

kul, czyli od $r_1^2 + \dots + r_n^2$. Jednocześnie (znowu – intuicyjnie) trójkąt da się *dowolnie ściśle* wypełnić kulami, definiujemy więc

pole $T := \sup \{r_1^2 + \dots + r_n^2 : \text{istnieją parami rozłączne}$

$$\text{kule } \mathbb{B}(S_1, r_1), \dots, \mathbb{B}(S_n, r_n) \subseteq T\}.$$

Tak zdefiniowane pole nosi w literaturze nazwę *zawartości Minkowskiego*. Nie jest to łatwe, ale da się wykazać, że nie zależy od wybranej normy, a więc i od kształtu kul, jakimi wypełniamy T . Ściślej rzecz biorąc, prawie nie zależy – zmiana normy powoduje przemnożenie pól wszystkich figur przez pewną stałą.

Na zakończenie proponuję dwa zadania. Pierwsze daje warunek, którego sprawdzenie przenosi nas w znajome rejony geometrii. Drugie natomiast proponuje dokładniejsze zbadanie nieco zaskakującej rodziny norm.

Zadanie 1. Jeśli kwadrat normy punktu $A = (x, y)$ wyraża się wzorem $\|A\|^2 = ax^2 + 2bxy + cy^2$ dla pewnych $a, b, c \in \mathbb{R}$, to długość okręgu jednostkowego wynosi 2π .

Zadanie 2. Wyznaczyć długość okręgu jednostkowego dla normy, w której \mathbb{B} jest $2n$ -kątem foremnym. Sprawdzić, że długość ta jest mniejsza od 2π dla nieparzystych wartości n , a większa dla parzystych.

Czy życie musi być oparte na węglu?

Janusz PĘTKOWSKI*

*Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, MIT, Cambridge, USA

Idea życia krzemowego została po raz pierwszy zaproponowana przez niemieckiego astrofizyka Juliusa Scheinera pod koniec XIX wieku.



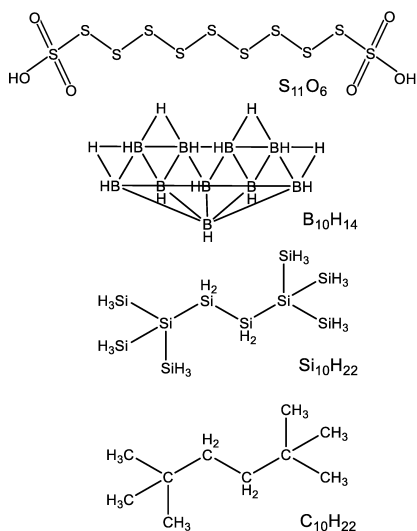
Heteroatom to w nomenklaturze chemii organicznej określenie dowolnego atomu, znajdującego się w cząsteczce związku organicznego, który nie jest atomem rusztowania – ani węglem, ani wodorem.

Możliwość istnienia życia, które wykorzystuje pierwiastki inne niż węgiel jako podstawowy budulec swojej biochemii, urzeka ludzką wyobraźnię od ponad wieku. Stałym rywalem węgla jest krzem. Co jednak mamy na myśli, mówiąc „życie oparte na krzemie”? Najczęściej chodzi o różnorodną chemię krzemooorganiczną, a konkretnie biochemię, w której krzem zastępuje węgiel w cząsteczkach organicznych.

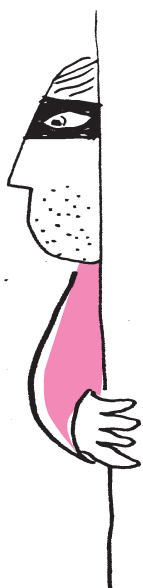
Krzem ma wiele cech wspólnych z węglem i występując pod różnymi postaciami krzemianów w skałach, jest drugim (po tlenie) najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem w skorupie ziemskiej. Mimo jego obfitości znamy niewiele przykładów zastosowania krzemu przez życie: jest to kwas krzemowy (np. H_4SiO_4) i krzemionka (SiO_2). Aby odpowiedzieć na pytanie, czemu wykorzystanie krzemu jest tak ograniczone, i dowiedzieć się, czy krzem (lub inne pierwiastki) zamiast węgla może być głównym budulcem jakiejś pozaziemskiej biochemii, musimy najpierw zrozumieć, jakie są ogólne wymagania dotyczące chemii życia, niezależnie od jego chemicznej podstawy.

