

Czarne dziury i paradoks informacji

*Co dzieje się z informacją, gdy materia ulega zniszczeniu w czarnej dziurze?
Poszukując odpowiedzi na to pytanie, fizycy zbliżają się
do znalezienia kwantowej teorii grawitacji*

Leonard Susskind

Gdzieś w kosmosie kapsuła czasu profesora Dęciaka została zniszczona przez jego odwiecznego rywala, profesora Gulasza. Kapsuła zawierała jedyny istniejący zapis matematycznego wzoru przeznaczonego dla przyszłych pokoleń. Jednak Gulaszowi udało się zrealizować swój szatański plan i umieścić bombę wodorową na pokładzie kapsuły. Bum! Wzór wyparował i zmienił się w chmurę elektronów, nukleonów, fotonów i neutrino. Dęciak wpadł w rozpacz. Nie zapisał swojego wzoru i nie pamięta, jak go wprowadził.

Później, w sądzie, Dęciak stwierdził, że Gulasz popełnił niewybaczalną zbrodnię. „To, co zrobił ten głupiec, jest nieodwracalne. Ten diabeł zniszczył mój wzór i musi za to zapłacić. Pozbawić go stałej profesury!”

„Nonsens! – odrzekł spokojnie Gulasz. – Informacja nigdy nie ulega zniszczeniu. Po prostu jesteś leniwy, Dęciak. To prawda, że narobiłem nieco bałaganu, ale wystarczy, że odszukasz wszystkie cząstki należące do szczątków i odwrócisz kierunek prędkości każdej z nich. Prawa fizyki są symetryczne ze względu na zmianę kierunku czasu, a zatem w wyniku takiej operacji odzyskasz swój głupi wzór. To dowodzi bez wątpienia, że nie zniszczyłem twojej cennej informacji.” I Gulasz sprawę wygrał.

Dęciak zemścił się jednak w równie diaboliczny sposób. Gdy Gulasz wyje-

chał z miasta, Dęciak ukradł mu komputer wraz ze wszystkimi przepisami kucharskimi. I aby upewnić się, że Gulasz już nigdy nie posmakuje swego słynnego matelote d'anguilles z truflami, Dęciak wysłał komputer do najbliższej czarnej dziury.

Podczas sprawy Dęciaka Gulasz nie mógł się uspokoić. „Tym razem posunąłeś się za daleko, Dęciak. Nie ma żadnego sposobu, bym odzyskał swoje dokumenty. Są w czarnej dziurze, jeżeli więc się po nie udam, zostanę zgnieciony. Naprawdę zniszczyłeś informację i musisz za to zapłacić.”

„Sprzeciw, Wysoki Sądzie! – Dęciak podskoczył na krześle. – Każdy wie, że czarne dziury parują. Wystarczy poczekać dostatecznie długo, a czarna dziura wypromieniuje całą swoją masę i zmieni się w rozchodzące się fotony i inne cząstki. To prawda, że może to potrwać 10^{70} lat, ale tu chodzi przecież o zasadę. Sytuacja nie różni się w istocie od wy-

buchu bomby. Wystarczy, że Gulasz odwróci prędkości wszystkich cząstek emitowanych przez czarną dziurę, a jego komputer wyłoni się zza horyzontu czarnej dziury.”

„Nieprawda! – wykrzyknął Gulasz. – Sytuacja jest odmienna. Mój przepis zniknął za horyzontem zdarzeń czarnej dziury. Gdy coś go przekroczy, może się wydostać tylko wtedy, gdy będzie poruszał się z prędkością większą niż światło. Zgodnie z naukami Einsteina jest to niemożliwe. Nie ma żadnego sposobu, aby



POWIERZCHNIA CZARNEJ DZIURY wydaje się Dęciakowi, lecącemu statkiem kosmicznym, sferyczną membranę – jest to tzw. horyzont zdarzeń. Obserwując Gulasza, który spada na czarną dziurę, widzi, jak ten zwalnia i rozpląszcza się na horyzoncie. Wobec tego zdaniem Dęciaka informacja zawarta w materii spadającej na czarną dziurę zatrzymuje się na horyzoncie. Natomiast Gulasz uważa, że spada przez horyzont prosto na osobliwość, gdzie ulega rozerwaniu.

parujące cząstki, które pochodzą z obszaru znajdującego się na zewnątrz horyzontu, mogły zawierać moje stracone przepisy nawet w zniekształconej postaci. Dęciak jest winny, Wysoki Sądzie.”

„Musimy powołać eksperta – stwierdziła zmieszana sędzina. – Profesorze Hawking, jakie jest pana zdanie?”

Stephen W. Hawking z University of Cambridge zajął miejsce świadka.

„Gulasz ma rację – powiedział. – W większości przypadków informacja ulega wymieszaniu i z praktycznego punktu widzenia jest stracona. Jeśli na przykład podrzucimy w powietrze talię kart, dotychczasowe ich uporządkowanie znika. W zasadzie gdybyśmy dokładnie wiedzieli, jak talia została rzucona, moglibyśmy odtworzyć pierwotny porządek. Nazywamy to mikroodwracalnością. Jednak w pracy z roku 1976 wykazałem, że czarne dziury prowadzą do naruszenia zasady mikroodwracalności, która obowiązywała wcześniej w mechanice klasycznej i kwantowej. Ponieważ informacja nie może wydostać się zza horyzontu, czarne dziury stanowią nowe źródło nieodwracalności w przyrodzie. Dęciak naprawdę zniszczył informację.”

