

MICHAŁ RÓŻYCZKA

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN
Bartycka 18, 00-716 Warszawa
e-mail: mnr@camk.edu.pl

EKOSFERY GWIAZDOWE

WSTĘP

Termin „ekosfera” (*ang.* *ecosphere*) został wprowadzony do astronomii ponad pół wieku temu (STRUGHOLD 1955). Początkowo określano nim tę część Układu Słonecznego, w której panują warunki sprzyjające istnieniu życia w jego ziemskich formach; jednak dość szybko zaczęto używać go także w odniesieniu do analogicznych obszarów w otoczeniu innych gwiazd. Zgodnie z obecną definicją, ekosfera jest to otaczająca gwiazdę, sferyczna warstwa, w której mogą istnieć planety zdolne do utrzymania na swych powierzchniach wody w stanie ciekłym. Takie samo znaczenie ma równie często, a być może nawet częściej spotykany w literaturze anglojęzycznej termin „habitable zone” (KASTING i współaut. 1993). Jego optymistyczny wydźwięk (dosłownie: „strefa nadająca się do zamieszkania”) jest jednak zwodniczy, ponieważ obecność ciekłej wody to warunek konieczny, lecz najprawdopodobniej niewystarczający do tego, by na danej planecie mogły egzystować organizmy żywe (GONZALEZ 2005).

Choć trudno sobie wyobrazić jeszcze prostszą definicję ekosfery, okazuje się, że wcale nie jest ona jednoznaczna. Zakładając, że historia życia na Ziemi nie potoczyła się jakąś wyjątkową drogą, musimy przyjąć, że skalę czasową jego rozwoju na innych planetach również trzeba mierzyć w miliardach lat. Przez cały ten czas warunki na powierzchni planety nie mogą ulegać zbyt wielkim zmianom. W praktyce oznacza to, że planeta nie może zbyt oddalać się od stanu równowagi, w którym w jednostce czasu wypromieniowuje w przestrzeń międzyplane-

tarną tyle energii, ile otrzymuje od swej macierzystej gwiazdy. Stan równowagi jest osiągnięty w określonej temperaturze, i to właśnie ona decyduje o tym, czy planeta znajduje się w ekosferze, czy poza nią. Równowagowy poziom temperatury ustala się zaś pod wpływem bardzo wielu czynników współdecydujących o klimacie planety, wśród których oprócz tempa dopływu energii gwiazdowej należy wymienić nachylenie osi obrotu planety do płaszczyzny jej orbity, spłaszczenie orbity, grubość i skład chemiczny atmosfery i wiele innych (patrz niżej).

Poprawne uwzględnienie wszystkich tych czynników jest po prostu niemożliwe – po części dlatego, że jest ich zbyt wiele, a po części dlatego, że nasza wiedza o wiążących je sprzężeniach i mechanizmach jest jeszcze bardzo fragmentaryczna. Aby wyznaczyć granice ekosfery, musimy więc zdecydować się na przyjęcie mniej lub bardziej uproszczonego modelu planety, co do całego zagadnienia wprowadza pewien element dowolności. Co gorsza, okazuje się, że równowagowa temperatura jest funkcją takich podstawowych parametrów planety jak masa i promień (prze staje od nich zależeć tylko w najprostszym modelu, w którym planety są pozbawionymi atmosfery ciałami doskonale czarnymi). Porównywanie ekosfer różnych gwiazd ma zatem sens tylko wtedy, gdy ich granice wyznaczone są w oparciu o ustalony model planet ustalonej wielkości. Ze zrozumiałych względów autorzy poświęconych tym zagadnieniom publikacji koncentrują się na planetach podobnych do Ziemi, w których atmosferach

dominuje azot, a w roli gazów cieplarnianych występują para wodna i dwutlenek węgla (np. UNDERWOOD i współaut. 2003).

Mimo wszystkich problemów i niepewności związanych z wyznaczaniem granic ekosfery, dla każdej gwiazdy można podać wiarygodne wartości skrajne a_1 , a_2 , a_3 i a_4 takie, że $a_1 < a_w < a_2$ oraz $a_3 < a_z < a_4$, gdzie a_w i a_z są odpowiednio wewnętrznym i zewnętrznym promieniem ekosfery (KASTING i współaut. 1993). Ma to olbrzymie znaczenie dla projektowanych misji kosmicznych, których zadaniem będzie poszukiwanie życia na planetach pozasłonecznych. Przyjmuje się, że o obecności życia będą świadczyły takie biosygnatury, jak tlen (także ozon), metan i tlenki azotu, zwłaszcza gdy zostaną zaobserwowane w ilościach świadczących o braku równowagi termodynamicznej. Wykryć je na planetach pozasłonecznych mogą tylko olbrzymie, wieloelementowe obserwatoria orbitalne (DARWIN; patrz <http://darwin.esa.int>) oraz Terrestrial Planet Finder (patrz <http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF>), które mają rozpocząć pracę w następnych dziesięcioleciach (BEICHMAN i współaut. 2006).

