

**TYGODNIK
POWSZECHNY**

Nr 13/2018

**WIELKIE
PYTANIA 9**



**Copernicus
Center**

**PRZEŁOMY
W FIZYCE**

J. Newton



03 Fizyka wyprowadzona w pole
TOMASZ MILLER
Zmiercz cząstek i triumf pól

07 Wielkie odpowiedzi na małe pytania
SEBASTIAN SZYBKA
O drobnym problemie z trzema ciałami

10 W cieniu bomby
INFOGRAFIKA
Wędrowni w czasie i przestrzeni twórców bomby jądrowej

12 Ciemny sektor kosmosu
TOMASZ PŁAZAK
Jak zmierzyć naszą niewiedzę o wszechświecie?

16 Historia pewnej nierówności
MICHAŁ ECKSTEIN, PAWEŁ HORODECKI
Upiorne oddziaływanie na odległość

20 Urwana trajektoria
ŁUKASZ ŁAMŻA
Żegnamy Stephena Hawkinga

21 Obce globy
ROZMOWA Z NIGELEM MASONEM
O nowym życiu kosmosu

24 Jako w niebie, tak na papierze
ŁUKASZ ŁAMŻA
Między młotem teorii a kowadłem obserwacji

Redakcja: Łukasz Kwiatek, Łukasz Lamża
Projekt graficzny: Marek Zalejski
Fotoedycja: Edward Augustyn
Infografiki: Lech Mazurczyk

Skład: Andrzej Leśniak
Okładka: Marek Zalejski
ILUSTRACJE: GL ARCHIVE / ALAMY STOCK PHOTO // PIXABAY
Współwydawca: Fundacja Centrum Kopernika



TO JUŻ TRZECI DODATEK O WIELKICH PRZEŁOMACH w nauce. Po biologii i chemii czas na fizykę. Osoby wciąż wzdrgające się na wspomnienie chwil spędzonych pod zakurzoną od kredy tablicą chcemy uspokoić. Choć nauki tej nie da się uprawiać bez zmiennych, parametrów i równań – słowo harcerza, naprawdę się nie da! – kryje się za nimi całkiem namacalna, otaczająca nas rzeczywistość. I to jaka!

Dziś mówimy o momentach w historii, kiedy nasze rozumienie świata uległo fundamentalnej przemianie. Opisuujemy stopniowe oddalanie się naukowców od swojskiego pojęcia materii oraz jej porcji – cząstek – i migrację ku trudniej uchwytnym polom, a także odkrycie kryjącej się nawet w najprostszyc

uchdach nieprzewidywalności oraz zupełnie nowego rodzaju powiązania pomiędzy cząstkami: splątania kwantowego. Mówimy też o problemie „ciemnego sektora”, który uświadamia nam, jak niewiele wiemy o wszechświecie jako takim, oraz odkryciu planet pozasłonecznych, a więc morza wypełniających kosmos światów.

Krótko mówiąc, wielkie przełomy w fizyce to przewroty w naszym rozumieniu podstawowych własności świata. A jest on dziwniejszy od najdziwniejszych snów Salvadora Dalego i Yves’a Tanguya oraz bardziej tajemniczy niż wszystkie opowiadania Jorge Luisa Borgesa razem wzięte. Czytajmy więc i dziwu

„Wielkie Pytania: cz. II: Przełomy w nauce”

– zadanie realizowane przez Fundację Centrum Kopernika, finansowane w ramach umowy 538/P-DUN/2017 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.



Fizyka wyprowadzona w pole

TOMASZ MILLER

Mylą się ci, którzy zarzucają fizykom materializm. Wielowiekowy rozwój nauki uświadomił nam, że obok materii fundamentalnym składnikiem wszechświata są przenikające go niematerialne pola.

DLA PORZĄDKU PRZYPOMNIJMY ogólną definicję: polem fizycznym nazywamy przestrzenny rozkład pewnej wielkości. Pojęcie to można stosować do wielu fizycznych parametrów – pomyślmy choćby o mapie pogodowej, przedstawiającej temperaturę w kraju (każdemu punktowi na mapie przypisana jest liczba stopni Celsjusza) albo prędkość wiatru (w każdym punkcie zaczepiona jest strzałka, a ściślej – wektor, który mówi, skąd i jak mocno wieje).

Znaczenie ciekawszymi przykładami są pola grawitacyjne i elektromagnetyczne.

O ile bowiem pola temperatury i prędkości wiatru stanowią tylko wygodny matematyczny opis zachowania ogromnej liczby atomów powietrza, o tyle grawitacja i elektromagnetyzm okazują się mieć naturę fundamentalnie polową. Stopniowe uświadamianie sobie tego faktu przez uczonych ściśle spletało się z historycznym rozwojem fizyki.

Zabrania się oddziaływać zdalnie!

Gdyby w historii filozofii przyrody próbować wskazać jedną zasadę, co do której od Arystotelesa do Kartezjusza panowała wśród uczonych niemal powszechna

zgoda, byłby to zakaz bezpośredniego oddziaływania ciał na odległość. „Ciało po prostu nie może oddziaływać tam, gdzie go nie ma” – podsumowywał to prawo przyrody filozof i historyk nauki Ernan McMullin. Od tej zdroworozsądkowej reguły zdawały się jednak istnieć wyjątki, z którymi uczeni radzili sobie przez wieki na różne pomysłowe sposoby. Kamienie i jabłka spadają na ziemię? To dlatego, że dążą do swojego naturalnego położenia (Arystoteles). Pływy wydają się podążać za Księżycem? To dlatego, że Księżyc dzieli z oceanem „wodną naturę” (Abu Maszar), jego światło

BRIAN SNYDER / REUTERS

→ zagęszcza i rozrzedza wodę (Robert Grosse-teste), albo wręcz za pływy wcale nie odpowiada Księżyc, tylko ruch dobowy i orbitalny Ziemi (Galileusz).

Nieco więcej kłopotów sprawiały tajemnicze kamienie znajdujące m.in. w greckiej Magnezji (choć znane również w starożytnych Chinach, Indiach i Meksyku), potrafiące przyciągać drobne żelazne przedmioty z pewnej odległości, a także bursztyn, zwany przez Hellenów „elektronem”, który po potarciu wełną przyciąga źdźbła słomy, sukno i pyłki kurzu. Tales z Miletu widział w zachowaniu tych kamieni dowód na posiadanie przez nie duszy. Empedokles, a za nim Platon, Plutarch oraz greccy atomiści spekulowali, iż wydzielają one swoiste „wyziewy” (*effluvia*), które wywiewają pobliskie powietrze i w tak powstałą próżnię wciągają drobne obiekty. Jakkolwiek dziwaczne mogą się wydawać z dzisiejszej perspektywy, takie „wyziewowe” wyjaśnienia zjawisk elektrycznych (jak zaczęto je nazywać po odkryciu podobnych właściwości u innych niż bursztyn substancji) funkcjonowały aż do XVII w. W przypadku magnesów przestały one jednak wystarczać znacznie wcześniej – gdy pod koniec XII w. do Europy dotarł (prawdopodobnie z Chin) genialny wynalazek: kompas.

Jak to możliwe, że magnes, gdy pozwolić mu się swobodnie obracać, nieomylnie wskaże kierunek północ-południe? Z czym on właściwie wówczas oddziałuje? Wśród marynarzy od wieków krążyły legendy o „wyspach magnetycznych”, zdolnych wyrwać gwoździe z przepływających zbyt blisko statków. Czyżby największa z takich wysp znajdowała się w pobliżu bieguna? A może, jak u progu XVII w. zaproponował angielski lekarz królewski William Gilbert, cała Ziemia jest gigantycznym magnesem, którego bieguny pokrywają się z biegunami geograficznymi? Tak czy inaczej, ewidentnie mielibyśmy tu do czynienia z bezpośrednim oddziaływaniem na odległość, co byłoby niemożliwe do zaakceptowania! W swoim traktacie „O magnesie” (1600) Gilbert zaproponował więc, że każdy magnes – w tym kula ziemiska – rozciąga w swoim pobliżu „sferę mocy” (*orbis virtutis*). Każdy żelazny przedmiot umieszczony w obrębie tej sfery doznaje działania siły magnetycznej. Chociaż wprowadzenie takiej niewidzialnej „strefy wpływów” jako pośrednika oddziaływań może wydawać się sztucznym zabiegiem, to, jak

Wprowadzając prawo powszechnego ciężenia, **Newton dokonał unifikacji mechaniki** ziemskiej i niebieskiej, za jednym zamachem opisując spadające jabłka i kule armatnie, pływy oraz ruchy planet.

się okazało, przygotowało grunt pod rewolucję w ście kosmicznej skali.

Matematyczna siła

Od czasów Arystotelesa i Ptolemeusza uważano, że planety przemierzają kosmos przytwierdzone do sztywnych, koncentrycznych sfer. Nawet Kopernik nie polemizował z tym poglądem w swym słynnym traktacie, zatytułowanym jednak „O obrotach sfer niebieskich”. Wszystko zmieniło się dzięki Wielkiej Komecie 1577 roku i obserwacyjnemu kunsztowi Tycho Brahego. Drobiazgowo dane zgromadzone przez duńskiego astronoma nie tylko udowodniły ponadksiężycową proveniencję komet (dotąd uważano je raczej za zjawiska atmosferyczne), ale w dodatku wskazywały, że muszą one na swojej drodze przebiegać się przez kilka sfer niebieskich. Dla jego asystenta Johanna Keplera był to wystarczający dowód na to, że w kosmosie tak naprawdę nie ma żadnych twardych, obracających się sfer, a przyczyn obserwowanego ruchu planet trzeba szukać gdzie indziej.

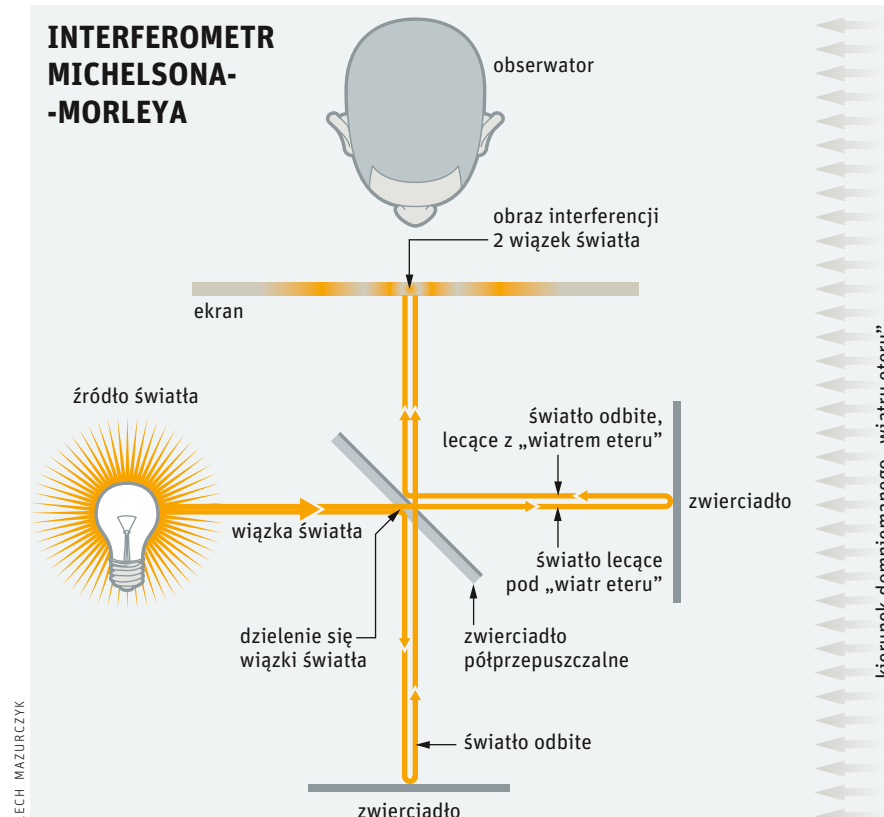
Jako gorliwy kopernikanista Kepler upatrywał źródła tego ruchu w Słońcu. Znajdąc teorię Gilberta, wysunął hipotezę, że Słońce, podobnie jak magnesy, rozciąga swego rodzaju niematerialną „strefę wpływów”. Strefa ta, obracając się wraz z naszą gwiazdą dzienną, miałaby popychać planety w ich ruchu obiegowym. Z kolei odstępstwa od kolistego kształtu orbit – to właśnie Kepler odkrył, że orbity są elipsami – miały być skutkiem naprzemiennego przyciągania i odpychania magnetycznego między planetami a Słońcem. Zauważmy, że nie ma tu jeszcze mowy o innej niż magnetyczna siła przyciągającej. Gdy Kepler zasugerował ją w swoich późniejszych pracach,

został ostro skrytykowany przez Galileusza i Kartezjusza. W upowszechniającej się właśnie „filozofii mechanicznej” nie było miejsca na takie „dziecinne absurdy” jak zdalne przyciąganie i niematerialne strefy wpływów – wszystkie oddziaływania miały pochodzić od zderzeń, naprężeń i ciśnień.

I wtedy na scenę wkroczył Izaak Newton, który wyniki i intuicje Keplera (a także Galileusza i innych) przekuł na ścisły, praktycznie kompletny zestaw praw rządzących mechaniką. Wprowadzając w „Matematycznych zasadach filozofii przyrody” (1687) słynne prawo powszechnego ciężenia, Newton dokonał oszałamiającej unifikacji mechaniki ziemskiej i niebieskiej, za jednym zamachem opisując spadające jabłka i kule armatnie, pływy oraz ruchy planet. Dostrzegł jednocześnie, że jego teoria grawitacji wyraźnie sugeruje bezpośrednie oddziaływanie na (znaczną!) odległość, i przestulowana przez niego siła ciężenia jest tylko „siłą matematyczną”; jest pewnym modelem, który ma poprawnie opisywać wyniki doświadczeń, ale nie śmie aspirować do dociekania „prawdziwych” źródeł tego zjawiska. Co do tych ostatnich, jak odpowiadał krytykom, „*hypotheses non fingo*” („nie stawiam hipotez”). Warto wszakże odnotować, że w późniejszych latach on sam i jego zwolennicy podejmowali próby mechanicznego wyjaśnienia grawitacji.

Matematyzując filozofię przyrody, twórca teorii powszechnego ciężenia przesunął akcenty w pracy fizyka. Skuteczny matematyczny model zjawiska był cenny nawet bez kompletnej filozoficznej interpretacji (choć ta wciąż uchodziła za kluczową). To z kolei nie tylko stymulowało rozwój matematyki, ale i ośmielało badaczy do stosowania w fizyce coraz bardziej abstrakcyjnych struktur matematycznych. Jeszcze w XVIII w. powstały alternatywne, wyrafinowane sformułowania Newtonowskiej mechaniki, a także samej teorii grawitacji. Okazało się, że „strefa grawitacyjnego wpływu” daje się wygodnie opisać pojedynczą funkcją zwaną „potencjałem”, pozwalającą w każdym punkcie przestrzeni obliczyć siłę, która działałaby na umieszczone w tym punkcie ciało. W myśl przytoczonej na wstępie definicji było to już pełnokrwiste pole, ale na historycznie pierwsze użycie tego terminu trzeba było poczekać kolejne pół wieku.

INTERFEROMETR MICHELSONA-MORLEYA



Eksperyment Michelsona-Morleya

ZE ŹRÓDŁA emitowana jest wiązka światła, która trafiając na zwierciadło półprzezroczyste, dzieli się na dwie wiązki biegnące w prostych kierunkach do równoodległych zwierciadeł. Odbiwszy się od nich, wiązki ponownie spotykają się w zwierciadle

półprzezroczystym, a stamtąd padają na ekran tworząc tzw. obraz interferencyjny. Ponieważ światło jest falą, dwie wiązki mogą się nawzajem wzmacniać (gdy szczyt jednej fali spotyka się ze szczytem drugiej, a dolina z doliną) lub wygaszać (gdy szczyt jednej fali spotyka się z doliną drugiej). Przy braku „wiatru eteru” rozdzielone wiązki potrzebują dokładnie tyle samo czasu na pokonanie drogi

do luster i z powrotem, dzięki czemu wzmacniają się nawzajem. Jeśli jednak jedna z wiązek nieco się spóźni wskutek znoszenia przez „wiatr eteru”, nastąpi ich zauważalne wygaszenie. Obracając detektor oraz prowadząc obserwacje o różnych porach doby, Michelson i Morley mieli nadzieję zmierzyć prędkość Ziemi względem eteru, jednak nigdy nie zaobserwowali wygaszenia się wiązek.

