

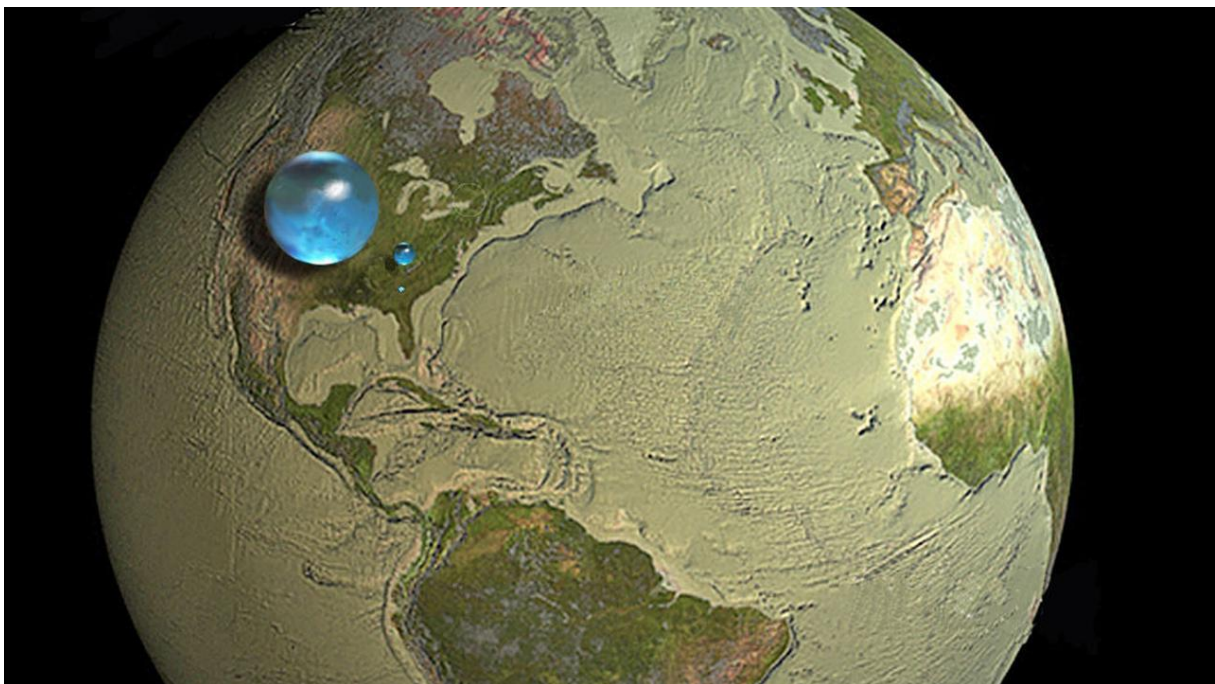
Co (astro)fizyk widzi w wodzie?

Dr Krzysztof Rochowicz, KPCEN/UMK Toruń

To niezwykła cząsteczka. Łączy w sobie dwa atomy pierwiastka podstawowego, najbardziej we Wszechświecie rozpowszechnionego, z atomem innego, najbardziej powszechnego na Ziemi, niezbędnego do oddychania i podtrzymującego proces palenia.

Woda jest jedną z najpospolitszych substancji we Wszechświecie. Cząsteczka wody jest trzecią najbardziej rozpowszechnioną molekułą w ośrodku międzygwiazdowym, po cząsteczkowym wodorze i tlenku węgla. Jest również szeroko rozpowszechniona w Układzie Słonecznym: stanowi istotny element budowy Ceres i księżyców lodowych krążących wokół planet-olbrzymów, jako domieszka występuje w ich atmosferach, a przypuszcza się, że duże jej ilości znajdują się we wnętrzach tych planet. Jako lód występuje także na części planetoid, a zapewne również na odległych obiektach transneptunowych.

Dość znany fakt: woda jest bardzo rozpowszechniona także na powierzchni Ziemi. Występuje głównie w oceanach, które pokrywają 70% powierzchni globu, ale także w rzekach, jeziorach i w postaci stałej w lodowcach. Część wody znajduje się w atmosferze (chmury, para wodna), duża jest jej zawartość w strukturze minerałów. Popatrzmy więc na rysunek.



