



Ziemia pod pierzynką, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym

Grzegorz Karwasz, Krzysztof Służewski

Zakład Dydaktyki Fizyki,

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Wstęp

Na pogodzie – jak na piłce nożnej – wszyscy się znają. Stąd na temat efektu cieplarnianego jest tyle głosów, ilu autorów. Przede wszystkim nie do końca zgadzamy się czy temperatura (średnia?) na Ziemi rośnie, jak szybko, i czy z powodów naturalnych, czy z „winy” człowieka. Ewentualne decyzje, zadanie dla polityków, mają globalne konsekwencje ekonomiczne. Rolą fizyka jest natomiast poszukiwanie prawidłowości, tendencji, ale jeszcze lepiej mechanizmów fizycznych, chemicznych, biologicznych (?) w systemie Ziemia ze swoją atmosferą i biosferą.

Problemom klimatu poświęca się ostatnio sporo uwagi – zajmują się nim organizacje międzynarodowe jak UE, ONZ, panele międzyrządowe (IPCC¹), duże agencje państwowe, wydawane są prestiżowe czasopisma². Prof. Kazimierz Bodek w 2008 roku [1] zwracał uwagę na łamach *Fotonu* na znaczne koszty makroekonomiczne ewentualnych nieprzemyślanych decyzji w kwestiach ochrony klimatu. Redaktor Z. Wiśniewski w „Fizyce w Szkole” w cyklu artykułów przedstawił główne czynniki fizyczne rządzące klimatem na Ziemi [2] i innych planetach [3]. Pisaliśmy o możliwych konsekwencjach zmian klimatycznych bardzo lakonicznie w 1997 roku [4], nieszczęśliwie przed wielką powodzią na Dolnym Śląsku³. W niniejszym artykule omawiamy główne mechanizmy rządzące systemem klimatycznym na Ziemi, a ocenę scenariuszy pozostawiamy Czytelnikowi.

Słoneczna maszynieria

Źródłem ciepła na Ziemi jest Słońce. Co prawda, z rozpadów izotopu ⁴¹K i z szeregów promieniotwórczych ²³⁸U i ²³²Th powstaje w płaszczu (czyli górnej „połowie”) kuli ziemskiej około 20 TW ciepła [5, 6], a ze stygnięcia całego wnętrza globu dociera do powierzchni dodatkowo prawie 30 TW (tera = 10¹²), ale jest to bardzo niewiele w porównaniu z 1,37 kW/m² · π (6370 · 10³ m)² = 171 · 10³ TW dopływającymi bezustannie ze Słońca⁴.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Changes, www.ipcc.ch/

² Nature Climate Change, <http://www.nature.com/nclimate/index.html>

³ Artykuł dostępny na stronie: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/283

⁴ Jako promień Ziemi przyjęliśmy $R = 6370$ km, mimo że Ziemia nie jest kulą.

Tu mamy natychmiast oszacowania dla energii alternatywnych. Przepływ ciepła z wnętrza na powierzchnię Ziemi to zaledwie 65 mW/m^2 (nieco więcej pod oceanami) w porównaniu z podaną już wyżej „stałą słoneczną” około **1366 W/m^2** , czyli energią, jaka w jednostce czasu trafia na 1 m^2 powierzchni ustawionej prostopadle do promieniowania słonecznego, docierającą w okolice Ziemi. Licząc sprawność ogniw fotowoltaicznych jako 10% i niewielkie (około 25%) osłabienie promieniowania słonecznego w atmosferze łatwo oszacować, że do zaspokojenia zapotrzebowania na energię pojedynczego gospodarstwa domowego (3 kW) wystarczy 30 m^2 paneli słonecznych⁵.

W przybliżeniu Ziemi bez atmosfery możemy oszacować, korzystając z modelu ciała doskonale czarnego, jaka powinna być temperatura globu w stanie równowagi termodynamicznej – promieniowania padającego i wysyłanego. Jeżeli założymy, że obiektem promieniującym w Kosmos jest kula (o powierzchni $4\pi R^2$) to strumień energii I wypromieniowanej w jednostce czasu wynosi $I = \frac{1}{4} \cdot 1366 \text{ W/m}^2 = 341 \text{ W/m}^2$ (czynnik $\frac{1}{4}$ bierze się z porównania powierzchni koła πR^2 do powierzchni kuli).

Z prawa Stefana-Boltzmannia $I = \sigma T^4$, gdzie stała $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, otrzymujemy $T = 278 \text{ K}$ (czyli $+5^\circ\text{C}$). Podana wyżej stała słoneczna I jest wynikiem pomiarowym z użyciem satelitów⁶. Podobny wynik na ekwiwalentną temperaturę Ziemi doskonale czarnej można uzyskać również z geometrycznych danych astronomicznych⁷.

Czy stała słoneczna jest rzeczywiście stała? Aktywność Słońca rośnie co 11 lat, kiedy przybywa plam słonecznych⁸, ale zmiany w ilości energii docierającej do Ziemi nie przekraczają $\pm 0,1\%$, zob. rys. 1.

