

Paradoks informacyjny a zasady zachowania w fizyce

*Doktorant na Wydziale Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Kacper DEBSKI*

– Chciałbym przejrzeć tę pańską powieść. – I wyciągnął otwartą dłoń.
– Niestety, nie mogę tego zrobić – odparł mistrz – spaliłem ją w piecu.
– Przepraszam, nie mogę w to uwierzyć – odpowiedział Woland – to niemożliwe, rękopisy nie płoną. – Odwrócił się do Behemota i powiedział: – Ano, Behemocie, daj no tu tę powieść.
Kot momentalnie zerwał się z krzesła i wszyscy zobaczyli, że siedział na grubym pliku maszynopisów.

Michaił Bułhakow, „Mistrz i Małgorzata”

Jeszcze kilka lat temu zacytowany fragment powieści Michaiła Bułhakowa mógł być zrozumiany tylko w sposób metaforyczny. Przyjrzyjmy mu się jednak naszym, współczesnym okiem, przywykłym do spoglądania na ekrany komputerów. W czasach, w których pisanie powieści kojarzy się nam bardziej z terkotem klawiatury niż z kałamarzem i gęsim piórem, łatwo zrozumieć, że cytat ten nie jest już tak zupełnie absurdalny, jak mogłoby się nam początkowo wydawać. Obecnie prawdopodobnie większość dostępnej literatury powstaje przy użyciu komputera. Pojedyncze słowa składają się z ciągów bitów zapisanych na twardym dysku. Czy w takich realiach faktycznie nie można dostrzec namiastki obowiązywania zasady zakazującej zupełnego zniszczenia pliku „rękopisu”? Dobrze wiemy, że sprawny informatyk bez trudu będzie w stanie przywrócić pochopnie usunięty plik. Informacje (bity) zapisane na dysku wciąż przecież fizycznie na nim istnieją, a użytkownik jedynie traci do nich dostęp, przez co faktycznie wygląda to, jakby dokonał się proces niszczenia. Gdy myślimy współczesnymi kategoriami, cytat ten nie zaskakuje nas już tak bardzo. To zupełnie oczywiste, że po zapisanym pliku zostaje jakiś ślad. Nawet jeżeli jest on trudny do znalezienia, to okiem fachowca można dostrzec jego istnienie. Jednak czy nie to samo tyczy się każdego obiektu, który kiedyś istniał? Co w takim razie z oryginalnym zdaniem z powieści? Czy faktycznie rękopisy nie płoną? Postarajmy się wcielić w rolę detektywa mającego ustalić utraconą treść spalonego rękopisu.

Piszac swą powieść, tytułowy mistrz posługiwał się maszyną do pisania, ale puśćmy wodze wyobraźni i przypuśćmy, że posługiwał się staromodnym piórem, starannie kreśląc słowa powieści. Czy w takim wypadku nie moglibyśmy spodziewać się, że na blacie stołu pozostały jakieś ślady? Dociskając stalówkę pióra do kartki papieru spoczywającej na polakierowanym blacie biurka, mógł on minimalnie zarysować jego powierzchnię. Nic poza ewentualnymi trudnościami technicznymi nie stoi na przeszkodzie, aby takie ślady zarysowań zebrać, przeanalizować, a następnie po wielu godzinach żmudnych obliczeń odtworzyć każde słowo utraconej powieści. W tym miejscu w ramach uczciwości intelektualnej musimy wyjaśnić, że nawet w przypadku posługiwania się maszyną do pisania możliwa byłaby podobna procedura badania śladów. W tym wypadku należałoby zapewne skupić się na

zużywających się elementach maszyny do pisania, takich jak ruchome czcionki, wałek, w który uderzają, i inne elementy. Jestem przekonany, że możemy się zgodzić, iż odpowiednio docieklivy detektyw mógłby odtworzyć utracony maszynopis. Idąc dalej w naszych rozważaniach, możemy pokusić się o stwierdzenie, że gdybyśmy tylko byli w stanie zbadać każdy atom, każdy ślad pozostały po procesie pisania, to faktycznie moglibyśmy powiedzieć, że rękopis raz napisany już nigdy nie zostanie utracony. Zawsze znajdzie się metoda pozwalająca go odtworzyć na podstawie zebranych dowodów. Jednak co tak naprawdę pozwala nam formułować tego typu przypuszczenia? Na zupełnie fundamentalnym poziomie jest to wiara w obowiązywanie czegoś, co moglibyśmy roboczo nazwać zasadą zachowania informacji.

