NAUKA 3/2007 • 105-112

ZBIGNIEW JACYNA-ONYSZKIEWICZ

Czy istnieje kres podzielności materii?

Jak wiadomo wszystkie ciała zbudowane są z atomów. Atomy natomiast składają się z jądra atomowego i elektronów. Z kolei w skład jądra atomowego wchodzą protony i neutrony. W końcu protony i neutrony są układami złożonymi z kwarków. W doświadczeniach, przeprowadzonych przy obecnie dostępnych energiach, kwarki i leptony, w tym elektrony, jawią się jako cząstki elementarne, tzn. cząstki nieposiadające wewnętrznej struktury.

W tym miejscu rodzi się pytanie: czy przy wyższych energiach kwarki i leptony okażą się układami złożonymi z jakichś subcząstek, a te z kolei układem związanych jeszcze innych mikrocząstek – i tak w nieskończoność?

Problem nieskończonej podzielności materii od wieków stanowi jedną z zasadniczych kwestii filozofii przyrody. Doktryną broniącą tezy o istnieniu kresu podzielności materii jest atomizm. Jak wiadomo ideę atomizmu podali w V wieku przed Chrystusem Leucyp i jego uczeń Demokryt.

Koncepcja najmniejszej części materii jest naturalną konsekwencją dążenia do wyjaśnienia złożonej i różnorodnej struktury materii na podstawie prostej materialnej przyczyny wszystkich rzeczy.

Pojęcie najmniejszych części materii, których właściwości dałoby się prosto zrozumieć, prowadzi jednak do znanych trudności związanych z pojęciem nieskończoności. Kawałek materii można podzielić na części, te części można rozłożyć na jeszcze drobniejsze kawałki, owe kawałeczki znów porozcinać itd., ale trudno przecież wyobrazić sobie, by ta podzielność miała trwać bez końca. Bardziej naturalne wydaje się założenie, że są części najmniejsze, których już dalej rozłożyć nie można. Z drugiej strony trudno przyjąć, by dalsze dzielenie tych najmniejszych części miałoby być zasadniczo niemożliwe – w myślach możemy sobie zawsze przedstawić części jeszcze mniejsze. Najwidoczniej nasza wyobraźnia zawodzi nas, kiedy chcemy uprzytomnić sobie proces ciągłego dzielenia. Tak też tę trudność odczuwali filozofowie greccy. Wyobrażenie najmniejszych, nierozkładalnych części można więc uważać za pierwszą naturalną próbę przezwyciężenia tego problemu.

Platon w swoim „Timajosie" przedstawił koncepcję atomów geometrycznych, przejmując wyobrażenie najmniejszych części materii. Zdecydowanie przeciwstawił się jed-

Prof. dr hab. Zbigniew Jacyna-Onyszkiewicz, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań

nak skłonności do brania atomów za podstawę wszelkiego bytu, za jedyne obiekty materialne rzeczywiście istniejące. Atomy Platona nie były właściwie materią, zostały pomyślane jako formy geometryczne – foremne bryły matematyków. Bryły te były w pewien sposób ideami, fundamentalnymi dla struktury materii i charakteryzującymi zachowania fizykalne żywiołów, do których przynależały. Sześcian był na przykład najmniejszą cząstką żywiołu ziemi i tym samym symbolizował zarazem jej stabilność. Z kolei czworościan ze swymi ostrymi wierzchołkami reprezentował najmniejszą cząstkę żywiołu ognia, a dwudziestościan – ze wszystkich brył foremnych najbliższy kuli – przedstawiał ruchliwość żywiołu wody. W ten sposób bryły foremne mogły uchodzić ze symbole określonych tendencji w fizykalnym zachowaniu materii [1].

Nie były one jednak niepodzielnymi jednostkami podstawowymi. Platon rozpatrywał je jako złożone z trójkątów, które składały się na ich powierzchnię. Stąd te najmniejsze części mogły się przez wymianę trójkątów przekształcać jedne w drugie. Dwa atomy powietrza i jeden atom ognia mogły się na przykład złożyć w jeden atom wody. W ten sposób Platon mógł uniknąć problemu nieskończonej podzielności materii. Trójkąty bowiem jako powierzchnie dwuwymiarowe nie były już bryłkami materii, dlatego materii nie można było dzielić w nieskończoność. Zatem pojęcie materii rozpłynęło się w obszarze najmniejszych wymiarów przestrzennych, w pojęciu formy matematycznej. Forma ta jest miarodajna dla zachowania przede wszystkim najmniejszych części materii, a w rezultacie samej materii. Z perspektywy fizyki kwantowej wydaje się, że w kwestii struktury materii Platon był znacznie bliższy prawdy niż Demokryt.