„Co pan na to? – sędzina zwróciła się do Dęciaka. Ten w odpowiedzi wezwał

na świadka profesora Gerarda 't Hoofta z Uniwersytetu w Utrechcie.

„Hawking się myli – zaczął 't Hooft. – Uważam, że czarne dziury nie muszą prowadzić do naruszenia praw mechaniki kwantowej. Gdyby tak było, sytuacja wymknęłaby się spod kontroli. Nie można podkopywać mikroskopowej odwracalności, nie naruszając przy tym zasady zachowania energii. Gdyby Hawking miał rację, Wszechświat powinien w ciągu ułamka sekundy podgrzać się do temperatury 10^{31} stopni. Ponieważ tak się nie stało, to musi istnieć jakieś rozwiązanie tego problemu.”

Zeznawało jeszcze 20 innych słynnych teoretyków. Lecz jedyne, co udało się ustalić, to fakt, że nie potrafili oni uzgodnić stanowiska.

Paradoks informacji

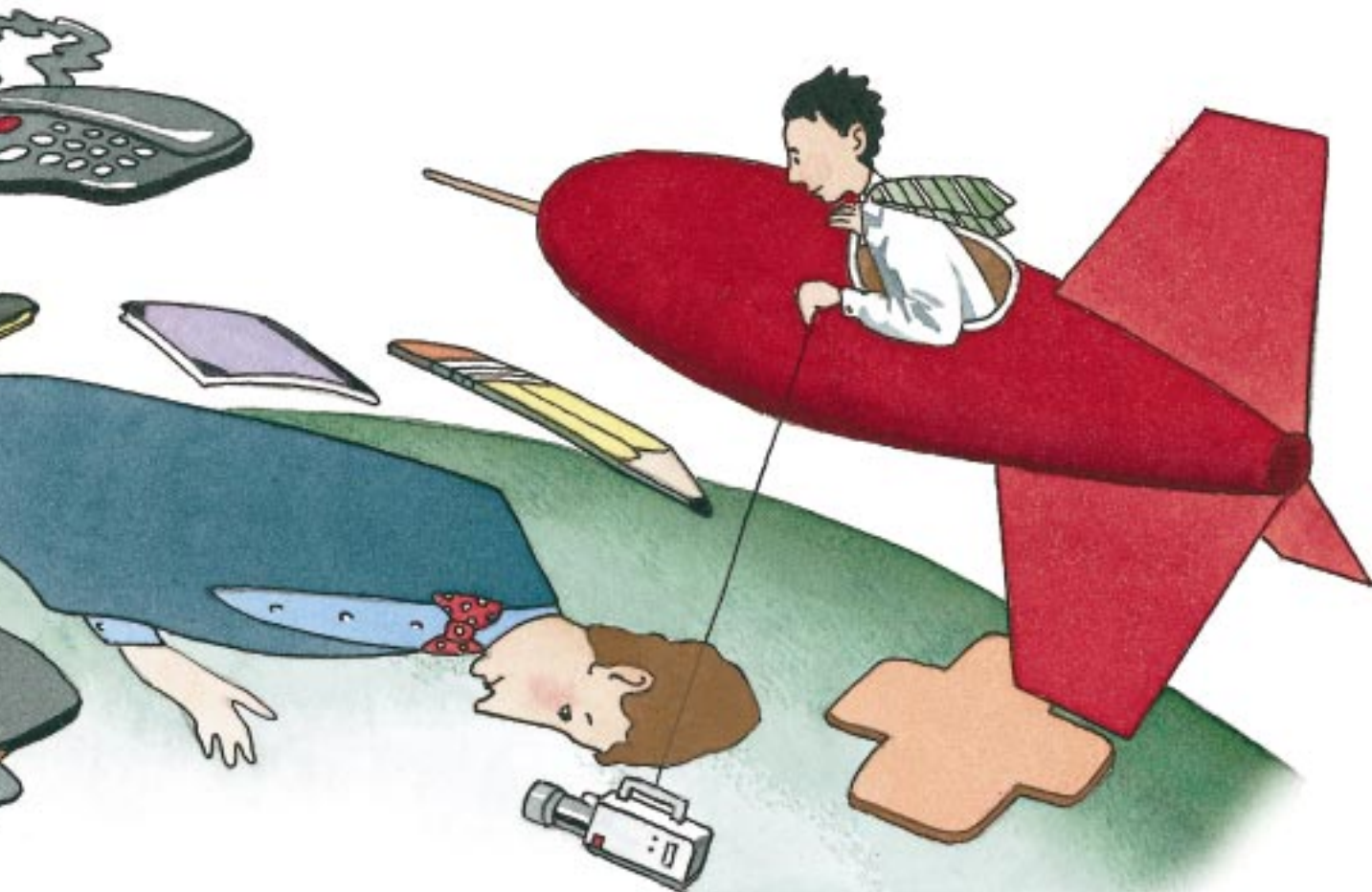
Dęciak i Gulasz to oczywiście postaci fikcyjne, w przeciwieństwie do Hawkinga i 't Hoofta. Również kontrowersja dotycząca losów informacji w czarnej dziurze jest jak najbardziej realna. Twierdzenie Hawkinga, iż czarna dziura pochłania informację, zwróciło uwagę fizyków na potencjalnie poważną sprzeczność pomiędzy mechaniką kwantową a ogólną teorią względności.