Ogólne wymagania dotyczące chemii życia to kilka cech, które musi spełnić każda biochemia. Zasadnicze są trzy aspekty: wystarczająca różnorodność chemiczna, stabilność i reaktywność oraz obecność rozpuszczalnika. Mimo że różnorodność chemiczna, reaktywność i wymagania dotyczące rozpuszczalników są powiązane, omówimy je oddzielnie poniżej.

Różnorodność chemiczna to wymóg istnienia dostatecznie szerokiego zestawu związków chemicznych zdolnych do pełnienia wielu funkcji biologicznych. Życie na Ziemi robi użytek z aminokwasów (do produkcji białek), cukrów i zasad azotowych (do produkcji kwasów nukleinowych), hydrokso- i ketokwasów (jako podstawowych półproduktów metabolicznych), lipidów (do produkcji błon komórkowych) oraz wielu innych substancji. Tak zróżnicowany zestaw związków chemicznych wymaga zestawu pierwiastków zdolnych do budowania cząsteczek złożonych z wielu atomów, które zapewnią wystarczającą funkcjonalność biologiczną. Wymaganą różnorodność chemiczną można osiągnąć jedynie za pomocą dostatecznie uniwersalnego pierwiastka zdolnego do budowy rusztowania cząsteczki. Takie atomy *pierwiastka rusztowania* muszą się z kolei stabilnie wiązać ze sobą i z atomami innych pierwiastków – z heteroatomami (atomami



Rys. 1. Porównanie siarkowych, borowych, krzemowych i węglowych rusztowań cząsteczek chemicznych. Siarka (np. w cząsteczce $S_{11}O_6$) może tworzyć łańcuchy atomów połączonych ze sobą lub wiązać się z różnymi heteroatomami, np. azotem lub tlenem. Jednakże takie siarkowe łańcuchy mają bardzo ograniczoną możliwość rozgałęziania się, co mocno ogranicza różnorodność kształtów cząsteczek zbudowanych z siarkowego rusztowania. Bor (np. $B_{10}H_{14}$) tworzy raczej skupiska atomów niż mniejsze, liniowe cząsteczki, czyli jest niejako przeciwieństwem siarki. Z drugiej strony krzem (np. izomer dekasilanu $Si_{10}H_{22}$) i węgiel (np. izomer dekanu $C_{10}H_{22}$) tworzą łańcuchy o liniowych bądź rozgałęzionych strukturach mogących wiązać się z różnymi heteroatomami. Spośród możliwych alternatywnych pierwiastków rusztowania krzem wydaje się najbardziej obiecującym wyborem jako zamiennik węgla w biochemii



Cukry, na przykład, nie mogą być trwałym składnikiem hipotetycznej biochemii, w której rozpuszczalnikiem jest stężony kwas siarkowy, ponieważ pod wpływem kwasu siarkowego w przeciągu kilkudziesięciu sekund odwadniają się one do amorficznego węgla.

funkcjonalnymi). Dobry atom rusztowania musi łączyć się w łańcuchy i klastry, aby zbudować szkielet cząsteczki, jednocześnie umożliwiając heteroatomom aktywność chemiczną i w efekcie zapewnić funkcjonalność biologiczną cząsteczki. Pierwiastki budujące rusztowanie cząsteczek powinny również zapewniać możliwość tworzenia dużych cząsteczek, a co za tym idzie – dużej liczby różnorodnych biomolekuł. Rusztowanie musi być stosunkowo stabilne i niereaktywne chemicznie i jednocześnie dobrze wiązać się z heteroatomami.