Na gruncie nowożytnej filozofii doktryna atomistyczna spotkała się z krytyką. Najpoważniejsze zarzuty przedstawił Kartezjusz, który z pozycji swojego systemu filozoficznego argumentował, że elementem konstytuującym materię jest rozciągłość, będąca ze swej natury podzielna w nieskończoność.

Pytania o najgłębszy poziom struktury materii uchodziły do niedawna za czysto abstrakcyjne, mogące być przedmiotem tylko rozważań filozoficznych, a nie nauk empirycznych. Pokażemy jednak, że badania termicznych właściwości czarnych dziur, z wykorzystaniem metod kwantowej mechaniki statystycznej, wyraźnie wskazują, że materii nie można dzielić w nieskończoność.

1. Zdarzenie, prawdopodobieństwo, informacja i entropia

Zdarzeniem nazywamy każde zjawisko, dla którego ma sens powiedzenie, że zachodzi ono lub też nie zachodzi. Zdarzeniem jest np. pewien stan układu fizycznego scharakteryzowany liczbowymi wartościami pewnych parametrów. Między zdarzeniami mogą zachodzić określone związki np. z zajścia jakiegoś zdarzenia wynika konieczność zajścia innego zdarzenia. Zdarzenie, które musi zajść, nazywamy pewnym. Zdarzenie, co do którego jesteśmy pewni, że ono nie zajdzie, nazywamy niemożliwym.

Każdemu zdarzeniu można przyporządkować liczbę nieujemną z przedziału $\langle 0,1\rangle$ zwaną prawdopodobieństwem p tego zdarzenia. Jeżeli dane zdarzenie jest zdarzeniem pewnym, to jego prawdopodobieństwo $p = 1$. Jeżeli natomiast określone zdarzenie jest zdarzeniem niemożliwym, to jego prawdopodobieństwo $p = 0$.

Z prawdopodobieństwem zdarzenia łączy się pojęcie informacji, którą określa się jako treść komunikatu o danym zdarzeniu przekazywanego za pomocą danych. Ta sama treść może być przekazywana za pomocą różnych danych, znaków, wykresów, mowy itp. Informacja jest więc pojęciem szerszym niż dane, chociaż potocznie często używa się tych określeń zamiennie. Jeżeli otrzymamy komunikat o zajściu zdarzenia pewnego, to zawartość takiej informacji jest zerowa. Na przykład, jeśli ktoś nam zakomunikuje, że jutro wzejdzie Słońce – to za taką informację, na pewno nie będziemy chcieli zapłacić. W przeciwnym wypadku, kiedy otrzymamy komunikat informujący nas o zdarzeniu bardzo mało prawdopodobnym, dla którego prawdopodobieństwo $p \ll 1$, to uzyskamy cenną informację. Na przykład, gdy dowiemy się, jakie padną numery w najbliższym losowaniu gry liczbowej. Tak określoną zawartość informacji możemy zdefiniować wzorem

$$s = -a \sum_{j=1}^{k} p_j \log_r p_j , \tag{1}$$

gdzie k to liczba zdarzeń, p_j oznacza prawdopodobieństwo zdarzenia j, r jest podstawą logarytmu oraz a – stałą większą od zera. Wielkość s nazywa się entropią, a $\sum p_j = 1$.

Najmniejszą informację otrzymujemy wtedy, gdy dowiadujemy się, które z dwóch równoprawdopodobnych i wykluczających się zdarzeń zajdzie. Na przykład przy rzucie monetą dowiemy się, że zajdzie zdarzenie wypadnięcia orła. Z tego powodu w teorii informacji przyjmuje się $r = 2$ i $a = 1$. W tym przypadku entropia powyższej informacji wynosi $s = 1$. Wówczas jednostką informacji jest bit.

Zawartość informacji przenoszonej przez komunikat określona jest przez liczbę elementarnych pytań, na które daje się odpowiedzieć za pomocą tego komunikatu. Są to na przykład sekwencje jedynek i zer, które można uważać za sekwencje odpowiedzi „tak" lub „nie". Zawartość informacyjna komunikatu określona jest przez entropię s, jest więc równa liczbie bitów, jako że każdy bit może służyć do zakodowania jednej takiej odpowiedzi.

