Tony Rothman i *George F. R. Ellis*

Department of Applied Mathematics
University of Cape Town
Cape Town, Republika Południowej Afryki

Metaflacja? *

Metaflation?

Abstract. ** The difficulties in reconciling the inflationary model of the Universe with astronomical evidence are discussed. These are e. g.: observed energy density (being only about 10% of the critical density), the age of the Universe (being equal to the age of some globular clusters, if the missing 90% of density is made up for by relativistic GUT particles — so far unobserved), and the „cosmological constant conundrum" which arises if this constant is invoked to solve the aforementioned „age problem" (why is it so close to zero?). The conclusion is that the arguments for inflation are based on theoretical prejudice rather than on observation, and so the theory should be part of metaphysics rather than of physics.

1. Etymologia podsumowuje ontologię

Fizyka i metafizyka. Natura i poza naturą. W takim znaczeniu terminy te są zwykle używane. Fizyka jest nauką; zajmuje się ona kwestiami, które mogą być rozstrzygnięte przez obserwację i eksperyment. Metafizyka zajmuje się zagadnieniami, w których przyznanie się do porażki nie następuje tak łatwo: istnieniem Boga, treścią duszy. W dwudziestym wieku uczeni szczycą się utrzymywaniem rozróżnienia między nimi. Jak przebiegał Wielki Wybuch jest pytaniem, na które próbują odpowiedzieć kosmologowie, *dlaczego* Wielki Wybuch nastąpił, nie jest takim pytaniem.

Terminy fizyka i metafizyka, tak jak ich przed chwilą użyliśmy, mogłyby sugerować zestawienie nauki z religią. Nie chcemy wywoływać takiego wrażenia. Słowo „fizyka" pochodzi od greckiego *physika*, co dosłownie znaczy „rzeczy natury". „Metafizyka" pochodzi od *meta ta physika*, dosłownie „po rzeczach natury". O ile nam wiadomo, termin ten został po raz pierwszy użyty przez helleńskich wydawców Arystotelesa dla określenia

---

* Artykuł, opublikowany w *Astronomy* **15**, no. 2, 6 (1987), został przetłumaczony za zgodą Autorów i Wydawcy [Translated with permission]. Tłumaczenia dokonano z Preprintu AM 85/18 Uniwersytetu w Cape Town.

Staramy się zamieszczać od czasu do czasu (bez przesady jednak) w *Postępach Fizyki* artykuły dyskusyjne. Niniejszy wydaje się do nich należeć może w większym stopniu niż zwykle. Swoim sposobem krytyki popularnego obecnie modelu inflacyjnego ewolucji Wszechświata zdaje się nawet prowokować do dyskusji. Przedstawiamy go więc razem z uwagami dra Leszka M. Sokołowskiego, autora artykułu o modelu inflacyjnym (*PF* 36, 195 (1985)), oraz komentarzem do tych uwag napisanym przez dra Andrzeja Krasińskiego, tłumacza niniejszego artykułu (przyp. Red.).

** Streszczenie dodane przez tłumacza.

tekstów, które napisał on po swych książkach o fizyce. Średniowieczni teologowie nabrali przekonania, że teksty te następowały „po rzeczach natury", ponieważ omawiane w nich tematy były bardziej oddalone od bezpośredniego postrzegania niż tematy z *fizyki*. Od tamtego czasu „metafizyka" oznaczała zawsze coś, co wychodzi poza fizykę i, od czasów Kanta, przybrała swoje zwykłe znaczenie — rozważanie pytań, na które nie można odpowiedzieć twierdząco lub przecząco za pomocą eksperymentów naukowych. Będziemy używali tego terminu w takim znaczeniu, chociaż Czytelnicy mogą woleć złośliwą charakterystykę daną przez H. L. Menckena: „Metafizyka jest prawie zawsze próbą udowodnienia niewiarygodnego przez odwołanie się do niezrozumiałego".