Gdyby zebrać całą wodę występującą na naszej planecie - w oceanach, lodowcach, rzekach, jeziorach, gruncie, atmosferze i żywych organizmach - w jednym miejscu i zamknąć ją w kuli, miałaby ona średnicę ok. 1384 km. [1] Niestety, duża część zapasu z hipotetycznej "wodnej bańki" nie nadaje się do wykorzystania przez ludzi ze względu na to, że jest zasolona. Ziemskie zapasy wody zdatnej do picia - ze źródeł gruntowych, jezior, rzek i bagien - przedstawia na grafice mniejsza niebieska kula umieszczona na terenie amerykańskiego stanu Kentucky. W rzeczywistości ta bańka miałaby tylko ok. 273 km średnicy. Jednak 99 proc. jej zawartości stanowią wody gruntowe, których większość nie jest dostępna dla ludzi. Jak w takim razie wyglądałyby zapasy wody pitnej, do której mamy dostęp? Na grafice amerykańskiej agencji geologicznej USGS to obrazuje je małe niebieska kropka

znajdująca się w rejonie Atlanty w południowo-wschodnim stanie Georgia. Pokazuje ona objętość zapasów wody ze wszystkich jezior i rzek naszej planety - bo większość wody wykorzystywanej przez ludzi i ekosystemy pochodzi ze źródeł powierzchniowych. Średnica takiej banki z dostępną pitną wodą to zaledwie 56 km...

Cytując klasyka: powiedzieć, że nie ma życia bez wody, to nic nie powiedzieć.

Oczywiście można spierać się, czym jest życie i dość bałamutnym zajęciem jest dyskusowanie o życiu z punktu widzenia jedyne go znanego nam przypadku, ale na ogół wszyscy zgadzają się z tym, że woda stanowi fundament życia. Co ciekawe, dyskusje o życiu z kosmicznej perspektywy dopuszczają jego oparcie np. na związkach krzemu zamiast węgla, ale trudno byłoby znaleźć lepszy od wody rozpuszczalnik związków ustrojowych i niezbędne uzupełnienie pokarmu wszystkich znanych organizmów. Woda uczestniczy w przebiegu większości reakcji metabolicznych, stanowi środek transportu wewnątrzustrojowego, np. produktów przemiany materii, substancji odżywczych, hormonów, enzymów. Reguluje temperaturę. Stanowi płynne środowisko niezbędne do usuwania końcowych produktów przemiany materii. Jako składnik żywych organizmów buduje z reguły większą część ich masy, od ośmiornic, poprzez naszych ulubieńców, do nas samych – patrz rys.



Ciekawe, że kwestia pochodzenia wody (i życia) na Ziemi wciąż jeszcze nie została do końca uzgodniona. Większość uczonych zgadza się, że w zaopatrzeniu pierwotnej Ziemi w wodę dużą rolę odegrała tzw. epoka wielkiego bombardowania - okres w początkowej historii Układu Słonecznego, tuż po uformowaniu się planet, około 3,8 do 4,1 miliarda lat temu, podczas którego powstała m.in. większość kraterów uderzeniowych na Księżycu. Nieco więcej wątpliwości wzbudza proces powstania życia, choć i tu osiągnięto, jak się wydaje, dość dobre porozumienie. Warto pamiętać, że pierwotna ziemska atmosfera miała charakter

redukujący (preferowane były procesy, w trakcie których atom lub ich grupa przechodzi z wyższego stopnia utlenienia na niższy, oddając elektrony), nie zaś utleniający (jak dzisiaj). Składała się ona z elementów takich jak azot, para wodna, metan, dwutlenek węgla i tlenek węgla. Chociaż nie ma konsensusu wśród naukowców co do dokładnego składu wczesnej atmosfery, wiadomo że nie zawierała ona prawie wcale wolnego tlenu.

We współczesnej atmosferze tlenu i azotu nie tylko nie formują się spontanicznie związki organiczne (bo nie zawiera ona węgla, i jedynie bardzo nieznaczne ilości wodoru w postaci pary wodnej), ale wiele z nich rozkłada się reagując z tlenem. Zupełnie inaczej było jednak w pełnej związków węglowych atmosferze redukującej – pod wpływem wyładowań atmosferycznych, temperatury i innych czynników samorzutnie formowały się stanowiące podstawę życia związki organiczne. Woda jako rozpuszczalnik odgrywała w tych procesach niewątpliwie kluczową rolę i tak pozostaje do dziś.