Specyfika obserwacji planet pozasłonecznych stanowczo wyklucza używanie tych niezwykle drogich urządzeń „na chybił-trafił”: trzeba je nakierowywać na planety już znane i wstępnie wyselekcjonowane. Planeta kwalifikuje się do szczegółowych badań spektroskopowych tylko wtedy, gdy promień jej orbity a spełnia nierówność $a_i < a < a_p$, a więc

wtedy, gdy z dużym prawdopodobieństwem znajduje się w ekosferze. Zadanie wyszukiwania odpowiednich planet będzie realizowane głównie przez satelitę SIM PlanetQuest (patrz <http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM>), który ma zostać umieszczony na orbicie w 2011 r. Podczas pracy posłuży się on wynikami obserwacji przeprowadzonych w ramach misji satelitów COROT (patrz: <http://smc.cnes.fr/COROT/>; wystrzelenie przewidywane na koniec 2006 r. lub początek 2007 r.) i Kepler (patrz: <http://kepler.nasa.gov/>; wystrzelenie przewidywane na rok 2009), które potrafią wykrywać planety wielkości Ziemi; nie potrafią jednak mierzyć promieni ich orbit (CANTANZARITE i współaut. 2006).

Jak więc widać, poszukiwanie biosygnatur na planetach pozasłonecznych jest zadaniem niezwykle złożonym, którego pomyślna realizacja w bardzo dużym stopniu zależy od tego, czy zdołamy trafnie wskazać najlepiej rokujące obiekty. Teoria ekosfer gwiazdowych znajduje tu oczywiście zastosowanie praktyczne. W dalszych częściach tego artykułu zapoznamy się z metodą wyznaczania granic ekosfery w oparciu o konkretne modele planet oraz omówimy zależność położenia tych granic od typu gwiazdy i jej zaawansowania ewolucyjnego. Na zakończenie krótko przedyskutujemy kilka efektów wiekowych, które zaburzają równowagę termiczną planety, prowadząc w dłuższej perspektywie czasowej do katastrofalnego przegrzania lub wyziębienia.

GRANICE EKOSFERY

W najprostszym modelu planeta jest traktowana jako ciało doskonale czarne: zakładamy, że pochłania całą docierającą do niej energię gwiazdy, emitując jednocześnie taką samą ilość energii w innym przedziale widmowym – zazwyczaj w bliższej lub dalszej podczerwieni (ARTYMOWICZ 1995). Tempo emisji ciała doskonale czarnego zależy tylko od temperatury i jest dane wzorem:

$$L_{p,c} = 4\pi r_p^2 \sigma T_p^4 \quad (1),$$

gdzie r_p i T_p oznaczają odpowiednio promień i temperaturę planety, a σ jest stałą Stefana – Boltzmanna, równą $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Jeżeli gwiazda emituje energię w tempie L_g (innymi słowy: jej moc promieniowania jest równa L_g), to tempo pochłaniania energii przez planetę jest równe:

$$L_{p,p} = \pi r_p^2 S \quad (2),$$

gdzie, jak poprzednio, a jest promieniem orbity. Wielkość S , zdefiniowana wzorem:

$$S = \frac{L_g}{4\pi a^2} \quad (3),$$

nosi nazwę strumienia energii. Jest to ilość energii, jaka przepływa w jednostce czasu przez 1 m^2 powierzchni znajdującej się w odległości a od gwiazdy i ustawionej prostopadle do padających na nią promieni świetlnych. Po przyrównaniu prawych stron wzorów (1) i (2) i skorzystaniu z definicji (3) otrzymujemy:

$$T_p^4 = \frac{L_g}{16\pi\sigma a^2} \quad (4).$$

Gdy w równaniu (3) podstawimy zamiast L_g wartość mocy promieniowania Słońca L_s (która wynosi $3,9 \cdot 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$) i wyrazimy pro-

mień orbity a w jednostkach równych średniej odległości Ziemi od Słońca (tzw. jednostkach astronomicznych, oznaczanych w astronomii skrótem j.a.; 1 j.a. jest równa $1,496 \cdot 10^{11}$ m), dostaniemy prosty wzór:

$$T_p = 280\sqrt{a^{-1}} \quad (5),$$

z którego otrzymuje się temperaturę powierzchni planety w stopniach Kelvina. Wiadąc że od razu, że w omawianym modelu temperatura Ziemi wynosi 280 K, czyli $+7^\circ\text{C}$. W rzeczywistości dzięki naturalnemu efektowi cieplarnianemu (patrz niżej) średnia temperatura naszej planety sięga 15°C . Wykorzystując zależności $T_p(a_w) = 100^\circ\text{C} \approx 373$ K oraz $T_p(a_z) = 0^\circ\text{C} \approx 273$ K, ze wzoru (5) można też wyliczyć wewnętrzny i zewnętrzny promień ekosfery Słońca $a_{w,s}$ i $a_{z,s}$. Wynoszą one odpowiednio 0,87 j.a. i 1,01 j.a.