W przeszłości uczeni nie zgodziliby się z Menckenem. Newton nie czuł żadnych oporów postulując z jednej strony, że siła grawitacji spełnia prawo $1/r^2$, a z drugiej strony stwierdzając, że Bóg był potrzebny, aby uchronić Wszechświat przed zapadnięciem się wskutek działania tego samego prawa. Pierwsze stwierdzenie jest testowalną hipotezą, drugie nie jest. Wielu uczonych siedemnastego i osiemnastego wieku, łącznie z wielkim Christiaanem Huygensem, wierzyło, że kosmos jest wypełniony zamieszkałymi światami, ponieważ takie wyobrażenie o Wszechświecie było bardziej godne nieskończonego Stwórcy niż Wszechświat, który wypełnia samotna Ziemia.

Niemniej jednak, mechanika Newtona i jej następczynie odniosły taki sukces w eliminowaniu Boga i podobnych nietestowalnych hipotez z objaśnienia naukowego, że trzysta lat później nauka mówi zupełnie innym głosem. Steven Weinberg w *Pierwszych trzech minutach* mówi: „Im bardziej Wszechświat wydaje się zrozumiały, tym bardziej wydaje się także bezcelowy".

W tym eseju mamy zamiar przedyskutować teorię kosmologiczną, o której Czytelnicy prawdopodobnie już słyszeli — inflację — lecz przedyskutujemy ją mając na myśli następujące pytania: Czy dwudziestowieczne rozróżnienie między fizyką i metafizyką jest nadal słuszne? Czy kosmologia powróciła do stadium teologicznego, w którym czyni nietestowalne przewidywania? Czy założenia, na których opiera się kosmologia, są sprawdzalne? Czy dzisiejsza kosmologia powinna być nazywana kosmologią czy metakosmologią?

2. Zagadki

W tej serii artykułów [1] dyskutowaliśmy często standardowy model Wielkiego Wybuchu i jego sukcesy. Do naszych obecnych celów potrzebujemy jedynie kilku szczegółów. Standardowy model Wielkiego Wybuchu (albo model FLRW, na cześć Friedmana, Lemaitre'a, Robertsona i Walkera) zakłada, że Wszechświat zaczął rozszerzać się w pewnej skończonej chwili w przeszłości. Uważa się, że nastąpiło to między dziesięcioma a dwudziestoma miliardami lat temu. Świat FLRW jest także *jednorodny* i *izotropowy*. *Izotropowy* znaczy, że Wszechświat wydaje się nam taki sam we wszystkich kierunkach. *Jednorodny* znaczy, że gdybyśmy odbyli podróż daleko od Ziemi do jakiegokolwiek punktu w przestrzeni, to Wszechświat wyglądałby tam tak samo, jak wygląda w naszym sąsiedztwie. *Jednorodny*

[1] Mowa o serii preprintów wydawanej przez Uniwersytet w Cape Town, w której ukazał się oryginał niniejszego artykułu (przyp. tłum.).

i izotropowy Wszechświat nie zawiera żadnych nieregularności, które mogłyby odróżnić jedno położenie od drugiego. Zakłada się, że materia jest rozłożona wszędzie w absolutnie jednostajny sposób. Z tego powodu trudno jest wyobrazić sobie prostszy Wszechświat niż w standardowym modelu Wielkiego Wybuchu. Jest ważne, aby pamiętać, że obserwacje wskazują na tak dokładną izotropię rzeczywistego Wszechświata, gdy patrzymy nań w dostatecznie dużej skali. Nie możemy jednak sprawdzić, że Wszechświat jest jednorodny, ponieważ nie możemy podróżować bardzo daleko od Ziemi w skali odległości kosmologicznych.

