

# GALILEUSZ W KRAINIE CZARÓW

Okazuje się, że świat po drugiej stronie lustra z opowieści Lewisa Carrolla o Alicji istnieje naprawdę – odkryli go i opisali fizycy. Jak do niego trafić?



**mgr Maciej Kolanowski**

Urodził się w Poznaniu, skończył studia i pracuje nad doktoratem z fizyki teoretycznej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W pracy zajmuje się badaniem czarnych dziur na wszystkie możliwe sposoby, które próbuje stosować w innych dziedzinach nauki.  
maciej.kolanowski@fuw.edu.pl

**Maciej Kolanowski**

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Zapewne każdej osobie czytającej te słowa zdarzyło się jechać autobusem. Wyobraźmy sobie jednak ciut mniej codzienny eksperyment: nudząc się na przystanku, synchronizujemy dwa zegarki, jeden zostawiamy na ławce, z drugim wskakujemy do pojazdu, jedziemy aż do końca trasy i z powrotem, a na końcu porównujemy wskazania obu urządzeń. Nie będzie dla nikogo niespodzianką, jeżeli powiem, że odczytamy tę samą godzinę. Tego typu obserwacje (choć wyrażone w inny sposób) stoją za transformacją Galileusza. Można ją wyrazić prostymi słowami tak: jeśli się poruszamy (względem kogoś), to zmienia się nasze położenie względem tej osoby (jest zatem względne), ale czas płynie i dla nas, i dla tej drugiej osoby tak samo (jest bezwzględny).

## Teoria względności


Ta bardzo intuicyjna zasada obowiązywała przez stulecia w fizyce – przestrzeń traktowano jako coś niezależnego od obserwatora, ale czas miał już charakter bezwzględny. Paradygmat ten postawił na głowie Albert Einstein, który w 1905 roku zaproponował szczególną teorię względności. Miejsce rozdzielonych czasu i przestrzeni zajął jeden obiekt – czasoprzestrzeń. W ramach teorii względności czas i przestrzeń trak-

tujemy równoważnie, a zatem skoro w ruchu zmienia się położenie, to i czas musi płynąć inaczej. Jest to tzw. dylatacja (czyli wydłużenie) czasu – okazuje się, że zegarki w ruchu bieżą wolniej, a zatem zegarek z autobusu powinien wskazywać wcześniejszą porę. Stajemy tu wobec oczywistej sprzeczności z wynikiem dopiero co przeprowadzonego (myślowo) eksperymentu: obiecałem przecież, że odczytamy tę samą godzinę. Musimy jednak pamiętać, że każde urządzenie pomiarowe ma pewną skończoną dokładność. Jeżeli zatem różnice w upływie czasu są bardzo małe, to nie wykryjemy ich za pomocą zegarka w telefonie. Okazuje się, że tak się w istocie dzieje – pewną charakterystyczną skalą, jak duże są efekty relatywistyczne, jest stosunek prędkości (w tym wypadku autobusu) do prędkości światła w próżni (która wynosi dokładnie 299 792 458 m/s). Najszybszy pociąg na świecie rozwija prędkość około 167 m/s. Choć jest to wielki triumf ludzkiej techniki, to w porównaniu do światła mówimy o tempie ślimaczym! Nawet w takim pojeździe efekty relatywistyczne będą niezwykle małe (aczkolwiek różne do zera, więc możliwe do pomierzenia. Wystarczy „tylko”, byśmy zbudowali wystarczająco dokładne zegary).

Einsteinowska relatywistyka, która już dawno obchodziła chlubny jubileusz stulecia, wciąż jest teorią obowiązującą. Każdy kolejny eksperyment (przeprowadzony np. za pomocą cząstek elementarnych) i każda kolejna obserwacja (np. gdy wsłuchujemy się w fale grawitacyjne z odległych gwiazd) niezmiennie ją potwierdzają.

Choć teoria względności może wydawać się dość mocno oderwana od codziennej rzeczywistości (mówimy wszak o absurdalnie wielkich prędkościach),





Widoczny tutaj cień czarnej dziury jest najbliższy obrazowi samej czarnej dziury, całkowicie ciemnego obiektu, z którego światło nie może uciec. Granica czarnej dziury – horyzont zdarzeń, od którego EHT bierze swoją nazwę – jest około 2,5 razy mniejsza niż rzucany przez nią cień i mierzy prawie 40 mld km średnicy. Choć może to wydawać się dużo, ten pierścień ma tylko około 40 mikrosekund kątowych – co odpowiada pomiarowi długości karty kredytowej na powierzchni Księżyca.