Epoka elektromagnetyzmu

Końcówka XVIII i pierwsza połowa XIX w. przyniosły sensacyjne odkrycia w dziedzinie elektryczności i magnetyzmu. Najpierw Charles Coulomb ustalił, że siła elektrostatyczna maleje z odległością analogicznie jak siła ciężkości, a po odkryciu Hansa Oersteda, że prąd elektryczny wychyla igły pobliskich kompasów, również tę magnetyczną siłę udało się zawrzeć w podobnie wyglądającej formule. Elektryczność i magnetyzm, przez kilkadziesiąt lat traktowane rozdzielnie, oka-

zały się tajemniczo powiązane, w dodatku za pomocą stosunkowo niewinnie wyglądających wzorów! Koniecznym było zbadać ten związek bliżej – może dzięki temu uda się wreszcie zrozumieć naturę zdalnych oddziaływań?

Nad tym zagadnieniem pracowało wielu badaczy, ale na polu doświadczeń żaden z nich nie mógł się równać z Michałem Faradayem. Ów „książę doświadczeń” nie tylko „odwrócił” eksperyment Oersteda, indukując prąd elektryczny za pomocą ruchomego magnesu,

ale wykazał też, że w pewnych warunkach silny magnes może wpływać na własności światła. Tym samym dostarczył zadziwiającej przesłanki na rzecz elektromagnetycznej natury tego ostatniego.

Faraday był wywodzącym się z biednej rodziny samoukiem i nie znał zaawansowanej matematyki, która pozwalałaby przekuć jego obserwacje i intuicje na język równań i formuł. Wykształcił za to pomysłową wizualną reprezentację tego, co dzieje się w przestrzeni otaczającej magnesy i przewody z prądem, inspirowaną zachowaniem opiłków żelaza rozsypywanych w ich pobliżu. Wyobrażał sobie mianowicie magnetyczne „linie siły” (jak je nazwał), wijące się w przestrzeni zgodnie z kierunkiem wskazywanym przez opiłki i igły kompasów. Co istotne, doszedł do wniosku, że linie te istnieją fizycznie (choć może niematerialnie), składając się na coś, co nazwał „polem magnetycznym”. Innymi słowy, według Faradaya magnesy i przewody z prądem powołują do istnienia w dookolnej przestrzeni nowy, do pewnego stopnia niezależny byt fizyczny – pole magnetyczne – i to z tym polem reagują żelazne obiekty, a także światło.

Wizja Faradaya, choć użyteczna i oparta na drobiazgowych doświadczeniach, pozostałaby może nieco bardziej wyrafinowaną wersją *orbis virtutis* Gilberta, gdyby nie dzieło Jamesa Clerka Maxwella. To on oparł wyniki i idee Faradaya na solidnych, matematycznych podstawach, tworząc elegancką, dynamiczną teorię dwóch pól: magnetycznego i elektrycznego, przy czym wiązała je ona ze sobą tak ściśle, że uzasadnione było mówienie o „polu elektromagnetycznym”. Z równań Maxwella wyłaniał się obraz pola jako czegoś na wskroś fizycznego, zdolnego przenosić pęd i energię. Okazało się dodatkowo, że zaburzenia tego pola – fale elektromagnetyczne – idealnie pasują do opisu światła.

Podówczas wiadano już doskonale (dzięki eksperymentom Thomasa Younga z początku XIX w.), że światło jest falą. Aby odpowiedzieć na pytanie, co właściwie fałuje, wskrzeszono i uwspółcześniono wysuniętą ponad dwa stulecia wcześniej (przez Christiaana Huygensa) koncepcję eteru światłonośnego. Miała to być substancja wypełniająca cały wszechświat, zachowująca się jak ciało stałe o ogromnej sztywności, równocześnie niewidzialna i praktycznie bezmasowa. Byłyby to dziwaczne właściwości, ale alternatywa w postaci Faradayowskiego niematerialnego →



ITER.ORG

Fuzja jądrowa

Od kiedy w latach 30. XX w. stało się jasne, że nasze Słońce świeci dzięki syntezie jądrowej – produkcji helu z wodoru – w umyślach naukowców na trwałe załęgała się idea oswojenia tego potężnego procesu. Łatwiej jednak powiedzieć, niż wykonać. Synteza helu osiąga przyzwoitą wydajność dopiero przy setkach milionów stopni Celsjusza, zaś wodór – a właściwie dowolny gaz – podgrzany do takich temperatur trudno utrzymać w miejscu. Słońce rozwiązuje ten problem, przygniatając go swoim potwornym polem grawitacyjnym. Co jednak mamy zrobić my, Ziemianie? Podgrzanie i opanowanie wodoru wymaga olbrzymiego nakładu energii – fizycy po prostu liczą na to, że w wyniku udanej syntezy helu zdołają otrzymać nadwyżkę energetyczną. Aktualny rekord należy do europejskiego projektu Joint European Torus (JET), który w 1997 r. w jednym z eksperymentów uzyskał bilans ok. 16 megawatów „na plus”. To niewiele więcej niż obiecujący początek. Drugim problemem jest czas, przez jaki udaje się utrzymać w ryzach ultragorącą plazmę wodorową. Dla przykładu: dwa lata temu grupa badawcza w Princeton ogłosiła (z dumą!), że ich reaktor funkcjonował prawidłowo przez... 300 milisekund – czas zbliżony do mrugnienia okiem. Trudno dziś orzec, czy dojdzie do jednego spektakularnego przełomu, czy też będziemy przez kolejne dekady zmuszeni podnosić wydajność reaktorów. Jednak ludzkość z pewnością nie zrezygnuje z prób okiełznania „mocy gwiazd”. © ŁL

→ pola dla większości fizyków zakrawała na jawną sprzeczność – niczym drgania struny bez samej struny. Nawet Maxwell do końca życia był przekonany, że jego równania elektrodynamiki w istocie opisują pewne aspekty eteru. Pole elektromagnetyczne, choć realne, jeszcze przez dalsze kilkadziesiąt lat miało być postrzegane jako fenomen zasadniczo mechaniczny.

Cisza w eterze

Unifikacja elektryczności, magnetyzmu i fenomenu światła sprawiła, że zgłębienie natury eteru stało się w drugiej połowie XIX w. zadaniem priorytetowym. Jedną z palących kwestii było zmierzenie prędkości, z jaką Ziemia przemierza eter, a także czy i w jakim stopniu „wlecze” go ze sobą niczym piechur brnący przez gęsty śnieg. W 1886 r. Abraham Michelson i Edward Morley doświadczalnie wykazali, że o żadnym „wleczeniu” eteru nie może być mowy. To z kolei oznaczało, że prędkość „wiatru eteru”, który owiewa Ziemię w jej wędrówce, można mierzyć nawet przy jej powierzchni, a zatem bez konieczności opierania się na niedokładnych obserwacjach astronomicznych.

Pomiaru tego Michelson i Morley dokonali już rok później w pomysłowym i bardzo dokładnym eksperymencie, który skończył się bodaj najsłynniejszym negatywnym rezultatem w historii nauki [zob. ramka]: żadnego „wiatru eteru” nie stwierdzono! Okazało się, że światło porusza się względem Ziemi z taką samą prędkością we wszystkich kierunkach, zupełnie jakby nasza planeta spoczywała względem eterycznego ośrodka.

Doświadczenie Michelsona-Morleya wytworzyło poważną rysę na fizyce eteru. Potrzeba było jednak dopiero geniuszu młodego szwajcarskiego urzędnika patentowego, aby uczeni ostatecznie zerwali z postrzeganiem pola elektromagnetycznego jako drgań tajemniczej substancji.

Cudowny rok Einsteina

W 1905 r. – swoim *annus mirabilis* – Albert Einstein opublikował cztery artykuły, z których trzeci nosił tytuł „O elektrodynamice ciał w ruchu”. To właśnie w nim, posługując się teorią Maxwella oraz tzw. zasadą względności głoszącą, iż równania fizyki muszą wyglądać tak samo we wszystkich (inercjalnych) układach odniesienia, Einstein wykazał, że eter światłonośny jest czymś całkowicie zbędnym. W jego teorii, wkrótce nazwanej szcze-

gólną teorią względności, pole elektromagnetyczne stało się wreszcie w pełni niezależnym bytem – równoprawnym, obok materii, składnikiem fizycznego świata.

Niebawem podobnego awansu, i to również dzięki Einsteinowi, dostąpiła grawitacja. Co ciekawe, jeszcze pod koniec XIX w. również ją próbowano sprowadzić do oddziaływań mechanicznych z eterem. W ogłoszonej w 1915 r. ogólnej teorii względności została ona jednak w elegancki sposób wyjaśniona jako skutek zakrzywienia się geometrii czasoprzestrzeni. Matematycznie geometrię tę opisuje się za pomocą obiektu matematycznego zwanego „metryką”, która stanowi swego rodzaju pole – mieści się bowiem w podanej przez nas na początku definicji (każdemu punktowi czasoprzestrzeni przypisuje ona dziesięć niezależnych liczb). Jako własność samej czasoprzestrzeni tak rozumiane pole grawitacyjne nie wymagało już rzecz jasna żadnego eterycznego nośnika.

Co więcej, Einstein podał równania rządzące zachowaniem tego pola – odpowiednik równań Maxwella dla grawitacji. Wynikało z nich między innymi, że podobnie jak w elektrodynamice, w polu tym mogą rozchodzić się zaburzenia – fale grawitacyjne. To właśnie za niedawną detekcję tych „zmarszczek czasoprzestrzeni” przyznano w ubiegłym roku Nagrodę Nobla z fizyki.

Historia koncepcji pola fizycznego nie kończy się na Einsteinie. W innej publikacji ze swojego „cudownego roku” uczony ten jako pierwszy rozważał „kwanty światła”. Zapewne nie przypuszczał wówczas, że przyczyni się tym do powstania całkowicie nowego rodzaju fizyki. Sformułowana w latach 20. XX w. mechanika kwantowa gruntownie przeobraziła (i wciąż przeobraża) nasze rozumienie świata. Nic dziwnego, że również pojęcie pola uległo pod jej wpływem głębokiej modyfikacji, tak w swojej warstwie matematycznej, jak i interpretacyjnej. Pola – już teraz kwantowe – pozwoliły opisać strukturę materii na tak głębokim poziomie, że we współczesnej fizyce sama materia stała się wobec nich czymś wtórnym. To już jednak temat na osobną opowieść. © TOMASZ MILLER

AUTOR obronił doktorat z fizyki matematycznej. Pracuje na Wydziale Matematyki i Nauk Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Członek Centrum Kopernika.



Gra w bule, Francja, lipiec 2016 r.

Wielkie odpowiedzi na małe pytania

SEBASTIAN J. SZYBKA

By doprowadzić do przełomu w fizyce, nie zawsze trzeba sięgać na krańce naszych teorii. Czasami wystarczy uważniej przyjrzeć się ich podstawom. Tak było z problemem trzech ciał.

Wyjaśnienie całej Natury to zadanie zbyt trudne dla pojedynczego człowieka, a nawet całego wieku. O wiele lepiej jest zrobić niewiele, mając pewność, że zrobiło się to poprawnie, a resztę pozostawić tym, którzy nadejdą po nas.

IZAAK NEWTON

DZISIAJ WIEMY, ŻE KAŻDA ZE znanych nam teorii fizycznych ma granice stosowności. Grawitacja w naszym najbliższym otoczeniu bardzo precyzyjnie opisywana jest przez teorię Newtona. Jeśli badamy układy o wielkich energiach

lub rozmiarach, np. takie, które często pojawiają się w astronomii, teoria Newtona przestaje wystarczać. Wtedy trzeba odwołać się do teorii Einsteina. Jest ona o wiele bardziej skomplikowana obliczeniowo, ale znacznie lepiej opisuje naturę grawitacji. Wiemy też, że istnieją obiekty i zjawiska, takie jak wnętrza czarnych dziur i kosmologiczny Wielki Wybuch, do opisu których nawet teoria Einsteina jest niewystarczająca. W tym miejscu pojawia się granica naszej wiedzy. Przypuszczamy, że przekroczenie tej granicy wymaga odkrycia teorii jeszcze bardziej doskonałej niż teoria grawitacji Einsteina, jednak obecnie takiej nie znamy. Chociaż próby jej znale-

zienia podejmowane są od stu lat, to nie mamy pewności, czy któraś z nich zmierza w dobrym kierunku.

Nie trzeba jednak sięgać tak daleko, żeby spotkać się z nieodgadnionym. W starych i dobrze przetestowanych teoriach fizycznych istnieje wiele zaskakująco prostych, a zarazem fundamentalnych pytań, na które, pomimo upływu czasami nawet setek lat, ciągle nie znamy odpowiedzi. Nic w tym dziwnego. Przecież językiem fizyki jest matematyka. Niektóre słynne zagadnienia matematyczne, jak wielkie twierdzenie Fermata czy też tzw. siedemnasty problem Hilberta, można sformułować przy użyciu →

ALAN KEITH BEASTALL / ALAMY / BEW

→ szkolnej matematyki. Ich zdefiniowanie to jednak dopiero początek – prostota języka nie oznacza, że równie łatwo będzie znaleźć rozwiązanie. W przypadku wielkiego twierdzenia Fermata trzeba było na nie czekać przez 358 lat.

Stare teorie, takie jak teorie grawitacji Newtona i Einsteina, przetrwały wiele testów. Sprawdzają się one znakomicie, oczywiście w ramach swoich granic stosowalności. Ich reguły są jasno określone i praktycznie niezmiennie. Ale znajomość reguł to nie wszystko. Fizyk, noblista, Richard Feynman porównał kiedyś poznanie Natury do nauki gry w szachy. Każde dziecko może nauczyć się zasad poruszania figurami, ale znajomość zasad to nie koniec, lecz dopiero początek zabawy. Ten arcyciekawy aspekt nauk teoretycznych jest mało doceniany przez osoby spoza nauki. Niestety, zdaniem Feynmana, ludzie zawsze pytają o to, czego fizycy nie wiedzą, a nie są zainteresowani teoriami, które fizycy poznali całkiem dobrze.

Granice wiedzy można przesuwać nie tylko poprzez odkrywanie nowych teorii fizycznych, lecz także studiując te istniejące. To pierwsze bardzo ważne zadanie jest obciążone wielkim ryzykiem: większość podejmowanych prób prowadzi donikąd. Studiując stare i dobrze potwierdzone teorie, mamy pewność, że nawet najmniejszy krok przybliży nas w dobrym kierunku: ku zrozumieniu, jak działa Natura. Historia nauki potwierdza, iż czasami mały krok i proste pytanie mogą zapoczątkować nieoczekiwaną rewolucję. Jedną z takich historii zaczyna się od Newtona.

Grawitacja

Dzieło „*Philosophiæ naturalis principia mathematica*”, w którym Newton zawarł swoją teorię, zostało opublikowane w 1687 r. Prawa Newtona zostały sformułowane dla bardzo prostych układów fizycznych: ciał tak małych, że w praktyce można uważać je za tzw. masy punktowe. Zrozumienie bardziej realistycznych układów wymaga żmudnego studiowania konsekwencji tych praw. Jak daleko udało się nam sięgnąć po 331 latach? Dla przykładu rozważmy problem, który nurtował jeszcze samego Newtona. Jest to zagadnienie oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy trzema ciałami (np. pomiędzy Słońcem, Ziemią i Księżycem).

Jeśli przez „ciało” będziemy rozumieć realistyczny, rozciągający się w przestrzeni

Fizyka jest jak gra w szachy:

znajomość reguł to dopiero początek zabawy.

obiekt fizyczny, np. wirującą gwiazdę, to dosyć szybko popadniemy w kłopoty. Chociaż kształt wirującego ciała studiowało wiele wybitnych osób, to pełne rozwiązanie tego problemu nie jest znane do dzisiaj. Dla prostoty w naszych rozważaniach ograniczymy się do mas punktowych – wyidealizowanych obiektów o zerowej objętości.

Oddziaływanie grawitacyjne pomiędzy dwiema masami punktowymi jest trenścią prawa grawitacji Newtona. (W „Principiach” znajduje się piękne twierdzenie, które pokazuje, że to samo prawo obowiązuje dla dwóch rozciągniętych ciał o symetrii sferycznej). Chociaż Słońce, Ziemia i Księżyc to trzy ciała, a nie dwa, to duże różnice ich mas i odległości pomiędzy nimi powodują, że w przybliżeniu (tylko w przybliżeniu!) można opisać ich ruch, traktując je jako dwa niezależne układy dwóch ciał: Słońce–Ziemia i Ziemia–Księżyc. Przeważnie w podobny uproszczony sposób opisuje się dynamikę Układu Słonecznego: uwzględniając tylko oddziaływanie grawitacyjne Słońca z kolejnymi planetami.

Pierwszym nietrywialnym zagadnieniem dotyczącym mas punktowych w teorii grawitacji Newtona jest zagadnienie trzech ciał. Po Newtonie z problemem tym mierzyło się wiele wybitnych osób. Po ponad dwustu latach zmagania te doprowadziły do rewolucji w naszym rozumieniu Natury i ukazały głęboką prawdę, która sięga daleko poza teorię Newtona, prawdę, która przez wszystkie te lata była tuż-tuż: determinizm nie oznacza przewidywalności!

