

Próżnia

Pojęcie próżni w filozofii przyrody

Spory o istnienie próżni rozpoczęły się jeszcze w starożytnej filozofii przyrody. Pitagorejczycy (VI w. p.n.e.) twierdzili, że wszystkie obiekty w przyrodzie składają się z elementarnych składników, zwanych przez nich „liczbami” (pojmowali jednak liczby nie jako obiekty abstrakcyjne, ale jako obiekty fizyczne, zajmujące miejsce w przestrzeni). Jako pierwsi przyjmowali istnienie próżni, która miała oddzielać od siebie poszczególne liczby. Przez próżnię rozumieli jednak zarówno pustą przestrzeń, jak również powietrze oraz „to, co nieskończone”. Parmenides z Elei (ok. 540–470 p.n.e.) twierdził zaś, że próżnia to niebyt i utrzymywał, że próżnia nie istnieje (skoro „był jest, a niebytu nie ma”). Ponieważ sądził, że istnienie próżni jest warunkiem możliwości wielości rzeczy i ruchu, to – skoro próżnia nie istnieje – wielość rzeczy i wszelkie zmiany w przyrodzie są jedynie iluzją. Atomiści – Leukippos (V w. p.n.e.) i Demokryt z Abdery (ok. 460–360 p.n.e.) – chcieli pogodzić tezę o niezmienności bytu z realnością zmian w przyrodzie. Twierdzili zatem, że istnieje zarówno byt, jak i niebyt. Byt to atomy, niebyt natomiast to próżnia. „Naprawdę istnieją tylko atomy i próżnia” – ostatecznym składnikami wszelkich rzeczy są materialne (cielesne) atomy i niecielesna próżnia. W rozumieniu atomistów próżnia (podobnie jak atomy) istnieje odwiecznie i niezależnie od atomów, jest ponadto nieskończona, nieograniczona, ciągła, jednorodna (wszystkie jej punkty są sobie równoważne) i izotropowa (nie posiada wyróżnionego kierunku). Próżnia jest – w odróżnieniu od nieprzenikliwych atomów – całkowicie przenikliwa i nie stawia żadnego oporu poruszającym się atomom. Epikur (341–270 p.n.e.) i Lukrecjusz (Titus Lucretius Carus, ok. 95–55 p.n.e.), zwolennicy teorii atomistycznej, również podzielali pogląd o istnieniu próżni.

Generalnie jednak – poza nielicznymi wyjątkami – filozofowie starożytni, głównie pod wpływem Arystotelesa (384–322 p.n.e.), odrzucali tezę o istnieniu próżni. Arystoteles był zwolennikiem poglądu, że materia jest ciągła i potencjalnie można ją dzielić w nieskończoność, a próżnia istnieć nie może. Argumenty przeciwko istnieniu próżni czerpał

m.in. ze swojej teorii ruchu ciał: twierdził, że prędkość poruszającego się ciała jest wprost proporcjonalna do „siły poruszającej”, a odwrotnie proporcjonalna do „oporu ośrodka” (zgodnie bowiem z dynamiką Arystotelesa, naturalnym stanem ciał jest spoczynek w „naturalnym miejscu”, a „wszystko, co się porusza, musi być przez coś poruszane”). Utrzymywał więc, że gdyby istniała próżnia, to – jako ośrodek całkowicie przenikliwy – nie stawiałaby żadnego oporu poruszającemu się ciału, a zatem ciało poruszałoby się z prędkością nieskończoną, co jest absurdem. Następcy Arystotelesa głosili, że natura boi się próżni (*horror vacui*), i taki pogląd panował przez całe średniowiecze. Nawet jeszcze Kartezjusz – ojciec filozofii nowożytnej – odrzucał możliwość istnienia próżni. Twierdził bowiem, że „przestrzeń” to tyle, co „rozciągłość przestrzenna ciał” (materia to rzecz rozciąglą, czyli *res extensa*). Rozciągłość zaś jako własność materii, nie może istnieć tam, gdzie nie ma materii.

