



## Causal Dynamical Triangulation, czyli kwantowy Wszechświat z klocków lego

*Jakub Gizbert-Studnicki*

*Instytut Fizyki UJ*

Rewolucje naukowe wymagają wielkich odkryć, łamiących dotychczasowe paradygmaty. W bieżącym roku obchodzimy setną rocznicę rewolucyjnego odkrycia, jakim było opracowanie przez Alberta Einsteina Ogólnej Teorii Względności. Teoria ta wraz z odkrytą kilka lat później przez Erwina Schrödingera, Wernera Heisenberga i innych badaczy mechaniką kwantową stanowiły impuls do zupełnego przeformułowania opisu otaczającego nas świata, doprowadzając do niezwykle dynamicznego rozwoju nauk ścisłych, a w szczególności fizyki.

Odkrycie Alberta Einsteina było rewolucyjne w dwojnasób. Po pierwsze, stworzona przez niego geometryczna teoria grawitacji (co to oznacza zostanie przedstawione za chwilę) pozwoliła z niezwykłą precyzją opisać większość obserwacji astronomicznych niemożliwych do wyjaśnienia na gruncie dziewiętnastowiecznej fizyki oraz doprowadziła do sformułowania niezwykle interesujących wniosków, takich jak istnienie czarnych dziur, powstawanie fal grawitacyjnych czy koncepcja wielkiego wybuchu. Po drugie, Einstein zainicjował zupełną zmianę samej metody naukowej fizyki. Począwszy od Galileusza a następnie Newtona fizyka skupiała się na podejściu „odgórnym”: od wyniku eksperymentu do matematycznego opisu mierzonych zjawisk. Einstein zaproponował metodę „oddolną”, zgodną z zasadą: najpierw stwórzmy nietypowy (jak na owe czasy), lecz spójny matematycznie opis, a następnie zbadajmy wnioski, jakie z niego płyną dla przewidywań eksperymentalnych. Ponieważ możliwych opisów jest bardzo wiele należy przy tym przyjąć pewne kryteria wyboru „właściwej” teorii. Po pierwsze, nowa teoria powinna być zgodna z poprzednio obowiązującą wszędzie tam, gdzie ta poprzednia dobrze opisuje wyniki pomiarów (**zasada korespondencji**) oraz przewidywać nowe zjawiska możliwe do eksperymentalnego potwierdzenia. Po drugie, teoria powinna być maksymalnie „prosta” – powinna zależeć od możliwie najmniejszej liczby parametrów i przyjmować jak najmniej dodatkowych założeń<sup>1</sup>.

Ogólna Teoria Względności i mechanika kwantowa okazały się niezwykle skuteczne w opisie otaczającego nas świata. W szczególności, teoria grawitacji Einsteina pozwoliła stworzyć tzw. model kosmologiczny opisujący rozwój ca-

---

<sup>1</sup> Anegdota mówi, że Einstein spytany, dlaczego spośród wielu możliwych teorii geometrycznej grawitacji wybrał tę, którą obecnie nazywamy Ogólną Teorią Względności, odpowiedział, że była ona „najładniejsza”.