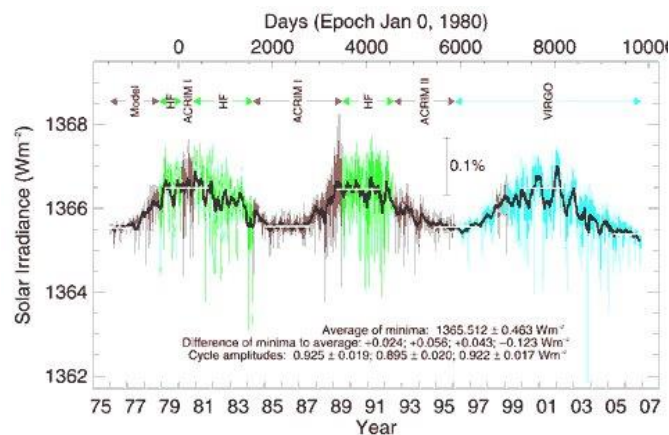
Mimo to brak plam słonecznych przez dłuższy czas, np. zaobserwowany przez Jana Heweliusza, wyraźnie prowadzi do ochłodzenia klimatu. Ochłodzenie to, mniej więcej od czasu Potopu Szwedzkiego do Sejmu Niemego, nosi miano minimum Maundera lub małej epoki lodowcowej, zob. rys. 3.

⁵ Oczywiście zakładamy, że panele dostarczają prądu, kiedy go potrzebujemy. We Włoszech z ogniw fotowoltaicznych uzyskuje się 13% wytwarzanej energii elektrycznej; boom nastąpił w ciągu ostatnich 4 lat. Wiele pól na południu Włoch zamieniono w farmy fotowoltaiczne. Niestety, okres zwrotu kosztów tych inwestycji (bez dotacji) to nadal 20–30 lat.

⁶ Zob. np. artykuł *Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present*, <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>

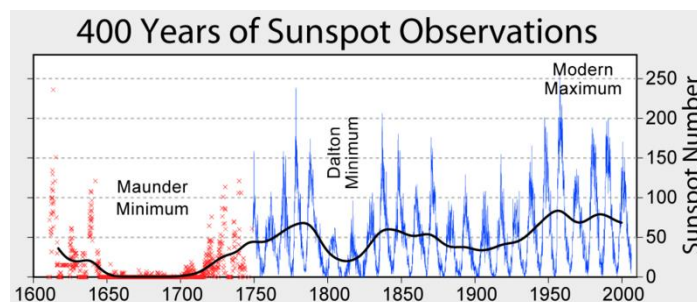
⁷ Jeżeli znamy temperaturę powierzchni Słońca (5780 K), to temperaturę Ziemi można obliczyć bez stałej Stefana-Boltzmana, korzystając jedynie z danych astronomicznych (promień Ziemi, średnica Słońca 1,4 mln km i odległość Ziemia – Słońce 150 mln km), zob. *Zadania czeskie*, ZDF UMK, „Temperatura Ziemi”, <http://physicstasks.eu/uloha.php?uloha=1091&filtr=00000000>

⁸ Plamy słoneczne to w uproszczeniu gigantyczne wiry pola magnetycznego docierające na powierzchnię Słońca. Wzrostowi ilości plam odpowiada wzrost „zerwanych” wirów, czyli słonecznych erupcji, wyrzucających w Kosmos zwiększone ilości ultra-gorącej plazmy. Nie ma dotychczas przekonującego modelu magneto-hydro-termo-dynamiki Słońca wyjaśniającego obserwowane cykle 11-letnie.



Rys. 1. Zmiany „stałej” słonecznej – pomiary za pomocą satelitów. Krzywa powstała ze złożenia wielu eksperymentów, są one wyróżnione na wykresie różnymi kolorami⁵. Obecne maksimum narasta wolniej niż należałoby się tego spodziewać; może to być, hipotetycznie, powodem ostrych zim

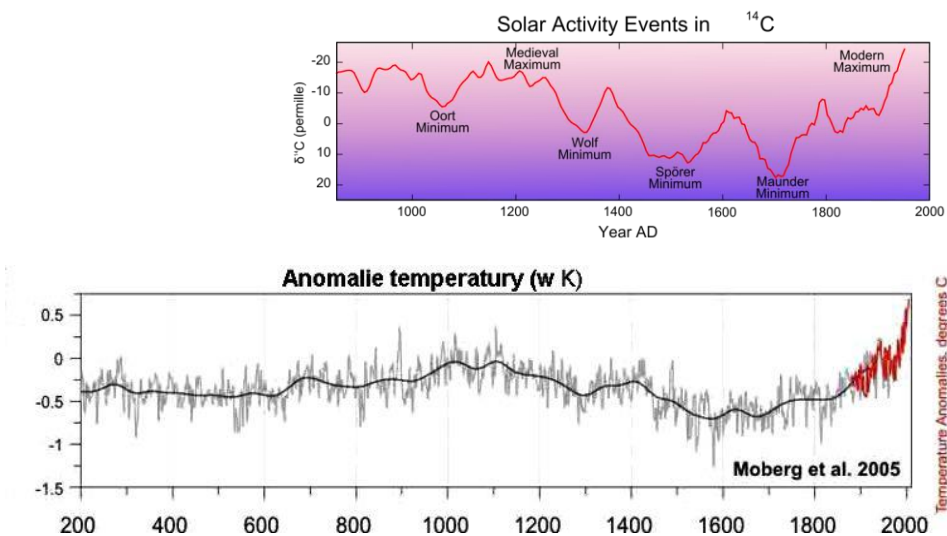
Fot. 2. Przejście Wenus na tle tarczy słonecznej godz. 6:25, 6/6/2012, Monte Bondone, szer. geogr. 46°N, foto Christian Lavarian (Museo Tridentino delle Scienze Naturali). Wenus to plamka w górnym prawym rogu, pozostałe ciemne punkty to plamy słoneczne



Rys. 3. Liczba plam na powierzchni Słońca od czasów Galileusza⁹. Na podstawie analizy zawartości węgla ^{14}C w słojach drzew możemy ocenić aktywność Słońca również w okresach dawniejszych¹⁰. Wydaje się, że aktywność słoneczna była niższa niż zwykle również pod koniec średniowiecza (minimum Wolfa, około roku 1300 n.e.). Nie do końca jednak minima temperatury (uśrednione w okresach kilkuletnich) odpowiadają minimom aktywności słonecznej (por. rys. 4)