U zarania nauki nowożytnej tacy uczeni, jak Mikołaj Kopernik (1473–1543), Giordano Bruno (1548–1600), Johannes Kepler (1571–1630), Pierre Gassendi (1592–1655) czy Galileo Galilei (1564–1642) przyjmowali istnienie próżni, ale pierwsze eksperymentalne dowody istnienia próżni stanowiły dopiero prace ucznia Galileusza, Evangelisty Torricellego (1608–1647). W 1643 r. wykonał on sławne doświadczenie: napełnił szklaną próbkę długości ok. metra rtęcią, a następnie, przytrzymując palcem otwarty koniec próbki, obrócił ją o 180 stopni i zanurzył ją denkiem do góry w naczyniu z rtęcią. Po odblokowaniu otwartego końca część rtęci z próbki wypłynęła do naczynia i pozostał słup rtęci wysokości ok. 74 cm. W przestrzeni pomiędzy powierzchnią rtęci w próbce a jej zasklepionym końcem utworzyła się pusta przestrzeń, zwana dziś „próżnią Torricellego”.

Niezależnie od Torricellego doświadczenia dowodzące istnienia próżni wykonywał również włoski zakonnik Valeriano Magni (1586–1661). Główne eksperymenty zostały przeprowadzone w 1647 r. w Polsce na Zamku Królewskim.

Również w 1647 r. Blaise Pascal (1623–1662) wykonał doświadczenie podobne do doświadczenia Torricellego: na pokładzie statku przycumowanego do nadbrzeża użył kilkunastometrowych szklanych rur, z których jedne były napełnione wodą, inne zaś winem (a zatem substancjami o różnym ciężarze właściwym) i za pomocą odpowiedniego mechanizmu obracał je, podobnie jak to wcześniej uczynił Torricelli, dowodząc istnienia próżni. Pascal wykonał również sławny eksperyment (1647 r.) w

Clermot u podnóża góry Puy-de-dôme (1 464 m.n.p.m.), w którym wykazał, że wysokość słupa rtęci w rurce Torricellego jest mniejsza na szczycie wzgórza niż u jego podłoża, a zatem różnica ta zależy wyłącznie od ciśnienia atmosferycznego panującego na różnych wysokościach, a nie od rzekomej „obawy natury przed próżnią”, jak sądzili liczni jeszcze wówczas zwolennicy filozofii przyrody Arystotelesa (trudno bowiem byłoby utrzymywać, że na większych wysokościach natura mniej „boi się” próżni, niż u podnóża góry).

Otto von Guericke (1602–1686) ok. 1650 r. wynalazł pompę próżniową. W 1657 r. przeprowadził sławny eksperyment z półkulami magdeburskimi: jeżeli dwie metalowe półkule (o średnicach ok. 42 cm każda) połączymy ze sobą (używając odpowiedniej uszczelki) i z tak powstałej kuli wypompujemy powietrze, uzyskując wewnątrz próżnię, to zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne nie pozwala rozłączyć tych półkul nawet wówczas, jeśli użyjemy dwóch zaprzęgów po 8 koni. Po wpuszczeniu powietrza do środka, półkule łatwo można było rozdzielić. Był to przede wszystkim eksperymentalny dowód istnienia ciśnienia atmosferycznego, a również kolejny dowód istnienia próżni. Udoskonalenie pomp próżniowych przez Roberta Boyle’a (1627–1691) i Roberta Hooke’a umożliwiło zbudowanie odpowiednich naczyń próżniowych, co z kolei pozwoliło na doświadczalne sprawdzenie teorii Galileusza, że w próżni ciała o różnych ciężarach (np. piórko i kamień) spadają z takim samym przyspieszeniem. Od XVII wieku dyskusje na temat próżni miały już bardziej charakter dyskusji naukowych niż filozoficznych.

Pojęcie próżni w mechanice klasycznej

Pojęcie próżni odgrywa ważną rolę w mechanice klasycznej i w filozofii przyrody Isaaca Newtona (1642–1727). Przede wszystkim trzy zasady dynamiki Newtona opisują ruch ciał w próżni, czyli w przestrzeni, w której – poza ciałami, których ruch rozważamy – nie ma żadnych innych ciał obdarzonych masą (próżnia absolutna). Newton tak rozumianą próżnię określił mianem przestrzeni absolutnej i pisał, że „absolutna przestrzeń, ze swej własnej natury, bez względu na cokolwiek zewnętrznego, pozostaje zawsze taka sama i nieruchoma”. Zdaniem Newtona, obok ruchu względnego, można mówić również o ruchu absolutnym, czyli o ruchu względem samej przestrzeni. Dowodem takiego ruchu miały być pewne efekty, jak na przykład odkształcenie powierzchni wody w sławnym eksperymencie z wirującym wiadrzem (opisanym przez Newtona w *Princi-*