Źródło:  
<https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>

to po cichutku przemyka ona do różnych sfer naszego życia. Elektronów w miedzi (czyli po prostu prąd w druciku) poruszają się z prędkością 0,15 mm/s. Mimo to ich powolne pełzanie połączone z efektami relatywistycznymi prowadzi do oddziaływania materii z magnesami – a to coś, co bardzo łatwo poczuć. Powodem, dla którego niewielkie prędkości dają tak olbrzymi efekt, jest ogromna (rzędu  $10^{23}$  na centymetr sześcienny) liczba elektronów swobodnych w przewodzie i fakt, że ich wkłady do oddziaływań elektromagnetycznych się dodają.

To nie wszystko. Teoria względności (zarówno w swojej szczególnej formie z 1905 roku, jak i jej ogólna wersja z 1915 roku) stanowi niezbędny element funkcjonowania systemu GPS. Gdyby naiwnie stosować reguły dynamiki galileuszowsko-newtonowskiej, po zaledwie kwadransie satelita by nas „zgubił” i nie mógłby podpowiedzieć, w którą stronę skręcić. To fantastyczny przykład na to, jak „czysto akademickie” i „niepraktyczne” rozważania mogą stać się w kilka dekad jedną z podstaw współczesnego świata.

## Prześcignąć światło

Pierwszy test, któremu poddajemy każdą nową teorię w fizyce, to zasada korespondencji. Jak wyjaśnić nasze codzienne doświadczenia z autobusami i zegarkami (i wszystkie inne wielowiekowe obserwacje) w języku teorii Einsteina? Kluczowym elementem jest już wspomniana prędkość światła. Gdy rozważamy tylko obiekty znacznie wolniejsze (czyli formalnie rzecz ujmując: prędkość światła dąży do nieskończoności), odzyskujemy klasyczną fizykę, którą znamy i kocha-

my. Chciałbym zaproponować teraz pewien eksperyment myślowy: co, jeśli prędkość światła nie byłaby bardzo duża, ale wprost przeciwnie – bardzo mała i każdy autobus byłby od światła szybszy? Zapewne propozycja moja wzbudza (uzasadniony!) sprzeciw: jak mantrę zawsze się powtarza, że nic nie może poruszać się szybciej od światła.

Tu miejsce na krótką dygresję, ponieważ ten slogan jest beczelnie fałszywy. Po pierwsze, jeżeli wpuszczimy światło do wody, to znacznie ono zwolni i nie stoi na przeszkodzie, by np. naładowane cząstki je wyprzedzały. W ten sposób powstaje promieniowanie Czerenkowa. Musimy zatem uzupełnić ten slogan: nic nie może poruszać się szybciej od światła w próżni. Po drugie, zależy od tego, co rozumiemy przez „coś” lub „nic”. Dość łatwo skonstruować obiekty poruszające się szybciej od światła (pozostawiamy to jako zadanie do wykonania samodzielnie przez czytelnika lub czytelniczkę. Podpowiedź: wystarczy do tego latarka i odległa ściana), które jednak nie niosą z sobą żadnej informacji. Jedynie wtedy, gdy w ruchu przenosimy informację, pojawia się relatywistyczne ograniczenie.

Po tej dygresji chciałbym wyraźnie zaznaczyć, że nie chodzi mi o którykolwiek z powyższych wyjątków. Chwilowo odrzucam więzy obserwowalnej rzeczywistości i oddaję się matematycznej ciekawości. Jak zobaczymy, doprowadzi ona nas z powrotem do naszego ulubionego Wszechświata. Bez wchodzenia w algebraiczne szczegóły otrzymujemy w tej granicy prawa fizyki dokładnie przeciwne do tych znanych Galileuszowi. Absolutny czas zostaje zastąpiony przez czas względny (każdy zegar chodzi inaczej!),





Ilustracja autorstwa  
 Johna Tenniela  
 do angielskiego wydania  
 książki Lewisa Carrolla  
*Alicja po drugiej stronie lustra*  
 (1871)

ale za to przestrzeń jest absolutna – mamy prędkość, ale się nie przemieszczamy. Jako pierwszy możliwość taką rozważył Lewis Carroll:

– Cóż, w naszym kraju – powiedziała wciąż jeszcze zdyszana Alicja – zwykle jest się w innym miejscu... jeżeli biegło się tak szybko i tak długo, jak my biegliśmy.

– Musi to być powolny kraj! – powiedziała Królowa. – Bo tu, jak widzisz, trzeba biec tak szybko, jak się potrafi, żeby zostać w tym samym miejscu. Jeżeli chce się znaleźć w innym miejscu, trzeba biec co najmniej dwa razy szybciej!

