



Ucieczka galaktyk

Panie Profesorze, na wstępie muszę się przyznać, że nie radzę sobie z pojęciem nieskończoności – nieskończoności czasu, nieskończoności przestrzeni. Coś, co dla matematyka jest nieuchronną konsekwencją, przekracza możliwości mojej pojęciowej wyobraźni, kategorią niedostępną ludzkiemu doświadczeniu. A jak sobie z tym radzą astronomowie badający Wszechświat, w końcu model wcale nie teoretyczny, a obiekt jak najbardziej fizyczny? ▽

Astronomowie radzą sobie z nieskończonością dokładnie tak samo jak matematycy. Ci co nie dają rady, oblewają pierwszy egzamin z analizy matematycznej na pierwszym roku i wylatują ze studiów.

Bez odpowiedniego przygotowania wcale nie jest łatwo sobie z nieskończonością poradzić. Nie poradzili sobie starożytni Grecy i dali temu wyraz w słynnym paradoksie Zenona z Elei: Achilles nie dogoni nigdy żółwia jeżeli ten wystartował pierwszy. Wyobraźmy sobie, że Achilles przemieszcza się z prędkością jednego metra na sekundę, a żółw z prędkością dwukrotnie mniejszą. Żółw wystartował o dwie sekundy wcześniej od Achillesa, żółw będzie w odległości $1 + (1/2)$ m od mety; Achilles – w odległości 1 m. W pół sekundy później Achilles znajdzie się w odległości $1 + (1/2)$, a żółw – w odległości $1 + (1/2) + (1/4)$. W ćwierć sekundy później te odległości będą wynosiły, odpowiednio $1 + (1/2) + (1/4)$ oraz $1 + (1/2) + (1/4) + (1/8)$, itd. W ten sposób można wykonać nieskończoną liczbę kroków i dojść do wniosku że szybko nogi Achilles nigdy nie dogoni żółwia.

Paradoks Zenona, sformułowany w V wieku, skłonił do wysiłku całe legiony filozofów i matematyków. Został on rozwiązany dopiero 2400 lat później, dzięki rewolucji, która dokonała się w matematyce (przejście od wielkości nieskończone małych do idei ciągu matematycznego i rachunku różniczkowego).

Dziś problem ten można rozwiązać, wypisując wzór na sumę N wyrazów szeregu geometrycznego, znany wszystkim licealistom. Po N krokach mierzona w metrach odległość żółwia od Achillesa wynosi $x(N) = (1/2)^N$, czyli $1/2$ do potęgi N , a czas jaki upłynął od startu Achillesa wynosi $t(N) = 2[1 - (1/2)^N]$ sekund. W granicy, gdy N dąży do nieskończoności, $x(N)$ dąży do zera, a $t(N)$ dąży do skończonej granicy: $t = 2$ s.

Zatem mimo nieskończonej liczby kroków w naszym rozumowaniu, Achilles dogoni żółwia po upływie skończonego czasu – dwóch sekund.

Pojęcie nieskończoności nie jest bardziej niezrozumiałe ani tajemnicze niż pojęcie zera. Jedno jest odwrotnością drugiego. Kłopoty starożytnych z nieskończonością wynikały z braku zera w ich aparacie matematycznym.

Pojawienie się wielkości nieskończonych w fizyce oznacza zwykle, że model którego używamy trzeba poprawić, lub „zrenormalizować”, jak np. w kwantowej teorii pola. Niektóre nieskończoności wyglądają na nieusuwalne: tak jest z osobliwościami, związanymi z teorią grawitacji Einsteina. Takie osobliwości pojawiają się w czarnych dziurach i w modelach kosmologicznych na początku Wielkiego Wybuchu. Zdaniem wielu moich kolegów, osobliwości te zostaną usunięte w przyszłej teorii grawitacji, uwzględniającej efekty kwantowe, które teoria Einsteina pomija.

