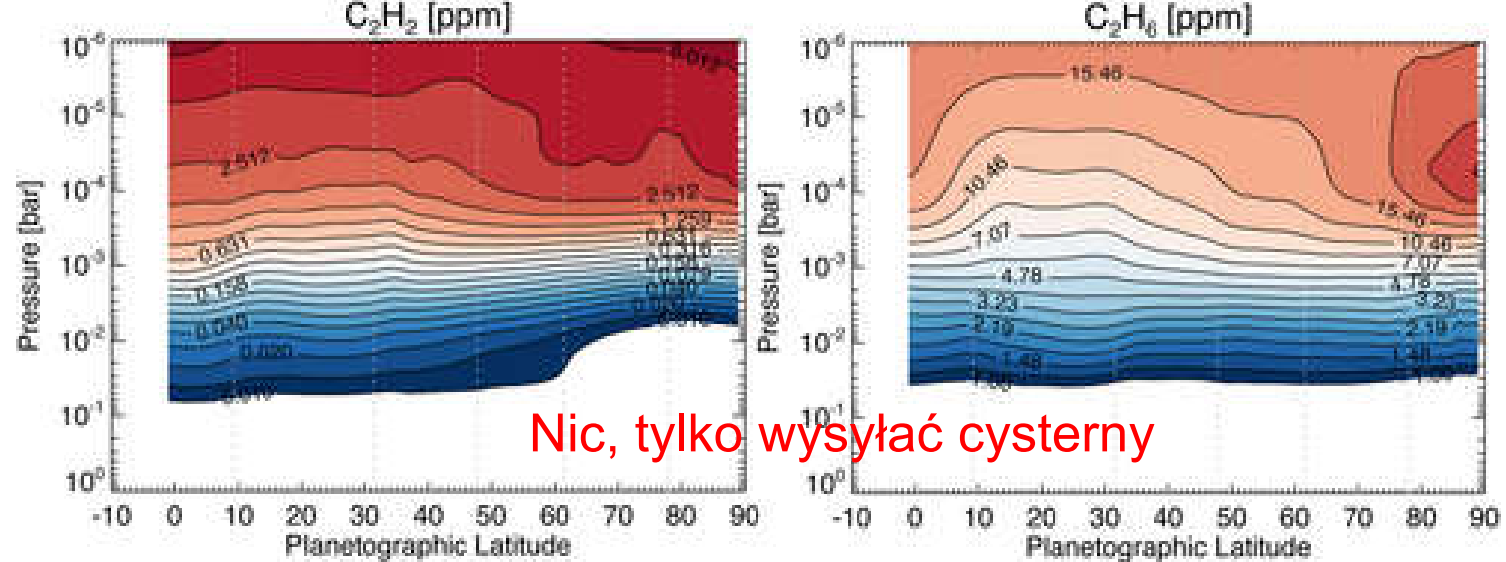


5.36. Pionowy układ atmosfery Saturna na podstawie badań wykonanych przez sondę Voyager-1

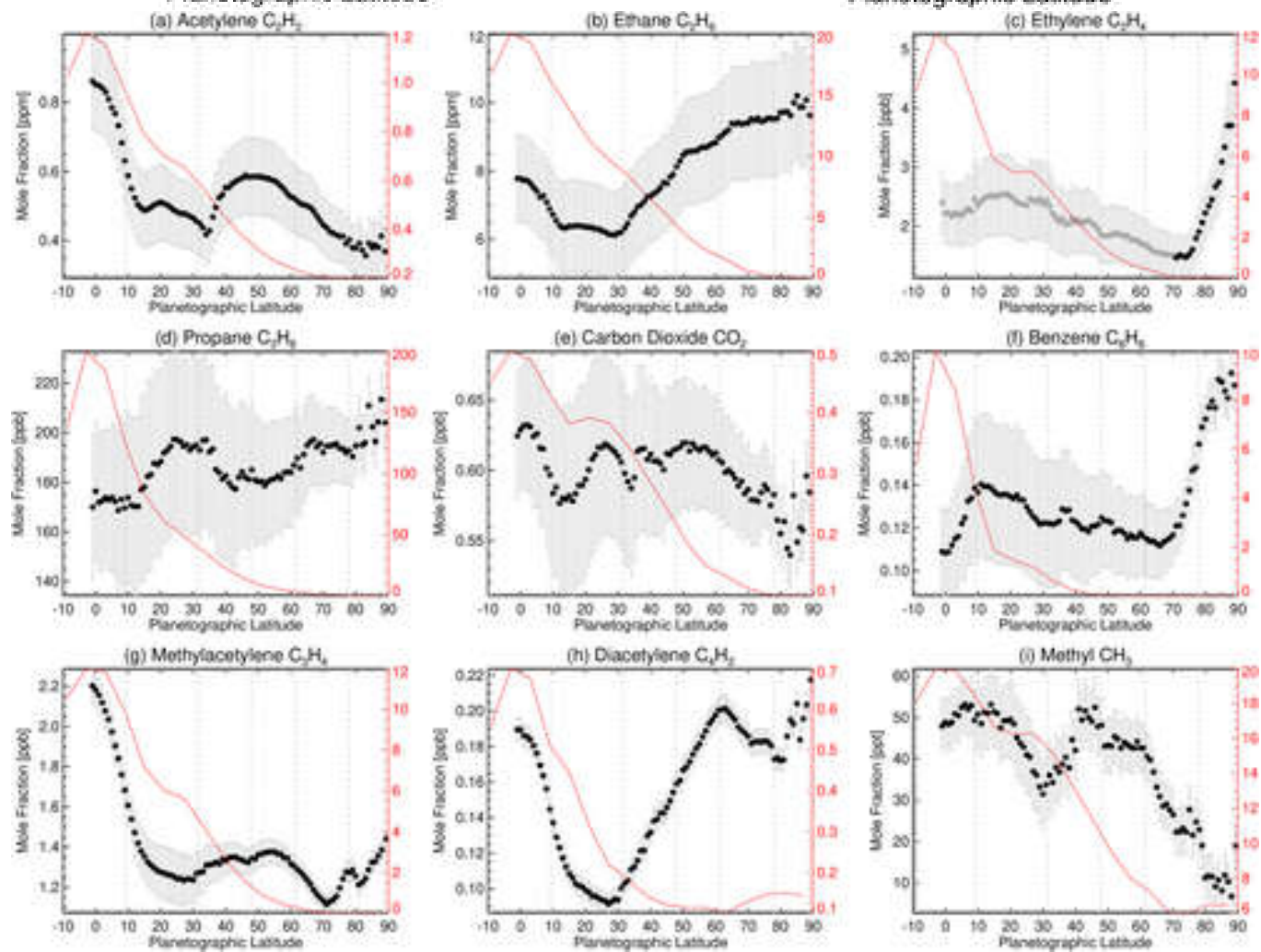
# Saturn: wiatry i skład (2023)



Fletcher, L. N., King, O. R. T., Harkett, J., Hammel, H. B., Roman, M. T., Melin, H., et al. (2023). Saturn's atmosphere in northern summer revealed by JWST/MIRI. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2023JE007924. <https://doi.org/10.1029/2023JE007924>



Nic, tylko wysłać cysterny



Saturn  
JWST NIRCам F323N  
June 25, 2023

# Saturn rings



On June 25, 2023, NASA's James Webb Space Telescope turned to famed ringed world Saturn for its first near-infrared observations of the planet. The initial imagery from Webb's NIRCам (Near-Infrared Camera) is already fascinating researchers.

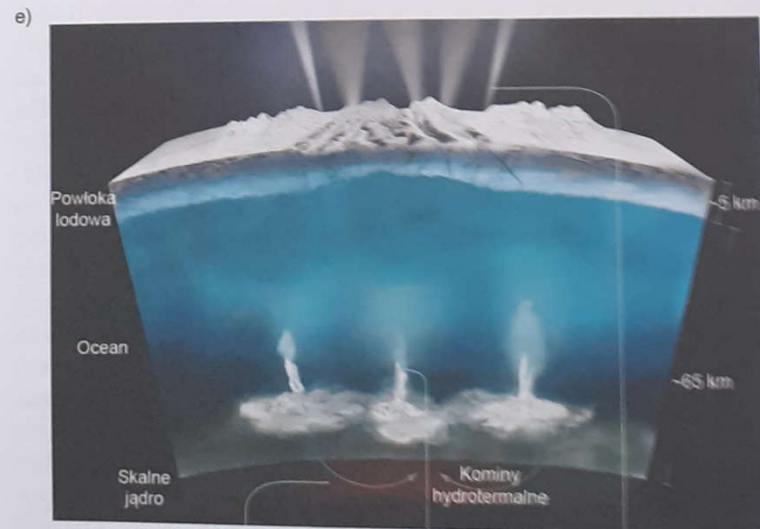
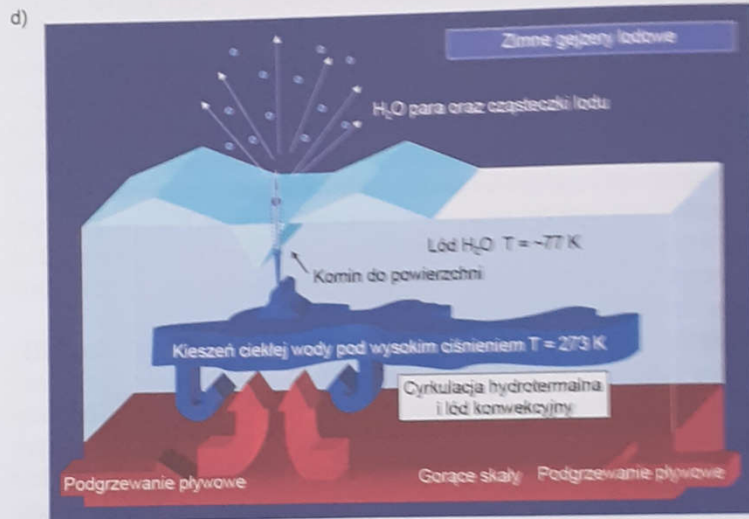
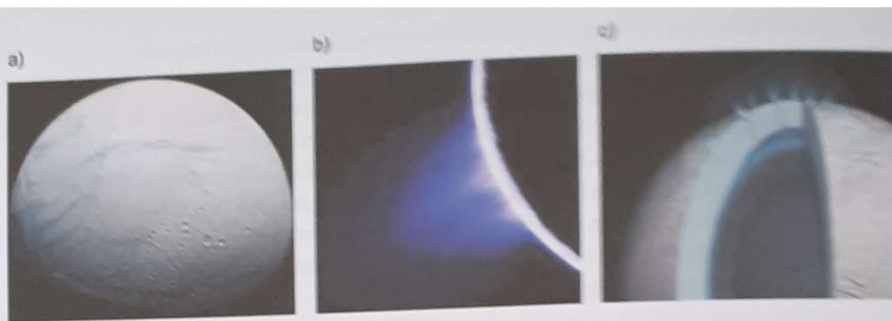
Saturn itself appears extremely dark at this infrared wavelength observed by the telescope, as **methane** gas absorbs almost all of the sunlight falling on the atmosphere. However, the icy rings stay relatively bright, leading to the unusual appearance of Saturn in the Webb image.

<https://webbtelescope.org/contents/media/images/01H3X9BMPCX165ZK9RA49J2416>

# Enceladus



Zdjęcie sztucznie pokolorowane uwidacznia aktywny obszar tzw. „tygrysiach pasów” na południowej półkuli, Cassini, 14 lipca 2005



Rysunek 5.46. a) Zdjęcie Enceladusa z sondy Cassini z 14.07.2005 r.; b) zjawisko kriowulkanizmu na Enceladusie widziane z sondy Cassini (fałszywe kolory); c) wizja artystyczna hydrotermalnej aktywności oceanu na Enceladusie; d) model zimnych gejzerów Enceladusa; e) kminy hydrotermalne na dnie oceanu Enceladusa

Enceladus tak zainteresował naukowców, że zdecydowali się skorygować trasę Cassini w taki sposób, aby także podczas następnego przelotu (14 lipca 2005) sonda zbliżyła się do księżycy na odległość zaledwie 175 km. W trakcie lipcowego zbliżenia sonda wykryła na południowym biegunie miejsce cieplejsze o kilkadziesiąt stopni od obszarów okołorównikowych. Analiza zdjęć uzyskanych z sondy Cassini potwierdziła istnienie w tym miejscu lodowego wulkanu. Modele wnętrza księżycy wyjaśniające jego aktywność sugerują, że na Enceladusie płynna woda może znajdować się zaledwie kilka metrów pod powierzchnią lodu w postaci niewielkich zbiorników, które uwalniają ją podobnie jak ziemskie gejzery. W związku z tym niektórzy uczeni uważają, że na tym księżycy mogą istnieć warunki do powstania organizmów żywych<sup>[6]</sup>.

# Tytan

[Electron-driven molecular processes for cyanopolyacetylenes  \$\text{HC}\_{2n+1}\text{N}\$  \( \$n=3, 4\$ , and  \$5\$ \)](#)

P Mer, C Limbachiya - Physical Chemistry Chemical Physics, 2024

Linear carbon series cyanopolyacetylenes ( $\text{HC}_{2n+1}\text{N}$ ) ( $n=3, 4$ , and  $5$ ) are astromolecules found in the atmosphere of Titan and interstellar media such as TMC-1 (Taurus molecular cloud-1). All these compounds are also detected in IRC+10216.

In the present work, we comprehensively investigate electron interaction with important cyanopolyacetylene compounds, viz.  $\text{HC}_7\text{N}$  (cyano-tri-acetylene),  $\text{HC}_9\text{N}$  (cyano-tetra-acetylene), and  $\text{HC}_{11}\text{N}$  (cyano-penta-acetylene). The study covers ...