⁹ Zob. <http://calgary.rasc.ca/sunspots.htm>

¹⁰ Niestabilny izotop ^{14}C powstaje w atmosferze w reakcji pochłonięcia neutronu przez izotop ^{14}N , a produkowany jest proton, według schematu ${}^1_0n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$. Neutrony w atmosferze pochodzą z tzw. promieniowania kosmicznego, a to głównie z wiatru słonecznego



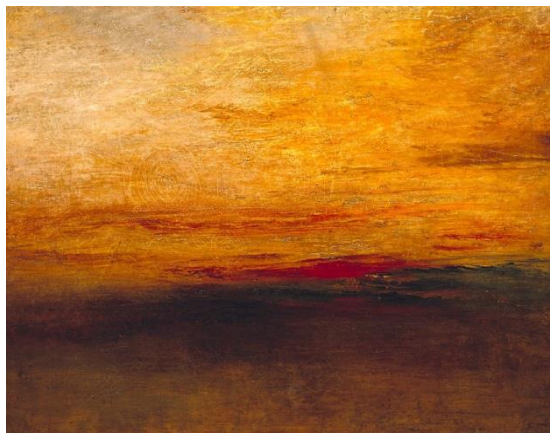
Rys. 4. Rekonstrukcja zmian temperatury (jako odchylenie w °C od średniej z lat 1960–1990) na półkuli północnej w ciągu ostatnich dwóch tysiącleci [7] (dolny panel) w porównaniu z aktywnością słoneczną (na podstawie paleontologicznych zmian zawartości ^{14}C (w częściach na tysiąc, górny panel). Wyraźne ocieplenie klimatu miało miejsce między rokiem 900 a 1200 n.e. (w tym czasie miało miejsce zasiedlenie Grenlandii przez Wikingów), a minimum, aż o $-0,7^\circ\text{C}$ od średniej, około roku 1600 n.e. W tym ostatnim okresie nasiliły się wojny religijne i dynastyczne w Europie – tzw. wojna trzydziestoletnia¹¹, a w Holandii jeżdżono na łyżwach

Dane temperatury przedstawione na rys. 4b linią pogrubioną¹² są danymi uśrednionymi dla okresów kilkuletnich (dokładniejszy opis w [7]). Dane temperaturowe dla poszczególnych lat różnią się dość znacznie od średnich. Bardzo zimnym rokiem był 1580, a także 1816. Ten ostatni, z którego mamy sporo zapisów historycznych (i ekonomicznych), Wikipedia nazywa „rokiem bez lata”¹³. Przyczyną tej *aberracji* klimatycznej był wybuch wulkanu Tambora w Indonezji, który wprowadził do stratosfery (gdzie układ temperatury jest odwrotny niż w troposferze) ogromne ilości pyłu wulkanicznego, przysłaniającego Słońce. Obrazy impresjonistów z okresów po wybuchach wulkanów przedstawiają zachody Słońca przesłonięte krwisto-żółtym welonem [8]. Również chłodny rok 1580, zob. rys. 4b, możemy przypisać wybuchowi wulkanu (Billy Mitchell na Pacyfiku [9]).

¹¹ W wyniku wojny i panującej w jej czasie zarazy, liczba ludności Czech zmniejszyła się z około 4 milionów na początku XVII w., do około 700 tysięcy w połowie stulecia, http://pl.wikipedia.org/wiki/Wojna_trzydziestoletnia

¹² National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/images/moberg-2005-large.jpg>

¹³ Rok bez lata, http://pl.wikipedia.org/wiki/Rok_bez_lata



Fot. 5. Obraz „Zachód Słońca” Wiliama Turnera¹⁴ z około 1828 roku. Duża ilość żółtego koloru wskazuje na obecność pyłów wulkanicznych w stratosferze [9]

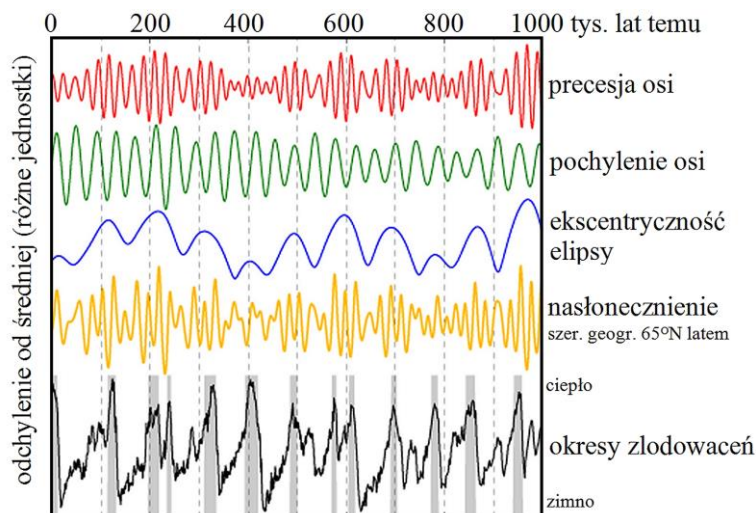
Nie tylko zmiany aktywności Słońca mają wpływ na klimat. Wiemy, choćby z obserwacji morenowego krajobrazu północnej Polski, że co mniej więcej sto tysięcy lat zdarzają się wielkie zlodowacenia, zob. np. [10]. Podobnie długie są tzw. cykle Milankoviča. Wydaje się, że za cykle rzędu dziesiątek i setek tysięcy lat jest odpowiedzialna „maszyna” Układu Słonecznego.