Człowiek dociekał tajemnic Wszechświata już od chwili, kiedy zszedł z drzewa. Mamy o tym odniesienia w Biblii, wzmianki w mitologiach wszystkich kręgów kulturowych. Arystotelesowy model Wszechświata obowiązywał w nauce aż do Kopernika i Keplera, to znaczy do XVI wieku. Newton z prawem powszechnego ciążenia i Einstein z teorią względności wnieśli do astronomii fundamentalne odkrycia, co wiemy ze szkoły. Dziś słyszymy o ciemnej materii. Ciemna, bo nieświecąca, czy dlatego, że inna niż nam znana?..... ▽

Ciemna materia zawdzięcza swą nazwę temu, że nie świeci. Oddziałuje z barionową (czyli „normalną”) materią tylko grawitacyjnie, dzięki czemu wiemy o jej obecności. Z punktu widzenia makroskopowego wiemy o gazie cząstek ciemnej materii, wypełniającym Wszechświat wszystko, co wiedzieć trzeba: znamy jego równanie stanu, wiemy jak jego gęstość malała w miarę ogólnej ekspansji i wiemy jak obecność ciemnej materii wpływa na dynamikę gwiazd i galaktyk. Taki prosty model makroskopowy pasuje do obserwacji astronomicznych i był wielokrotnie weryfikowany. Jednak na poziomie mikroskopowym nie wiemy nic. Są różne hipotezy co do natury ewentualnych cząstek elementarnych ciemnej materii, ale rozważa-

Roman Juszkiewicz



urodził się w 1952 roku w Warszawie. Studia wyższe w zakresie fizyki ukończył w 1976 roku na Uniwersytecie Moskiewskim, gdzie współpracował ze słynnym prof. Zeldowiczem., który wprowadził go w arkana współczesnej kosmologii fizycznej.

Doktorat w dziedzinie nauk fizycznych uzyskał w 1980 r. na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, tam też habilitował się w 1997 r. Dotąd wypromował 5 magistrów i 6 doktorów.

Prof. Roman Juszkiewicz przez 6 lat pracował nad problemami kosmologii fizycznej na uniwersytetach w Berkeley i Princeton w USA.

Ostatnio zaproponował oryginalną metodę oszacowania gęstości materii we Wszechświecie, czyli jak zważyć Wszechświat.

Wraz ze współpracownikami z Uniwersytetu Genewskiego, Kalifornijskiego oraz Oxfordzkiego przeanalizował ruchy trzech tysięcy galaktyk. Eksperyment ten wykazał, że ruchy te są wywoływane ciemną materią nieznanego pochodzenia, która stanowi aż 70 proc. masy Wszechświata.

Prof. R. Juszkiewicz opublikował 75 prac naukowych, które były cytowane ponad 1.500 razy w publikacjach innych uczonych.

Internetowe wydanie tygodnika „Wprost” z lipca ubiegłego roku zamieściło listę 241 polskich uczonych ulokowanych w bazie danych Science Citation Index w latach 1965-2001 na prestiżowej liście filadelfijskiej. Wykaz Wprost obejmował tylko te osoby, które legitymowały się w tym okresie co najmniej tysiącem cytowań innych uczonych, a naukowiec musiał mieć w swoim dorobku przynajmniej jedną pracę cytowaną co najmniej 100 razy.



nia takie pozostaną jałowe dopóki takich cząstek nie schwytają w swoje detektory fizycy.

Czy Wielki Wybuch, początek narodzin fizycznego Wszechświata – to hipoteza czy ugruntowana, poparta dowodami teoria? A może pewność, że tak stać się musiało?.....?

Poczucie pewności kojarzy mi się z Ojcem Rydzykiem, Ajatollahem Chomeinim czy neoliberalnymi fundamentalistami rynkowymi (tych ostatnich można poznać po tym, że jedną rękę mają niewidzialną). W prawdziwej nauce nie ma miejsca na takie cuda. Podstawową cechą metody naukowej jest sceptycyzm. Z całą pewnością daje się tylko teorie eliminować – wtedy, gdy okazuje się że ich przewidywania są sprzeczne z danymi empirycznymi. Najlepsze na co teoria może liczyć, to niesprzeczność z obserwacjami i eksperymentami, znanymi w danej chwili. Liczą się też względy estetyczne. Jeżeli mamy dwie teorie, zgodne z tymi samymi danymi empirycznymi, ale jedna z nich jest prostsza, tę bardziej skomplikowaną zarzynamy tak zwaną brzytwą Ockhama (w myśl dewizy, że nie należy mnożyć bytów bez konieczności).