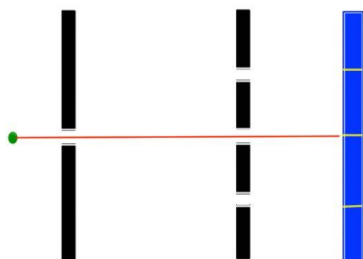
łego Wszechświata od momentu wielkiego wybuchu aż po czasy współczesne, zaś mechanika kwantowa doprowadziła do sformułowania tzw. Modelu Standardowego, opisującego w zwarty sposób wszystkie pozostałe (poza grawitacyjnym) oddziaływania i tłumaczącego cechy wszelkiej dotychczas zaobserwowanej materii. Z drugiej strony teorie te nie są wzajemnie kompatybilne. Wynika to z zupełnie odmiennej skali zjawisk opisywanych przez każdą z nich, jak również z innych założeń stojących za ich podstawami. Mechanika kwantowa dobrze opisuje fizykę w skali (sub)atomowej, zaś Ogólna Teoria Względności odnosi się do skali makro. Co prawda, zarówno teoria Einsteina jak i mechanika kwantowa niezwykle precyzyjnie przewidują wyniki większości eksperymentów w odpowiedniej dla każdej z nich skali, lecz wciąż istnieje wiele pytań, które wymagają odpowiedzi. Najbardziej zadziwiające jest to, że współczesna fizyka doskonale opisuje zachowanie „zwykłej” materii, lecz według niektórych szacunków materia ta stanowi zaledwie około 5% zawartości Wszechświata. Pozostała część to tzw. ciemna materia (około 27%) czy jeszcze bardziej tajemnicza ciemna energia (około 68%), których natury zupełnie nie rozumiemy. Paradoksalnie, można pokusić się więc o stwierdzenie, że po złotym wieku rozwoju fizyki zapoczątkowanym przez wspomnianą powyżej rewolucję naukową z początku XX wieku, znajdujemy się obecnie w trochę podobnej sytuacji jak naukowcy z przełomu XIX i XX wieku, szukając kolejnej rewolucyjnej idei. Być może idea ta powinna być związana z teorią łączącą cechy Ogólnej Teorii Względności i mechaniki kwantowej w jednym spójnym ujęciu tzw. kwantowej grawitacji. Postulowana teoria kwantowej grawitacji powinna być w stanie odpowiedzieć na najbardziej fundamentalne pytania dotyczące początku Wszechświata, natury czasu i przestrzeni oraz wyjaśniać zjawiska fizyczne zachodzące na niezwykle małych odległościach, porównywalnych z tzw. długością Plancka<sup>2</sup>, dla których zarówno mechanika kwantowa jak i teoria Einsteina tracą sens. Aby eksperymentalnie zbadać zjawiska fizyczne zachodzące w tak małych skalach, potrzebowalibyśmy energii rzędu miliona miliardów razy większej niż ta obecnie dostępna w największym na świecie akceleratorze cząstek, Wielkim Zderzaczem Hadronów (LHC). Tak małe odległości nie są obecnie i być może nigdy nie będą dostępne dla bezpośrednich pomiarów eksperymentalnych, nie wyklucza to jednak możliwości, że związana z nimi fizyka może się objawiać w subtelnych pomiarach kosmologicznych.

---

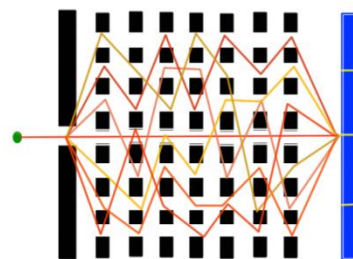
<sup>2</sup> Długość Plancka wynosi około  $10^{-35}$  m (jeden metr należy podzielić przez liczbę zapisaną jako jeden z trzydziestoma pięcioma zerami). Aby wyobrazić sobie o jak niezwykle małej długości mówimy, wyobraźmy sobie kropkę na końcu tego zdania. Gdybyśmy kropkę o średnicy równej długości Plancka powiększyli do rozmiarów kropki na końcu zdania, to pierwotna kropka osiągnęłaby w tym samym powiększeniu rozmiar całego widzialnego Wszechświata.

Zadanie stworzenia teorii kwantowej grawitacji jest niezwykle skomplikowane i od kilkudziesięciu lat stanowi cel pracy wielu fizyków. Do najbardziej znanych prób rozwiązania tego problemu zalicza się teorię strun oraz pętlową grawitację kwantową. Każda z tych teorii ma jednak swoje ograniczenia. Jednym z mniej znanych podejść jest model Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji (CDT), stworzony pod koniec lat 90. XX wieku przez Jana Ambjørna, Renate Loll i Jerzego Jurkiewicza. Jak się za chwilę przekonamy, model CDT posiada pożądane przez Einsteina cechy „nowej” teorii grawitacji – w szczególności spełnia wspomnianą powyżej zasadę korespondencji, jednocześnie wykazując wiele nietrywialnych cech „nowej” fizyki oraz oparty jest na stosunkowo prostym połączeniu mechaniki kwantowej z Ogólną Teorią Względności, bez uciekania się do wielu dodatkowych założeń.