Teoria chaosu

Wśród znakomitych naukowców zajmujących się problemem trzech ciał na wyróżnienie niewątpliwie zasługuje żyjący na przełomie XIX i XX w. Henri Poincaré, czasem nazywany ojcem teorii chaosu.

Większość współczesnych teorii fizycznych można przedstawić następująco: określamy stan układu w danej chwili, a prawa danej teorii pozwalają nam przewidzieć jego stan w chwili późniejszej. Pod koniec XIX w. Poincaré jako pierwszy za-

uważył, że dla pewnych początkowych konfiguracji trzech ciał bardzo drobna zmiana położenia w chwili początkowej może prowadzić po krótkim czasie do zupełnie odmiennych trajektorii tych ciał. Używając współczesnej terminologii: odkrył zjawisko czułości na warunki początkowe. Teoria chaosu dotyczy układów wykazujących tę cechę. Ta właściwość oznacza, że nawet jeśli znamy dokładne prawa rządzące układem fizycznym, to nie możemy mieć pewności, że potrafimy na ich podstawie przewidzieć dłuższą ewolucję tego układu. Wystarczy, że mierząc położenie początkowe jednego z trzech ciał pomylimy się o milimetr (każdy pomiar fizyczny obciążony jest pewnym, choćby nawet bardzo małym błędem), a po stosunkowo krótkim czasie ta drobna niedokładność spowoduje, że nasze przewidywania staną się całkowicie niepoprawne.

Poincaré swoją analizę problemu trzech ciał opisał za pomocą prawie tysiąca trzystu stron przepięknej matematyki zawartej w trzytomowym dziele „*Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*” (1892–1899). Opisane tam metody stosowane są do dzisiaj i to w znacznie bardziej ogólnym kontekście. Powtórzmy: determinizm nie oznacza przewidywalności!

Jak to się stało, że taka fundamentalna właściwość teorii Newtona pozostała nieodróżniona przez ponad dwa wieki? Zdziałał tu swego rodzaju efekt selekcji.

Dla bardzo prostych przypadków da się uzyskać „czyste”, matematycznie eleganckie rozwiązania równań Newtona. Przykładowo, oddziaływujące ze sobą dwie masy punktowe mogą poruszać się po elipsach, z regularnością zegarka powracając do tych samych punktów na swoich orbitach. Położenie każdej w dowolnym momencie można przewidzieć na podstawie prostego wzoru. Tego typu rozwiązania określa się mianem ścisłych. W przypadkach trudniejszych nie da się znaleźć gotowego rozwiązania – położenie mas trzeba żmudnie odtwarzać krok po kroku, sekunda po sekundzie. Przykładowo, równania modelujące pogodę są skomplikowane i nie istnieje prosty wzór przewidujący temperaturę powietrza w Krakowie, do którego wystarczyłoby pod „t” podstawić „27 lutego 2025 roku”. Procedura benedyktyńskiego wędrowania ku przyszłości, kroczone po kroczeniu, określana jest mianem rozwiązania numerycznego. Komputery są znacznie sprawniejsze od nas, ludzi, w tej żmudnej pracy.

W pewnym sensie można więc powiedzieć, że przez stulecia nie znajdowano rozwiązań skomplikowanych (w tym: chaotycznych), bo szukano prostych i eleganckich.

Wynalezienie komputerów diametralnie zmieniło sytuację. Dostrzeżenie chaosu nie wymagało już geniuszu Poincarégo. Na początku lat 60. XX w. meteorolog Edward Lorenz, badając równania, które modelowały pogodę, przez przypadek odkrył powtórnie zjawisko czułości na warunki początkowe, tzw. efekt motyla: ruch skrzydeł motyla w Brazylii może wywołać tornado w Teksasie. Każdy, kto miał dostęp do komputera, mógł przeprowadzić podobne badania. Powstała teoria chaosu. Okazało się, że obserwacja dokonana przez Poincarégo nie jest tylko ciekawostką matematyczną. Czułość na warunki początkowe pojawia się powszechnie w różnych układach fizycznych.

Problem trzech ciał uwidoczniał, że znajomość zasad i znajomość konsekwencji tych zasad to dwie różne rzeczy. Można powtórzyć za Feynmanem, że bardzo trudno jest poznać coś naprawdę.

Zadziwiający fakt, że czasami nie można przewidzieć ewolucji układu trzech ciał, pomimo znajomości praw nim rządzących, fascynuje nie tylko naukowców. Również literatura podejmuje ten temat. Wystarczy wspomnieć „Katedrę” Jacka Dukaja czy „Problem trzech ciał” Cixina Liu. Skoro taki prosty układ może wykazywać czułość na warunki początkowe, to czy tym bardziej nasze ludzkie losy, podobnie jak w filmie Kieślowskiego „Przypadek”, nie ulegają nieustannym dramatycznym zwrotom pod wpływem drobnych, pozornie nic nieznaczących zdarzeń?

Małe pytanie za milion dolarów

Problem trzech ciał to tylko jeden z wielu ważnych problemów sformułowanych w ramach teorii Newtona, które opierają się próbom rozwiązania przez setki lat. Inny ciekawy problem dotyczy przepływu cieczy lepkiej. W terminologii naukowej, wbrew potocznemu rozumieniu słowa »lepkość«, woda, a nawet powietrze jest cieczą lepka (oczywiście mniej lepka niż np. miód). Równania, które opisują przepływ cieczy lepkiej, wyprowadzono prawie dwieście lat temu. Noszą one nazwę równań Naviera-Stokesa.

Podczas przepływu cieczy mogą pojawić się wiry. Wyjaśnienie, w jaki spo-

sób wiry powstają i ewoluują, pozwoliłoby lepiej zrozumieć wiele zagadnień: od przepływu krwi przez nasze żyły, po przez optymalizację kształtu skrzydeł samolotu, na zjawiskach astrofizycznych kończąc.

Nie potrafimy znaleźć ścisłych nietrywialnych rozwiązań równań Naviera-Stokesa. Chociaż można te równania rozwiązać na komputerze, to ze względu na komplikacje związane z powstawaniem wirów nie wiemy, jak udowodnić, że rozwiązania numeryczne są prawdziwymi rozwiązaniami oryginalnych równań. Algorytmy komputerowe mogą prowadzić do znajdowania rozwiązań numerycznych tam, gdzie prawdziwe rozwiązania nie istnieją, lub do braku rozwiązań numerycznych tam, gdzie prawdziwe rozwiązania istnieją. Instytut Matematyczny Claya wyznaczył milion dolarów nagrody za rozwiązanie tego problemu. Pieniądze nadal czekają na śmiałka, któremu uda się znaleźć odpowiedź na to małe pytanie.

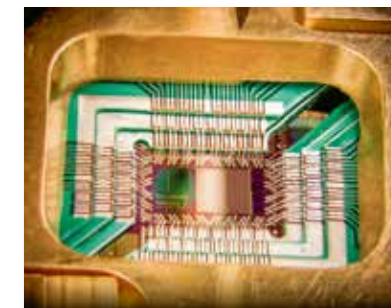
Niewiele, lecz poprawnie

W każdej teorii fizycznej istnieje wiele prostych nierozwiązanych zagadnień, które domagają się, aby je zrozumieć. Równania Einsteina w pełnej postaci zawierają tysiące razy więcej członów niż równania Newtona. Skoro teoria Newtona przez ponad dwa wieki broniła swoich sekretów, to można się spodziewać, że teoria Einsteina nadal skrywa w sobie, pomimo ponad stu lat badań, niejedną niespodziankę.

Próby znajdowania odpowiedzi na małe pytania, sformułowane w ramach dobrze przetestowanych teorii, są trudne. To, że pytania są proste, a teorie stare, oznacza, że przed nami mierzyło się z nimi wiele wybitnych osób. Naprawdę nie jest łatwo w badaniach teoretycznych po upływie setek lat dołożyć kolejną cegielkę. Każda taka cegielka jest wartościowa. Rzymscy konsulowie, przekazując władzę następcom, wypowiadali słowa: „Zrobiłem to, co mogłem, niech inni, ci, którzy potrafią, zrobią więcej”. Właśnie taką skromną sentencję zapragnął mieć na swoim grobie Stanisław Lem. Myślę, że zgodziłby się z nią autor słów, które zacytowałem na początku tego tekstu.

© SEBASTIAN J. SZYBKĄ

AUTOR jest doktorem habilitowanym, pracuje w Zakładzie Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii w OA UJ.



Komputer kwantowy

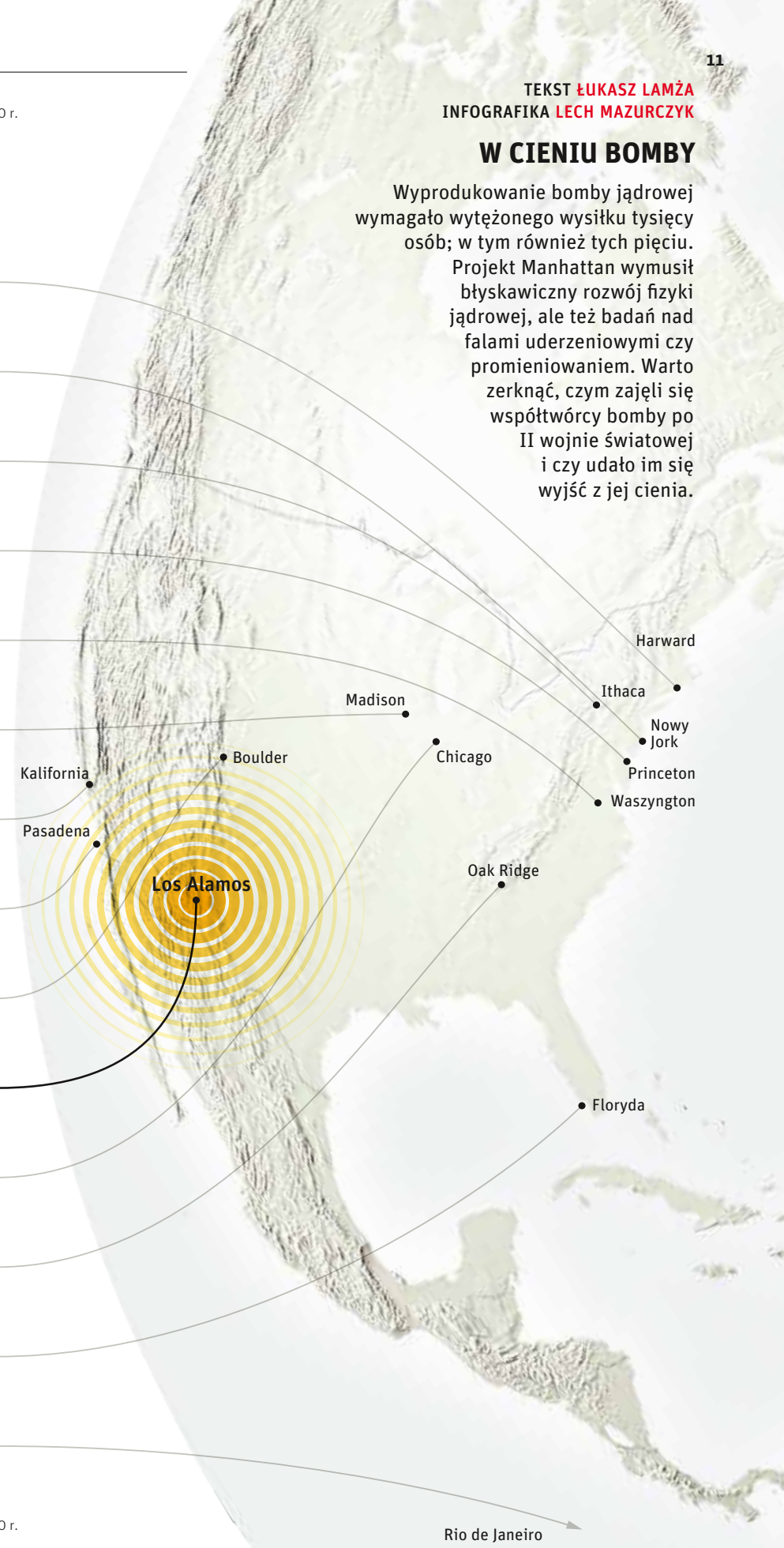
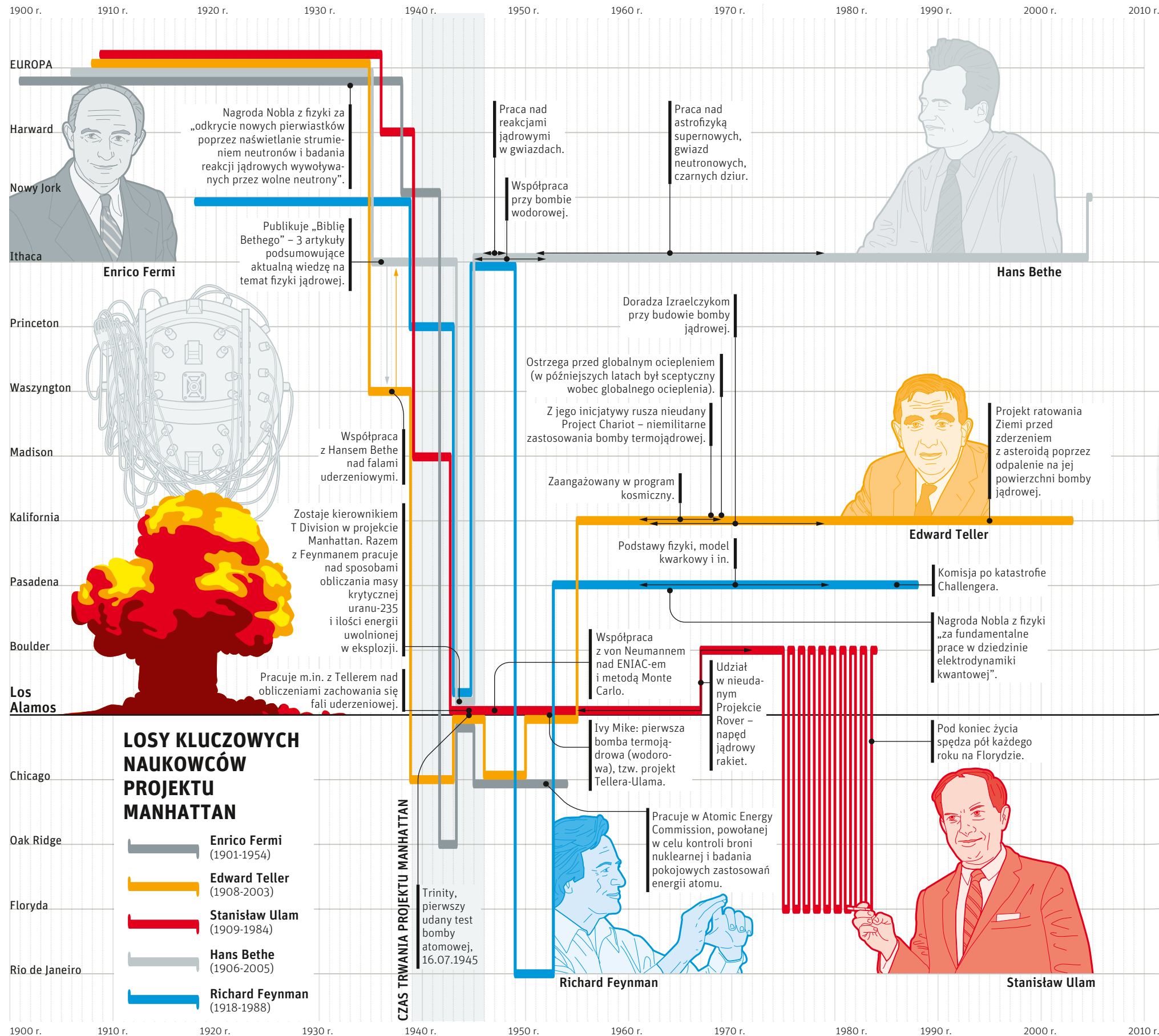
Od lat 70. XX w. aż do pierwszej dekady XXI w. z niebywałą konsekwencją sprawdzało się prawo Moore'a głoszące, że liczba tranzystorów na pojedynczym układzie scalonym podwaja się co około dwa lata. Rozwój ten oznacza w praktyce szybki, stały wzrost wydajności obliczeniowej komputerów. W ostatnich latach trend ten zaczął jednak spadać i sam George Moore, współzałożyciel firmy Intel, oszacował w 2015 r., że w ciągu najbliższej dekady określane jego nazwiskiem prawo przestanie się sprawdzać.