W tym miejscu warto zrobić małą dygresję, aby uświadomić sobie, że zasady zachowania w fizyce, które znamy ze szkoły, nie zawsze były tak oczywiste, jak się to może wydawać. Podobnie jeszcze do niedawna świadomość obowiązywania zasady zachowania energii nie była w pełni jasna, tak jak obecnie nie jest w pełni jasne to, czy obowiązuje zasada zachowania informacji. Historycznie jedną z pierwszych zasad zachowania, które udało się zrozumieć w fizyce, była zasada zachowania pędu. Konieczność jej obowiązywania wynikała wprost z definicji pojęcia siły wprowadzonej przez Newtona. Z definicji siła miała odzwierciedlać to, jak zmienia się pęd pewnego układu (jednego obiektu bądź też wielu ciał) wraz z czasem. Oznacza to, że jeżeli jesteśmy w stanie zapewnić, że zewnętrzna siła działająca na cały układ będzie dokładnie równa zero, to zmiana pędu tego układu również będzie zerowa. Innymi słowy, pęd będzie stały. Weryfikacja takiego przypuszczenia jest całkiem prosta. Wystarczy sprawdzić, co dzieje się z ciałem, ewentualnie z wieloma ciałami, kiedy nie działają na nie żadne siły. Czyż faktycznie w naszym życiu codziennym nie obserwujemy, jak raz poruszony przedmiot porusza się cały czas z tą samą prędkością, nie zmieniając swojego pędu? Otóż właśnie nie. W rzeczywistości materialnej istnieją siły tarcia, których praktycznie nie da się w pełni wyeliminować. Dopiero wykonując serię eksperymentów na specjalnie skonstruowanym stole ograniczającym wpływ tarcia na ruch, możemy potwierdzić słuszność wyprowadzonej zasady zachowania pędu.

Bardzo podobnie rzecz miała się z zasadą zachowania energii, której obowiązywanie jeszcze dłużej pozostawało ukryte przed ludzką świadomością. Początkowo jedyną znaną formą energii była energia mechaniczna, tzn. związana bezpośrednio z ruchem (energia kinetyczna) bądź też zależna od położenia ciała (energia potencjalna), która dopiero potencjalnie w pewnych sytuacjach mogła skutkować ruchem; stąd też jej nazwa.

Chcąc zbadać zasadę zachowania energii, moglibyśmy rozpocząć od sprawdzenia, jak jeden rodzaj energii zmienia się w inny. Ciało podrzucone do góry wlatuje, a im wyżej się znajdzie, tym mniejsza jest jego prędkość. Ciało upuszczone spada, nabierając coraz większej prędkości wraz z przebytą drogą. Te i inne proste eksperymenty mogą uzmysłowić nam, że faktycznie coś jest na rzeczy z zasadą zachowania energii mechanicznej. Co jednak w sytuacji, w której ze stołu zrzucimy kubek z herbatą i poczekamy, aż roztrzaskany wylądnie na podłodze? Początkowo kubek miał jedynie energię potencjalną związaną z tym, że został umieszczony na blacie stołu znajdującym się na pewnej wysokości nad poziomem podłogi. W czasie lotu kubek obniżał swoją wysokość względem podłogi, rozpędzając się. Jego energia potencjalna zmieniała się w energię kinetyczną. Co jednak stało się w chwili kontaktu z podłogą? Kubek roztrzaskał się na małe fragmenty, a herbata rozlała się po całej podłodze. Gdzie podziła się cała energia kinetyczna zgromadzona w kubku? Na pierwszy rzut oka może wydawać się, że zasada zachowania energii przestała obowiązywać.