Zgodnie z mechaniką kwantową, każdy obiekt fizyczny znajduje się równocześnie w wielu stanach kwantowych. Jest to sprzeczne z Ogólną Teorią Względności, zakładającą istnienie tylko jednego „klasycznego” stanu. Jednocześnie, mechanika kwantowa przyjmuje ustaloną geometrię (kształt) czasoprzestrzeni, niezależną od zachodzących w niej zjawisk. W Ogólnej Teorii Względności geometria czasoprzestrzeni jest obiektem dynamicznym, kształtowanym przez masywne obiekty znajdujące się w jej wnętrzu. Model CDT łączy cechy obydwu teorii, używając wielostanowego opisu mechaniki kwantowej do samej geometrii czasoprzestrzeni poprzez zastosowanie metody tzw. sumy (całki) po trajektoriach. Aby zrozumieć to pojęcie, wyobraźmy sobie układ przesłon ze szczelinami, przez który przechodzi pocisk wystrzelony z karabinu wycelowanego dokładnie w środek tarczy (rys. 1). Zgodnie z fizyką klasyczną, pocisk leci po linii prostej (zaniedbujemy na chwilę siłę ciężkości) i przechodząc przez środkową szczelinę ze 100% prawdopodobieństwem trafia w środek tarczy. Okazuje się, że w przypadku bardzo małego kwantowego pocisku (np. elektronu) wynik wielokrotnego powtarzania tego doświadczenia byłby inny: pocisk czasami trafiałby w środek tarczy, czasami zaś w inne jej punkty, przy czym możliwe jest obliczenie prawdopodobieństwa każdego z tych zdarzeń. Wygląda to tak, jakby kwantowy pocisk mógł przejść przez dowolną szczelinę, a nawet jakby (podobnie jak fala światła) przechodził przez wszystkie szczeliny jednocześnie. Załóżmy teraz, że mamy bardzo dużo przesłon z bardzo gęsto umieszczonymi szczelinami. Zgodnie z mechaniką kwantową pocisk przechodzi przez dowolny układ szczelin wykreślając „zygzakowatą” krzywą (rys. 2). Aby obliczyć prawdopodobieństwo trafienia w konkretny punkt tarczy musimy dokonać pewnego sumowania z uwzględnieniem wszystkich „zygzakowatych” dróg łączących punkt początkowy i końcowy, przy czym każda z dróg ma nieco inną wagę (znaczenie), zależną od tzw. działania.



Rys. 1

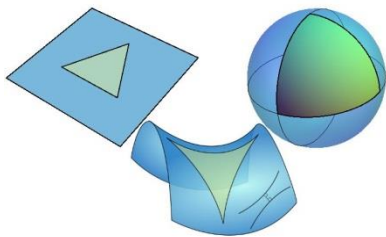


Rys. 2

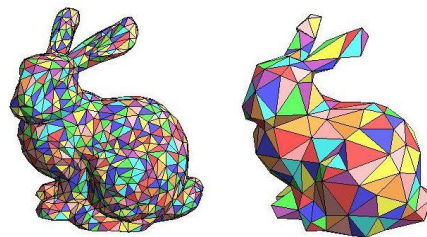
Posłużmy się tutaj pewną analogią. Wyobraźmy sobie dziecko budujące pojazd z klocków lego. Dziecko stara się uzyskać kształt samochodu zgodny z załączoną instrukcją, jednak z braku umiejętności, czy też ulegając fantazji, od czasu do czasu przestawia położenie pewnych klocków. Zazwyczaj odchylenia od kształtu z instrukcji nie są znaczne (np. kierownica zostaje przestawiona z lewej na prawa stronę, czy też zmienia się kolor przednich świateł), od czasu do czasu jednak zdarza się, że budowla bardziej przypomina samolot niż samochód. Wyobraźmy też sobie, że opiekun dziecka obiektywnie ocenia poszczególne kształty, za każdym razem przyznając punkty w zależności od tego, na ile wybudowany pojazd przypomina samochód z instrukcji. Im mniejsze odchylenie od instrukcji tym mniejsza liczba punktów (punkty mierzą odchylenia od założonego kształtu). Okazuje się, że nieco podobnie postępuje natura. Powróćmy do przykładu kwantowego pocisku poruszającego się między szczelinami. W fizyce odpowiednikiem oceny opiekuna jest tzw. **działanie**, opisujące ruch pocisku. Wartość działania zależy od tego jaką drogą (trajekcją) pocisk się porusza. W fizyce klasycznej pocisk za każdym razem „wybiera” identyczną drogę – linię prostą, łączącą lufę ze środkiem tarczy (odpowiednik kształtu auta z instrukcji) – taką, dla której wartość działania osiąga lokalne minimum. W mechanice kwantowej pocisk może się poruszać wszystkimi możliwymi drogami (tak jak mogą się zmieniać kształty w zabawie dziecka). Dla każdej z tych dróg działanie (ocena opiekuna) przybiera zazwyczaj inną wartość. Trajektorie o małej wartości działania (bliskie klasycznej) mają duży wkład przy obliczaniu prawdopodobieństwa znalezienia pocisku w danym punkcie tarczy, zaś trajektorie o dużej wartości działania (dalekie od klasycznej) są prawie pomijalne.