Zachwyty fizyka nad naturą wody

Jednym z bardziej znanych fizyków współczesnych (z pokoleń po Einsteinie) pozostaje Richard Feynman, m.in. autor doskonałych kursów fizyki w formie podręczników akademickich oraz świetnych, popularnych, pamiętnikowych autobiografii. W jednej z nich (Pan raczy żartować, panie Feynman!) wspomina m.in. jak przy okazji jednego ze spacerów zwrócił uwagę na współdziałanie mszyc i mrówek - *ujrzałem mszycę i rzeczywiście: wkrótce przytuła mrówka i zaczęła ze wszystkich stron obstukiwać mszycę łapką. Coś pięknego! Potem z mszycy polał się sok. W powiększeniu kropla wyglądała jak piękna, błyszcząca piłka, a raczej balon, z powodu napięcia powierzchniowego. Mikroskop nie był zbyt dobry, na skutek aberracji chromatycznej kropla zabarwiła się trochę - coś wspaniałego! Mrówka wzięła piłkę między przednie łapki, uniosła i t r z y m a ł a w p o w i e t r z u . W tej skali świat jest taki inny, że można podnieść wodę i trzymać ją w powietrzu!*

W stanie nieważkości można te właściwości wody obserwować również w skali makro – astronauta wymyślili sporo niezłych zabaw w oparciu o wykorzystanie zjawiska napięcia powierzchniowego (np. youtube: liquid ping-pong in space). Oczywiście znacznie wcześniej uprzedziła ich w tym ewolucja, powołując do życia stworzenia wykorzystujące tę ciekawą własność wody (patrz fot.).

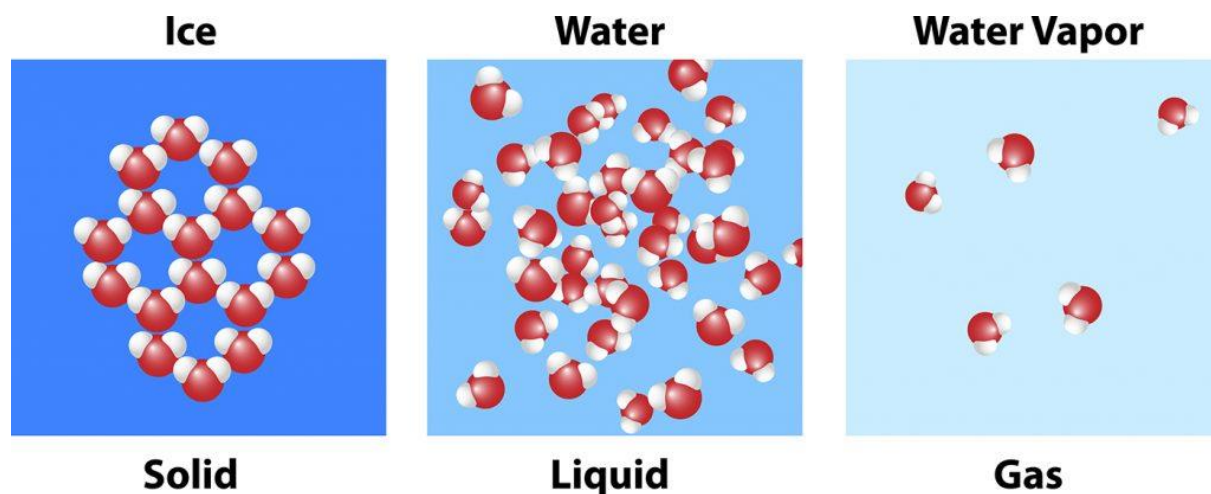


Nam też korzystanie z tej własności wody może dać wiele frajdy (surfing, narty wodne). W tych i innych sportach oraz w przypadku pływających łodzi i statków korzystamy ze zjawiska wyporności (siły wyporu) – zgodnie z prawem Archimedesesa, ciało zanurzone w cieczy (ogólniej: w płynie) pozornie traci na ciężarze tyle, ile wynosi ciężar wypartej substancji. A woda „waży” naprawdę sporo – wszyscy chyba kojarzymy masę litrowej butelki – to kilogram. Oznacza to, że na pytanie o gęstość wody usłyszymy od fizyka odpowiedź: to 1000 kg (albo 1 tona) na metr sześcienny! Z dużej gęstości wody zdają sobie sprawę miłośnicy akwariów, wiedząc jak duża może być to masa i rozważając już nie tylko wytrzymałość szkła (a i tu mogą się zdarzyć „spektakularne” wpadki – jak choćby pęknięcie akwarium w jednym z niemieckich hoteli w grudniu 2022), ale i podłogi (czyli stropu ewentualnych sąsiadów z dołu) w mieszkaniu.