Model Wielkiego Wybuchu zwycięsko przetrwał niejedną konfrontację z obserwacjami. Tłumaczy on takie zjawiska jak ucieczka galaktyk, związaną z ogólną ekspansją, czy istnienie mikrofalowego promieniowania tła, jego charakter spektralny (widmo Plancka), jak i rozkład jego temperatury na niebie. Tłumaczy również pochodzenie i obserwowane obfitości pierwiastków lekkich (wszystkie pierwiastki od wodoru do litu-7) oraz obserwowaną ewolucję galaktyk (galaktyki dalej położone są dynamicznie młodsze od galaktyk w naszym sąsiedztwie). Warto przy tym zwrócić uwagę, że ucieczka galaktyk i promieniowanie tła zostały najpierw przewidziane, a dopiero później zaobserwowane! Rozliczne teorie alternatywne w stosunku do Wielkiego Wybuchu nie przeżyły zderzenia z rzeczywistością: miały kłopoty z wytłumaczeniem pochodzenia mikrofalowego promieniowania tła oraz ewolucji galaktyk, czy też prostej na pozór obserwacji, że nocne niebo jest ciemne (pomijając światło księżycy).

Sceptycyzm i weryfikacja hipotez przez obserwację czy eksperymenty spełniają w fizyce rolę kontroli jakości. Dzięki temu samoloty na ogół latają, a mosty zbudowane zgodnie z wymogami sztuki inżynierskiej, opartymi na prawach fizyki, nie załamują się pod przejeżdżającymi ciężarówkami. Istnienie mikrofalowego promieniowania tła zostało (jak już wspomni-



nałem) przewidziane przez Georgija Gamowa w latach 40-tych ubiegłego wieku. W dwadzieścia lat później zostało zaobserwowane przez parę radioastronomów – Penziasa i Wilsona.

Sukces Gamowa warto porównać z wiarygodnością przewidywań ekonomistów. W ciągu ostatnich 100 lat specjaliści giełdowi przewidzieli 150 kryzysów i 150 razy spudłowali. Kryzysy na Wall Street się zdarzały, ale nie wtedy, kiedy przewidywano... W fizyce taka kompromitacja byłaby nie do pomyślenia. Ekonomistom nie zaszkodziło: rządy na całym świecie traktują ich z wielką atencją, tak jak niegdyś monarchowie traktowali swych nadwornych astrologów i wróżbitów.

Czy odkryte przez Edwina Hubble'a pod koniec lat dwudziestych ubiegłego wieku zjawisko rozszerzania się Wszechświata to konsekwencja do dziś trwającego impetu Wielkiego Wybuchu, czy może rozszerzanie ma zupełnie inną przyczynę? Czy efekt rozszerzania jest stały – w przeszłości i czekającej nas przyszłości? To ważne – chodzi przecież o losy Wszechświata!..... ▽

Jeszcze do niedawna byliśmy przekonani, że ekspansja Hubble'a ma charakter ruchu bezwładnego rozprężającego się samograwitującego gazu. Grawitacja powinna te ekspansje spowalniać, a zatem dzisiejsze tempo ekspansji powinno być mniejsze niż w przeszłości. Najnowsze obserwacje dalekich wybuchów gwiazd supernowych sugerują co innego: tempo ekspansji rośnie! Oznacza to, że teorie grawitacji być może trzeba zmodyfikować, wprowadzając dodatkową siłę odpychania, lub tzw. stałą kosmologiczną, rozważaną wcześniej, a następnie porzuconą przez samego Alberta Einsteina. Najprostsza interpretacja obecnych danych obserwacyjnych sugeruje, że Wszechświat będzie się rozszerzał również w przyszłości, a ekspansja nigdy nie zostanie wyhamowana i odwrócona.

Archeolog czy paleontolog budując obraz prehistorii ma przed oczami archaiczny przedmiot codziennego użytku czy kości dinozaura i na tej podstawie orzeka o stopniu kultury cywilizacyjnej czy układzie kostnym stwora. Tymczasem kosmolog nie dysponując materialnym dowodem twierdzi, że wie, jak wyglądał Wszechświat w trzy minuty po Wielkim Wybuchu! Skąd ta wiedza?..... ▽

Skąd przekonanie, że strumień fotonów kosmicznego promieniowania tła jest mniej „materialny” niż skamieniały fragment szczęki brontozaura? Jest do-

kładnie na odwrót. Kosmologowie dysponują bardziej bezpośrednimi świadectwami z przeszłości niż historycy czy paleontologowie.