W modelu CDT rolę trajektorii spełnia geometria czasoprzestrzeni. Żeby lepiej zrozumieć to pojęcie wyobraźmy sobie płaską kartkę papieru. Właściwości powierzchni takiej kartki różnią się istotnie od właściwości powierzchni kuli, czy powierzchni siodła. W szczególności, suma kątów wewnętrznych dowolnego trójkąta na powierzchni kartki wynosi zawsze  $180^\circ$ . Okazuje się, że na powierzchni kuli suma kątów wewnętrznych trójkąta jest większa, zaś na powierzchni siodła – mniejsza niż  $180^\circ$  (rys. 3). Fizycy mówią o (dodatnim lub

ujemnym) deficycie kątowym i związanej z nim dodatniej lub ujemnej krzywiznie przestrzeni. W ogólności, można sobie wyobrazić bardzo skomplikowaną zakrzywioną powierzchnię (przestrzeń), gdzie niektóre fragmenty lokalnie przypominają powierzchnię kartki, podczas gdy inne są podobne do powierzchni kuli albo siodła. Właśnie takimi przestrzeniami zajmuje się Ogólna Teoria Względności, z której wynika, że ruch dowolnego ciała pod wpływem działania siły grawitacji może być opisany jako ruch w pewnej zakrzywionej (czaso)przestrzeni.



Rys. 3



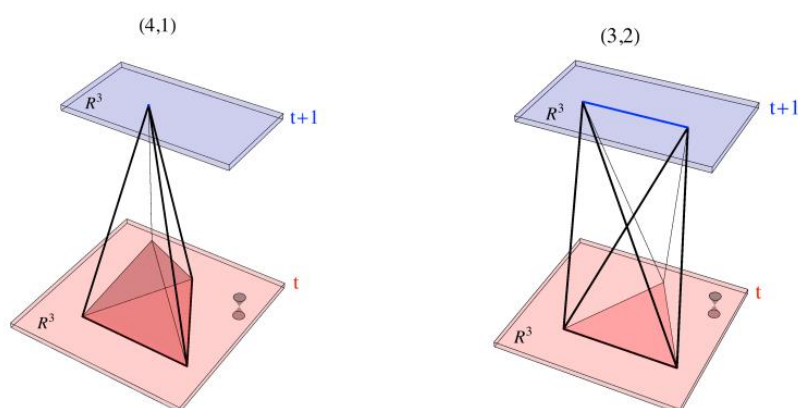
Rys. 4

Podobnie jak w przypadku kwantowego pocisku poruszającego się różnymi trajektoriami, w teorii kwantowej grawitacji oprócz klasycznej (wynikającej z minimum działania Ogólnej Teorii Względności) czasoprzestrzeni możliwe są inne geometrie, czasami znacząco różne od tej pierwszej. Każdą taką czasoprzestrzeń można przybliżyć za pomocą tzw. triangulacji, czyli powierzchni złożonej ze sklejonych bokami trójkątów. Im mniejszych trójkątów użyjemy, tym lepsze przybliżenie uzyskamy (rys. 4). Tak więc zagadnienie „sumowania” gładkich czasoprzestrzeni złożonych z nieskończonej liczby punktów można sprowadzić do znacznie łatwiejszego problemu „sumowania” triangulacji złożonych ze skończonej liczby trójkątów.