Wiadomo od czasów Keplera, że planety krążą dookoła Słońca po elipsach (a podejrzania o orbity niekołowe znajdujemy też w dziele Kopernika). Słońce znajduje się w ognisku elipsy, a raczej wspólnym ognisku elips dla różnych planet. Elipsy te mogą być spłaszczone mniej (jak w przypadku Ziemi, z mimośrodem $e = 0,0167$) lub bardziej (jak w przypadku Marsa, $e = 0,0935$). Ba! geometria orbity określonej planety, np. Ziemi, ulega okresowym zmianom – spłaszczenia i nachylenia płaszczyzny orbity (czyli ziemskiej ekliptyki) do średniej płaszczyzny orbit innych planet. Pod wpływem Jowisza i Saturna oś orbity Ziemi ulega też powolnej rotacji. Z kolei oś *obrotu* Ziemi, wirującego w przestrzeni bąka, podlega *precesji* z okresem około 25 tys. lat (ten ruch znał już Kopernik); co więcej, waha się też pochylenie tej osi w stosunku do ekliptyki (od $22,1^\circ$ do $24,5^\circ$). Zsumowanie tych ruchów jest trudne, jak to omawia angielska wersja Wikipedii¹⁵. Efektem są niewielkie zmiany nasłonecznienia, ale powodujące, zdaje się, zmiany temperatury od $+2^\circ\text{C}$ do -8°C , zob. rys. 6. I wreszcie, najdłuższe z postulowanych okresowości, ok. 140 mln lat, wynikać mogą z obiegu całego Układu Słonecznego dookoła centrum Galaktyki¹⁶.

¹⁴ Tate Gallery, <http://www.tate.org.uk/art/artworks/turner-sunset-n01876>

¹⁵ Wikipedia, *Milankovitch Cycles*, http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles

¹⁶ Zauważmy jednak, że podobnego rzędu (200 mln lat) są również okresy zbijania się i rozbiegania płyt kontynentalnych Ziemi, też niezwykle istotnie wpływające na klimat m.in. poprzez aktywność wulkaniczną.



Rys. 6. Cykle astronomiczne Milankoviča

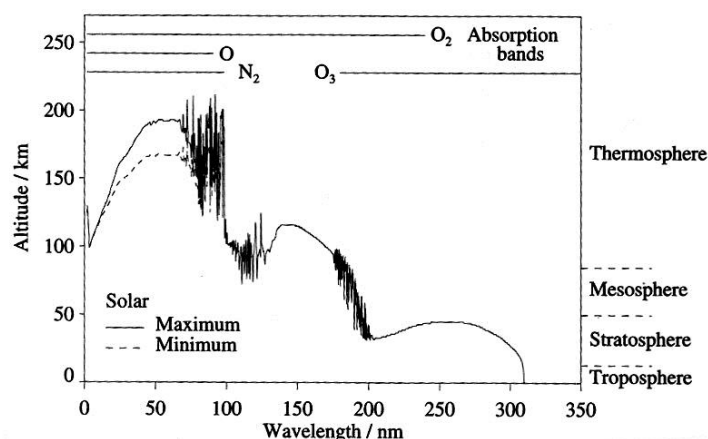
Atmosfera – ciepła pierzynka

Dokonane wcześniej przez nas obliczenie temperatury zakładało, że Ziemia jest doskonale czarna, tzn. pochłania całe padające promieniowanie. Gdyby tak było, np. dla Księżyca, to byłoby on niewidoczny: tak nie jest! Pewna część promieniowania jest odbijana w Kosmos – mówimy o współczynniku *albedo*, czyli zdolności odbijania promieniowania. Wynosi on 0,9 dla śniegu, 0,4 dla piasku pustyni, 0,15 dla świerkowego lasu, 0,1 dla oceanu, a średnio dla Ziemi 0,3. Uwzględnienie tego albedo we wcześniejszym obliczeniu daje temperaturę 254°K, czyli –18°C. Tyle wynosiłaby temperatura na Ziemi, gdyby nie miała ona pierzynki z atmosfery.

Aby zrozumieć, jak na klimat działa atmosfera, musimy przypomnieć sobie jej skład: 78% N₂, 21% O₂, 0,9% Ar. Dziwnym trafem wszystkie są bezbarwne, nawet jako ciecze, jak to zauważyli krakowscy uczeni, Zygmunt Wróblewski i Karol Olszewski na początku XX wieku. Dokładniej rzecz biorąc, i azot i tlen są przezroczyste w świetle widzialnym, ale nieprzezroczyste w nadfiolecie. Tu działa fizyka kwantowa – najniższe elektronowe poziomy wzbudzone tak cząsteczki, jak i atomu azotu lub tlenu, wymagają do wzbudzenia kwantu o energii powyżej 4–5 eV, czyli światła nadfioletowego¹⁷. Widma absorpcji tlenu (O, O₂, O₃) pokazuje rys. 7 – są one bardzo złożone. Daleki nadfiolet, 50–100 nm, jest

¹⁷ Dokładniej, dwa najniższe poziomy wzbudzone cząsteczki tlenu to poziomy „leżące” w bliskiej podczerwieni. Najniższy stan, $a^1\Delta_g$ ma energię wzbudzenia 0,98 eV, a stan $b^1\Sigma_g^+$ – energię 1,63 eV. Są to jednak stany „optycznie wzbronione”, tzn. takie, które nie mogą zostać wzbudzone przez promieniowanie elektromagnetyczne, ale np. przez zderzenia z elektronami, zob. [11], s. 117. Niskoenergetyczne stany „rezonansowe” są istotne np. dla zorzy polarnej, zob. [12].

absorbowany przez tlen atomowy, w najwyższej warstwie atmosfery – termosferze, na wysokości 50–100 km. Kolejny przedział nadfioletu, 100–200 nm, jest „wycinany” z widma słonecznego w mezosferze przez tlen cząsteczkowy. Okno nadfioletu jest domykane w stratosferze przez ozon¹⁸, absorbujący w zakresie 200–300 nm. Dzięki obecności tlenu w atmosferze Ziemia jako jedyna planeta widziana z Kosmosu jest niebieska.