Wydaje się, że powoli docieramy do czysto fizycznych granic możliwości miniaturyzacji stosowanych obecnie technik projektowania i produkcji elementów elektronicznych. W obecnie najbardziej zaawansowanej technologii odstęp między sąsiednimi elementami wynosi 10 nanometrów – zaczynamy więc zbliżać się do skali pojedynczych atomów, których kilka mieści się na długości jednego nanometra. Nasz apetyt na moc obliczeniową jest zaś nieograniczony.

Naturalnym krokiem naprzód jest więc zmiana sposobu myślenia o komputerze, której wcieleniem jest idea komputera kwantowego, niejako z samej definicji realizującej się na układach w skali atomowej. Istnieją już działające prototypy komputera kwantowego i wiadomo, że jest to realny, uzasadniony technologicznie oraz naukowo plan. Pytanie tylko, kiedy się zrealizuje i jak wiele będzie dało się z niego „wycisnąć”. © ŁŁ

W CIENIU BOMBY

Wyprodukowanie bomby jądrowej wymagało wyjątkowego wysiłku tysięcy osób; w tym również tych pięciu. Projekt Manhattan wymusił błyskawiczny rozwój fizyki jądrowej, ale też badań nad falami uderzeniowymi czy promieniowaniem. Warto zerknąć, czym zajęli się współtwórcy bomby po II wojnie światowej i czy udało im się wyjść z jej cienia.



LOS KLUCZOWYCH NAUKOWCÓW PROJEKTU MANHATTAN

- Enrico Fermi (1901-1954)
- Edward Teller (1908-2003)
- Stanisław Ulam (1909-1984)
- Hans Bethe (1906-2005)
- Richard Feynman (1918-1988)

CZAS TRWANIA PROJEKTU MANHATTAN

Trinity, pierwszy udany test bomby atomowej, 16.07.1945



Los Alamos

Ciemny sektor kosmosu

TOMASZ PŁAZAK

Ogólna teoria względności otworzyła drzwi do współczesnej, ilościowej kosmologii. Coraz precyzyjniejsze obserwacje i pomiary zaowocowały kolejnymi przełomowymi ustaleniami, łącznie z ostatnim – że wszechświat puchnie coraz szybciej.

IZAAK NEWTON, ODKRYWAJĄC PRAWO grawitacji i prawa dynamiki, zdołał wyjaśnić nimi tysiące zjawisk. „Z jednym tylko nie potrafiłem sobie nigdy poradzić – z istnieniem wszechświata” – pisał po latach. Główną trudnością był problem brzegu. Jeżeli statyczny wszechświat ma brzeg, to siły grawitacji powinny zbić wszystkie masy w jedną masę centralną. Jeżeli brzegu nie ma, to – aby znosiły się siły grawitacyjne – wszystkie gwiazdne masy musiałyby być ustawione z perfekcyjną symetrią, czemu przeczą obserwacje. Wszechświat pozostawał tworem niezrozumiałym. Aż do czasów Einsteina.

Zakrzywiona i dynamiczna przestrzeń

Przełomem otwierającym drogę do rozumienia wszechświata było zastosowanie do jego opisu ogólnej teorii względności (OTW), której istotę Einstein zawarł w słowach: „masy zakrzywiają czasoprzestrzeń”. W roku 1917 obliczył, że przestrzeń naszego wszechświata ma za-

krzywienie i typ geometrii analogiczny do sfery (co matematycznie zapisuje się: $k = +1$) [więcej w ramce na str. 14 oraz tekście „Sto lat kosmologii”, „TP” 49/2017]. Pojawił się jednak kłopot. Einstein wierzył, że wszechświat jest statyczny (stale taki sam), tymczasem grawitacyjne przyciąganie się mas prowadziłoby do jego kurczenia się. Aby wyjść z tej trudności, wprowadził do równań OTW tajemniczą wielkość, oznaczoną literą Λ (lambda), nazywając ją stałą kosmologiczną. Postuluje ona istnienie odpychania wkodowanego w samą przestrzeń. Przy jej konkretnej wartości liczbowej (Λ_E) wszechświat może być statyczny pomimo istnienia grawitacji.

Rosyjski matematyk Aleksander Friedman był jedną z pierwszych osób, które rozwiązywały równania OTW z myślą o poznaniu struktury wszechświata. Friedman posługiwał się jednak ich postacią podstawową, czyli bez stałej kosmologicznej ($\Lambda = 0$). Tak jak Einstein, otrzymał możliwość występowania geometrii sferycznej ($k = +1$), ale z fundamentalną różnicą: promień tej „sfery” musi wzrastać

(startując od zera), co powoduje wzrost jej powierzchni – a to powierzchnia (nie jej wnętrze!) modeluje całość zakrzywionej przestrzeni wszechświata. W ten sposób Friedman dokonał fundamentalnego przełomu, odkrywając, że sama przestrzeń wszechświata jest dynamiczna: musi się powiększać (puchnąć) albo kurczyć. Galaktyki w takiej przestrzeni, nawet jeśli nie zmieniają swojej lokalizacji, oddalają się od siebie nawzajem tylko dlatego, że unosi je pęczniejąca przestrzeń.

Przełomem obserwacyjnym potwierdzającym tezę Friedmana było stwierdzenie przez Edwina Hubble’a, że światło dochodzące z odległych gromad galaktyk ma większe długości fal, niż musiało mieć przy ich opuszczaniu (zjawisko zwane przesunięciem ku czerwieni). Ponieważ gromady galaktyk są w istocie nieruchome (nie przesuwają się w przestrzeni), odległości pomiędzy grzbietami fal mogły zostać zwiększone tylko przez puchnięcie przestrzeni.

Po sprawdzeniu obserwacji Hubble’a Einstein przyznał: „stała kosmologiczna

to był największy błąd mojego życia”. Modele Friedmana zatryumfowały.

Decyduje gęstość

Na początku wszechświata szybkość rozszerzania była ogromna. Jednakże upakowane w przestrzeni masy przyciągają się grawitacyjnie, co działa hamująco na szybkość rozszerzania. Łatwo dostrzec, że im większa jest obecna gęstość materii ρ_M (wym. „ro em”), tym ten hamujący efekt będzie silniejszy. Przy dużych wartościach ρ_M jest on tak silny, że zdoła zahamować rozszerzanie i spowodować kurczenie wszechświata; taki wszechświat ma nie tylko początek, ale i koniec. Natomiast przy niewielkich gęstościach szybkość rozszerzania nieznacznie tylko (i coraz słabiej) maleje, a wszechświat nie ma końca.

Zgodnie z OTW od gęstości zależy jednak również rodzaj geometrii wszechświata.

Obliczono, że duże gęstości powodują tak duże zakrzywienie, iż geometria będzie taka, jak na sferze ($k = +1$); natomiast małe gęstości prowadzą do geometrii hiperbolicznej ($k = -1$), której ilustracją jest powierzchnia siodła. Bardzo szczególnie, krytyczny przypadek, kiedy przestrzeń ma krzywiznę zerową ($k = 0$) i zwykłą („szkolną”) geometrię euklidesową, może wystąpić tylko dla jednej, ściśle określonej gęstości, zwanej krytyczną. Dzisiaj znamy już jej wartość: $\rho_{KR} = 9 \cdot 10^{-30}$ g/cm³ (wartość rzędu jednego protonu na metr sześcienny). Nawet taka „bezkrzywiznowa” przestrzeń wszechświata nie może być jednak rozumiana „tradycyjnie”

– jako coś niezmiennego – gdyż także ona zachowuje cechę puchnięcia.

Podsumowując: o szybkości puchnięcia, rodzaju geometrii, wieku wszechświata i jego losach decyduje tylko to, ile razy gęstość jego materii ρ_M jest mniejsza lub większa od gęstości krytycznej. Na oznaczenie tej zależności wygodnie jest wprowadzić parametr Ω_M (omega em), zdefiniowany jako stosunek ρ_M do ρ_{KR} ($\Omega_M = \rho_M / \rho_{KR}$), zwany często bezwymiarową gęstością wszechświata. Omawiane wyżej trzy możliwości odpowiadają $\Omega_M > 1$, $\Omega_M = 1$, $\Omega_M < 1$. Dokładne zmierzenie Ω_M powie o wszechświecie wszystko. W szczególności, jak daleko zostaną uniesione przez puchnącą przestrzeń galaktyki. Dlatego przyjrzymy się teraz gęstości różnych rodzajów masy czy energii wszechświata.

Ciemna materia

Pierwszym krokiem do zmierzenia gęstości była ocena ilości materii na podstawie wyświecanego przez nią światła. Otrzymał $\Omega_{LUM} = 0,005$ – co oznaczało, że dająca się zaobserwować zwykłymi teleskopami materia ma masę dwustukrotnie za małą, aby zapewnić wszechświatowi gęstość krytyczną (zapewniającą płaską geometrię). Ale od początku zdawano sobie sprawę, że niektóre formy materii nie świecą. Jak więc zmierzyć gęstość tej ciemnej (*dark*) materii, czyli wartość Ω_{DM} ? Oto pomysł: przez jej grawitacyjny wpływ na materię widoczną.

Chcąc wyznaczyć masy galaktyk spiralnych, badano prędkości obiektów (gwiazd lub atomów wodoru), które krążą wokół środka galaktyki, jak planety wokół

środka układu słonecznego. Prędkości te okazały się tak duże, że badane obiekty powinny uciec poza galaktykę – a skoro w niej pozostają, to przyciąga je dodatkowo jakaś masa nieświecąca. W ten sposób dowiedzieliśmy się, że w skalach odległości zbliżonych do rozmiarów galaktyk gęstość ciemnej materii jest rzędu $\Omega_{DM} = 0,1$. Ta wartość zaskoczyła astronomów, bo znane formy materii nieświecącej odpowiadały za niewielką część tej wartości.

Pomiary w jeszcze większych skalach – gromad galaktyk – wskazały na jeszcze większe wartości Ω_{DM} . Nie były one precyzyjne, ale i tak mogło zrodzić się pytanie, jak wielka okaże się ostatecznie wartość Ω_{DM} , zwłaszcza w skalach największych?

Nowy aspekt tego problemu przyniosły fascynujące badania tworzenia się jąder kilku lekkich pierwiastków, o których wiadziano, że powstały już w pierwszych minutach wszechświata z protonów i neutronów – w kosmologii nazywa się je barionami. Zdołano wyliczyć, że gęstość materii barionowej (nazywanej często po prostu „zwykłą materią”) wszechświata wynosi $\Omega_{BAR} = 0,04$. Ta – bardzo ważna – liczba określa pełną gęstość wszelkiej materii, którą znamy. Tymczasem, przypomnijmy, gęstość ciemnej materii w obrębie galaktyk obliczono na 0,1. Już to pozwala stwierdzić, że większość ciemnej materii ma nieznaną nam naturę.

Z obliczeń fizyków zajmujących się cząstkami elementarnymi o skrajnie wysokich energiach wynikało, że zaledwie 10^{-36} s po chwili zero wszystkie odległości błyskawicznie wzrosły – o czynnik rzędu... →

→ 10^{28} ! Można wydedukować, że proces taki – zwany inflacją – spowodowałby, iż fragment wszechświata, który jesteśmy w stanie obserwować, stał się niemal zupełnie płaski ($k = 0$) – podobnie jak lokalnie wypłaszcza się powierzchnia nadmuchanego balonu. Skoro inflacja „produkuje” $k = 0$, to zarazem wytwarza wszechświat o gęstości całkowitej $\Omega = 1$. Teza o inflacji była prawdziwym błogosławieństwem dla kosmologii, gdyż likwidowała jej wszystkie naczelnie nierozwiązane od lat problemy. Dlatego teoretycy z wielką radością witali coraz większe wartości Ω_{DM} , oczekując, że w końcu pomiary pokażą, iż całkowita wartość gęstości wyniesie dokładnie $\Omega = 1$. Astronomowie cierpliwie jednak powiększali dokładność pomiarów i w końcu oszacowali szukaną gęstość na $\Omega_{DM} = 0,3$. To było bardzo dużo – ciemnej materii jest kilkadziesiąt razy więcej niż widzialnej – a, co donioślejsze, sześć razy więcej niż materii złożonej ze znanych nam cząstek! Ale dla teoretyków był to cios, bo zaprzeczał istnieniu inflacji (z jej błogosławieństwami!) – domagali się nowych pomiarów Ω_{DM} jakąś inną drogą.

Zmierzyć hamowanie

Istota tej metody wyznaczania Ω_M polega na kontroli, jak daleko została uniesiona galaktyka o zmierzonej wartości z (przesunięcia ku czerwieni) przez puchnącą przestrzeń. Odległość ta obliczona dla galaktyki o przesunięciu z jest ponadto zależna od przyjmowanych (na próbę) wartości Ω_M , gdyż, jak już wiemy, od Ω_M zależy stopień hamowania. Jeżeli więc potrafimy

zmierzyć faktyczną odległość galaktyki, to poznamy faktyczną wartość Ω_M .

Sposobem na zmierzenie odległości galaktyk jest pomiar ich obserwowanej jasności wizualnej. Jasność wizualna to ilość światła padającego na określoną powierzchnię – na przykład na kartkę papieru. Jeżeli źródłem światła jest żarówka o znanej mocy (np. 100 W), to tym słabiej kartka jest oświetlona, im żarówka jest dalej. Zmierzenie jasności wizualnej pozwala zatem na bezpośrednie wyznaczenie odległości żarówki od kartki – niestety pod warunkiem, że znamy jej absolutną jasność, czyli moc. I w tym tkwił kłopot, który przez długie lata skazywał na porażkę wysiłki astronomów.

Nową nadzieję przyniósł postęp techniki umożliwiający badanie tzw. supernowych typu Ia, gwiazd wybuchających również w bardzo odległych galaktykach. Supernowe Ia są bowiem „żarówkami” o jasności absolutnej ogromnej, ale zawsze takiej samej. Odnajdywanie i pomiary tych wiarygodnych „świec standardowych” pozwoliły na obejście wspomnianego wyżej kłopotu – faktyczne odległości bardzo dalekich galaktyk mogły być pomierzone.

Jakie więc ostateczne wyniki wartości Ω_M przyniosło badanie odległych galaktyk tym pomiarowym testem „przesunięcia – jasność”?

Wszechświat przyspiesza!

Gdy jeden zespół ogłosił swoje wyniki, świat kosmologów przeżył kompletny szok. Oto okazało się, że zmierzone jasności wizualne dla supernowych wybuchających

w dalekich galaktykach są wyraźnie mniejsze (ok. 25 proc.) niż wyliczone dla jakichkolwiek (!) wartości gęstości Ω_M . Co więcej: nawet gdyby uznać, że grawitacyjnego hamowania w ogóle nie ma (a przecież musi ono być, bo masy istnieją), to i tak galaktyki są dalej, niż mogłyby bez hamowania dolecieć. Zamiast hamowania obserwujemy więc przyspieszanie rozszerzającej się przestrzeni wszechświata!

Drugi zespół w pełni potwierdził te zaskakujące rezultaty, ale otrzymał coś więcej. Okazało się, że dla jeszcze odleglejszych galaktyk obserwujemy jednak hamowanie. Znaczenie tego wyniku łatwo zrozumieć, gdy przypomnimy sobie, że im odleglejsze galaktyki obserwujemy, tym wcześniej obserwowujemy przeszłość wszechświata. W dziejach wszechświata galaktyki najpierw zwalniały, a potem (po przejściu „punktu przegięcia”) zaczęły coraz gwałtowniej przyspieszać. Oznacza to, że istnieje jakiś wkodowany w puchnącą przestrzeń czynnik, który oddala od siebie galaktyki – najpierw przegrywając, ale potem wygrywając ze zbliżającą je ku sobie grawitacją. Obecnie znajdujemy się już w fazie przyspieszania puchnięcia przestrzeni. Z obliczeń wynika, że „punkt przegięcia” nastąpił ok. 5 mld lat temu, przy 14 mld lat całej historii wszechświata. Późniejsze kontrole potwierdziły wiarygodność tych wniosków.

Istnieje jeszcze jeden ważny walor otrzymanych wyników. Podany powyżej wiek wszechświata, uwzględniający obecne przyspieszanie, okazał się wystarczająco

długi, abyśmy już nie musieli się obawiać, że niektóre obiekty wszechświata (najstarsze gwiazdy, izotopy uranu) są starsze niż on sam. Taka groźba wisiała od lat nad kosmologią przyjmującą, że puchnięcie wszechświata zawsze zwalniało swe tempo.

Ciemna energia

Równania OTW zastosowane do wszechświata można dzięki jego prostocie (jest jednorodny i izotropowy) sprowadzić do dwóch zaledwie prostych równań: pierwsze określa prędkości rozszerzania, drugie przyspieszenia tego rozszerzania. Pełne przyspieszenie okazuje się sumą dwóch przyspieszeń – jedno jest wywołane grawitacją i ma znak ujemny (grawitacja hamuje), drugie czynnikiem Λ i ma znak dodatni (odpychanie). Einstein chciał, aby oba te składniki się zniósły (wszechświat statyczny), i stąd wyliczył wartość Λ_E . Ale co będzie, gdy Λ istnieje, lecz ma wartość różną od Λ_E ?