Na Ziemi węgiel jest głównym pierwiastkiem rusztowania cząsteczek wchodzących w skład biochemii, co tłumaczy dosłowny sens terminu „życie oparte na węglu”. Kilka innych pierwiastków niebędących metalami mogłoby stanowić realną alternatywę rusztowania dla węgla. Siarka, bor, a w szczególności krzem są zdolne do tworzenia związków kowalencyjnych, w których wiele atomów tego samego typu wiąże się, tworząc duże cząsteczki (rys. 1). Polimery na bazie siarki, np. amfifilowe (tzn. np. jednocześnie wodo- i tłuszczolubne) politioniany, są jednak ograniczone do łańcuchów liniowych, co poważnie ogranicza różnorodność kształtów takich cząsteczek. Bor również tworzy struktury polimerowe; są one jednak raczej skupiskami atomów niż mniejszymi cząsteczkami (np. dekaboran(14), $B_{10}H_{14}$, o strukturze podobnej do nanocząsteczki diamentu). Pośród tych możliwości krzem wydaje się najbardziej obiecującym wyborem jako zamiennik węgla.

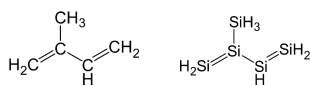
Ponieważ rusztowanie z samego węgla (i wodoru) zapewnia jedynie bardzo ograniczone funkcje związane z metabolizmem, heteroatomy są niezbędne do zapewnienia reaktywności chemicznej. Heteroatomy mogą tworzyć wiązania kowalencyjne z węglem lub innymi pierwiastkami, z których zbudowane jest rusztowanie cząsteczek, różnią się one jednak elektroujemnością od atomów rusztowania. Różnica w elektroujemności zapewnia reaktywność cząsteczek. Reaktywność chemiczna zapewniona przez heteroatomy jest odpowiedzialna za zdecydowaną większość reakcji metabolicznych zachodzących w ziemskich organizmach. Życie na Ziemi wykorzystuje kilka heteroatomów (tlen O, azot N, siarka S i fosfor P), które tworzą wiązania kowalencyjne zarówno z węglowym rusztowaniem biomolekuł, jak i między sobą, co umożliwia chemiczną różnorodność i reaktywność niezbędną do życia.

Krzem tworzy stabilne wiązania kowalencyjne z tymi samymi kluczowymi elementami budulcowymi co węgiel: z samym węglem, a także azotem, tlenem, siarką, fosforem i halogenami (fluorem, chlorem, bromem, jodem), może nawet tworzyć wiązania kowalencyjne z różnymi metalami. Oprócz wszechstronnego wiązania wielu innych pierwiastków w najbardziej powszechnym stanie tetrakoordynacyjnym, krzem może również tworzyć stabilne związki penta- i heksakoordynacyjne z kluczowymi pierwiastkami biogennymi, takimi jak azot, węgiel lub tlen, z ogólnym ładunkiem cząsteczki lub bez niego. Często prowadzi to do powstania krzemowych związków chemicznych, które nie mają bezpośrednich analogów wśród organicznych związków węgla, z czego wynika, że potencjalna różnorodność chemiczna krzemu (choć osiągnięta w inny sposób) może być tak duża, jak węgla. Jednak teoretyczna różnorodność chemiczna, którą zapewnia Si, nie jest wystarczająca, aby przeważać na korzyść krzemu jako dobrego pierwiastka rusztowania – ważna jest również stabilność chemiczna i reaktywność cząsteczek zawierających Si. Przyjrzymy się zatem tym cechom związków krzemu dokładniej.