Jeśli gęstość materii w modelu FLRW przekracza tzw. „gęstość krytyczną" równą ok. $2 \cdot 10^{-29}$g/cm^3, to Wszechświat przestanie się w końcu rozszerzać i zapadnie się z powrotem. W tym przypadku model nazywa się zwykle „zamkniętym". Jeśli gęstość materii jest mniejsza od wartości krytycznej, to Wszechświat będzie rozszerzał się już zawsze. Taki model określa się zwykle jako „otwarty". Jeśli gęstość materii jest dokładnie krytyczna, to Wszechświat jest nazywany „marginalnie związanym" albo „płaskim". Dwoma najsławniejszymi triumfami standardowego modelu Wielkiego Wybuchu są jego przepowiednie obserwowanych zawartości helu i deuteru w kosmicznym ośrodku i istnienia kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła.

W naszych przeglądach kosmologii wspomnieliśmy także o kilku niepowodzeniach modelu standardowego. Najpoważniejszą trudnością fizyczną jest istnienie osobliwości w momencie Wielkiego Wybuchu, to znaczy chwili, w której ciśnienie, gęstość i temperatura stają się jednocześnie nieskończone i znane prawa fizyki załamują się zupełnie. Czasoprzestrzeń, a właściwie sama fizyka, rozpoczynają istnienie w tej chwili. Poważną trudnością filozoficzną jest zrozumienie, dlaczego Wszechświat miałby zacząć się jako dokładnie izotropowy wszędzie, a zatem dokładnie jednostajny, co zakłada model standardowy. (Więcej szczegółów o modelach kosmologicznych — patrz „Ogród rozkoszy kosmologicznych" w czasopiśmie *Analog*, numer z maja 1985).

Jak się okazuje, model standardowy ma inne problemy, które trzymaliśmy dotąd w ukryciu przed naszymi Czytelnikami. Rozwiązania tych właśnie zagadek podjął się Alan Guth za pomocą swojego scenariusza „Wszechświata inflacyjnego" w swojej sławnej pracy z *Physical Review* z r. 1981. Robiąc to, Guth stworzył sam nieco inflacji — przemysł, który wyprodukował setki prac i nie przerwał produkcji do chwili obecnej.

Pierwsza zagadka, ku której zwrócił się Guth, została wskazana w ciągu poprzedniej dekady przez Roberta Dicke'a i Jima Peeblesa z Uniwersytetu w Princeton i jest teraz znana jako „problem płaskości". Źródłem problemu płaskości jest fakt, że gęstość materii mierzona przez astronomów w rzeczywistym Wszechświecie różni się od gęstości krytycznej o czynnik ok. 10. Możemy wypowiedzieć nawet mocniejsze stwierdzenie: większość badań obserwacyjnych i teoretycznych, jeśli nie wszystkie, wskazują, że gęstość materii barionowej (gęstość neutronów i protonów) jest zawarta pomiędzy ok. czterema a dziesięcioma procentami wartości krytycznej. W zasadzie gęstość materii mogłaby być miliard razy mniejsza albo miliard razy większa niż krytyczna. Nie istnieje zasadniczy powód inny niż zasada antropiczna [2], dla którego nie powinno tak być. A jednak tak się składa, że według obserwacji rzeczywisty Wszechświat różni się od płaskiego o czynnik 10.

[2] Patrz P. C. W. Davies, *Postępy Fizyki* 37, 213 (1986) oraz J. Barrow i F. Tipler, *The anthropic principle in cosmology*, Oxford University Press 1981 (przyp. tłum.).

Mogłaby to być koincydencja, lecz fizycy czują się nieswojo z koincydencjami i szukają przyczyn tkwiących u ich podstaw. Co istotniejsze, nie jest trudno pokazać, że jeśli obecnie Wszechświat różni się od płaskiego o czynnik 10, to w 1 s po Wielkim Wybuchu, na początku tworzenia pierwiastków, musiał być płaski z dokładnością do ok. 1 części na 10^{15}. A w 10^{-35} s, w sławnej epoce wielkiej unifikacji, Wszechświat musiał być płaski z dokładnością do ok. 1 części na 10^{50}. Tak subtelne dostrojenie uderza wielu fizyków jako rzecz wymagająca wyjaśnienia. Inni fizycy wskazują, że w standardowym modelu Wszechświat jest dokładnie płaski w momencie Wielkiego Wybuchu, a więc nie jest dziwne, że jest dostrojony z dokładnością $1 : 10^{50}$ po 10^{-35} s. Dla sceptyków istnieje szereg alternatywnych sposobów wysłowienia problemu płaskości. Podamy jeden z nich teraz, chociaż Czytelnicy będą musieli uwierzyć nam na słowo, że jest to stwierdzenie tego samego problemu.