Rys. 7. Widmo absorpcji w nadfiolecie tlenu i azotu w formie atomowej i cząsteczkowej (cytowane za F. Bagenal, *Spectroscopy of atmospheres*, materiały do wykładów, University Colorado) z orientacyjną skalą przekroju czynnego na fotoabsorbpcję dodaną z prawej strony (skala z lewej strony jest jedynie ilustracją stratyfikacji atmosfery)¹⁹

Jednocześnie ani azot N_2 , ani tlen O_2 nie absorbują w podczerwieni²⁰. Znakomicie w podczerwieni absorbuje natomiast cząsteczka H_2O . Jest ona zgięta i posiada dość duży dipolowy moment elektryczny²¹. Możliwe są więc i drgania i obroty wzbudzone przez promieniowanie elektromagnetyczne. Różne momenty bezwładności względem dwóch różnych możliwych osi obrotu i różnorodność drgań (zginające, rozciągające symetryczne i rozciągające niesymetryczne)

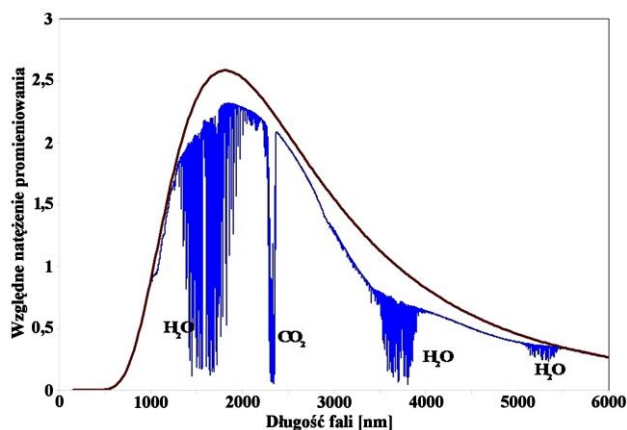
¹⁸ Ozon powstaje jedynie w stratosferze, w odpowiednich warunkach ciśnienia i temperatury i w obecności promieniowania nadfioletowego. Ozonu w atmosferze jest bardzo mało – pod ciśnieniem na poziomie morza zajmowałby warstwę o grubości zaledwie 3 mm. Jego komplementarna rola w stosunku do O i O_2 w absorpcji promieniowania UV jest niezwykle ważna dla stabilności życia na lądzie.

¹⁹ <http://lasp.colorado.edu/~bagenal/3720/CLASS5/5Spectroscopy.html>

²⁰ Powodem przezroczystości N_2 i O_2 w podczerwieni jest symetria tych cząsteczek – nie mają one momentu dipolowego, więc promieniowanie elektromagnetyczne nie może pobudzić cząsteczek ani do drgań (energii wzbudzenia rzędu 0,1 eV), ani do obrotów (energii rzędu 0,01 eV), zob. np. [11].

²¹ Moment ten wyrażony jako iloczyn ładunku elektronu ($e = 1,609 \cdot 10^{-19}$ C) i promienia Bohra ($a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ m) wynosi $0,727 ea_0$ (=1,85 Debye).

powodują, że widmo absorpcji cząsteczki H₂O to prawdziwy „gąszcz” linii, zob. rys. 8.



Rys. 8. Widmo absorpcji w podczerwieni uzyskane (dość przypadkowo) w powietrzu w trakcie kalibracji spektrometru do badań krzemu (courtesy prof. Gino Mariotto). Para wodna skutecznie pochłania promieniowanie podczerwone – trzy grupy linii opowiadają trzem różnym wzbudzeniom drgań cząsteczki, a poszczególne linie w tych pasmach – wzbudzeniom obrotów cząsteczki H₂O. Dwutlenek węgla skutecznie pochłania podczerwień tam, gdzie nie pochłania go para wodna (CO₂ „przymyka okno” w podczerwieni). Dopasowana krzywa Plancka odpowiada temperaturze żarnika spektrometru, około 1600 K

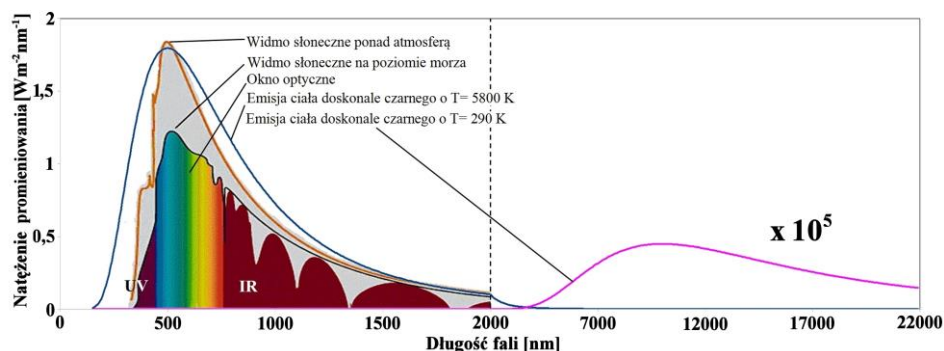
Jesteśmy teraz gotowi do szczegółowej analizy widma światła słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi. Jest on osłabione w stosunku do stałej słonecznej, relatywnie najbardziej w zakresie nadfioletu i „poprzecinane” w zakresie podczerwieni. Maksimum emisji ciała doskonale czarnego o temperaturze 5800 K przypada, zgodnie z prawem przesunięć Wiena, $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$ (λ – długość fali o maksymalnej mocy promieniowania mierzona w metrach, T – temperatura ciała doskonale czarnego mierzona w kelwinach, $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ m·K – stała Wiena), na 500 nm, czyli na światło zielone²². Sumarycznie, na zakres widzialny (380–760 nm) przypada 40% energii, na nadfiolet 10%, a na podczerwień 50%, zob. rys. 9.