Z podobnymi problemami interpretacyjnymi borykali się ludzie żyjący kilkaset lat temu. W międzyczasie liczne doświadczenia zdawały się sugerować, że na przykład w wyniku tarcia część energii dostarczonej układowi w postaci pracy może przekształcić się w ciepło. Przykładem, który odegrał pewną historyczną rolę w fizyce, był proces wiercenia armat, który zrewolucjonizował pola bitew w XVIII wieku. Armata przygotowana zgodnie z tzw. systemem Gribeauvala była odlewana w całości pełna, a dopiero później starannie wiercono przewód w jej lufie, aby zapewnić wysoką jakość i precyzję wykonania. Zapewne niejeden pracownik zaangażowany w produkcję tego typu armat zauważył, że produkowane w takim procesie metalowe opilki bardzo się rozgrzewają. Praca wykonana w czasie obracania wiertła mogła pośrednio doprowadzić nawet do wrzenia wody, do której zostały wrzucone skrawki metalu. Liczne prace dające początek współczesnej termodynamice pozwoliły ostatecznie ustalić istnienie kolejnej formy energii, którą to nazwano ciepłem. Początkowo jej istnienie (błędnie) utożsamiano z pewnego rodzaju substancją będącą jej przekazywaczem. Liczne fałszywe tropy zaowocowały takimi egzotycznie brzmiącymi teoriami jak teoria ciepłika czy flogistonu.

Bez wątplenia najważniejszy okazał się jednak fakt, że ludzie utwierdzili się w przekonaniu, iż raz powstała energia nie ginie, tylko zmienia swoją formę. Nawet odkrycie tak zwanego ciepła utajonego związanego z przemianami pomiędzy różnymi fazami skupienia

nie doprowadziły ich do wątplenia. Współcześni fizycy zrozumieli, że energia może być przekazywana wewnętrznym składnikom materii, co może skutkować zmianą stanu skupienia, na przykład z lodu w wodę. Kolejnym krokiem milowym pozwalającym zrozumieć istotę zasady zachowania energii było opublikowanie przez Einsteina jego słynnej teorii względności. Uczony pokazał, że energia kinetyczna, jaką znamy z fizyki Newtonowskiej, jest tylko drobną częścią energii, jaką obdarzone jest każde ciało posiadające masę. Okazało się, że energia i pęd ciała stanowią jedną nierozdzielalną całość, a zasada zachowania pędu, jak i energii, jest tak naprawdę tylko częścią tak zwanej zasady zachowania czteropędu. Ponadto teoria Einsteina pokazała, że nawet spoczywające ciało ma energię, którą można wykorzystać. Tak narodził się słynny wzór, z którego wynika między innymi olbrzymia śmiercionośność broni atomowej. W wyniku reakcji jądrowej uwalniana jest energia zależąca od tego, jaka masa substancji promieniotwórczej uległa rozpadowi. Wyposażeni w wiedzę z pogranicza historii i fizyki możemy w pełni zrozumieć, jak ważną rolę odgrywają zasady zachowania w nauce. Kolejne odkrycia pokazują, jak coś, co początkowo wymykało się rozumieniu uczonych, wkrótce ujawnia nowe, niezbadane dotychczas rejony nauki. W pewnym sensie współczesna fizyka znajduje się obecnie w podobnej fazie rozwoju co mechanika tuż przed wyjaśnieniem praw termodynamiki stojących za przemianami ciepła. Panuje powszechna wręcz zgoda co do ogólnej słuszności zasady zachowania informacji w świecie przyrody. Wszystkie potwierdzalne eksperymentalnie teorie sugerują jej prawdziwość. Jest jednak jedna kwestia, która wymyka się naszemu rozumieniu w związku z zasadą zachowania informacji. Tym, co stanowi ten twardy orzech do zgryzienia dla współczesnej fizyki teoretycznej, jest przedziwne zachowanie czarnych dziur.

Zanim jednak będziemy w stanie dokładnie zrozumieć, w czym tkwi problem, musimy włożyć nieco wysiłku w zrozumienie tego, czym są same czarne dziury i z czego wynika ich niecodzienne zachowanie.

Zacznijmy od bardzo prostego eksperymentu myślowego. Wyobraźmy sobie raketę startującą z powierzchni planety. Aby mogła ona zupełnie opuścić glob i odlecieć dowolnie daleko, musimy nadać jej odpowiednio dużą prędkość początkową, tym większą, im większa jest siła przyciągania grawitacyjnego. Minimalna prędkość pozwalająca opuścić jakiś obiekt astronomiczny to tzw. *prędkość ucieczki*, która w skrajnym wypadku, dla odpowiednio ciężkiej planety może przekroczyć nawet prędkość światła. Teoria względności uczy nas, że aby rozpędzić jakąkolwiek raketę do prędkości większej od prędkości światła, potrzebowalibyśmy nieskończenie dużo energii, a to jest niemożliwe. Bazując na tak prostym rozumowaniu, możemy przypuszczać, że jeżeli tylko jakiś obiekt astronomiczny będzie wystarczająco masywny, to nic nie będzie mogło opuścić jego powierzchni. Nawet światło okaże się zbyt wolne, ponieważ wymagana prędkość ucieczki będzie jeszcze większa niż prędkość światła.