Problem ten jest znany jako paradoks informacji.

Gdy jakieś ciało wpadnie do czarnej dziury, nie możemy liczyć, że kiedykolwiek wypadnie. Według Hawkinga nie można już odzyskać informacji zakodowanej we własnościach atomów, z których zbudowane jest to ciało. Albert Einstein odrzucił kiedyś mechanikę kwantową, mówiąc, że „Bóg nie gra w kości”. Zdaniem Hawkinga natomiast „Bóg nie tylko gra w kości, ale czasem rzuca je tam, gdzie nie można ich zobaczyć” – tzn. do czarnej dziury.

Jednak jak wskazał 't Hooft, jeśli informacja jest naprawdę tracona, to powoduje to załamanie mechaniki kwantowej. Mimo swej osławionej nieokreśloności mechanika kwantowa kieruje zachowaniem cząstek w bardzo specyficzny sposób: jest odwracalna. Gdy jednak cząstka oddziałuje z drugą, może ulec absorpcji, odbić się, a nawet rozpaść na inne cząstki, w każdym jednak przypadku dokładna znajomość stanu końcowego pozwala zrekonstruować stan początkowy.

Jeśli czarne dziury powodują, że ta reguła nie obowiązuje, to można również tworzyć i niszczyć energię, co jest sprzeczne z jedną z najbardziej podstawowych zasad fizycznych. Matematycz-





na struktura mechaniki kwantowej gwarantuje zachowanie energii, podobnie jak odwracalność. Naruszenie jednej zasady pociąga za sobą załamanie się drugiej. W 1980 roku w Stanford University Thomas Banks, Michael Peskin i ja wykazaliśmy, że utrata informacji w czarnej dziurze prowadzi do wygenerowania ogromnej energii. Z tego powodu wraz z 't Hooft'em wierzymy, że musi istnieć jakiś sposób wydobycia informacji, która wpadła do czarnej dziury.

Niektórzy fizycy uważają, że pytanie, co dzieje się wewnątrz czarnej dziury, ma charakter czysto akademicki lub wręcz teologiczny, niczym liczenie diabłów na główce szpilki. Tak jednak nie jest: gra idzie o przyszłe podstawowe prawa fizyki. Procesy zachodzące wewnątrz czarnych dziur to tylko skrajne przykłady oddziaływań między cząstkami elementarnymi. Gdy mają one taką energię, jaką można uzyskać w największych obecnie akceleratorach, oddziaływania grawitacyjne między nimi są zaniedbywalnie małe. Jeśli jednak energia cząstek jest rzędu „energii Plancka”, równej mniej więcej 10^{28} eV, wtedy koncentracja energii – czyli masy – w niewielkiej objętości jest tak wielka, że oddziaływania grawitacyjne dominują nad wszystkimi innymi. Zderzenia między takimi cząstkami podlegają w równej mierze prawom mechaniki kwantowej, jak i ogólnej teorii względności.

A zatem rozglądając się za wskazówkami w poszukiwaniu przyszłych teorii fizycznych, powinniśmy zająć się budową planckowskich akceleratorów. Niestety, jak obliczył Shmuel Nussinov z Uniwersytetu w Tel Awiwie, taki akcelerator musiałby być wielkości obecnego Wszechświata.

Znane własności materii mogą nam jednak coś powiedzieć o prawach fizyki obowiązujących w obszarze energii zbliżonych do energii Plancka. Cząstki elementarne mają wiele cech, które wzbudziły podejrzenia fizyków, iż wcale nie

HORYZONTOWI ZDARZEŃ w tej analogii odpowiada linia w poprzek rzeki. Od tego punktu woda płynie z większą prędkością niż najszybsze z ryb – świetliki. Jeśli świetlik przekroczy tę linię, nigdy już nie powróci do górnej części rzeki, ponieważ rozbije się na skałach wodospadu. Przekraczając jednak tę linię, ryba nie dostrzega nic szczególnego. Podobnie promień światła lub osoba, która przekroczy horyzont zdarzeń, nie mogą już wydostać się na zewnątrz, lecz nieuchronnie spadają na osobliwość w środku czarnej dziury, choć przecinając horyzont, nie zauważyły niczego nadzwyczajnego.