Na tym samym wykresie pokazujemy rozkład energii promieniowania ciała doskonale czarnego o temp. 290 K – ma ono maksimum dla około $\lambda = 10 \mu\text{m}$. Fale elektromagnetyczne o długości fali z tego zakresu są silnie pochłaniane i przez parę wodną, i dwutlenek węgla (a również metan, podtlenek azotu²³

²² Pamiętajmy, że chlorofil nie absorbuje światła zielonego, co zabezpiecza rośliny przed przegrzaniem.

²³ Używamy nazw chemicznych nie do końca zgodnych z najnowszą nomenklaturą w Polsce, jak np. di-tlenek węgla, lub tlenek di-azotu (II).

N_2O , dwutlenek azotu itd., zob. widma absorpcji elektronowej w [13]). Światło podczerwone, wysyłane przez kulę Ziemią jest przez te gazy absorbowane. Atmosfera, dzięki prawu przesunięć Wiena, to taka ziemiska pierzynka. Nie „grzeje” jak grzałka, ale izoluje, jak wełenka.



Rys. 9. Zależność od długości fali (λ w nm) mocy promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni docierającego do powierzchni Ziemi. Maksimum emisji ciała doskonale czarnego o $T = 5800$ K odpowiada długości fali $\lambda = 0,5$ μm . Maksimum emisji dla $T = 290$ K odpowiada $\lambda = 10$ μm . Natężenie promieniowania poza atmosferą ma w maksimum wartość ok. $2 \text{ Wm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$. Natężenie promieniowania dla $T = 290$ K zostało pomnożone przez czynnik 10^5 . Uwaga na dwa rodzaje skali OX (powyżej 2000 nm jest ona pomnożona o czynnik 1/10). Widma absorpcji w podczerwieni (bardzo złożone) gazów wieloatomowych znajdzie Czytelnik np. w [2]. Moc promieniowania Słońca w innych zakresach fal jest pomijalnie mała

Nieco księgowości

Możemy teraz pokusić się o bilans energii na Ziemi. Czynnikiem najważniejszym są własności absorpcyjne w podczerwieni gazów wieloatomowych. Istotną rolę odgrywają również chmury, pyły, aerozole, a nawet sadza. Prześledźmy po kolei, jaki jest bilans promieniowania docierającego ze Słońca do Ziemi. Stała słoneczna $1,366 \text{ kW/m}^2$ stanowi w tym bilansie 100%.

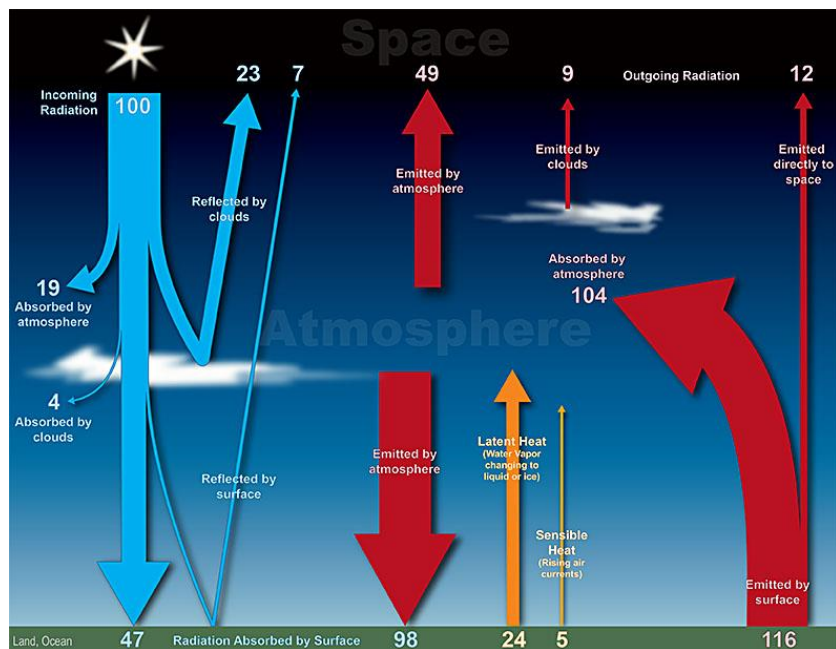
Tylko 47% energii promieniowania słonecznego dociera do powierzchni Ziemi. Pozostała część, czyli trochę więcej niż połowa początkowego bilansu, zostaje „przechwycona” przez atmosferę. Około połowa z tej części z kolei, czyli około 23% (= 19% + 4%) bilansu początkowego zostaje *zaabsorbowane* przez atmosferę i chmury. Na absorpcję tę składa się między innymi przechwytywanie nadfioletu w najwyższych warstwach atmosfery (termosferze, w obszarze między około 100 a 500 km nad Ziemią²⁴, gdzie tlen i azot występują w formie atomowej oraz w stratosferze, warstwie z ozonem, około 12–50 km).