Cytuje: Total-cross-section measurements for electron scattering by  $\text{NH}_3$  ...

# Neptun

Aurora – pasy van Allena?  
na Neptunie

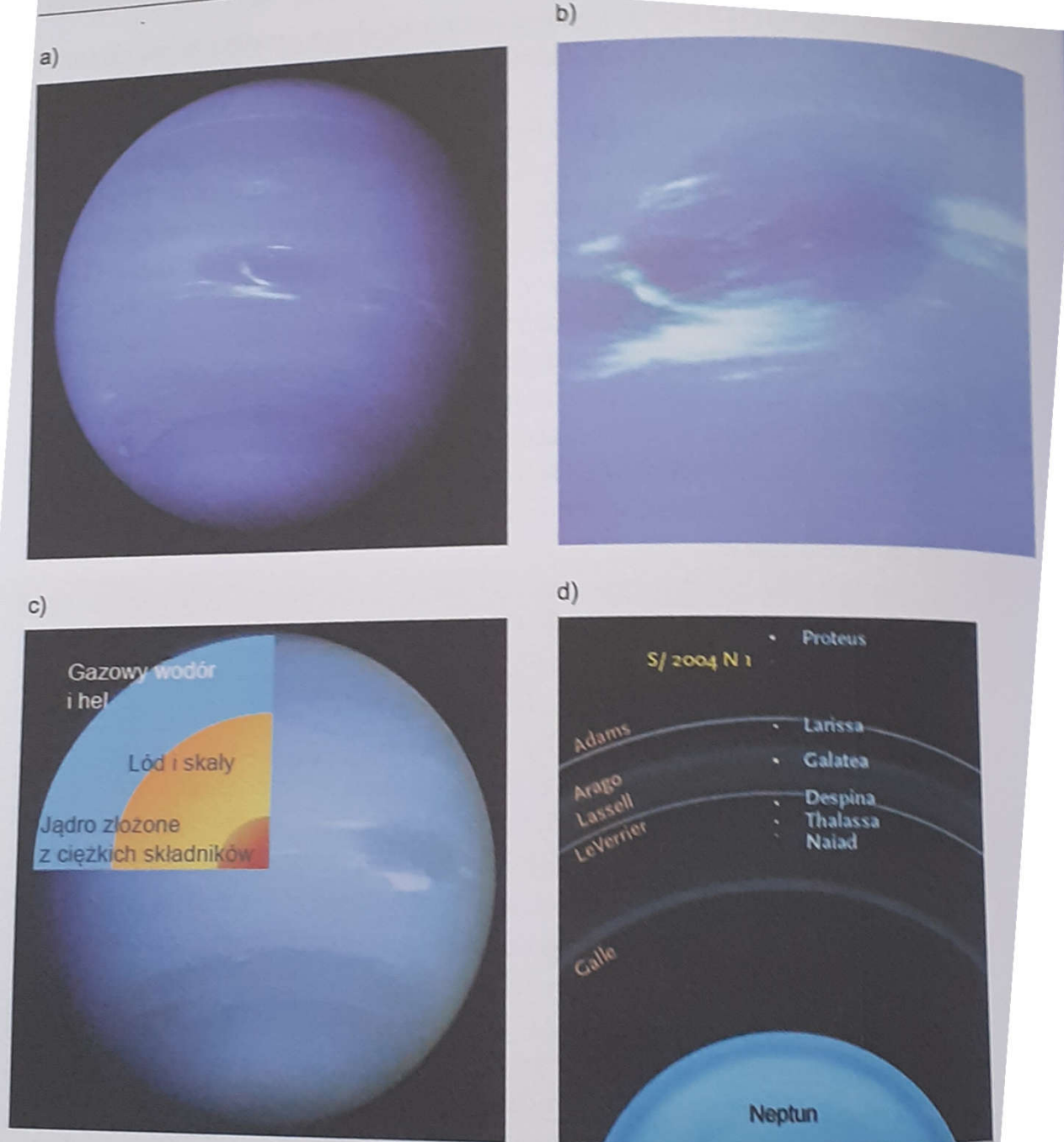
„Tryton jest chyba najbardziej  
niezwykłym obiektem na tym  
zdjęciu. Pokryty w 70%  
wodnym lodem jest w  
podczerwieni jaśniejszy  
nawet od macierzystej  
planety. Neptun jest dość  
ciemny w IR, gdyż  
zdominowana przez metan  
atmosfera pochłania  
większość promieniowania w  
podczerwieni.”

Ten najmniejszy z gazowych olbrzymów jest położony tak  
daleko od Słońca, że na jego odkrycie musieliśmy czekać do  
XIX wieku. [Mała gwiazdka na pozycji Neptuna jest na mapie  
nieba Galileusza z 1610 roku.]

„Sprawa przedstawia się zupełnie inaczej w podczerwieni, okazującej prawdziwą dynamikę  
atmosfery tej planety. Jasne plamy to wysoko położone metanowe chmury. Odkryciem są  
chmury pierścieniowe, okalające biegun, wskazujące na istnienie cyrkulacji w atmosferze.”

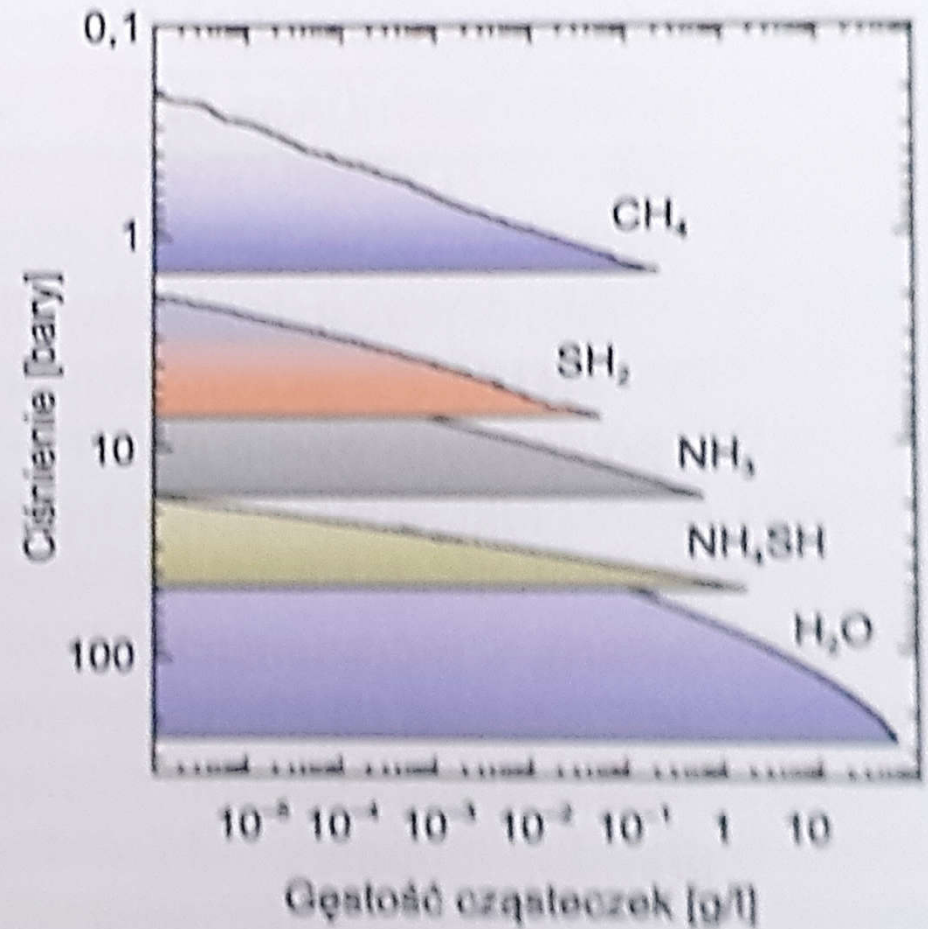
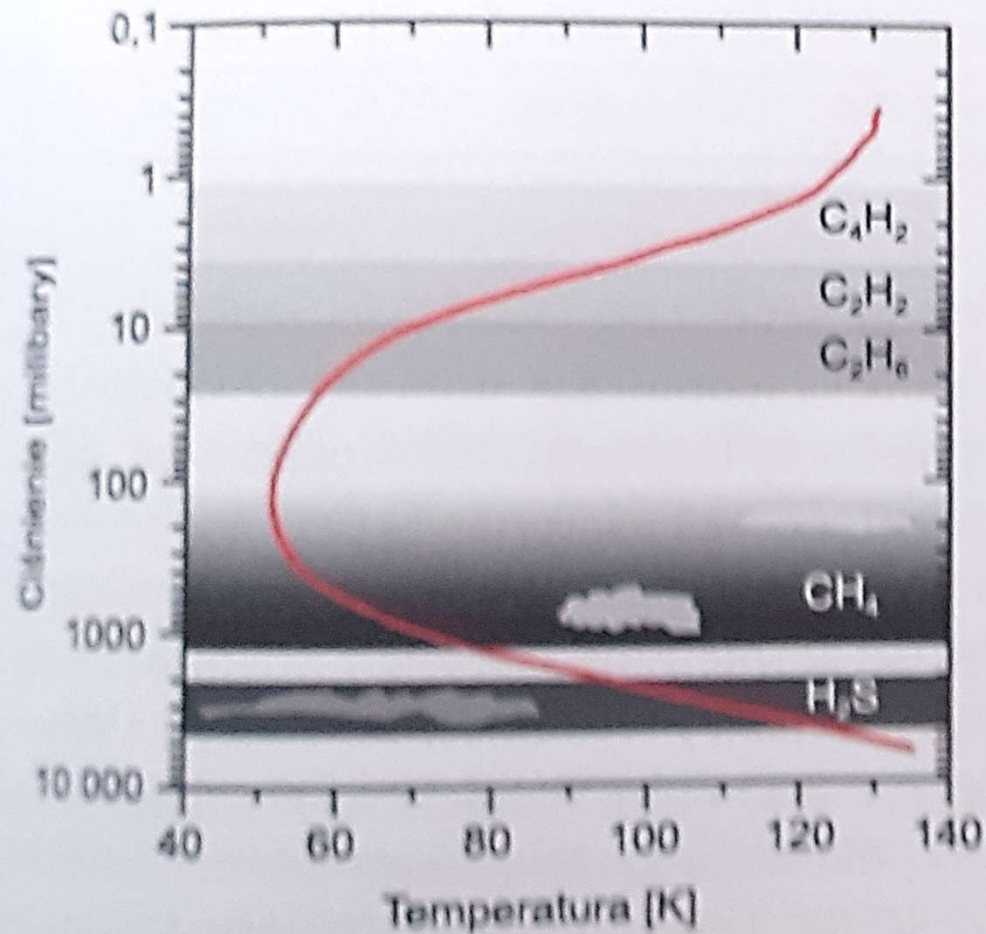
Neptun:  
struktura  
wewnętrzna?

Wielka plama:  
substytut  
troposfery?



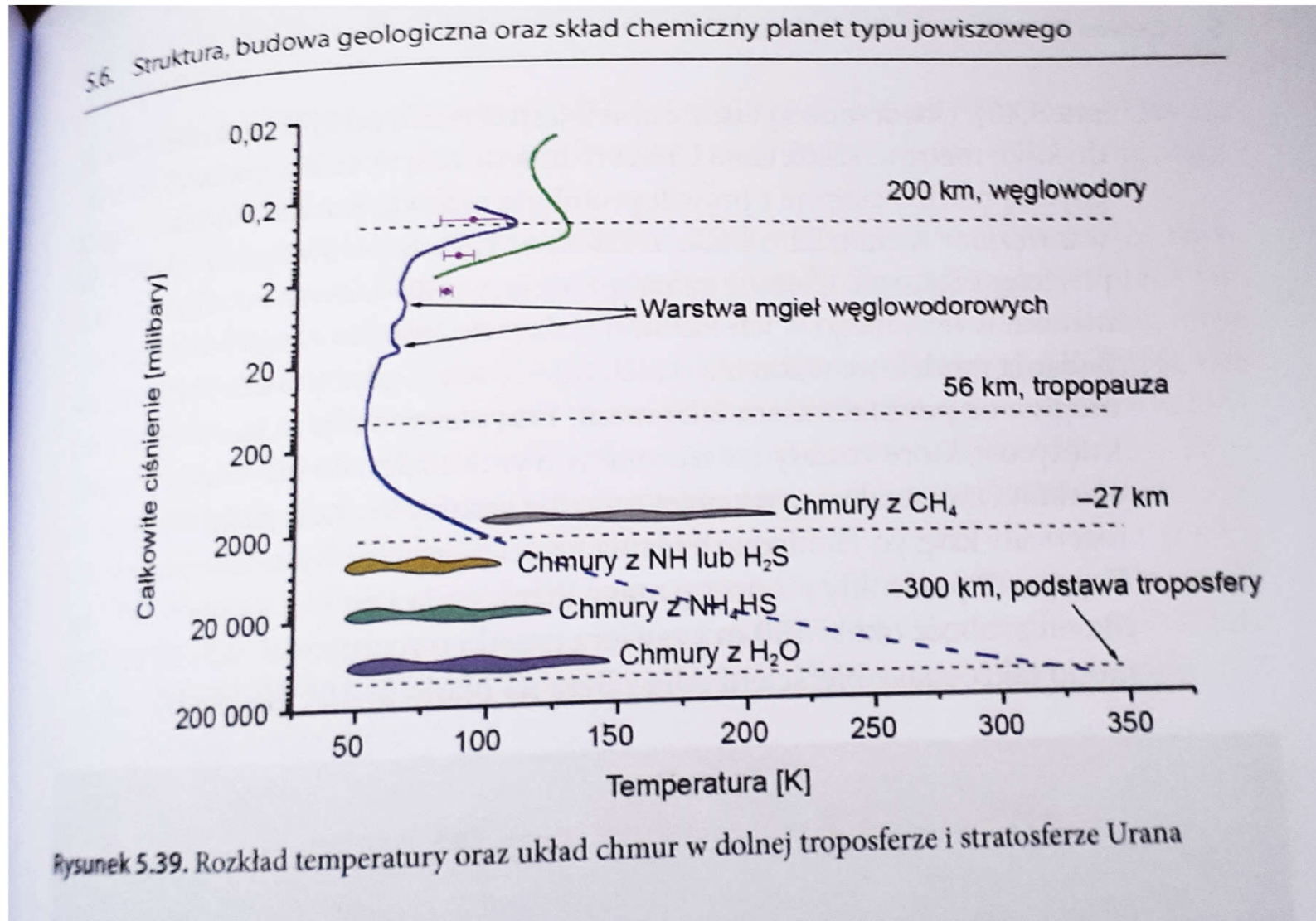
Rysunek 5.41. Neptun: a) zdjęcie Neptuna wykonane przez sondę kosmiczną Voyager-2 w 1989 r.; b) Ciemna Plama w atmosferze Neptuna – odpowiednik Wielkiej Czerwonej Plamy na Jowisie; c) struktura wewnętrzna Neptuna; d) układ pierścieni oraz księżyców Neptuna