Dzieje się tak dlatego, że prędkość światła jest skończona. Dzięki temu patrząc w dal, patrzymy w przeszłość. Słońce położone jest w odległości ośmiu minut świetlnych od Ziemi i gdyby nagle zgasło, dowiedzielibyśmy się o tym dopiero po ośmiu minutach. Obserwując Wielką Galaktykę w Andromedzie (najlepiej w czasie nowiu w sierpniową noc; wystarczy do tego lornetka polowa), widzimy ją taką, jaka była dwa miliony lat temu. Teraz wygląda nieco inaczej i jest w innym miejscu na niebie, ale o tych zmianach będzie się można dowiedzieć za następne dwa miliony lat. Kiedy w roku 1987 eksplodowała supernowa w jednym z Obłoków Magellana, ujrzeliśmy dramatyczną śmierć gwiazdy, położonej sto tysięcy lat świetlnych od nas. Jeszcze rok wcześniej prekursor supernowej świecił w najlepsze na naszym firmamencie, jak „normalna” gwiazda. W rzeczywistości w miejscu prekursora od 100 000 lat były tylko pozostałości po wybuchu. Obserwacje kosmicznego promieniowania tła pozwalają nam zajrzeć w jeszcze bardziej odległą przeszłość – kilkanaście miliardów lat temu.

To tak, jakby paleontolog mógł obserwować dinozaurow, buszujące w pierwotnych zaroślach.

Powiedział Pan, że obiekt mniejszy od gromady galaktyk Pana nie interesuje. Czy rzeczywiście Wszechświat można zobrazować jedynie w bardzo dużej skali? Wiemy już co nieco o dynamice Wszechświata. A jaki on jest – ma postać geometrycznej bryły, kuli, półkuli, na co wskazywałaby potoczna i dostępna każdemu obserwacja?..... ▽

Jeżeli tak rzeczywiście powiedziałem, to chyba żartowałem. Gromady składają się z galaktyk, galaktyki z gwiazd. Bez znajomości fizyki gwiazd zmiennych nie można mierzyć odległości, a bez tego niemożliwe byłoby uprawianie kosmologii.

Teoria grawitacji Einsteina łączy własności metrycznej przestrzeni z dynamiką. Krzywizna przestrzeni zależy od własności fizycznych materii, która ją wypełnia. Obecny stan naszej wiedzy sugeruje, że średnia gęstość materii bliska jest tak zwanej gęstości krytycznej. Oznaczałoby to, iż krzywizna trójwymiarowej przestrzeni jest bliska zeru i obowiązuje geometria Euklidesowa.

Jest Pan autorem metody „zważenia” Wszechświata. Wynalazł Pan jakąś specjalną wagę? Pewnie nie chowa Pan jej w piwnicy?

A galaktyki chętnie wchodzą na wagę? Może się odchudzają?.....

Prawo Hubble'a, mówiące że pary galaktyk oddalają się od siebie z prędkością równą odległości pomiędzy nimi, pomnożonej przez pewną uniwersalną stałą, opisuje rzeczywisty Wszechświat jedynie w przybliżeniu. Prawo Hubble'a byłoby spełnione gdyby rozkład materii w przestrzeni był idealnie jednorodny. Rzeczywiste pole gęstości materii jest niejednorodne: galaktyki wykazują tendencje do grupowania się w gromady i supergromady. Niejednorodności powodują zaburzenia przepływu Hubble'a – prędkości względne par galaktyk są mniejsze tam gdzie jest gęściej i na odwrót – galaktyki położone na „pustkowiu” oddalają się od siebie szybciej. Obserwując takie zaburzenia można zmierzyć średnią gęstość ciemnej materii. Okazuje się, że ta gęstość wynosi około 1/3 gęstości krytycznej, o której wspominałem odpowiadając na poprzednie pytanie.