piach). Eksperyment przebiega następująco: napełnione wodą wiadro wprawimy w ruch obrotowy względem jego osi symetrii. Po pewnym czasie stwierdzamy, że pierwotnie płaska powierzchnia wody ulega charakterystycznemu odkształceniu (wiadro i woda wirują z taką samą prędkością kątową, a więc woda nie wiruje względem wiadra). Następnie zatrzymujemy wiadro (woda nadal wiruje) – powierzchnia wody nadal ma kształt paraboloidy obrotowej. Ponieważ efektu tego nie można wyjaśnić wirowaniem wody względem wiadra (deformacja powierzchni wody pojawia się zarówno wówczas, gdy woda wiruje względem wiadra, jak i wtedy gdy nie ma między nimi ruchu względnego), to, zdaniem Newtona, jest to dowód na istnienie ruchu absolutnego, a zatem i istnienie przestrzeni absolutnej. Pogląd ten został zakwestionowany przez Ernesta Macha (1838–1916), który twierdził, że o wirowaniu można mówić jedynie w odniesieniu do innych ciał – na przykład odległych gwiazd, a nie względem „samej przestrzeni”. Zdaniem Macha, opisany efekt nie występowałby w pustej przestrzeni – wówczas nie byłoby sensu mówić o ruchu wirowym.

Newton przez próżnię rozumiał przestrzeń, w której nie ma ciał, dopuszczał jednak istnienie w przestrzeni absolutnej jakichś substancji duchowych (niematerialnych). W szczególności był przekonany, że nawet w pustej przestrzeni w każdym miejscu jest obecny Bóg.

Po sformułowaniu przez Jamesa Clerka Maxwella (1831–1879) równań pola elektromagnetycznego (1861) i odkryciu, że fale elektromagnetyczne poruszają się ze stałą prędkością, pojawiła się koncepcja, że próżnia w istocie nie jest całkowicie pustą przestrzenią, ale jest wypełniona pewnym ośrodkiem, zwanym eterem, w którym rozchodzą się fale elektromagnetyczne (sądzone bowiem, że każdy ruch falowy wymaga pewnego ośrodka – na przykład fale na wodzie polegają na drganiu cząsteczek wody i nie ma sensu mówić o falach na wodzie w przypadku braku wody). Skoro światło porusza się względem eteru, a Ziemia porusza się wokół Słońca, a zatem również względem eteru to – zgodnie z zasadą względności Galileusza – pomiar prędkości światła powinien dawać różne wyniki w zależności od tego, czy promień świetlny porusza się zgodnie z kierunkiem ruchu Ziemi względem eteru, czy też w stronę przeciwną. Pod koniec XIX w. wykonano wiele eksperymentów, mających na celu wykrycie tego efektu. Najślynniejsze z nich, przeprowadzone w 1887 r. przez Alberta Abrahama Michelsona (1852–1931) i Eduarda Morley’a (1838–1923) ostatecznie wykazały, że prędkość światła nie zależy od obrotowego i orbitalnego ruchu Ziemi. Ponieważ okazało się, że w żaden

sposób nie można stwierdzić istnienia eteru, to rezultaty eksperymentu Michelsona–Morley’a spowodowały ugruntowanie się pojęcia próżni. Albert Einstein (1879–1955), formułując w 1905 r. szczególną teorię względności przyjął, że „ośrodkiem”, w którym poruszają się fale elektromagnetyczne jest właśnie sama próżnia, a prędkość światła w próżni ($c = \text{ok. } 300\,000 \text{ km/s}$) jest niezależna od układu odniesienia (i jest jednocześnie maksymalną prędkością, z jaką mogą rozchodzić się jakiegokolwiek oddziaływania).