# Neptun: stratyfikacja atmosfery



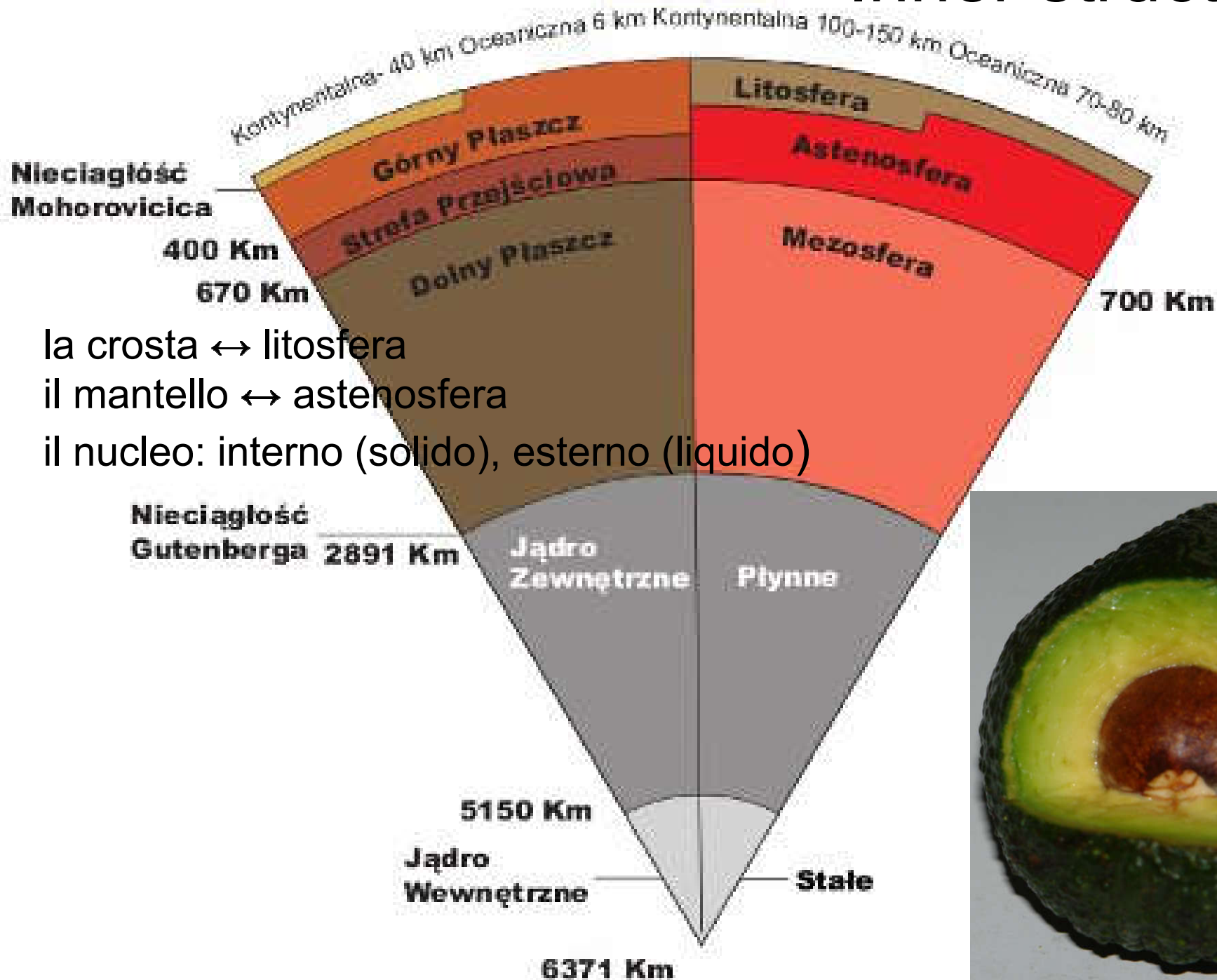
Rysunek 5.42. Rozkład temperatury oraz układ chmur w atmosferze Neptuna

# Uran: skład i stratyfikacja atmosfery



# Inner structure

**Skorupa**



la crosta ↔ litosfera

il mantello ↔ astenosfera

il nucleo: interno (solido), esterno (liquido)

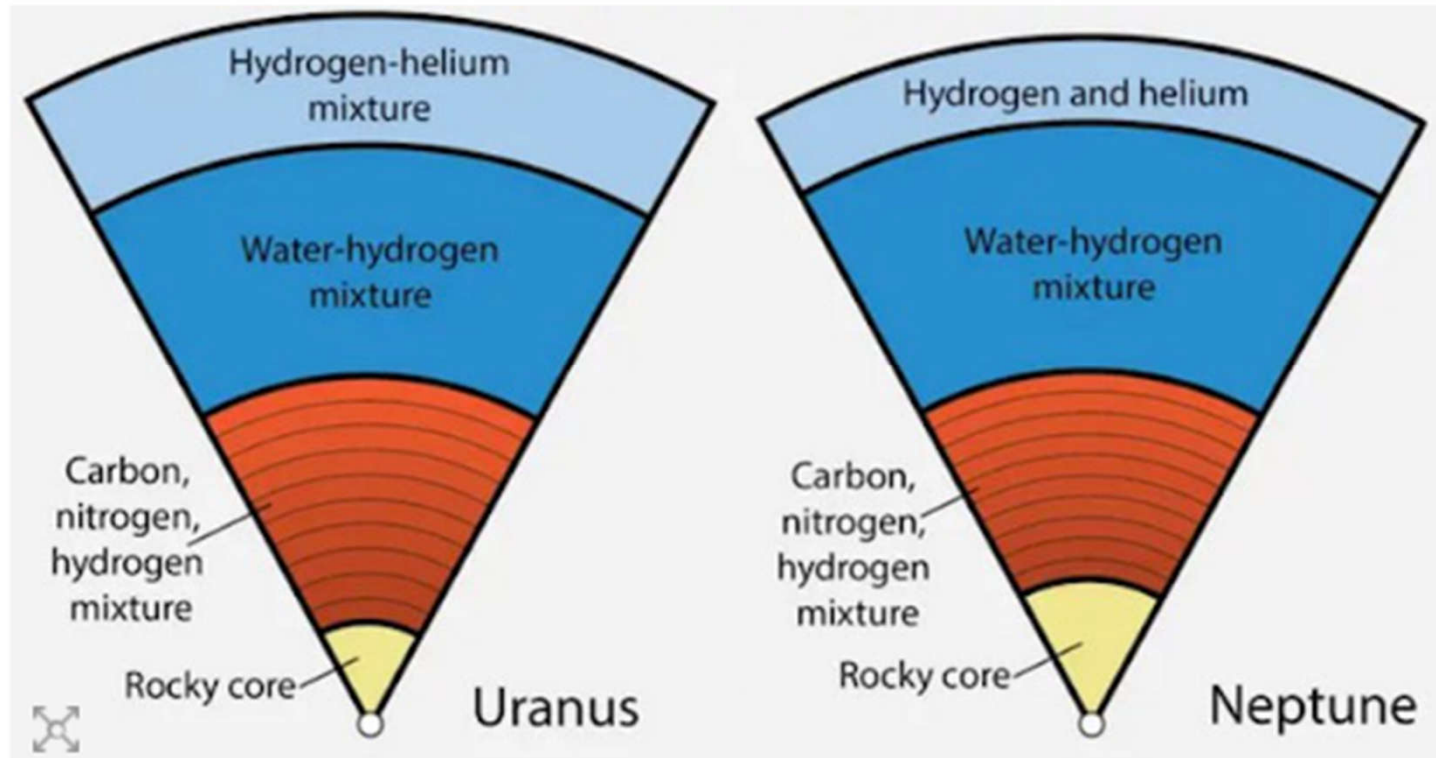


# Uran & Neptun: no magnetic poles

lack magnetic poles

17 Dec 2024 Isabelle Dumé

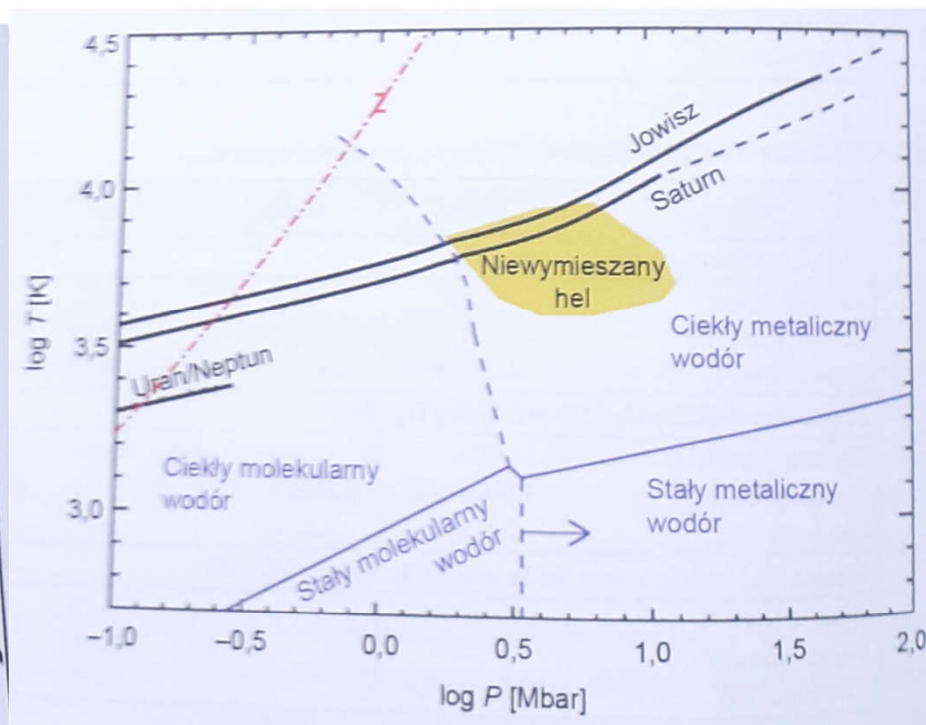
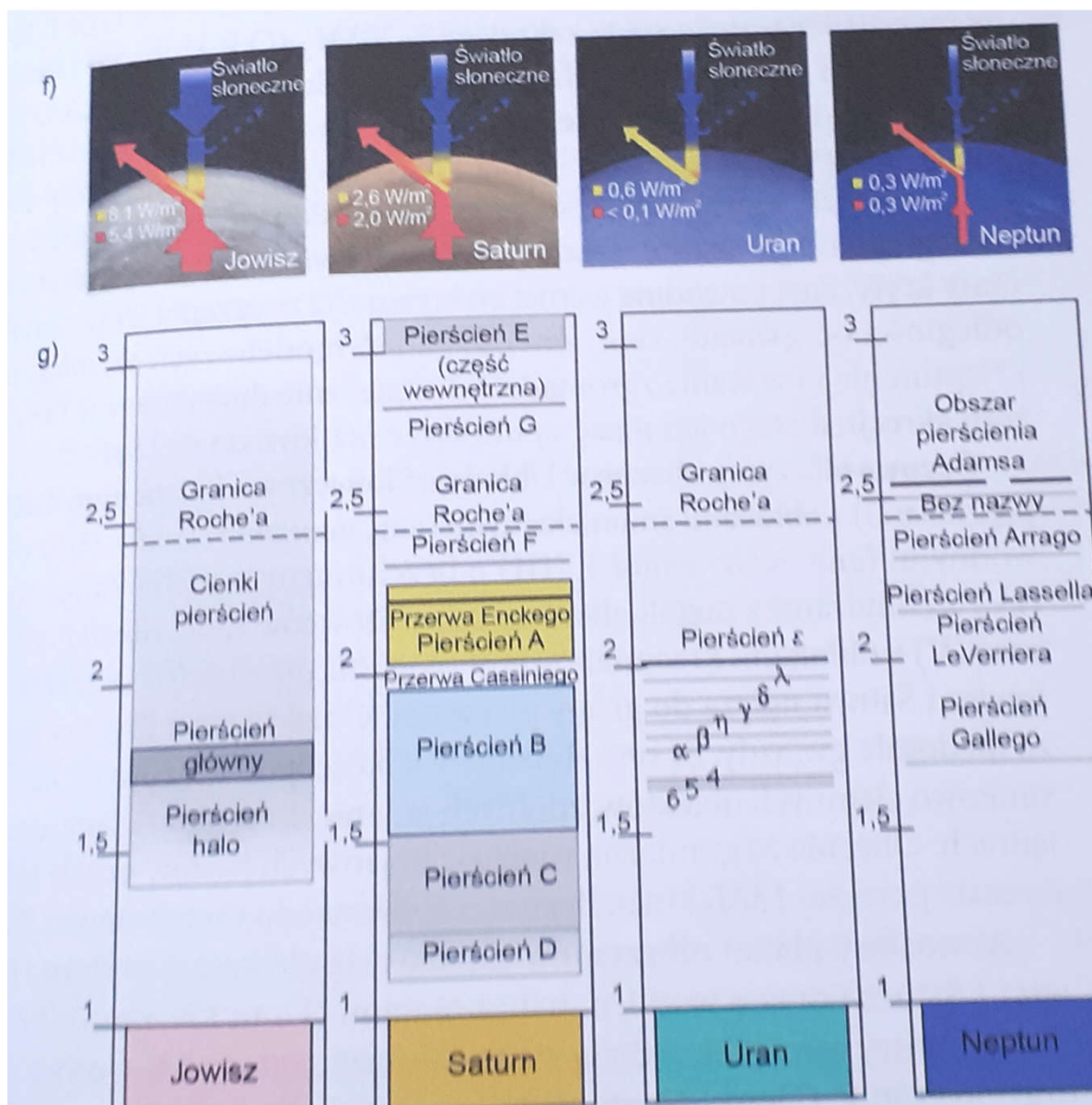
<https://physicsworld.com/a/immiscible-ice-layers-may-explain-why-uranus-and-neptune-lack-magnetic-poles/>