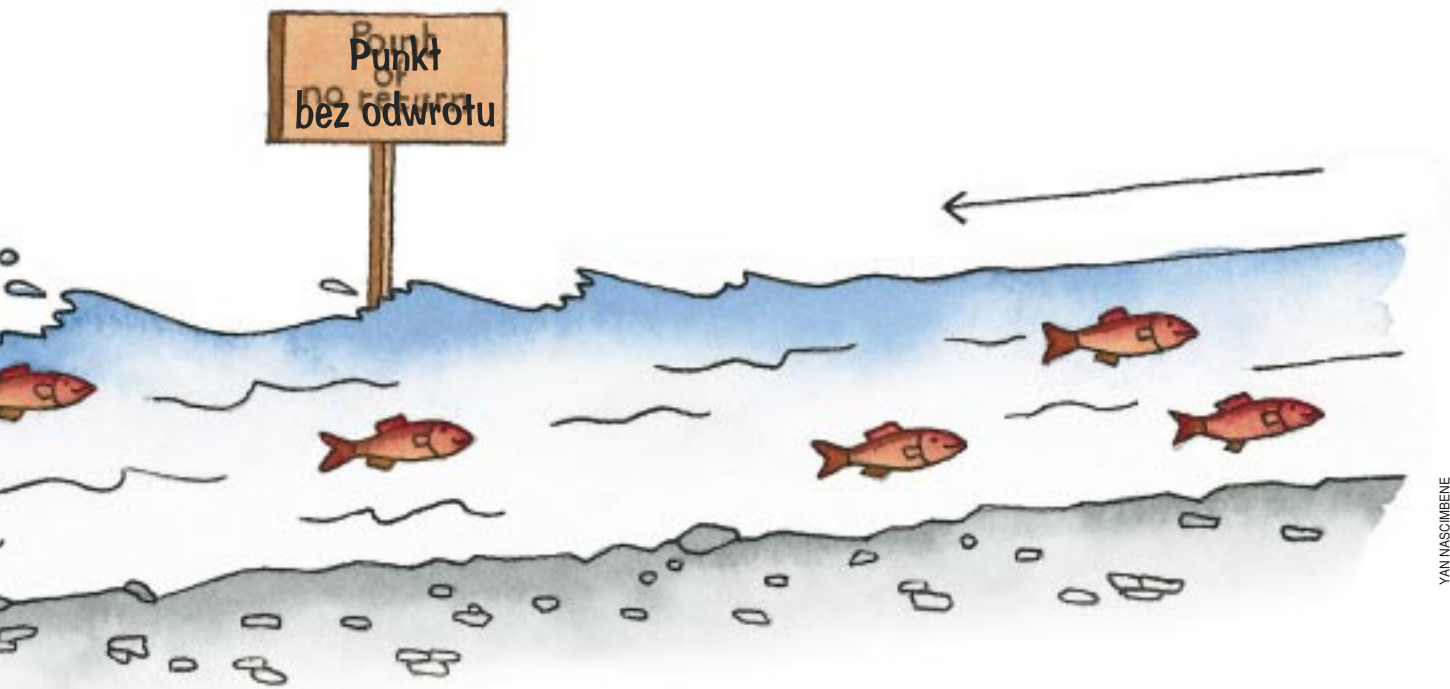
Bardzo niewiele wiadomo na pewno o zderzeniach w skali energii Plancka, ale sporo można się domyślać. Zderzenia czołowe przy takich energiach powodują powstanie tak dużej koncentracji masy, że tworzy się czarna dziura, która następnie paruje. Wobec tego jeśli chcemy poznać strukturę cząstek elementarnych, musimy odpowiedzieć na pytanie, czy czarne dziury zachowują się w sposób sprzeczny z regułami mechaniki kwantowej.

Czarna dziura powstaje, gdy w niewielkiej objętości skoncentrowana zostaje taka masa, że siły grawitacyjne dominują nad innymi i materia zapada się pod własnym ciężarem. Materia ulega ściśnięciu w niewyobrażalnie małym obszarze zwanym osobliwością; gęstość materii wewnątrz osobliwości jest właściwie nieskończona. Jednak nas tutaj nie interesuje osobliwość.

Osobliwość jest otoczona powierzchnią zwaną horyzontem zdarzeń. Dla czarnej dziury mającej taką masę jak cała galaktyka promień horyzontu wynosi 10^{11} km – czyli tyle, ile promień orbity Plutona. Dla czarnej dziury o masie takiej jak Słońce promień horyzontu ma długość zaledwie jednego kilometra. Promień horyzontu małej czarnej dziury o masie niewielkiej góry wynosi 10^{-13} cm – tyle, ile promień protonu.

Horyzont zdarzeń dzieli przyszłość na dwa obszary – wewnątrz czarnej dziury i obszar na zewnątrz. Przypuśćmy, że Gulasz, który czatuje na swój komputer w pobliżu czarnej dziury, emituje cząst-

są one tak elementarne, lecz mają skomplikowaną strukturę wewnętrzną, określoną prawami fizyki z zakresu energii Plancka. Gdy uda się nam połączyć mechanikę kwantową z ogólną teorią względności, powinniśmy poprawnie wyjaśnić mierzalne własności elektronów, fotonów, kwarków i neutron.