Lewis Carroll,  
*Alicja w Krainie Czarów*  
 (tłum. M. Słomczyński)

## Horyzont zdarzeń

Odkrywcą tej struktury, francuski matematyk Jean-Marc Lévy-Leblond, nazwał ją geometrią Carrolla, właśnie na cześć autora *Alicji*... (zresztą też matematyka). Jest to istotnie świat pełen dziwów, w którym odcinki czasu mogą się drastycznie skracać i wydłużać, choć stoimy wszyscy w miejscu. Jest to tym dziwniejsze, że takie miejsca, jakby po drugiej stronie lustra, istnieją naprawdę. Jednym z nich, pewnie najciekawszym, są czarne dziury. Czarna dziura to obszar o tak potężnej grawitacji, że nic, nawet najszybsze w świecie światło, nie może go opuścić. Granicę czarnej dziury stanowi horyzont zdarzeń. Temat ten

fascynuje nas od dekad, fizycy poświęcili mnóstwo czasu na zrozumienie struktury, dynamiki czy zasad powstawania horyzontów. Teraz już wiemy – zarówno na podstawie teoretycznych rozważań, jak i obserwacji – że czarne dziury istnieją naprawdę (odkrycia te nagrodzono Nagrodą Nobla w 2020 roku). Dzięki wyłożonej pracy astronomów mamy teraz nawet zdjęcia czarnych dziur! Udało się, opuściliśmy fantastykę i rozmawiamy o twardych faktach. Zaledwie przed kilku laty zrozumieliśmy, że horyzont czarnej dziury to dokładnie geometria Carrolla! Skomplikowane równania ogólnej teorii względności, opisujące zmiany, którym podlega horyzont zdarzeń, to w gruncie rzeczy fundamentalne prawa przyrody w świecie z absolutną przestrzenią. Czy oznacza to, że Alicja trafiła do środka czarnej dziury, a wewnątrz Sagittariusu A\* możemy spotkać Szalonego Kapelusznika? Raczej nie, ale wypada złożyć ukłon przed wizją XIX-wiecznych literatów i matematyków.

Innym „miejszem” wartym wzmianki jest nieskończoność czasoprzestrzeni. To rzecz jasna nie jest miejsce, ale z punktu widzenia opisu matematycznego znacznie łatwiej jest ją tak traktować. Ilekroć dokonujemy obserwacji astrofizycznej (choćby fal grawitacyjnych) i próbujemy ją zasymulować, zaczynamy od założenia, że jesteśmy bardzo daleko od źródła. Wtedy cała maszynaria się upraszcza i możemy próbować coś faktycznie przewidzieć. Okazuje się, że tak rozumiana nieskończoność – w żargonie relatywistów nazywana *scri* (czyt. skraj) – też jest geometrią Carrolla. Te dwa przykłady nie są z sobą niepowiązane. Mniej niż rok temu uświadomiliśmy sobie, że struktury opisujące horyzont i *scri* są prawie takie same. Nie jest to jedynie matematyczna obserwacja – stanowi ona punkt wyjścia dla „tomografu czarnych dziur”. (Ambitne założenia tego programu to odczytanie dokładnej ewolucji horyzontu (który powstał np. w wyniku zderzenia dwóch czarnych dziur) na podstawie fal grawitacyjnych, które w tym czasie zostały wyemitowane. Najbliższe lata pokażą, jak blisko jesteśmy zrealizowania tych planów.

Mam nadzieję, że udało mi się (z konieczności – pobieżnie!) opisać ewolucję teorii względności. Kiedyś zajmowała się ona hipotetycznie wielkimi prędkościami, a dziś znajduje zastosowanie w prawie każdym samochodzie. Czarne dziury uważano najpierw za matematyczne artefakty (czyli brzydko mówiąc: błędy i niedociągnięcia) relatywistyki, a dziś możemy ich słuchać, oglądać ich zdjęcia, a nawet filmiki wideo z nimi. Rozwój coraz to doskonalszych narzędzi obserwacyjnych idzie w parze z odkrywaniem nowych struktur matematycznych, które pozwalają nam lepiej zrozumieć te fascynujące obiekty, a filmiki z nimi – interpretować. Nie jestem pewny, jaki będzie rezultat naszych dociekań, ale wiem, że przyszłość fizyki czarnych dziur małuje się w niezwykle ciekawych barwach. ■

Chcesz wiedzieć  
 więcej?

Penrose R.,  
*Droga do rzeczywistości.*  
*Wyczerpujący przewodnik*  
*po prawach rządzących*  
*Wszechświatem,*  
 Warszawa 2020.

Dyson F., *Missed opportunities,*  
 „Bulletin of the American  
 Mathematical Society” 5/1972,  
 vol. 78 (dostępny online  
 na ams.org).