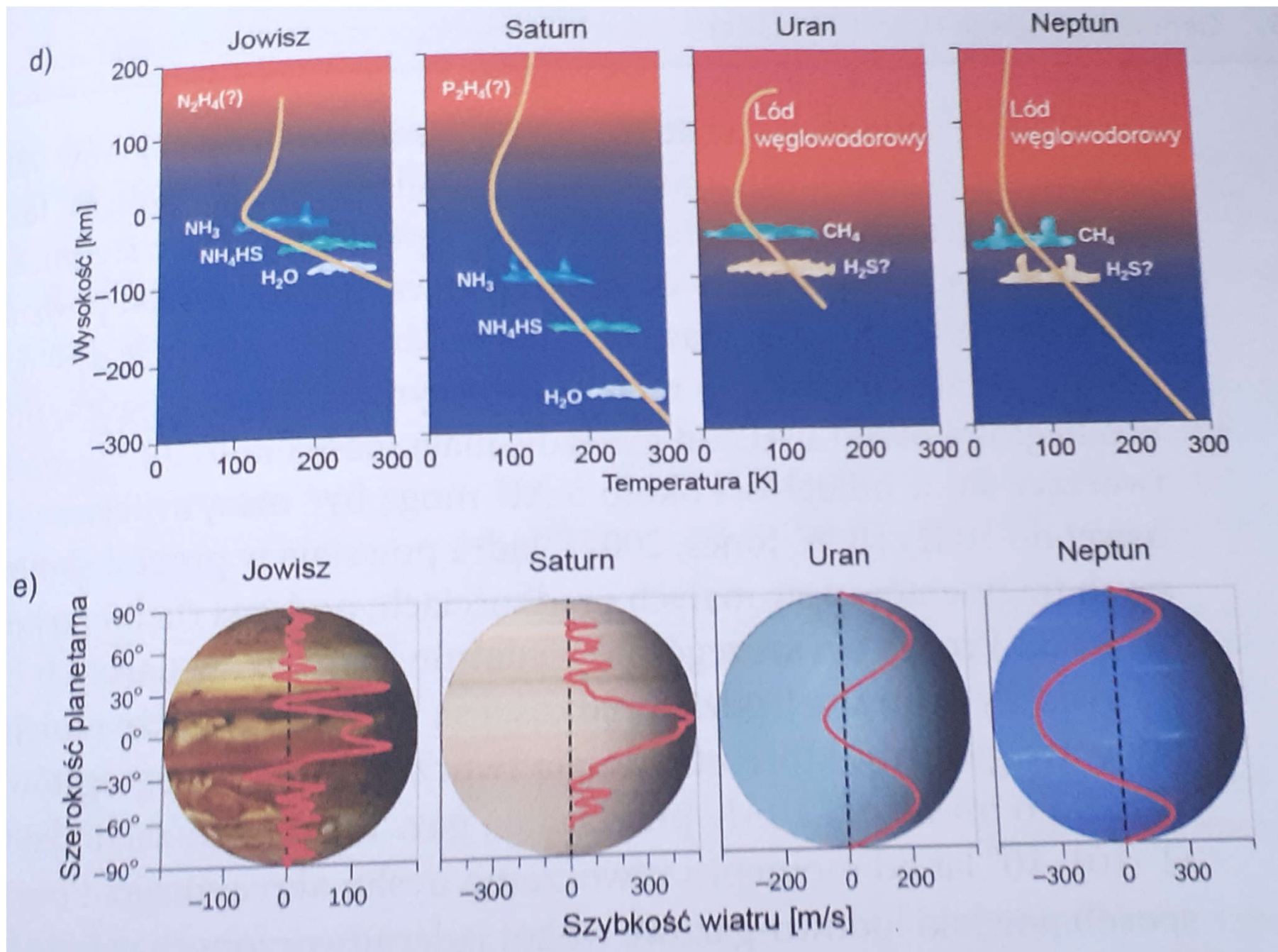
Under the ice: Models for the interior structures of the ice-giant planets Uranus and Neptune have two distinct, intermediate layers: an upper, water-rich convecting layer where disorganized magnetic fields are

To investigate conditions deep beneath Uranus and Neptune's icy surfaces, Militzer developed computer models to simulate how a mixture of water, methane and ammonia will behave at the temperatures (above 4750 K) and pressures (above  $3 \times 10^6$  atmospheres) that prevail there.