Eksperyment myślowy Alberta Einsteina ilustrujący, jak grawitacja oddziałuje na światło, wygląda następująco. Wyobraźmy sobie windę. Każdy z nas zna to uczucie, kiedy winda rusza, jadąc do góry, a my czujemy, jak niewidzialna siła wgniata nas w podłogę. Z kolei kiedy winda rozpoczyna ruch w dół, czujemy, jakbyśmy lekko odrywali się od podłogi. Zdaniem twórcy teorii względności te dwa zjawiska są bardzo podobne do działania grawitacji. W pewnym przybliżeniu nie da się wręcz odróżnić grawitacji od ruchu z przyspieszeniem. W fizyce jest to znane pod nazwą *zasady równoważności*. Mając to na uwadze, wyobraźmy sobie promień światła wpadający poziomo do jadącej w górę windy. Zgodnie z naszą wiedzą na temat światła, promień ten będzie poruszał się po linii prostej względem szybu windy. Pamiętajmy jednak, że światło porusza się z pewną skończoną, acz bardzo dużą prędkością, i z perspektywy pasażera windy sytuacja nie będzie już taka prosta. Zwróćmy uwagę na to, co będzie mógł zaobserwować pasażer omawianej windy. W czasie, w którym światło będzie pokonywać szerokość szybu, winda zdąży się trochę przesunąć do góry. Jeżeli udałooby się nam zanotować wysokość, na jakiej znajdowało się światło na początku swego lotu przez windę, to okazałoby się, że wysokość, na jakiej wyleciało ono z windy, byłaby nieznacznie mniejsza ze względu na ruch samej windy. Gdyby winda poruszała się z jednostajną prędkością, to ostatecznie z perspektywy pasażera windy tor światła w windzie nadal pozostałby linią prostą, tyle że skierowaną nieco do dołu względem początkowego poziomu. W skrajnej sytuacji możemy nawet wyobrazić sobie scenariusz, w którym światło wpada do windy, aby następnie uderzyć w podłogę. Co więcej, jeśli winda poruszała się ruchem przyspieszonym, to trajektoria światła przestałaby być liniowa, a swym kształtem zaczęłaby przypominać parabolę. Mając na uwadze zasadę równoważności, ten prosty eksperyment myślowy pokazuje nam, że światło podlega grawitacji jak każdy inny obiekt. Może nawet zostać uwięzione przez silne źródło grawitacji, czyli czarną dziurę. O dowodach na istnienie czarnych dziur, za które przyznano Nagrodę Nobla w 2020 roku, pisaliśmy w Δ_{20}^{12} .

O promieniowaniu Hawkinga pisał w Δ_{18}^5 Sebastian J. Szybka.

Hipoteza zaproponowana przez Gerardusa 't Hoofta i Leonarda Susskinda zakłada, że cała informacja na temat trójwymiarowego ciała lub całego rejonu przestrzeni zawarta jest na powierzchni otaczającej to ciało bądź też region przestrzeni. Zgodnie z tą hipotezą cała informacja na temat czarnej dziury i wszystkiego tego, co do niej wpadło, zawarta jest na powierzchni samej czarnej dziury. Posługując się naszym przykładem rękopisu, moglibyśmy powiedzieć, że pomimo tego, że wpadł on do czarnej dziury, to jego obraz i wszystkie informacje o nim wciąż tkwią „namalowane” na powierzchni horyzontu zdarzeń i wystarczająco docieklivi detektyw wciąż mógłby je

Oczywiście tego typu prosty argument nie udowadnia w żaden sposób, że podobny obiekt faktycznie istnieje, ani nawet tego, że faktycznie światło podlega takim samym prawom grawitacji, jak każdy inny obiekt w przyrodzie. Aby móc wyjaśnić, co dzieje się ze światłem w pobliżu źródła grawitacji, musielibyśmy odwołać się do kolejnej ważnej teorii Alberta Einsteina, tak zwanej ogólnej teorii względności. By przekonać się, że także światło może podlegać wpływowi grawitacji, możemy posłużyć się zaproponowanym przez samego twórcę teorii prostym eksperymentem myślowym, który przytaczamy na marginesie.