Tak określona entropia danej informacji jest liczbą bitów potrzebnych do jej zakodowania. Nie mówi ona nic o jakości samej informacji, która silnie zależy od kontekstu, niemniej jednak jako obiektywna miara ilości informacji jest niezmiennie użyteczna w nauce i technice.

Entropia s określona wzorem (1) jest nieujemna, jest maksymalna, gdy prawdopodobieństwa p_j wszystkich k zdarzeń są takie same, wynosi zero, gdy jedno zdarzenie jest pewne ($p_j = 1$) oraz jest wielkością addytywną.

Inaczej można powiedzieć, że entropia s dla danego układu czy systemu jest miarą nieokreśloności naszej wiedzy o nim. W układach chaotycznych, takich jak gaz w określonej temperaturze, w ruchu tworzących je molekuł zakodowana jest olbrzymia informacja o położeniach i prędkościach molekuł. Wielkości tych nie można określić za pomocą pomiarów makroskopowych. Entropia gazu jest miarą tej niedostępnej informacji. Jest ona równa liczbie pytań elementarnych z odpowiedziami „tak" lub „nie", na które trzeba odpowiedzieć, żeby podać dokładny opis wszystkich atomów gazu.

Ze względów historycznych, entropię układów fizycznych, zwaną czasami entropią termodynamiczną, wyraża się w jednostkach energii na stopień Kelwina i liczy się, wykorzystując logarytm naturalny. W związku z tym entropię termodynamiczną określa się wzorem (1) przy założeniu, że r = e oraz $a = k_B$, gdzie $k_B = 1{,}3806 \cdot 10^{-23}$ [J·K^{-1}] to stała Boltzmanna. W przypadku r = e oraz a = 1 mówimy o bezwymiarowej entropii termodynamicznej. Wówczas jednostką informacji jest 1 nat = 1 bit/ln 2 ≅ 1,44 bita.

Na pozór termodynamika, opisująca termiczne właściwości ciał makroskopowych, jest bardzo odległa od teorii informacji. Ta pierwsza powstała, aby opisywać maszyny parowe, a druga natomiast, by zoptymalizować systemy łączności. Jednak entropia termodynamiczna ograniczająca ilość użytecznej pracy, jaką może wykonać maszyna parowa, okazała się proporcjonalna do liczby niedostępnych bitów zmagazynowanych w położeniach i prędkościach molekuł, z których składa się para wodna.

W tym sensie entropię można także uważać za miarę nieuporządkowania układu fizycznego. Entropia zdefiniowana jest jako zawartość informacji, opisującej mikroskopowy ruch atomów układu, nieokreślonych za pomocą makroskopowego opisu stanu układu, za pomocą takich makroskopowo mierzalnych parametrów, jak: temperatura, ciśnienie, objętość, gęstość itp. Wraz ze wzrostem nieuporząkowania zwiększa się entropia, będąca miarą utraconej (niedostępnej) informacji. Ponieważ w przyrodzie istnieje samorzutna tendencja do wzrostu nieporządku, obowiązuje druga zasada termodynamiki głosząca, że: „entropia izolowanego układu fizycznego nie może maleć".

Druga zasada termodynamiki wyraża znany nam z codziennego doświadczenia fakt, że większość procesów zachodzących w przyrodzie ma charakter nieodwracalny. Szklanka spada ze stołu i roztrzaskuje się o podłogę. Nie obserwujemy natomiast tego, by kawałki szkła same uniosły się z podłogi i złożyły się w stojącą na stole szklankę. Takiego właśnie odwrócenia biegu zdarzeń zabrania druga zasada termodynamiki. Z tego powodu zajmuje ona jedną z najwyższych pozycji wśród praw przyrody.

2. Entropia czarnej dziury

Obserwacje astronomiczne przeprowadzane w ciągu ostatnich dziesięciu lat potwierdzają, że w centrum naszej Galaktyki, w odległości około 26 000 lat świetlnych, znajduje się czarna dziura o średnicy około 1,5 mln km i masie prawie 3 mln mas Słońca.

W 1916 roku niemiecki fizyk Karl Schwarzschild znalazł rozwiązanie równania pola grawitacyjnego ogólnej teorii względności, opisującego kulistą masę, z którego wynika, że jeśli ta masa skupiona jest w dostatecznie małym obszarze, to pole grawitacyjne na jej powierzchni jest tak silne, że nawet światło nie może się z niej wydostać. Obiekt, którego właściwości opisuje rozwiązanie Schwarzschilda, to czarna dziura. Termin czarna dziura został ukuty przez fizyka amerykańskiego Johna Wheelera w 1969 roku.