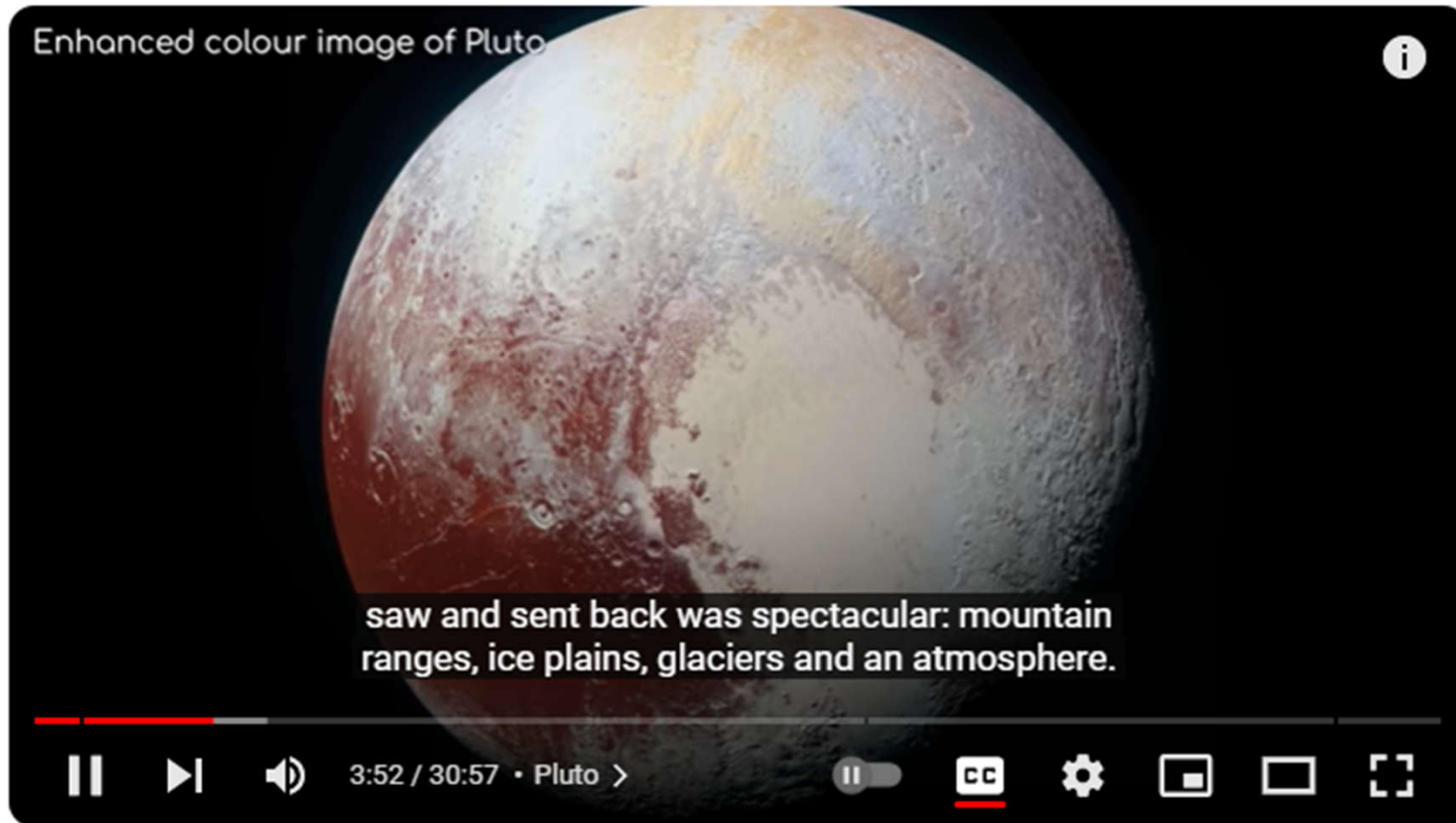
# Giganty gazowe: porównanie



# Giganty gazowe: porównanie



# Pluton – odrzucona planeta



**The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth**

<https://www.youtube.com/watch?v=D5XPuS-Y0fg>

# Pluton: oceany płynnego azotu



## The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

- 229°C
- Kry z zestalonego N<sub>2</sub>

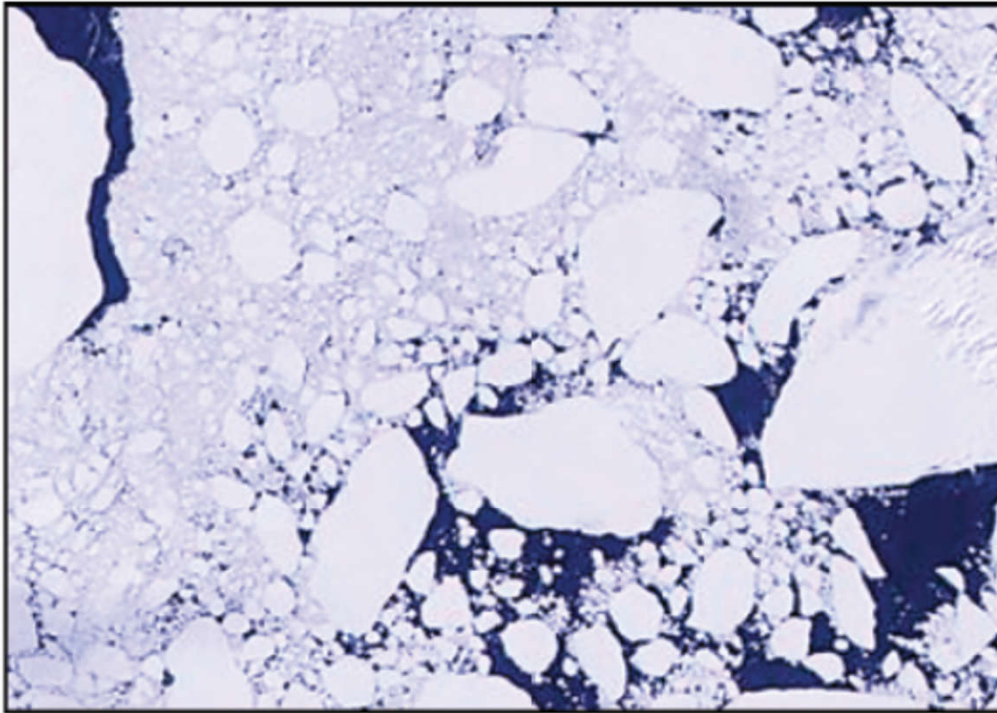
# Pluton: kry na oceanie płynnego azotu



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

- 229°C
- Kry z zestalonego N<sub>2</sub>

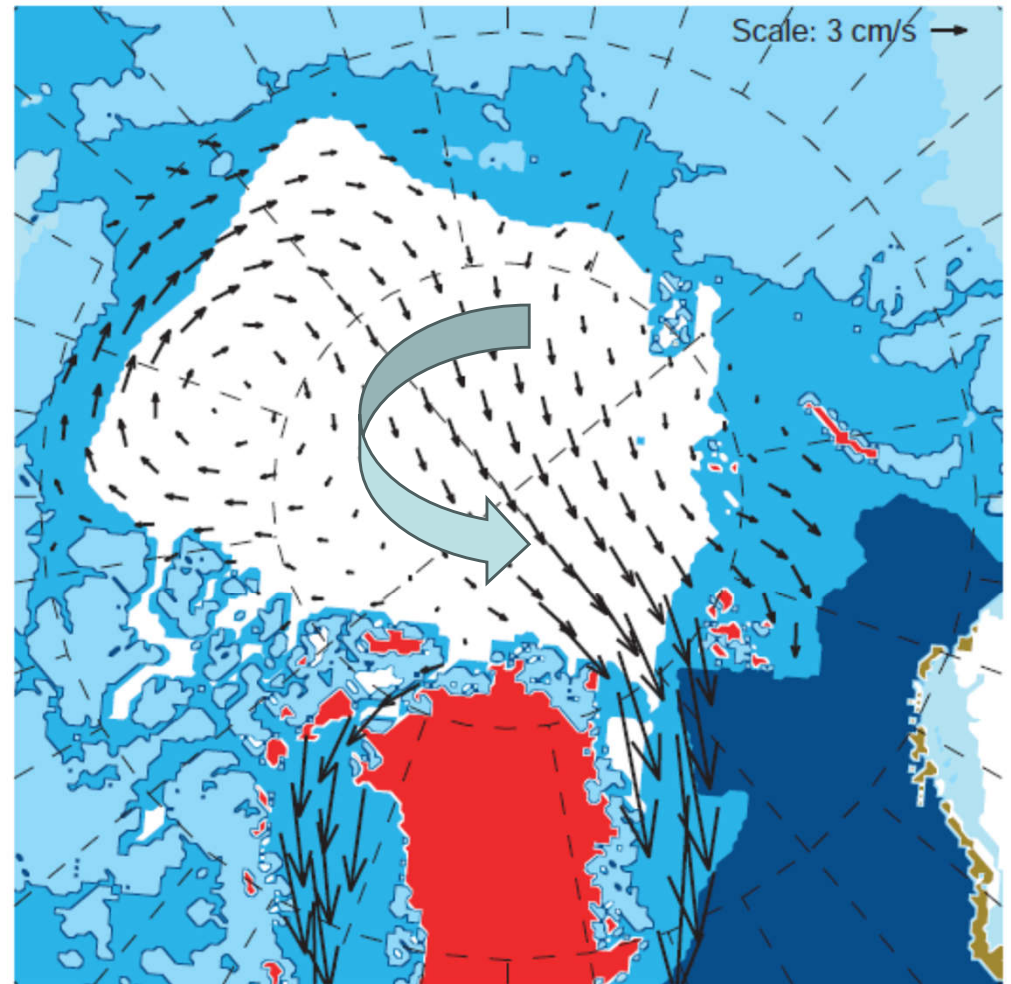
# Dryf lodu w Arktyce



**Fig. 2.15** Floes in pack ice streaming southward off the east coast of Greenland. The white area at the upper left is *landfast ice* that is attached to the coast, and the black channel adjacent to it is open water, where the mobile pack ice has become detached from the landfast ice. [NASA MODIS imagery.]

W lewym górnym rogu – lód przylegający do Grenlandii

Atmospheric Science, str. 34



**Fig. 2.16** Wintertime Arctic sea ice motion as inferred from the tracks of an array of buoys dropped on ice floes by aircraft. [Courtesy of Ignatius Rigor.]

Wir „dookoła” bieguna to siła Coriolisa (obróć Ziemi)  
Kry wypływają z obu stron Grenlandii

# Pluton: krio-wulkany



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

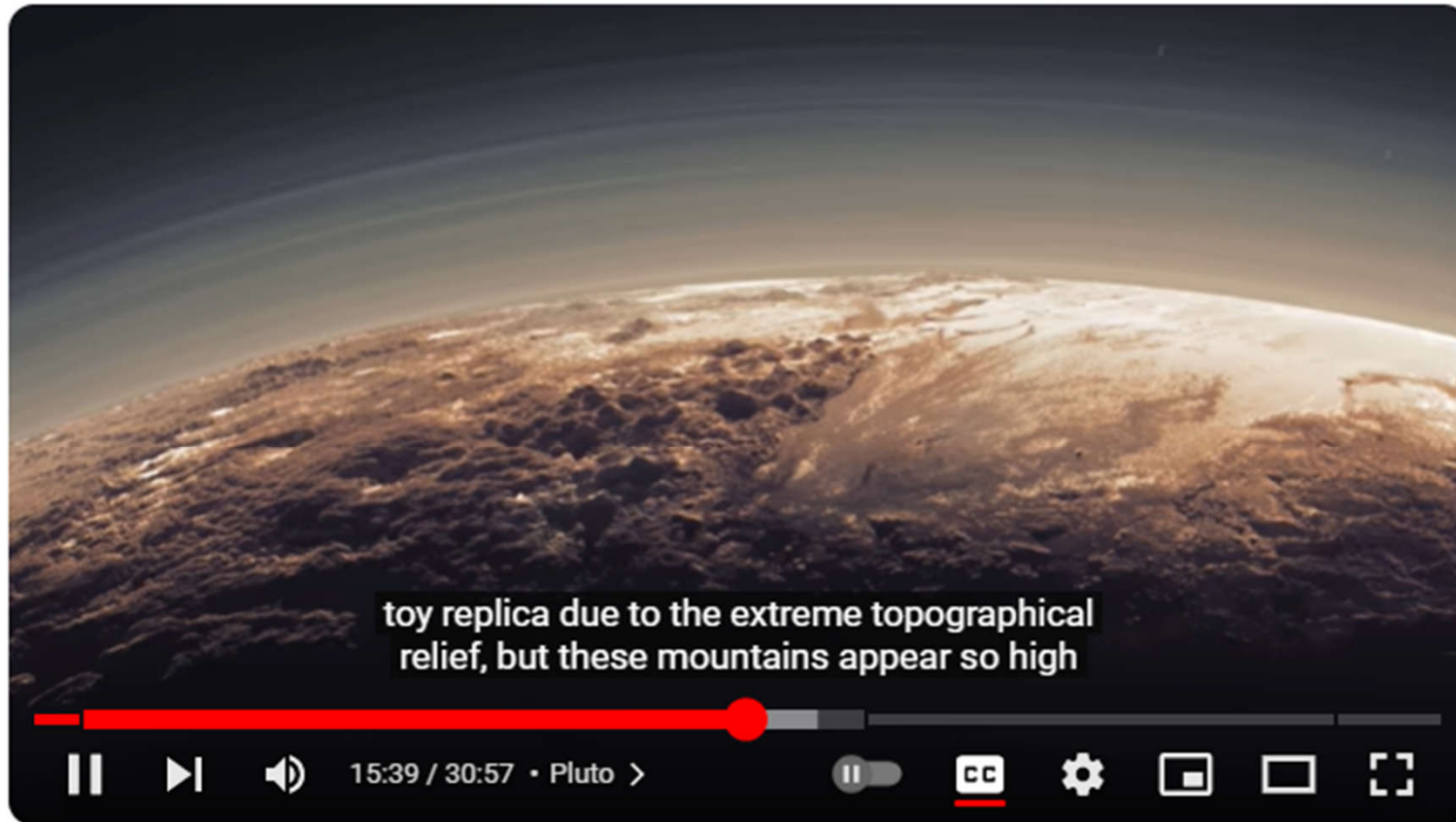
# Pluton: śniegowe ( $\text{H}_2\text{O}$ ) chmury



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

- $229^{\circ}\text{C}$
- Kry z zestalonego  $\text{N}_2$

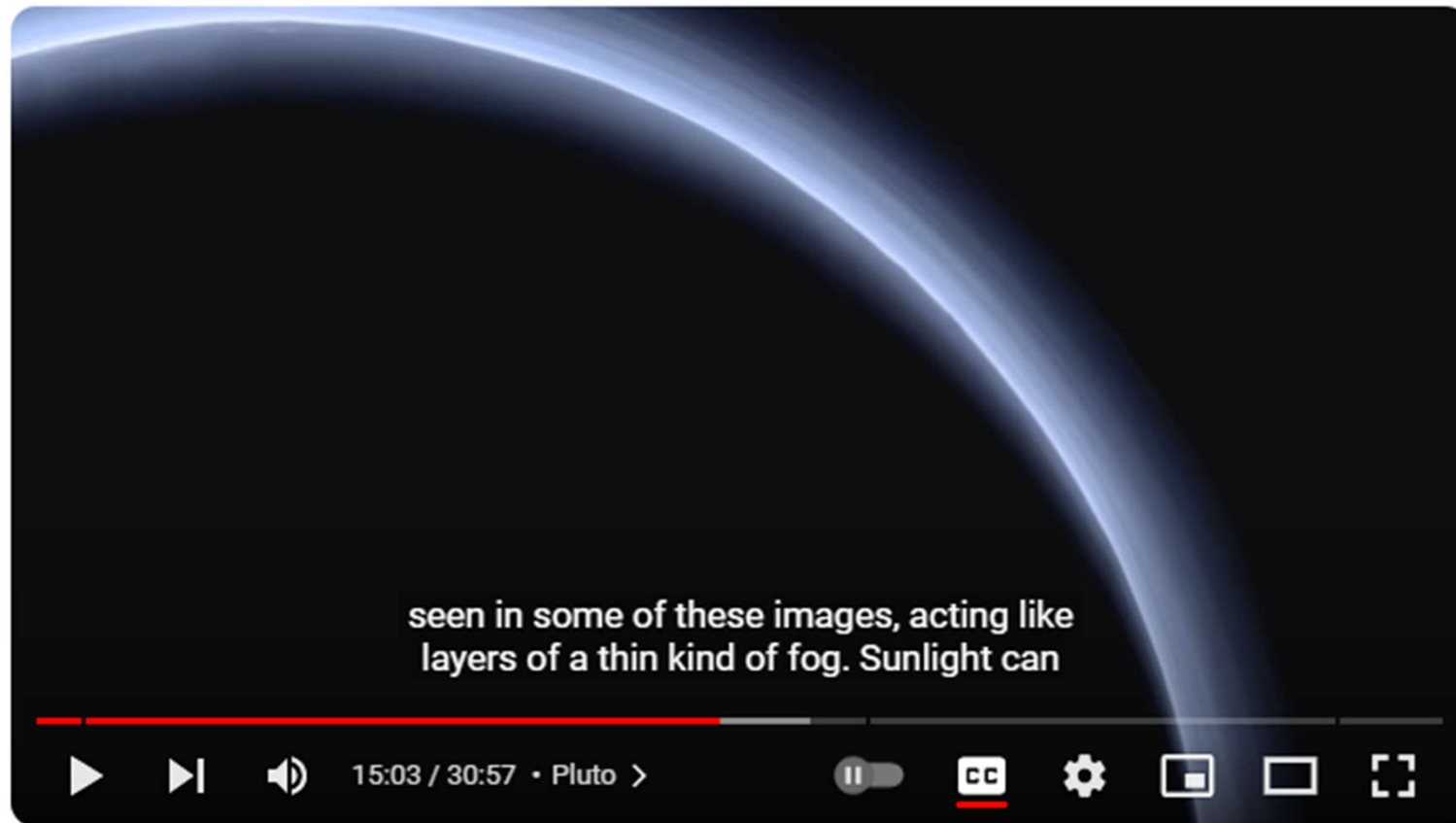
# Pluton: całkiem spora atmosfera



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

100 microbar

# Pluton: całkiem spora atmosfera



- Azot, metan, węglowodory

# Charon



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

<https://www.youtube.com/watch?v=D5XPuS-Y0fg>

# Mniejsze satelity Plutona



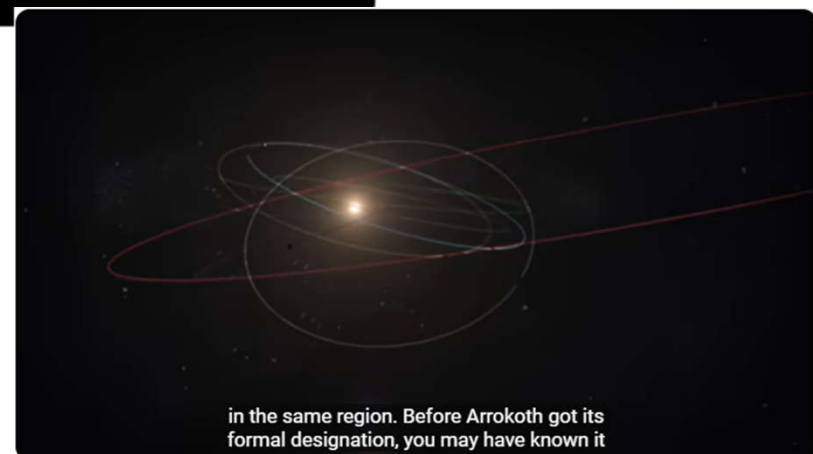
The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrokoth

<https://www.youtube.com/watch?v=D5XPuS-Y0fg>

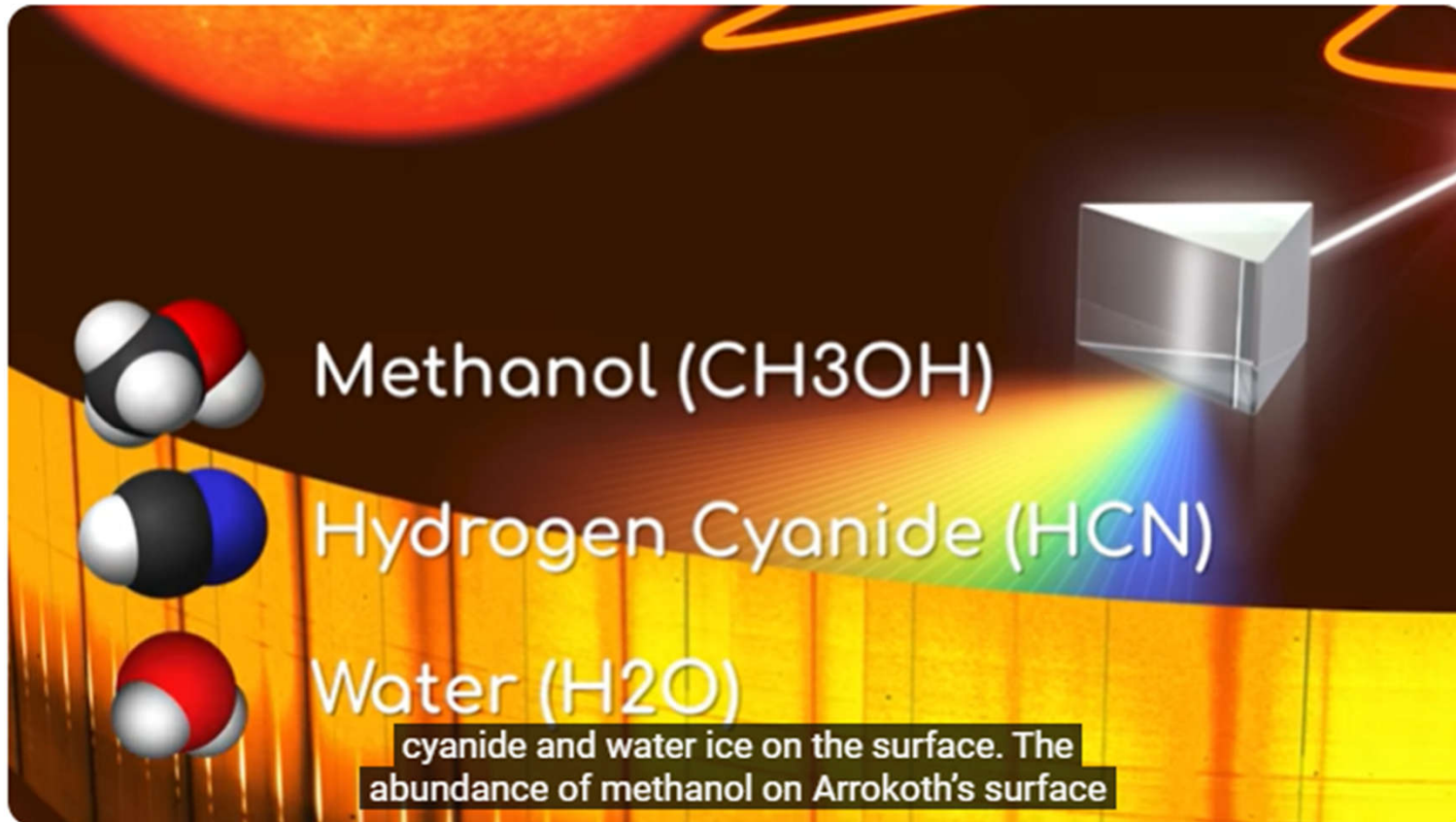
# Arrakoth: 45 A.U. od Ziemi



Pochodzenie: Kuiper belt?



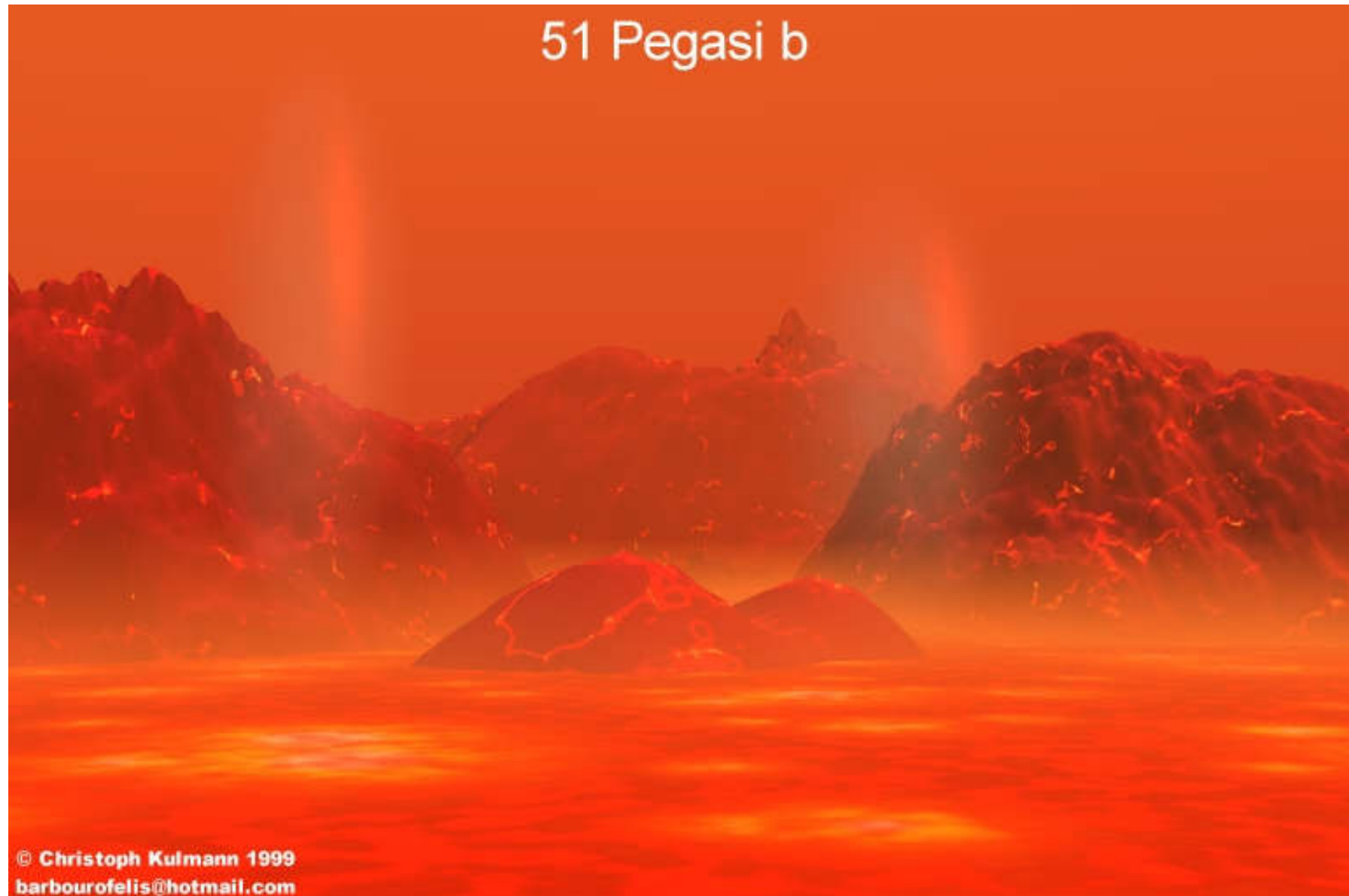
# Arrakoth: 45 A.U. od Ziemi



The Final Images We Will Ever See of Pluto and Arrakoth

Czerwona barwa – organiczne związki na powierzchni

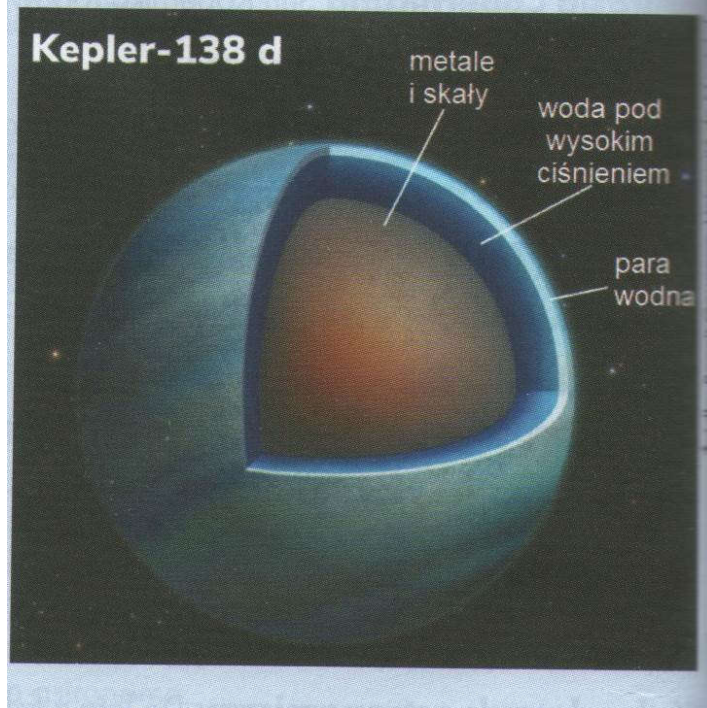
# Planety pozasłoneczne



Wolszczan, 1993 – odkrył pierwsze planety wokół gwiazdy neutronowej

# Kepler 138d

$\sim 1,5 R_{\oplus}$  i masy  $\sim 2 M_{\oplus}$ , co oznacza, że ich gęstość to tylko 60% gęstości Ziemi. Może to oznaczać, że połowę ich objętości stanowi woda. Planety są blisko gwiazdy, więc jest to gorąca woda (rys. niżej). Przypominają zatem przerośniętą Europę (księżyc Jowisza), tyle że bez lodowej skorupy. To pierwsze z egzoplanet o rozmiarach zbliżonych do Ziemi, które nie są globami skalistymi.



Równie dobrze mogą to być planety zbudowane ze skał podobnych do granitów i bez żelaznego jądra

# Water vapour in the atmosphere of the habitable-zone eight-Earth-mass planet K2-18 b

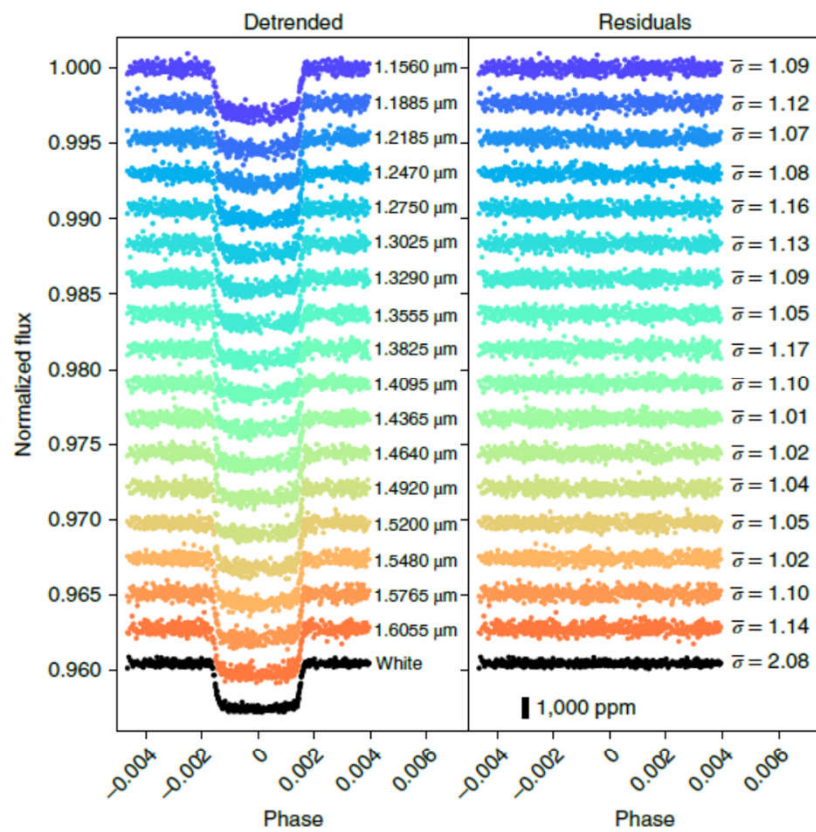
Angelos Tsaras <sup>\*</sup>, Ingo P. Waldmann <sup>\*</sup>, Giovanna Tinetti , Jonathan Tennyson and Sergey N. Yurchenko

**Nagroda Nobla, 2035 r.**

**In the past decade, observations from space and the ground have found water to be the most abundant molecular species, after hydrogen, in the atmospheres of hot, gaseous extrasolar planets<sup>1–5</sup>. Being the main molecular carrier of oxygen, water is a tracer of the origin and the evolution mechanisms of planets. For temperate, terrestrial planets, the presence of water is of great importance as an indicator of habitable conditions. Being small and relatively cold, these planets and their atmospheres are the most challenging to observe, and therefore no atmospheric spectral signatures have so far been detected<sup>6</sup>. Super-Earths—planets lighter than ten Earth masses—around**