Rozumiemy już, czym jest czarna dziura. Jak jednak powiązać ją z zasadą zachowania informacji? Wyobraźmy sobie naszego detektywa badającego sprawę zaginionego rękopisu. Poprzednio ustaliliśmy, że badając ślady pozostałe po napisaniu rękopisu, można będzie ustalić jego pierwotne brzmienie. Wyobraźmy sobie jednak, że cały rękopis wraz z biurkiem i innymi materialnymi dowodami powstania dzieła trafił jakimś cudem do wnętrza czarnej dziury. Zgodnie z tym, co udało się nam wydedukować na temat natury czarnych dziur, odtąd żaden sygnał, żadna informacja na temat rękopisu nie opuści już jej wnętrza. Wygląda na to, że w takiej sytuacji nawet najlepszy detektyw nie zdoła ustalić brzmienia rękopisu. Cała informacja wysłana do czarnej dziury przepada w jej wnętrzu. W tym momencie Docieklivi Czytelnik może zaprotestować, zwracając uwagę na to, że wciąż możliwe jest wysłanie ekspedycji ratunkowej do wnętrza czarnej dziury. Możliwe, że taka ekspedycja już nigdy nie wróci na Ziemię, ale treść rękopisu uda się jej ustalić. Faktycznie istnieje taka hipotetyczna możliwość. Okazuje się jednak, że świat fizyczny jest jeszcze ciekawszy i bardziej niesamowity.

Zgodnie z teorią z pogranicza mechaniki kwantowej i teorii względności czarne dziury nie są jednak tak do końca czarne. Okazuje się, że promieniują one promieniowaniem termicznym, tzn. świecą tak jak każdy rozgrzany obiekt, tylko że temperatura, którą można im przypisać, jest bardzo mała. To promieniowanie, nazywane promieniowaniem Hawkinga, może z czasem doprowadzić do wyparowania całej czarnej dziury. Oznacza to, że czarna dziura może zniknąć, a w jej miejsce pojawi się promieniowanie termiczne tak samo chaotyczne, jak to wydobywające się z rozgrzanej powierzchni Słońca. Promieniowanie wydobywające się z parującej czarnej dziury nie zależy zupełnie od tego, co zostało do niej wrzucone. Zależy jedynie od całkowitej masy zgromadzonej w jej wnętrzu. Wracając do naszego rękopisu – oznacza to, że jeśli tylko zaczekamy wystarczająco długo, to nie będzie nawet gdzie wysłać ekspedycji ratunkowej i cała wiedza na temat rękopisu przepadnie na wieki.

Fakt znikania informacji po wpadnięciu do wnętrza czarnej dziury nazywamy *paradoksem informacyjnym*, ponieważ wygląda na to, że informacja, mająca być kolejną wielkością zachowaną w fizyce, ginie bezpowrotnie po przekroczeniu granicy horyzontu zdarzeń czarnej dziury. Odkąd po raz pierwszy zauważono istnienie tego swoistego paradoksu dotyczącego znikającej informacji, fizycy nie raz starali się podać jakieś alternatywne rozumowanie ratujące zasadę zachowania informacji. Jednym z postulowanych wyjaśnień mających rozwiązać problem paradoksu informacyjnego jest tzw. zasada holograficzna.

W ten sposób wydaje się, że można rozwiązać ten problematyczny paradoks, a także ocalić prawo zachowania informacji, jednak w świecie nauki nie ma co do tego pełnej zgody. Przez ostatnie 50 lat nie udało się wcale przekonujący sposób rozwiązać tego ważnego problemu. Nie wszyscy fizycy są skłonni zaakceptować prawdziwość zasady holograficznej. Istnieją także inne, bardziej egzotyczne rozwiązania tego paradoksu, jednak żadne z nich nie zyskało pełnego uznania. Być może musimy jeszcze trochę poczekać na nowe dane eksperymentalne, które rzuciłyby odrobinę światła na problem zasady zachowania informacji.