

# ZIEMIA

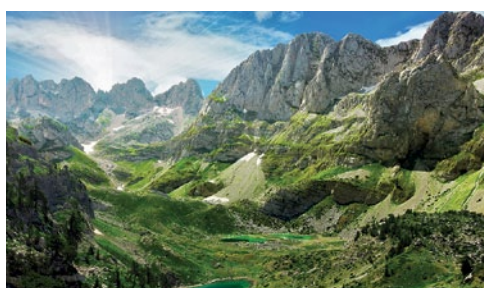


**KOMPENDIUM WIEDZY O PLANECIE**





# ZIEMIA



**KOMPENDIUM WIEDZY O PLANECIE**

**Autorzy:**

Piotr Czubla (68–73, 108–173)

Monika Fijołek (214–283)

Sławomir Kobołek (24–33, 52–67, 74–107, 206–213)

Andrzej Nowak (350–443)

Zbigniew Rdzany (6–23, 34–51, 174–205)

Marcin Turczyn (350–443)

Kamila Twardowska i Jacek Twardowski (284–347)

**Redakcja:** Monika Wróbel

**Korekta:** Justyna Tomas

**Opracowanie graficzne:** Jacek Bronowski

**Projekt okładki:** Dirty South Design

**Zdjęcia na okładce:**

ISBN 978-83-8059-351-0

Shutterstock.com – front (od góry, od lewej): © Gabriele Maltinti, © Lenar Musin, © beboy,

© ERainbow, © MU YEE TING; tył: © Andrew Mayovskyy (2 zdjęcia)

ISBN 978-83-8059-455-5

Dreamstime.com – front (od góry): © Lawrence W Stolte, © Thaiview, © AvDe, © Fallsview; grzbiet (od góry):

© Dimaberkut, © Helena Bilková; tył (od góry): © Tomas1111, © Marzena, Michał i Jacek Bronowscy / foto-baza.pl

Wydanie I

© Copyright for the text, cover and layout by Wydawnictwo SBM Sp. z o.o.

Warszawa 2017



Wydawnictwo SBM Sp. z o.o.

ul. Sułkowskiego 2/2

01-602 Warszawa

[www.WYDAWNICTWO-SBM.pl](http://www.WYDAWNICTWO-SBM.pl)

ISBN 978-83-8059-492-0





|                                                   |            |
|---------------------------------------------------|------------|
| <b>Wstęp .....</b>                                | <b>4</b>   |
| <b>WSZECHŚWIAT I CIAŁA NIEBIESKIE .....</b>       | <b>6</b>   |
| <b>ATMOSFERA.....</b>                             | <b>24</b>  |
| <b>POGODA I KLIMAT .....</b>                      | <b>34</b>  |
| <b>WODA NA ZIEMI.....</b>                         | <b>52</b>  |
| <b>OCEANY I MORZA .....</b>                       | <b>54</b>  |
| <b>LODOWCE NA ZIEMI .....</b>                     | <b>68</b>  |
| <b>RZĘKI, STRUMIENIE, POTOKI .....</b>            | <b>74</b>  |
| <b>WODOSPADY I KATARAKTY .....</b>                | <b>82</b>  |
| <b>JEZIORA .....</b>                              | <b>90</b>  |
| <b>TERENY PODMOKŁE.....</b>                       | <b>96</b>  |
| <b>WODY PODZIEMNE .....</b>                       | <b>98</b>  |
| <b>BUDOWA I DYNAMIKA WNĘTRZA ZIEMI .....</b>      | <b>108</b> |
| <b>TRZĘSIENIA ZIEMI .....</b>                     | <b>118</b> |
| <b>PLUTONIZM I WULKANIZM .....</b>                | <b>126</b> |
| <b>MATERIA SKORUPY ZIEMSKIEJ .....</b>            | <b>140</b> |
| <b>GÓRY .....</b>                                 | <b>148</b> |
| <b>GDY POJAWIŁO SIĘ ŻYCIE NA ZIEMI .....</b>      | <b>164</b> |
| <b>CO KRUSZY GÓRY – WIETRZENIE I EROZJA .....</b> | <b>174</b> |
| <b>GORĄCE PUSTYNIE.....</b>                       | <b>196</b> |
| <b>OBSZARY POLARNE .....</b>                      | <b>202</b> |
| <b>PODZIEMNY ŚWIAT – JASKINIE .....</b>           | <b>206</b> |
| <b>ŚWIAT ROŚLIN I GRZYBÓW .....</b>               | <b>214</b> |
| <b>ŚWIAT ZWIERZĄT .....</b>                       | <b>284</b> |
| <b>MAPA POLITYCZNA ŚWIATA .....</b>               | <b>348</b> |
| <b>PAŃSTWA ŚWIATA .....</b>                       | <b>350</b> |
| <b>Indeks .....</b>                               | <b>444</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                         | <b>447</b> |





# WSTĘP

Poetyckie określenie Carla Sagana nazywa Ziemię „niebieską kropką”. Bo rzeczywiście z kosmicznej perspektywy Ziemia wygląda właśnie jak malutki, niepozorny błękitny punkt, który dźwiga wszystkie nasze doczesne sprawy i problemy. Czy ktoś obserwujący nas z odległej, hipotetycznie zamieszkałej planety mógłby pomyśleć, że na tym niewielkim skalistym globie od milionów lat toczy się życie, raz spokojne i niczym niezakłócone, innym razem gwałtownie przerywane w wyniku lokalnego lub globalnego kataklizmu? Zapewne mógłby stwierdzić, że Ziemia znajduje się w ekosferze swojej gwiazdy centralnej, błękitny kolor świadczy o istnieniu wody w stanie ciekłym, a wędrujące połacie chmur są świadectwem aktywnych procesów atmosferycznych. Proste badanie spektralne wyjaśniłoby mu skład gazowej otuliny planety, który sprzyja procesom biologicznym (o ile obserwator oddycha tlenem). Dodatkowo pojawiające się w dobowym cyklu światła

mogłyby naprowadzić kosmitów na ślad rozwiniętej cywilizacji, w której w wielkich aglomeracjach uliczne latarnie, reflektory, neony i reklamy nawet z nocy czynią biały dzień. Czy w istocie jesteśmy wnikliwie obserwowani? Tego nie wiemy, ale jeżeli my sami zaglądamy coraz głębiej w otchłań Wszechświata, odkrywamy kolejne planety pozasłoneczne, a w przyszłości będziemy potrafili badać je szczegółowo niczym kosmiczni detektywi, to nie ulega wątpliwości, że podobna naszej ciekawska cywilizacja robi to samo.

Planeta Ziemia powstała około 5 mld lat temu z ogromnego obłoku materii, z której uformowały się Słońce i krążące wokół niego planety, planetoidy, komety oraz gaz i pył międzyplanetarny. Był to bardzo długi proces i wymagał, aby wcześniej jakaś gwiazda, a może kilka gwiazd zakończyło swój żywot w ogromnej eksplozji supernowych. Skąd o tym wiemy? Ciężkie pierwiastki, z których są zbudowane nasze ciała,

wszelka materia ożywiona i nieożywiona nie powstają same z siebie. Ich źródłem są wysokotemperaturowe i wysokociśnieniowe procesy termonuklearne zachodzące w jądrach gwiazd. Nie istnieją inne naturalne procesy, które mogłyby prowadzić do powstania węgla, tlenu, żelaza, złota i wielu innych pierwiastków śladowych niezbędnych do funkcjonowania organizmu. Nasze ciała są zatem zbudowane z gwiazdnej materii. Ogromny obłok gazu i pyłu wykazywał lokalne zagęszczenia będące doskonałą pożywką dla siły grawitacji, która jak tocząca się kula śniegu skupiała materię coraz intensywniej. Objętość układu zaczęła się zmniejszać, a zarazem rosła temperatura. Całość zaczęła wykazywać coraz bardziej regularną strukturę z wielkim zagęszczeniem centralnym, które było zalążkiem Słońca, oraz licznymi lokalnymi zagęszczeniami, które w późniejszym czasie przekształciły się w planety. Gdy gęstość gazu i temperatura centralnego zagęszczenia wzrosły



na tyle, aby zapoczątkować reakcje termonuklearne, narodziło się Słońce. Oczywiście nawet po uformowaniu się gwiazdy i planet młody system planetarny był bardzo dynamiczny i niekoniecznie przyjazny. Liczne kolizje, zderzenia, ustawiczne bombardowanie młodych obiektów przez meteoryty i komety, wszystko to kształtowało jego ówczesne oblicze. Ostatecznie gdzieś na krańcach (Droga Mleczna w jej ramieniu spiralnym zwanym Ramieniem Strzelca) powstał Układ Słoneczny.

Oblicze naszej Ziemi również ewoluowało. Aby dokładnie poznać jej przeszłość, należałoby przestudiować opracowania z zakresu geologii historycznej i paleontologii. Ta lektura uświadomiłaby nam, że w ciągu wieków zmieniał i wciąż się zmienia układ lądów oraz oceanów, motorem napędowym są procesy tektoniczne i wulkanizm. Góry w jednych miejscach powoli, lecz systematycznie wypiętrzają się, w innych z kolei ogromne masywy skalne poddają się zjawiskom erozji, która nieubłaganie przekształca je w drobny piasek i pył. Również życie równoległe do zmian środowiskowych musiało się przystosowywać do nowych warunków i co najwspanialsze, zawsze to mu się udawało. Nawet największe katastrofy, nieważne, czy związane z aktywnością wewnętrzną planety, czy

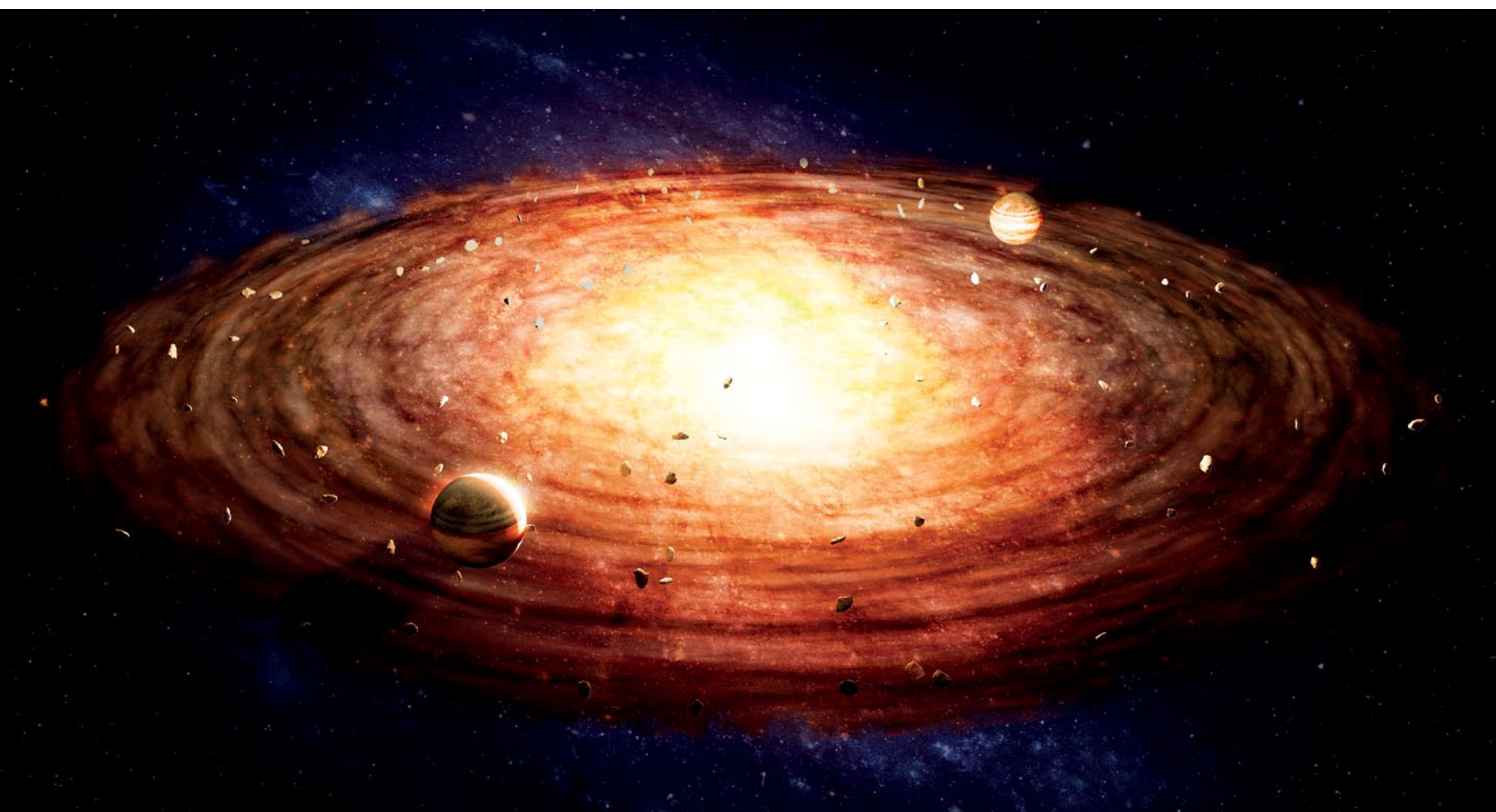


▲ Artystyczna wizja katastrofy, która prawdopodobnie doprowadziła do wyginięcia dinozaurów

też z kosmicznymi kolizjami podobnymi do tej, która być może 65 mln lat temu zmiotła z powierzchni Ziemi dinozaury, nie potrafiły zniszczyć biologicznego żywiołu, którego kulminacją było pojawienie się człowieka. To on, wyposażony w inteligencję i zdolność kreatywnego oraz abstrakcyjnego my-

ślenia, jako pierwszy skierował oczy ku gwiazdom i postawił pytanie o swoje miejsce w tej skomplikowanej kosmicznej układance. Czytając te słowa, także my ulegamy odwiecznej i przyrodzonej nam ciekawości świata, która dla dociekliwych jest sensem pasjonującej wędrówki przez życie.

▼ Artystyczna wizja dysku protoplanetarnego, czyli obłoku gazu i pyłu, z których formują się gwiazdy i planety





# WSZECHŚWIAT I CIAŁA NIEBIESKIE

**W**szechświat, inaczej kosmos, to energia w różnych postaciach, materia (od tzw. cząstek elementarnych po wielkie zbiory galaktyk), a także wszelkie prawa fizyki, czyli wszystko, co istnieje i jest nieograniczoną przestrzenią. Materię stanowią ciała niebieskie. Częstkami Wszechświata są także człowiek oraz wszelkie pozosta-

łe istoty ziemskie. O istnieniu istot pozaziemskich nic do tej pory nie wiemy. Wciąż trwają ich poszukiwania, choć bardziej konkretne badania ograniczają się głównie do szukania śladów życia w budowie meteorytów i próbek materii pozaziemskiej przywożonych na Ziemię z misji kosmicznych. Prowadzone są także analizy sygnałów radiowych. Zapoczątkowane przez Aleksandra Wolszczana

w 1992 r. odkrywanie planet poza Układem Słonecznym otworzyło nową szansę na odnalezienie życia poza Ziemią. Na przykład w 2014 r. odkryto planetę z wodą na powierzchni o podobnych warunkach termicznych jak na Ziemi.

Według aktualnych danych Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu (*Big Bang*) około 14 mld lat temu, ale zgodnie z obecną wiedzą jego część widzialna ma średnicę około 92 mld lat świetlnych. Ta niezgodność wieku wynika ze zjawiska ekspansji, bez którego kosmos miałby średnicę zaledwie 28 mld lat świetlnych. Wszechświat powstał z tzw. osobliwości, czyli punktu, w którym były skupione cała materia i cała energia. W wyniku ekspansji w obrębie całego kosmosu spada zarówno gęstość materii, jak i temperatura. Pierwsze gwiazdy, stanowiące obiekty emitujące światło widzialne, powstały około miliarda lat po Wielkim Wybuchu (13 mld lat temu), a Ziemia – około 4,6 mld lat temu.



▲ Ekstremalnie Głębokie Pole Hubble'a jest najdalej sięgającym astronomicznym zdjęciem, jakie kiedykolwiek wykonano w świetle widzialnym



## TEORIA WIELKIEGO WYBUCHU

Ludzie od zawsze starali się znaleźć odpowiedź na fundamentalne pytanie, jak to wszystko się zaczęło. Pod pojęciem „wszystko” można rozumieć dosłownie każdą materialną rzecz ożywioną i nieożywioną, która w ramach praw fizyki wypełnia całą przestrzeń dostępną nie tylko naszym bezpośrednim obserwacjom, ale także to, co do tej pory wymyka się poznaniu. Jak więc zaczął się Wszechświat? – bo właśnie to słowo skupia w sobie wszystkie poszukiwania naukowców, filozofów i myślicieli religijnych. Ci ostatni w ramach i na podstawie religijnych dogmatów mają z reguły gotowe odpowiedzi, które mniej lub bardziej przystają do osiągnięć nauki, a czasem zupełnie je negują. W tym opracowaniu skupimy się, rzecz jasna, na podejściu metodystycznym, które przyświeca wszystkim ceniącym znaczenie eksperymentów myślowych i obserwacji empirycznej jako podstawowych instrumentów badania przyrody. Po zwycięstwie idei kopernikańskiej, która z Ziemi uczyniła tylko jedną z licznych niewyróżniających się planet w Układzie Słonecznym, kolejne odkry-

cia jeszcze bardziej podkopywały ów piedestał, na którym ludzie zwykli stawiać swój gatunek. W późniejszych czasach okazało się, że Słońce jest tylko jedną z miliardów gwiazd tworzących ogromny dysk zwany galaktyką. Droga Mleczna, nasza kosmiczna wyspa Wszechświata, to tylko jedna z setek albo tysięcy miliardów galaktyk, które jak ona zawierają miliardy gwiazd. Wokół tych gwiazd krążą niezliczone planety, komety, planetydy i drobny pył.

Świat wielkich liczb, w który wkraczamy, jest niewątpliwie przypisany astronomii i jej prężnie rozwijającej się fascynującej dyscyplinie zwanej kosmologią. To w niej na podstawie zebranego materiału obserwacyjnego, modeli teoretycznych, zdobyczy fizyki kwantowej i teorii względności formułuje się hipotezy na temat początków świata, warunków, w jakich dokonywało się dzieło stworzenia. Odkrycie w 1929 r. przez Edwina Hubble’a ucieczki galaktyk (przewidziane teoretycznie dwa lata wcześniej przez belgijskiego księdza Georges’a Lemaître’a), które amerykański uczyony zawarł w wyjątkowo pięknym i eleganckim formalnie prawie fizyki (prawie Hubble’a), zwróciło uwagę naukowców



▲ Edwin Hubble

na ekstrapolowaną w przeszłość jego konsekwencję. Wskazywała ona, że w zamierchłej historii wszystkie galaktyki musiały się znajdować bardzo blisko siebie. Cofając się w czasie jeszcze dalej, dochodzimy do okoliczności, w których cała materia i energia znajdowały się w niewielkiej, bardzo gorącej i gęstej objętości, w czymś w rodzaju matema-

▼ Działający od 1990 r. Kosmiczny Teleskop Hubble’a to jedno z najważniejszych narzędzi przyczyniających się do poznania kosmosu





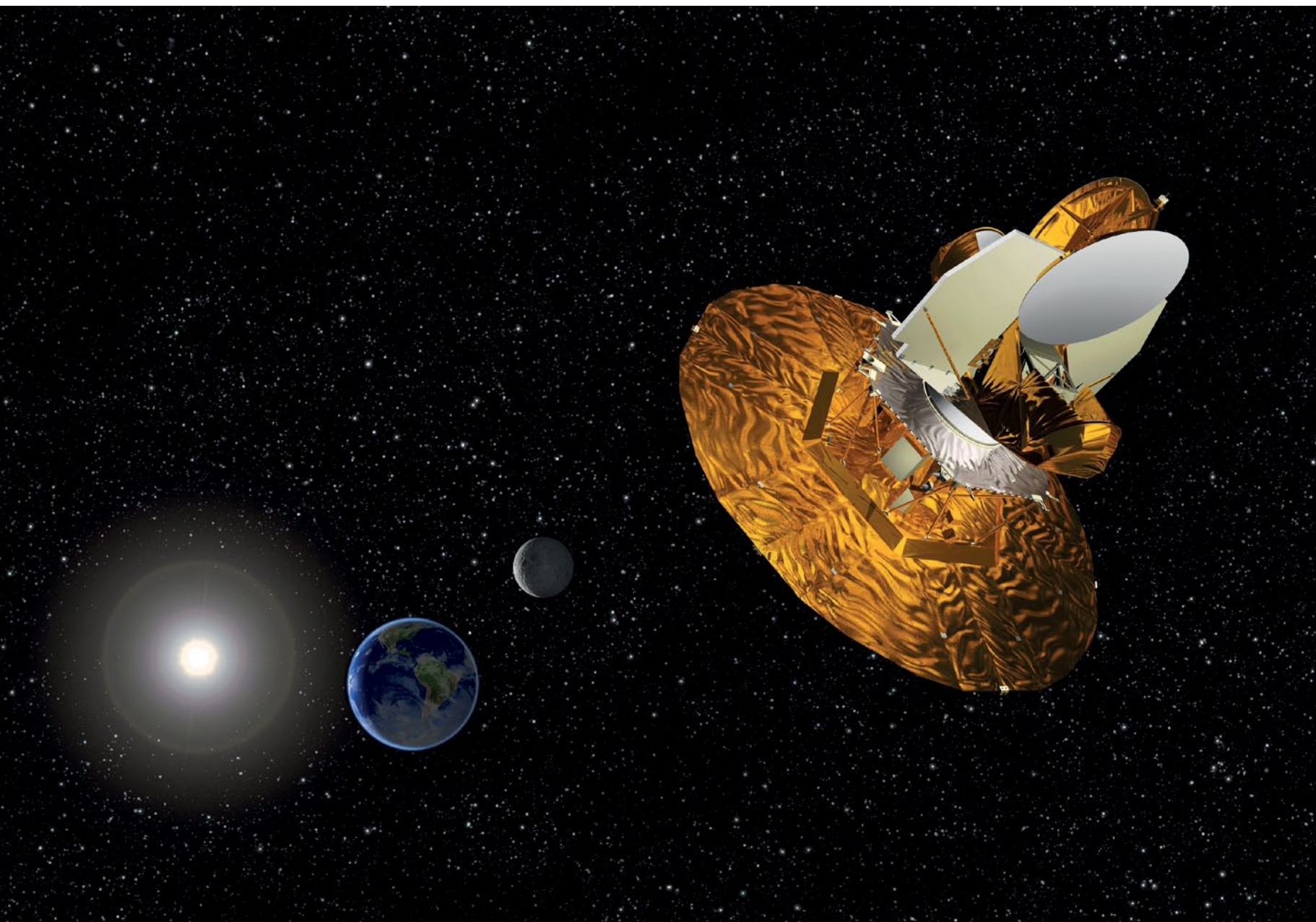
tycznego punktu zwanego osobliwością. Ów punkt, który pojawił się nagle i bez wiadomych przyczyn, nagle zaczął się rozprzestrzeniać, przy czym ta ekspansja nie odbywała się w uprzednio „przygotowanej” lub istniejącej przestrzeni. Ta przestrzeń pojawiła się i zaczęła ekspandować razem ze wszystkim, co zawierała. Jakby tego było mało, w tej gwałtownej eksplozji pojawił się też czas, którego wcześniej nie było.

Czas, jaki upłynął od momentu zwanego Wielkim Wybuchem, określa się na mniej więcej 13,8 mld lat. Warto zauważyć, że koncepcja gwałtownych narodzin Wszechświata początkowo była przyjmowana bardzo sceptycznie, a sama nazwa Wielki Wybuch (ang. *Big Bang*), której użył brytyjski kosmolog Fred Hoyle, miała wydźwięk ironiczny-szyderczy. Konkurującą hipotezą w tym czasie była teoria stanu stacjonarnego, która zakładała, że Wszechświat istniał zawsze, a fakt, że hubbleowskie oddalanie się galaktyk nie powoduje zmian jego jednorodności i gęstości, wynika

z nieustannej kreacji materii. Ten ostatni efekt był jednak sprzeczny z zasadą zachowania masy, co mocno podważało zasadność teorii. Dodatkowo przewidziane teoretycznie przez George’a Gamow’a promieniowanie reliktowe, które miało wypełniać całą przestrzeń i być echem dawnej epoki gorącego oraz gęstego Wszechświata, w 1965 r. zostało odkryte przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona. To nagrodzone Nagrodą Nobla odkrycie ostatecznie przekonało świat nauki, że o ile teoria Wielkiego Wybuchu nie tłumaczy całości zagadnień początków Wszechświata, o tyle najbardziej zbliża się do ich wyjaśnienia i warto na jej bazie budować kolejne, pełniejsze hipotezy. Dalsze mapowanie niejednorodności promieniowania relikowego, dokonane przez satelity COBE (ang. *Cosmic Background Explorer*, pol. Badacz Tła Kosmicznego) i WMAP (ang. *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), potwierdziły model, na podstawie którego wyłania się taki oto obraz głównych etapów ewolucji Wszechświata.