I z tego ważenia wynika, że krzywizna przestrzeni jest ujemna, zgodna z prawidłami geometrii Łobaczewskiego (obrazowo – wklęsła, na siodle). Badając jednak promieniowanie reliktowe, nazywane też promieniowaniem tła, obrazu, kiedy Wszechświat był w niemowlęcym wieku – materią o wielkiej gęstości i niewyobrażalnie wysokiej temperaturze – że jest on jednak płaski. Jak kosmologowie próbują wyjaśnić tę sprzeczność?.....

Byłoby tak w istocie gdyby prócz materii nierelatywistycznej (ciemnej i świecącej), którą uwzględniają moje rachunki nic więcej nie było w kosmicznym spisie inwentarza. Tak jednak nie jest - już wspominaliśmy o obserwacjach supernowych i stałej kosmologicznej. Efekty dynamiczne wywołane przez taką stałą są identyczne z tymi, które otrzymalibyśmy gdyby wszechświat prócz cieczy nierelatywistycznej, jaką jest ciemna materia, wypełniała jeszcze ciecz o ujemnym ciśnieniu, zwana również odpychającą próżnią lub ciemną energią. Obserwacje supernowych sugerują, że gęstość tej odpychającej próżni jest rzędu 2/3 gęstości krytycznej. Jeżeli uwzględnimy jeszcze gęstość ciemnej materii, o której mówiliśmy wcześniej, całkowita gęstość wyniesie $2/3 + 1/3 = 1$, co odpowiada zerowej krzywiznie. Warto zwrócić tu uwagę na fakt, iż ten wynik uzyskano zanim ukazały się pierwsze wyniki z pomiarów widma mocy kątowych fluktuacji promieniowania tła. Te ostatnie obserwacje również sugerują znikającą krzywiznę. O żadnej sprzeczności nie może być tutaj mowy – jest wręcz



Czy Wszechświat jest płaski?

przeciwnie: trzy rodzaje obserwacji prowadzą do takiego samego wniosku.

Prof. Kazimierz Jodkowski na ostatniej Kepleriadzie (15 listopada) pytał podejrzliwie czy koncepcja „ciemnej energii” ma uzasadnienie, czy nie jest konstrukcją taką, jak w przeszłości eter czy ciepłik, pojęcia które szanowały wprowadzić wcześniej sprawdzalne prawa fizyki, ale miały tę wadę, że nie występowały w przyrodzie. Czy to czasem nie krasnoludki (może nawet ciemne krasnoludki) przyspieszają ekspansję Wszechświata? – pytał. No właśnie, co przemawia za tym, że jest to uprawniona teoria?.....

Nie ma mowy o żadnych krasnoludkach. Jak już chyba wyjaśniłem, na poziomie makroskopowym rozumiemy bardzo dobrze fizykę ciemnej materii, gorzej z teorią mikroskopową. Podobnie rzeczy się mają z gęstością energii próżni. Te dwa pytania: o naturę ciemnej energii i ciemnej materii stanowią moim zdaniem dwa najważniejsze nierozwiązane problemy fizyczne naszych czasów.

I bardzo dobrze! Nie po raz pierwszy astronomia stawia wyzwania fizyce. Newton sformułował swoje prawo grawitacji pod naciskiem Halleya, który poszukiwał jednolitego opisu dla ruchu komet i planet. Hel odkryto najpierw na Słońcu, a dopiero później w laboratoriach na Ziemi. Zanim oscylacje neutrinowe zaobserwowano w laboratoriach, pojawiły się one najpierw jako słynny problem deficytu neutrin słonecznych. Wcześniej problem źródła energii gwiazd przyczynił się do rozwoju fizyki jądrowej.

Koncepcja eteru była źródłem paradoksów, które w końcu doprowadziły do sformułowania szczególnej teorii względności i relatywistycznej elektrodynamiki. Podobnie problemy z ciepłikiem doprowadziły do powstania termodynamiki. Paradoks Zenona okazał się prekursorem rachunku różniczkowego i całkowitego. Jestem głęboko przekonany, że podobnie będzie z ciemną energią i ciemną materią. Wskazują one wyraźnie, że nasz obraz Przyrody jest niekompletny. Jeszcze nie wiadomo, czy trzeba będzie zmodyfikować geometrodynamikę Einsteina, czy też teorie mikroskopowej budowy materii, czy też jedno i drugie.