Na to, aby dana kulista masa M (wyrażona w kg) stała się czarną dziurą, musi zmieścić się wewnątrz sfery zwanej horyzontem zdarzeń o polu powierzchni [2]

$$A_h = 2{,}77 \cdot 10^{-53} M^2 \ [\mathrm{m}^2]. \tag{2}$$

Kiedy powstaje niewirująca i nienaładowana czarna dziura, tracimy wszelką informację o jej składowych cząstkach, z wyjątkiem informacji, która wynika ze znajomości jej całkowitej masy M. Nie sposób określić, co znajduje się wewnątrz czarnej dziury. Spod horyzontu zdarzeń nie są bowiem w stanie przedostać się z niej do świata zewnętrznego żadne informacje. Tej utracie informacji odpowiada wzrost entropii s aż do osiągnięcia maksymalnej możliwej wartości. Istnienie maksymalnej wartości entropii czarnej dziury rozwiązuje paradoks z teorii powszechnego ciążenia Newtona, że zapadający się układ, w którym dominują przyciągające oddziaływania grawitacyjne, nie posiada końcowego stanu równowagi, scharakteryzowanego przez maksimum entropii.

W przypadku kulistej czarnej dziury, która nie obraca się i nie posiada ładunku elektrycznego, jej entropię termodynamiczną można wyrazić prostym wzorem Beckensteina-Hawkinga [3]

$$s = k_B \frac{A_h}{4A_p}, \tag{3}$$

gdzie A_h jest polem powierzchni horyzontu zdarzeń (2) czarnej dziury, natomiast $A_p = 2{,}59 \cdot 10^{-70}$ [m^2] jest polem powierzchni Plancka (wyrażonym w m^2).

Wzór (3) pokazuje, że entropia, będąca miarą utraconej informacji, jest związana z horyzontem zdarzeń, który stanowi granicę ukrytego obszaru. Niezwykłe jest to, że zawartość ukrytej informacji związanej z entropią przyjmuje nadzwyczajnie prostą postać. Entropia termodynamiczna jest po prostu równa jednej czwartej pola powierzchni horyzontu zdarzeń, mierzonego w jednostkach Plancka, pomnożonego przez stałą Boltzmanna k_B.

Zatem każdy element powierzchni horyzontu zdarzeń o polu równym A_p zawiera ¼ nata, czyli $(4 \ln 2)^{-1} \approx 0{,}36$ bita ukrytej w czarnej dziurze informacji.

Zauważmy, że entropia czarnej dziury obliczona ze wzoru (3) jest olbrzymia. Na przykład dla czarnej dziury o promieniu horyzontu zdarzeń równym 1 m i masie porównywalnej z masą Saturna entropia jest rzędu 10^{70} bitów. Taką entropię posiada około 10^{30} m^3 wody w temperaturze pokojowej.

3. Zasada holograficzna

Udowodnimy teraz bardzo ważne twierdzenie:

Entropia termodynamiczna dowolnego sferycznego i izolowanego ciała i jest nie większa niż jedna czwarta pola zamkniętej i spójnej powierzchni otaczającej to ciało, wyrażonego w jednostkach Plancka, pomnożonego przez stałą Boltzmanna k_B [4].

Dowód: Zakładamy, że mamy w pełni izolowany makroskopowy układ o masie $m = m_1 + m_2$, gdzie $m_1 \gg m_2$ i entropii $s = s_1 + s_2$. Składa się on z dwóch oddalonych od siebie makroskopowych podukładów 1 i 2. Podukład 1 ma formę ciała sferycznego. Posiada on masę m_1 i entropię s_1. Przyjmujemy, że nie jest on czarną dziurą. Zakładamy ponadto, że podukład 1 znajduje się w środku sfery o polu powierzchni A_h, określonej wzorem (2), którą będziemy nazywać ekranem, będącym horyzontem zdarzeń czarnej dziury o masie $m = m_1 + m_2$.