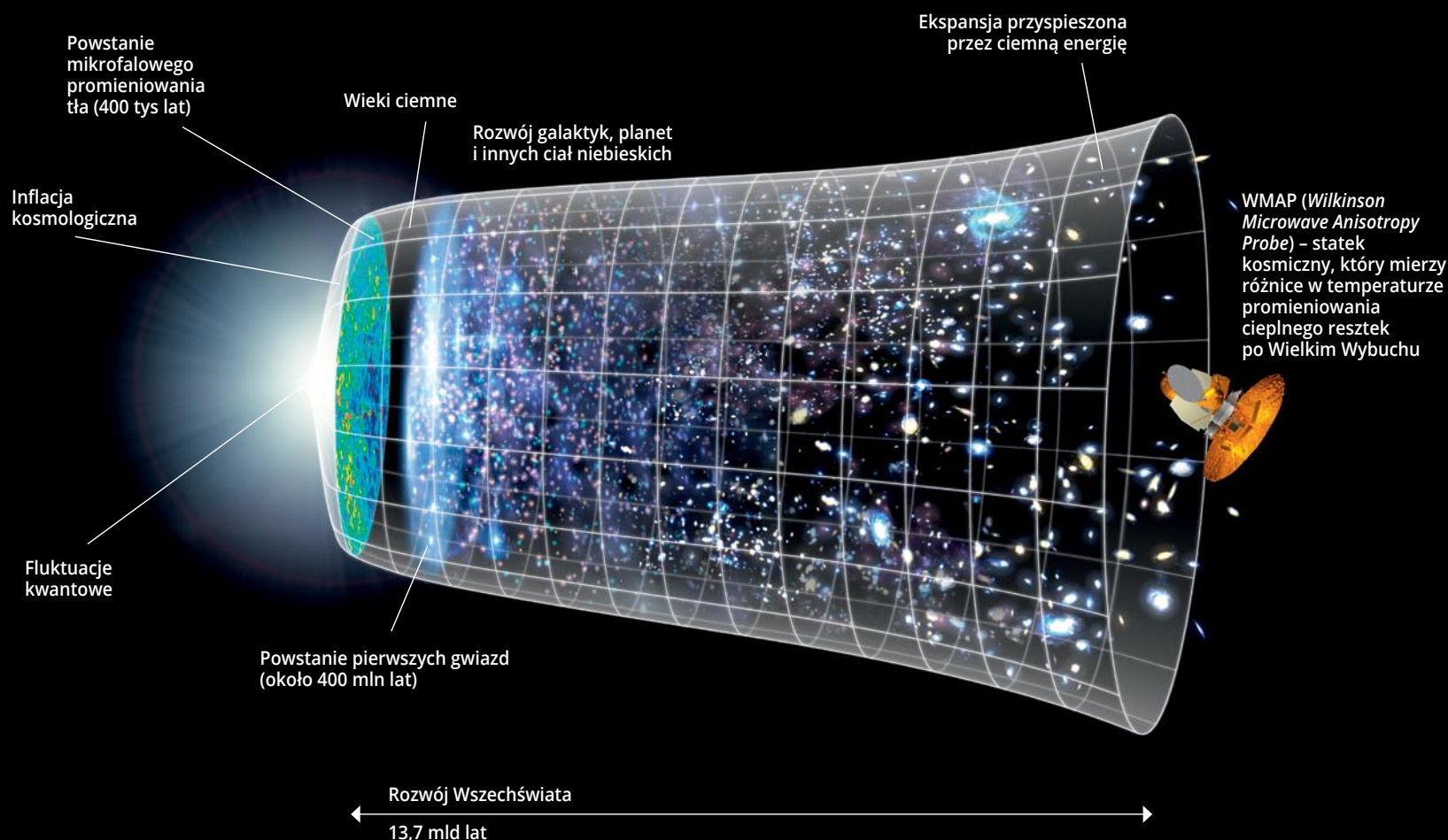
Era Plancka, trwająca od Wielkiego Wybuchu do około  $10^{-43}$  sekundy po nim, była okresem, w którym w warunkach gęstości sięgającej około  $10^{97}$  kg/m<sup>3</sup> nie obowiązywały znane nam prawa fizyki. Nie sposób więc opisać, co działo się w tak krótkim odcinku czasu poza przypuszczeniem, że nad materią zdecydowanie dominowała energia, a temperatura układu spadała. Być może nowe teorie łączące grawitację z fizyką kwantową będą w stanie wyjaśnić ten okres. Kolejna era kwarkowo-gluonowa trwała do  $10^{-4}$  sekundy i przyniosła gwałtowne rozszerzanie się przestrzeni zwane inflacją. Dzięki niej obserwuje się we wszystkich kierunkach jednorodność Wszechświata. W tym też okresie doszło do złamania symetrii wśród cząstek elementarnych, gdyż po intensywnej anihilacji doszło do ustalenia się przewagi pomiędzy cząstkami i antycząstkami. Dało to początek materii, z której jest zbudowany nasz świat. Ten etap ewolucji Wszechświata jest wnikliwie studiowany przez fizyków

▼ Artystyczna wizja gromadzenia danych (potrzebnych do zrozumienia początków Wszechświata) przez WMAP





# GŁÓWNE ETAPY ROZWOJU WSZECHŚWIATA



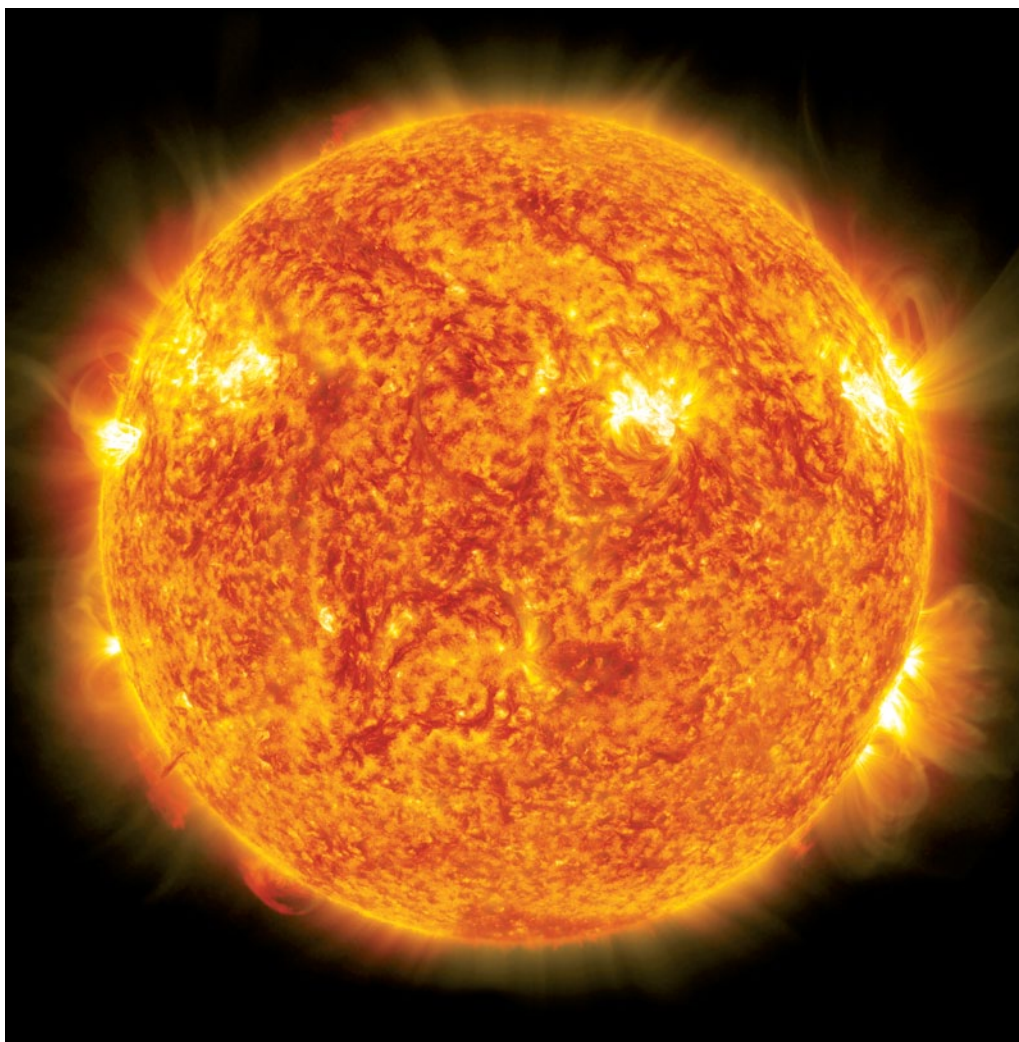
wysokich energii, którzy pracują na akceleratorach, czyli wielkich zderzaczach cząstek elementarnych. Te urządzenia pozwalają bowiem uzyskiwać warunki ogromnych ciśnień i temperatur, w których protony, neutrony, elektrony i inne cząstki w wyniku zderzeń rozpadają się na elementy składowe. Era leptonowa trwała do 10 sekundy po Wielkim Wybuchu. Wciąż anihilowało w niej wiele typów cząstek, neutrino przestały oddziaływać z materią, zaczęły powstawać pierwsze jądra deuteru, helu i litu. Przez następnych kilka minut trwał intensywny proces nukleosyntezy. W trakcie ery promieniowania, która trwała do kilkuset tysięcy lat po Wielkim Wybuchu, Wszechświat wypełniały wysokoenergetyczne fotony z domieszką wodoru i helu, które ustawicznie wchodziły ze sobą w interakcje. Temperatura wciąż spadała, by po około 10 tys. lat uczynić Wszechświat przezroczystym, zdominowanym przez materię. Pod koniec tego etapu protony z elektronami trwale połączyły się w jądra atomowe, a nieoddziałujące z rozrzedzoną materią fotony dziś obserwujemy jako promieniowanie reliktywne. Era gwiazdowa (era materii)

zaczęła się około 150 mln lat po Wielkim Wybuchu, gdy pod wpływem grawitacji wielkie obłoki wodoru i helu zaczęły się kurczyć i dawać początek pierwszym galaktykom, a w nich najstarszemu pokoleniu gwiazd. Wiemy, że nasze Słońce jest gwiazdą młodego pokolenia, a więc żółtym karłem, który zabłyśnął około 5 mld lat temu na obrzeżu dawno uformowanego już spiralnego dysku Drogi Mlecznej.

Dalsze losy Wszechświata są uzależnione od tego, czy zawiera dostatecznie dużo materii, której sumaryczne efekty grawitacyjne w skali całej przestrzeni zdeterminują jej przyszłe zachowanie. Opisują to trzy główne scenariusze zwane modelami Aleksandra Friedmana od nazwiska rosyjskiego uczonego, który zaproponował je w 1922 r. Model Wszechświata zamkniętego zakłada, że po okresie rozszerzania się nastąpi punkt zwrotny, po którym przestrzeń wraz z zawartą w niej materią i energią zacznie się kurczyć aż do początkowej osobliwości. Na bazie tego modelu pojawiło się wiele sensacyjnych doniesień i popularnych teorii, mówiących o cykliczności Wszechświata, który jakby

pulsował w odwiecznym rytmie wielkich ekspansji i kontrakcji. Model otwarty mówi, że przy związanych z brakiem odpowiedniej masy niedostatek efektów grawitacyjnych dążących do ponownego zapadania się Wszechświata będzie się on rozszerzał w nieskończoność, a gęstość materii wraz z upływem czasu będzie się zbliżała do zera. Ta dość ponura wizja prowadzi do mało spektakularnych wniosków, w których ogromną, pustą przestrzeń, gdzie zgasły już wszystkie gwiazdy, będą wypełniać tylko efekty kwantowe, niemożliwe do zaobserwowania przez nikogo, gdyż życie już dawno przestało istnieć. Model Wszechświata płaskiego natomiast opisuje stan, gdy po upływie nieskończonego czasu (o ile można użyć tego logicznie sprzecznego określenia) ekspansja przestrzeni ustanie. Jest to przypadek, gdy ilość materii we Wszechświecie ma wartość równą krytycznej. Nie wiemy jeszcze, który z omawianych modeli właściwie opisuje stan faktyczny, ale odkrycie nagrodzone w 2011 r. Nagrodą Nobla, mówiące o tym, że ekspansja Wszechświata przyspiesza, wskazywałoby raczej na model otwarty. Warto uzmysłowić sobie





▲ Słońce stanowi centrum Układu Słonecznego i zawiera około 99,8% jego masy. Wokół Słońca jest widoczna korona słoneczna, w której rozchodzi się wiatr słoneczny

jednak, że naszym obserwacjom podlega według różnych szacunków zaledwie tylko kilka procent całkowitej zawartości Wszechświata! Reszta, czyli ciemna materia i ciemna energia, których istnienie postuluje się na podstawie obserwowanych pośrednio efektów grawitacyjnych, jakie wywołują, może implikować zupełnie inne scenariusze. Z pewnością w tej kwestii jest jeszcze wiele do poznania i będą to odkrycia o fundamentalnym znaczeniu dla zrozumienia świata, w którym żyjemy.

### CIAŁA NIEBIESKIE

Ciała niebieskie to naturalne lub sztuczne obiekty fizyczne oraz układy powiązanych ze sobą obiektów fizycznych lub ich struktur, występujące w przestrzeni kosmicznej poza granicą atmosfery ziemskiej. Pośród ciał niebieskich w porządku od największych do najmniejszych wyróżnia się m.in. Wszechświat, pustki (Wielka Pustka), gromady galak-

tyk, galaktyki, mgławice, pustki, kwazary, ciemną materię, gromady gwiazd, gwiazdy, czarne dziury, układy planetarne, planety, planety karłowate, księżyce planet, małe ciała układów planetarnych, w tym planetoidy, komety, meteoroidy, materię międzyplanetarną. Do ciał niebieskich są zaliczane obecnie także sztuczne satelity, umieszczane w przestrzeni kosmicznej przez człowieka od 1957 r. Pierwszym obiektem tego typu był Sputnik 1, wyniesiony na orbitę wokół Ziemi przez Związek Radziecki. Obecnie w przestrzeni pozaziemskiej funkcjonuje kilka tysięcy satelitów Ziemi, Księżyca, Słońca, kilku planet, a nawet satelity planetoid (Westy) i planet karłowatych (Ceres). Większość z nich została umieszczona przez Rosję (dawniej Związek Radziecki) i USA. Znaczna ich część to satelity sterowalne, są także statki załogowe wielokrotnego użytku: wahadłowce i stacje orbitalne.

Olbrzymim sukcesem ludzkości było lądowanie człowieka na innym ciele niebieskim – Księżycu, które nastąpiło 20 lipca 1969 r. o godzinie 20.17'40" UTC w ramach programu Apollo. Astronauci dotarli tam na statku Apollo, który wy-



▲ Księżyc – jedyny naturalny satelita Ziemi. Jego powierzchnia jest silnie naznaczona kraterami uderzeniowymi. Ciemne obszary są nazywane morzami księżycowymi





▲ Mars – obraz stworzony w wyniku kompilacji 102 zdjęć z sondy Viking 1

niosła rakieta Saturn V. Ta rakieta wraz z modułem załogowym miała 111 m wysokości, a jej masa całkowita wynosiła około 3000 t. W załodze byli: dowódca Neil Armstrong, Buzz Aldrin – pilot modułu księżycowego (lądowika) i Michael Collins – pilot modułu dowodzenia. Jako pierwszy stopę na Księżycu posta-

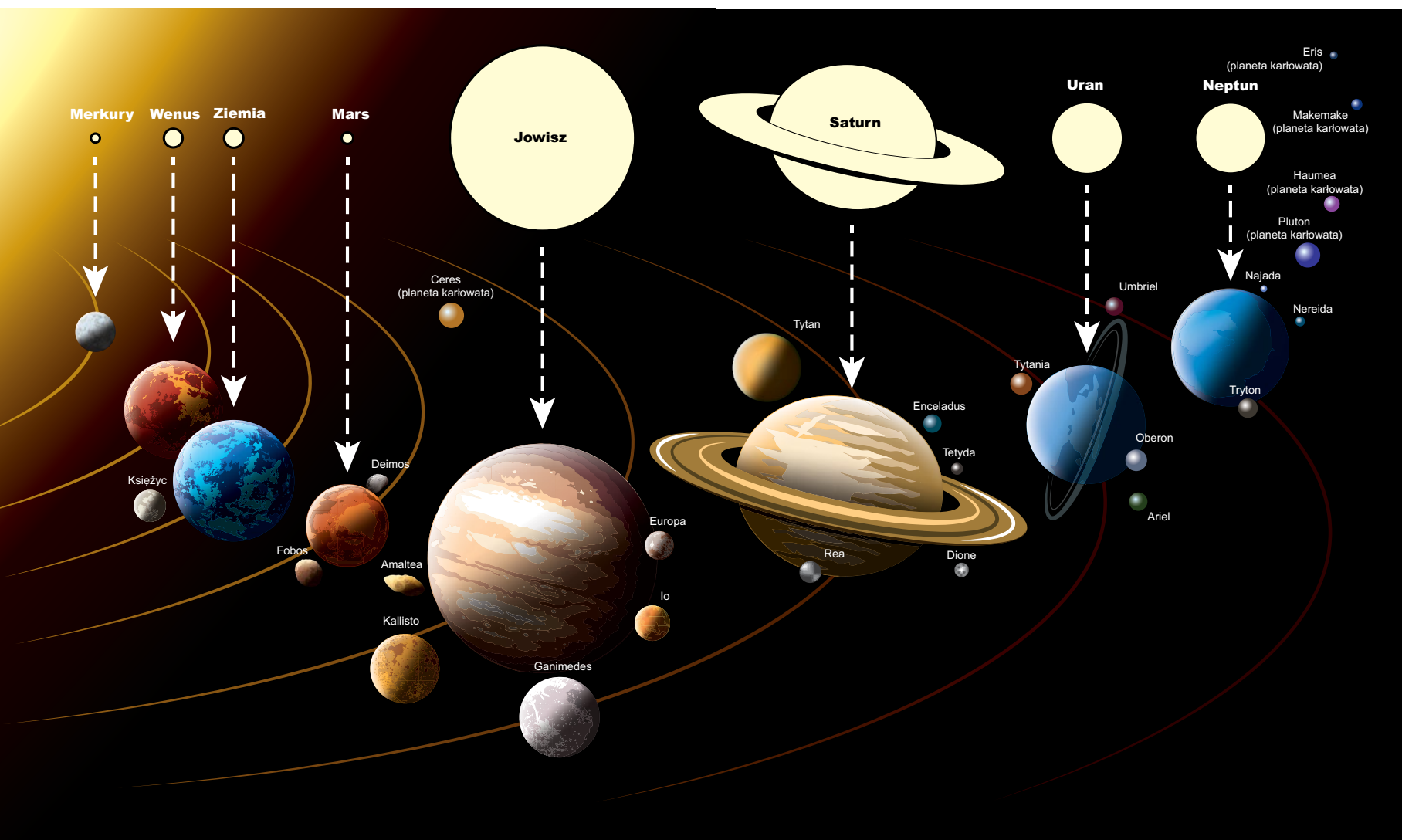
wił Neil Armstrong, który wygłosił słynne słowa: „To jest mały krok człowieka, ale wielki skok dla ludzkości”. Obecnie kolejnym celem lądowania człowieka jest Mars. Wysłano tam już blisko 40 sond z różnym powodzeniem, a niewątpliwym sukcesem jest pięć lądowań sprzętu. W ciągu najbliższych lat należy się spodziewać lądowania człowieka na Czerwonej Planecie.

### UKŁAD SŁONECZNY

Około 4,5 mld lat temu w zewnętrznych rejonach Drogi Mlecznej rozbłysła młoda gwiazda. Wokół niej w dysku protoplanetarnym o średnicy około 200 jednostek astronomicznych powoli formowały się lokalne zagęszczenia materii, które grawitacyjnie zaczęły ściągać ku sobie otaczający je pył i gaz. Obiegając gwiazdę centralną, stopniowo czyściły przestrzeń wokół siebie i przybierał coraz bardziej regularne kuliste kształty. Były to zalążki przyszłych

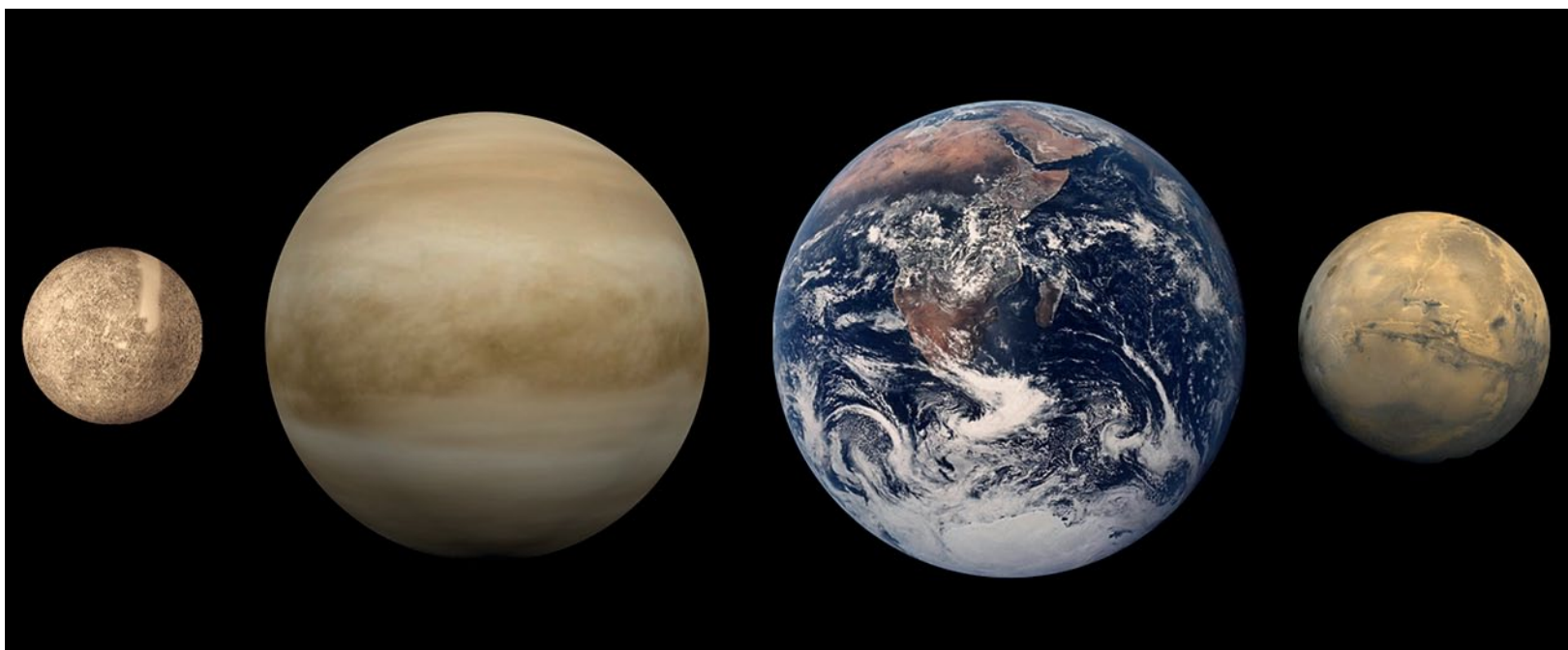
obiektów Układu Słonecznego – planet i ich większych księżyców oraz planet karłowatych. Pozostała materia została wykorzystana na kreację mniejszych ciał jak planetoidy, komety oraz pył międzyplanetarny.