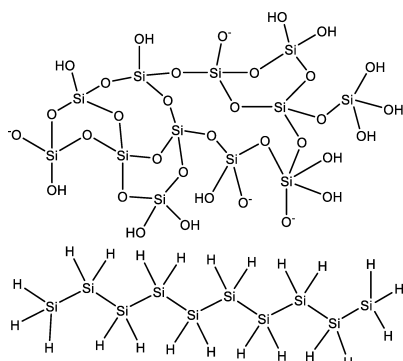
Stabilność chemiczna i reaktywność to drugi ogólny wymóg chemii życia: musi istnieć równowaga między stabilnością substancji biochemicznych a ich reaktywnością w rozpuszczalniku. Substancje biochemiczne powinny być odporne na reakcje zarówno z rozpuszczalnikiem, jak i ze sobą nawzajem, w zależności od skali czasowej wymaganej funkcji biologicznej. Innymi słowy, substancje biochemiczne muszą do pewnego stopnia reagować w swoim rozpuszczalniku, aby mogły spełniać wymagane funkcje biologiczne.

Rozpuszczalniki *aprotyczne* (czyli takie, które nie mogą przekazywać protonów) są zwykle mniej reaktywne niż woda, amoniak i kwas siarkowy.

Rozpuszczalniki protonowe (protyczne) zawierają w swojej strukturze chemicznej tak zwane „kwaśne protony”, które mogą ulec oderwaniu lub brać udział w tworzeniu wiązań wodorowych. Rozpuszczalniki protonowe to np. woda, amoniak lub kwas siarkowy. Wszystkie rozpuszczalniki protonowe są również rozpuszczalnikami polarnymi. Rozpuszczalniki aprotone (aprotyczne) nie mają w swojej strukturze chemicznej „kwaśnych protonów”, np. ciekły azot lub ciekły metan. Rozpuszczalniki aprotone mogą być polarne lub niepolarne.



Rys. 2. Tworzenie wielu biologicznie ważnych cząsteczek i grup funkcyjnych jest znacznie mniej wydajne dla krzemu niż dla ich węglowych odpowiedników. Jednym z takich przykładów jest tworzenie struktur nienasyconych. Struktury sprzężonych podwójnych wiązań, takie jak w węglowodorze o nazwie izopren (schemat po lewej), są łatwo tworzone przez życie na Ziemi. Tworzenie jakichkolwiek nienasyconych struktur krzemu (schemat po prawej) (np. zawierających podwójne lub potrójne wiązania między atomami krzemu) jest wysoce nieefektywne. Jeśli w ogóle są stabilne, to tylko wtedy, gdy są chronione przez inne grupy organiczne, i tylko w bardzo niskich temperaturach kriogenicznych



Rys. 3. Polimeryzacja krzemu w warunkach, gdzie tlenu jest pod dostatkiem, prowadzi do powstania siatki łańcuchów Si-O (takich jak przykładowa struktura bezpostaciowej krzemionki, schemat u góry), a nie polimerów liniowych, z wiązaniami Si-Si, takich jak silany (np. n-dekasilan, $\text{Si}_{10}\text{H}_{22}$, schemat dolny). W rezultacie chemia Si w środowiskach bogatych w tlen (np. w wodzie) ostatecznie prowadzi do powstania krzemionki (SiO_2)

Rozpuszczalność ciał stałych w jakimkolwiek rozpuszczalniku generalnie rośnie wraz z temperaturą, więc powszechnie dostępne rozpuszczalniki aprotone, takie jak ciekły metan (obecny np. na Tytanie, księżycu Saturna) i ciekły azot, są słabymi rozpuszczalnikami, ponieważ są ciekłe tylko w bardzo niskich temperaturach. Chemiczny charakter i temperatura rozpuszczalnika wpływa zarówno na to, jaki rodzaj chemicznych rusztowań jest możliwy, jak również na to, jaka chemia heteroatomów jest stabilna w danym rozpuszczalniku.

Ponadto reaktywność jest znacznie zmniejszona w niskich temperaturach, więc prawie każda substancja chemiczna jest stabilna w aprotycznych rozpuszczalnikach, takich jak ciekły metan lub ciekły azot. Dlatego też bardzo stabilne związki chemiczne nie będą składnikami życia w zimnych, aprotycznych rozpuszczalnikach, po prostu nie będą wystarczająco reaktywne, by wykonywać swoje biologiczne zadania.