Następnie bardzo wolno i stopniowo, żeby na zewnątrz ekranu nic się nie wydarzyło, co mogłoby zwiększyć entropię, dostarczamy masę z podukładu 2 do podukładu 1. Po dostarczeniu całej masy m_2 do podukładu 1 cały układ staje się izolowaną czarną dziurą, którego entropia, na mocy drugiej zasady termodynamiki i wzoru Beckensteina-Hawkinga (3) spełnia nierówność

$$s_1 \leq k_B \frac{A_h}{4A_p} \quad . \tag{4}$$

Zauważmy, że w przypadku, gdy pole powierzchni ekranu $A > A_h$, nierówność (4) jest nierównością mocniejszą. W ten sposób wykazaliśmy, że dowolne sferyczne i izolowane ciało (w naszym dowodzie podukład 1) ma entropię termodynamiczną nie większą niż jedna czwarta pola powierzchni dowolnego sferycznego ekranu otaczającego to ciało, wyrażonego w jednostkach Plancka, pomnożonego przez stałą Boltzmanna, co kończy dowód twierdzenia.

Z wyrażenia (4) wypływa ważny wniosek, że dany skończony i spójny obszar przestrzeni (w naszym przypadku sferyczny) posiada maksymalną entropię, jeżeli wypełnia go czarna dziura. Z tego powodu można powiedzieć, że czarne dziury są najbardziej chaotycznymi obiektami we Wszechświecie.

Zaskakującym wnioskiem, wynikającym z tego twierdzenia, jest to, że maksymalna entropia ciała zależy od pola powierzchni ograniczającego to ciało, a nie od jego objętości. Ten zdumiewający fakt można wyjaśnić w sposób naturalny, o ile słuszna jest „zasada holograficzna", sformułowana w 1993 roku przez holenderskiego fizyka, noblistę Gerarda 't Hoofta i rozwinięta w 1995 roku przez Amerykanina Leonarda Susskinda [5].

Jak wiadomo, hologramy to szczególnego rodzaju fotografie, które po oświetleniu wiązką światła spójnego generują realistyczny obraz trójwymiarowy. Pełna informacja opisująca świat trójwymiarowy zakodowana jest w postaci jasnych i ciemnych miejsc

obrazu interferencyjnego na kawałku dwuwymiarowej kliszy fotograficznej. Przez analogię do hologramu wniosek wypływający z udowodnionego twierdzenia nazwano „silną zasadą holograficzną" [6]. Głosi ona, że w przypadku pełnego opisu dowolnego trójwymiarowego ciała istnieje jego opis fizyczny, określony jedynie na dwuwymiarowej powierzchni ograniczającej to ciało, który wyczerpująco opisuje jego fizykę w trzech wymiarach.

Jeśli więc trójwymiarowy układ fizyczny można w zupełności opisać teorią fizyczną, określoną jedynie na jego dwuwymiarowej powierzchni, nasuwa się wniosek, że zawartość informacyjna tego układu nie przekracza zawartości opisu na dwuwymiarowej zamkniętej powierzchni. Zatem entropia zwykłego ciała niebędącego czarną dziurą jest także proporcjonalna do jego powierzchni, co implikuje, że jego objętość jest rodzajem iluzji.

Ideę silnej zasady holograficznej można wyjaśnić następująco. Ponieważ obserwator może badać dane ciało, wyłącznie obserwując ekran je otaczający, można przyjąć, że zamiast ciała ma do czynienia z układem fizycznym, określonym przez ekran. Zatem ciało może być opisywane w sposób zupełny za pomocą teorii fizycznej, odnoszącej się do ekranu. Teoria ekranu mogłaby przedstawiać go jako powierzchnię złożoną z pikseli (najmniejszych części ekranu), z jednym bitem informacji na każdym pikselu o polu powierzchni $4A_p$.

Wyobraźmy sobie, że obserwator przesyła sygnał świetlny, który po przejściu przez ekran oddziaływuje z ciałem. W wyniku tego oddziaływania powstaje nowy sygnał, który znowu poprzez ekran dociera do obserwatora. Z tego punktu widzenia, gdyby sygnał świetlny padł tylko na ekran i w odpowiedzi piksele ekranu wysłałyby taki sam sygnał jak ciało – efekt byłby dokładnie taki sam. Obserwator nie może zatem stwierdzić, czy nastąpiło oddziaływanie danego sygnału świetlnego z ciałem, czy też jedynie z jego obrazem na ekranie. Tak więc prawa fizyki, odnoszące się do ciała, mogą być dokładnie odwzorowane przez to, co obserwator widzi na ekranie. Silna zasada holograficzna mówi więc, że najbardziej szczegółowy opis tego, co dzieje się po drugiej stronie jakiejś zamkniętej powierzchni, jest opisem zachowania się obrazu, pojawiającego się na tej powierzchni.