Układem Słonecznym jest nazywany system składający się ze Słońca jako gwiazdy i powiązanych z nią grawitacyjnie innych ciał niebieskich. W składzie tego zespołu występuje osiem planet (Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun), liczne planetoidy (inaczej asteroidy), planety karłowate (Pluton, Makemake, Haumea), księżyce planet (łącznie 173), a także komety, meteoroidy i pył międzyplanetarny. Poglądy dotyczące liczby planet niedawno się zmieniły. Ciekawym przypadkiem jest planeta karłowata o nazwie Pluton, oznaczona numerem 134 340 w katalogu planetoid, o średnicy 2370 km, stanowiąca najjaśniejszy obiekt Pasa Kuipera. Została odkryta w 1930 r. przez amerykańskiego astronoma Clyde'a Tombaugh'a i była



▲ Schemat Układu Słonecznego – skala odległości niezachowana. W części górnej (kolor żółty) przedstawiono porównanie wielkości planet – skala wielkości zachowana. Poniżej przedstawiono rozmieszczenie poszczególnych obiektów (planety, planety karłowate i wybrane księżyce planet) – skala wielkości niezachowana





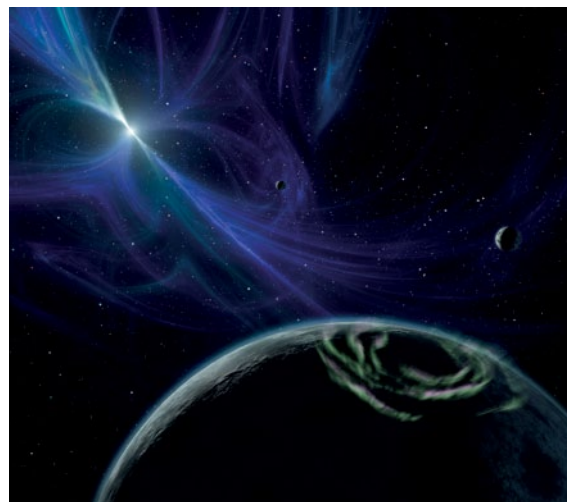
▲ Merkury, Wenus, Ziemia i Mars – cztery skaliste planety Układu Słonecznego w jednakowej skali

uznawana za dziewiątą planetę aż do 24 sierpnia 2006 r., kiedy w wyniku obrad Międzynarodowej Unii Astronomicznej zaliczono ją do planet karłowatych. Ciekawostką jest sposób uczczenia amerykańskiego odkrycia z 1930 r. w stanie Nowy Meksyk. Jego Izba Reprezentantów w 2007 r. ogłosiła akt prawny, który pozwala nazywać Plutona planetą, ilekroć będzie przemierzał piękne nocne niebo nad tym terytorium.

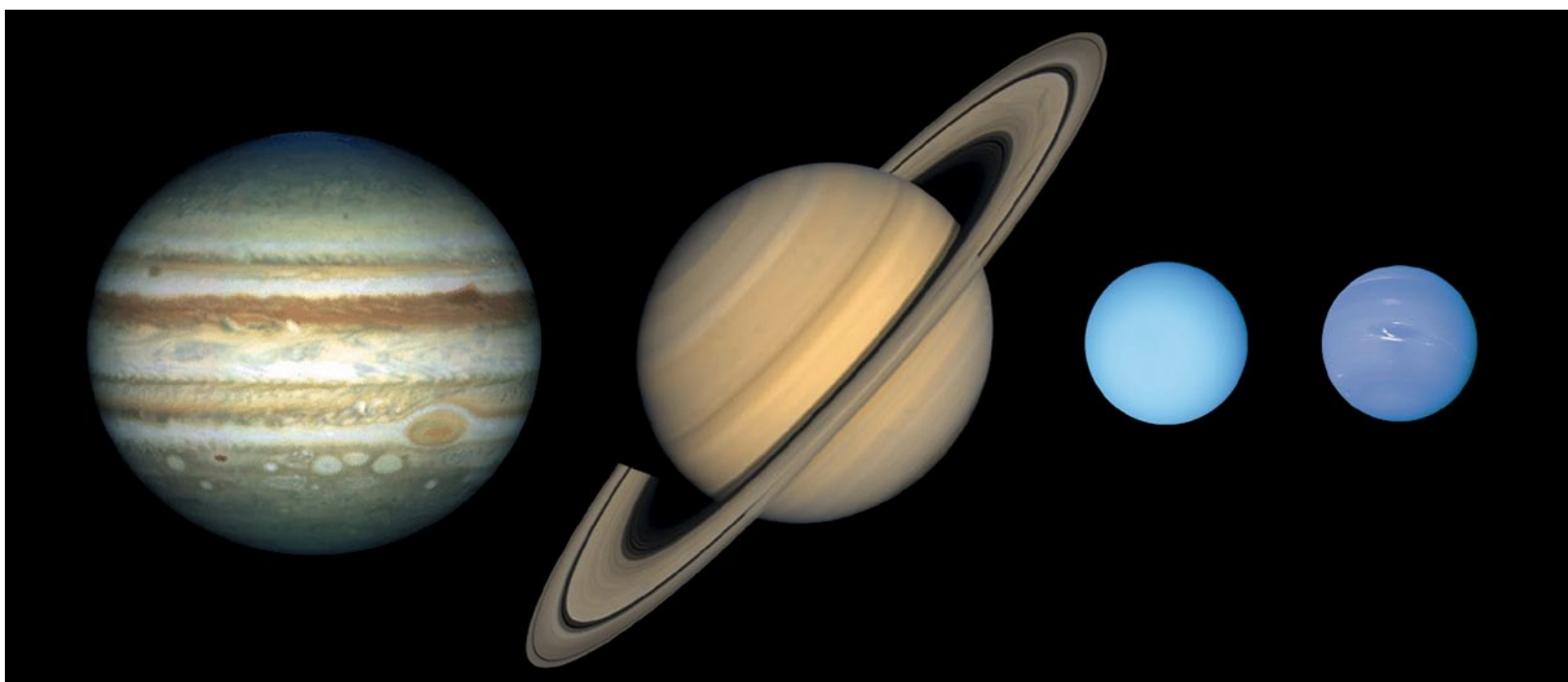
Planety wchodzące w skład Układu Słonecznego dzielą się na: wewnętrzne (Merkury, Wenus) i zewnętrzne (Mars, Jowisz, Saturn, Uran, Neptun). Cztery z nich, położone najbliżej Słońca –

Merkury, Wenus, Ziemia, Mars – tworzą grupę ziemską i są skaliste. Planety bardziej oddalone, zwane olbrzymami, czyli Jowisz, Saturn, Uran i Neptun, są zbudowane z gazów.

Do 1992 r. Układ Słoneczny był jedynym znanym układem planetarnym. Pierwszy pozasłoneczny układ planetarny został odkryty przez polskiego astronoma Aleksandra Wolszczana w 1992 r. w rejonie pulsara PSR B1257+12. Wkrótce zaczęto potwierdzać kolejne tego typu odkrycia. Na początku 2017 r. liczba znanych planet pozasłonecznych (egzoplanet) osiągnęła 3,5 tys. Niemal  $\frac{1}{3}$  z nich została odkryta dzięki badaniom przez



▲ Planety orbitujące wokół pulsara Lich (PSR 1257+12). Wizja artystyczna



▲ Jowisz, Saturn, Uran i Neptun – cztery gazowe olbrzymy Układu Słonecznego w jednakowej skali



nowoczesny teleskop Keplera. Pozasłoneczne układy planetarne znacznie różnią się od Układu Słonecznego. Ostatnio najczęściej są wykrywane planety o dużej masie, przypominające Jowisza, silnie zaburzające ruch lub promieniowanie docierające z gwiazdy macierzystej. Pośród egzoplanet niedawno znaleziono także ciała podobne pod względem wielkości do Ziemi, na których może występować woda w stanie płynnym. O jednym z takich rewelacyjnych odkryć poinformowano 18 kwietnia 2014 r. w czasopiśmie „Science”. Obecnie trwają dalsze badania mające ustalić ewentualne istnienie życia w takich warunkach.

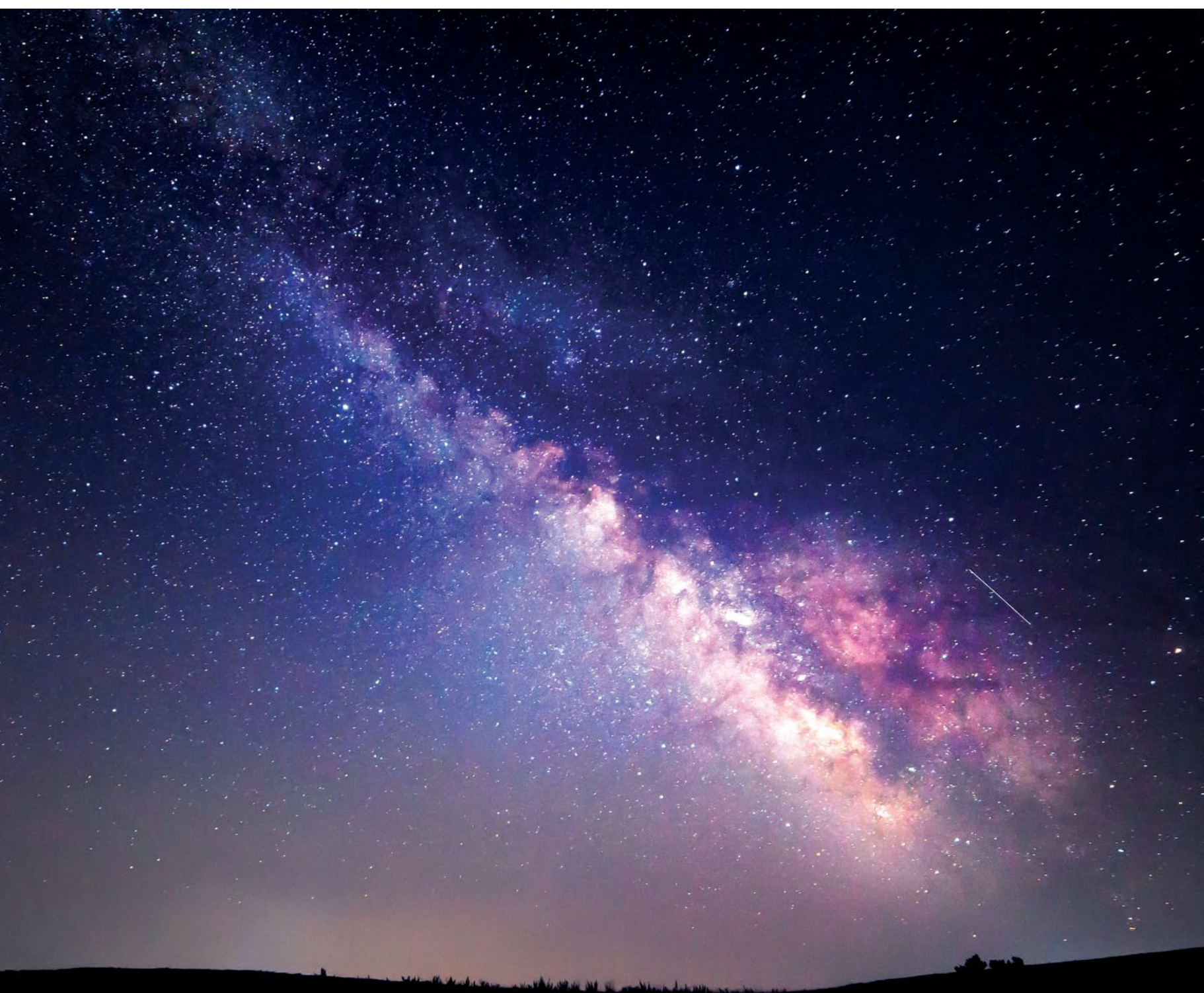
### DROGA MLECZNA

Gdy w pogodną noc z dala od miejskich świateł spojrzymy na sklepienie niebieskie, z pewnością zauważymy bladą, podłużną poświatę, ciągnącą się na tle konstelacji. Jej obserwacji w Polsce sprzyja zwłaszcza koniec okresu letniego, kiedy widziana w ten właśnie sposób Droga Mleczna znajduje się wysoko ponad horyzontem i przechodzi przez zenit. Starożytni mieszkańcy Peloponezu wierzyli, że była rozlanym na firmamencie mlekiem Hery, żony Zeusa, która karmi małego Heraklesa. Warto poobserwować tę poświatę za pomocą lornetki lub ma-

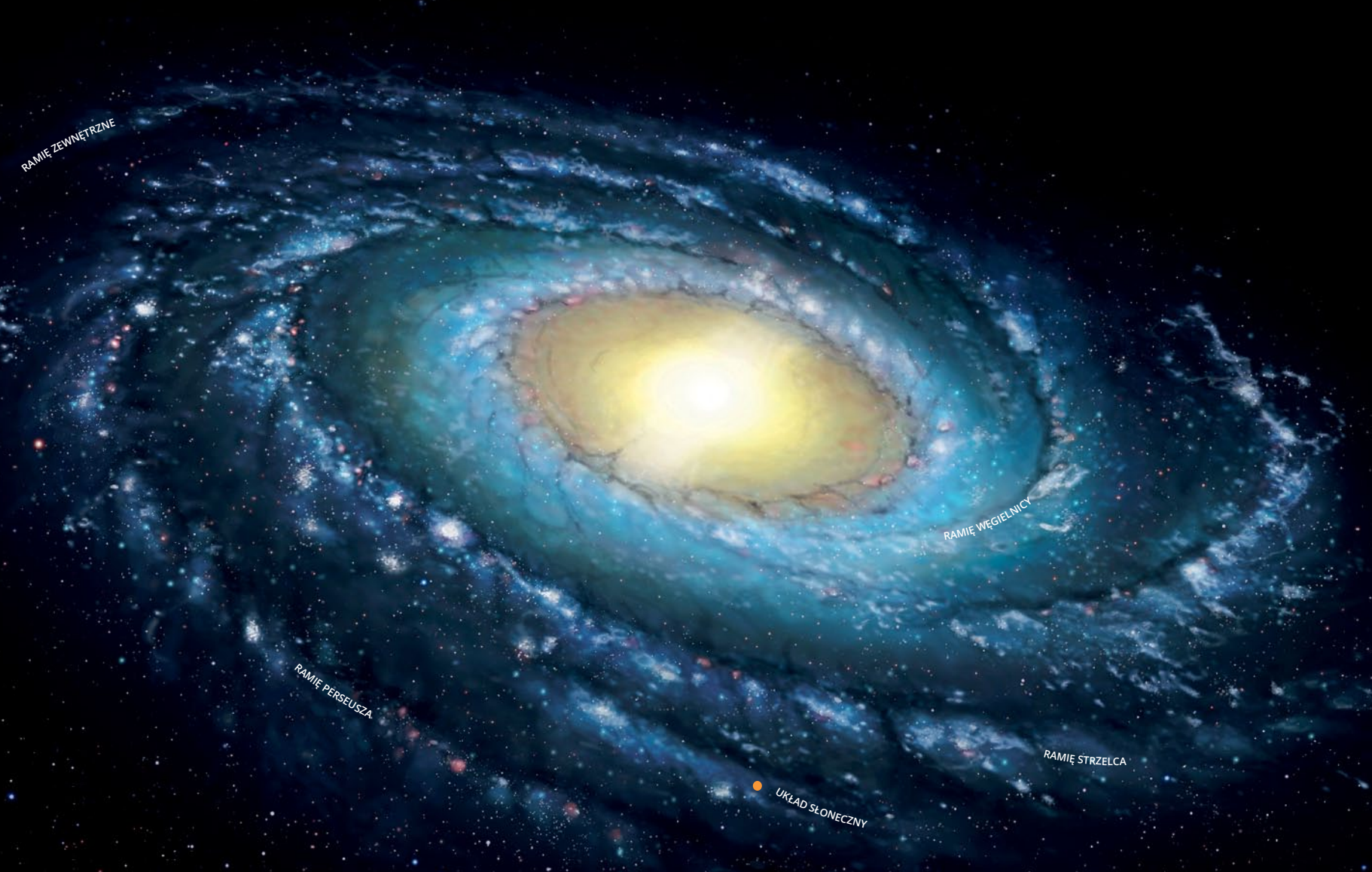
łego teleskopu – wtedy osłupienie z powodu niezliczonej liczby słabych gwiazd widocznych w okularze może dorównać prawdopodobnie temu, jakie przeżył Galileusz, który jako pierwszy skierował prostą lunetę w niebo.

Droga Mleczna to galaktyka spiralna z tzw. poprzeczką, w obrębie której wyróżniają się dwa ramiona. Ma trudne do wyobrażenia rozmiary: zawiera od 100 do 400 mld gwiazd, ma średnicę 100–120 tys. lat świetlnych i grubość 1 tys. lat świetlnych. Na niebie jest widoczna jako biaława smuga. W odległości do 20 lat świetlnych od Układu Słonecznego (czyli całkiem blisko) istnieje ponad

- ▼ Droga Mleczna – galaktyka spiralna, w której znajduje się nasz Układ Słoneczny. Z Ziemi jest obserwowany od wewnątrz dysk Galaktyki, widoczny jako jaśniejąca smuga na niebie







100 gwiazd, a najbliższe to Proxima Centauri (tzw. czerwony karzeł usytuowany w odległości 4,22 lat) i Alfa Centauri A i B (pomarańczowy i żółty karzeł w odległość około 4,39 lat).

Słońce z naszym systemem planetarnym wiruje wokół środka Galaktyki w pewnej odległości od jej centrum, wykonując pełny obieg w ciągu 240 mln

lat z prędkością 220 km/s. Układ Słoneczny znajduje się nieco na północ od płaszczyzny dysku galaktycznego. Słońce porusza się zarówno w stosunku do centrum Galaktyki, jak i względem otaczających gwiazd. Punkt na sferze niebieskiej, do którego zmierza Słońce, to tzw. apeks ruchu Słońca, znajdujący się w gwiazdozbiorze Herkulesa.

▲ Struktura Drogi Mlecznej z podpisanymi ramionami

▼ Tak prawdopodobnie wyglądałaby galaktyka Drogi Mlecznej, gdyby obserwować ją w płaszczyźnie jej dysku





GWIAZDY

Gwiazdą jest nazywane kuliste ciało niebieskie stanowiące koncentrację materii w postaci plazmy lub materii zdegenerowanej. W pogodną noc gołym okiem można dostrzec zaledwie do 5000–6000 gwiazd. W składzie przeciętnej gwiazdy zwykle dominują wodór i hel, często są także obecne inne pierwiastki.

Gwiazdy mają różną jasność, temperaturę, barwę, wiek i skład chemiczny. Jasność obserwowana wynika zarówno z odległości od Słońca, jak i wielkości oraz temperatury, które implikują moc strumienia energii promienistej docierającej do naszych oczu. Często bowiem mniejsza gwiazda, ale bliżej położona jest pozornie jaśniejsza niż znacznie większa, ale odleglejsza. Aby mieć obiektywne porównanie rzeczywistych jasności gwiazd, astronomowie wprowadzili definicję jasności, jaką miałby obiekt astronomiczny obserwowany z odległości 10 parseków w pustej przestrzeni, gdzie nie dochodzi do pochłaniania lub rozpraszania jego światła. Ustawiając zatem wszystkie gwiazdy w tej samej odległości, mamy możliwość oceny stanu rzeczywistego. Jasność jest wyrażana w jednostkach zwanych wielkościami gwiazdowymi (łac. *magnitudo*). Gwiazdy świecące najmocniej (na przykład Syriusz) mają magnitudo  $-1,5$ , gwiazdy naj słabiej widoczne na sklepieniu osiągają magnitudo 6. Wyjątkiem jest Słońce, którego magnitudo wynosi  $-26,3$ . Dla porównania jasność ziemskiego Księżyca w pełni ma wartość  $-12,7$ , Wenus w okresie największej jasności  $-4,6$ , a Marsa  $-2,8$ .



▲ Jedną z najmocniej świecących gwiazd jest Syriusz zaliczany do typu widmowego A. Zdjęcie wykonane teleskopem naziemnym

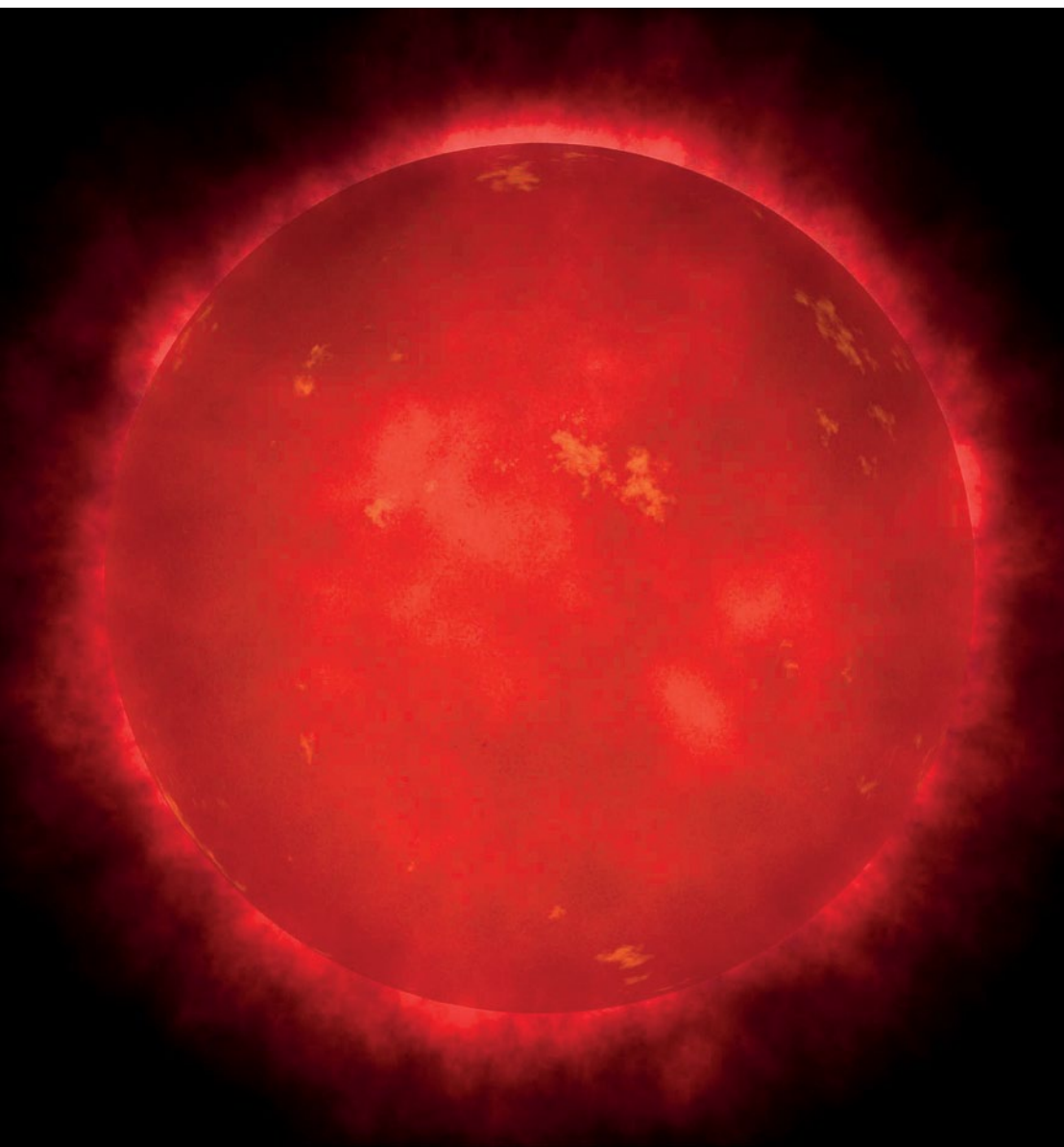
Barwa gwiazdy jest związana z jej składem chemicznym, temperaturą i etapem ewolucji, na jakim się w danej chwili znajduje. Słońce, które jest obecnie typowym żółtym karłem, za około 5 mld lat stanie się czerwonym olbrzymem, by po kolejnych milionach

lat wejść w stadium stygnącego z wolna białego karła. Każda gwiazda ma więc swój dokładnie zaprogramowany scenariusz istnienia. Wiek obserwowanych gwiazd waha się od powstających dopiero zalążków protogwiazdowych poprzez młode obiekty w wieku kilku milionów