W jaki sposób chemia organiczna krzemu spełnia wymagania równowagi między wystarczającą stabilnością a reaktywnością chemiczną? Pomimo potencjalnie bogatej i różnorodnej chemii krzemooorganicznej bezpośrednie zastąpienie węgla krzemem w cząsteczkach organicznych jest często niemożliwe. Wynika to ze znacznie większej reaktywności cząsteczek krzemooorganicznych, zwłaszcza w standardowych temperaturach i w wodzie (rys. 2). Na przykład, chociaż krzem jest zdolny do tworzenia długich łańcuchowych struktur chemicznych z wiązaniami Si-Si (np. w silanach), są one znacznie bardziej reaktywne niż ich odpowiedniki C-C, zwłaszcza w wodzie. W wyniku większej reaktywności wiązania Si-Si najpowszechniejsze stabilne polimery krzemu są zbudowane z łańcuchów Si-O – ponieważ wiązanie Si-O jest nieproporcjonalnie silniejsze od jakichkolwiek innych wiązań zawierających Si. Co więcej, polimeryzacja krzemu często prowadzi do siatki łańcuchów Si-O, a nie liniowych polimerów, jak w przypadku węgla; tworzenie długich liniowych polimerów jest często wymieniane jako podstawowa charakterystyka każdej biochemii. W rezultacie chemia Si w środowiskach bogatych w tlen, np. w wodzie, ostatecznie prowadzi do krzemionki SiO_2 , która jest chemicznie odpornym ciałem stałym, a nie gazem, jak w węglowym odpowiedniku SiO_2 , czyli CO_2 (rys. 3).

Czy znaczy to zatem, że ze względu na ogólnie znacznie wyższą reaktywność krzemu związki zawierające krzem są całkowicie bezużyteczne do życia jako ważny element budulcowy? Niekoniecznie. Stabilność i reaktywność są wypadkową samej chemii, ale także rozpuszczalnika.

Rozpuszczalnik jest istotny z następujących powodów: życie chemiczne musi działać w ośrodku, który pozwala cząsteczkom na ruch, ale który jest jednocześnie wystarczająco gęsty, aby powstrzymać duże cząsteczki przed wytrącaniem się w postaci agregatów. Oznacza to, że chemia życia musi działać w gęstym, ale płynnym rozpuszczalniku – w cieczy. Woda jest powszechnie uważana za idealny, być może jedyny, rozpuszczalnik gwarantujący rozwój życia. Woda aktywnie pomaga w samoorganizacji błon i polimerów życia, umożliwiając w ten sposób zjawisko kompartmentalizacji, czyli rozdzielania na przedziały (np. komórki), co jest koniecznym warunkiem życia. Na Ziemi woda w stanie ciekłym odgrywa dodatkowo aktywną rolę w procesach metabolicznych życia. Czy woda w stanie ciekłym może podtrzymać złożoną chemię krzemooorganiczną? Jest to mało prawdopodobne, bo jak wspomniano powyżej, potencjalna przestrzeń możliwości chemii krzemu skutkuje związkami najczęściej zupełnie niestabilnymi w wodzie, co w rezultacie oznacza, że biochemia krzemu na Ziemi jest niezwykle ograniczona chemicznie. W organizmach żywych wykorzystujących Si (np. u okrzemków) atom krzemu jest związany wyłącznie z tlenem, tworząc wiązanie pojedyncze Si-O.

Jeśli woda nie jest odpowiednim rozpuszczalnikiem dla różnorodnej, złożonej chemii krzemu, to może inne, alternatywne rozpuszczalniki są bardziej przyjazne dla chemii krzemu jako budulca życia? W szczególności przyjrzymy się przykładom kwasu siarkowego i krio-rozpuszczalników, ponieważ substancje te są obserwowane w naszym Układzie Słonecznym i mogą mieć znaczenie w skali planetarnej.