Z równania (4) wynika, że promień orbity, dla którego planeta osiąga daną temperaturę T_p , rośnie proporcjonalnie do kwadratowego pierwiastka z mocy promieniowania gwiazdy:

$$a(T_p) = \frac{T_p^2}{\sqrt{16\pi\sigma}} \sqrt{L_g}. \quad (6).$$

Oznacza to, że przy czterokrotnym zwiększeniu (zmniejszeniu) mocy promieniowania promienie a_z i a_w zwiększają się (zmniejszają się) dwukrotnie. W takim samym stopniu zmienia się grubość ekosfery $\Delta a_e = a_z - a_w$. Ogólnie, im większą moc promieniowania ma gwiazda, tym grubsza jest jej ekosfera i tym dalej od niej leży.

Ostatni wniosek jest słuszny także dla bardziej realistycznego modelu planety, który uwzględnia efekt cieplarniany. Efekt ten występuje wtedy, gdy planeta ma atmosferę, która pochłania emitowane przez nią promieniowanie podczerwone. W takim przypadku efektywnym emitorem ciepła planety staje się atmosfera, zaś temperatura powierzchni planety musi ustalić się na poziomie wyższym, niż to wynika ze wzoru (4) lub (5). Wytłumaczyć to można ogólną zasadą, zgodnie z którą energia cieplna płynie od ciała cieplejszego do chłodniejszego. Promieniowanie gwiazdy rozgrzewa planetę, ta jednak nie może odprowadzić ciepła wprost w przestrzeń międzygwiazdową, lecz musi je przekazać atmosferze. Jeśli atmosfera promieniuje jak ciało doskonale czarne, jej temperatura jest dana wzorem (4) lub (5). Aby jednak ciepło mogło płynąć z powierzchni planety

do atmosfery, temperatura powierzchni musi być większa, niż temperatura atmosfery.

Na ogół atmosfery planet nie promieniają jak ciała doskonale czarne, i chcąc ustalić, jak bardzo ich obecność podnosi temperaturę powierzchni, trzeba wykonać skomplikowane rachunki modelowe. O położeniu granic ekosfery decyduje już nie tylko moc promieniowania gwiazdy, lecz także jej tzw. temperatura efektywna, oznaczana w astronomii symbolem T_e . Im jest ona niższa, tym większą część energii gwiazda wypromieniowuje w podczerwieni (patrz np. KUBIAK 1994). Gwiazdowe promieniowanie podczerwone jest pochłaniane przez atmosferę planety, przez co temperatura atmosfery wzrasta, potęgując efekt cieplarniany.

W pobliżu wewnętrznej granicy ekosfery głównym gazem cieplarnianym jest para wodna, zaś w pobliżu jej granicy zewnętrznej – dwutlenek węgla (KASTING i współaut. 1993). Modelując atmosferę zawierającą H_2O i CO_2 , można wyznaczyć minimalne i maksymalne krytyczne strumienie promieniowania emitowanego przez gwiazdy o różnych temperaturach efektywnych. Krytyczny strumień minimalny S_{min} jest zdefiniowany jako taki, przy którym cieplarniany efekt dwutlenku węgla utrzymuje powierzchnię planety w temperaturze 0°C ; natomiast krytyczny strumień maksymalny S_{max} – jako taki, przy którym woda zaczyna parować z powierzchni planety w tempie szybszym, niż na niej osiada wskutek opadów. Rosnąca zawartość pary wodnej w atmosferze potęguje efekt cieplarniany, co z kolei zwiększa tempo parowania. Wywołany w ten sposób lawinowy efekt cieplarniany (ang. runaway greenhouse effect) w krótkim czasie doprowadza do przemieszczenia się całej wody z powierzchni planety do atmosfery, gdzie jej cząsteczki są dysocjowane przez ultrafioletowe promieniowanie gwiazdy. KASTING i współaut. (1993) rozpatrują jeszcze dwie inne definicje strumieni krytycznych, którymi jednak nie będziemy się tutaj zajmować.