PODSTAWOWE TYPY WIDMOWE GWIAZD

| Typ widmowy | Barwa               | Temperatura (K) | Źródło głównych linii widmowych                         | Typowy przedstawiciel |
|-------------|---------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|
| O           | niebieska           | 30 000–40 000   | atomy zjonizowanego helu                                | Alnitak               |
| B           | bladoniebieska      | 11 000–30 000   | atomy neutralnego helu                                  | Rigel                 |
| A           | niebieskobiała      | 7500–11 000     | atomy neutralnego wodoru                                | Syriusz               |
| F           | biała               | 6000–7500       | jw. i słabo zjonizowanych metali                        | Kanopus               |
| G           | białożółtawa        | 5000–6000       | atomy zjonizowanego wapnia, metali i neutralnego wodoru | Słońce                |
| K           | żółtawopomarańczowa | 3500–5000       | atomy neutralnych metali                                | Aldebaran             |
| M           | czerwonawa          | 3500            | atomy neutralnych metali, molekuły                      | Antares               |





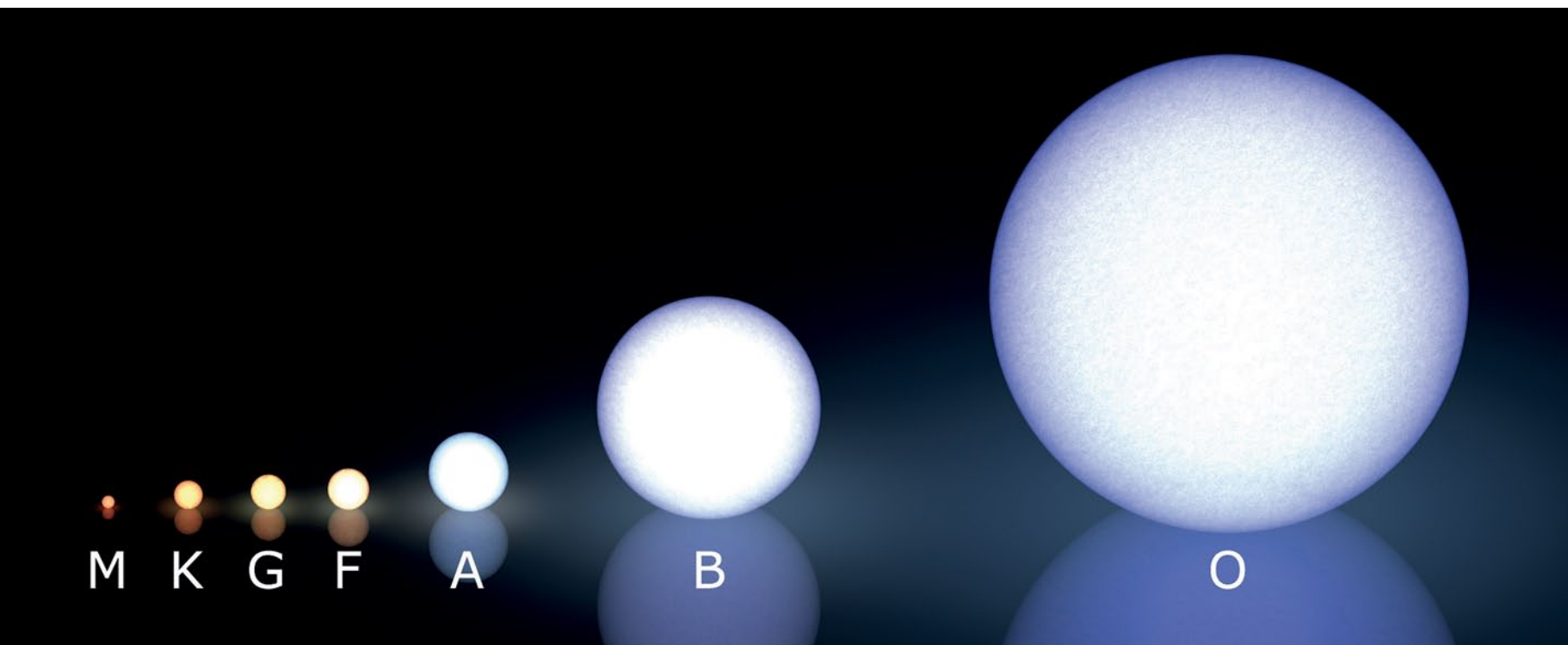
▲ Czerwony karzeł (typ widmowy M) – Gwiazda Teegardena w gwiazdozbiornie Barana. Wizja artystyczna na podstawie materiałów NASA

lat aż do prawdziwych starców, których wiek sięga kilkunastu miliardów lat. Paradoksalnie dłuższy żywot przewiduje się dla gwiazd najmniejszych, takich jak czerwone karły. Wynika to z faktu, że te relatywnie chłodne obiekty bardzo powoli zużywają swoje paliwo, co ostatecznie wróży im nawet kilkadziesiąt lub kilkaset miliardów lat życia. Tymczasem gwiazdy, które uformowały się od razu jako ogromne i gorące kule wodoru, mają przed sobą krótkie, lecz gwałtowne życie z finałową eksplozją supernowej, a być może nawet z zapadnięciem się do czarnej dziury.

W klasyfikacji harwardzkiej odpowiedni typ widmowy wskazuje na określony przedział temperatury fotosfery, czyli widzialnej powierzchniowej części gwiazdy.

Początkowe typy widmowe – najgorętsze – są także nazywane gwiazdami wczesnymi, natomiast końcowe – późnymi. Zapamiętanie typów widmowych ułatwia nieformalna formuła, wymyślona przez studentów: „O Be A Fine Girl, Kiss Me”. W obrębie typów wydziela się także podtypy oznaczane od 0 do 9.

Gwiazdy różnią się także rozmiarami. Na przykład gwiazdy nazywane neutronowymi osiągają średnicę rzędu 10–20 km, a gwiazdy olbrzymy mają średnicę rzędu nawet 700 mln km, czyli ponad tysiąckrotnie większą od średnicy Słońca.



▲ Zmiany rozmiarów gwiazd i barw ich fotosfer wraz z typem widmowym. Zmiany barwy od czerwieni ku błękitowi (od lewej do prawej) są związane ze wzrostem temperatury fotosfery





▲ Całkowite zaćmienie Słońca w 1999 roku sfotografowane z terenu Francji

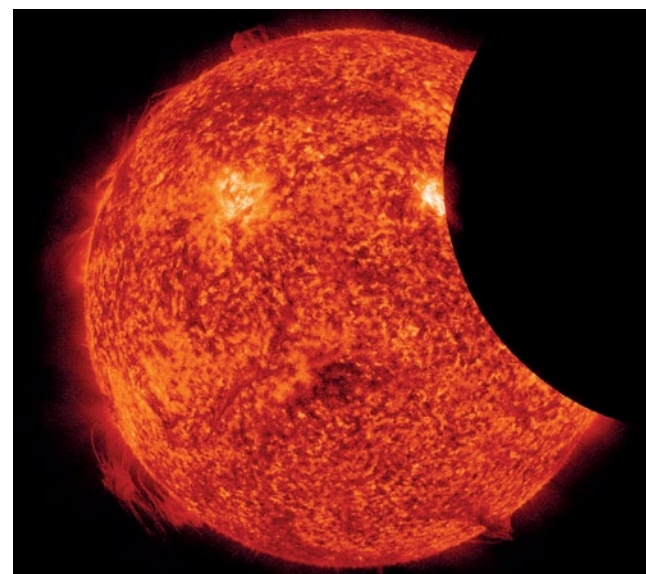
## ZAĆMIENIA SŁOŃCA I KSIĘŻYCA

Powinniśmy być wdzięczni Matce Naturze, że poza licznymi skarbami rozgwieżdżonego nieba podarowała nam również takie zjawiska jak zaćmienia Słońca i Księżyc. To wspaniałe móc się znaleźć na jednej geometrycznej linii ze Słońcem oraz Księżycem i wziąć udział w niezwykłym astronomicznym spektaklu.

Zaćmienie w astronomii oznacza zjawisko, w czasie którego cień jednego ciała niebieskiego pada na powierzchnię drugiego. Dzieje się tak wówczas, gdy w jednej linii ustawione są trzy ciała niebieskie, przy czym jedno z nich stanowi

źródło światła lub wysyła światło odbite. Jeśli na drodze promieni słonecznych biegnących w kierunku obserwatora znajduje się Księżyc, można zaobserwować zaćmienie Słońca. Jeśli cień Ziemi przysłania tarczę Księżyc, powstaje zaćmienie Księżyc, ale jest to możliwe tylko podczas jego pełni. W porównaniu z krótkimi zaćmieniami Słońca, które w najlepszym razie mogą trwać 7,5 minuty, całkowite zaćmienia Księżyc trwają znacznie dłużej i mogą być obserwowane niemal z całej półkuli, o ile satelita znajduje się wtedy ponad horyzontem.

Dla obserwacji zaćmień istotne znaczenie mają rozmiary kątowe poszczególnych ciał. Dla Ziemi zarówno Słońce,



▲ Częściowe zaćmienie słońca widziane z satelity Solar Dynamics Observatory



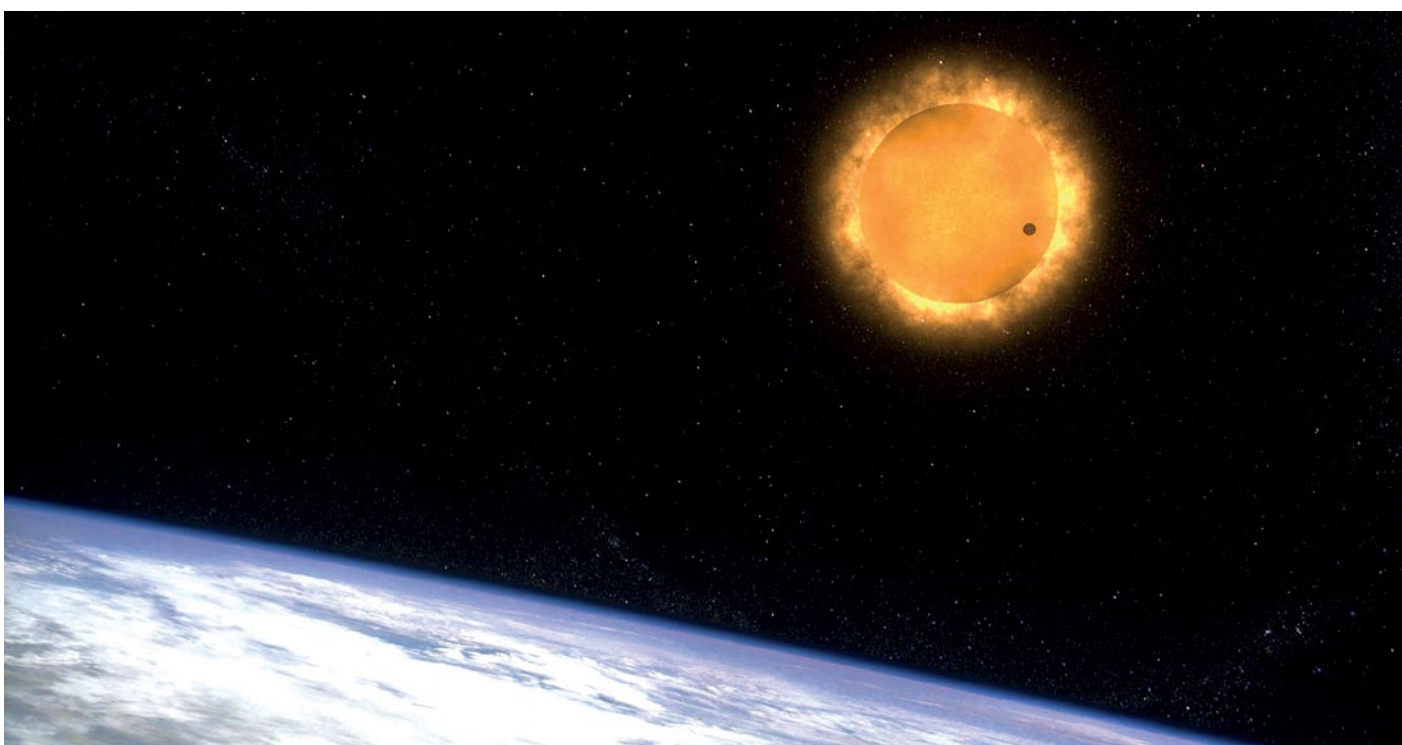


▲ Fazy pełnego zaćmienia superksiężycy (księżyc w pełni znajdujący się najbliżej Ziemi). Zdjęcia wykonano 27 września 2015 r. w Teksasie

jak i Księżyc mają zbliżone rozmiary kątowe o wielkości około pół stopnia. Chociaż średnica Księżyca jest około 400 razy mniejsza od średnicy Słońca, to jednocześnie odległość Księżyca od Ziemi jest także około 400 razy mniejsza od odległości Księżyca od Słońca. W przypadku gdy obiekt przesłaniający źródło światła ma stosunkowo niewielki rozmiar kątowy, występuje przejście (tranzyt) na tle tarczy większego ciała. Za przykład może służyć przejście Merkurego lub Wenus na tle tarczy Słońca. Ciekawym przykładem tranzytu jest tzw. obrączkowe zaćmienie Słońca, któ-

re występuje wówczas, gdy Księżyc podczas zaćmienia znajduje się blisko apogeum. Widać wtedy charakterystyczną chromosferę i wewnętrzną część korony słonecznej w postaci jasnej obwódki, które świecą wokół tarczy Księżyca. To zjawisko daje jedyną szansę zobaczenia gołym okiem chromosfery – purpurowej warstwy, która rozpościera się na zewnątrz fotosfery. Chromosfera nie jest jednolita, bowiem w obszarach wzmożonej aktywności jej jasność jest wyraźnie większa niż w obszarach spokojnych. Te jaśniejsze obszary są zwane polami pochodni.

Na niebie zachodzą również inne zjawiska związane z wzajemnym zakrywaniem się ciał niebieskich, m.in. zakrycia gwiazd przez planetoidy, zakrycia gwiazd przez planety i ich księżyce, zjawiska związane z zakrywaniem i zaćmiewaniem księżyców galileuszowych Jowisza przez macierzystą planetę i siebie wzajemnie. Występują także wzajemne zakrycia księżyców planet, zakrycia gwiazd przez Księżyc oraz zakrycia planet przez Księżyc. Bardzo rzadko zdarzają się zakrycia planetoidy przez inną planetoidę lub planety przez planetę.



▲ Końcowa faza tranzytu Wenus na tle tarczy Słońca 5 czerwca 2012 r. (NASA/Goddard Space Flight Center)



## KOMETY

Komety często zalicza się do jednych z najbardziej fascynujących ciał niebieskich. Każda jest inna, inaczej się zachowuje, jest nieprzewidywalna. Jedne mają wielkie głowy z krótkim warkoczem, inne są smukłe, a ich warkocz ciągnie się na kilkanaście stopni. Ostatnie 20 lat obfitowało w pojawianie się jasnych komet, które stawały się prawdziwymi ozdobami pogodnego nieba.

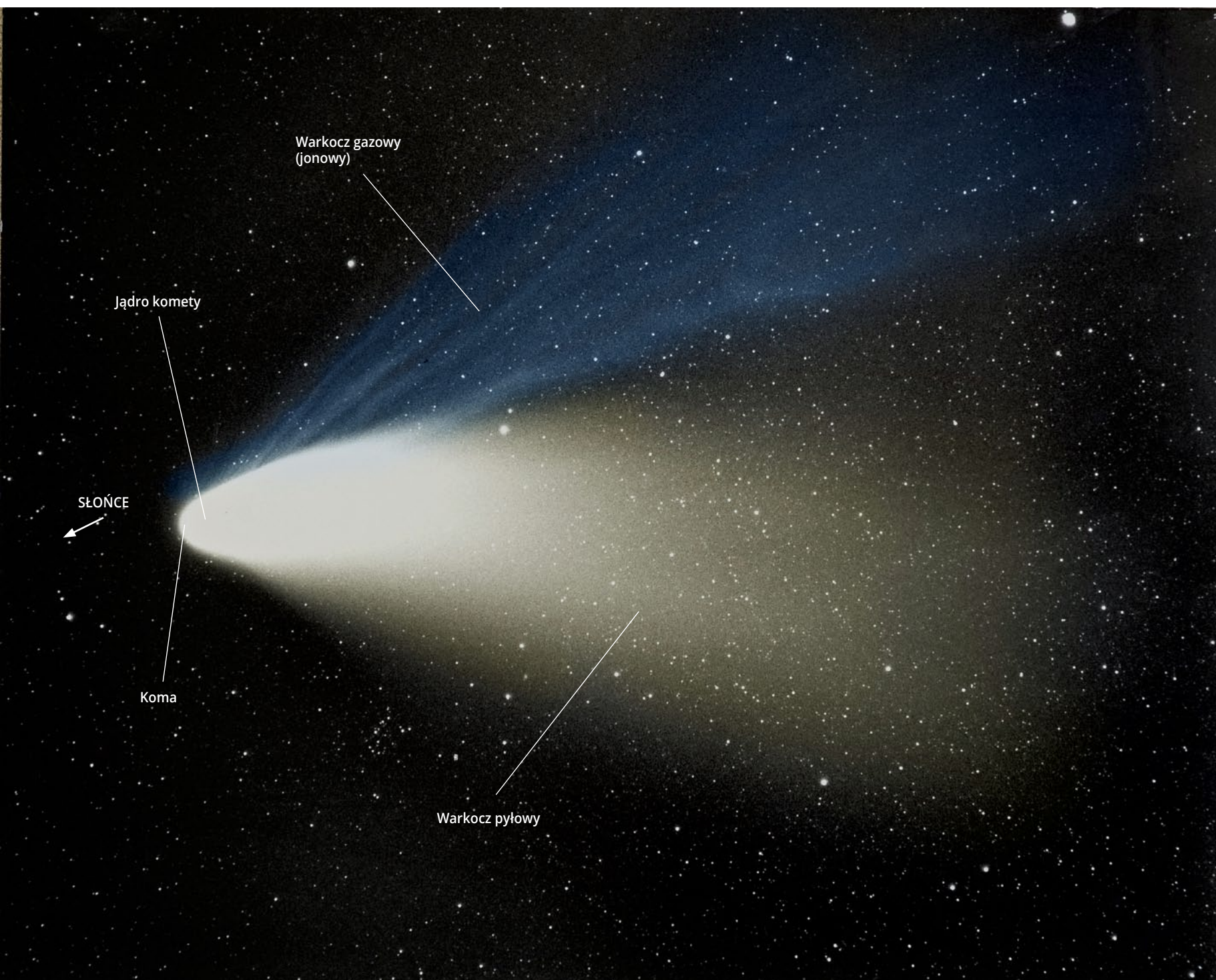
Kometa to małe ciało niebieskie poruszające się w obrębie układu planetarnego po bardzo wydłużonej orbicie,

które na krótko pojawia się w pobliżu gwiazdy centralnej (w naszym układzie w pobliżu Słońca). Promieniowanie gwiazdy powoduje, że wokół komety powstaje gazowa otoczka zwana komą. Kometa wykazuje aktywność, kiedy przebywa w pobliżu gwiazdy, po czym znika w odległych rejonach układu planetarnego, gdzie przyjmuje postać zamrożonej kuli skalno-lodowej.

Kometa składa się z jądra i dwóch warkoczy: gazowego i pyłowego. Jej jądro jest zbudowane z mieszaniny pyłów i drobnych odłamków skalno-lodowych, czasem lodu wodnego, zestalonego dwutlenku

węgla, amoniaku i metanu. Średnica jądra jest zwykle niewielka – z reguły wynosi od kilku do kilkunastu kilometrów. Warkocze powstają w efekcie wyrzucania materii w przestrzeń kosmiczną. Warkocz gazowy zawsze jest zwrócony w kierunku przeciwnym do gwiazdy, co wynika z oddziaływania wiatru słonecznego. Wiatr słoneczny to silny strumień plazmy wypływający gwałtownie ze Słońca, składający się przede wszystkim z protonów, elektronów i cząstek alfa. Warkocz pyłowy składa się natomiast z reguły z drobin zbyt masywnych, by wiatr słoneczny mógł znacząco zmienić kierunek ich ruchu.

- ▼ Budowa komety. Na zdjęciu kometa Hale'a-Boppa, którą można było obserwować w latach 1996–1997. Ze względu na jej wielkość oraz możliwość długiej obserwacji została okrzyknięta Wielką Kometą z 1997 r.





Ludzkość od dawna uznawała komety za ciała bardzo tajemnicze. Łączono z nimi różne zdarzenia, zazwyczaj nieszcześnie. Tymczasem nie ma naukowych potwierdzeń tych teorii, choć zderzenie komety z innym ciałem niebieskim może być przyczyną zdarzeń katastrofalnych. Istnieje na przykład przypuszczenie, że zdarzenie

impaktowe na Syberii w 1910 r., związane upadkiem meteorytu tunguskiego, mogło wynikać z uderzenia w Ziemię jądra komety.

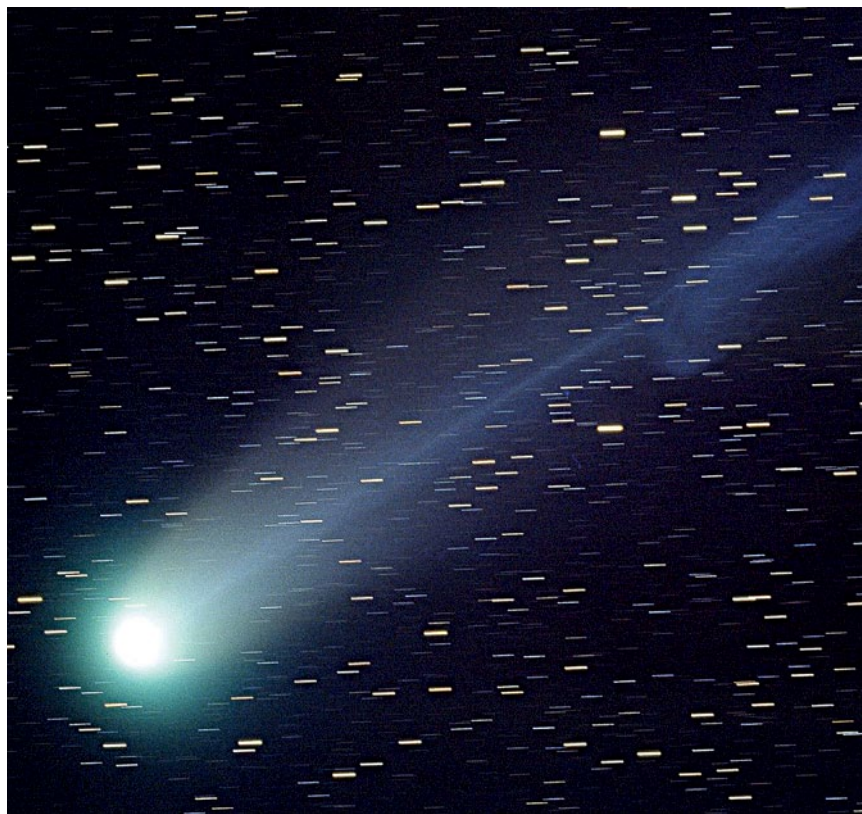
Dotychczas odnotowano pojawienie się na niebie znacznie powyżej 1000 komet. W centralnych obszarach Układu Słonecznego każdego roku można zaobserwować kilkaset małych komet,

ale tylko o kilku informują media. Raz na kilka lub kilkanaście lat pojawia się kometa, którą można dostrzec gołym okiem nocą na niebie. Do bardziej znanych należą: Halleya, Kohoutka, Enckego, Hyakutake, C/2006 P1 (McNaught) – widoczna w Polsce w styczniu 2007 r., Shoemaker-Levy 9 znana z kolizji z Jowiszem.



▲ Kometa Halleya (1P/Halley). Zdjęcie z 29 maja 1910 r.

▲ Kometa Kohoutka (C/1973 E1). Zdjęcie z 11 stycznia 1974 r.



▲ Kometa Hyakutake (C/1996 B2). Zdjęcie z 25 marca 1996 r.