Oceniamy, że w obserwowalnym Wszechświecie jest ok. 10^{87} fotonów. Liczba ta mogłaby wydawać się równie rozsądna jak każda inna, lecz ma ona dwa aspekty, które wzięte razem martwią niektórych kosmologów. Po pierwsze, jest to bardzo duża liczba według zwykłych wzorców, a po drugie jest to liczba bez jednostek takich jak centymetry czy gramy. W fizyce większość naturalnie występujących liczb „bezwymiarowych" jest rzędu jedności. Myśląc naiwnie można by oczekiwać jednego fotonu we Wszechświecie zamiast 10^{87}. Przyznajemy, że byłby to bardzo ciemny Wszechświat, ale to inna historia. Czytelnikowi o dobrej pamięci argument ten może przypomnieć argument związany z Wielkimi Liczbami Diraca dyskutowany w „Ogrodzie rozkoszy kosmologicznych". W tamtym artykule domagaliśmy się wyjaśnienia liczby barionów w obserwowanym Wszechświecie, która wynosi z grubsza 10^{78}. Ta liczba nie jest niezwiązana z 10^{87}; przeciwnie, związek ten jest wyjaśniony przez nowe teorie wielkiej unifikacji (GUT) [3]. Zatem, prośba o wyjaśnienie problemu płaskości jest zasadniczo prośbą o wyjaśnienie Wielkich Liczb Diraca. Rozwiązanie Gutha jest z drugiej strony bardzo różne od rozwiązania Diraca. Niemniej jednak, jeśli Czytelnik skłonny jest uważać, że kwestia Wielkich Liczb Diraca jest pseudoproblemem, to jest tymczasowo uprawniony do odrzucenia jednym tchem problemu płaskości. W ramach naszego tematu fizyki i metafizyki, oto pierwsza ważna sprawa: problem płaskości jest dylematem metafizycznym, a nie fizycznym. Powodem istnienia 10^{87} fotonów we Wszechświecie są oczywiście słowa Boga „Niech stanie się światło".

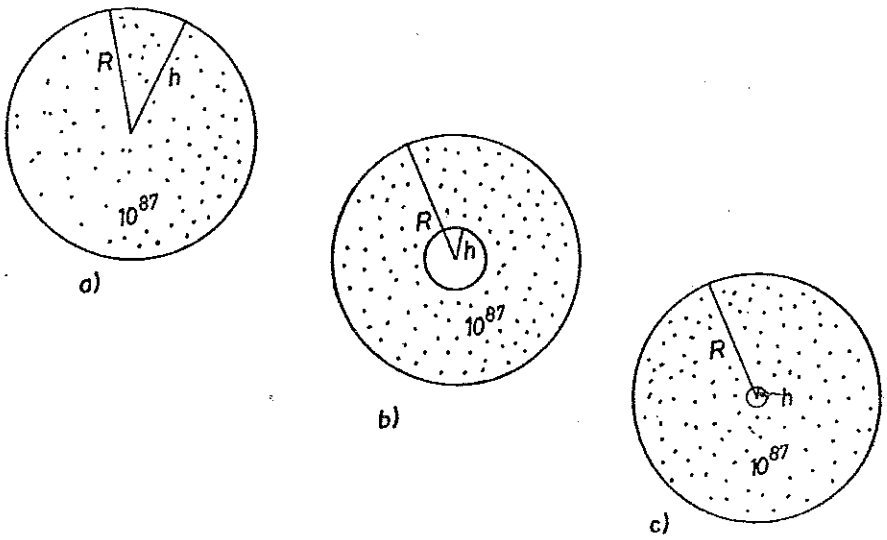
Druga zagadka, wyjaśniona pierwotnie przez Wolfganga Rindlera już w r. 1956, może zaintrygować Czytelnika jako bardziej istotna. Jest ona znana jako „problem horyzontu". Aby objaśnić problem horyzontu, musimy ostrożnie ujawnić pewien fakt dotyczący modelu standardowego, od którego próbuje trzymać się z daleka większość wykładów popularnych: istnieją dwa rozmiary Wszechświata. Pierwszy z nich to po prostu wiek Wszechświata t pomnożony przez prędkość światła c. Oznaczymy tę odległość przez $h = ct$. Ponieważ żaden sygnał nie może poruszać się prędzej niż światło, nie można w czasie t otrzymać informacji z odległości większej niż h. Lepszym sposobem wyrażenia tego faktu jest: nie możemy wiedzieć niczego o zdarzeniach zachodzących poza naszym horyzontem. Odległość h jest trafnie nazwana odległością horyzontu.