YAN NACIMBENE

kę w kierunku od środka. Jeśli nie jest zbyt blisko, a cząstka ma dostatecznie dużą prędkość, to zdoła ona pokonać przyciąganie grawitacyjne i uciec do nieskończoności. Prawdopodobieństwo ucieczki jest największe, gdy cząstka ma największą możliwą prędkość początkową, czyli porusza się z prędkością światła. Jeśli jednak Gulasz znajduje się zbyt blisko osobliwości, to nawet światło nie zdoła uciec. Horyzont to miejsce, gdzie znajduje się (wirtualny) znak ostrzegawczy: Nie ma odwrotu. Żadna cząstka ani sygnał nie może przekroczyć horyzontu od strony czarnej dziury.

Horyzont zdarzeń i entropia

William G. Unruh z University of British Columbia, jeden z pionierów kwantowej teorii czarnych dziur, zaproponował analogię, która pomaga zrozumieć znaczenie horyzontu. Przyjmijmy, że pewna rzeka płynie tym szybciej, im bliżej ma do ujścia. Wśród ryb żyjących w tej rzece najszybsze są świetliki. Poczynając od pewnego punktu, rzeka płynie z prędkością większą niż maksymalna prędkość świetlików. Oczywiście żaden świetlik, który przekroczy ten punkt, nie zdoła się już wycofać. Rozbije się na skałach poniżej Wodospadu Osobliwości w dolnym biegu rzeki. Jednak dla niczego nie podejrzewającego świetlika punkt bez odwrotu niczym się nie wyróżnia. Żaden szczególnie prąd ani fala nie ostrzega go przed niebezpieczeństwem.

Co stanie się z Gulaszem, który beztropko zbliży się za bardzo do horyzontu?

Podobnie jak swobodnie pływająca rybka nie czuje nic szczególnego: żadnych wielkich sił, żadnych szarpnięć ani błyskających światła. Sprawdza puls, posługując się naręcznym zegarkiem – wszystko w porządku. Szybkość oddychania – normalna. Dla niego horyzont nie różni się od innych miejsc.

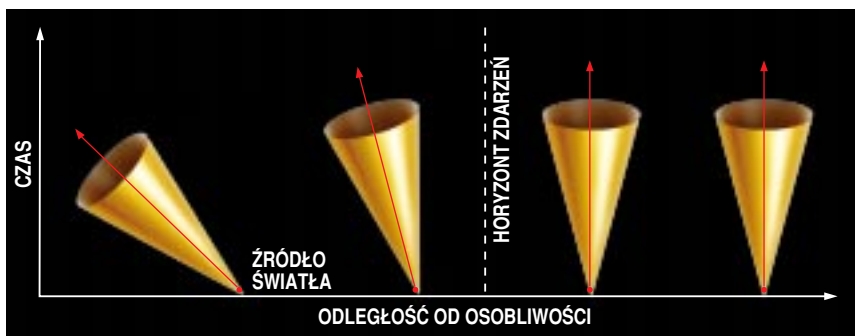
Ale Dęciak, który obserwuje to wszystko ze statku kosmicznego lecącego w bezpiecznej odległości, widzi, że Gulasz zachowuje się bardzo dziwnie. Dęciak opuścił na linie kamerę i inne urządzenia, żeby móc śledzić rywalka. Gdy Gulasz zbliża się do czarnej dziury, jego prędkość zaczyna wzrastać, aż staje się bliska prędkości światła. Einstein wykazał, że jeśli dwaj obserwatorzy poruszają się względem siebie z dużą prędkością, to każdy uważa, że zegarek drugiego chodzi wolniej. Co więcej, zegarek w pobliżu ciała o dużej masie chodzi wolniej niż taki sam czasomierz w pustej przestrzeni. Dęciak widzi zatem, że Gulasz staje się dziwnie powolny i apatyczny. Spadając, wymachuje w stronę Dęciaka pięścią, ale jego ruchy są coraz wolniejsze, aż wreszcie po dotarciu do horyzontu całkowicie zamierają. Choć Gulasz wpada pod horyzont, Dęciak tego nigdy nie zobaczy.

W rzeczywistości nie tylko wszystkie ruchy Gulasza stają się coraz wolniejsze, ale jego ciało zostaje zgniecione w ciekłą warstwę materii. Einstein wykazał także, że jeśli dwaj obserwatorzy poruszają się względem siebie z dużą prędkością, to każdy z nich widzi, że drugi ulega spłaszczeniu w kierunku ruchu. Dęciak widzi również całą materię, która wpadła do czarnej dziury –

w tym materię, z której ona powstała – rozciągniętą i zamrożoną na horyzoncie. Z punktu widzenia odległego obserwatora stan materii jest skutkiem ogromnej dylatacji czasu. Zdaniem Dęciaka czarna dziura jest wielkim śmietnikiem materii rozplaszczonej na horyzoncie. Natomiast Gulasz nie widzi niczego szczególnego, dopóki nie zbliży się do osobliwości, gdzie ginie wskutek działania potężnych sił pływowych.