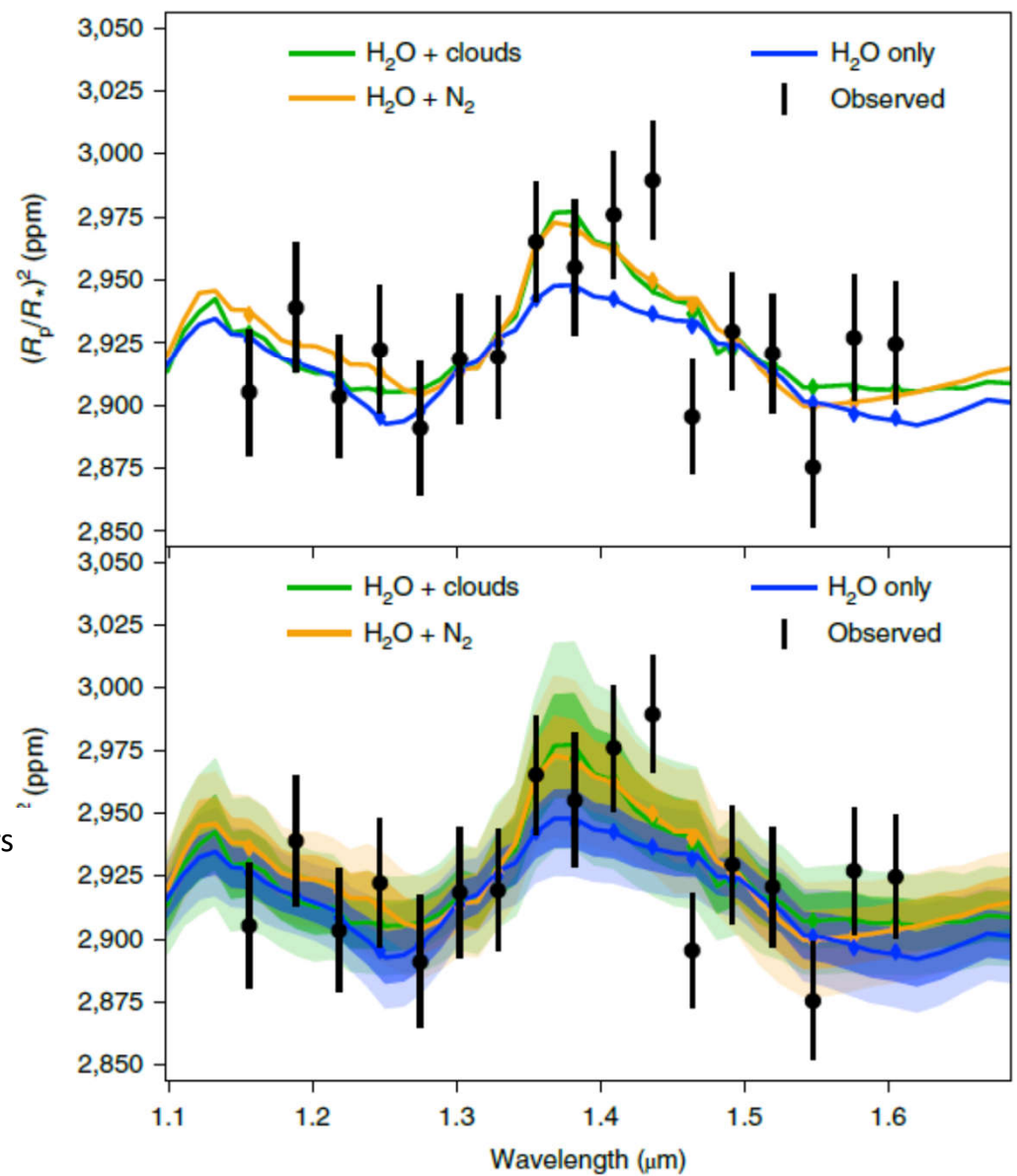
planet within the star's habitable zone ( $\sim 0.12\text{--}0.25$  au) (ref. <sup>20</sup>), with effective temperature between 200 K and 320 K, depending on the albedo and the emissivity of its surface and/or its atmosphere. This crude estimate accounts for neither possible tidal energy sources<sup>21</sup> nor atmospheric heat redistribution<sup>11,13</sup>, which might be relevant for this planet. Measurements of the mass and the radius of K2-18 b (planetary mass  $M_p = 7.96 \pm 1.91$  Earth masses ( $M_\oplus$ ) (ref. <sup>22</sup>), planetary radius  $R_p = 2.279 \pm 0.0026 R_\oplus$  (ref. <sup>19</sup>)) yield a bulk density of  $3.3 \pm 1.2 \text{ g cm}^{-3}$  (ref. <sup>22</sup>), suggesting either a silicate planet with an extended atmosphere or an interior composition with a water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mass fraction lower than 50% (refs. <sup>22–24</sup>).

8 mas Ziemi, promień 2.28 ziemskiego, gęstość  $4.3 \text{ g cm}^{-3}$  (silikaty), albo  $\text{H}_2\text{O}$   
odległość ok. 0.12-0.25 a.u., temperatura ok 200-320 K: „habitable zone”  
Pomiary w IR, dla 9 tranzytów



modelled the atmosphere of K2-18 b including all potential absorbers in the observed wavelength range, that is, H<sub>2</sub>O, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and ammonia (NH<sub>3</sub>). However, we found that only the spectroscopic signature of water vapour is detected with high confidence, so we continued our analysis with only this molecule as trace gas. We modelled the atmosphere following three approaches:

- a cloud-free atmosphere containing only H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>-He
- a cloud-free atmosphere containing H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>-He and molecular nitrogen (N<sub>2</sub>, which acted as proxy for ‘invisible’ molecules not detectable in the WFC3 bandpass but contributing to the mean molecular weight)
- a cloudy (flat-line model) atmosphere containing only H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>-He.



**2 | Best-fit models for the three different scenarios tested.** A cloud-free atmosphere containing only H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>-He (blue), a cloud-free atmosphere containing H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>-He and N<sub>2</sub> (orange) and a cloudy atmosphere containing only H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>-He (green). Top: best-fit models  $\chi^2$ . Bottom:  $1\sigma$  and  $2\sigma$  uncertainty ranges.

# Cross Sections for Electron Collisions with H<sub>2</sub>O

Cite as: J. Phys. Chem. Ref. Data **50**, 023103 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035315>

Submitted: 27 October 2020 . Accepted: 31 March 2021 . Published Online: 12 May 2021

 Mi-Young Song, Hyuck Cho,  Grzegorz P. Karwasz,  Viatcheslav Kokoouline, Yoshiharu Nakamura,   
Jonathan Tennyson,  Alexandre Faure,  Nigel J. Mason, and Yukikazu Itikawa



View Online



Export Citation



CrossMark

## ARTICLES YOU MAY BE INTERESTED IN

### Fifty Years of Reference Data

Journal of Physical and Chemical Reference Data **50**, 010401 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0040316>

### Recommended Cross Sections for Electron-Indium Scattering

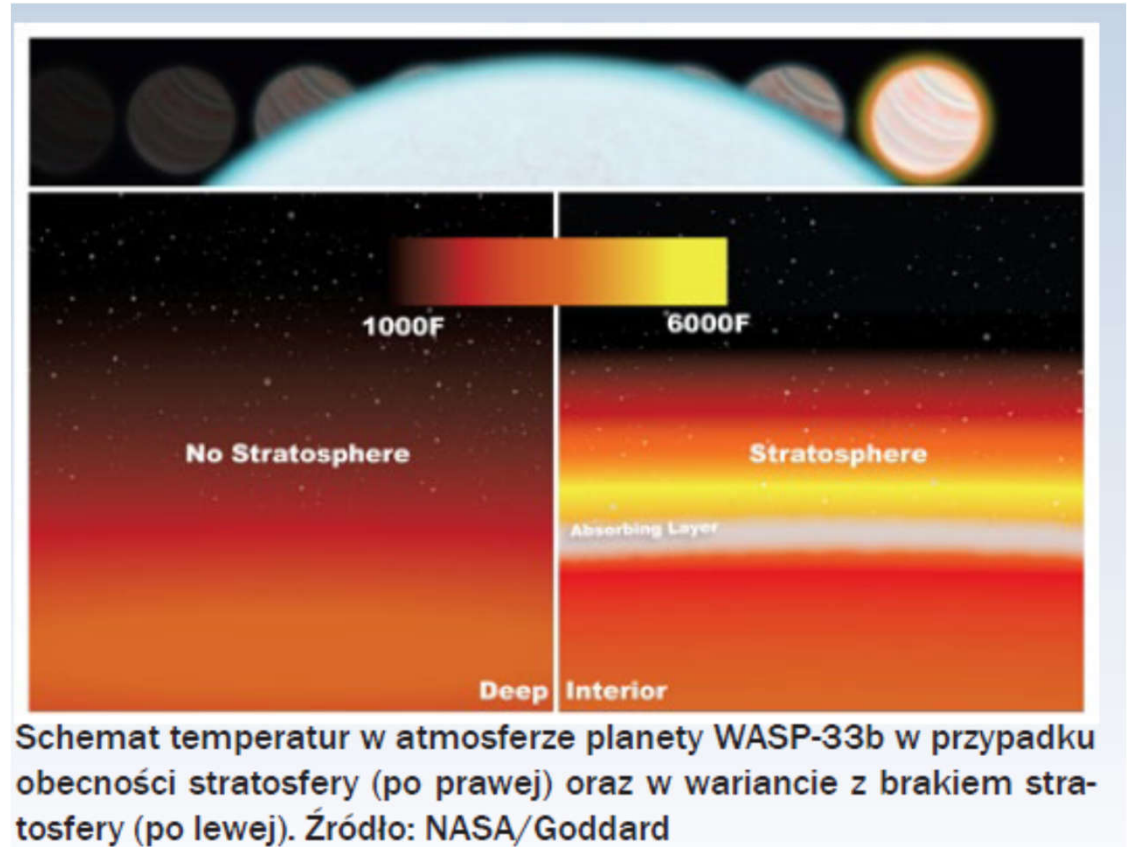
Journal of Physical and Chemical Reference Data **50**, 013101 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035218>

### New Equations of State for Binary Hydrogen Mixtures Containing Methane, Nitrogen, Carbon Monoxide, and Carbon Dioxide

Journal of Physical and Chemical Reference Data **50**, 013102 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0040533>

# Stratosfera na WASP-33b

Jednak wyniki najnowszych obserwacji za pomocą Kosmicznego Teleskopu Hubble'a wskazują na istnienie stratosfery w atmosferze planety WASP-33b. Wykryto w niej inwersję temperatury, czyli cechę charakterystyczną dla stratosfery. Pomiar wskazuje, że na wyższych warstwach atmosfera planety ma około 3000°C, a w niższych tylko połowę tej wartości. Rolę cząsteczek ozonu pełni w tym przypadku tlenek tytanu (swoją drogą obserwacje były pierwszym wykryciem tlenku tytanu w widmie planety WASP-33b).



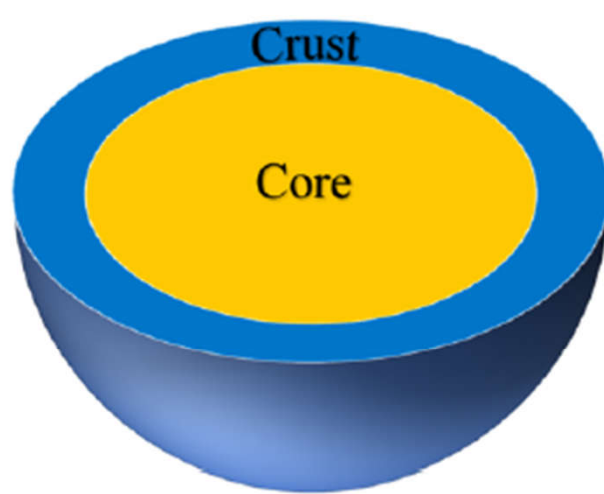
# Trzęsienia „ziemi” na gwiazdach neutronowych

## On Neutron Stars' Crusts Breaking and Gravitational Waves Emission

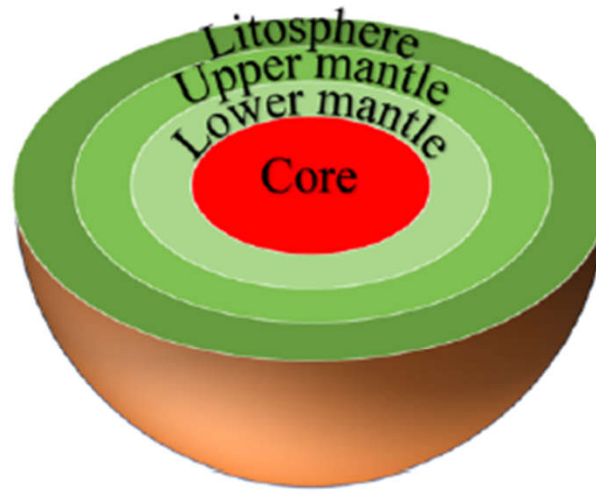
Elia Giliberti, PhD Thesis, Università Degli Studi di Milano, a/a 2019/2020