Na początku XX w. atomistyczna teoria materii była już dobrze ugruntowana – sądzono powszechnie, że wszelkie zjawiska ostatecznie sprowadzają się do ruchu atomów w próżni, natomiast same atomy, zgodne z panującym jeszcze wówczas mechanistycznym wyobrażeniem przyrody, traktowano jako całkowicie nieprzenikliwe cząstki materii. Badania nad wewnętrzną strukturą atomów, w szczególności zaś odkrycie w 1911 r. jądra atomowego przez Ernesta Rutherforda (1871–1937) doprowadziły jednak do odkrycia radykalnych zmian na temat budowy atomów. Okazało się, że próżnia istnieje nie tylko pomiędzy poszczególnymi atomami, ale że ponad 99,99% objętości samego atomu stanowi pusta przestrzeń, czyli próżnia. Wszyscy jesteśmy w ponad 99,99% zbudowani z pustej przestrzeni.

Pojęcie próżni we współczesnej fizyce i kosmologii

Pojęcie próżni w fizyce współczesnej dość daleko odbiega od potocznego wyobrażenia próżni jako zupełnie pustej przestrzeni, obdarzonej jedynie geometrycznymi własnościami. Jest to raczej ośrodek dynamiczny o bogatych właściwościach.

W mechanice kwantowej i kwantowej teorii pola próżnia jest definiowana jako stan o najniższej możliwej energii (stan podstawowy), w którym nie ma żadnych cząstek materii ani kwantów oddziaływań, takich jak np. fotony. Jest to stan niemożliwy do eksperymentalnego osiągnięcia, ponieważ przestrzeń kosmiczna jest wypełniona fotonami mikrofalowego promieniowania tła. Nawet jednak ten czysto teoretyczny stan podstawowy posiada interesujące własności z uwagi na zjawisko *fluktuacji próżni*. W mechanice kwantowej obowiązują bowiem relacje nieoznaczoności Heisenberga. Dla energii i czasu wyraża je formuła $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$, gdzie ΔE jest nieoznaczonością energii cząstki elementarnej, Δt – nieoznaczonością czasu jej życia, $\hbar = h/2\pi$ jest zredukowaną stałą Plancka.

Zgodnie z zasadą nieoznaczoności, w kwantowej próżni mogą powstawać *cząstki wirtualne* o energii $\Delta E = mc^2$, które istnieją jedynie przez czas Δt , a następnie znikają. Cząstki wirtualne, pomimo tego, że bezpośrednio nie mogą być zaobserwowane, powodują jednak obserwowalne efekty, takie jak *efekt Casimira* (Hendrik. B. G. Casimir, 1948). Polega on na przyciąganiu się dwóch nienaładowanych elektrycznie płytek wykonanych z przewodnika, umieszczonych w odległości d mniejszej niż $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) od siebie. Zgodnie z mechaniką kwantową, z każdą cząstką materii o pędzie p związana jest fala o długości $\lambda = h/p$ (dotyczy to oczywiście również cząstek wirtualnych). Na zewnątrz płytek mogą powstawać cząstki wirtualne o dowolnych długościach fali, pomiędzy nimi natomiast jedynie takie, dla których $\lambda = d, d/2, d/3, \dots$ (kolejne harmoniczne), ponieważ fale o innych długościach będą tłumione. Powoduje to powstanie różnicy ciśnień między cząstkami wirtualnymi na zewnątrz płytek i pomiędzy nimi (ciśnienie na zewnątrz jest większe), a w efekcie płytki będą się wzajemnie przyciągać.

Zgodnie z kwantową teorią pola każda cząstka elementarna otoczona jest chmurą cząstek wirtualnych i nie istnieje bez swego wirtualnego otoczenia. Na przykład elektron, poruszając się w próżni, może wyemitować wirtualny foton, który następnie może spowodować kreację pary elektron-pozyton. W pobliżu elektronu znajduje się więcej wirtualnych pozytonów niż wirtualnych elektronów, ponieważ dodatnie ładunki wirtualnych pozytonów są przyciągane przez ładunek elektronu, natomiast ujemne ładunki wirtualnych elektronów są przez niego odpychane. Z pewnej odległości ładunek elektronu wydaje się mniejszy niż ładunek elektronu pozbawionego swego wirtualnego otoczenia, gdy wnikamy coraz głębiej w wirtualną otoczkę elektronu, wydaje się, że ładunek elektronu wzrasta. Zjawisko to nosi nazwę polaryzacji próżni.