Teoretycy zajmujący się czarnymi dziurami stwierdzili z czasem, że własnościami – z punktu widzenia obserwatora z zewnątrz – przypominają one membranę rozciągniętą tuż nad horyzontem. Membranę należy przypisać wiele cech fizycznych, na przykład lepkość i przewodnictwo elektryczne. Zapewne najbardziej zaskakująca była sformułowana w początkach lat siedemdziesiątych hipoteza Hawkinga, Unruha i Jacoba D. Bekensteina z Uniwersytetu Hebrajskiego w Izraelu. Stwierdzili oni, że wskutek efektów kwantowych czarna dziura – a w szczególności jej horyzont – zachowuje się tak, jakby zawierała ciepło. Horyzont zachowuje się jak warstwa materii o niezerowej temperaturze.

Temperatura horyzontu zależy od sposobu przeprowadzenia pomiaru. Przyjmijmy, że wśród instrumentów, które opuścił ze swego statku Dęciak, jest również termometr. Z daleka od horyzontu wskazuje on, że temperatura jest odwrotnie proporcjonalna do masy czarnej dziury. Dla czarnej dziury mającej taką masę jak Słońce „temperatura Hawkinga” wynosi około 10^{-8} stopnia, czyli jest dużo niższa niż temperatura



STOŻEK ŚWIETLNY przedstawia możliwe trajektorie promienia światła wychodzącego z danego punktu. Na zewnątrz horyzontu stożek świetlny jest skierowany do góry, w przybliżeniu równoległe do osi czasu. Wewnątrz czarnej dziury stożki świetlne są tak pochylone do środka, że promień światła musi wpaść w osobliwość znajdującą się w środku czarnej dziury.

panująca w przestrzeni międzygalaktycznej. Jednak w miarę zbliżania się do horyzontu termometr wskazuje coraz wyższą temperaturę. W odległości 1 cm od horyzontu temperatura wynosi już jedną tysięczną stopnia, a w odległości równej średnicy jądra – 10 mld stopni. Ostatecznie temperatura staje się tak wysoka, że nie da się jej zmierzyć żadnym wyobraźnym termometrem.

Inną wielkością charakteryzującą gorące ciała jest entropia, stanowiąca miarę ilości informacji, jaką może zawierać to ciało. Proszę sobie wyobrazić kryształ, którego sieć ma N węzłów. Każdy węzeł jest pusty lub zawiera jeden atom. Wobec tego każdy węzeł odpowiada jednemu bitowi informacji – albo w węźle znajduje się atom, albo nie; cała sieć zawiera N bitów informacji. Ponieważ każdy węzeł może znajdować się w dwóch stanach, to całkowita liczba możliwych stanów wynosi 2^N (każdy stan odpowiada innej konfiguracji atomów). Entropię, czyli nieuporządkowanie ciała, definiujemy jako logarytm liczby możliwych stanów. Entropia jest zatem w przybliżeniu równa liczbie N charakteryzującej pojemność informacyjną ciała.

Bekenstein stwierdził, że entropia czarnej dziury jest proporcjonalna do powierzchni horyzontu zdarzeń. Zgodnie ze ścisłym wzorem wyprowadzonym przez Hawkinga entropia na centymetr kwadratowy horyzontu jest równa 3.2×10^{64} . Niezależnie od tego, jaki układ fizyczny jest nośnikiem bitów informacji na horyzoncie, musi on być bardzo mały i gęsto rozmieszczony. Liniowe rozmiary takiego układu muszą być 10^{20} razy mniejsze niż promień protonu. Muszą mieć również bardzo szczególny charakter, taki żeby Gulasz nie dostrzegł niczego w chwili, gdy przecina horyzont.

Odkrycie entropii i innych termodynamicznych własności czarnych dziur

doprowadziło Hawkinga do bardzo interesującego wniosku. Podobnie jak wszystkie ciała gorące czarna dziura musi emitować promieniowanie. Powstaje ono w okolicy horyzontu i jego istnienie nie zaprzecza regule, że nic nie może wydostać się z czarnej dziury. Sprawia jednak, że czarna dziura traci energię i masę. Po upływie dostatecznie długiego czasu odizolowana czarna dziura wypromieniowuje całą masę i znika.

Wszystko to wiadomo już od ponad 20 lat. Trudności pojawiają się wtedy, gdy w ślad za Hawkingiem prześledzimy losy informacji, która wpadła do czarnej dziury. Czy promieniowanie czarnej dziury może wynieść zawartą w niej informację, choćby w bardzo zniekształconej formie? Czy też informacja ginie na zawsze pod horyzontem?

Gulasz, który poszukując swego komputera, wpadł do czarnej dziury, mógłby uważać, że jego zbiory dostały się pod horyzont i są stracone dla świata zewnętrznego; takie jest stanowisko Hawkinga. Dęciak broni odmiennego poglądu: „Widziałem, jak komputer spada w kierunku horyzontu, ale nigdy nie zauważyłem, żeby naprawdę tam wpadł. Temperatura promieniowania w pobliżu horyzontu jest tak wielka, że straciłem komputer z oczu; zapewne wyparował. Później jego energia i masa powróciły w postaci promieniowania termicznego. Zgodnie z regułami mechaniki kwantowej promieniowanie musi nieść również całą informację na temat komputera.” Takiego stanowiska broni ‘t Hooft, z którym się zgadzam.