Omawiana praca podaje na str. 121 tabelę z wartościami S_{min} i S_{max} dla kilku typów gwiazd. Zostały one obliczone dla modelu planety o masie i rozmiarach Ziemi, której atmosfera składa się z azotu i tlenu w postaci cząsteczkowej z domieszkami pary wodnej i dwutlenku węgla (więcej szczegółów można znaleźć w pracy KASTING 1988). UNDERWOOD i współaut. (2003) dopasowali do tej tabeli proste wzory:

$$S_{min} = 6,19 \cdot 10^{-9}(T_e)^2 - 1,319 \cdot 10^{-5}T_e + 0,234 \quad (7),$$

oraz:

$$S_{max} = 4,19 \cdot 10^{-8}(T_e)^2 - 2,139 \cdot 10^{-4}T_e + 1,268 \quad (8),$$

które dla danego T_e podają krytyczne strumienie w jednostkach stałej słonecznej, zdefiniowanej jako wartość strumienia energii słonecznej w odległości 1 j.a. od Słońca i równej 1368 Wm^{-2} . Znając S_{min} i S_{max} , można skorzystać z równania (3) i obliczyć a_w oraz a_z dla gwiazdy o dowolnej mocy promieniowania. Wygodnie jest posłużyć się przy tym wzorami:

$$a_w = \sqrt{\frac{L_g}{S_{max}}} \quad (9)$$

$$a_z = \sqrt{\frac{L_g}{S_{min}}} \quad (10),$$

w których odległości są wyrażone w jednostkach astronomicznych, zaś moce promieniowania w mocach promieniowania Słońca. Ponieważ temperatura efektywna Słońca jest równa ok. 5700 K (ARTYMOWICZ 1995), S_{max} i S_{min} dla Układu Słonecznego wynoszą od-

powiednio ok. $1,43$ i ok. $0,36$. Podstawiając te wartości do wzorów (9) i (10) dla $L_g = 1$ otrzymamy $a_{w,s} = 0,84$ j.a. oraz $a_{z,s} = 1,67$ j.a. Te same wartości podają KASTING i współaut. (1993), co świadczy o dobrym dopasowaniu wzorów (7)–(10).

Jak więc widać, przyjęcie bardziej realistycznego modelu planety prowadzi do znaczącego powiększenia obszaru ekosfery. O ile zwiększenie się a_z po uwzględnieniu efektu cieplarnianego jest zrozumiałe i oczywiste, o tyle zmniejszenie się a_w może budzić uzasadnione wątpliwości. Ten sprzeczny z intuicją wynik jest jednak poprawny, w obliczeniach uwzględniono bowiem fakt, iż planeta odbija część padającego na nią promieniowania słonecznego. Autorzy przyjęli współczynnik odbicia równy $0,22$, przy którym temperatura modelu planety umieszczonego w odległości 1 j.a. od Słońca była równa średniej temperaturze Ziemi. Pewne pojęcie o zależności położenia granic ekosfery od niektórych parametrów modelu planety daje tabela zamieszczona w omawianej pracy na str. 117. Przy dużych zmianach masy planety, zawartości CO_2 w jej atmosferze i grubości atmosfery zmieniają się one w stosunkowo wąskich przedziałach $0,81 \text{ j.a.} \leq a_{w,s} \leq 0,88 \text{ j.a.}$ oraz $1,64 \text{ j.a.} \leq a_{z,s} \leq 1,69 \text{ j.a.}$

EWOLUCJA EKOSFERY

Nasze wyobrażenia o gwiazdach opierają się na teorii ich budowy i ewolucji, która pomyślnie przeszła liczne testy obserwacyjne i jest jedną z najlepiej ugruntowanych teorii astrofizycznych. Mówi ona, że moc promieniowania gwiazdy silnie zależy od jej masy i zaawansowania ewolucyjnego. Energia emitowana przez gwiazdę pochodzi z reakcji syntezy jądrowej, podczas których z jąder lżejszych pierwiastków powstają jądra pierwiastków cięższych. Reakcje te zachodzą w głębokim wnętrzu gwiazdy – tzw. rdzeniu. W pierwszej, najdłuższej trwającej i najspokojniejszej fazie życia gwiazdy jądra wodoru łączą się w jądra helu, co astrofizycy trochę nieprecyzyjnie nazywają „spalaniem wodoru”. Tempo tej reakcji bardzo silnie zwiększa się z temperaturą, która z kolei rośnie wraz z masą gwiazdy. W efekcie moc promieniowania gwiazdy zwiększa się z jej masą zgodnie z przybliżonym wzorem:

$$L \approx M^{3,5} \quad (11),$$

w którym zarówno moc promieniowania jak i masa są wyrażone w jednostkach słonecznych.