Okazuje się, że taką możliwość rozważał już współczesny Einsteinowi belgijski ksiądz i fizyk Georges Lemaître. We wczesnym wszechświecie materia była gęsto zbita (powiemy, że skala R charakteryzująca odległości jest mała), toteż hamujące przyspieszenie grawitacyjne – tym większe, im mniejsze są odległości pomiędzy cząstkami materii – ma wielką wartość, natomiast odpychające przyspieszenie kosmiczne ma wartość zupełnie znikomą, gdyż okazało się, że jest zależne od iloczynu maleńkiej wartości Λ i wielkości skali R . To dlatego też w naszym otoczeniu (nawet w galaktyce) wpływu Λ nie widzimy, a modele Friedmana ($\Lambda = 0$) dla wczesnego wszechświata pozostają ważne. Natomiast dla późnego wszechświata jest wręcz przeciwnie: skale odległości są ogromne i coraz silniej zdominują kosmiczne odpychanie, rozpędzając i rozrzedzając wszechświat – do pustki. Po 80 latach model Lemaître’a święci tryumfy.

Do rozważenia pozostaje równanie na prędkość rozszerzania. Można je zinterpretować następująco: ponieważ jest w nim obecny czynnik Λ , to do Ω_M , czyli zwykłej gęstości materii (masy), należy dodać jeszcze gęstość energii Ω_Λ . Pełna gęstość energii we wszechświecie jest więc sumą Ω_M i Ω_Λ ; wszechświat trzeba określać przez obie te wielkości. Tę ukrytą energię, rozpychającą wszechświat, o gęstości Ω_Λ , nazywano „ciemną energią”. Zwróćmy uwagę

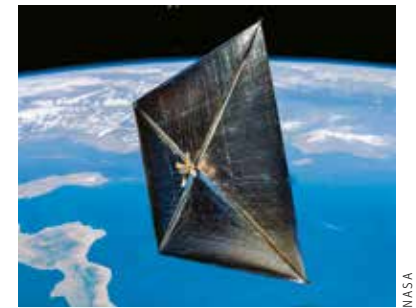
na jej niezwykłość. Skoro powiększa ona gęstość wszechświata, to powinna przyczynić się również do jego grawitacyjnego wyhamowywania – a działa wręcz odwrotnie! Nie można zatem zastosować do niej słynnego wzoru Einsteina ($E = mc^2$) mówiącego o równoważności energii i masy; musimy o Ω_M i Ω_Λ mówić osobno. Ciemna energia jest więc czymś zasadniczo odmiennym od zwykłej materii. Czym? Do dziś nikt tego nie wie. Być może jej obecność otwiera wrota do nowej, rozszerzonej i głębszej fizyki?

Czy w tej dziwnej sytuacji można jakoś obserwacyjnie upewnić się, że ciemna energia istnieje, a zwłaszcza poznać, jaką wartość liczbową ma Ω_Λ ? Z pomocą przychodzi test „przesunięcia – jasność”, tym razem wykonywany dla wielkości Ω_M i Ω_Λ . Zaawansowana analiza pomiarów wskazała, że przy $\Omega_M = 0,3$ otrzymuje się wartość $\Omega_\Lambda = 0,7$. Aż tyle! Najważniejsza równość, wynikająca z istotnie nowego paradygmatu wszechświata, może być zapisana „banalnym” związkiem: $0,3 + 0,7 = 1,0$. Wskazuje on, że nasz wszechświat ma przestrzeń płaską ($k = 0$). Rozwiązująca problemy inflacja mogła zatem istnieć (co za radość dla teoretyków), a co najważniejsze, we wszechświecie dominuje nie masa widzialna (jest jej 0,5 proc.), nie wszelka znana nam postać „zwykłej” materii (4 proc.), a nawet nie ciemna materia (26 proc.), lecz przede wszystkim zupełnie nieznannej natury ciemna energia (70 proc.). Kosmologiczny obraz wszechświata stał się spójny, a jego rozpoznanie jest tak ważne, że określone zostało jako model (w istocie nowy paradygmat wszechświata) Λ CDM (Λ *Cold Dark Matter*) – uznany za standardowy i „obowiązkowy”.

Uparci przeciwnicy Λ CDM szukają innych możliwości. Przyspieszanie rozszerzania jest faktem niepodważalnym, ale może nie było inflacji albo jakiś inny mechanizm prowadzi do $k = 0$, czyli $\Omega = 1$? Tu musimy koniecznie dodać, że już po odkryciach za pomocą supernowych Ia stwierdzono bezpośrednio i niewątpliwie płaskość przestrzeni wszechświata ($k = 0$), a pośrednio także $\Omega_\Lambda = 0,7$ i $\Omega_M = 0,3$, na zupełnie innej drodze, przynoszącej jeszcze pełniejsze i pewniejsze wnioski, jaki jest nasz wszechświat.

© TOMASZ PŁAZAK

AUTOR jest doktorem fizyki, kosmologiem. Wykłada na AGH.



Żagiel słoneczny

Istnieje wiele sposobów na rozprędkowanie obiektu w przestrzeni kosmicznej, od „starych dobrych” rakiet na paliwo stałe czy płynne, po współczesne silniki jonowe. Żaden z nich nie pozwala jednak osiągnąć naprawdę dużych odległości. W latach 1996–2002 NASA prowadziła program Breakthrough Propulsion Physics Project, którego celem była ocena potencjału wszelkich spekulatywnych – czasem balansujących na granicy *science fiction* – form napędu kosmicznego. Od wielu dekad istnieje projekt, który łączy ze sobą intrygującą prostotę z potężnym potencjałem – żagiel słoneczny.

Idea zasadza się na dawno już potwierdzonym fakcie, że promieniowanie – również słoneczne – wywiera ciśnienie, zupełnie jak strumień wody czy wiatr. Stąd pomysł, by wystać w kosmos duży płaski obiekt, który by ów strumień fotonów „łapał”. Żaglowi takiemu można by pomóc, celując w niego z powierzchni Ziemi odpowiednio potężnym laserem. Projekt taki ma fundamentalną zaletę: na pokładzie wyposażonego w żagiel słoneczny statku nie musi się znajdować kłopotliwy bagaż – zbiornik paliwa. W 2010 r. japońska agencja kosmiczna JAXA wysłała w przestrzeń międzyplanetarną statek kosmiczny IKAROS, który stanowił pierwszą udaną realizację idei żagla słonecznego. Niewykluczone, że w najbliższych dekadach kolejna wersja tego projektu wyprzedzi sondy Voyager, obecnie najbardziej oddalone od Ziemi twory wykonane ręką ludzką, i pofurunie ku gwiazdom. © ŁL

Kosmiczne zależności

k : parametr krzywizny wszechświata; decyduje o jego „kształcie”

$k = -1$: zakrzywiony ujemnie (jak powierzchnia siodła)

$k = 0$: płaski

$k = +1$: zakrzywiony dodatnio (jak powierzchnia kuli)

Λ (lambda): stała kosmologiczna, decyduje o tym, czy i jak przyspiesza puchnięcie wszechświata

$\Lambda = 0$: wszechświat bez stałej kosmologicznej; po pewnym czasie zacznie zapadać się pod wpływem grawitacji

$\Lambda = \Lambda_E$: wartość stałej kosmologicznej dokładnie równoważy przyciąganie grawitacyjne mas we wszechświecie – nie dojdzie do zapadania się

$\Lambda > \Lambda_E$: stała kosmologiczna powoduje przyspieszanie puchnięcia wszechświata

ρ (rho): gęstość danego składnika wszechświata (w g/cm^3)

ρ_M : gęstość materii, czyli wszystkich obiektów posiadają-

cych masę i oddziałujących grawitacyjnie

ρ_{KR} : gęstość krytyczna, czyli taka, przy której wszechświat będzie płaski ($k = 0$)

Ω (omega): gęstość danego składnika wszechświata (podawana względem gęstości krytycznej ρ_{KR} , której odpowiada wartość 1)

Ω_M : gęstość materii (czyli ρ_M/ρ_{KR})

Ω_{LUM} : gęstość materii świetlnej (*luminous*), czyli takiej, która emituje światło

Ω_{DM} : gęstość (nieświecącej)

ciemnej materii (*dark matter*), o której istnieniu wiemy pośrednio, poprzez jej oddziaływanie grawitacyjne

Ω_{BAR} : gęstość materii barionowej, czyli „zwykłej materii”

Ω_Λ : gęstość odpowiadająca stałej kosmologicznej, czyli „ciemnej energii”

$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$: jeżeli gęstość materii (wszelkiego rodzaju, czyli zarówno Ω_{LUM} , jak i Ω_{DM}) i ciemnej energii łącznie wynosi 1, czyli jest równa gęstości krytycznej, to wszechświat jest płaski (dziś wydaje się, że tak właśnie jest)



MARTIN MEISSNER / AP / EAST NEWS

Historia pewnej nierówności

MICHAŁ ECKSTEIN, PAWEŁ HORODECKI

Ponad 80 lat temu Albert Einstein i Niels Bohr spierali się o naturę rzeczywistości. Według najnowszych kwantowych eksperymentów wizja Bohra jest bardziej adekwatna, jeśli tylko... fizycy mają wolną wolę.

MECHANIKA KWANTOWA KRYSTALIZOWAŁA SIĘ STOPNIOWO. Choć jej matematyczny formalizm, czyli sposób wyliczania wyników eksperymentów, został przez fizyków opanowany dość szybko, to natura obiektów kwantowych, czyli „małych” – takich jak atomy czy fotony – pozostaje przedmiotem kontrowersji do dzisiaj.

Filozoficzne preludeum

W latach 30. rozgorzała słynna debata pomiędzy Albertem Einsteinem a tzw. szkołą kopenhaską, reprezentowaną w szczegól-

ności przez Nielsa Bohra. W swej istocie był to spór filozoficzny o naturę „fizycznej rzeczywistości”, czyli wizji świata kreślonej przez nowożytną fizykę.

Einstein utrzymywał, że jeśli bez oddziaływania z układem potrafimy z pewnością przewidzieć wartość jakiejś wielkości fizycznej, to istnieje element rzeczywistości, któremu owa wielkość odpowiada. Przykładowo, nie musimy oświetlać pomarańczy, żeby wiedzieć, że ma ona z pewnością kolor pomarańczowy – jest to jej inherentna własność. Można powiedzieć, że zdaniem Einsteina kwantowe cząstki są jak pomarańcze – mają określone indy-

widualne własności, zanim je zbadamy. Ponieważ mechanika kwantowa potrafi przewidzieć niektóre wyniki tylko z pewnym prawdopodobieństwem, a nie z pewnością, to nie może ona – uważał Einstein – być uznana za teorię zupełną, czyli zdolną adekwatnie odwzorować każdy element fizycznej rzeczywistości.

Bohr oponował, posiłkując się zasadą nieoznaczoności Wernera Heisenberga, twierdząc, że każdy pomiar wielkości fizycznej jest inwazyjny – mierząc, zawsze zaburzamy mierzony układ. W konsekwencji tego pewne wielkości – takie jak np. położenie i pęd cząstki – należy uznać

za komplementarne, czyli takie, których nie da się równocześnie zmierzyć, a nawet równocześnie przypisać im jednoznacznie wartości liczbowych. Bohr stwierdził, iż ten pozornie paradoksalny fakt pokazuje jedynie, że Einsteinowska koncepcja „fizycznej rzeczywistości” jest nieadekwatna do opisu mikroświata. Zakładała ona bowiem zadekretowanie wyników pomiarów przed ich wykonaniem, podczas gdy w mechanice kwantowej cechy cząstek „aktualizują się” dopiero w momencie pomiaru.

Obaj uczeni zgadzali się w pełni co do skuteczności mechaniki kwantowej do opisu zjawisk mikroświata. W końcu jednym z prekursorów tej teorii był właśnie Einstein, który już w 1905 r. zastosował koncepcję „kwantów światła” [niem. *Lichtquanten*] do opisu tzw. efektu fotoelektrycznego. Krytykując mechanikę kwantową, Einstein twierdził jedynie, iż jest ona przybliżeniem jakiejś lepszej teorii, zgodnej z klasycznym rozumieniem fizycznej rzeczywistości. Bohr zaś utrzymywał, że jeśli zjawiska kwantowe wydają się paradoksalne z punktu widzenia „naturalnej filozofii”, to... tym gorzej dla filozofii.

Debata Einstein–Bohr toczyła się zatem nie tyle w obszarze fizyki, co raczej filozofii fizyki. O ile jednak kwestia istnienia obiektywnych własności pojedynczych cząstek wydawała się problemem czysto akademickim, o tyle układ dwóch cząstek kwantowych wprawiał naukowców w zakłopotanie. W słynnym artykule z 1935 r. Einstein, we współpracy z Borisem Podolskim i Nathanem Rosenem, pokazał, że jeśli dwie cząstki kiedyś ze sobą oddziaływały, to mechanika kwantowa mówi, iż pomiar jakiejś własności jednej z nich natychmiast ustala wartość tejże wielkości u jej partnera. Einstein określił to mianem „upiornego oddziaływania na odległość”, które stało – w jego mniemaniu – w sprzeczności z zasadami teorii względności (ponieważ, jak się wydawało, wymagałoby to przekazu informacji z prędkością większą od prędkości światła). Z kolei Bohr i Erwin Schrödinger argumentowali, że dwie cząstki kwantowe, które oddziaływały, należy postrzegać jako jeden nielokalny układ, który zachowuje się jak jeden obiekt, mimo że jego składniki są bardzo daleko od siebie. Nie przekonało to sceptyków, choć za sprawą Schrödingera „upiorne oddziaływanie na odległość” zyskało mniej dramatyczną nazwę „splątania kwantowego”.

Najnowsze eksperymenty nie pozostawiają złudzeń: kwantowym cząstkom, **wbrew temu, co sądził Einstein**, nie można przypisać obiektywnych własności.

Twierdzenie o teoriach

Choć przykład wymyślony przez Einsteina i współpracowników był określany mianem „paradoksu EPR”, fizycy praktycy nauczyli się z nim żyć. Mechanika kwantowa działała doskonale, a nikomu nie udało się opracować lepszej teorii, zgodnej z Einsteinowską wizją, w której własności cząstek byłyby zdeterminowane przed pomiarem. Co więcej, sprzeczność zasad kwantowych z teorią względności okazała się pozorna – nie można bowiem używać kwantowego splątania do przesyłania informacji z prędkością nadświetlną. Mariaż mechaniki kwantowej ze szczególną teorią względności doprowadził zaś do powstania bardzo trudnej, ale niezwykle skutecznej, kwantowej teorii pola, którą na co dzień posługują się całe zastępy teoretyków pracujących w CERN-ie. Problemy interpretacyjne kwantowego splątania zostały zatem na powrót przesunięte do sfery filozofii.

Po blisko trzech dekadach kwestia splątania kwantowego nieoczekiwanie powróciła na grunt fizyki. W 1964 r. John Bell wyraził koncepcję EPR w postaci prostej nierówności, którą dawało się skonfrontować z doświadczeniem.

Wyobraźmy sobie eksperyment jako zadawanie pytań układowi fizycznemu. Możemy np. spytać foton, jaki ma kolor, a on odpowiada, załamując się odpowiednio na pryzmacie. Z tej perspektywy własność cząstki to odpowiedź na dane pytanie, która jest określona jeszcze przed samym pomiarem. Pomarańcza – by pozostać przy tym samym przykładzie – zawsze jest pomarańczowa, zanim zadamy jej pytanie o kolor, oświetlając ją. Jeśli cząstki kwantowe są jak pomarańcze, to wciąż – nawet jeżeli są w stanie splątanim – mają określone indywidualne własności, zanim je zbadamy. Owe cechy kwantowych indywidualności powinny opisywać jakaś teoria, której mechanika kwantowa – potrafiąca przewidzieć wyniki tylko

z pewnym prawdopodobieństwem – jest jedynie przybliżeniem.

Wyobraźmy sobie dwoje eksperymentatorów – Alicję i Boba – zamkniętych w oddległych laboratoriach. Teraz weźmy źródło emitujące parę cząstek splątanych, z których jedna leci do Alicji, a druga do Boba. Eksperymentatorzy zadają cząstkom po jednym z zestawu pytań, to znaczy przeprowadzają pewien pomiar, którego wynik skrzętnie zapisują. Cząstki odpowiadają tylko „tak” lub „nie”. Alicja i Bob muszą zadawać różne pytania wielu cząstkom w nadziei, że uda się uchwycić jakąś prawidłowość.