²⁴ W dolnej granicy termosfery, w okolicach polarnych, występują zorze; górna granica termosfery, określona przez umowne temperatury i gęstości swobodnych elektronów, zależy silnie od aktywności Słońca, zob. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Nomenclature_of_Thermosphere.jpg

23% energii ze Słońca zostaje odbite przez chmury, co dodane do 7% odbitych przez powierzchnię daje wspomniane wcześniej średnie albedo 0,3 dla Ziemi jako planety.

We wcześniejszym obliczeniu temperatury Ziemi jako ciała doskonale czarnego istotną była powierzchnia absorbująca πR^2 i powierzchnia promieniująca w Kosmos $4\pi R^2$. W przypadku energii *zaabsorbowanej* przez atmosferę, połowa trafia do Ziemi, a połowa w Kosmos (przysłowiowe *fifty-fifty*). $\frac{1}{2}$ z 23% daje więc kolejne 11% docierające do Ziemi, teraz już jako promieniowanie podczerwone.

I tu zaczyna się cieplarniany ping-pong. Z nieco ponad połowy (47% + 11%) energii Słońca, która dotarła do Ziemi i zgodnie z zasadą równowagi termodynamicznej zostaje odesłana w Kosmos, prawie całość jest ponownie wylapywana przez atmosferę. Strumienie energii z powierzchni Ziemi do atmosfery są dwa – część jest wypromieniowana jako podczerwień, a część przenoszona przez konwekcję – 5% i procesy parowania/kondensacji pary wodnej – 25% (pomarańczowe strzałki na rys. 10).



Rys. 10. Bilans energii na Ziemi. Do powierzchni Ziemi, dzięki wielokrotnym „odbiciom” między powierzchnią a atmosferą dociera o 50% więcej energii niż by to było bez atmosfery (dwie grube strzałki w dół). Uwzględnienie strat daje emisję w podczerwieni z powierzchni Ziemi jako 116% energii docierającej pierwotnie. To ta wielkość, poprzez prawo Wiena, determinuje średnią temperaturę w Krakowie (i Toruniu). Źródło: NOAA²⁵

²⁵ NOAA, http://www.srh.noaa.gov/jetstream/atmos/energy_balance.htm

Z tych wspomnianych $47\% + 11\% = 58\%$ znów połowa trafia na Ziemię, z tej połowy – znów połowa. Obrazowo, suma takiego szeregu geometrycznego to 116% . Obliczenia są dużo bardziej skomplikowane, zob. tabele, ale wynik jest istotny: strumień energii wypromieniowywanej w jednostce czasu z powierzchni *ziemi* (nie Ziemi!) wynosi 116% energii docierającej do Ziemi, czyli $1,16 \cdot 1360 \text{ W/m}^2 = 1578 \text{ W/m}^2$. To ta wielkość określa temperaturę powierzchni naszego Globu. Korzystając ponownie z prawa Stefana-Boltzmann'a otrzymujemy ekwiwalentną temperaturę ciała doskonale czarnego $288 \text{ K} = +15^\circ\text{C}$.

Analiza strumieni energii przepływających między atmosferą a powierzchnią Ziemi daje sumę aż o 50% większą niż pierwotna wartość energii ze Słońca. Jak w ping-pongu – piłeczka jedna, a u dobrych graczy wydaje się, że jest tych piłeczek więcej. Nieco podobnie jak w laserze, który dzięki dwóm zwierciadłom na końcach wielokrotnie wykorzystuje ten sam foton do stymulowania emisji z ośrodka laserowego. Podkreślamy jeszcze raz, że dokładny bilans przepływów energii między powierzchnią ziemi a atmosferą jest niezwykle złożony. Naukowcy konstruują coraz bardziej zaawansowane komputerowe modele „Global Climate Circulation”, zob. np. [14]. Są one bazą do przewidywania możliwych globalnych zmian klimatycznych.

Tabela 1. Bilans energii na Ziemi; 100% odpowiada stałej słonecznej, 1366 W/m^2

Dociera do powierzchni Ziemi	%	
	$47\% + 7\%$	światła bezpośrednio ze Słońca
	98%	promieniowania podczerwonego z atmosfery
Suma	152%	

Powierzchnia Ziemi oddaje	%	
	7%	odbija światło bezpośrednio
	5%	ciepło poprzez konwekcję powietrza
	24%	ciepło poprzez parowanie wody
	116%	ciepło poprzez promieniowanie podczerwone
Suma	152%	

Atmosfera otrzymuje	%	
	4%	absorpcja światła słonecznego przez chmury
	19%	absorpcja słońca przez atmosferę (m.in. ozon)
	24%	przez skraplanie wody z Ziemi w chmurach
	5%	poprzez konwekcję z powierzchni Ziemi
	104%	promieniowanie podczerwone emitowane z Ziemi
Suma	156%	

Atmosfera oddaje	%	
	9%	emisja w podczerwieni z chmur w Kosmos
	49%	emisja w podczerwieni z atmosfery w Kosmos
	98%	emisja w podczerwieni w kierunku Ziemi
Suma	156%	

Z Kosmosu dociera	%
Suma	100%

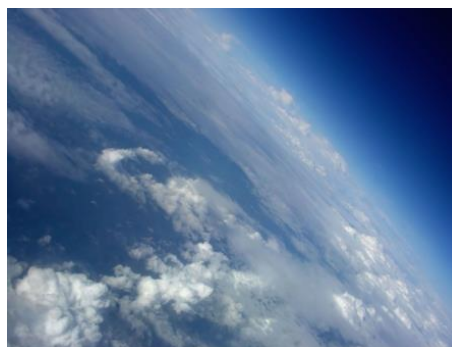
W Kosmos powraca	%	
	23%	odbite światło Słońca przez chmury
	7%	odbite światło Słońca przez Ziemię
	49%	emisja podczerwona z atmosfery
	9%	emisja podczerwona z chmur
	12%	emisja podczerwona z powierzchni Ziemi
Suma	100%	

W powyższych tabelach jak w prawdziwej księgowości, bilans jest skomplikowany, ale się „zgadza”! Nie ma nadwyżki (Ziemia się nie grzeje), ale nie ma też *manka*. Obrazowo można natomiast powiedzieć, że atmosfera jest jak pierzynka – nie grzeje tak jak grzałka, ale zapobiega ucieczce ciepła.