W 1928 r. Paul A. M. Dirac (1902–1984) sformułował relatywistyczne równanie dla elektronu (ogólniej: dla cząstek o spinie połówkowym, do których stosuje się *zakaz Pauliego*), tzn. równanie zgodne ze szczególną teorią względności Einsteina. (Równanie Schrödingera ma charakter nie-relatywistyczny, co znaczy, że stanowi dobre przybliżenie w przypadku, gdy prędkość elektronu jest mała w porównaniu z prędkością światła w próżni c). Interesującą konsekwencją rozwiązań równania Diraca są *stany o ujemnej energii*. Otóż relatywistyczny związek między energią E i pędem p cząstki o masie m wyraża się wzorem: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$. Jeżeli elektron spoczywa w danym układzie odniesienia ($p = 0$), wówczas

otrzymujemy dwa rozwiązania na energię: $E = mc^2$ lub $E = -mc^2$. Dla cząstki swobodnej istnieją zatem dwa ciągle pasma dozwolonej energii – jedno od minus nieskończoności do $-mc^2$ i drugie od mc^2 do plus nieskończoności, oddzielone od siebie o $2mc^2$. Na ogół rozwiązania z ujemną energią odrzuca się jako nieposiadające znaczenia fizycznego. Dirac potraktował jednak te rozwiązania realistycznie, a nie jako przejaw nadmiarowości formalizmu matematycznego. Pojawia się wówczas problem: z teorii wynika, że wszystkie elektrony powinny znaleźć się w najniższym niezajętym stanie, a zatem elektrony ze stanów o dodatniej energii powinny przejść do stanów o ujemnej energii. Jak zatem wyjaśnić istnienie elektronów o dodatniej energii? Otóż elektrony są fermionami i podlegają zakazowi Pauliego, co znaczy, że w danym stanie kwantowym może znajdować się w tej samej chwili tylko jedna cząstka. Dirac przyjął więc, że wszystkie stany o ujemnej energii są już obsadzone. Zatem to, co nazywamy próżnią, nie jest po prostu pustą przestrzenią, ale jest „morzem elektronów” o ujemnej energii (zwanym *morzem Diraca*). Jeżeli dostarczymy elektronowi energii o wartości co najmniej równej $E = 2mc^2$, to elektron może przejść do stanów energii dodatniej. Otrzymujemy wówczas cząstkę o dodatniej energii i ładunku elektrycznym $-e$, a w morzu Diraca powstaje *dziura* – stan o energii ujemnej, która zachowuje się dokładnie jak cząstka o masie równej masie elektronu i dodatnim ładunku elementarnym $+e$.

Współcześnie owe „dziury w morzu Diraca” interpretujemy jako cząstki *antymaterii*. Przyjmuje się, że dla każdej cząstki „zwykłej” materii istnieje odpowiadająca jej *antycząstka*, posiadająca taką samą jak dana cząstka masę spoczynkową, ale równy co do wartości lecz przeciwnego znaku ładunek elektryczny (niektóre cząstki nienaładowane, takie jak foton, są identyczne ze swoimi antycząstkami, ale nie dotyczy to wszystkich cząstek nienaładowanych). Pierwsza cząstka antymaterii (antycząstka elektronu – *pozyton*) została odkryta eksperymentalnie w 1932 r. przez Carla Davida Andersona (1905–1991) i Patricka Blacketta (1897–1974). Podczas zderzenia cząstki i antycząstki następuje ich *anihilacja* – przestają one istnieć, przekształcając się w wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne.

W fizyce współczesnej własności i dynamikę elementarnych składników materii opisuje zbiór teorii, zwanych *modelem standardowym fizyki cząstek elementarnych*. Chociaż nie stanowi on kompletnego opisu materii na poziomie fundamentalnym, ponieważ w ogóle nie uwzględnia od-