Komplementarność czarnych dziur

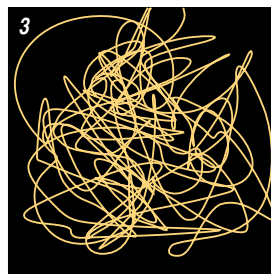
Czy to możliwe, że w pewnym sensie rację mają zarówno Gulasz, jak i Dęciak? Czy możliwe, że obserwacje Dęciaka są zgodne z hipotezą, iż Gulasz i jego komputer zmienili się w promieniowanie

cieplne, które zostało wyemitowane w przestrzeń, nim przekroczyło horyzont, choć sam Gulasz nie dostrzega niczego szczególnego aż do chwili znacznie późniejszej, gdy już dociera do osobliwości? Lárus Thorlacius, John Uglum i ja pierwsi przedstawiliśmy taką hipotezę; nazwaliśmy ją zasadą komplementarności czarnych dziur. Bardzo podobne koncepcje można znaleźć również w pracach ‘t Hoofta. Zasada komplementarności czarnych dziur jest nową zasadą względności. Zgodnie ze szczególną teorią względności różni obserwatorzy mierzą różne przedziały czasu i odległości, ale zdarzenia zachodzą w dobrze określonych punktach czasoprzestrzeni. Zasada komplementarności odrzuca to założenie.

Znaczenie tej zasady najłatwiej zrozumieć w zastosowaniu do problemu struktury cząstek elementarnych. Przypuśćmy, że Dęciak obserwuje atom spadający na horyzont zdarzeń, posługując się zawieszonym na linie potężnym mikroskopem. Początkowo widzi jądro otoczone chmurą ujemnego ładunku. Elektrony poruszają się tak szybko, że ich rozkład wydaje się rozmyty. Jednak gdy atom zbliża się do horyzontu, elektrony zwalniają i można je dostrzec. Protony i neutrony w jądrze wciąż poruszają się tak szybko, że nie widać struktury jądra. W chwilę później elektrony zamierają, a protony i neutrony zaczynają zwalniać. Jeszcze później można dostrzec poszczególne kwarki. (Gulasz, który spada wraz z atomem, nie widzi nic szczególnego.)

Wielu fizyków wierzy, że cząstki elementarne są zbudowane z jeszcze mniejszych elementów składowych. Choć żadna teoria nie została dotąd powszechnie przyjęta, najbardziej obiecującym kandydatem wydaje się teoria strun. Nie ma w niej cząstek punktowych. Obiektem fundamentalnym jest natomiast maleńka pętka oscylująca z częstością podstawową i wieloma częstościami harmonicznymi. Poszczególne typy drgań odpowiadają różnym cząstkom elementarnym.

Pomocna tu będzie następująca analogia. Nie można dostrzec skrzydeł wiszącego w powietrzu kolibra, ponieważ ptak trzepoce nimi zbyt szybko. Jeśli natomiast zrobimy zdjęcie, posługując się bardzo krótkim czasem naświetlania, to możemy zobaczyć skrzydła, i ptak wyda się nam wtedy większy. Wyobraźmy sobie, że koliber spada na czarną dziurę. W miarę jak zbliża się do horyzontu, Dęciak coraz wyraźniej widzi jego skrzydła, których uderzenia stają się wolniejsze. Koliber wydaje się nieco większy. Teraz przypuśćmy, że pióra



KOLEJNE MODY OSCYLACJI można obserwować, gdy struna spada w kierunku horyzontu czarnej dziury. Struny są tak małe, że mogą przechować całą informację, która kiedykolwiek wpadła do czarnej dziury, co pozwala rozwiązać paradoks informacji.

skrzydeł ptaka poruszają się nawet szybciej. Wkrótce one także zamierają, stają się coraz wyraźniej widoczne i również pozornie zwiększają rozmiary ptaka. Natomiast Gulasz, który spada wraz z kolibrem, nie dostrzega nic godnego uwagi.

Oscylacje strun, podobnie jak ruchy skrzydeł kolibra, są zazwyczaj zbyt szybkie, by można je było wykryć. Struna jest obiektem bardzo małym, 10^{20} razy mniejszym niż proton. Gdy jednak spada na czarną dziurę, jej oscylacje ulegają spowolnieniu i stają się widoczne. Amanda Peet, Thorlacius, Arthur Mezhlumian i ja zbadaliśmy matematycznie zachowanie się struny, gdy zamierają jej kolejne mody. Struna powiększa się, jakby była bombardowana przez cząstki i promieniowanie w gorącym otoczeniu. Po stosunkowo krótkim czasie struna i zawarta w niej informacja zostają rozciągnięte na cały horyzont.

W taki sposób zachowuje się wszelka materia, która wpada do czarnej dziury, gdyż zgodnie z teorią strun wszystkie ciała fizyczne są zbudowane ze strun. Elementarne struny krzyżują się i tworzą gęstą sieć pokrywającą horyzont. Każdy fragment struny o długości 10^{-33} cm niesie jeden bit informacji. Wobec tego struny mogą przechować ogromną ilość informacji zawartej w materii, która wpadła do czarnej dziury od chwili jej powstania.