Duża gęstość odpowiada m.in. za szybki wzrost ciśnienia hydrostatycznego z głębokością: już 10 metrów pod wodą do klasycznej 1 atmosfery, jaką charakteryzuje ciśnienie otaczającego nas powietrza, dokładamy kolejną – i tak każde następne 10 metrów głębokości to kolejna atmosfera; 1000 metrów to 100 atmosfer, a większe głębokości – odpowiednio więcej. Środowisko dla organizmu człowieka zupełnie egzotyczne, ale i tam życie sobie jakoś radzi...

Woda to nie tylko ciecz

Kolejną z zadziwiających (ratujących życie) własności wody jest proces jej zamarzania, wiążący się (co nie występuje w przypadku innych cieczy) z tworzeniem sieci krystalicznej o większej objętości – czyli lodu pływającego na jej powierzchni.



Gdy pod koniec prekambriu Ziemia przybrała postać śnieżnej kuli, istniejąca pod powierzchnią lodu woda umożliwiła przetrwanie życia – tak zresztą dzieje się i dziś w wodnych zbiornikach, gdy zimą skuwa je lód. Dodatkowym „cudem” ułatwiającym wodzie to zadanie jest fakt, że gęstość tej cieczy jest największa w temperaturze 4 stopni Celsjusza; w połączeniu z małym przewodnictwem cieplnym umożliwia to funkcjonowanie i przetrwanie organizmom, gdyż woda o temperaturze około 4 stopni gromadzi się bliżej dna i bardzo niechętnie zmienia swoją temperaturę.

W czasie ostatnich wakacji spędzałem licowe wietrzne przedpołudnie na plaży w Ustce, próbując oddać się lekturze książki Tomasza Ulanowskiego „Ostatnia minuta. Pieszko przez antropocen”. Wiatr od morza był tak silny, że próbowałem schronić się przed nim za betonową konstrukcją „trzeciego mola”. Nie było łatwo, ale za to bogatą ilustracją fragmentu

książki dotyczącego energii „zakłętej” w atmosferze obserwowałem w czystej postaci – jako wzburzone fale i pędzące po niebie cumulusy. Ile waży/ile wody niesie ze sobą taka chmura? Rachunek jest dość prosty: średnia gęstość powietrza to nieco ponad 1 gram na liter (czyli kilogram na metr sześcienny). Z kolei pary wodnej w metrze sześciennym będzie już tylko około grama. Szacując bardzo „grubo” średnicę deszczowej chmury np. na 1000 metrów (i, powiedzmy, 1000 metrów w pionie), otrzymamy masę wody rzędu nawet tysiąca ton – tyle, ile waży 200 słońi. [2]

Prawdziwy cud: jak (i jak długo jeszcze?) woda ratuje nas przed katastrofą klimatyczną?

Docieramy do najbardziej może istotnej własności wody, która nie jest chyba powszechnie zbyt dobrze znana i dostatecznie doceniana: to jej ogromne ciepło właściwe (oraz idąca za tym bezwładność cieplna – to, że jej ogrzanie lub ochłodzenie wymaga przepływu dużej ilości energii). Ciepło właściwe jest wielkością, którą poznajemy w szkole – określa ono ilość ciepła potrzebną do ogrzania jednostkowej masy substancji o jeden kelwin (można też użyć tu określenia o jeden stopień Celsjusza). W szkole wprowadza się ją zwykle po to, by dręczyć i męczyć uczniów zadaniami związanymi z bilansem cieplnym (ogólnie chodzi o zasadę zachowania energii w formie „ciepło pobrane równa się ciepło oddane”). Tymczasem umknąć może świadomości uczniów fakt, że ciepło właściwe wody w stanie ciekłym to około 4200 dżuli (na kilogram i kelwin) – czyli tyle właśnie energii musimy dostarczyć, aby 1 liter wody ogrzać o jeden stopień. Ta porcja energii odpowiada podniesieniu masy 1 kilograma w ziemskim polu grawitacyjnym na wysokość ponad 420 metrów. To sporo, prawda? Aby liter wody o temperaturze 20 stopni doprowadzić do wrzenia, potrzebujemy energii, którą osoba o masie 60 kilogramów zużyłaby (oczywiście w uproszczeniu, ale też pomijając straty energii) do wejścia na górę o wysokości 5400 metrów! To więcej niż od podnóży do szczytu Kilimandżaro, o himalajskich w gruncie rzeczy 3-4-tysięcznikach (licząc od bazy) nie wspominając.