Sumowanie triangulacji dwuwymiarowych powierzchni jest stosunkowo łatwe do rozwiązania, problem znacząco się jednak komplikuje w przypadku większej liczby wymiarów. W przypadku czterowymiarowej czasoprzestrzeni (trzy wymiary przestrzenne + czas) musimy użyć czterowymiarowych uogólnień trójkątów, zwanych sympleksami. Wracając do analogii z klockami lego – praktycznie każdy dowolnie skomplikowany trójwymiarowy kształt możemy (z określoną dokładnością) odtworzyć łącząc ze sobą klocki zaledwie kilku rodzajów. W przypadku CDT dochodzi dodatkowy czwarty wymiar związany z czasem i „klocki” stają się czterowymiarowe<sup>3</sup>. Okazuje się przy tym, że do

<sup>3</sup> Boki sympleksów („klocków”) używanych w CDT są w przeciwieństwie do klocków lego trójkątne a nie prostokątne, zaś klocki można łączyć dowolnymi „ścianami”, jednak ogólna analogia pozostaje prawdziwa.

połączenia ich w jedną zwartą całość wystarczy rozróżnić dwa rodzaje sympleksów (rys. 5).



Rys. 5

Pierwszy sympleks (schematycznie przedstawiony z lewej strony) jest związany z przestrzennymi warstwami określonego wspólnego czasu (obszary zaznaczone na rysunku kolorami – kolor w wersji internetowej). Warstwy te są zbudowane z połączonych ze sobą identycznych 3-wymiarowych czworoboków foremnych, tzw. tetraedrów (zaznaczonych ciemno – w Internecie na czerwono). Każdy taki tetraedr ma cztery wierzchołki o wspólnej współrzędnej czasowej. Każdy z tych czterech wierzchołków jest następnie połączony z jednym dodatkowym wierzchołkiem w sąsiedniej warstwie czasu, tworząc razem 4-wymiarowy obiekt zwany sympleksem typu (4,1). Drugi sympleks – typu (3,2) – (przedstawiony z prawej strony) interpoluje między poszczególnymi warstwami przestrzennymi: posiada on trzy wierzchołki w jednej warstwie czasu oraz dwa wierzchołki w warstwie sąsiedniej. Czterowymiarowe sympleksy (4,1) oraz (3,2) są łączone (3-wymiarowymi czworobocznymi) bokami w jedną całość będącą triangulacją gładkiej 4-wymiarowej czasoprzestrzeni. Z każdą taką triangulacją związana jest zazwyczaj inna wartość działania – w CDT używa się działania zdefiniowanego 100 lat temu przez Alberta Einsteina do opisu Ogólnej Teorii Względności.

Problem sumowania 4-wymiarowych triangulacji (z uwzględnieniem odpowiadającego im działania) można rozwiązać przy pomocy odpowiednich algorytmów numerycznych<sup>4</sup>. Algorytmy te generują opisane powyżej triangulacje, odpowiadające kwantowym stanom mikroskopijnego Wszechświata oraz po-

<sup>4</sup> W CDT używa się tzw. algorytmu *Metropolis*, który generuje triangulacje z prawdopodobieństwem określonym przez związane z nimi działanie, co umożliwia automatyczne uwzględnienie wagi danej triangulacji w obliczanej sumie (całce) po trajektoriach.