▼ Kometa C/2006 P1 (McNaught). Zdjęcie z 20 stycznia 2007 r. (Nowa Zelandia)







▲ Międzynarodowa Stacja Kosmiczna. Zdjęcie wykonane 23 maja 2010 r. z pokładu promu Atlantis (misja STS-132)

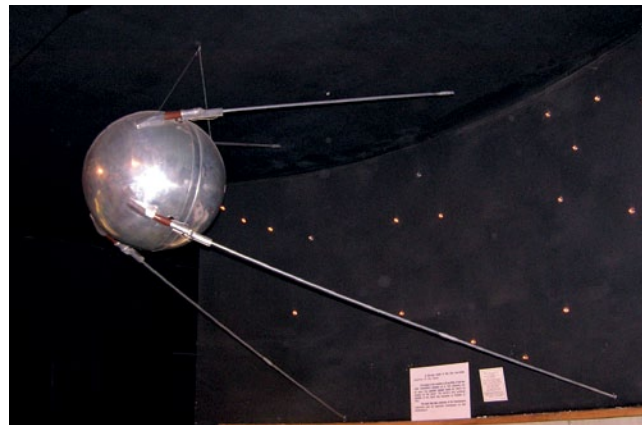
### SZTUCZNE SATELITY ZIEMI

Specyficzna i odrębna kategoria ciał niebieskich to sztuczne satelity. Z pewnością każdy miał okazję śledzić mniej lub bardziej jasne punkciki, które z dość dużą prędkością przemierzają nieboskłon w różnych kierunkach. Czasem niektóre z nich na moment jaśnieją i stają się w danej chwili najjaśniejszym obiektem na niebie, po czym przygasają i się oddalają. Warto sobie uświadomić, że jeszcze 60 lat temu nie były widoczne na niebie, ponieważ era podboju kosmosu rozpoczęła się w 1957 r. wraz z wystrzeleniem na orbitę Sputnika 1. Od tego czasu wokół Ziemi krąży kilka tysięcy różnych urządzeń skonstruowanych przez człowieka. Pełnią one wiele funkcji, m.in. dostarczają danych i zdjęć satelitarnych do prognozy pogody, przesyłają informacje na duże odległości, stale skanują ziemską biosferę przez kamery satelitów badawczych, wykonują pomiary geologiczne i hydrologiczne, poszukują złóż surowców, śledzą strumienie zanieczyszczeń i wiele innych. Do najciekawszych

sztucznych satelitów naszej planety należy bez wątpienia Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ang. *International Space Station*). Jej stała załoga od kilkunastu lat prowadzi badania Ziemi oraz eksperymenty w warunkach nieważkości. Stację często można obserwować na tle tarczy słonecznej albo Księżyca. Niektóre satelity już się zużyły i stanowią śmieci kosmiczne, inne są naprawiane podczas specjalnych wypraw, niektóre stały się stacjami kosmicznymi i dostosowano je do warunków niezbędnych do pobytu ludzi.

Aby obiekt pozostawał w przestrzeni kosmicznej, musi osiągnąć prędkość kosmiczną. Pierwsza prędkość kosmiczna umożliwia utrzymanie się satelity przy powierzchni. Dla promienia równikowego (6378 km) wynosi ona 7,9 km/s, a dla ciał znajdujących się około 1000 km nad Ziemią 7,35 km/s. Druga prędkość kosmiczna to prędkość, jaką musi uzyskać ciało, aby móc opuścić strefę grawitacji Ziemi i przyjąć orbitę heliocentryczną (przy powierzchni Ziemi wynosi ona 11,2 km/s).

▼ Sputnik 1 – pierwszy sztuczny satelita Ziemi (replika)



▲ Współczesny satelita telekomunikacyjny (grafika)





▲ Hoba – największy dotychczas znaleziony w całości meteoryt na Ziemi (północna Namibia)

## METEOROIDY

Z kometami i planetoidami jest związane zjawisko spadających gwiazd, czyli meteorów. Układ Słoneczny jest wypełniony drobną materią meteoroidową, której zagęszczenia są nieustannie przecinane przez planety, w tym Ziemię. Jeśli jakaś drobinka wejdzie z dużą prędkością w atmosferę, natychmiast ulega spaleni, co z powierzchni obserwacji jest jako meteor. Jak się okazuje, poza sporadycznymi zjawiskami meteorów, które błakając się po przestrzeni międzyplanetarnej, napotkały Ziemię, istnieje cała rodzina ich rojów, które mają wspólną genezę. Tym prąródłem są komety i planetoidy, a dokładnie produkty ich rozpadu.

Meteoroidy to odłamki skalne, mniejsze od planetoid, poruszające się po orbitach heliocentrycznych, o masie od  $10^{-9}$  kg do  $10^3$  kg i średnicy od 0,1 mm do 10 m. Większe obiekty są zaliczane do planetoid, a mniejsze cząstki to pył kosmiczny. Największe z nich, o średnicy powyżej 10 cm, to superbolidy, które spa-

dają na Ziemię raz na kilka lat. Bardziej rozpowszechnione są bolidy o średnicy kilku centymetrów – spada ich nawet kilkadziesiąt w ciągu roku. Mniejsze (rzędu kilku milimetrów) są nazywane są meteorami lub mikrometeorami i wielkości drobin pyłu.

Meteoroidy powstają w wyniku zderzeń planetoid, rozpadu komet lub wybitcia materii z innych ciał przez meteority. Kometa, podróżując poprzez Układ Słoneczny, stopniowo traci część swojej materii w wyniku sublimacji zawartych w niej związków chemicznych. Ta materia porusza się po orbicie bardzo zbliżonej do ciała macierzystego. Jeżeli Ziemia przetnie orbitę komety i jednocześnie napotka na lokalne zagęszczenie produktów jej rozpadu, na niebie obserwujemy zjawisko deszczu meteorów. Czasami jest to tylko kilka lub kilkanaście zjawisk w ciągu godziny, zdarzały się jednak prawdziwe ulewki spadających gwiazd, gdy podczas tylko jednej minuty obserwowano kilkaset czy nawet kilka tysięcy zjawisk, jak w przypadku Leonidów, Drakonidów oraz Kwadrantydów.

Podobnie jest z planetoidami i ich rozpadem, który częściej następuje w wyniku kosmicznych kolizji z inną planetoidą, czasem też po prostu z tego powodu, że sama planetoida jest obiektem składającym się z luźno związanych ze sobą okruchów skalnych, przez co bardzo niestabilnym i pozostawiającym na swojej orbicie okruchy materii meteoroidowej. W związku z tym, że meteory danego roju promieniają z niewielkiego obszaru na niebie zwanego radiantem, przyjęło się nazywać je od konstelacji, w której radiant się znajduje. Stąd Leonidy promieniają z Lwa, Orionidy z Oriona, Geminiidy z Bliźniąt, a Piscydy z Ryb i tak dalej.

Szacuje się, że do ziemskiej atmosfery w ciągu doby trafia 100–1000 t tego typu materii kosmicznej, w większości pyłu. Meteoroidy stanowią duże zagrożenie dla satelitów oraz stacji kosmicznych. Fragmenty, które docierają do powierzchni Ziemi, a nie wyparowują w atmosferze, są nazywane meteorytami. Jeśli są dość duże, mogą również uderzyć w Ziemię i spowodować zniszczenia na jej powierzchni.





- ▲ Ślad meteoru roju Perseidów na tle Drogi Mlecznej. Północna Minnesota, 12 sierpnia 2016 r.
- ▼ Ślad po meteorze roju Leonidów, 17 listopada 2009 r.



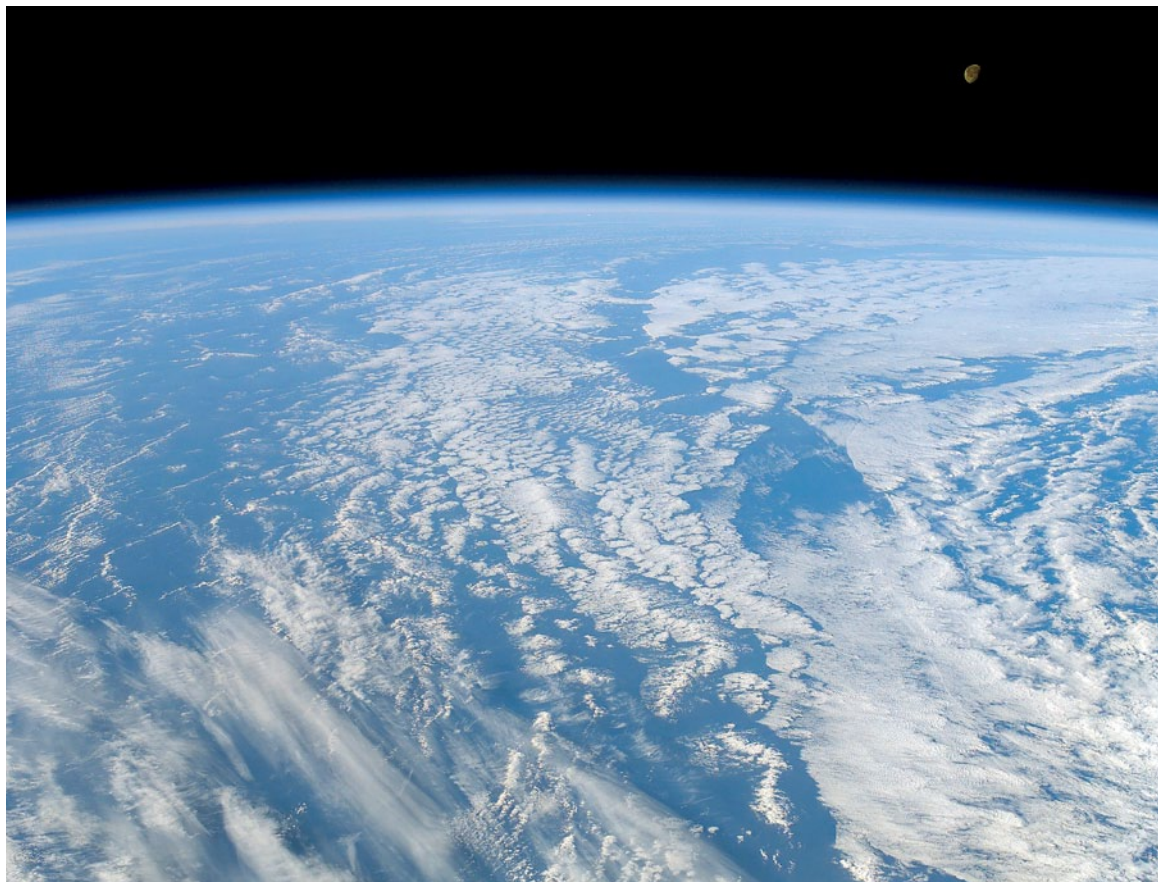




# ATMOSFERA

## **Z CZEGO SKŁADA SIĘ POWIETRZE I JAK POWSTAŁA ATMOSFERA ZIEMSKA?**

Powierzchnię Ziemi otacza cienka powłoka składająca się głównie z mieszaniny gazów nazywana powietrzem. To ziemska atmosfera i można powiedzieć, że nasze życie upływa na jej dnie. Powietrzem atmosferycznym oddychamy od narodzin do śmierci. Powłoka gazowa otaczająca Ziemię ma szereg specyficznych cech, m.in. jest ściśliwa i w związku z tym jej gęstość maleje wraz ze wzrostem wysokości, a atmosfera zanika bez wyraźnej granicy. Połowa całej masy atmosfery koncentruje się na dolnych 5 km,  $\frac{3}{4}$  w dolnych 10 km, a  $\frac{9}{10}$  w dolnych 20 km. Jednak jeszcze na bardzo dużej wysokości można stwierdzić istnienie rozrzedzonej atmosfery, a jej istnienie na wysokości od około 100 km wzwyż wykazują na przykład zorze polarne. Na wysokości około 400–500 km następuje stopniowe przejście atmosfery w przestrzeń międzyplanetarną.



▲ Ziemską atmosferę i Księżyc widziane z promu kosmicznego Columbia



Powstanie atmosfery było wynikiem emisji gazów z wnętrza Ziemi we wczesnym etapie rozwoju naszej planety. Pierwotna atmosfera sprzed 4,5 mld lat składała się głównie z pary wodnej, wodoru, chlorowodoru, tlenku i dwutlenku węgla oraz azotu, a następnie ewoluowała w toku historii geologicznej planety. Jej pierwotny skład daleko odbiega od obecnego, można nawet powiedzieć, że w porównaniu z aktualnym był to ośrodek zabójczy dla niemal każdej żywej istoty. Niezbędny do życia człowieka i większości współczesnych organizmów tlen jest produktem fotosyntezy.

Podstawowymi składnikami atmosfery są gazy: azot ( $N_2$ ) i tlen ( $O_2$ ). W znacznie mniejszych ilościach występują dodatkowo także: argon (Ar), dwutlenek węgla ( $CO_2$ ) oraz krypton, ksenon, neon, hel, wodór, ozon, jod, radon, metan, amoniak i inne. W tej mieszaninie, blisko powierzchni Ziemi, znajdują się drobne kropelki wody i drobiny lodowe, a także nieliczne i występujące w zmiennej ilości mikroskopijnej wielkości cząstki stałe pochodzenia organicznego i nieorganicznego: pyłki roślin, rozdrob-

nione cząstki skał itp. Skład i proporcje ilościowe suchego powietrza atmosferycznego do wysokości około 80 km są stałe w odniesieniu do azotu, tlenu, wodoru i gazów szlachetnych. W powietrzu występują również składniki gazowe, których ilość zmienia się w przestrzeni i czasie. Należą do nich: dwutlenek węgla ( $CO_2$ ), para wodna ( $H_2O$ ) oraz ozon ( $O_3$ ). Te niestałe składniki dolnej atmosfery, chociaż występują w niewielkiej ilości, odgrywają niezmiernie ważną rolę w systemie przyrody ziemskiej.

### WARSTWOWA BUDOWA ATMOSFERY

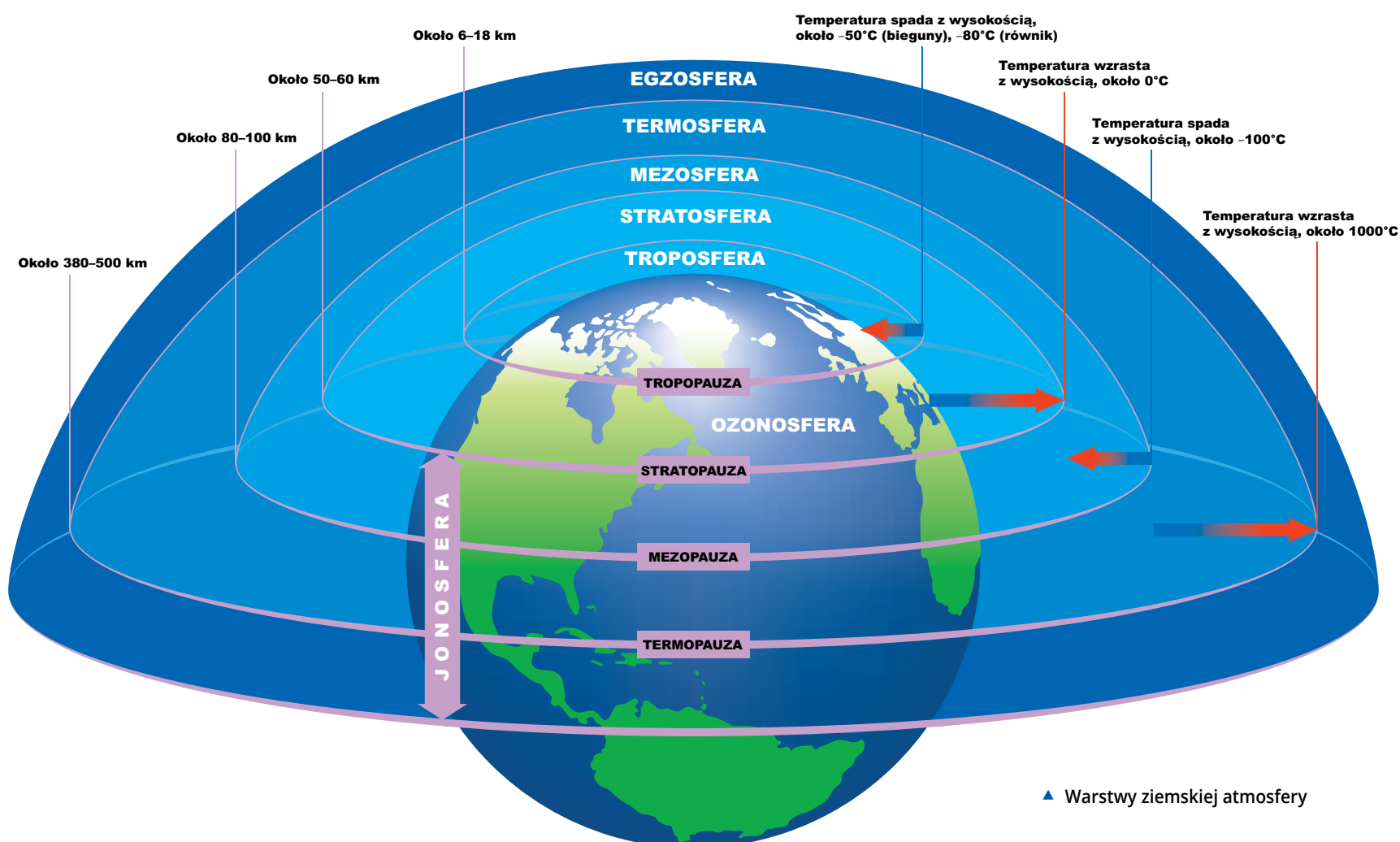
Atmosfera ziemska jest prawie przezroczysta dla promieniowania słonecznego, które w związku z tym dociera do powierzchni Ziemi i ją ogrzewa. Atmosfera jest natomiast ogrzewana ciepłem wydzielanym przez grunt. Ciepło promieniujące od Ziemi jest pochłaniane przez parę wodną oraz cząsteczki pyłów i  $CO_2$ , a na większych wysokościach także przez ozon. W związku z tym, że  $H_2O$ , pyły i  $CO_2$  znajdują się w większej ilości w niższych warstwach atmosfery, jej

### OBECNY SKŁAD CHEMICZNY GAZOWEJ POWŁOKI ZIEMI

78% azot,  
21% tlen,  
0,9% argon,  
0,04% dwutlenek węgla

oraz śladowe ilości gazów szlachetnych, takich jak hel, krypton, neon, ksenon.

temperatura maleje wraz z wysokością. Kiedyś sądzono, że spadek temperatury w atmosferze występuje ciągle, aż po jej górną granicę. Jednak na podstawie pomiarów temperatury ustalono, że od pewnej wysokości temperatura powietrza jest stała i nie zmienia się wraz z wysokością, a dalej nawet wzrasta. Udowodniono tym samym warstwową budowę atmosfery ziemskiej i wyróżniono kilka odrębnych jej części składowych. Najbliżej powierzchni Ziemi znajduje się troposfera. Tutaj odbywa się większość zjawisk mających znaczenie dla kształtowania stanów pogodowych i klimatów kuli ziemskiej.





Troposfera odznacza się stałym spadkiem temperatury wraz z wysokością, wynoszącym około  $0,5-1^{\circ}\text{C}$  na każde 100 m wzniesienia. Wraz z wysokością spada także ciśnienie atmosferyczne. W troposferze zachodzi nieustanne mieszanie się powietrza w wyniku turbulencji i konwekcji. Grubość tej warstwy atmosfery jest zmienna i wynosi nad biegunami około 6–7 km, w średnich szerokościach geograficznych 10–12 km, a nad równikiem 16–18 km. W troposferze występuje para wodna oraz powstają efekty jej kondensacji, czyli chmury (niskie, średnie, wysokie). Troposferę od następnej warstwy – stratosfery – oddziela strefa przejściowa zwana tropopauzą o grubości około 2 km. Przy górnej granicy troposfery temperatura osiąga wartość od  $-60$  do  $-90^{\circ}\text{C}$ .

Powyżej tropopauzy rozpościera się stratosfera, sięgająca do wysokości około 55 km. Charakterystyczną cechą stratosfery jest prawie całkowity brak ruchów powietrza w pionie, w związku z tym gazy wchodzące w jej skład układają się

w warstwy zależnie od gęstości. Od tego wywodzi się nazwa tej części atmosfery – od łacińskiego rzeczownika *stratum*, co oznacza warstwę. Dolna część stratosfery, od tropopauzy do wysokości 35 km, jest pozbawiona chmur (brak pary wodnej) i odznacza się prawie stałą temperaturą. W rzeczywistości temperatura wzrasta tu bardzo powoli wraz z wysokością. Powyżej 35 km wzrost temperatury powietrza jest już bardzo wyraźny. Na wysokości 50 km panuje temperatura bliska  $0^{\circ}\text{C}$ . Wzrost temperatury w stratosferze jest związany z obecnością ozonu, którego molekuły pochłaniają promieniowanie ultrafioletowe, co powoduje wydzielanie się ciepła. Powyżej 55 km rozciąga się cienka strefa zwana stratopauzą, oddzielająca stratosferę od kolejnej warstwy, czyli mezofery.

Mezosfera, określana mianem zimnej warstwy atmosfery ziemskiej, sięga od 55 do 80 km ponad powierzchnię naszej planety. Temperatura zmniejsza się tu bardzo wyraźnie wraz z wysokością i przy górnej granicy warstwy

osiąga  $-60^{\circ}\text{C}$ , a miejscami nawet  $-100^{\circ}\text{C}$ . Obecność niewielu kryształków lodowych powoduje, że mogą tu powstawać charakterystyczne świecące obłoki mezoferyczne. Strefą przejściową między mezosferą a wyżej leżącą warstwą atmosfery jest mezopauza.

Termosfera to kolejna warstwa budująca atmosferę ziemską. Jej dolna część odznacza się silną jonizacją i wysokimi temperaturami. Ten fragment jest nazywany w związku z tym jonosferą. Związana z jonizacją gazów wysoka temperatura na wysokości 120 km dochodzi do  $100^{\circ}\text{C}$ , a jeszcze wyżej osiąga wartość nawet około  $1000^{\circ}\text{C}$ . W związku z silną jonizacją gazów w termosferze zachodzi zjawisko zorzy polarnej, inaczej *aurora borealis*, która powstaje w wyniku działania wiatru słonecznego na zjonizowane atomy i cząstki gazów. Zorza przybiera postać jednolitych pasów, świetlistych obłoków o barwie żółtozielonej, rzadziej czerwonej lub fioletowej. Najlepiej jest widoczna w porze zimowej w wysokich szerokościach geograficznych.

▼ Zorza polarna. Niebiesko-fioletowa barwa jest wywołana świeceniem wodoru i helu





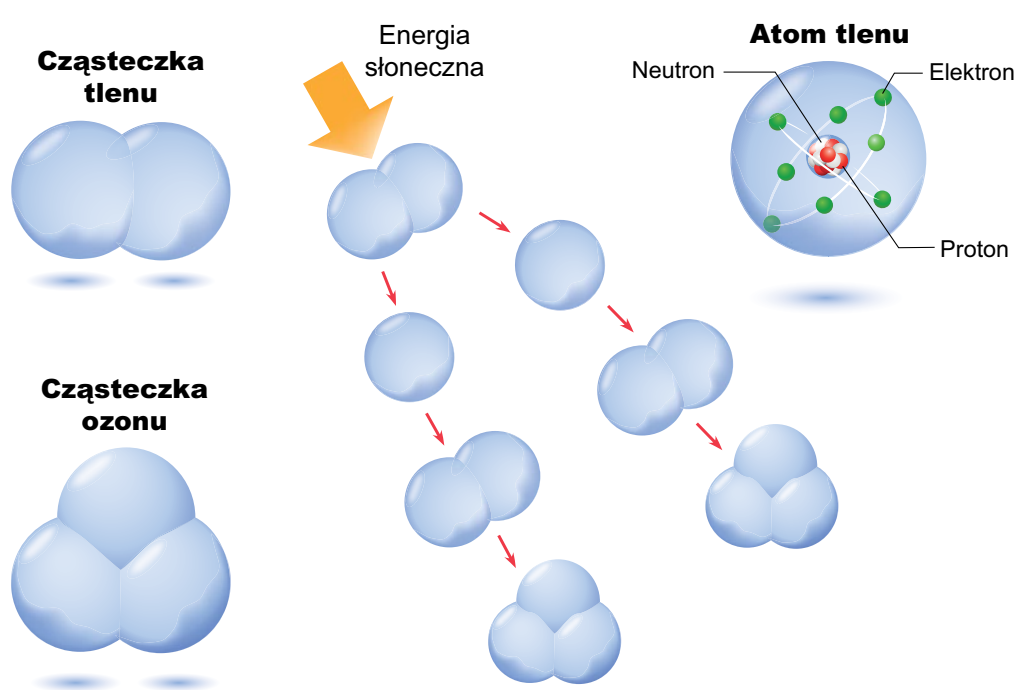
W jonosferze emitowane przez Słońce promieniowanie gamma oraz promieniowanie rentgenowskie (X) są pochłaniane przez cząstki azotu i tlenu. Atomy tlenu i azotu tracą przez to jeden lub więcej elektronów, stając się jonami o ładunkach dodatnich. Jonosfera odgrywa tym samym bardzo istotną rolę w rozchodzeniu się fal elektromagnetycznych emitowanych przez Słońce. Interesującą i ważną właściwością jonosfery jest zdolność do odbijania fal radiowych, zwłaszcza krótkich, wysyłanych i odbieranych na całej powierzchni Ziemi. Zaburzenia w jonosferze wywołane przez zmiany w natężeniu emitowanego przez Słońce promieniowania ultrafioletowego powodują zaburzenia w rozchodzeniu się fal radiowych.