Jeszcze bardziej rzuca się w oczy odstępstwo wody od innych substancji pod tym względem – przykładowo dla żelaza czy aluminium nie przekracza 1000 dżuli na kg i K, inne ciecze (np. alkohole) charakteryzuje ciepło właściwe rzędu 2000 dżuli na kg i K. Mówiąc bardzo ogólnie – zbiorniki wodne to potężny rezerwuuar ciepła. Być może zetknęliście się już z pewnym porównaniem, które świadczy o tym, że w dużej mierze to ta cecha wody decyduje o tym, że jeszcze tu jesteśmy jako ludzie na Ziemi. Nasza działalność, głównie rolnicza i przemysłowa sprawia, że do atmosfery emitowane są przeogromne ilości ciepła (oraz dwutlenku węgla). Obie te kwestie bierze na siebie ziemski wszechocean (o lodowcach nie wspominając). Międzynarodowy zespół naukowców przeanalizował dane zebrane od lat 50-tych, analizując temperaturę wód oceanów do głębokości 2 tysięcy metrów [3]. Analiza danych pokazuje, że temperatura wód w oceanach rosła stopniowo w latach 1955-1986, a ocieplenie wód przyspieszyło w ostatnich kilku dekadach. W latach 1987-2019 temperatura wód w oceanach zwiększała się o 450 proc. szybciej niż w poprzednim okresie. Wzrost temperatury oceanów jest obecnie taki, jakbyśmy zrzucali niemal cztery bomby atomowe o sile bomby zrzuconej na Hiroszimę co sekundę przez ostatnich 25 lat... Badacze wyliczają, że od 1970 roku ponad 90 procent ciepła wyemitowanego na naszej planecie zostało przyjęte przez oceany, podczas gdy ok. 4 procent zaabsorbowała atmosfera i ziemia.

Nie dzieje się to oczywiście bezkarnie. Wzrost temperatury wody w oceanach (oraz rozpuszczanie się w niej coraz większej ilości dwutlenku węgla) powoduje coraz większe

zakwaszanie wody, co z kolei niszczy rafy koralowe, a organizmom żywym utrudnia budowanie np. skorupy czy pancerza zapewniającego przeżycie.

Gdy więc myślimy o Ziemi jako wodnej planecie, z pewnością mamy rację – pod wieloma względami woda jest substancją cudowną, sprzyjającą życiu i je ratującą. Jednocześnie nie powinniśmy zapominać, jak skromne są jej zasoby i jak wielkie czekają nas wyzwania w niedalekiej przyszłości, by walczyć choćby z nadciągającą i w nasze regiony suszą. Sceptykom raz jeszcze polecam lekturę książki „Nauka o klimacie” (i internetowej witryny naukaoklimacie.pl), wszystkim zaś zainteresowanym tematyką wody - arcyciekawej książeczki napisanej przez jedną z działaczek tego zespołu [4].

Literatura

[1] <https://ziemianarozdrozu.pl/ile-mamy-wody-na-ziemi/>

[2] Kłębiasta chmura waży tyle co 200 słoni. Dlaczego nie spada?

<https://wyborcza.pl/7,75400,25830761,klebiasta-chmura-wazy-tyle-co-200-slوني-dlaczego-nie-spada.html>

[3] "Cztery bomby atomowe co sekundę". Tak ciepłe są oceany

<https://www.rp.pl/nauka/art939341-cztery-bomby-atomowe-co-sekunde-tak-cieple-sa-oceany>

[4] Kardaś Aleksandra – Książka o wodzie, wydawnictwo MG (2019).