zwalają na pomiar niektórych jego cech. Pomimo, że sam model CDT należy do obszaru badań fizyki teoretycznej, praktyczne aspekty jego analizy przypominają często pracę fizyka eksperymentalnego. Rzeczywisty eksperyment (nieosiągalny przy obecnym rozwoju technologicznym) jest w tym przypadku zastępowany eksperymentem numerycznym. Analogia ta jest daleko posunięta – eksperyment numeryczny, podobnie jak złożony eksperyment rzeczywisty, wymaga wielu wstępnych przygotowań (wstępnego przemyślenia problemu, zdefiniowania interesujących wielkości pomiarowych, zakupu aparatury – w tym wypadku komputerowej, modyfikacji/stworzenia nowego oprogramowania itp.), długiego czasu oczekiwania na wyniki (pomimo postępu współczesnej techniki obliczeniowej, pomiary zajmują niejednokrotnie wiele tygodni lub nawet miesiący) oraz starannego opracowania uzyskanych danych i analizy płynących z nich wniosków. Niejednokrotnie również koszt aparatury pomiarowej (superkomputerów użytych do symulacji) jest porównywalny z kosztem aparatury wykorzystywanej w badaniach fizyki eksperymentalnej. Z uwagi na złożoność problemu, ograniczony czas dostępny dla obliczeń i wielkość dostępnej pamięci komputerowej w symulacjach numerycznych CDT uwzględniane są obecnie jedynie najbardziej podstawowe cechy rzeczywistego Wszechświata (np. zazwyczaj pomija się obecność materii), zaś kwantowe „Wszechświaty” symulowane we wnętrzu komputera są niezwykle małe<sup>5</sup>.

Pomimo tych uproszczeń, badania modelu CDT doprowadziły do kilku niezwykle interesujących wniosków, które zostaną pokrótce przedstawione poniżej.

Po pierwsze, podobnie jak np. woda może znajdować się w różnych fazach różniących się stanem skupienia (lód, woda, para wodna), tak i kwantowa geometria w modelu CDT może występować w różnych fazach o odmiennych cechach fizycznych. Szczególnie interesująca jest tzw. faza C, która wykazuje cechy rzeczywistego makroskopowego Wszechświata. Można wykazać, że w obrębie tej fazy spełniona jest wspomniana na wstępie **zasada korespondencji** modelu CDT z Ogólną Teorią Względności Einsteina. Aby to zrozumieć powróćmy na chwilę do pocisku poruszającego się między przesłonami. Gdybyśmy zamiast rozpatrywać mikroskopowy kwantowy elektron obserwowali prawdziwą kulę z karabinu, to okazałoby się, że zawsze podąża ona klasyczną drogą i trafia w środek tarczy. Jest tak dlatego, że w przypadku obiektów makroskopowych wpływ poprawek kwantowych (nieklasycznych trajektorii) jest znikomy i praktycznie niemożliwy do zaobserwowania. Zasada korespondencji mówi w tym przypadku, że dla „dużych” obiektów mechanika kwantowa jest zbieżna z fizyką klasyczną. Symulacje komputerowe pokazują, że w modelu CDT kwantowe oscylacje geometrii zachodzą wokół tzw. czasoprzestrzeni de

---

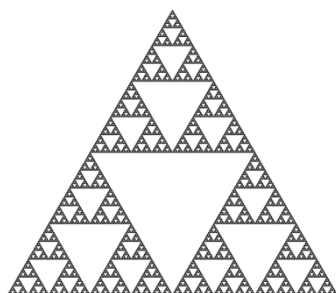
<sup>5</sup> „Wszechświaty” CDT mają średnicę kilku(nastu) długości Plancka. Długość Plancka – jednostka długości w naturalnym systemie jednostek oznaczana jako  $l_p = 1,616199(97) \times 10^{-35}$  m.

Sittera, zgodnej z klasyczną (niekwantową) Ogólną Teorią Względności Einsteina. Jednocześnie, znaczenie odchyień od stanu klasycznego maleje przy zwiększaniu rozmiarów symulowanego Wszechświata. CDT jest jedną z niewielu teorii kwantowej grawitacji, które zdołały odtworzyć tę klasyczną „granicę”.

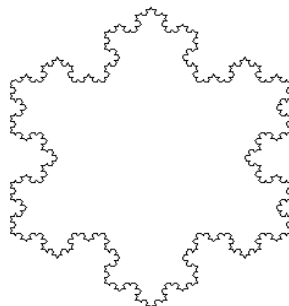
Po drugie, badania pokazały, że kluczowym elementem w prezentowanym tutaj podejściu do teorii kwantowej grawitacji jest odgórne założenie kauzalności (przyczynowości). Oznacza to, że każde zdarzenie zachodzące w czasoprzestrzeni ma dobrze określoną przeszłość i przyszłość, które nie mogą się rozdzielać, czy zapętleć. Poprzednie próby stworzenia podobnego do CDT modelu bez uwzględnienia tego założenia nie pozwalały na odtworzenie opisanej powyższej klasycznej „granicznej” geometrii – zasada korespondencji nie była tym samym spełniona. Niestety wygląda więc na to, że przedstawiane w literaturze *science fiction* podróże w czasie nie są fizycznie możliwe.