Tabelki pytanie–odpowiedź dla każdego z obserwatorów nie są specjalnie interesujące, wyglądają na kompletnie losowe (i takie w istocie są!). Ciekawie zaczyna się robić, kiedy Alicja i Bob się spotykają i porównują swoje zapiski. Okazuje się, że jeśli, przykładowo, pytali swoje elektrony, czy mają „spin do góry” (spin to pewna własność elektronów), to jeśli cząstka Alicji odpowiedziała „tak”, to ta u Boba zawsze mówiła „nie”. Powiemy zatem, że wyniki ich pomiarów są skorelowane. Z drugiej strony, jeśli Alicja pytała o „spin do góry”, a Bob o „spin w prawo”, to odpowiedzi nie będą w żaden sposób powiązane.

Aby uchwycić te prawidłowości, można posłużyć się tzw. funkcją korelacji, która zależy od pytań postawionych przez Alicję oraz Boba. Bell rozumował następująco: założmy, że wyniki pomiarów zależą, oprócz od zadawanego pytania, od jakiejś zmiennej, nad którą nie mamy żadnej kontroli. Ten „ukryty parametr”, determinujący własności cząstek, pochodziłby od owej hipotetycznej fundamentalnej teorii, antycypowanej przez Einsteina, dla której mechanika kwantowa byłaby jedynie przybliżeniem. Wówczas funkcję korelacji można prosto wyliczyć na gruncie klasycznej teorii prawdopodobieństwa. Bell pokazał, iż w tym przypadku pewna kombinacja funkcji korelacji (oznaczymy ją przez „D”) nie może być większa od 2 dla żadnego zestawu pytań Alicji oraz Boba. Okazuje się jednak, że dla pewnych zestawów pytań mechanika kwantowa przewiduje większą wartość D – dokładnie 2√2, czyli ok. 2,83.

Innymi słowy, jeżeli lecące cząstki miałyby zawczasu przygotowane odpowiedzi na zadawane im pytania, to liczba D nie mogłaby przekraczać 2. Ponieważ jednak okazuje się, że D jest znacząco większe od 2, to oznacza, że cząstki nie mogą

→ mieć własności zdeterminowanych przed pomiarem przez żadną teorię. Muszą nabywać je w sposób niezeterminowany swoją przeszłością – czyli losowy.

Twierdzenie Bella – jak każde twierdzenie matematyczne – jest oparte na pewnych założeniach.

Po pierwsze, pomiary Alicji i Boba muszą zachodzić prawie równocześnie. Innymi słowy, Alicja nie powinna mieć żadnej szansy na wysłanie Bobowi wyniku swojego pomiaru, zanim Bob nie zada swojego pytania – i *vice versa*. Wówczas bowiem eksperymenci mogliby się dogadywać „poza konkursem”. Ponieważ, zgodnie ze szczególną teorią względności – możemy przesyłać wiadomości co najwyżej z prędkością światła, Bob musi wykonać pomiar na tyle szybko, aby nie zdążył do niego dolecieć ewentualny sygnał świetlny, wysłany przez Alicję po dokonaniu przez nią pomiaru.

Po drugie, urządzenia rejestrujące odpowiedź cząstek powinny być wystarczająco wydajne. Szybko zauważono bowiem, że jeśli będziemy wyłapywać mniej niż 87 proc. wysłanych cząstek, to uzyskaną „nadwyżkę korelacji” można złożyć na karb naszej niewiedzy o tych, których nie zmierzylśmy.

Po trzecie wreszcie, pytania zadawane przez Alicję i Boba muszą być w pełni losowe i niezależne od siebie. Oznacza to, w szczególności, że musimy wykluczyć możliwość komunikacji pomiędzy laboratoriami nie tylko w momencie pomiaru, ale również w chwili ustalania pytań. Bo jeśli Alicja z Bobem umówiliby się wcześniej, o co będą pytać, to silne korelacje między odpowiedziami nie byłyby niczym zaskakującym. Frapujący jest fakt, iż eksperymenci wcale nie muszą być świadomi zmywy – ktoś lub coś (np. jakiś złośliwy kartezyński demon) mógł im przecież „poustawiać” urządzenia.

Jeśli zakładamy zatem, że pytania Alicji i Boba faktycznie są nieskorelowane, to znaczy, że muszą oni nie tylko mieć „uczciwe” urządzenia, ale również posiadać wolną wolę wyboru pytania!

Nierówności na Ziemi i w niebie

Teoretyczny wynik badań Bella należało skonfrontować z eksperymentem. Jego oryginalną nierówność ulepszyli pięć lat później John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony i Richard Holt, czyniąc ją bardziej adekwatną do realiów laborato-



Niels Bohr i Albert Einstein podczas Kongresu Solvaya, Bruksela, 1930 r.

PAUL EHRENFEST / DOMENA PUBLICZNA

wości „pozakonkursowej” komunikacji między laboratoriami. W kolejnej wersji, w 2010 r., wiedeńscy przenieśli się do bardzo spektakularnej scenarii: pary splątanych fotonów były generowane na kanaryjskiej wyspie La Palma. Jeden z nich był mierzony nieopodal, podczas gdy drugi leciał na Teneryfę. Użycie szybkich polaryzatorów oraz kwantowych generatorów liczb losowych zapewniało, że komunikacja „poza konkursem” nie była możliwa.

Otwarta pozostawała jednak wciąż kwestia czułości detektorów. Wymóg wyłapywania przynajmniej 87 proc. strumienia cząstek był nie lada wyzwaniem w latach 70. ubiegłego wieku. Tak wydajne detektory udało się zbudować dopiero w XXI w. W 2001 r. zespół kierowany przez późniejszego laureata Nagrody Nobla Davida Winelanda wykorzystał takowe urządzenie do przeprowadzenia testu Bella. Tu również nie było niespodzianki, a mechanika kwantowa triumfowała. Sęk jednak w tym, iż eksperyment Winelanda wykorzystywał jony, którymi trudno się manipuluje, i nie udało się zagwarantować pierwszego założenia – o niemożności komunikacji. Detektory fotonowe o wydajności przekraczającej 90 proc. powstały dopiero dekadę później, a w 2013 r. dwa zespoły, kierowane przez Zeilingera oraz Paula Kwiaty z Illinois, niezależnie od siebie potwierdziły łamanie nierówności Bella w przyrodzie.

Dwa lata później wszystkie trzy elementy powiązano w jedną całość w trzech autonomicznych zespołach. W Delft pod kierunkiem Ronalda Hansona użyto kryształków diamentu specjalnie „zanieczyszczonych” azotem. Tymczasem wiedeńscy na czele z Zeilingerem, a także zespół Lyndena Shalma z Boulder w Colorado użyli fotonów i ultraczułych detektorów. Wyniki nie pozostawiały wątpliwości – żadna teoria „ukrytych zmiennych” nie może wyjaśnić kwantowych korelacji. Kilka miesięcy później Alain Aspect opublikował na łamach „Physics” artykuł o wymownym tytule „Zakończenie kwantowego sporu Einsteina z Bohrem” (ang. „Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate”).

W 2017 r. chiński zespół kierowany przez Jan-Wei Pana, ucznia Zeilingera, zaobserwował łamanie nierówności Bella przy użyciu par splątanych fotonów emitowanych z satelity na orbicie, a kwantowe technologie coraz odważniej wkra-

ZAGADKI KWANTOWEGO SPLĄTANIA

Źródło emituje pary cząstek splątanych, które lecą w przeciwnych kierunkach (np. na Ziemię i Tytana) z prędkością bliską prędkości światła. Wbrew intuicji, taka „splątana para” zachowuje się jak jeden układ – niezależnie od tego, jak duża odległość w przestrzeni dzieli partnerów. Pomiar własności jednej cząstki z pary natychmiast wpływa na własności drugiej, choć nie można w ten sposób przesłać żadnej informacji. Wyniki pomiarów wykazują bardzo silną korelację, której nie da się wyjaśnić, jeśli założymy, że własności cząstek są określone (zdeterminowane) przed pomiarem. Eksperymenty z cząstkami splątanymi dowodzą, że nie mają one niezależnie określonych parametrów.

LECH MAZURCZYK



cząją w przestrzeń kosmiczną. Sami zaś wiedeńscy również postanowili odwołać się do kosmosu, aby odeprzeć argumenty o tym, że może urządzenia do losowania są wadliwe (bądź też specjalnie ustawione). W ich fascynującym zeszłorocznym eksperymencie to fotony pochodzące z dwóch odległych gwiazd „zadawały pytania” w eksperymencie na Ziemi. Nierówność Bella została oczywiście złamana. To oznacza, że jeśli ktoś (lub coś) uknuł(o) intrygę, by nam mydlić oczy, musiał(o) to zrobić ponad 600 lat temu – przed Gutenbergiem i tym bardziej przed drukiem „Principiów” Newtona.

Filozoficzna koda

Dzisiaj ludzie chętniej wierzą internautom niż fizykom i ich fotonom z gwiazd. Tym tropem poszli w 2016 r. autorzy Wielkiego Testu Bella (ang. *The BIG Bell Test*), w którym to 100 tys. użytkowników internetu generowało ciągi zer i jedynek wedle własnego widzimisie. Na podstawie ich zachcianek 15 laboratoriów na całym świecie zadało pytania cząstkom splątanim. I znów, mechanika kwantowa zatriumfowała.

Ciekawą uwagę dotyczącą tego testu poczynił brytyjski fizyk Lucien Hardy. Zauważył bowiem, że użyta metoda nie daje szans na spełnienie założeń testu Bella związanych z szybkością wykonywania eksperymentu ze względu na zbyt długi czas reakcji między podjęciem decyzji w ludzkim mózgu a jej motorycznym rezultatem – np. wciśnięciem klawisza komputera. Hardy zaproponował znaczącą poprawkę – nowy eksperyment miałby bazować na sygnałach EEG, używanych na co dzień w medycynie do diagnostyki mózgu, a także zadbać o przestrzenne rozdzielanie grup osób zaangażowanych w eksperyment.

W tym momencie czytelnik ma prawo nabrać podejrzeń, że cała ta historia z mechaniką kwantową jest jakimś piramidalnym błędnym kołem. Oto bowiem, żeby uznać, że pewne zjawiska w świecie zachodzą w sposób kompletnie losowy, musimy założyć, że... pewne zjawiska w świecie zachodzą w sposób kompletnie losowy. Chcąc wykazać kwantowy indeterminizm, musimy odwołać się do jakiegoś „źródła losowości” – czy to w zasadzie nieoznaczoności Heisenberga, czy to w kosmosie, czy też w naszych mózgach. Fizycy są zatem niczym baron Münchhausen, który rzekomo sam siebie wyciągnął za włosy z mokradła.

Fizycy, chcąc pozostać wiernymi metodologii właściwej ich dziedzinie, patrzą jednak na całą sprawę zupełnie inaczej. Silne korelacje pomiędzy cząstkami splątanimi są faktem naukowym, dowiedzonym niezależnie w wielu eksperymentach – i ten fakt domaga się wyjaśnienia. Najlepszym, jakim dysponujemy, jest mechanika kwantowa – z całym jej bagażem filozoficznym.

Pytanie, jakie natomiast mogą zadać fizycy, to: jak bardzo losowe muszą być ustawienia urządzeń pomiarowych, by zachodziło przewidziane przez mechanikę kwantową łamanie nierówności Bella?

Pytanie to postawiono dopiero niedawno (w 2012 r.) i okazało się, w wyniku badań teoretycznych prowadzonych w Zurychu, Barcelonie i Gdańsku, że – co zaskakujące – potrzeba jedynie bardzo słabej nieprzewidywalności, albo jak kto woli: wolnej woli. Wystarczyłaby tu jedynie moneta, której zachowania nikt i nic we wszechświecie nie może przewidzieć z prawdopodobieństwem większym niż 99 proc. (rzucając ją wielokrotnie i próbując przewidzieć wynik, każdy użytkownik lub automat zrobi błąd średnio raz na

sto rzutów). Nie wiemy, czy takie źródła istnieją w przyrodzie (być może ludzki mózg ma w sobie właśnie jakąś dozę nieprzewidywalności tego typu, także na poziomie decyzyjnym). Jeśli jednak istnieje choćby jedno, i to dowolnie słabe takie źródło, wówczas możemy pokazać, że nierówność Bella jest łamana, a nawet, co więcej, wykorzystać ją do generowania losowości maksymalnej – czyli 50 proc. na 50 proc.

Fenomen kwantowego splątania – niezwykle silnych korelacji między odległymi cząstkami – jest niezrozumiały na gruncie naszej potocznej intuicji wywodzącej się ze świata makroskopowego, którego doświadczamy na co dzień. Einstein był przeświadczony, że ów brak zrozumienia jest chwilowy i wynika po prostu z niedoskonałości naszego opisu fundamentalnych praw fizyki. W świetle najnowszych badań taki pogląd filozoficzny, choć niewykluczony, staje się coraz trudniejszy do przyjęcia.

Wydaje się, że przyroda stawia nas przed wyrazistą alternatywą. Albo cały świat, z nami samymi, jest całkowicie zdeterminowany, a wszelka rzekoma losowość zdarzeń jest jedynie złudzeniem fundowanym nam przez jakiegoś kartezyńskiego demona, albo też mamy, choćby nawet bardzo słabiutką, „rozrzedzoną” wolną wolę, a obserwując świat, fizycznie go zmieniamy i potrafimy poprzez mechanikę kwantową doprowadzić do zdarzeń zupełnie nieprzewidywalnych. *Tertium non datur*.

© MICHAŁ ECKSTEIN, PAWEŁ HORODECKI

MICHAŁ ECKSTEIN jest doktorem matematyki i fizykiem.

PAWEŁ HORODECKI jest profesorem fizyki. Obaj autorzy pracują w Krajowym Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku.



Stephen Hawking z żoną Elaine na plaży San Lorenzo w Gijón, Hiszpania, kwiecień 2005 r.

ELOY ALONSO / REUTERS / FORUM

Urwana trajektoria

ŁUKASZ LAMŻA

Tuż przed oddaniem tego dodatku do druku zmarł Stephen Hawking. Przyjrzyjmy się krótko jego najważniejszym dokonaniom naukowym i miejscu w krajobrazie dzisiejszej debaty na temat kosmosu.

NAZWISKO HAWKINGA WESZŁO już do języka potocznego. Dziś jest on już wymieniany jednym tchem obok Alberta Einsteina jako „po prostu fizyk” – jedna z pierwszych osób, które przychodzą nam do głowy, gdy myślimy o nauce i kosmosie. Brytyjski matematyk i kosmolog Roger Penrose, w długim pożegnaniu swojego wieloletniego współpracownika i przyjaciela – opublikowanym w „The Guardian” 14 marca, a więc w dniu jego śmierci – słusznie zauważył, że Hawking z wielką przyjemnością przyjął sławę, która na niego spadła. Pozwalała mu nie tylko mówić o wszechświecie i matematyce, publicznie walczyć o sprawę osób chorych i niepełnosprawnych, ale także utrzymać do końca życia finansową niezależność. Od 1963 r., kiedy to – mając zaledwie 21 lat – usłyszał od lekarzy, że cierpi na postępującą stwardnienie zanikowe boczne, z każ-

dym rokiem rosła otaczająca go świta pielęgniarzek, lekarzy i asystentów. Hawking nie zrezygnował zaś z aktywności naukowej i popularyzatorskiej, dyktując kolejne artykuły i teksty wykładów. Oddając mu miejsce na łamach dodatku poświęconego przełomom w nauce, nie musimy nawet w minimalnym stopniu naginać prawdy – Hawking walczył przyczynił się do przynajmniej jednego znaczącego kroku naprzód w naszym rozumieniu wszechświata. Aby docenić jego wkład w fizykę, cofnijmy się do przełomu lat 60. i 70. XX w., kiedy to powstały jego najważniejsze prace naukowe.

Ogólna teoria względności (OTW) to matematyczny opis kształtu przestrzeni. Aparat teoretyczny OTW jest jednak, no właśnie, tylko strukturą matematyczną. Od 1915 r., kiedy zostały opublikowane kluczowe dla tej teorii tzw. równania pola Einsteina, najważniejsze stało się pytanie, które z rozlicznych możliwych kon-

sekwencji tej teorii rzeczywiście dotyczą świata fizycznego, a które są tylko ciekawostką matematyczną.

Ot, czarne dziury. Już w 1916 r. niemiecki matematyk Karl Schwarzschild wykazał, że w ramach teorii Einsteina da się opisać konfigurację czasoprzestrzeni, w środku której znajduje się tzw. osobliwość: punkt, w otoczeniu którego krzywizna czasoprzestrzeni zdążyła do nieskończoności. Jeżeli mówimy o tym wyłącznie jako o obiekcie matematycznym, nie jest to jeszcze koniec świata. Dopiero wtedy, gdy obiekt ten zacznie nam służyć do opisu jakiegoś rzeczywistego zjawiska fizycznego, zachodzącego w otaczającej nas, realnej przestrzeni świata, osobliwość staje się naprawdę... końcem świata. Przez kolejne dziesięciolecia nie było jasne, czy osobliwości tego typu są wyłącznie kłopotliwym gościem w kajetach matematyków, czy też zagrażają spójności naszego własnego wszechświata. W taką właśnie atmosferę niepewności wkroczył w połowie lat 60. Stephen Hawking, wówczas doktorant na Uniwersytecie Cambridge.