Sześć lat spędził Pan w Stanach Zjednoczonych w renomowanych ośrodkach – Berkeley i Princeton. Na co dzień współpracuje Pan z uniwersytetami w Genewie, Kalifornijskim i Oxfordem. Jak na dziś wygląda geografia myśli kosmologicznej? Czy amerykańska perfekcja techniczna w budowaniu urządzeń obserwacyjnych i obiektów kosmicznych

przekłada się na konstruowanie nowych teorii tłumaczących budowę i dynamikę Wszechświata? Czy we współczesnej astrofizyce Polacy mają taki udział jak w czasach Kopernika?..... ▽

Do roku 1990 istniały dwa główne ośrodki badań w dziedzinie kosmologii o równym mniej więcej znaczeniu: Związek Radziecki i Stany Zjednoczone, przy czym nasi wschodni sąsiedzi byli niedoścignieni w dziedzinie teorii, a Amerykanie w obserwacjach i technikach komputerowych. Po rozpadzie Związku Radzieckiego niektórzy spodziewali się całkowitej dominacji jedyne go pozostałego przy życiu supermocarstwa. Nawet jeżeli do tego doszło, to nie na długo. Podobnie jak w innych dziedzinach globalnej polityki, widać coraz wyraźniej Unię Europejską. Projekty takie jak nowe teleskopy ESO (European Southern Observatory) czy satelita Planck pozwalają żywić nadzieję, że już niedługo nasi młodzi adepci kosmologii nie będą musieli wyjeżdżać z Europy na staże po doktoracie. W końcu tak stało się już w przeszłości w dziedzinie fizyki wysokich energii, kiedy Europejski Ośrodek Badań nad Energią Atomową w Genewie (CERN) kilkakrotnie utarł nosa kolegom zza oceanu.

Równać się z Kopernikiem jest trudno, ale nie wiem kto w ogóle miałby mu sprostac (nie tylko w Polsce). Jeżeli chodzi o poziom polskiej astrofizyki, to nie mamy się czego wstydzić, zwłaszcza zważywszy że nierzadko niskie nakłady na badania naukowe. Ktośkolwiek ma jakieś rozeznanie w poziomie nauk przyrodniczych w kraju, zapytany o to, jacy Polacy mają szanse na otrzymanie nagrody Nobla, wymienia zwykle te same osoby: Bohdana Paczyńskiego i Aleksandra Wolszczana. Obaj są astrofizykami.

Jak daleko dziś kosmologowi do obrazu romantycznego faceta, z zadartą głową zachwycającego się widokiem rozgwieżdżonego nieba? Albo wypatrującego na wysokiej wieży przez lunetę ruchu ciał niebieskich? Na ile „technologie” kosmiczne i techniki komputerowe przyspieszyły tempo odkryć i budowę nowych koncepcji kosmologicznych?..... ▽

Technologie ważne dla kosmologii obserwacyjnej jeszcze nie osiągnęły granic możliwości i błyskawicznie się rozwijają. Dlatego uprawianie kosmologii teraz jest świetnym zajęciem dla osób ambitnych i żądnych przygód intelektualnych. Kosmologia przeżywa teraz swoje złote gody, tak jak fizyka kwantowa w latach 1920-1980.

A jakie są Pana pasje i zainteresowania pozazawodowe? Jak Pan najchętniej wypoczywa?..... ▽

Lubię dobre książki, dobrą muzykę, dobre wino i dobre towarzystwo.

Z Pana wypowiedzi i zachowań emanuje nieodparte wrażenie, że kosmologia jest nie tylko przypadłością zawodową, ale autentyczną pasją – tak jak dobre książki, muzyka, wino i towarzystwo. Życzę zatem, by ta pasja nadal znajdowała tak owocne ujście w postaci przemyśleń o świecie, który nas otacza..... ▽

rozmawiał Andrzej Politowicz

PS. Zainteresowanych informujemy, że w Magazynie Gazety Wyborczej 22 lutego 2001 roku ukazał się obszerny wywiad Piotra Cieślińskiego z prof. Romanem Juszkiewiczem zatytułowany „Czego nie widać”.