Po trzecie, badania pokazują szereg nietrywialnych własności kwantowej czasoprzestrzeni opisanej przez CDT. W szczególności, we wspomnianej powyżej fazie C, geometria wydaje się być efektywnie dwuwymiarowa na bardzo małych odległościach, zaś dla większych odległości obserwujemy fizyczne cztery wymiary czasoprzestrzeni. Na pierwszy rzut oka może wydawać się to bardzo dziwne – przecież do budowy (triangulacji) czasoprzestrzeni używamy czterowymiarowych „klocków”. Problem tkwi w zbieżności różnych definicji tego, co nazywamy wymiarem. Po pierwsze, wymiar możemy zdefiniować jako ilość współrzędnych niezbędnych do opisu położenia dowolnego punktu – jest to tzw. wymiar topologiczny (w „zwykłej”, znanej ze szkoły, przestrzeni euklidesowej potrzebne są do tego trzy współrzędne, więc wymiar topologiczny wynosi trzy). Po drugie, wymiar można określić, patrząc na zmianę objętości dowolnej kuli wraz z jej promieniem – jest to tzw. wymiar Hausdorffa (w „zwykłej” przestrzeni objętość kuli rośnie jak promień do potęgi trzeciej, stąd wymiar Hausdorffa wynosi 3). Po trzecie wreszcie, wymiar można obliczyć analizując zachowanie hipotetycznego mikroskopowego ludzika, który przy każdym kroku wybiera losowo, w którą stronę pójdzie – jest to tzw. wymiar spektralny, zdefiniowany przez prawdopodobieństwo powrotu do punktu startowego (w „zwykłej” przestrzeni również wynosi on trzy). Okazuje się jednak, że w matematyce istnieją obiekty, dla których intuicyjne pojęcie wymiaru zawodzi i każda z powyższych definicji daje odmienny wynik, co więcej niekoniecznie będący liczbą całkowitą! Obiekty takie zwane są fraktalami. Przykłady fraktali wraz z ich wymiarem Hausdorffa zostały pokazane na rys. 6. W przypadku opisanej powyżej fazy C modelu CDT mierzony wymiar spektralny, który może zależeć od odległości, zmienia się od około dwóch dla małych odległości do czterech dla dużych odległości. Pozostałe definicje wymiaru w tym przypadku dają wynik cztery. Tym samym można przypuszczać, że opisana przez CDT kwantowa geometria ma naturę fraktalną.





**Trójkąt Sierpińskiego**  
Wymiar Hausdorffa  $\approx 1,585$   
Źródło: Wikipedia



**Płatek Kocha**  
Wymiar Hausdorffa  $\approx 1,262$   
Źródło: Wikipedia

Rys. 6

Po czwarte wreszcie, nie zapominajmy, że w CDT istnieją inne fazy. Niektóre z nich zapewne nie mają fizycznej interpretacji, istnieje jednak przypuszczenie, że ostatnio odkryta tzw. faza bifurkacji może być niezwykle interesująca. W szczególności, zachowanie geometrii na nowym przejściu fazowym można interpretować jako zamianę wymiaru czasu na dodatkowy (czwarty) wymiar przestrzeni (fizycy nazywają to zjawisko zmianą sygnatury metryki). Istnieje hipoteza mówiąca o tym, że taka zmiana mogła nastąpić na „bardzo wczesnym” etapie rozwoju Wszechświata (hipoteza ta tłumaczy częściowo mechanizm powstania wyróżnionego wymiaru czasu). Dokładne zrozumienie tego zjawiska jest niezwykle istotnym zadaniem, wymagającym dalszych badań.

Od Redakcji:

Polecamy artykuł Jerzego Jurkiewicza *Kwantowanie grawitacji. Co to znaczy?*, *Foton* 109, Lato 2010.