Wypływa stąd niezwykle ważny wniosek: ponieważ zapasy wodoru są proporcjonalne do M , gwiazdy o dużych masach „wypalają się” znacznie szybciej, niż gwiazdy mało masywne. Dla przykładu, Słońce zużyje wódór w czasie $\tau_{H,s} \approx 10$ mld lat, zaś gwiazda o masie $15 M_s$ ($M_s =$ masa Słońca) – w czasie:

$$\tau_H = \tau_{H,s} \frac{M}{L} = \tau_{H,s} \frac{15}{15^{3,5}} \approx 0,001 \tau_{H,s} \quad (12),$$

a więc tysiąckrotnie szybciej.

Wyczerpywanie zapasów wodoru powoduje zmiany takich podstawowych parametrów gwiazdy, jak średnica i moc promieniowania. W miarę ubywania wodoru i przybywania helu zwiększa się średnia masa cząsteczkowa materii, z której jest zbudowany rdzeń, co prowadzi do zachwiania równowagi między ciśnieniem i grawitacją. Dążąc do jej odzyskania, rdzeń kurczy się, przy czym wzrasta jego temperatura i moc

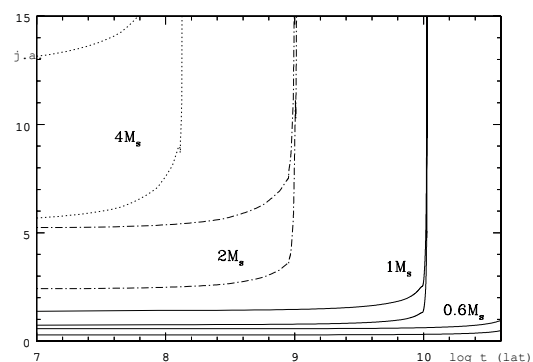
promieniowania. Jednocześnie zewnętrzne obszary gwiazdy, w których nie zachodzą reakcje jądrowe, są rozdymane przez rosnące ciśnienie promieniowania i stygną, wskutek czego maleje temperatura efektywna. Początkowo wszystkie te zmiany zachodzą powoli, lecz z upływem czasu ich tempo znacznie się zwiększa. Na przykład, za ok. 7 mld lat moc promieniowania Słońca będzie dziesięciokrotnie większa od obecnej, ale już po dalszych 120 mln lat przewyższy swą obecną wartość aż tysiąckrotnie (SCHALLER i współaut. 1992). Rozedmie się wtedy tak bardzo, że jego średnica będzie niemal równa średnicy orbity Ziemi. Życie na Ziemi stanie się jednak niemożliwe już dużo wcześniej, ponieważ w miarę wzrostu mocy promieniowania Słońca ekosfera będzie się przesuwiała na zewnątrz. Za ok. 1–2 mld lat jej wewnętrzna granica znajdzie się poza orbitą Ziemi (GAIDOS i SELSIS 2006), co oznacza, że nasza planeta utraci wodę.

Po wypaleniu wodoru gwiazda o masie większej od ok. $0,5 M_{\odot}$ „zapala hel”, czyli rozpoczyna syntezę jąder węgla z jąder helu (rdzenie gwiazd o mniejszych masach nigdy nie osiągają progowej temperatury 10^8 K, przy której reakcja ta zaczyna zachodzić). Kurczy się przy tym i zmniejsza moc promieniowania; kurczy się też więc jej ekosfera. W ten sam sposób będzie ewoluowało Słońce. Jednak nawet jeśli Ziemia ponownie znajdzie się we wnętrzu ekosfery, to najprawdopodobniej nie zdoła odtworzyć swych zasobów wodnych. Wprawdzie planety mogą być zapatrywane w wodę przez zderzające się z nimi jądra komet (KASTING i CATLING 2003), ale proces ten osiąga znaczącą wydajność tylko w stosunkowo krótkim okresie po powstaniu układu planetarnego.

Jak więc widać, z punktu widzenia teorii ekosfer istotne jest tylko to, co dzieje się z gwiazdą i jej otoczeniem w fazie palenia wodoru. Porównując szanse na rozwój życia w otoczeniu gwiazd o różnych masach można zatem ograniczyć się do tego etapu ich ewolucji, w którym źródłem emitowanej przez nie energii jest przemiana wodoru w hel. Położenie wewnętrznej i zewnętrznej granicy ekosfery w funkcji czasu dla palących wodor gwiazd o masach $0,6 M_{\odot}$, $1 M_{\odot}$, $2 M_{\odot}$ i $4 M_{\odot}$ jest pokazane na Ryc. 1. Widać na niej, że w rozległych ekosferach gwiazd o masie większej od ok. $2 M_{\odot}$ warunki sprzyjające istnieniu życia utrzymują się przez czas nie dłuższy niż 1 mld lat. Pierwsze prymitywne mikroorganizmy pojawiły się na Ziemi prawdopodobnie

ok. 3,5 mld lat temu, czyli miliard lat po jej powstaniu (GONZALEZ 2005). Przy założeniu, że historia biosfery Ziemi jest kosmicznym standardem, oznacza to, iż szanse znalezienia życia przy gwiazdach o masach większych od ok. $2 M_{\odot}$ są znikome. Duże rozmiary ich ekosfer nie mają tu żadnego znaczenia.