Wydaje się zatem, że horyzont jest zbudowany z całej materii zawartej w czarnej dziurze, która przybiera postać gigantycznej sieci strun. Z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego in-

formacja nigdy nie wpada do czarnej dziury – zatrzymuje się na horyzoncie, a następnie jest wynoszona przez promieniowanie. Struny stanowią konkretny model ilustrujący działanie zasady komplementarności czarnych dziur, a zatem pozwalają rozwiązać paradoks informacji. Dla zewnętrznych obserwatorów – czyli dla nas – informacja nigdy nie jest stracona. Co ważniejsze, wydaje się, że bity są zgromadzone na horyzoncie w postaci mikroskopijnych kałków strun.

Teoria strun

Prześledzenie ewolucji czarnej dziury od powstania do kresu istnienia wykracza daleko poza możliwości obecnie znanych metod matematycznych dostępnych teoretykom zajmującym się strunami. Mimo to pewne nowe wyniki wspierają ilościowo naszkicowane powyżej idee. Z matematycznego punktu widzenia najprostszy jest przypadek „ekstremalnych” czarnych dziur. Czarne dziury bez ładunku elektrycznego parują, dopóki nie utracą całej masy, natomiast czarne dziury z ładunkiem elektrycznym (lub – teoretycznie – magnetycznym) przestają parować, gdy przyciąganie grawitacyjne między elementami materii w ich wnętrzu jest równe odpychaniu elektrostatycznemu lub magnetostatycznemu. Obiekt, który wtedy powstaje, to właśnie ekstremalna czarna dziura.

Ashoke Sen z Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), wykorzystując moje wcześniejsze sugestie, wyka-

zał w 1995 roku, że dla niektórych ekstremalnych czarnych dziur z ładunkiem elektrycznym liczba bitów zawartych w strunach odpowiada ściśle entropii czarnej dziury mierzonej powierzchnią horyzontu. Ten wynik był pierwszym poważnym argumentem na rzecz tezy, iż czarne dziury zachowują się w sposób zgodny z kwantową teorią strun.

Sen rozpatrywał jednak tylko mikroskopijne czarne dziury. Andrew Strominger z University of California w Santa Barbara i Cumrun Vafa z Harvard University oraz nieco później Curtis G. Callan i Juan Maldacena z Princeton University rozszerzyli jego wyniki na przypadek czarnej dziury mającej oba ładunki – elektryczny i magnetyczny. W odróżnieniu od czarnych dziur Sena te czarne dziury mogą być tak duże, że zmieściłyby się w nich również Gulasz. I w tym przypadku teoretycy przekonali się, że termodynamika czarnych dziur jest zgodna z teorią strun.

Dwie grupy przeprowadziły nowe, jeszcze bardziej ekscytujące obliczenia promieniowania Hawkinga. Sumit R. Das z TIFR i Samir Mathur z Massachusetts Institute of Technology oraz Avinash Dhar, Gautam Mandal i Spenta R. Wadia, również z TIFR, zbadali proces emisji nadwyżki energii przez czarne dziury bliskie stanu ekstremalnego. Teoria strun w pełni wyjaśnia generowane wówczas promieniowanie Hawkinga. Podobnie jak mechanika kwantowa opisuje promieniowanie jako konsekwencję przeskoku elektronu ze stanu wzbudzonego do podstawowego, również teoria strun tłumaczy widmo promieniowania wzbudzonej czarnej dziury.

Moim zdaniem mechanika kwantowa okaże się zgodna z teorią grawitacji; te dwie wielkie dziedziny fizyki połączą się w ramach kwantowej teorii strun. Paradoks informacji, którego rozwiązanie wydaje się już bliskie, odegrał ważną rolę w zainicjowaniu trwającej wciąż rewolucji w fizyce. I choć Gulasz nigdy by tego nie przyznał, zapewne okaże się, że rację miał Dęciak: przepis na matelote d'anguilles nie przepadł na zawsze.

Tłumaczył
Piotr Amsterdamski

Informacje o autorze

LEONARD SUSSKIND należy do twórców teorii strun. Tytuł doktora otrzymał w Cornell University, a od 1978 roku ma profesurę w Stanford University. Jest autorem licznych prac z dziedziny cząstek elementarnych, kwantowej teorii pola, kosmologii, a ostatnio również teorii czarnych dziur. Na podstawie przeprowadzonych badań twierdzi, że informacja może zostać skompresowana w strukturze mającej jeden wymiar mniej; tę koncepcję określa mianem wszechświata holograficznego.

Literatura uzupełniająca

BLACK HOLES AND TIME WARPS: EINSTEIN'S OUTRAGEOUS LEGACY. Kip S. Thorne; W. W. Norton, 1994.
THE ILLUSTRATED A BRIEF HISTORY OF TIME. Stephen W. Hawking; Bantam Books, 1996.
TRENDY W FIZYCE TEORETYCZNEJ: TEORIE WSZYSTKIEGO. Madhusree Mukerjee, *Świat Nauki*, nr 3(55), s. 74, III/1996.