Ostatnią, najwyższą warstwą atmosfery jest egzosfera, która znajduje się na wysokości powyżej 400 km i stanowi w zasadzie strefę przejściową między atmosferą ziemską a przestrzenią międzyplanetarną. Gęstość powietrza jest tu znikoma, a od wysokości 700 km występują tylko pojedyncze molekuły gazów, głównie wodoru, tworzącego tzw. geokoronę.

### WARSTWA OZONOWA – PANCERZ OCHRONNY ZIEMI

Tlen jest ważnym składnikiem atmosfery. Najczęściej występuje w postaci cząstek składających się z dwóch atomów. Znacznie rzadziej w przyrodzie trafia się jego odmiana składająca się z trójatomowych cząstek, nazwana ozonem  $O_3$ . Ilość ozonu w atmosferze ziemskiej jest znikoma. Gdyby zgromadzić cały ozon atmosferyczny przy powierzchni Ziemi, utworzyłby on warstwę o grubości zaledwie 3 mm (300 dobsonów).

Ozon przy powierzchni terenu powstaje w wyniku wyładowań atmosferycznych, a także w rezultacie procesów fotochemicznych zachodzących w zanieczyszczonym spalinami powietrzu. Ten gaz odznacza się bardzo silnymi właściwościami toksycznymi. Stanowi główny trujący składnik brunatnożółtego smogu fotochemicznego (smog typu Los Angeles), będącego zmorą wielkich miast w czasie gorących letnich dni. Większość ozonu atmosferycznego na szczęście jest skupiona w stratosferze na wysokości około 20–40 km. Z tego powodu strefa atmosfery zawarta w wy-

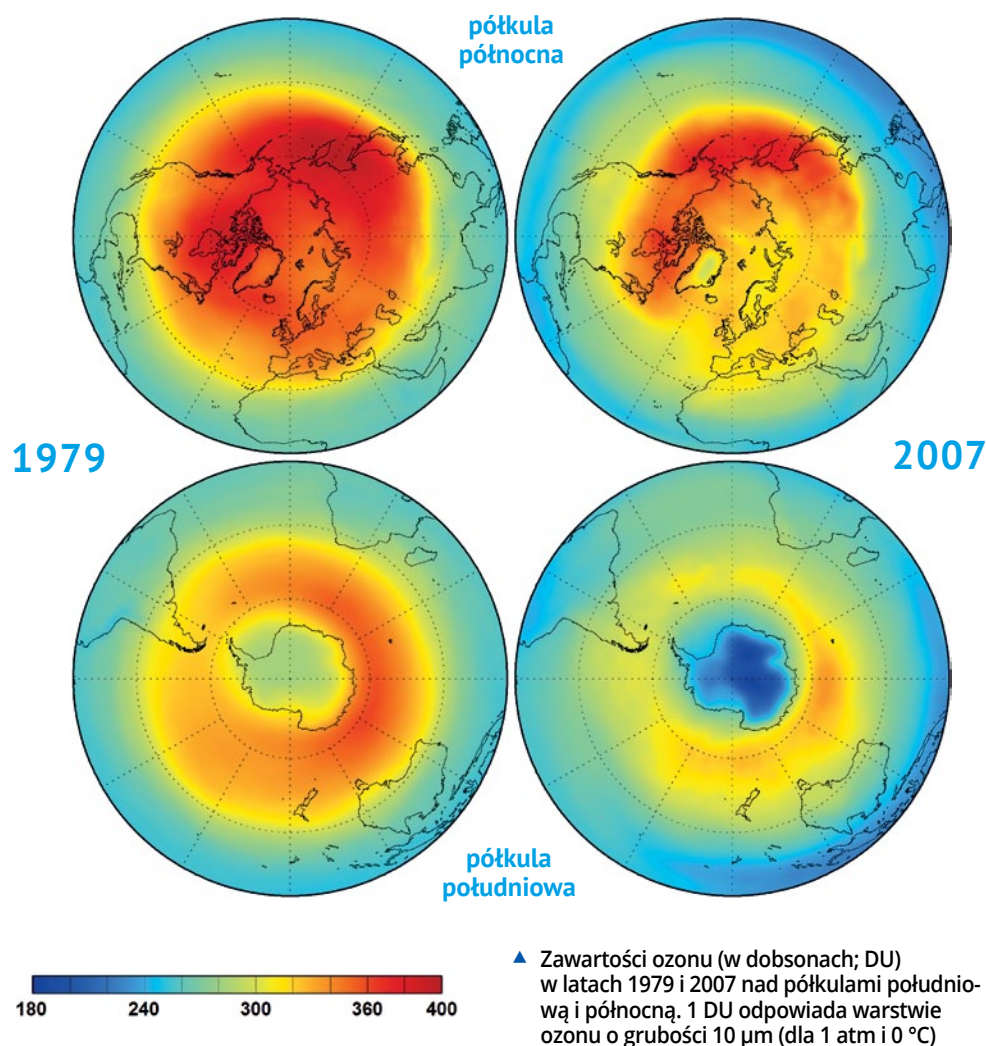


▲ Powstawanie ozonu

mienionym przedziale wysokościowym nosi nazwę ozonosfery. Ozon stratosferyczny powstaje w wyniku działania promieniowania ultrafioletowego na cząsteczki tlenu  $O_2$ , co prowadzi do powstania wolnych atomów tlenu  $O^{2+}$ . Warunkiem powstania tlenu trójatomowego jest dostatecznie gęsta atmosfera, w któ-

rej występuje duże prawdopodobieństwo zajścia tzw. potrójnych zderzeń cząstek tlenu  $O_2$  z atomami tlenu  $O^{2+}$  i cząsteczką neutralną  $M$  (na przykład  $N_2$ ). Powstaje wówczas tlen  $O_3$  – czyli ozon.

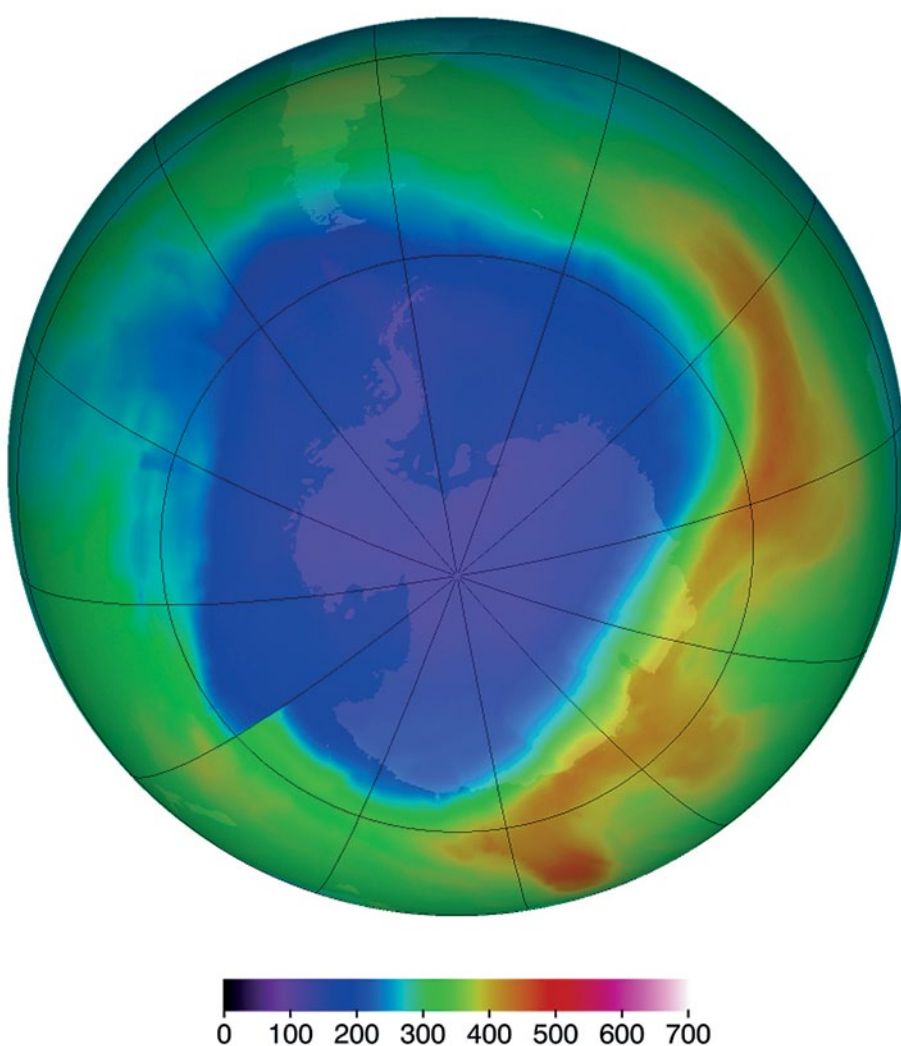
Występujący w znikomej ilości w stratosferze ozon spełnia dwie ważne funkcje w systemie przyrodniczym







▲ Do zmniejszenia koncentracji ozonu w atmosferze (dziury ozonowe) w znacznym stopniu przyczyniają się zanieczyszczenia powietrza



▲ Zawartość ozonu w atmosferze nad półkulą południową (16 września 2013 r.) – wyraźnie widoczna ogromna dziura ozonowa nad Antarktydą

Ziemi. Przede wszystkim przekształca nadfioletowe promieniowanie słoneczne w energię ciepłą i kształtuje tym samym bilans cieplny Ziemi. Pochłaniając promieniowanie nadfioletowe (ultrafioletowe – UV), ogranicza jego dopływ do powierzchni naszej planety. Słońce emituje szkodliwe dla życia promieniowanie UV o długości fal od 10 do 400 nm. Pancerzowi ochronnemu Ziemi, jakim jest warstwa ozonowa, zagrażają działania człowieka. Spaliny odrzutowców, eksplozje nuklearne i emisja szkodliwych freonów powodują zmniejszenie koncentracji ozonu w atmosferze, obniżając tym samym efektywność naturalnego filtra, jakim jest ten gaz. Promieniowanie ultrafioletowe to śmiertelne zagrożenie dla życia biologicznego na powierzchni naszej planety. Promienie UV docierające w większej ilości do powierzchni powodują choroby nowotworowe skóry, osłabienie systemu immunologicznego człowieka, spadek plonów roślin uprawnych, choroby oczu u ludzi i zwierząt oraz zwiększenie problemów związanych z powstawaniem smogu fotochemicznego. Gdyby cała dawka emitowanego przez Słońce promieniowania UV docierała do Ziemi, życie biologiczne na jej powierzchni nie byłoby możliwe.



## BŁĘKIT NIEBA I CZERWONE ZACHODY SŁOŃCA

Obserwując atmosferę ziemską w bezchmurny dzień przy czystym powietrzu, można podziwiać intensywny błękit nieba. To optyczne zjawisko to rezultat przenikania promieniowania słonecznego przez atmosferę. W trakcie przejścia promieni świetlnych następuje ich częściowe rozproszenie na cząstkach gazów wchodzących w skład atmosfery. Rozproszenie obejmuje w najwyższym stopniu fioletową część promieniowania. Mała intensywność fioletu w widmie promieniowania oraz określona czułość ludzkiego wzroku powodują, iż niebo dla naszych oczu ma barwę niebieską. Gdyby Ziemia nie miała atmosfery, widziane z jej powierzchni niebo miałoby barwę czarną. W ten sposób postrzegali niebo astronomi amerykańscy podczas spaceru po powierzchni Księżyca (Księżyc nie ma powłoki gazowej). Obecne w atmosferze domieszki, cząstki pyłu oraz kropelki wody powodują, że rozproszeniu podlegają wszystkie pasma promieniowania słonecznego, dlatego niebo w dzień jest czasami szare, jasnoszare lub prawie białe.

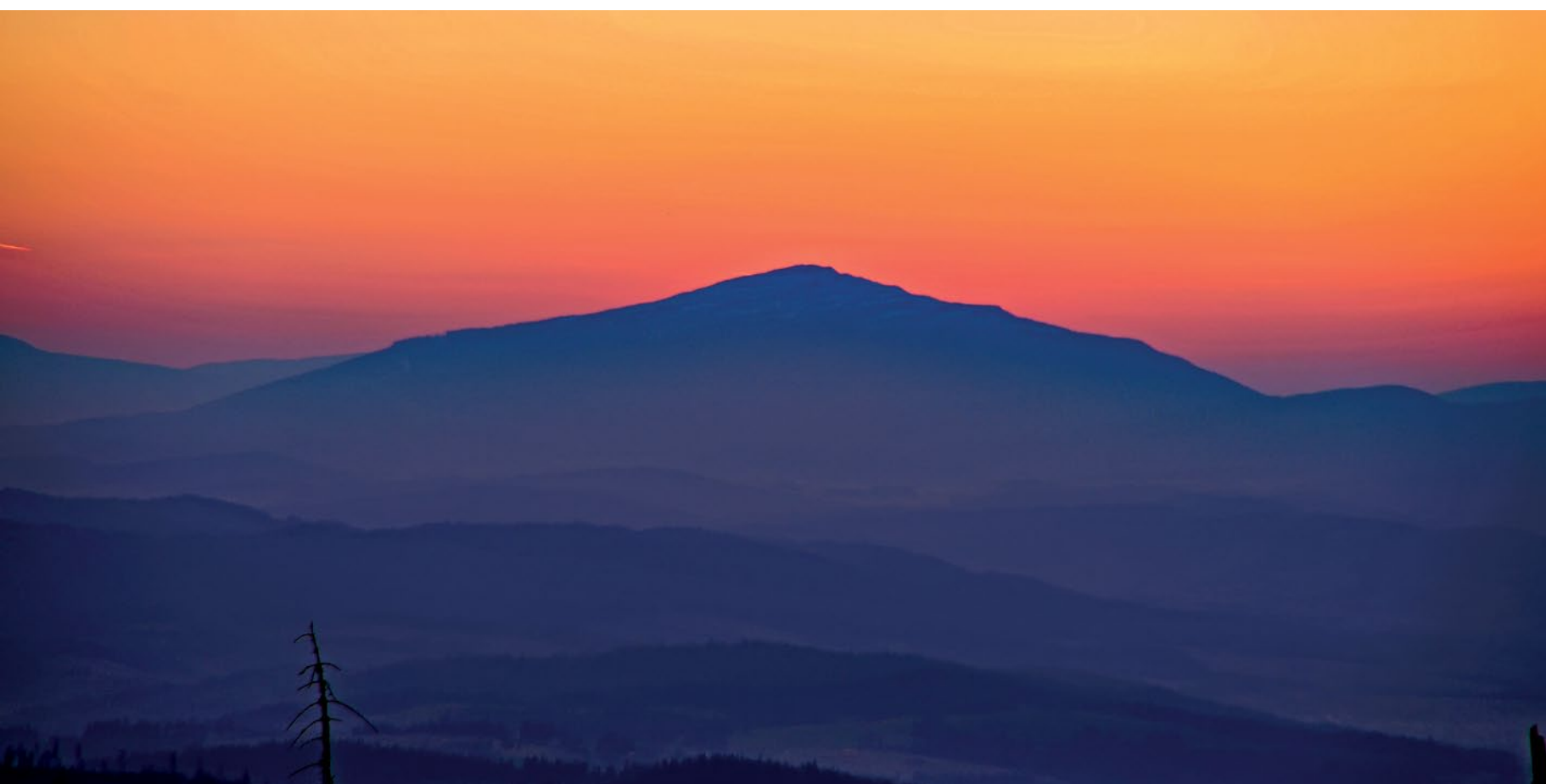


▲ Błękitny kolor nieba to efekt rozpraszania światła przechodzącego przez atmosferę. Szarobiały kolor (najczęściej nad horyzontem) wynika z obecności wody i zanieczyszczeń. Beskid Śląski

Promienie słoneczne w zależności od pory dnia docierają do powierzchni terenu pod różnymi kątami. Wieczorem kąt padania jest niewielki, dlatego światło docierające do górnej powierzchni musi przejść przez znacznie grubszą warstwę powietrza. W tym przypadku fale świetlne o mniejszej

długości (fioletowe i niebieskie) są rozpraszane i nie trafiają do oczu obserwatora. Docierają za to fale o największej długości, czyli czerwone. Czerwone światło jest rozpraszane przez drobiny lodu i wody, co powoduje, że zbudowane z nich chmury mienią się barwami czerwieni, różu i purpury.

▼ Pomarańczowoczerwone niebo tuż po zachodzie słońca. Zdjęcie z Turbacza w Gorcach w kierunku Babiej Góry





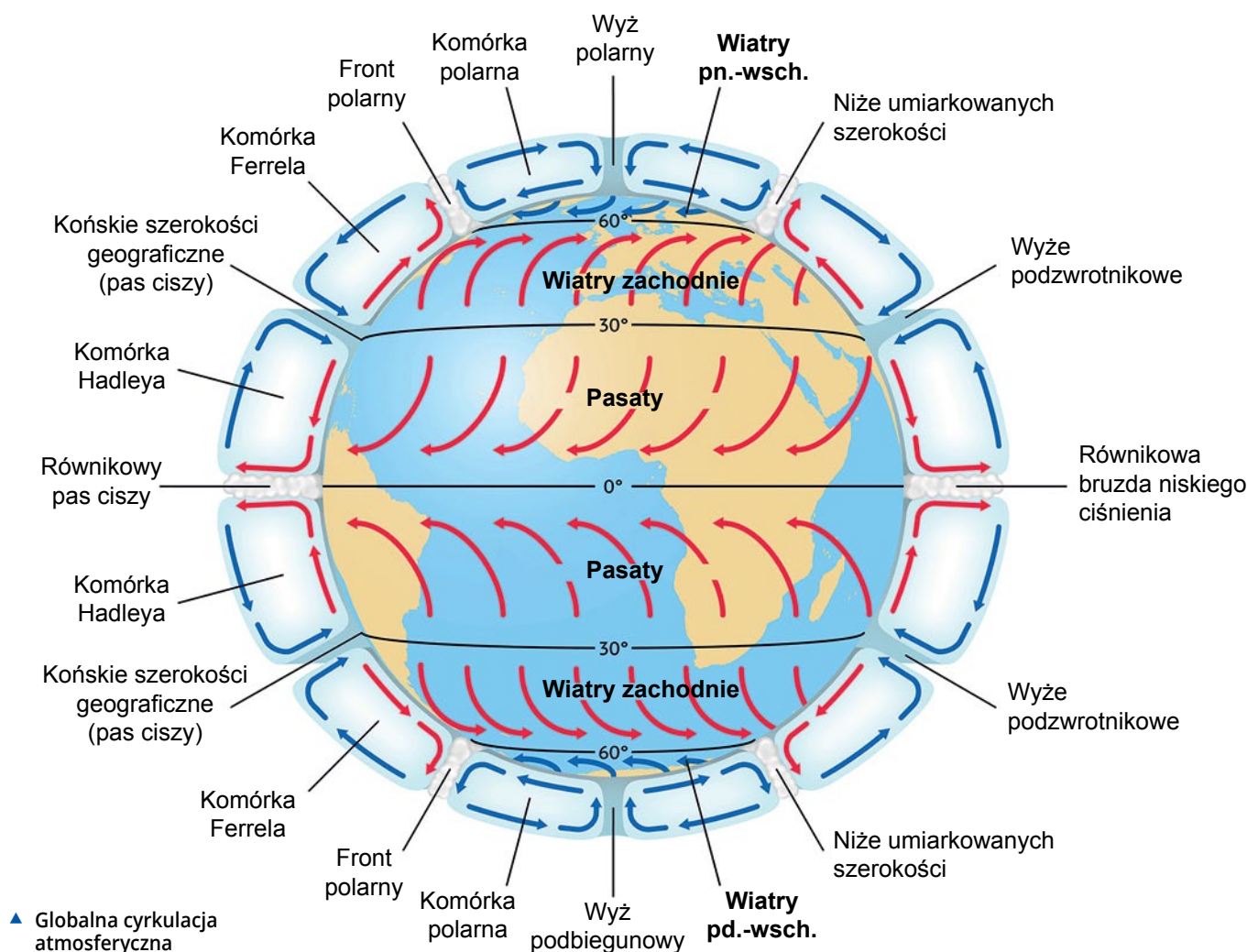
## CYRKULACJA ATMOSFERY, CZYLI JAK POWSTAJE WIATR

Atmosfera ziemiska w warstwie przypowierzchniowej odznacza się wielką dynamiką. Na styku powietrza, wody i lądu w wyniku dopływu energii słonecznej zachodzą różnorodne i bardzo gwałtowne procesy fizyczne wywołujące m.in. pionowe i poziome ruchy mas powietrza atmosferycznego. Powietrze atmosferyczne troposfery nieustannie się przemieszcza. Przy jego globalnym krążeniu podstawowe znaczenie ma istnienie pasa obniżonego ciśnienia wokół równika. Strefa równikowa jest silnie nagrzewana, w związku z tym w wyniku konwekcji (proces przenoszenia ciepła w gazach i cieczech) następuje ogrzewanie i wznoszenie powietrza, co w efekcie powoduje jego rozrzedzenie przy powierzchni i równocześnie obniżenie ciśnienia. We wznoszącym się i oziębiającym powietrzu zachodzi proces kondensacji pary wodnej, skutkujący powstaniem chmur oraz obfitych opadów atmosferycznych zwanych deszczami zenitalnymi. W obszarach podbiegunowych, gdzie dociera niewiele energii słonecznej, osiada

zimne, gęste powietrze i formują się rozległe, biegunowe wyży baryczne. Różnica ciśnień wynikająca z nierównomiernego ogrzania powierzchni Ziemi w obszarze równikowym oraz terenach biegunowych jest motorem wprawiającym w ruch przypowierzchniowe masy powietrza. W tym schemacie krążenie powietrza w skali planetarnej byłoby bardzo proste, gdyby nie fakt, że Ziemia wiruje wokół swojej osi. Ruch Ziemi powoduje, że poruszające się cząstki powietrza nie przemieszczają się wprost z miejsc o wysokim ciśnieniu do miejsc o niskim ciśnieniu. Nie występuje prosty przepływ powietrza od biegunowych wyżów ku równikowej bruzdzie niskiego ciśnienia, bowiem przepływ jego cząstek zakłóca siła Coriolisa, czyli pozorna siła wywołana ruchem obrotowym Ziemi z zachodu na wschód, która na półkuli północnej powoduje odchylenie kierunku ruchu ciał w prawo oraz w lewo na półkuli południowej, dzięki czemu zmienia się ich teoretyczny tor ruchu.

Globalne krążenie powietrza w dolnej atmosferze wynikające z różnicy ciśnień z uwzględnieniem działania siły Coriolisa powoduje, że powstają trzy

komórki cyrkulacyjne zwane komórkami Hadleya, Ferrela i polarnymi, między którymi zachodzi pozioma wymiana powietrza oraz wymiana w przekroju pionowym. Powietrze nad równikiem jest silnie ogrzewane, bowiem Słońce dostarcza tutaj największą ilość energii promienistej. Istnienie związanych z tym bardzo silnych prądów konwekcyjnych powoduje obniżenie ciśnienia atmosferycznego w strefie okołorównikowej oraz powstanie pasa ciszy przy powierzchni Ziemi. Nad równikiem prądy wznoszące występują stale. Nisko nad równikiem ciśnienie jest więc obniżone, a w wyższej warstwie – podwyższone. W związku z tym powietrze wysoko nad równikiem odpływa na zewnątrz, ku wyższym szerokościom geograficznym. Nie dociera jednak do biegunów, gdyż już około 30° szerokości geograficznej północnej i południowej odchyła się w wyniku działania siły Coriolisa w taki sposób, że jego przepływ obiera kierunek zachodni. Na szerokościach zwrotnikowych tworzą się zapory powietrza niepozwalające na swobodne przemieszczanie się mas znad równika dalej ku północy. Większość powietrza







▲ Jednym ze skutków globalnej cyrkulacji atmosferycznej jest istnienie wielkich pasów pustyń na obu półkulach w pobliżu 30° szerokości geograficznych. Na zdjęciu Sahara w południowym Maroku

zstępuje ku dołowi i przy powierzchni tworzy strefę zwrotnikowych wyżów barycznych. W środkowych częściach tych pasów wysokiego ciśnienia wiatry są bardzo słabe. Dawniej żaglowce płynące po oceanach musiały w okolicach 30° szerokości geograficznej na obu półkulach długo czekać na sprzyjający silniejszy podmuch wiatru. Te obszary w krajach anglosaskich zyskały nazwę końskich szerokości w związku z masowym wyrzucaniem zwierząt za burtę w okresach długiego oczekiwania na wiatr z powodu braku paszy i wody dla zwierząt. Z pasów podzwrotnikowych podwyższonego ciśnienia powietrze odpływa dołem ku równikowi. Te dolne wiatry noszą nazwę pasatów, a górne antypasatów. Osiadające w rejonie zwrotników powietrze ogrzewa się adiabatycznie i w związku z tym jego względna wilgotność jest bardzo niska. Nie powstają chmury i w związku z tym brak jest opadów, a ponieważ panują tam wysokie temperatury, powstają pustynie. Największe pustynie świata leżą w strefach wysokiego ciśnienia w pasie przebiegającym na obu półkulach w pobliżu 30° szerokości geograficznych.