Chemia krzemu, a właściwie ogólnie rzecz biorąc każda chemia, jest znacznie bardziej stabilna w zimnych rozpuszczalnikach aprotowych (krio-rozpuszczalnikach) niż w rozpuszczalnikach protonowych. Jednak pomimo sprzyjających warunków dla stabilności i reaktywności pokonanie bariery rozpuszczalności w krio-rozpuszczalnikach jest prawdopodobnie niemożliwe, co utrudnia powstanie jakiegokolwiek rodzaju biochemii w takim środowisku.



Rozwiązanie zadania F 1026.

Do oszacowania masy spoczynkowej skorzystamy ze związku całkowitej energii cząstki o masie spoczynkowej m_ν z jej prędkością v :

$$E = \frac{m_\nu c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

gdzie c jest prędkością światła, a $\beta = v/c$. Im większa prędkość, tym większa energia cząstki. Czas t potrzebny do pokonania odległości L wynosi $t = L/v = L/(\beta \cdot c)$. Różnica Δt między dotarciem do detektora cząstek o najmniejszych i największych energiach wyniesie:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right) = \frac{L(\beta_2 - \beta_1)}{c\beta_1\beta_2},$$

gdzie parametr β_1 odpowiada cząstkom o najmniejszych energiach (E_1), a β_2 o największych energiach (E_2). Obie wartości β muszą być bardzo bliskie 1, jeśli po 170 000 lat lotu różnica czasów przelotu cząstek najszybszych i najwolniejszych wynosi tylko $\Delta t \approx 2$ s. Wyznamy wartość β dla cząstki o energii E i skorzystamy z faktu, że obie interesujące nas wartości β są bardzo bliskie 1:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{E^2}} \approx 1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{2E^2}.$$

Po podstawieniu do wzoru na Δt i skorzystaniu z faktu, że $\beta_1\beta_2 \approx 1$, otrzymujemy:

$$\Delta t = \frac{L}{2c} m_\nu^2 c^4 \left(\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right),$$

a stąd:

$$m_\nu^2 c^4 = \frac{2c\Delta t}{L} \frac{E_1^2 E_2^2}{(E_2^2 - E_1^2)}.$$

Po podstawieniu danych liczbowych (1 rok $\approx 31,6 \cdot 10^7$ s) otrzymujemy $m_\nu c^2 \approx 7$ eV. Wartość ta mieści się w przedziale wartości szacowanych na podstawie innych danych eksperymentalnych.



Dowiedz się więcej: Petkowski, J. J., Bains, W., & Seager, S., „On the Potential of Silicon as a Building Block for Life”, *Life*, 10(6), 84 (2020), www.mdpi.com/2075-1729/10/6/84

Z drugiej strony, kwas siarkowy H_2SO_4 jest rozpuszczalnikiem jeszcze bardziej agresywnym chemicznie niż woda, co w konsekwencji oznacza, że nie jest on idealnym rozpuszczalnikiem dla ziemskiej biochemii, szybko niszczonej przez stężony kwas. Znaczna część chemii krzemooorganicznej jest jednak stabilna w trudnych warunkach stężonego H_2SO_4 . Jest to możliwe, ponieważ niestabilność związków krzemu w wodzie wynika w dużej mierze z nukleofilowego „ataku” jonów OH^- na atom krzemu i stabilności powstałej w ten sposób struktury pentakoordynacyjnej. W warunkach stężonego kwasu siarkowego dominuje natomiast atak elektrofilowy, a atomy krzemu, ubogie w elektrony w prawie wszystkich związkach, nie są skutecznymi celami chemii elektrofilowej. Taka różnica w reaktywności oznacza, że szereg grup chemicznych występujących w związkach krzemooorganicznych, stosunkowo nietrwałych w wodzie, jest stabilny w kwasie siarkowym.