działywań grawitacyjnych, to jednak dobrze opisuje trzy spośród czterech znanych oddziaływań – oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne. Oddziaływania te są opisywane jako procesy „wymiany” między cząstkami materii (*kwarkami* i *leptonami*), z których zbudowane są atomy, a w konsekwencji wszystkie obiekty materialne w przyrodzie, cząstek, będących nośnikami odpowiednich oddziaływań (kwantów pola elektromagnetycznego – foton, słabego – bozony *W* i *Z* oraz silnego – gluony). Równania modelu standardowego mają jednak sens jedynie wtedy, gdy masy tych cząstek wynoszą zero, co jednak nie zgadza się z doświadczeniem. Peter Higgs (ur. 1929) zaproponował pewien mechanizm, dzięki któremu cząstki uzyskują masę: według tej koncepcji cała przestrzeń jest wypełniona pewnym polem skalarnym, zwanym *polem Higgsa*. Oddziaływanie poruszających się w przestrzeni cząstek z tym polem (przez wymianę *bozonów Higgsa*) miałyby być odpowiedzialne za określone własności masy cząstek (i wyjaśniać, na przykład, dlaczego foton w ogóle nie ma masy, natomiast bozony *W* i *Z* są bardzo ciężkie). Ponieważ cała przestrzeń jest wypełniona polem Higgsa (podobnie jak wypełniona jest polem elektromagnetycznym oraz grawitacyjnym), trudno mówić o istnieniu próżni jako całkowicie pustej przestrzeni. W lipcu 2012 r. opublikowano informację o eksperymentalnym odkryciu bozonu Higgsa w największym na świecie laboratorium cząstek elementarnych CERN pod Genewą przy użyciu największego na świecie akceleratora *Large Hadron Collider* (LHC), co stanowi wspaniałe potwierdzenie modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych.

Wiadomo obecnie, że „zwykła materia” (czyli ta, którą opisuje model standardowy) to jedynie ok. 4% zawartości Wszechświata. Jakieś 23% zawartości Wszechświata stanowi *ciemna materia*, czyli materia, która nie emituje promieniowania elektromagnetycznego. Zgodnie z rozważanymi współcześnie hipotezami mogą to być hipotetyczne subatomowe cząstki, zwane *aksjonami*, *cząstki supersymetryczne* lub *neutrino*. Według innych hipotez są to natomiast duże obiekty zwane MACHO (*massive compact halo objects*) – ciała wielkości co najmniej Jowisza, które nie są jednak wystarczająco masywne, aby stać się gwiazdami i nie emitują promieniowania elektromagnetycznego. Mogą to również być czarne dziury. *Ciemna energia* natomiast, stanowiąca ok. 73% zawartości Wszechświata, miałyby równomiernie wypełniać całą przestrzeń i być odpowiedzialna obserwowane przyspieszenie ekspansji Wszechświata. Niezależnie od tego, czy fizykom uda się ostatecznie ustalić, czym są ciemna materia i ciemna energia (są to główne programy badawcze pro-

wadzone m.in. CERN pod Genewą, widać jednak wyraźnie, że pojęcie próżni w fizyce współczesnej niewiele ma wspólnego z „istniejącym niebytem” starożytnych filozofów przyrody, dalekie jest również od pojęcia przestrzeni absolutnej Newtona.

W fizyce doświadczalnej próżnię definiuje się jako obszar przestrzeni wypełniony na tyle rozrzedzonym gazem, że jego ciśnienie jest znacznie mniejsze niż ciśnienie atmosferyczne i nie przekracza 133 Pa (= 1 Tr = 1 mm Hg = 1/760 atm). Rozróżnia się m.in. próżnię niską ($p < 10^{-2}$ Pa), próżnię średnią ($10^{-5} - 10^{-2}$ Pa), próżnię wysoką ($10^{-9} - 10^{-5}$ Pa) oraz próżnię bardzo wysoką ($p < 10^{-9}$ Pa). Parametrem określającym własności próżni jest długość średniej drogi swobodnej cząstek (czyli średniej drogi, jaką przebywa cząstka pomiędzy zderzeniami). W warunkach normalnych jej wartość wynosi ok. 6×10^{-8} m, przy ciśnieniu 10^{-5} Pa – ok. 1 m, natomiast w przypadku próżni absolutnej średnia droga swobodna cząstek byłaby nieskończona.

Próżnia absolutna jest stanem czysto teoretycznym, niemożliwym do osiągnięcia w praktyce. Najdoskonalsza próżnia to *próżnia kosmiczna* rozciągająca się poza obszarem atmosfery w odległości ok. 100 km ponad Ziemią, w której przypada średnio ok. 1 atom na centymetr sześcienny.