W 1965 r. Penrose opublikował pracę („Gravitational Collapse and Space-Time Singularities”), w której wykazał, że zapadająca się materia musi doprowadzić do lokalnego powstania osobliwości, nawet w nieidealnym świecie fizycznym, w którym nie obowiązują niektóre dogodne uproszczenia matematyczne, np. założenie doskonałej symetrii. Zainspirowany tym tekstem Hawking rozszerzył wynik Penrose’a, obejmując nim już całą czasoprzestrzeń wszechświata. W 1966 r. przedstawił swoją pracę doktorską, której rozdział czwarty opisywał te zagadnienia na sposób ścisły. Wydawało się, że osobliwościom zostaje zapewnić solidne miejsce w opisie rzeczywistości.

W następnych latach Hawking wraz z Penrose’em opracowują szereg narzędzi matematycznych, pozwalających na wykrywanie i opisywanie osobliwości. Przyjęta przez nich metoda opiera się na śledzeniu cząstek. Jeżeli wyobrazimy sobie, że każda cząstka zostawia po sobie w czasoprzestrzeni ślad, to o istnieniu osobliwości miałyby świadczyć po prostu... urwane trajektorie.

W 1970 r. Hawking z Penrose’em opublikowali artykuł („The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology”), gdzie intuicje te zostały sprowadzone do postaci matematycznych twierdzeń,

a w 1973 r. z George’em Ellisem podredaktorzył, dziś klasyczny, „Large-Scale Structure of Space-Time”, w którym przedstawiony został syntetyczny opis czasoprzestrzeni, m.in. ze względu na wspomniane ograniczenia ruchu cząstek, a więc i możliwości przesyłania sygnałów. Książka ta do dziś stanowi jedno z najważniejszych rozwinięć Einsteińskiej teorii względności.

W następnych dekadach zainteresowania Hawkinga zwróciły się ku związkowi pomiędzy kosmologią a teorią kwantową. Jest m.in. współautorem hipotezy tzw. parowania czarnych dziur – nazywanego też po prostu parowaniem Hawkinga. Jest to niepotwierdzony jeszcze mechanizm, dzięki któremu owe, jak się sądzi konwencjonalnie, „leje bez dna” mogłyby jednak powolutku gubić masę poprzez typowo kwantowy proces emitowania cząstek z próżni.

W latach 80. Hawking, który łączył w sobie niezwykłą historię osobistą z niekłamany szacunkiem najwybitniejszych fizyków świata, został wywindowany do roli gwiazdy naukowej popkultury. Przełomowym momentem było wydanie w 1988 r. „Krótkiej historii czasu”, która szybko stała się bestsellerem. Rynek wydawniczy nie był wówczas tak nasycony jak dziś, a książka Hawkinga zapełniła potężną – jak się okazało – lukę, opowiadając o kosmosie i nauce w przystępny, nieprzeciętny matematyką sposób.

Z każdym kolejnym rokiem Hawking pozwalał sobie na coraz więcej, współpracując z muzykami (trudno zapomnieć choćby jego głos w „Keep Talking” Pink Floydów) oraz twórcami niezliczonych filmów i kreskówek, a także wypowiadając się na najróżniejsze tematy, od sztucznej inteligencji i przyszłości rasy ludzkiej, po życie pozaziemskie i Boga. Jego komentarze budziły często tyleż zainteresowania, co kontrowersji, i niejednokrotnie zarzucano mu podpieranie się autorytetem nauki, gdy przychodziło po prostu do głoszenia prywatnych poglądów. Trudno jednak zaprzeczyć, że opinia Hawkinga będzie jeszcze przez długie dekady punktem orientacyjnym w sprawach dotyczących zagadek kosmosu – zarówno tych czysto naukowych, jak i tych zgoła metafizycznych. ©

Obce globy

NIGEL MASON, ASTROCHEMIK:

Skomplikowane związki chemiczne znajdujemy jak wszechświat długi i szeroki – takie same w różnych jego rejonach. Prawa chemii, tak jak fizyki, są uniwersalne. A życie na innych planetach – prawdopodobne.

MICHAŁ KUŹMIŃSKI: Niedawno sądziliśmy, że Układ Słoneczny jest wyjątkowy. Dziś wiemy, że większość gwiazd ma planety. To kolejny przezwrot kopernikański w astronomii?
NIGEL MASON: Jak najbardziej.

Dotąd odkryliśmy przeszło 3,5 tys. planet pozasłonecznych, czyli egzoplanet. Co właściwie wiemy?

Liczba odkrywanych egzoplanet ciągle rośnie. Pierwszą odkrył Polak, Aleksander Wolszczan w latach 90. XX w. Wówczas istnienie planet pozasłonecznych było dyskusyjne, część badaczy sądziła, że do ich powstania potrzeba bardzo specyficznych warunków. Teraz wiemy, że wokół większości gwiazd wszechświata prawdopodobnie krążą dwa lub trzy ciała niebieskie. Klasyfikujemy je, posługując się analogią do Układu Słonecznego. Obserwujemy głównie tzw. superjowisze, czyli gazowe olbrzymy – z uwagi na rozmiar łatwiej je wykryć. Dlatego dziś badania koncentrują się na poprawieniu czułości instrumentów badawczych, by można było obserwować planety coraz mniejsze. Za pomocą kolejnej generacji teleskopów kosmicznych, jak PLATO [od *PLANetary Transits and Oscillations of Stars* – red.] czy Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba, który ma trafić na orbitę już niebawem, powinniśmy być w stanie zaobserwować planety rozmiarami zbliżone do Ziemi, których orbita mieści się w tzw. ekosferze gwiazdy – takiej odległości od gwiazdy, że dociera tam tyle ciepła, by na powierzchni planety mogła występować woda w stanie ciekłym. Takie planety są potencjalnie gościnniejsze dla występowania życia w formie, jaką znamy.

Bezpośrednio przez teleskop nie zobaczymy egzoplanet. Metodą ich tropienia jest tzw. tranzyt. Co pozwala stwierdzić?

To jedna z najczęściej stosowanych metod, acz nie jedyna. Obserwujemy zmiany emisji światła dochodzącego do nas od gwiazdy, gdy przed jej tarczą przechodzi planeta. Tak jak przy każdym zaćmieniu, im taka planeta bliższa gwiazdzie, tym większą ilość światła przysłała. Potrzebny jest do tego teleskop bardzo stabilny i czuły, zdolny obserwować bardzo niewielkie zmiany jasności. W przypadku obserwacji z powierzchni Ziemi trzeba wziąć poprawkę na oscylacje atmosfery, które mogą wywołać fałszywy sygnał. A więc najlepsze są do tego teleskopy kosmiczne.

Pomiary tranzytu planety przed gwiazdą dokonuje się wielokrotnie – pozwala to zbadać orbitę, ustalić jej kształt i odległość planety od gwiazdy. Z tego powodu częściej obserwujemy dziś planety obiegające swoją gwiazdę raz na kilka dni, tygodni, najwyżej miesięcy. Bo gdy chce się badać planetę obiegającą gwiazdę raz na ziemski rok, trzeba obserwować ten sam wycinek nieba przez kilka lat. Gdy już uzyska się to, co nazywamy krzywą tranzytu, analiza jej kształtu mówi wiele o masie i rozmiarach planety. Jeśli mamy kilka planet na tej samej płaszczyźnie, jak w Układzie Słonecznym, zaobserwujemy różne krzywe, które pozwolą oszacować, ile ich jest. A znajomość rozmiaru i masy pozwala stwierdzić, czy mamy do czynienia z superjowiszem, którego gęstość jest relatywnie niska, czy z masywnym ciałem skalistym. W tym drugim przypadku planeta ma powierzchnię, są więc większe szanse, by było tam życie.

Ale do tego trzeba zbadać coś jeszcze: atmosferę.

To też możliwe przy pomocy badania tranzytu?

Tak. Patrzymy, co się dzieje, gdy planeta właśnie wylania się z gwiazdy albo się za nią chowa. Przez króciutki czas światło prześwieca wtedy przez jej atmosferę. Gdy

→ poddamy je analizie spektroskopowej, linie widma absorpcyjnego pokażą, jakie pierwiastki i związki chemiczne wchodzi w skład tej atmosfery. A dodatkowo pomiar tego światła powie nam coś o jej temperaturze.

Co zawierają zbadane dotąd atmosfery?

Większość dotychczasowych badań dotyczy superjowiszy, bo mają wokół siebie grubą otoczkę atmosfery, mamy więc wiele światła do badania spektrum. Wykryliśmy wodę, metan, tlenek i dwutlenek węgla. Daje to nieco pojęcia, czy dana planeta składa się z gorących gazów, czy jest tam woda i w jakiej postaci itd. Następną generacją teleskopów kosmicznych będzie w stanie zebrać znacznie więcej danych na temat atmosfer. Pozwoli to spekulować, czy planeta jest potencjalnie zdolna do goszczenia życia, oraz wypatrywać biomarkerów.

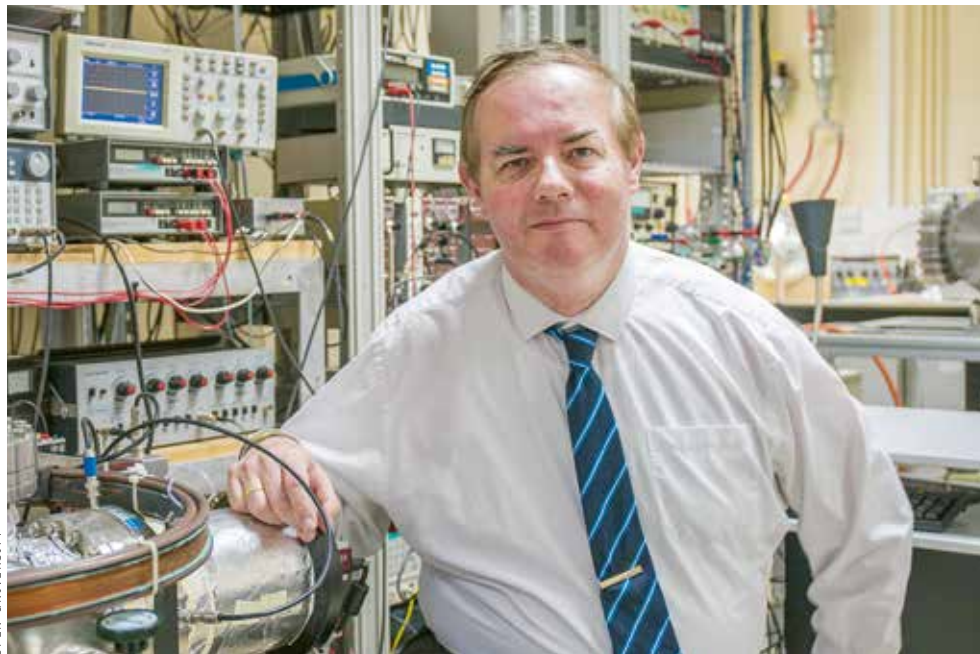
Co to są biomarkery?

Cząsteczki pochodzenia biologicznego. Bo biologia wpływa na atmosferę. Weźmy przykład planety, co do której na pewno wiemy, że jest na niej życie – na razie znamy jedną. Trzy miliardy lat temu atmosfera Ziemi zaczęła się zmieniać z metanowej na tlenową, a to za sprawą pojawienia się fotosyntetyzujących bakterii, które zaczęły absorbować energię słoneczną i wytwarzać tlen. Jeśli znajdziemy egzoplanetę z atmosferą obfitą w tlen, będzie on właśnie biomarkerem.

A gdyby istniały tam formy życia niekoniecznie związane z tlenem?

Nie wiemy, jak by działały, więc nie potrafilibyśmy stwierdzić, co w ich przypadku byłoby biomarkerem. Problem w tym, że jesteśmy związani jedynymi przykładami, którymi dysponujemy, czyli formami życia znanymi z Ziemi.

A z Ziemi znamy np. metanogeny, które czerpią energię z oddychania beztlenowego, korzystając z metanu. Takie były pierwsze organizmy we wczesnej historii życia na naszej planecie. Nawiąsem mówiąc, trwa właśnie wielka dyskusja wokół emisji metanu obserwowanego na Marsie. Otóż metan w atmosferze bardzo szybko rozpada się pod wpływem światła gwiazdy. Więc gdy go w niej obserwujemy, znaczy to, że coś go musi do niej wciąż dostarczać. I choć znamy procesy geologiczne, w których powstaje metan,



Profesor Nigel Mason obok spektrometru

to jest też możliwość, że marsjański metan pochodzi od form życia, które przeżyły głęboko pod powierzchnią dawnych oceanów tej planety. Dlatego część badaczy uważa go za biomarker.

Istnieją też inne potencjalne biomarkery, jak formaldehyd. Problem w tym, że w atmosferze występują one w bardzo małych stężeniach, bardzo więc trudno je wykryć nawet na Marsie, a wykrycie ich na egzoplanecie wykracza poza nasze dzisiejsze możliwości.

Co zobaczylibyśmy na powierzchni tamtych światów?

Nie mamy dziś wystarczających danych o żadnej egzoplanecie, by z pewnością wnioskować, jak może wyglądać jej powierzchnia. Byliśmy dotąd przekonani, że z grubszą atmosferą, jak wygląda powierzchnia Plutona czy księżyców Saturna, ale gdy tam dotarliśmy, okazało się, że sprawy miały się inaczej. Nie jesteśmy najlepsimi w przewidywaniu takich rzeczy. Ale na pewno każda z tych planet wygląda inaczej. Bardzo mało prawdopodobne, byśmy znaleźli dwie podobne. Choćby dlatego, że planety się zmieniają. Ziemia także: dzisiejsze kontynenty miliony lat temu były jednym wielkim lądem.

Odważamy się spekulować o wyglądzie ewentualnych tamtejszych form życia?

Wielu badaczy wierzy – i dziś to niewiele więcej niż tylko wiara – że jeśli istniałaby druga Ziemia z życiem opartym na tlenie,

to generalnie byłoby podobne do naszego: ale np. to, jaki kolor miałyby tamtejsze rośliny, zależałoby już od składu atmosfery. Rośliny ziemskie wyewoluowały jako zielone, bo to na naszej planecie najskuteczniejszy sposób odbijania części widma słonecznego – ze względu na warstwę ozonową, określone ilości tlenu i pary wodnej itd. Tam rośliny mogłyby być choćby fioletowe. Podobnie ludzkie oko jest najbardziej wyczułone na kolor żółty, bo taki jest kolor światła słonecznego. Światło tamtejszej gwiazdy mogłoby być inne. Ale możemy tylko zgadywać.

W naszym układzie wokół średniej wielkości gwiazdy po wewnętrznych orbitach krążą mniejsze planety, a po zewnętrznych – gazowe i lodowe olbrzymy. Jakich innych systemów możemy się spodziewać w kosmosie? Podwójnych planet? Podwójnych słońc?

Istnieją przykłady interpretowane jako układy dwóch planet krążących wspólnie blisko siebie. Ale bardziej prawdopodobne, że na jakimś etapie takie planety zderzą się i utworzą jedną. W każdym razie stabilny układ dwóch planet jest absolutnie możliwy z punktu widzenia praw fizyki, choć pewnie nieczęsto się zdarza – acz niedawno nie spodziewaliśmy się zaobserwować gwiazd podwójnych, a dziś znamy ich wiele. We wszechświecie możliwych jest tyle kombinacji, że właściwie wszystko, co sobie wyobrazisz, pewnie gdzieś istnieje. Co ciekawe, *science fiction*

na takie pomysły, jak podwójne gwiazdy czy planety, już dawno wpadła.

Planeta Tatooine z „Gwiezdnego wojen” ma dwa słońca. Zapewne wymyślono ją tak, żeby dać nam poczucie dziwności, obcości. A okazało się, że gwiazdy podwójne są w kosmosie dość powszechne.

W rzeczy samej. Co więcej, do wykrywania planet pozasłonecznych posłużyły te same techniki, z których korzystano w poszukiwaniu układów gwiazd podwójnych. A one mogą mieć bardzo interesujący zestaw krążących wokół nich planet. Możliwe są planety okrążające jedną z takich gwiazd, ale też takie, które po skomplikowanej orbicie krążyłyby wokół obu.

Kopernikański przewrót związany z odkrywaniem egzoplanet dotyczy też tego, że jeszcze niedawno wątpiono w życie poza Ziemią, dziś się to zmienia. Na ile powszechne wśród naukowców jest przekonanie, że ono istnieje?