W silnej zasadzie holograficznej zakłada się, że świat zbudowany jest z ciał umieszczonych w trójwymiarowej przestrzeni. „Słaba zasada holograficzna" [6] idzie dalej. Głosi ona, że nie mamy do czynienia z dwoma rzeczami: ciałami znajdującymi się w przestrzeni i obrazami na otaczających ich powierzchniach (ekranach). W świecie istnieją tylko procesy przekazywania informacji z jednej jego części do drugiej. A pole powierzchni dwuwymiarowego ekranu jest niczym innym jak zdolnością tego ekranu do przekazywania informacji. W świetle słabej zasady holograficznej przestrzeń jest zatem jedynie sposobem opisu różnych kanałów przekazu informacji od jednego obserwatora do drugiego. Geometria zaś przestrzeni sprowadza się do zdolności ekranów do przenoszenia informacji między różnymi obserwatorami. Geometrię przestrzeni możemy więc opisać w terminach sieci dwuwymiarowych ekranów.

Konkluzja

Relacja, określająca entropię dowolnego obszaru przestrzeni (nierówność (4)), wyznacza tym samym maksymalną ilość informacji, jaką może zawierać dany obszar przestrzeni. Zauważmy, że poszukiwanie sensu entropii materii doprowadziło w przeszłości do odkrycia atomów, a sensu entropii promieniowania do odkrycia fotonów. W ten sam sposób, poszukiwanie sensu entropii czarnej dziury, która okazuje się związaną z polem powierzchni jej horyzontu zdarzeń, wydaje się prowadzić do odkrycia dyskretnej struktury przestrzeni, a tym samym dyskretnej struktury materii na poziomie fundamentalnym.

W świetle słabej zasady holograficznej, dla dowolnego obserwatora, ciała fizyczne i zachodzące w nich zmiany sprowadzają się do przekazu skończonej ilości informacji. Każdy przedmiot można utożsamić z zamkniętym ekranem, składającym się z ogromnej ilości małych pikseli o powierzchni $4A_p$. Każdy piksel zawiera jeden bit informacji.

Mamy tutaj analogiczną sytuację jak na plazmowym ekranie telewizyjnym, składającym się najczęściej z około 1,2 mln pikseli, każdy o polu powierzchni 10^{64} razy większym od powierzchni piksela pojawiającego się w zasadzie holograficznej.

Silna zasada holograficzna burzy panujące od wielu lat przekonanie, że fundamentalnym językiem fizyki jest kwantowa teoria pola lub teoria superstrun, które zakładają nieskończoną liczbę stopni swobody (czyli niezależnych parametrów w pełni opisujących dany układ fizyczny). Zasada holograficzna ogranicza bowiem liczbę możliwych stopni swobody wewnątrz zamkniętej powierzchni do wartości skończonej. Zatem kwantowa teoria pola lub teoria superstrun, przewidujące nieskończoną liczbę stopni swobody, nie mogą być ostatnim słowem fizyki. Można więc przypuszczać, że przyszła fundamentalna teoria fizyczna nie będzie dotyczyć pól kwantowych, superstrun czy czasoprzestrzeni, lecz procesu wymiany informacji tworzącego zjawiska fizyczne.

Literatura

[1] Heisenberg W., *Ponad granicami*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1979, s. 195.
[2] Peacock J. A., *Cosmological physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1999, s. 51-55.
[3] Rovelli C., *Quantum gravity*, Cambridge University Press, Cambridge 2004, s. 301-311.
[4] Jacyna-Onyszkiewicz Z., *Zasada holograficzna a materia pierwsza*, [w:] *Nauka-Religia-Dzieje* pod red. J. A. Janika, Kraków 2006, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, s. 27-36.
[5] Bousso R., *The holographic principle*, „Reviews of Modern Physics" 74 (2002), s. 825-874.
[6] Smolin L., *Trzy drogi do kwantowej grawitacji*, Wydawnictwo CiS, Warszawa 2001, s. 189-199.

Is there a limit of matter divisibility?

Investigation of the thermal properties of the black holes by the quantum statistical mechanics has implied that matter cannot be divided to infinity because the number of independent parameters completely describing a subject of a limited volume is finite.

Keywords: black hole, entropy, holographic principle.