Z drugiej strony, niewielkie ekosfery gwiazd o małych masach utrzymują niemal niezmienną położenie nawet dziesiątki razy dłużej niż ekosfera Słońca. Gwiazdy o masach mniejszych od $0,8 M_{\odot}$ stanowią co najmniej 75% gwiazdowej populacji Galaktyki, a łączna objętość ich ekosfer może być większa od łącznej objętości ekosfer gwiazd podobnych do Słońca. Sprawia to, że obiekty te cieszą się sporym zainteresowaniem zespołów naukowych opracowujących plany misji TPF (np. SEGURA i współaut. 2005). Z różnych względów może się jednak okazać, że pokładane w nich nadzieje pozostaną niespełnione. Wątpliwości budzą przede wszystkim ciasne orbity planet. Musiałyby one krążyć tak blisko swych macierzystych gwiazd, że pod działaniem sił pływowych okresy ich obrotu wokół osi zrównywałyby się z okresami orbitalnymi. Taka planeta zwracałaby do gwiazdy stale tę samą stronę, która najprawdopodobniej uległaby przegrzaniu, podczas gdy przeciwna strona zostałaby wymrożona. Na razie brak jednak modeli na tyle szczegółowych, by mogły jednoznacznie rozwiązać ten problem, i najpewniejszymi kandydatkami na centralne obiekty ekosfer, w których rozwinęło się



Rycina 1. Ewolucja ekosfer gwiazd o różnych masach (uwaga: logarytmiczna skala czasu).

Górna i dolna krzywa w każdej parze obrazuje odpowiednio ewolucję zewnętrznej i wewnętrznej granicy ekosfery. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu wzorów (7)–(10) dla gwiazdowych modeli zaczerpniętych z pracy SCHALLERA i współaut. (1992). Symbol M_{\odot} oznacza masę Słońca.

życie, pozostają gwiazdy o masach niewiele różniących się od masy Słońca.

W ostatnich latach przy obiektach tego typu odkryto prawie dwieście planet. Ograniczenia dostępnych dziś instrumentów badawczych sprawiły, że niemal bez wyjątku są to planety znacznie większe od Ziemi, a w wielu przypadkach nawet od Jowisza (planety wielkości Ziemi będą w stanie wykrywać dopiero wspomniane wyżej satelity COROT i Kepler). Niektóre z tych planet-olbrzymów znajdują się wprawdzie w ekosferze, ale mimo to wydaje się nieprawdopodobne, by mogło się na nich rozwinąć życie podobne do ziemskiego. Ewentualnych śladów życia można by szukać na ich hipotetycznych księ-

życach; jednak badanie takich obiektów jest na razie niemożliwe. Interesujący eksperyment ze znanymi pozasłonecznymi układami planetarnymi przeprowadzili ostatnio JONES i współaut. (2006), umieszczając w nich wirtualne planety ziemopodobne i śledząc ewolucję ich orbit. Okazało się, że mimo zaburzeń spowodowanych grawitacyjnym oddziaływaniem planet-olbrzymów aż w 75% przypadków obiekty te pozostawały w granicach ekosfery przez co najmniej miliard lat. Nie wykluczone więc, że pozasłoneczne układy planetarne, w których rozwinęło się życie, są nam już znane, choć ciągle jeszcze nie umiemy wykryć w nich śladów pozostawianych przez organizmy żywe.

KILKA UWAG O EWOLUCJI PLANET

Samo znalezienie się planety w obrębie ekosfery nie gwarantuje, że utrzymają się na niej warunki sprzyjające istnieniu życia – nawet wtedy, gdy jest to stabilna ekosfera gwiazdy o masie nie większej, niż masa Słońca. Bardzo istotną rolę odgrywają tu nieomawiane dotychczas czynniki związane z ewolucją planety, jak również z ewolucją innych składników układu planetarnego. Ich szczegółową dyskusję podają GAIDOS i SELSIS (2006), GONZALEZ (2005) oraz KASTING i CATTING (2003); tutaj ograniczymy się tylko do wymienienia kilku najbardziej oczywistych efektów.