Dobre pytanie. Tzw. równanie Drake'a pozwala obliczyć prawdopodobieństwo istnienia planet, na których istnieje życie. W zależności od przypadku planety, który podstawisz do równania, wynosi ono niemal zero – brak życia, lub niemal jeden – niemal pewne istnienie. Przy takim rozstrzale można właściwie założyć cokolwiek. Prawie jak w ekonomii.

Ale istnieje sporo dowodów na to, że życie jest bardziej prawdopodobne niż jego brak. Wiąże się z pytaniem o chemię życia: o to, skąd biorą się złożone cząsteczki, które następnie łączą się, tworząc DNA, komórki, życie. Jeszcze w latach 70. większość astronomów uważała, że takie cząsteczki nie mogą powstawać w kosmosie, bo jest on zbyt zimny i zbyt pusty. Tymczasem dziś w ośrodku międzygwiazdowym odkrywamy ich mnóstwo.

Jest tam coś więcej niż samotne atomy wodoru i helu?

Tak. Od bardzo prostych, dwuatomowych cząsteczek, po łańcuchowe, wieloatomowe węglowodory, kwas octowy czy mrówkowy. Wszystkie one są częścią naturalnego procesu formowania się gwiazd i planet. W Układzie Słonecznym nie ma niczego szczególnego. To odkrycie jest właśnie jednym z wielkich przełomów ostatniej dekady: skomplikowane związki chemiczne znajdujemy jak

wszechświat długi i szeroki, a co więcej, w różnych jego rejonach znajdujemy takie same cząsteczki. A więc prawa chemii, tak jak fizyki, są uniwersalne. Z tego powodu pogląd, że cząsteczki budulcowe dla życia mogą się pojawić w kosmosie, jest dziś powszechnie podzielany.

Nie wiemy natomiast, w jaki sposób te cząsteczki łączą się w bardziej skomplikowane struktury dające początek życiu, jak DNA i komórki. Sądzę, że kiedy się dowiemy – nie „jeśli”, lecz „kiedy”, bo jestem przekonany, że nastąpi to w następnych kilku dekadach – być może wykrzyknijemy: „O Boże, jakie to oczywiste!”. Może się okazać, że warunki potrzebne do zajścia tego procesu występują na większości planet. Wszystkie dowody wskazują, że życie jest naprawdę żywotne. Od uformowania się Ziemi do powstania życia minął najwyżej miliard lat. To szybko. A skoro na Ziemi znajdujemy życie we wnętrzu reaktorów atomowych, w gorących i kwaśnych jeziorach, to dlaczego nie mogłoby się rozwinąć w podobnych warunkach na innej planecie?

Ale od żywej komórki do życia inteligentnego jeszcze daleko...

Na pytanie, jak z pierwszych komórek, pierwszych mikrobakterii, powstały organizmy wielokomórkowe, też nie znamy jednoznacznej odpowiedzi. Czy zakres potrzebnych do tego warunków jest bardzo wąski, czy przeciwnie: gdy już życie powstanie, nieuchronnie wyewoluują też organizmy wielokomórkowe? Uważam, że kroki, które doprowadziły do powstania ludzi, opierały się na jakichś interesujących fluktuacjach statystycznych, z których najczęściej przywoływaną była zagłada dinozaurów. Gdyby nie uderzenie asteroidy, które zmiotło je z powierzchni Ziemi, ssaki nie zdobyłyby przewagi, nie wyewoluowałyby naczelnie i człowiek. Planeta wciąż zdominowana byłaby przez dinozaury, których mózgi być może nie zdołałyby wyewoluować do tego stopnia, żeby dziś dyskutowały one o tym wszystkim, w dodatku przez telefon.

Jakiego wielkiego przełomu życzy Pan sobie w następnej kolejności?

Są trzy takie: pierwszym będzie to, czego się dowiemy o atmosferach egzoplanet, skatalogujemy to, porównamy podobne planety na różnych etapach ich życia. Okaze się wtedy, czy atmosfery te ewoluują w jakimś cyklu i czy istnieje ja-

kiś standardowy wzorzec rozwoju planetarnej chemii. Drugim przewrotem będzie odkrycie, jak łączą się tworzące życie cząsteczki. Otrzymanie w laboratoriach samoreplikujących się prostych komórek i prostych form życia. Trzeci przełom zaś prawdopodobnie nastąpi w naszym własnym Układzie Słonecznym, gdy odkryjemy składniki życia na Marsie, albo w oceanicznym świetle księżyców Jowisza: Europy bądź Ganimedesa, gdzie wysłana ma być niebawem europejska misja JUICE (*Jupiter Icy Moon Explorer*). To będzie bliżej domu, więc jeśli odkryjemy tam ślady życia, będziemy mogli po prostu tam polecieć i się mu przyjrzeć.

Czy z wszystkich tych badań możemy skorzystać na Ziemi?

Badania kosmiczne zawsze przynoszą korzyści technologii. Tu przyglądamy się bardzo, bardzo wątłym sygnałom za pomocą bardzo, bardzo małych, czułych i energooszczędnych instrumentów – takich, by nadawały się np. do wysłania na Marsa. I jest dla nich mnóstwo zastosowań na Ziemi. Już dziś służą np. do wykrywania śladów gruźlicy w oddechu pacjenta, wykrywania narkotyków czy środków wybuchowych, a nawet pluskiew w pokojach hotelowych. Albo w przypadku badań spektroskopowych: jeśli potrafimy zmierzyć stężenie cząsteczek w atmosferze planety pozasłonecznej, to ile możemy zbadać w ziemskiej! Np. wykrywać bardzo drobne zmiany mogące nam wiele powiedzieć o zmianach klimatu czy zanieczyszczeniu. Wreszcie – dane. Moc obliczeniowa i analityczna narzędzi potrzebnych do badań kosmicznych służy też przetwarzaniu *big data*, od zakupów przez internet po ludzkie zachowania.

Musimy o tym pamiętać: koszty badań kosmicznych są małeńkie w porównaniu z zyskami osiąganymi za sprawą kosmicznych technologii w przemyśle, wytwórstwie, służbie zdrowia. Ale technologie te powstają dzięki pragnieniu badania naszego Układu Słonecznego i naszego wszechświata.

©© Rozmawiał MICHAŁ KUŹMIŃSKI

PROF. NIGEL MASON jest astrochemikiem, pracuje na brytyjskim Open University. Koordynator naukowy konsorcjum Europlanet zrzeszającego ponad 60 ośrodków badawczych zajmujących się astronautyką i badaniami planet, również pozasłonecznych.

Jako w niebie, tak i na papierze

LUKASZ LAMŻA

Aby nauka szła do przodu, teoria musi iść w parze z obserwacjami. Czasem się udaje – a czasem nie.

FIZYKA TO INTERESUJĄCA NAUKA, stojąca w rozkroku pomiędzy swoim aspektem teoretycznym i obserwacyjnym. Z jednej strony bywa po prostu matematyką stosowaną. Istnieją całe zastępy „fizyków matematycznych”, których praca polega w istocie na rozwiązywaniu równań i tworzeniu nowych struktur matematycznych. Na pewnym etapie którąś z literek utożsamia się z mierzalną wielkością fizyczną i oto matematyka staje się opisem świata. Z drugiej strony bywa po prostu „starym, dobrym” przyrodoznawstwem empirycznym – tym od teleskopu, mikroskopu, sejsmometru, a także ich licznych mniej znanych kuzynów, jak spektroskop Ramana, wiskozymetr Höpplera albo laktodensymetr.

W idealnym świecie obserwacje powinny pobudzać do konstruowania nowych teorii, zaś teorie przewidywać nowe obserwacje – fizyka miałaby dzięki temu spokojnie postępować naprzód krok po kroczku. Czasem rzeczywiście tak bywa. Czasem – niekoniecznie. Zacznijmy od przypadku szczęśliwego.

Astronomia nowa

Kopernik spekulował w listach na temat nowego heliocentrycznego systemu niebios już w okolicach roku 1510, o czym świadczy choćby „*Commentariolus*” („Mały komentarz”) – znany jego przyjacielom przynajmniej od 1514 r. Dopiero 30 lat później, w 1543 r. (roku jego śmierci), ukazało się jednak „*De revolutionibus orbium coelestium*”. Książka ta stanowiła potężny krok naprzód względem powszechnie wówczas uznawanego systemu ptolemejskiego. System kopernikański ma wiele zalet: jest nie tylko po prostu słuszny (planety orbitują wokół Słońca, a nie Ziemi), ale też prostszy matematycznie. Utrzymanie zgodności sta-

rego systemu geocentrycznego Ptolemeusza z obserwacjami astronomicznymi wymagało nakładania na niego kolejnych poprawek, m.in. tzw. epicykli, czyli „cykli na cyklach” – planety miałyby poruszać się po sferach, które same poruszały się po sferach. System kopernikański błyskawicznie likwiduje tego typu kłopotliwe komplikacje. Z dzisiejszej perspektywy brakuje mu jednak czegoś fundamentalnego – solidnej podstawy matematycznej, która pozwalalaby na poszukiwanie podstaw fizycznych ruchu planet. Kopernik traktował ruch sfer niebieskich jako zjawisko niemające nic wspólnego z grawitacją, rozumianą po prostu jako siła sprawiająca, że przedmioty spadają ku środkowi Ziemi. O ile centrum kosmosu miało być Słońce, to centrum grawitacji pozostawała Ziemia. Powiązanie tych dwóch zjawisk ze sobą potrzebowało solidniejszej bazy, zarówno teoretycznej, jak i obserwacyjnej.

Pobudzeni przez Kopernika astronomowie drugiej połowy XVI w. rażno wzięli się do roboty. Szczególnie heroiczne były wysiłki Tycho Brahego, który, od kiedy tylko w 1560 r. jako 14-latek doświadczył zaćmienia Słońca, postanowił zostać naukowcem. Od lat 60. XVI w. prowadził już systematyczne obserwacje, również astronomiczne, odnotowując m.in. z fantastyczną precyzją położenia gwiazd „stałych” (czyli po prostu gwiazd) oraz „zmiennych” (czyli planet). To właśnie owa wspaniała precyzja pozwoliła nieco młodszemu od niego Johannesowi Keplerowi wyrysować krzywe ilustrujące ruchy planet w nowym systemie heliocentrycznym. W klasycznym układzie geocentrycznym krzywe te są tyleż piękne, co kłopotliwe. Przykładowo, niektóre planety wydają się zawracać na swych ścieżkach. Kepler był już w stanie pokazać, że w modelu kopernikańskim trajektorie planet dają się doskonale przybliżyć przez

elipsy (a nie idealne okręgi, w które wierzył Kopernik), a ich parametry, zwłaszcza prędkość, można przewidzieć odwołując się do odległości planet od Słońca. Tak narodziły się słynne keplerowskie prawa ruchu planet, na bazie których Newton sformułował później ideę powszechnego oddziaływania grawitacyjnego.

Zatrzymajmy się jednak jeszcze na chwilę przy Keplerze. W nim zbiegła się genialna pomysłowość Kopernika ze wspaniałą precyzją pomiarów astronomicznych Brahego, dokonywanych, dodajmy, gołym okiem. Trudno jednak o piękniejszą demonstrację wspólnego pochodzenia sfery teoretycznej i obserwacyjnej astronomii niż to, co nastąpiło w 1609 r. To wówczas Kepler opublikował swój 650-stronicowy traktat „*Astronomia nova*”, w którym opisał nowe prawa ruchu planet. W tym samym roku Galileusz skonstruował swój pierwszy teleskop, korzystając prawdopodobnie ze zgłoszonego rok wcześniej w Niderlandach patentu Hansa Lippersheya. Astronomia otrzymała więc podwójny bodziec dla rozwoju. Z jednej strony zupełnie nowy poziom (matematycznego) opisu, a z drugiej wspaniałe narzędzie badania rzeczywistych położzeń i wyglądu ciał niebieskich. O tym, jak niezwykłym wydarzeniem dla nauki był teleskop, niech świadczy fakt, że w samym tylko 1610 r., czasem w odstępach zaledwie dni, Galileusz jako pierwszy zaobserwował księżycy Jowisza, fazy Wenus, pierścienie Saturna i góry na powierzchni Księżyca. Podobna eksplozja nowych obserwacji to rzadkie zjawisko w nauce.

Widzę, ale nie rozumiem

Omówmy teraz przypadki gorszej koordynacji. Sytuację, gdy obserwacji nie brakuje, ale fizycy cierpią na poważny niedostatek teorii, ilustrują choćby badania przepływu cieczy. Nie trzeba żadnego zaawansowa-



ALAMY / BEW

Szkice wirów wodnych Leonarda da Vinci

tego sprzętu, aby obserwować powstające na powierzchni wody wiry – spojrzmy choćby na świetne, szczegółowe rysunki Leonarda da Vinci. Względnie łatwe jest opisanie dynamiki płynu, gdy ten zachowuje się w sposób uporządkowany, tj. gdy można go myślowo podzielić na równoległe warstewki przesuwające się niezależnie od siebie. Wyobraźmy sobie choćby idealnie gładką warstwę kisielu, powolutku spelzającą w dół na nieskończonej, nieznacznie opadającej pochylni: warstwa przyziemna nie porusza się wcale, a z każdym centymetrem ku górze prędkość pełnienia kisielu rośnie. Tego typu wyidealizowany przypadek to tzw. przepływ laminarny. W rzeczywistości w świecie przyrody trudno znaleźć tego typu cieszące matematyka idealne układy, a ciecze lubią

zakręcać, tworząc większe czy mniejsze strugi, wiry i cyklony, co określa się jako przepływ turbulentny.

Matematyczny opis tego typu ruchów stanowi od wieków szczególnie twarde orzech do zgryzienia. Któryś z wybitnych fizyków, albo Horace Lamb, albo Werner Heisenberg, miał rzekomo powiedzieć, że po śmierci zada Bogu tylko dwa pytania: o teorię względności i o turbulencję. Nie znaczy to, że teoretyczny opis turbulencji nie istnieje. W 1941 r., przykładowo, wybitny rosyjski matematyki Andriej Kołmogorow przedstawił opis „kaskadowego” wzbudzenia się wirów w cieczy: od największej skali, przez coraz mniejsze, aż po „mikrowirki”, ostatecznie rozpraszające się w postaci chaotycznych ruchów cząsteczek cieczy – czyli ciepła. Do dziś jed-

nak w wielu sytuacjach, kiedy turbulencja ma znaczenie – czyli od modelowania zachowania się samolotu po symulacje zmian klimatycznych – nie do końca wiadomo, jaką metodą sobie z nią poradzić.

Mamy taką piękną teorię...

Odwrotna sytuacja występuje wtedy, kiedy teoretycy posiadają do dyspozycji matematycznie elegancką teorię, ale żadnym sposobem nie udaje się jej potwierdzić – czy nawet obalić – obserwacyjnie. Najśłynniejszym ze współczesnych przypadków jest teoria strun, mająca stanowić kolejny wielki krok w drodze ku opisaniu mikroświata, a wraz z nim również i wszechświata jako takiego. Choć teoria ta rozwijana jest od lat 60. XX w., a co miesiąc publikuje się na jej temat setki kolejnych artykułów, nie istnieje obecnie żaden potwierdzony sygnał ze strony obserwatorów, jednoznacznie informujący o jej słuszności.

Nie jest to do końca niedostatek samej teorii, a raczej specyfika jej przedmiotu. Teoria strun pokazuje swoje pazury – i przewagę nad bieżącą wersją teorii kwantowej – dopiero przy opisie zjawisk takich jak zachowanie się cząstek elementarnych przy skrajnie wysokich energiach. Określenie „skrajnie wysokie energie” oznacza przy tym warunki, których żadnym sposobem nie da się dziś wytworzyć eksperymentalnie, a nawet przy maksymalnie podkreślonym Wielkim Zderzaczem Hadronów przewidywania teorii strun nie różnią się specjalnie od tego, co przewiduje standardowa fizyka. Istnieje oczywiście więcej takich przypadków w fizyce: bo cóż właściwie mają powiedzieć naukowcy modelujący stan materii w samym centrum Jowisza? Dane obserwacyjne informujące o zachodzących tam procesach praktycznie nie istnieją. Cóż, taki jest po prostu świat.

Jedno jest jasne – naprawdę wielkie przełomy następują wtedy, kiedy uda się zgrać ze sobą stronę teoretyczną i obserwacyjną nauki. Nie zawsze da się to zaplanować, dużo częściej potrzebny jest łut szczęścia, jakim było choćby pojawienie się teleskopu właśnie wtedy, kiedy astronomowie opracowali nowe narzędzia matematyczne, pozwalające na płodne korzystanie z nowo uzyskanego morza informacji. Czasem danych obserwacyjnych – albo błyskotliwego wglądu teoretycznego – uporczywie brak. Trudno jednak obrażać się na świat, że nie wręcza nam wszystkich swoich sekretów na tacy. ©