W umiarkowanych szerokościach geograficznych pomiędzy wyżami podzwrotnikowymi a wyżami arktycznym i antarktycznym tworzą się pasy obniżonego ciśnienia, w których kierunku przemieszcza się osiadające w wyżach powietrze: ciepłe napływające od zwrotników, przepływające generalnie w kie-

runku północno-wschodnim na półkuli północnej (wiatry zachodnie półkuli północnej) oraz w kierunku południowo-wschodnim na półkuli południowej (wiatry zachodnie półkuli południowej).

W obszarach podbiegunowych, gdzie następuje osiadanie powietrza z wyższych warstw troposfery, przy powierzchni powstają układy wysokiego ciśnienia. Zimne powietrze odpływa stamtąd i pod wpływem siły Coriolisa zmienia kierunek. Na obu półkulach od wyżów biegunowych odpływa powietrze ku zachodowi, czyli wieją wiatry wschodnie półkul północnej i południowej. W strefie umiarkowanych szerokości geograficznych, około 60°, ciepłe masy powietrza

płynące od zwrotników stykają się z zimnymi napływającymi od biegunów. Na styku tych mas powstają polarne fronty atmosferyczne (front polarny półkul północnej i południowej). Powietrze ciepłe wznosi się tu po łagodnie nachylonej powierzchni frontowej i odpływa górą w kierunku bieguna. Przy powierzchni formuje się strefa niskiego ciśnienia. Płynące górą ciepłe powietrze stopniowo się ochładza i w rejonie bieguna opada. W średnich szerokościach następuje zatem spotkanie poruszających się w przeciwnych kierunkach mas powietrza o odmiennych właściwościach fizycznych. Prowadzi to do powstania na ich styku zawirowań, czyli wędrownych ośrodków



▲ System niżowy średnich szerokości w okolicy Islandii (4 września 2003 r.)





▲ Ciemne monsunowe chmury nad południową Azją

niskiego ciśnienia, przemieszczających się z zachodu na wschód na obu półkulach. Pas niskiego ciśnienia zostaje przez to rozbity na pojedyncze ośrodki niżowe.

Na globalny układ cyrkulacji powietrza w dolnej atmosferze nakłada się system lokalnych wiatrów zakłócających ruch powietrza w skali planetarnej. Drugorzędną w stosunku do planetarnej cyrkulacją, będącą potężnym zaburzeniem atmosferycznym, jest cyrkulacja monsunowa, rozwijająca się na styku wielkich obszarów

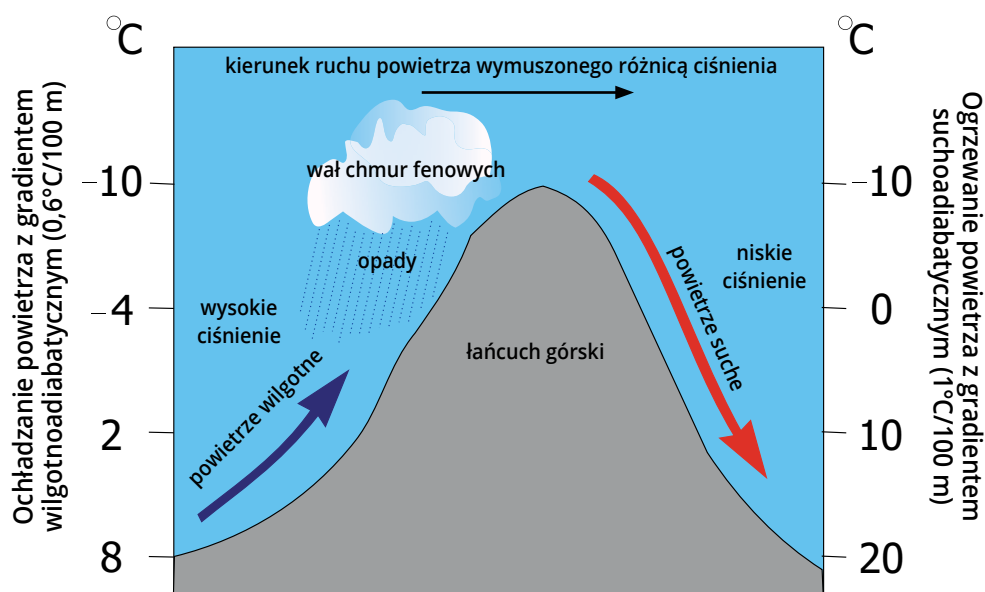
kontynentalnych i oceanicznych. Cyrkulacja ta najpełniej jest rozwinięta w Azji Południowej i Południowo-Wschodniej.

Monsun to prąd powietrzny w dolnej troposferze (wiatr), obejmujący całe kontynenty i zmieniający kierunek co pół roku. Jest on spowodowany różnicą temperatur między lądem i morzem w poszczególnych sezonach roku. Słowo „monsun” wywodzi się od arabskiego słowa *mansim* oznaczającego sezon. Nad cieplejszymi latem kontynentami przyziem-

ne ciśnienie atmosferyczne jest niższe niż nad oceanami. Zimą sytuacja jest odwrotna: ponieważ kontynenty są znacznie zimniejsze niż oceany, to nad lądem ciśnienie jest wtedy wyższe. W związku z tym zimą przepływ powietrza następuje od chłodnego lądu w kierunku Oceanu Indyjskiego. Latem kierunek wiatru się zmienia i obserwujemy napływ wilgotnego, niosącego opady powietrza znad oceanu nad kontynent azjatycki.

Poza cyrkulacją monsunową na kuli ziemskiej występuje jeszcze ogromna liczba mniejszych zakłóceń globalnej cyrkulacji atmosfery określanych jako wiatry miejscowe lub lokalne. Wiatry miejscowe wieją na ograniczonych obszarach i są im nadawane lokalne nazwy. Ich powstanie wiąże się ze specyficznymi czynnikami, m.in. rzeźbą terenu, sąsiedztwem dużych akwenów, regionalnymi sytuacjami barycznymi itp. Mogą się pojawiać w niektórych porach roku lub doby, przy czym wykazują znaczną niezależność od ogólnych cech krążenia atmosfery w danym obszarze. Nakładają się na globalną cyrkulację atmosfery, powodując jej mniejsze lub większe zakłócenie. Do najpowszechniej występujących typów wiatrów lokalnych należą powstające w wielu masywach górskich feny (na przykład wiatr halny w Karpatach, chinook w Górach Skalistych) oraz wiejące na wybrzeżach morskich bryzy.

- ▼ Schemat powstawania wiatrów typu fenowego (na przykład wiatru halnego). Wilgotne chłodne powietrze, wznosząc się przed przeszkodą, ochładza się około  $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  wysokości (wilgotnoadiabatycznie) i traci wilgoć (opady). Za przeszkodą, opadając, ogrzewa się około  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  wysokości (suchoadiabatycznie), co skutkuje pojawieniem się bardzo silnego, suchego i ciepłego wiatru





## WSZYSTKIE BARWY TĘCZY

Gdy kończy się deszcz, a niebo powoli się przejaśnia i do powierzchni Ziemi stopniowo zaczynają dopływać promienie słoneczne, pojawia się niezwykle barwne zjawisko – łuk tęczy. Zjawisko optyczne i meteorologiczne, jakim jest tęcza, powstaje wówczas, gdy promienie Słońca docierające do dolnej części troposfery oświetlają unoszące się jeszcze w powietrzu drobne kropelki wody. W kropłach dochodzi do rozszczepienia białego światła będącego mieszaniną fal elektromagnetycznych o różnych długościach (różnych barwach), a efektem tego dla oka ludzkiego są barwne łuki. Zewnętrzny łuk ma kolor czerwony, a kolejne mają barwy pomarańczową, żółtą, zieloną, niebieską, indygo i fioletową (wewnętrzny łuk). Ponieważ warunkiem koniecznym do powstania tęczy jest obecność w powietrzu rozpylonej wody, barwny spektakl jest widoczny nie tylko po deszczu, ale można go też podziwiać na przykład w pobliżu wodospadów.



▲ Tęcza nad wodospadem Dettifoss w północno-wschodniej Islandii

▼ Podwójny łuk tęczy na tle chmury burzowej







# POGODA I KLIMAT

**A**ktualny stan atmosfery, który obserwujemy na niebie lub czujemy bezpośrednio na własnej skórze na przykład podczas silnego wiatru, upałów lub mrozu, można w pewnym uproszczeniu zdefiniować jako pogodę. Bywa ona kapryśna i nieprzewidywalna, a jej przejawy w formie groźnych zjawisk atmosferycznych destrukcyjne. Kaprysy pogody

są też powodem spektakularnych zjawisk, takich jak potężne, malownicze chmury burzowe, błyskawice, grzmoty, trąby powietrzne, wielobarwne tęcze, zamiecie i zawieje śnieżne. Wiele z nich powoduje duże zniszczenia oraz straty materialne, a nawet zagraża życiu. Ich prognozowanie bywa trudne, ponieważ część gwałtownych zjawisk atmosferycznych ma charakter lokalny.

Pogodą jest nazywany aktualny stan atmosfery w danym miejscu na kuli ziemskiej. Ten stan ulega nieustannym zmianom, a całość tych procesów w określonym czasie, na przykład w ciągu doby, określa się mianem przebiegu pogody lub sytuacją atmosferyczną.

Klimat to przeciętny stan składników pogody w danym miejscu lub na danym obszarze kuli ziemskiej, ustalony w toku długoletnich obserwacji. Za minimalny okres do scharakteryzowania klimatu często przyjmuje się 30 lat obserwacji. Za najważniejsze składniki pogody uważa się temperaturę powietrza i opady. Podczas opracowywania danych klimatycznych uwzględniane są wartości średnie oraz ekstremalne zjawisk pogodowych, ich zmienność, częstotliwość występowania i czas trwania. Klimat kształtuje się w wyniku wzajemnych oddziaływań zachodzących między głównymi elementami środowiska: atmosferą, wodami, lądem i jego pokryciem, a współcześnie – także z człowiekiem.



▲ Do najważniejszych składników pogody należą opady



Badaniem pogody i klimatu zajmują się głównie: meteorologia (badanie atmosfery ziemskiej z punktu widzenia procesów pogodowych i prognozy pogody), fizyka atmosfery (zastosowanie fizyki do badania atmosfery ziemskiej i planetarnej) i klimatologia (dział geografii fizycznej zajmujący się badaniem cech klimatu i jego zmian).

Również pogoda, tak jak klimat, jest kształtowana przez wiele czynników zmieniających swoje cechy. Do najważniejszych zaliczają się: temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, natężenie promieniowania słonecznego (insolacja), prędkość i kierunek wiatru, wilgotność, zachmurzenie i rodzaj chmur, opady i osady atmosferyczne (rodzaj i wielkość), stężenie alergenów w powietrzu, zjawiska atmosferyczne, na przykład huragany, burze, gradobicia.

## CHMURY

Chmury to formy nagromadzeń cząstek wody w powietrzu w postaci kropeł wody lub kryształków lodu. Charakteryzuje je ogromna różnorodność kształtów. Pojawiają się w danym miej-

scu atmosfery wtedy, gdy zawartość pary wodnej osiąga stan przesylenia. Do ich wytworzenia potrzebne są także mikroskopijnych rozmiarów cząstki zwane jądrami kondensacji. Mogą to być na przykład cząsteczki soli lub okruchy pyłu w postaci drobnych fragmentów minerałów o wielkości rzędu setnych części milimetra. Powietrze uznawane za czyste może zawierać setki takich jąder kondensacji, a powietrze zanieczyszczone – dziesiątki, a nawet

## RODZAJE CHMUR

**Cirrus** (Ci) – pierzasta (*cirrus* – „pukiel kędzierzawych włosów”)

**Cirrostratus** (Cs) – pierzasto-warstwowa (*cirrus* + *sterněre*)

**Cirrocumulus** (Cc) – pierzasto-kłębiasta (*cirrus* + *cumulus*)

**Altostratus** (As) – średnia warstwowa (*altus* + *stratus*)

**Alto cumulus** (Ac) – średnia kłębiasta (*altus* – „wyniosły”, „wysoki”, „wzniesiony”, „wysoko leżący” + *cumulus*)

**Stratus** (St) – warstwowa (*sterněre* – „rozesłać”, „rozciągnąć”, „rozpościerać”)

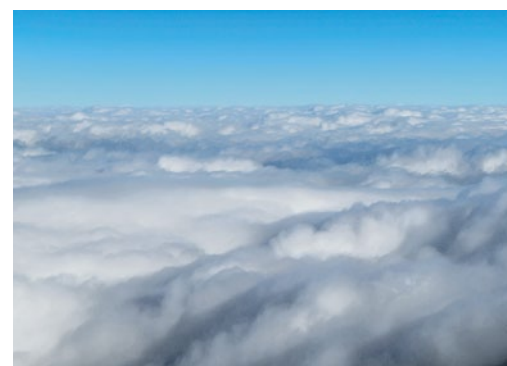
**Stratocumulus** (Sc) – kłębiasto-warstwowa (*sterněre* + *cumulus*)

**Nimbostratus** (Ns) – warstwowo-deszczowa (*nimbus* – „gęsta chmura”, „chmura deszczowa” + *sterněre*)

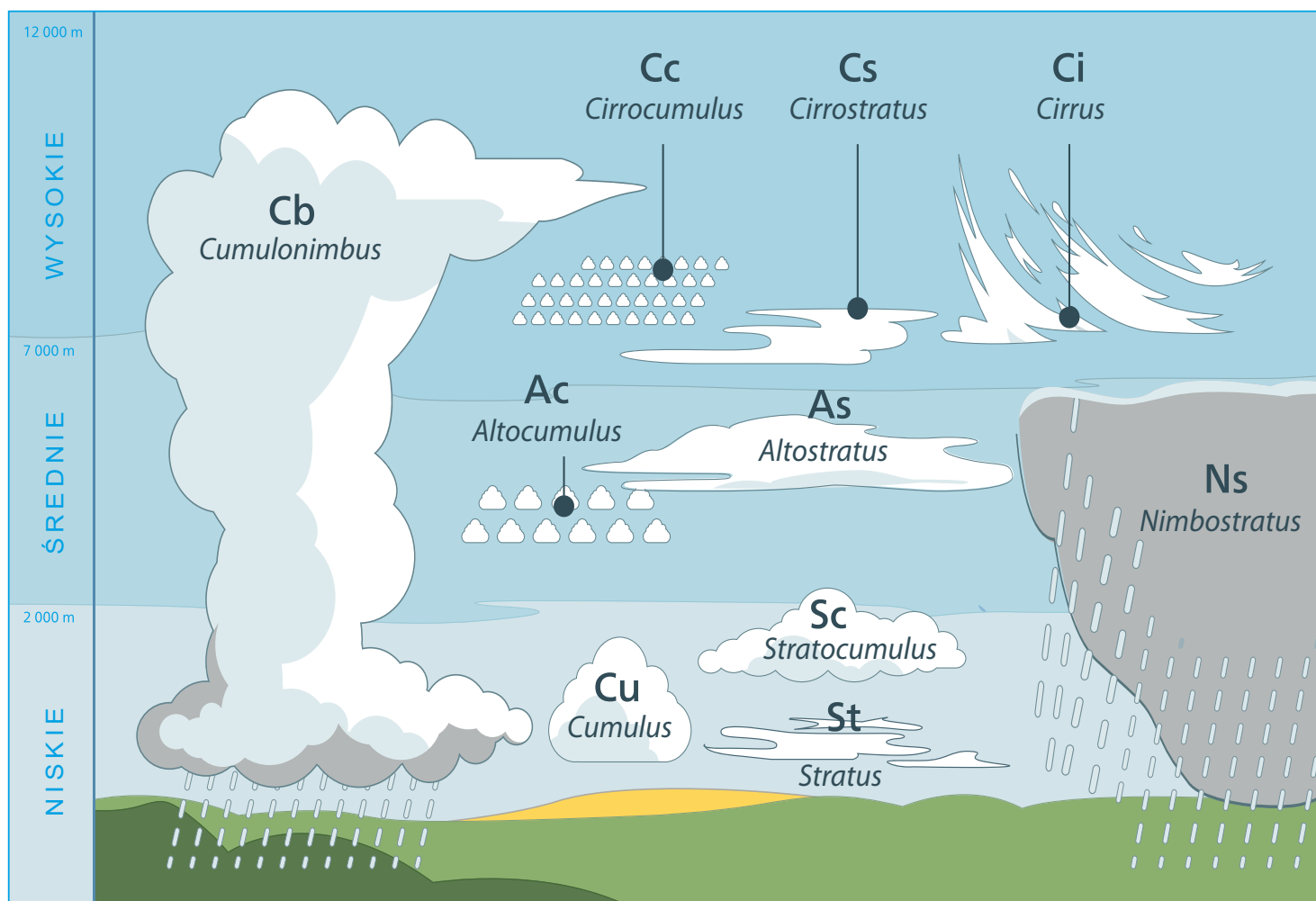
**Cumulus** (Cu) – kłębiasta (*cumulus* – „stos”, „korona”, „szczyt”)

**Cumulonimbus** (Cb) – kłębiasto-deszczowa (*cumulus* + *nimbus*)

Powyższe rodzaje chmur mogą występować w wielu gatunkach i odmianach.



▲ Zdecydowana większość chmur tworzy się w troposferze, mniej niż 10 km nad Ziemią



▲ Rodzaje chmur





▲ Chmury *cirrus*, gatunek *uncinus* (Ci unc)



▲ Chmury *cirrostratus*, gatunek *fibratus* (Cs fib)



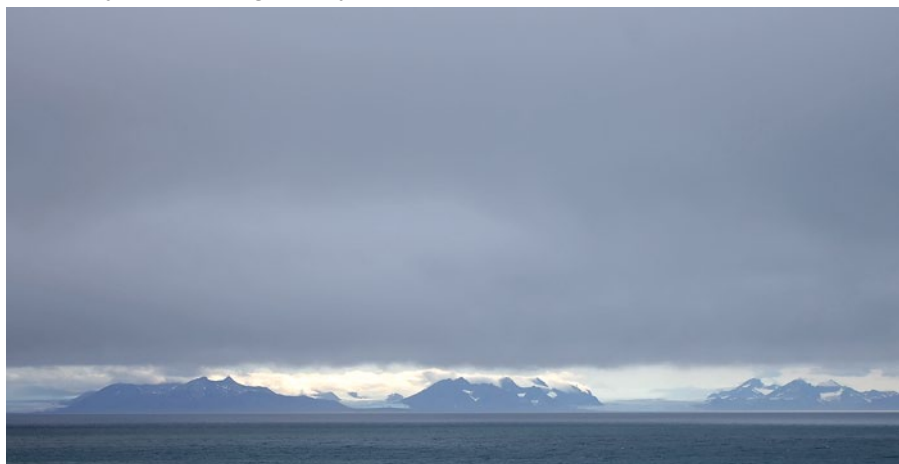
▲ Chmury *cirrocumulus*, gatunek *floccus* (Cc flo)



▲ Chmury *altocumulus*, gatunek *floccus* (Ac flo)



▲ Chmury *altostratus*, odmiana *undulatus* (As un)



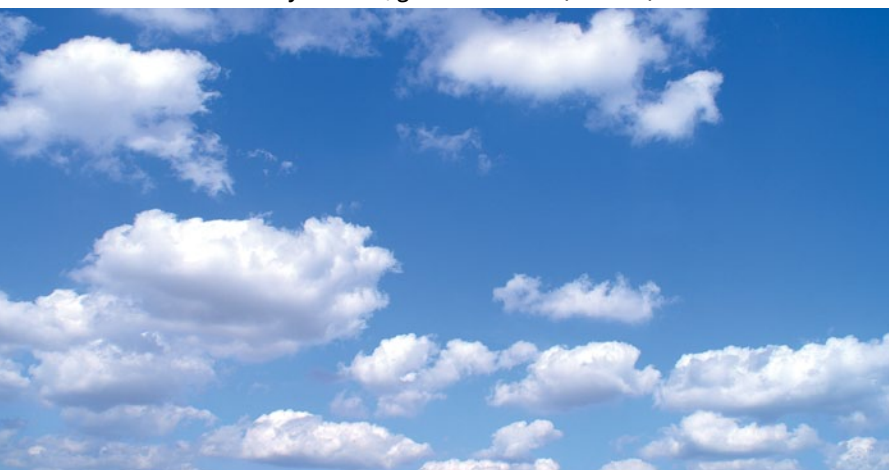
▲ Chmury *stratus*, odmiana *opacus* (St op)



▲ Chmury *stratocumulus*, odmiana *opacus* (Sc op)  
▲ Chmury *cumulus*, gatunek *humilis* (Cu hum)



▲ Chmura *nimbostratus* (nie wyróżnia się gatunków i odmian; Ns)  
▲ Chmura *cumulonimbus*, gatunek *capilatus* (Cb cap)







▲ Ograniczenie widzialności spowodowane mgłą może sparaliżować ruch lotniczy

setki tysięcy. Powstawanie chmur najczęściej jest związane z ochładzaniem powietrza. I odwrotnie – jeśli powietrze ulega ogrzaniu, krople wody i kryształki lodu wyparowują, a chmura zanika. Tylko część procesów powstawania chmur kończy się skutecznym opadem, który dociera do powierzchni Ziemi.

### MGŁA

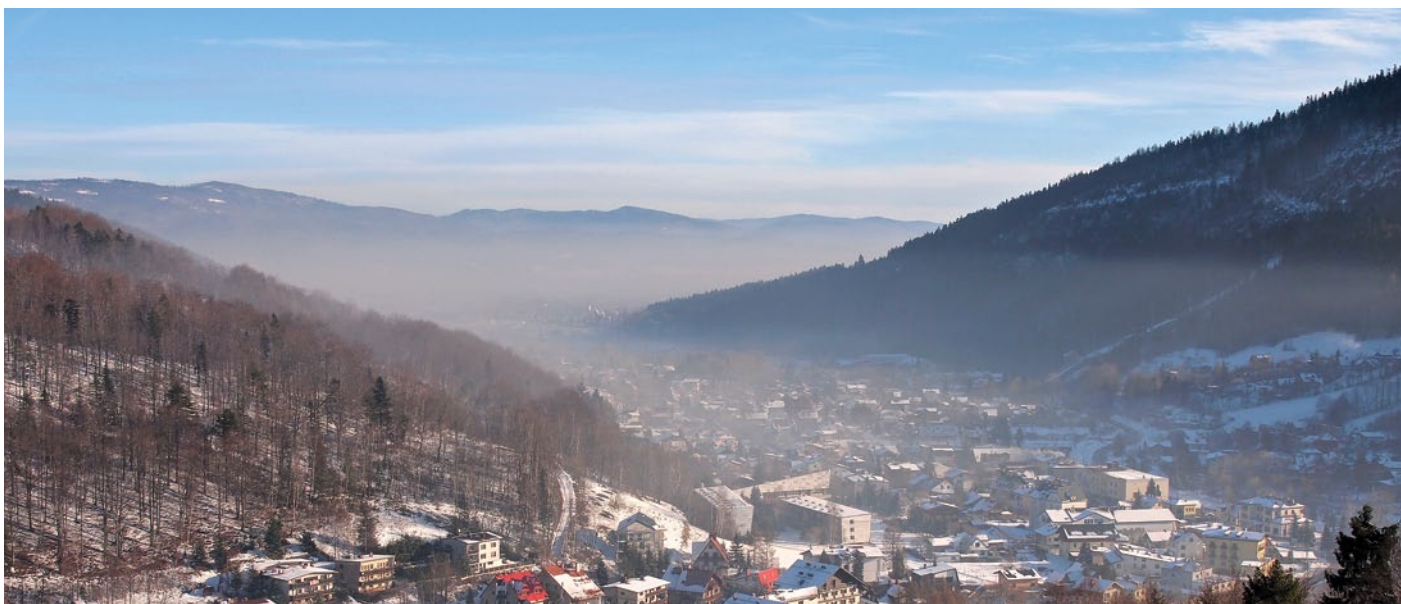
Chmura, która wznosi się bezpośrednio nad powierzchnią terenu, jest nazywana mgłą. W obrębie gęstej mgły widoczność nie przekracza 1 km. Niekiedy jest ona tak gęsta, że widoczność spada do kilku metrów. Takie zjawiska stwarzają duże utrudnienia w komunikacji, czasem nawet zagrożenia życia w drogowych ka-

rambolach. Powodują duże opóźnienia w transporcie, często doprowadzając nawet do paraliżu komunikacyjnego, oraz dezorientację w terenie. Oprócz negatywów można jednak znaleźć pewne pozytywy tego zjawiska. Mgła stanowi w wielu suchych regionach świata, jak na przykład przybrzeżna część pustyni Namib w Afryce, jedyne źródło wody dla organizmów żywych. Zimny Prąd Benguelski przepływający wzdłuż wybrzeży pustyni stwarza korzystne warunki do kondensacji pary wodnej i powstawania nad nim mgieł, które następnie z wiatrem przemieszczają się nad obszar pustyni. Wiele organizmów żyjących na pustyni wyspecjalizowało się w pozyskiwaniu wody z mgieł, na przykład owady i rośliny pustynne o poranku pozyskują wodę z mgły dzięki jej skraplaniu.