Nie ulega żadnej wątpliwości, że w Ziemię uderzały ciała kosmiczne o rozmiarach wystarczająco dużych, by spowodować globalne zaburzenia klimatu i wymarcie wielu gatunków. Jest też bardzo prawdopodobne, że zderzenie Ziemi z obiektem wielkości Marsa było przyczyną powstania Księżyca (CANUP i ASPHAUG 2001). Gdyby doszło do niego już po powstaniu biosfery, uległaby ona całkowitemu zniszczeniu. Podobnie katastrofalne skutki może mieć długotrwałe bombardowanie mniejszymi obiektami, pochodzącymi z odległych rejonów układu planetarnego, które zostały zaburzone przez efekty rezonansowe w ruchach planet-olbrzymów (GOMES i współaut. 2005). W Układzie Słonecznym prawdopodobieństwo takich katastrof jest obecnie zanedbywalnie małe; nie można jednak wykluczyć, że inne układy planetarne są mniej stabilne, niż nasz. Z kolei efekty rezonansowe w oddziaływaniach grawitacyjnych między planetą ziemopodobną i planetami-olbrzymami są w stanie zmieniać kąt, pod ja-

kim oś jej obrotu jest nachylona do płaszczyzny orbity. Gdy oś leży niemal w płaszczyźnie orbity, roczne zmiany temperatury osiągają dużą amplitudę na całej powierzchni planety, co w przypadku gdy znajduje się ona blisko wewnętrznej granicy ekosfery może przesądzić o utracie wody.

Wielkość planety wpływa nie tylko na globalne właściwości jej atmosfery (które zostały uwzględnione w modelu omawianym w poprzednim rozdziale), lecz w znacznym stopniu decyduje o takich pomijanych dotychczas i na pierwszy rzut oka drugorzędnych czynnikach, jak zachmurzenie i powolna utrata gazów atmosferycznych (KASTING i współaut. 1993). Od pierwszego z nich zależy albedo planety, drugi zaś prowadzi do stopniowej redukcji efektu cieplarnianego, postępującej tym szybciej, im mniejsza jest masa planety.

Duży wpływ na wielkość efektu cieplarnianego ma również charakter i wydajność wymiany gazów między atmosferą i litosferą planety. Szczególną wagę przypisuje się tu cyklowi wymiany dwutlenku węgla, który w długiej skali czasowej może działać jako stabilizator klimatu. Wraz z wodami opadowymi gaz ten przedostaje się z atmosfery do oceanu, gdzie reaguje z przyniesionymi przez rzeki produktami erozji skał lądowych. Wytworzone w ten sposób skały węglanowe są transportowane na płytach tektonicznych do stref subdukcji, gdzie pod wysokim ciśnieniem i w wysokiej temperaturze wydzielają dwutlenek węgla uwalniany następnie do atmosfery przez wulkany. Wzrost temperatury w atmosferze powoduje zintensyfikowanie

opadów i procesów erozyjnych, co przyspiesza przepływ dwutlenku węgla do litosfery i osłabia efekt cieplarniany, ochładzając tym samym atmosferę i zamykając negatywne sprzężenie zwrotne. W przeciwieństwie do dwutlenku węgla, para wodna jest czynnikiem destabilizującym. Jak już bowiem wspomnieliśmy, zwiększenie tempa parowania prowadzi do wzmocnienia efektu cieplarnianego, co skutkuje wzrostem temperatury atmosfery i dalszym zwiększeniem tempa parowania.

Powyższy przegląd jest z konieczności dalece niekompletny. Daje jednak na tyle jasne pojęcie o złożoności procesów, od których zależą warunki panujące na powierzchni planety, by zacząć podejrzewać, że w kosmosie życie może pojawiać się znacznie rzadziej, niż to wynika z optymistycznych oszacowań opartych na tzw. prawie Drake'a (np. LEMARCHAND 2003). Czy tak jest naprawdę, powinny pokazać najbliższe dziesięciolecia.

PODSUMOWANIE

(1) Teoria ekosfer znajduje praktyczne zastosowanie przy planowaniu misji kosmicznych, których celem jest poszukiwanie śladów życia w pozasłonecznych układach planetarnych.

(2) Położenie granic ekosfery zależy nie tylko od mocy promieniowania i temperatury gwiazdy, lecz także od przyjętego modelu planety.

(3) Z punktu widzenia możliwości pojawienia się i przetrwania życia ważny jest tylko pierwszy etap ewolucji gwiazdy, w którym emitowana przez nią energia pochodzi z przemiany wodoru w hel. Historia życia na Ziemi wskazuje, że u gwiazd o masie więk-

szej od dwóch mas Słońca jest on zbyt krótki, by mogły rozwinąć się prymitywne organizmy żywe.