W całościowym bilansie atmosfera podnosi efektywną (średnią) temperaturę na Ziemi, z -18°C dla piaskowej kuli bez atmosfery (jak to ma miejsce na Marsie) do $+15^{\circ}\text{C}$. Te dodatkowe $+33^{\circ}\text{K}$ to *naturalny efekt cieplarniany*. Na Marsie, gdzie atmosfera jest rzadka i zawiera, co prawda, nieco CO_2 , ale praktycznie nie zawiera H_2O , naturalny efekt cieplarniany wynosi $+3\text{K}$, a średnia temperatura jakiejś -55°C (Mars jest od Słońca w odległości 1,5 jedn. astronomicznej). Na Wenus, gdzie w atmosferze oprócz H_2O jest również polarna cząsteczka SO_2 , efekt cieplarniany wynosi aż 390K [14].

Te dodatkowe $+33\text{K}$ to „zbieg okoliczności” szczęśliwy dla życia na Ziemi – zamiast średnio syberyjskiej zimy mamy (średnio) majowe popołudnie! Powodem są, przypominamy, układy poziomów wibracyjnych i rotacyjnych H_2O i CO_2 (która w stanie wibracyjnym 010 jest również polarna). Oczywiście, te $+33\text{K}$ zależą silnie od stężenia pary wodnej i CO_2 w atmosferze.

Dokładna temperatura zależy od wielu czynników; w przypadku Europy jest to np. ciepły prąd morski z rejonu Morza Sargassowego. Jakie inne czynniki decydują o temperaturze na Ziemi, jak szczegółowo zmieniała się ta temperatura przez ostatnie pół miliona lat, czy ma to ma związek z koncentracją CO_2 i czy człowiek ma wpływ na klimat, będziemy dyskutować w drugiej, jesiennej części artykułu.



Atmosfera to taka ciepła pierzynka dla Ziemi: wpuszcza światło a nie wypuszcza ciepła.

Literatura

- [1] K. Bodek, O Czarnobylu, wiatrakach i ociepleniu klimatu – bez emocji..., Foton 103/2008, 4–15
- [2] Z. Wiśniewski, *O fizyce atmosfery i zmianach klimatu cz.2*, Fizyka w Szkole, 4/2010, 10–14
- [3] Z. Wiśniewski, *O fizyce atmosfery i zmianach klimatu cz.1*, Fizyka w Szkole, 3/2010, 26–32
- [4] G. Karwasz, *Czy grozi nam potop*, Świat Nauki, nr 8, Sierpień 1997, 106–107; http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/wyklady/efekt_cieplarniany/GK_SN_1997.pdf
- [5] G. Karwasz, *Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi*, Geografia w Szkole, 3/2012, 28–33; http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/288
- [6] A. Witze, *Detectors zero in on Earth's heat*, Nature 496, 17 (04 April 2013); <http://www.nature.com/news/detectors-zero-in-on-earth-s-heat-1.12707>
- [7] A. Moberg, *2,000-Year Northern Hemisphere Temperature Reconstruction*, World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, CO and NOAA Paleoclimatology Program (2005); ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/moberg2005/nhtemp-moberg2005.txt http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Carbon14_with_activity_labels.svg
- [8] C.S. Zederos i in. Atmospheric effects of volcanic eruptions as seen by famous artists and depicted in their paintings, Atmos. Chem. Phys. 7 (2007) 4017; <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/63/03/PDF/acp-7-4027-2007.pdf>
- [9] K.R. Briffa i in. *Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years*, Nature 393 (1998) 450; http://tomix.homelinux.org/~thomas/eth/7_semester/largescale_climate_variability_WS_2006_2007/unterlagen/edit/briffa_1600_volcanic.pdf
- [10] L. Lindner, *Nowe spojrzenie na liczbę, wiek i zasięgi zlodowaceń środkowopolskich w południowej części środkowowschodniej Polski*, Przegląd Geologiczny, vol. 53, nr 2, 2005; http://www.pgi.gov.pl/images/stories/przeglad/pdf/pg_2005_02_11.pdf
- [11] A. Zecca, G.P. Karwasz, R.S. Brusa, *One century of experiments on electron – atom and molecule scattering. A critical review of integral cross sections*. I. Atoms and diatomic molecules, Riv. N. Cim. 19 No.5 (1996), 1–146; <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/ncr1.pdf>
L. Josić, T. Wróblewski, Z. Lj. Petrović, J. Mechlińska-Drewko and G.P. Karwasz, *Influence of resonant scattering on electron-swarm parameters in NO*, Chem. Phys. Lett. 350 (2001) 318; http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/publikacje/2001_Influence.pdf; zob. też dyskusję w http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/218
- [12] A. Zecca, G.P. Karwasz, R.S. Brusa and T. Wróblewski, *Low-energy electron collisions in nitrogen oxides: a comparative study*, Int. J. Mass Spectr. 223–224 (2003) 205; http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/publikacje/2003_Low-energy_electron_collisions_in_nitrogen.pdf
- [13] C. Impey, Venus and the Greenhouse Effect, Teach Astronomy; <http://m.teachastronomy.com/astropedia/article/Venus-and-the-Greenhouse-Effect>

Strony www zostały sprawdzone 2–21.04.2013.