Fakt, że większa liczba krzemowych grup funkcyjnych wydaje się bardziej stabilna w stężonym kwasie siarkowym niż w wodzie, otwiera możliwość szerszego wykorzystania chemii krzemu przez hipotetyczne życie funkcjonujące w kwasie siarkowym. Choć węgiel nadal pełniłby dominującą funkcję jako główny pierwiastek budulcowy w biochemii opartej na kwasie siarkowym, krzem mógłby być szeroko używany jako heteroatom. Jednym z przykładów możliwych stabilnych cząsteczek krzemooorganicznych, które mogłyby zostać wykorzystane przez hipotetyczne życie na bazie kwasu siarkowego, są silany (cząsteczki krzemu zawierające wiązania Si-Si). Łańcuchy Si-Si, o których wiadomo, że są stabilne w stężonym kwasie siarkowym, mają tak ukształtowane orbitale molekularne σ , że umożliwiają przewodzenie elektronów wzdłuż rusztowania cząsteczki. Takie przewodzenie elektronów jest analogiczne do sprzężonych układów alkenowych w biochemii życia na Ziemi. Sprzężone alkeny, takie jak izopren (rys. 2), są bardzo szybko atakowane w stężonym H_2SO_4 , więc w zasadzie długołańcuchowe silany w kwasie siarkowym mogą zastępować funkcje biochemiczne wykonywane przez sprzężone dieny w biochemii ziemskiej. Taka wyjątkowa chemia krzemu może zapewnić niezbędną funkcjonalność biologiczną, którą w innym przypadku trudno byłoby osiągnąć w kwasie siarkowym wyłącznie na bazie węgla.

Podawane tu przykłady potencjalnych biologicznych zastosowań chemii krzemu to oczywiście spekulacje, a nie przewidywania. Używamy ich tutaj wyłącznie w celu zilustrowania, że krzem ma określone zalety jako heteroatom dla biochemii funkcjonującej w kwasie siarkowym jako rozpuszczalniku – zalety, które albo nie mają znaczenia dla jego zastosowania, albo mają mniejsze dla zastosowania w wodzie. Kwas siarkowy, w przeciwieństwie do innych proponowanych alternatywnych rozpuszczalników, takich jak HCN i NH_3 , ma precedens w naszym Układzie Słonecznym – istnieje jako ciecz w skali planetarnej, w chmurach Wenus. Warstwa chmur Wenus rozciąga się w zakresie wysokości od 48 do 60 km, z temperaturami $< 100^\circ C$ i ciśnieniem < 2 barów, i składa się z kropelek ciekłego kwasu siarkowego. Hipotetyczna biosfera w chmurach Wenus jest przedmiotem spekulacji naukowych od wielu dziesięcioleci. Nie wiadomo, czy i jaka biochemia mogłaby istnieć w tak silnie reaktywnym i agresywnym rozpuszczalniku protonowym, jakim jest kwas siarkowy, ale jak wskazuje powyższa dyskusja, istnieje – przynajmniej teoretycznie – możliwość biochemii, która w szerszym zakresie, niż to znamy z Ziemi, wykorzystuje krzem.

Podsumowując, krzem i węgiel to „fałszywe bliźniaki”: ich chemiczne podobieństwo jest powierzchowne. Życie oparte na krzemie, które wykorzystuje wyłącznie Si jako główny pierwiastek rusztowania, jak to jest często przedstawiane w twórczości *science fiction*, jest prawie na pewno niemożliwe. Potencjalne możliwości chemii krzemu są bardzo ograniczone dla biochemii opartej na wodzie w roli rozpuszczalnika, natomiast jakikolwiek rodzaj biochemii jest bardzo mocno limitowany w rozpuszczalnikach kriogenicznych z powodu ograniczeń rozpuszczalności. Wydaje się jednak, że krzem mógłby być elementem biochemii życia jako często spotykany heteroatom w biochemii opartej na kwasie siarkowym lub, jak to ma miejsce na Ziemi, jako rzadki heteroatom w biochemii opartej na wodzie, ale nie jako główny budulec życia.