(4) Największe szanse na znalezienie podobnych do Ziemi planet z biosferami rokują gwiazdy o masie nie większej od masy Słońca.

(5) Samo znalezienie się planety w obrębie ekosfery takiej gwiazdy nie gwarantuje jednak, że warunki sprzyjające życiu utrzymają się na niej przez czas niezbędny do pojawienia się organizmów żywych. Przesądzają o tym różnorodne i bardzo skomplikowane procesy decydujące o wiekowych zmianach klimatu planety.

STELLAR ECOSPHERES

Summary

The article reviews the theory of stellar eco-spheres (also called habitable zones), emphasizing the following points:

(1) The theory of habitable zones helps to choose appropriate targets for planned missions which will look for biosignatures in extrasolar planetary systems.

(2) The location of habitable-zone boundaries depends not only on luminosity and effective temperature of the star, but also on the particular planet's model we adopt.

(3) Hydrogen-burning is the only evolutionary phase in which stars can create and maintain con-

ditions suitable for the emergence and development of life.

(4) Search for extrasolar biospheres should be focused on stars with masses not larger than the solar mass.

(5) Even if the planet orbits a solar-like star within its ecosphere, it may easily happen that conditions appropriate for life to emerge on its surface will not be maintained long enough. This is because the long-term evolution of planet's climate depends on a multitude of very complicated processes which must be rather carefully balanced.

LITERATURA

ARTYMOWICZ P., 1995. *Astrofizyka układów planetarnych*. PWN, Warszawa.
 BEICHMAN C. A., FRIDLUND M., TRAUB W. A., STAPELFELDT K. R., QUIRRENBACH A., SEAGER S., 2006. *Comparative planetology and the search for life beyond the Solar System*. [W:] *Protostars and Planets V*. REIPURTH B., JEWITT D., KEIL K. (red). University of Arizona Press, Tucson, w druku (także: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601469>).

CANUP R. M., ASPHAUG E., 2001. *Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation*. *Nature* 412, 708–711.

CATANZARITE J., SHAO M., TANNER A., UNWIN S., YU J., 2006. *Astrometric detection of terrestrial planets in the habitable zones of nearby stars with SIM PlanetQuest*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 118, 1322–1342 (także: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0603681>).

- GAIDOS E., SELSIS F., 2006. *From protoplanets to protolife: the emergence and maintenance of life*. [W:] *Protostars and Planets V*. REIPURTH B., JEWITT D., KEIL K. (red). University of Arizona Press, Tucson, w druku (także: <http://arXiv.org/abs/astro-ph/0602008>).
- GOMES R., LEVISON H. F., TSIGANIS K., MORBIDELLI A., 2005. *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial plane*. *Nature* 435, 466–469.
- GONZALEZ G., 2005. *Habitable Zones in the Universe*. *Origins Life Evol. Biospheres* 35, 555–606.
- JONES B. W., SLEEP P. N., UNDERWOOD D. R., 2006. *Habitability of known exoplanetary systems based on measured stellar properties*. *Astrophys. J.* 649, 1010–1019 (także: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0603200>).
- KASTING J. F., 1988. *Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus*. *Icarus* 74, 472–494.
- KASTING J. F., CATLING D., 2003. *Evolution of a habitable planet*. *Ann. Rev. Ast. Aph.* 41, 429–63.
- KASTING J. F., WHITMIRE D. P., REYNOLDS R.T., 1993. *Habitable zones around main sequence stars*. *Icarus* 101, 108–128.
- KUBIAK M., 1994. *Gwiazdy i materia międzygwiazdowa*. PWN, Warszawa.
- LEMARCHAND G. A., 2003. *The technological adolescent age transition: a boundary to estimate the last factor of the Drake Equation*. [W:] *Bioastronomy 2002: Life Among the Stars. Proceedings of IAU Symposium No. 213*. NORRIS R., STOOTMAN F. (red). Astronomical Society of the Pacific, San Francisco.
- SCHALLER G., SCHAEERER D., MEYNET G., MAEDER A., 1992. *New grids of stellar models from 0.8 to 120 Msolar at Z=0.020 and Z=0.001*. *Astron. Astrophys.* 96 (Suppl.), 269–331.
- SEGURA A., KASTING J. F., MEADOWS V., COHEN M., SCALO J., CRISP D., BUTLER R. A. H., TINETTI G., 2005. *Biosignatures from earth-like planets around M Dwarfs*. *Astrobiology* 5, 706–725.
- STRUGHOLD H., 1955. *The ecosphere of the Sun*. *Aviation Med.* 26, 323–328.
- UNDERWOOD D. R., JONES B. W., SLEEP P. N., 2003. *The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life*. *Int. J. Astrobiol.* 2, 289–299