*The model*

31



**Neutron star**



**Earth**

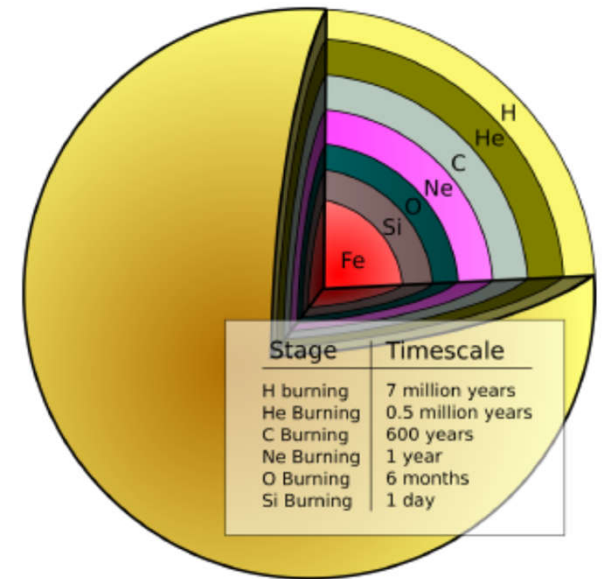
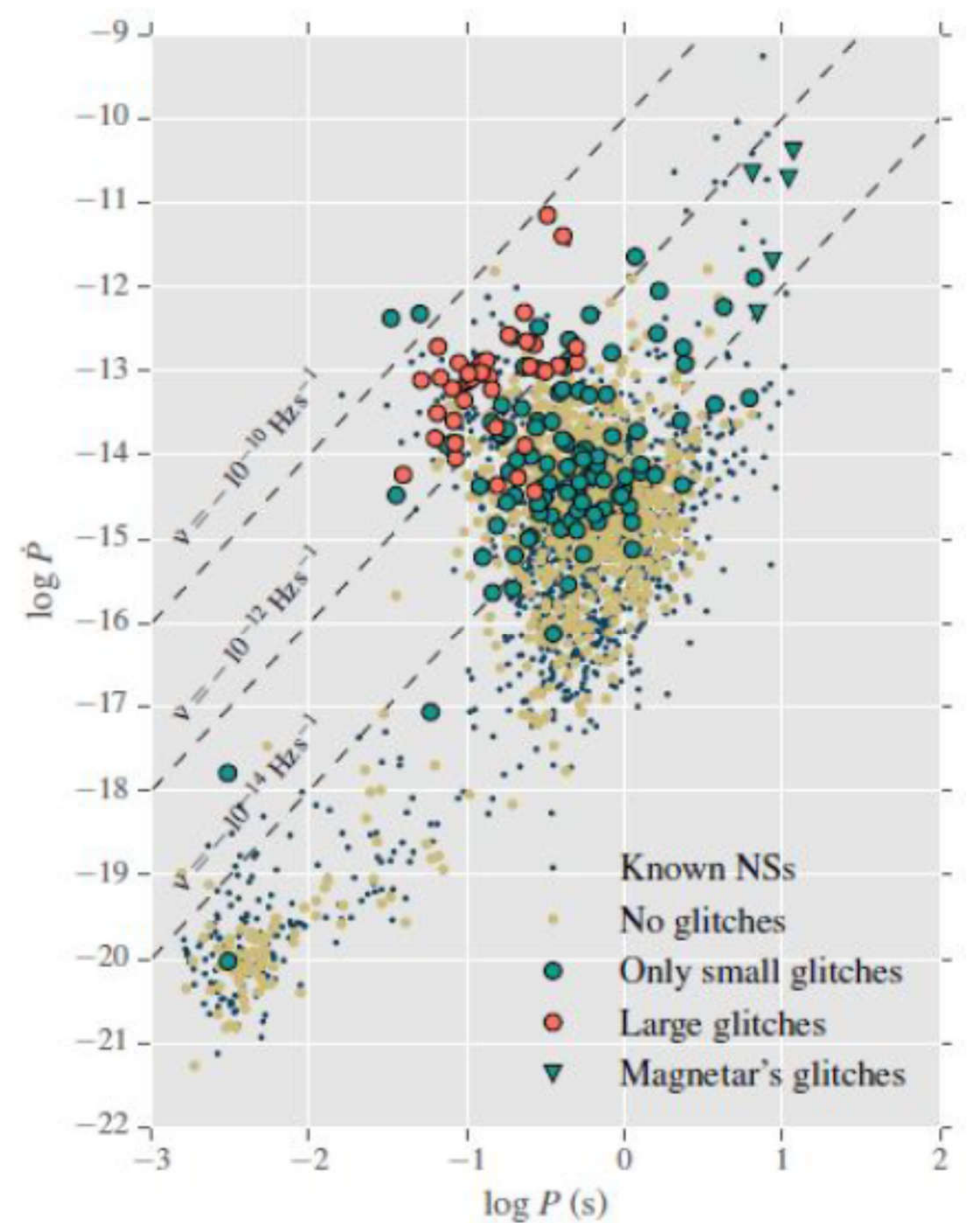
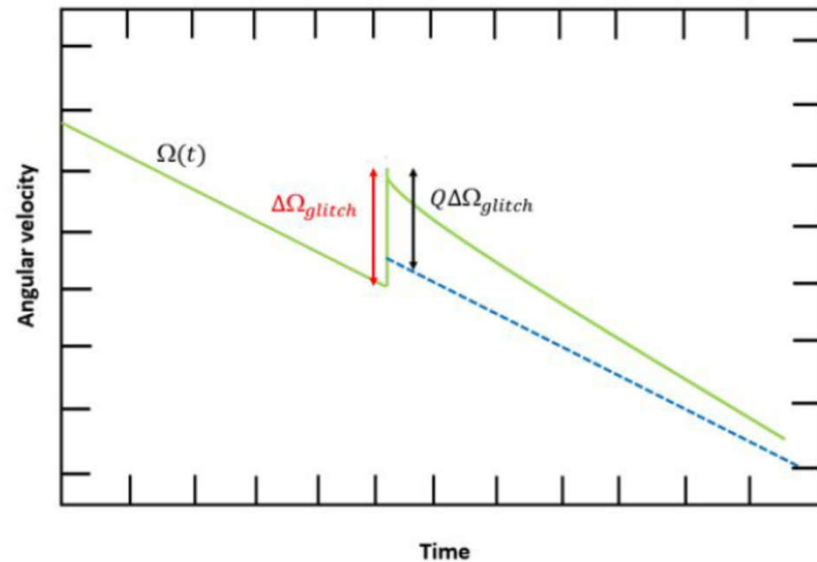
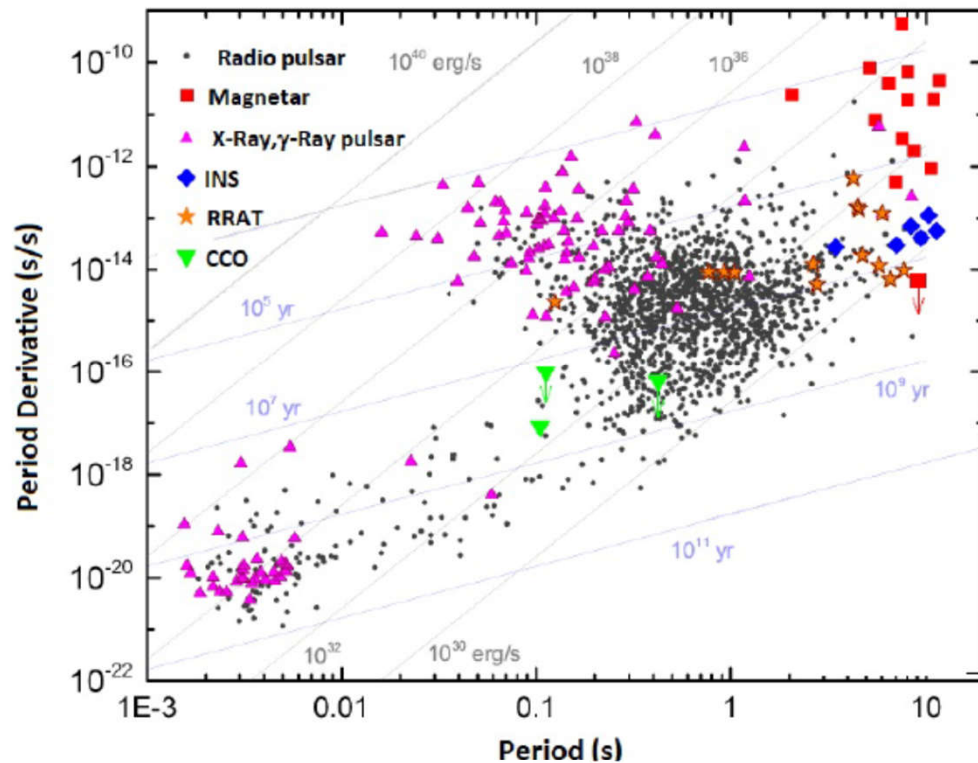


Figure 2.4: We model a NS as an object with only two layers: a fluid core and an elastic crust. However, the proposed equations allow to introduce an arbitrary large number  $N$  of elastic layers: better comprehension of the elastic properties of a NS crust will allow to introduce additional layers. Our model allows to treat continuous stratification of both density and elastic coefficients.

Massive star ( $25_{\odot}$ ) in last instants of life

# Neutron stars: glitches („poślizg”)



# Naprężenia i odkształcenia: Tōhoku, Fe bcc, SN

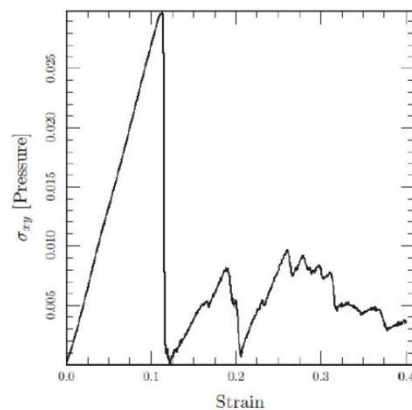
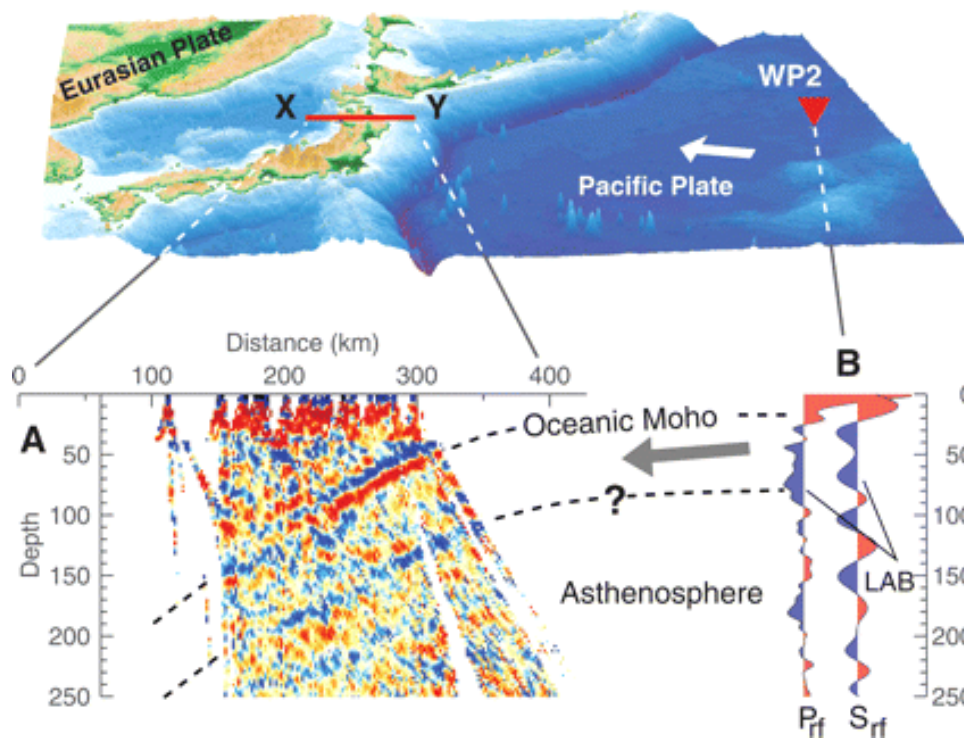


Figure 2.3: The stress-strain relationship for a pure iron bcc crystal of 31250 particles. A strain rate of  $20 \times 10^{-6}$  was applied in the X direction. The simulation box was deformed to a maximum strain of 0.4 in order to investigate the occurrence of a second material failure. The second yielding event occurs between a strain of 0.133 and 0.186. Credits to Hoffman & Heyl (2012).

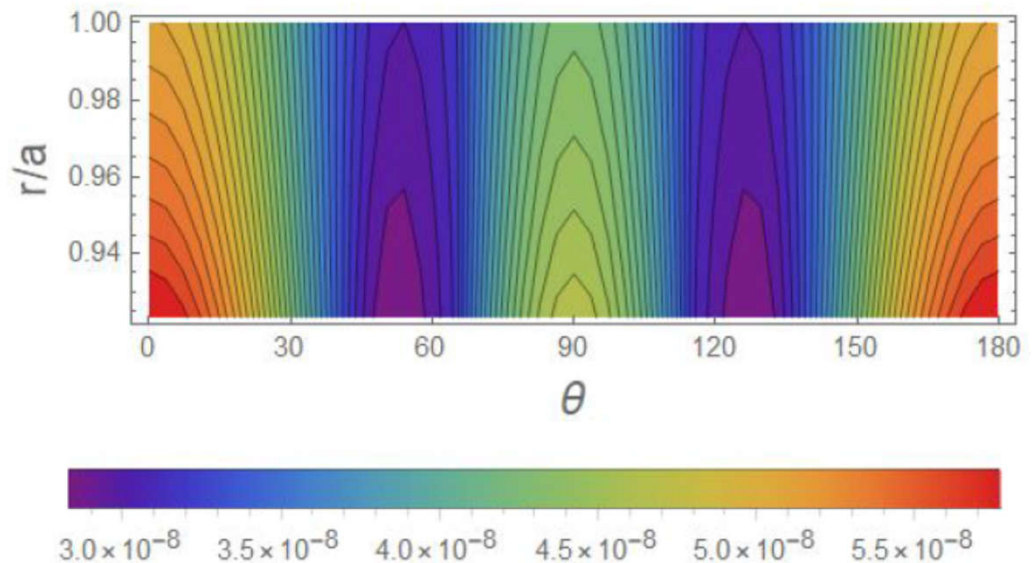


Figure 3.11: Color map of the strain angle  $\alpha$  as a function of the colatitude and of the normalized radius  $r/R$ . The region shown here refers to the crustal layer, from  $r = r$  to  $r = R$  for a  $M = 1.4M_{\odot}$  NS described by the SLy EoS. As can be seen, the maximum strain value is reached at the core-crust boundary.

The speed of the Earth's rotation increased, shortening the day by 1.8 microseconds due to the redistribution of Earth's mass.

# Zagadnienia

1. Jakiego koloru są zachody słońca na Marsie i dlaczego?
2. Wymień dwa główne składniki atmosfery na: Wenus, Marsie, Ziemi, Jowiszu
3. Na czym polega anomalia czerwonej plamy na Jowiszu?
4. Czy na Jowiszu wieją pasaty?
5. Wymień dwa składniki chmur na Jowiszu lub Saturnie.
6. Powierzchnia Plutona jest pokryta oceanem a na nim pływają kry. Z czego?
7. Co to są „glitches” na gwiazdach neutronowych?

# Podsumowanie

Podsumowanie naszej (nie)wiedzy o Fizyce i Chemii Atmosfery jest jedno:

Pracy naukowej nie zabraknie dla nikogo na najbliższe dziesięciolecia: fizyków, astronomów, chemików, geografów, matematyków itd.

A to tylko nasza planeta, nie mówiąc o tysiącach innych już odkrytych...

Dziękuję za uwagę!