### SMOG

Nad miastami i obszarami przemysłowymi często pojawia się smog, którego nazwa pochodzi od angielskiego *smoke* (dym) i *fog* (mgła). Smog rozwija się w czasie wyżu barycznego w zimnej połowie roku. Najpierw pojawia się mgła, którą uzupełnia skraplanie się wody na zanieczyszczeniach powietrza. W dużym stopniu na powstanie smogu mają wpływ sadza i dwutlenek siarki, które wydobywają się z kominów fabrycznych i palenisk domowych. Jeśli wyż jest stabilny i panuje bezwietrzna pogoda, stężenie zanieczyszczeń rośnie i w pewnym momencie osiąga stan groźny dla zdrowia człowieka.

W Polsce najczęściej pojawia się smog kwaśny zwany też londyńskim, siarkowym, zimowym, wilgotnym lub



▲ Zalegający w dolinach zimowy smog nad Szczyrkiem i Kotliną Żywiecką





▲ Smog nad Zakazanym Miastem w Pekinie (Chiny)

przemysłowym, który zazwyczaj występuje w chłodnej połowie roku, a jego powstawaniu sprzyjają wychłodzenie przyziemnej warstwy powietrza i wyższa temperatura nad nią oraz słaby wiatr lub jego brak. Główne źródła zanieczyszczeń powietrza powodujące powstanie smogu londyńskiego to przemysł oraz spalanie węgla w paleniskach domowych i w mniejszym stopniu transport samochodowy. Smog siarkowy jest niezwykle groźny dla zdrowia człowieka. Może być bardzo gęsty i ograniczać widoczność do zaledwie kilkunastu metrów. Równie niebezpieczny jest smog fotochemiczny (zwany też smogiem Los Angeles, utleniającym, letnim, suchym), który pojawia się podczas upalnych, słonecznych letnich dni, gdy temperatura powietrza przekracza 25°C, wilgotność jest niska, a w powietrzu znajduje się wiele różnych zanieczyszczeń gazowych, głównie ze spalin samochodowych. Nie jest tak gęsty jak smog kwaśny, ale może powodować ograniczenia widzialności do 800 m.

Wyjątkowo wysokie zanieczyszczenie powietrza związane z wystąpieniem smogu odnotowano w styczniu 2017 r. w południowej i środkowej Polsce. Niektóre normy zostały przekroczone kilkudziesięciokrotnie. Do miast szczególnie dotkniętych tym zjawiskiem należały: Rybnik, Radomsko, Częstochowa, Bielsko-Biała, Żywiec, Zabrze, Łódź i Warszawa.

### BURZE, WYŁADOWANIA ATMOSFERYCZNE I GRZMOTY

Wyładowania elektryczne w formie pioruna są efektem dużego napięcia pola elektrycznego pomiędzy dolną częścią chmury a powierzchnią Ziemi. Najlepsze warunki do jego wystąpienia wytwarzają się w dobrze rozbudowanych chmurach kłębiasto-warstwowych (*cumulonimbus*), kiedy działają silne ruchy powietrza o kierunku pionowym i między chmurą a powierzchnią Ziemi, między sąsiednimi chmurami lub wewnątrz pojedynczej chmury powstaje różnica

▼ Smog nad okolicami Bielska-Białej w styczniu 2017 r. Widok ze stoków Beskidu Małego







▲ Burza z wyładowaniami elektrycznymi pomiędzy chmurą i Ziemią

potencjałów. Po osiągnięciu odpowiedniej wartości następuje gwałtowne wyładowanie elektryczne, przejawiające się w postaci zjawiska świetlnego zwanego błyskawicą. Prąd elektryczny, który wtedy powstaje, może osiągnąć natężenie kilku tysięcy amperów. Błyskawice mają postać linii, zwykle z licznymi, ostrymi załamaniem i odgałęzieniami. Błyskawice, które pojawiają się wewnątrz chmur, zwykle rozświetlają je światłem rozproszonym, co powoduje charakterystyczne rozjaśnienie chmury nazywane błyskawicą powierzchniową. Dość tajemniczym, nie do końca wyjaśnionym zjawiskiem jest piorun kulisty, czyli ostro świecąca regularna kula wielkości nie większej niż piłka do gry.

Piorunowi towarzyszy grzmot – zjawisko akustyczne wynikające z gwałtownego i trwającego mikrosekundy rozgrzania powietrza nawet do 30 000°C. Natychmiastowa reakcja powietrza polega na rozrzedzeniu cząstek, co ujawnia się w formie eksplozji i powstania fali uderzeniowej. Dzięki wytworzeniu się fal dźwiękowych huk jest słyszany nawet w odległości kilkudziesięciu kilometrów. Fale dźwiękowe to podłużne fale mechaniczne, które rozchodzą się w atmosferze z prędkością około 340 m/s. Czas, jaki upływa od pojawienia się na niebie błyskawicy do usłyszenia grzmotu, pozwala ocenić odległość od miejsca wyładowania. Jeśli między pojawieniem się błyskawicy a grzmotem upłynie na przykład 6 sekund, odległość od miejsca jej pojawienia wynosi około 2 km.

Pioruny to zjawisko częste w atmosferze ziemskiej. W każdej sekundzie o powierzchnię Ziemi uderza 100 piorunów. Przeciętnie w ciągu roku na każdy kilometr kwadratowy przypada dwa uderzenia. Najwięcej dni burzowych w ciągu roku notuje się na wyspie Jawa – średnio 222, a maksymalnie nawet do 322 dni w roku. W Polsce najwięcej burz występuje na obszarach nizinnych, wyżynnych południowo-wschodniej części kraju oraz w Karpatach i Górach Świętokrzyskich – od 28 do 34 dni w roku, najmniej natomiast na wybrzeżu. Średnio burza w Polsce trwa dwie i pół godziny. Ilość energii, jaką niosą ze sobą wyładowania atmosferyczne, jest znaczna, ale 99% ulega rozproszaniu, zanim dotrze do podłoża. Pozostały 1% energii pioruna, który dociera do Ziemi, pozwoliłby świecić żarówce przez kilka miesięcy.

Jeśli wraz z wyładowaniami atmosferycznymi pojawiają się obfite opady deszczu lub gradu, takie zjawisko jest nazywane burzą. Burze są charakterystyczne przede wszystkim dla stref gorącej i umiarkowanej, a ich rozwój jest nierozdzielnie związany z chmurami typu *cumulonimbus*. Takie chmury, zaczynające się nisko nad powierzchnią terenu, osiągają nawet górną granicę troposfery. Oznacza to, że w strefie równikowej mogą być rozbudowane w pionie na 16–17 km przy średnicy około 7–8 km, z czego wynika, że często są lepiej rozwinięte w pionie niż w poziomie.

Przyczynami powstawania burz mogą być: silne rozgrzanie warstwy powietrza od gorącego podłoża i szybkie wznoszenie ciepłych i wilgotnych mas (burza konwekcyjna), wznoszenie powietrza po stoku (burza orograficzna, na przykład



▲ Burza z wyładowaniami wewnątrzchmurowymi





▲ Rozbudowane wysoko ponad innymi chmurami kowadło (*incus*) – charakterystyczny element chmury burzowej *cumulonimbus*

przy zjawisku fenowym) oraz wznoszenie się mas powietrza w strefie frontu atmosferycznego, szczególnie w zasięgu frontu chłodnego. Powietrze w obrębie budujących się wielkich chmur burzowych może tworzyć prądy wstępujące osiągające prędkości rzędu 20–30 m/s. W górnej części chmury często powstaje utworzone z kryształków lodu kowadło. W trakcie aktywności tych bardzo silnych prądów w obrębie chmury dochodzi do rozdzielenia się ładunków elektrycznych. Jej górna część jest strefą koncentracji ładunków dodatnich, dolna – ujemnych. Towarzyszy temu intensywne powstawanie kropeł wody, które pod wpływem grawitacji zaczynają opadać i tworzyć prądy zstępujące. Opadające powietrze przy powierzchni Ziemi rozplywa się we wszystkich kierunkach.

Oprócz kropeł wody z chmury burzowej nierzadko spadają opady gradu lub śniegu. Ich powstawaniu sprzyjają silne prądy wstępujące, które sprawiają, że krople wody schładzają się, zamarzają i obrastają kolejnymi warstewkami lodu, ale dość długo unoszą się w obrębie chmury. Gradziny osiągają bardzo różną wielkość, czasem do kilku, a nawet kilkunastu centymetrów średnicy. Rekordowa gradzina miała około 20 cm średnicy (Dakota Południowa, 2010).

Jednym z najbardziej burzowych miejsc na świecie jest rejon jeziora Maracaibo w Wenezueli – grzmi tu i błyska niemal codziennie. Tak duża liczba wyładowań atmosferycznych prawdopodobnie jest związana z istnieniem na dnie jeziora ogromnych zasobów ropy naftowej. Ze zbiornika i okolicznych terenów podmokłych uwalniają się duże ilości metanu, które powodują naładowanie elektryczne powietrza. Na częste powstawanie burz w rejonie jeziora mają wpływ również otaczające je góry i wysoka temperatura powietrza – Maracaibo silnie się nagrzewa i paru-

je, a unoszone ku górze ciepłe, wilgotne powietrze napotyka chłodne i dochodzi do tworzenia się chmur burzowych.

### ZAPACH BURZY

Zapach burzy jest efektem wyładowań atmosferycznych i reakcji chemicznych zachodzących w środowisku pod wpływem intensywnych opadów. Jednym z charakterystycznych zapachów po burzy jest woń ozonu powstałego podczas przepływu ładunku elektrycznego przez kanał wyładowania. Cząsteczki tlenu dzielą się wówczas na pojedyncze



▲ Wyładowania atmosferyczne nad jeziorem Maracaibo w Wenezueli



atomy, które mogą się łączyć z tlenem cząsteczkowym, tworząc ozon. W czasie deszczu w powietrzu można wyczuć także zapach związku chemicznego zwanego petrichorem, czyli mieszaniny kwasów tłuszczowych, węglowodorów i alkoholi, którego źródłem w naturalnym środowisku jest rozkładająca się materia organiczna obumarłych roślin i martwych zwierząt.

### BURZA ŚNIEŻNA

Burze śnieżne mają ten sam mechanizm powstawania co burze z deszczem, lecz zamiast kropel wody z chmury spada ogromna ilość śnieżynek, czemu towarzyszą wyładowania atmosferyczne. W Europie tego typu zjawiska występują dość rzadko. Znacznie częściej pojawiają się w Ameryce Północnej jako wynik gwałtownego napływu zimnego powietrza (tzw. blizzard) z północnej części kontynentu. Zimowe burze charakteryzują się bardzo głośnymi grzmotami, co jest związane z nieco innym sposobem rozchodzenia się fal dźwiękowych w niskiej temperaturze w terenie, który ma równocześnie inne pokrycie niż latem.

### BURZE PUSTYNNNE, TRĄBY POWIETRZNE I TORNADA

Na obszarach pustynnych i półpustynnych często dochodzi do bardzo silnego, lokalnego nagrzania powietrza, co sprzyja powstawaniu jego mniejszych lub większych zawirowań. Bardzo łatwo i często powstają niewielkie wiry, w których słup powietrza ma kilka, czasem kilkanaście metrów wysokości. Są na ogół krótkotrwałe i nie wyrządzają wielu szkód. Porywają ziarna pyłu i piasku, czasem drobne żwiry, fragmenty roślin i niewielkie przedmioty. Niekiedy takie zjawiska są nazywane diabłami piaskowymi. W podobnych warunkach mogą powstać także duże wiry – trąby powietrzne sięgające chmury kłębiastej, o średnicy do około 200 m. Prędkość wiatru może lokalnie przekraczać 200 km/godz., a czas trwania zjawiska zwykle nie przekracza 30 minut. Takie trąby mogą wyrządzać wielkie szkody w obszarach zurbanizowanych, w lasach, na polach uprawnych itd. Więcej informacji na temat trąb powietrznych i tornad – zob. s. 47.



▲ Wir pyłowy w Kenii

▼ Trąba powietrzna (tornado) w Stanach Zjednoczonych







▲ Szadź utrudnia pracę na stacjach meteorologicznych



▲ Szron na młodym dębie

▼ Zjawisko virga

## HISTORIA KROPLI WODY – OPADY I OSADY ATMOSFERYCZNE

Opady są zjawiskiem związanym z powstawaniem chmur, ale warto pamiętać, że nie wszystkie chmury dają opady. Na przykład z chmur zbudowanych z kryształków lodowych (*cirrus*) opady powstają niezwykle rzadko i dopiero wtedy, gdy kryształki opadają i roztopiają się wskutek ogrzania przez cieplejsze powietrze.

Deszcz składa się z kropeł wody o wielkości od około 0,05 mm do 8 mm – w czasie opadania i pokonywania oporu powietrza krople większe od 8 mm ulegają rozpadowi na mniejsze. Opady kropeł najmniejszych (0,05–0,5 mm) są nazywane mżawką. Krople mżawki spadają wolniej (0,5–2 m/s) w porównaniu z typowym deszczem, który opada z prędkością 2–9 m/s. Czasem deszcz nie osiąga powierzchni Ziemi, ponieważ wyparowuje w powietrzu. Taki opad jest nazywany virgą.

Inną formą wody są osady atmosferyczne, do których zaliczają się: rosa, szron, szadź i gołoledź. Rosa jest produktem kondensacji pary wodnej i składa się z kropelek wody, które pokrywają powierzchnie roślin i innych obiektów.

Pojawia się nad ranem, po bezchmurnych, bezwietrznych i chłodnych nocach, kiedy podłoże ulega znacznemu ochłodzeniu, aż do osiągnięcia temperatury punktu rosy, a powietrze może wejść w stan skraplania z powodu nasycenia. W temperaturze ujemnej w takiej sytuacji tworzy się szron, zbudowany z kryształków lodowych podobnych do igiełek. Pewną odmianą szronu jest szadź (albo sadź), która tworzy się zimą przy wyżowej, mroźnej i mglistej pogodzie, zwykle przy słabym wietrze. Zjawiskiem podobnym do szadzi i szronu jest okiść, która powstaje na gałęziach drzew i krzewów na skutek narastania na nich pokrywy śnieżnej. Gruba warstwa okiści może połamać gałęzie – wówczas mamy do czynienia ze śniegołomem, natomiast jeśli wywrócone zostanie całe drzewo – mówi się o śniegowale.

Gołoledź jest powłoką lodową, która powstaje na roślinach i zmrożonej powierzchni terenu, kiedy pada mżawka lub słaby deszcz. Jeśli występuje na jezdniach i chodnikach, powoduje niezwykle niebezpieczne sytuacje w ruchu drogowym. Szczególne zagrożenie występuje, gdy gołoledź pojawia się nagle i lokalnie, zaskakując kierowców i pieszych.







▲ Okiść i śniegowal

## ZIELONA SAHARA I SUSZE W LASACH DESZCZOWYCH

Istnieje wiele hipotez naukowych łączących skutki zmian lub wahań klimatu objawiających się niedoborem opadów atmosferycznych lub ich nadmiarem z rozwojem cywilizacji ludzkiej. Dobrym przykładem dużej zmienności ilości opadów atmosferycznych w stosunkowo krótkim czasie jest obszar Sahary, który około 8–5 tys. lat p.n.e. był zieloną krainą nawiedzaną przez deszcze monsunowe. Saharę przemierzały wówczas liczne grupy myśliwych, które wraz z redukcją opadów zaczęły się przemieszczać do rejonów bardziej zasobnych w wodę i zwierzynę, takich jak dolina Nilu. Prawdopodobnie to właśnie zmiany klimatyczne były jedną z istotnych przyczyn rozwoju cywilizacji egipskiej. W ciągu ostatnich 4 tys. lat na terenie Egiptu występowały liczne wahania sum opadów atmosferycznych – ich nadmiar niszczył pola uprawne i domy zbudowane z cegieł mułowych, natomiast długotrwałe susze sprowadzały nieurodzaj i głód. Mimo wszystko cywilizacja egipska przetrwała setki

lat, wiele społeczności nie miało jednak tyle szczęścia. Osiedla starożytnego narodu Harappa prawdopodobnie zostały zniszczone przez wielką powódź, która nawiedziła dolinę Indusu, z kolei długoletnia susza doprowadziła do osłabienia potęgi królestwa Khmerów i podbicia go przez Tajów. Prawdopodobnie przyczyną upadku cywilizacji Majów były długotrwałe susze.

## SZTUCZNY DESZCZ

Możliwe jest wywoływanie opadów atmosferycznych w sposób sztuczny, co wymaga rozpylenia w chmurze specjalnych substancji chemicznych. Najczęściej wykorzystuje się jodek srebra lub zestalony dwutlenek węgla (suchy lód), ciekły azot, propan, pył gipsowy i cementowy, stosowane są też związki pochodzenia naturalnego, takie jak sól, rozdrobnione minerały. Ta metoda jest zwana zasiewaniem chmury i przynosi różne efekty, czasami odmienne od planowanych. Nie można dokładnie określić, gdzie spadnie sztucznie wywołany opad oraz jaka będzie jego wielkość. Gdy sztucznych jąder zamarzania jest

zbyt dużo lub są rozpylane w nieodpowiednim momencie, zabieg może spełznąć na niczym. Do zasiewania chmur wykorzystuje się samoloty, specjalne urządzenia naziemne wystrzeliwujące pojemniki z substancjami chemicznymi, a także impulsy laserowe. Chmury wywołuje się w celach badawczych, wojskowych, zapobiegania suszom atmosferycznym, wypłukania zanieczyszczeń z powietrza, zapobiegania wystąpieniu gradu, zmniejszania siły huraganów, a nawet wywoływania lub ograniczania opadów podczas imprez sportowych lub politycznych. Sztuczne próby wywoływania opadów budzą kontrowersje ze względu na możliwość negatywnego wpływu jodku srebra na środowisko naturalne i zdrowie człowieka. Efektywność tego zabiegu jest podważana przez część naukowców – z niektórych badań wynika, że wzrost opadów nad obszarami nizinnymi jest niezauważalny i może zaistnieć jedynie na obszarach górskich, jednak jest niewielki. Naukowcy podkreślają, że nawet lokalne zasiewanie chmur może skutkować nieprzewidywalnymi konsekwencjami na większą skalę.





▲ Obfite opady monsunowe umożliwiają intensywną uprawę ryżu. Na zdjęciu skąpane w deszczu terasy ryżowe na Filipinach

## MONSUNY

Monsuny to wiatry stałe obejmujące znaczne części kontynentów i sąsiadujących oceanów o okresowo zmiennym kierunku. Powstają w wyniku różnic temperatur pomiędzy lądem a morzem. Mechanizm tego zjawiska jest podobny do schematu powstawania bryzy morskiej i lądowej, lecz jego skala jest nieporównywalnie większa.

Największy wpływ monsunów na klimat jest obserwowany w południowej, południowo-wschodniej i wschodniej Azji. Latem ląd kontynentu azjatyckiego nagrzewa się w znacznie większym stopniu niż sąsiednie morza. Rozgrzane powietrze unosi się nad lądem, dlatego spada tam ciśnienie, a znad morza nadciąga powietrze bardzo wilgotne, przynoszące wraz z wiatrami intensywne opady. Na jego drodze często znajdują się wysokie góry, na przykład dla powietrza znad Oceanu Indyjskiego ogromną barierą są Himalaje. Efekt wspinania się powietrza po ich wysokich stokach to niezwykle obfite opady, na przykład w Czerapuńdżi w Indiach odnotowuje się przeciętnie rocznie około 11 000 mm opadu. Odnotowano tam też rekordową na skalę światową wartość ponad 26 000 mm deszczu. Ten typ cyrkulacji to monsun letni. Letnie ulewę związane z monsunem umożliwiają w gęsto zaludnionych krajach Azji intensywną uprawę ryżu i innych roślin tropikalnych.

Zimą ląd ulega ochładzaniu, co sprzyja powstawaniu rozległego wyżu, a nad stosunkowo ciepłymi wodami panuje niskie ciśnienie. Z tego powodu rozwija się chłodny i suchy monsun lądowy.

## BRYZA MORSKA

Rozwój bryz jest związany z przebiegiem dobowym temperatury powierzchni lądu. Bryza rozwija się w słoneczne dni na wybrzeżach morskich, najczęściej w czasie wyżowej pogody i we wczesnych godzinach popołudniowych. W ciągu dnia ląd ogrzewa się silniej i w efekcie podnoszą się nad nim powierzchnie izobaryczne. Ponieważ na pewnej wysokości wytwarza się gradient, a powietrze zawsze dąży do wyrównania ciśnień, jego ciepłe masy znad lądu zaczynają płynąć w kierunku morza. Jednocześnie bezpośrednio nad powierzchnią płynie powietrze od strony morza, które przynosi łagodne ochłodzenie. Bryza morska wieje w dolnych warstwach troposfery z prędkością 3–5 m/s. Jednocześnie z bryzą nad lądem mogą się pojawić chmury

kłębiaste, które wieczorem zanikają. Wiatr wówczas słabnie i cichnie.

W nocy i we wczesnych godzinach rannych układ cyrkulacji ulega odwróceniu: wiatr wieje od strony lądu w kierunku morza. Ponieważ ląd ochładza się szybko, cieplejsze powietrze nad wodą sprawia, że powierzchnie izobaryczne znajdują się tam wyżej niż nad lądem. Wytworzony na pewnej wysokości gradient ciśnienia wymusza ruch powietrza w kierunku lądu, co skutkuje jego przypowierzchniowym odpływem znad lądu do morza (bryza lądowa). Pionowy zasięg bryzy nie jest wielki – może objąć warstwę o grubości 1–2 km, a jej zasięg poziomy osiąga zakres od kilku do około 30 km w zależności od lokalnych warunków.

## BRYZA GÓRSKA

Bryza górską, nazywaną też wiatrem gór i dolin, to zjawisko lokalne o okresie dobowym, powstające według nieco podobnego schematu jak bryzy morska i lądowa: w nocy wiatr wieje ze szczytów w kierunku doliny, w ciągu dnia z doliny na szczyty, a jego prędkość nie przekracza 10 m/s. Spływanie nocą powietrza w doliny wynika z szybszego ochładzania wyższych partii stoków i oziębiania się od nich powietrza, które staje się cięższe. W ciągu dnia stoki nagrzewają się szybciej niż wnętrza dolin i w ten sposób wytwarza się poziomy gradient termiczny zorientowany od zbocza w kierunku swobodnej atmosfery. Ogrzane powietrze tuż nad stokiem zaczyna płynąć w górę, co może prowadzić do powstania chmur.



▲ Dzienna bryza morska daje ochłodę podczas plażowania i umożliwia uprawianie takich sportów wodnych jak windsurfing i kitesurfing