Druga ważna miara odległości w modelu standardowym jest zwykle nazywana kosmicz-

[3] Grand Unified Theories (przyp. tłum).

nym czynnikiem skali i jest oznaczana przez R. W przypadku modelu zamkniętego, R można identyfikować z promieniem Wszechświata. W modelu otwartym identyfikacja ta nie jest ściśle poprawna (ponieważ przestrzenne rozmiary modelu otwartego są nieskończone). Dla prostoty pojęciowej ograniczymy więc naszą uwagę do modeli zamkniętych. Model zamknięty można porównać do balonu o promieniu R, który może rozszerzać się lub kurczyć. Jeśli balon rozszerza się, galaktyki czyli cząstki namalowane na powierzchni będą oddalać się jedna od drugiej, lecz całkowita liczba galaktyk lub cząstek nie zmienia się. Przypuśćmy teraz, że w rzeczywistym Wszechświecie o promieniu R znajduje się 10^{87} fotonów. Liczba ta nie zmienia się przy rozszerzaniu lub kurczeniu. Jeśli R zmniejszy się o czynnik dwa, średnia odległość między fotonami zmniejszy się także o czynnik dwa i 10^{87} fotonów zawarte będzie w objętości mniejszej od początkowej o czynnik osiem (ponieważ objętość zmienia się jak R^3).

W związku z problemem horyzontu zbadajmy iloraz h/R. Okazuje się, że w ciągu pierwszych ok. 100 000 lat po Wielkim Wybuchu, R jest proporcjonalne do pierwiastka z wieku Wszechświata, $R \sim t^{1/2}$. Widzieliśmy już, że $h \sim t$. Zatem, w miarę jak t maleje, h maleje szybciej niż R. Innym sposobem wyrażenia tego faktu jest stwierdzenie, że $h/R \sim t^{1/2}$, więc w miarę jak t dąży do zera, h/R dąży też do zera. Objętość zawarta wewnątrz horyzontu w porównaniu z objętością całego Wszechświata, h^3/R^3, dąży do zera jeszcze szybciej (rys. 1).



Rys. 1. Problem horyzontu. Dana cząstka może obserwować tylko te cząstki i oddziaływać tylko z tymi, które leżą wewnątrz jej horyzontu h. Przypuśćmy, że wewnątrz promienia Wszechświata R znajduje się 10^{87} fotonów. Jeśli dzisiaj $h = R$, to możemy obserwować wszystkie 10^{87} fotonów we Wszechświecie. Ta sytuacja jest pokazana na rysunku (a). Jednakże w ciągu pierwszych 100 000 lat po Wielkim Wybuchu iloraz h/R zmienia się jak $t^{1/2}$. Zatem h zbliża się do zera szybciej niż R. W 1 sekundę po Wielkim Wybuchu (b), h/R wynosiło około 10^{-9} i objętość obserwowalnego Wszechświata była tylko ułamkiem $h^3/R^3 \approx 10^{-27}$ całego Wszechświata. W rezultacie, tylko $10^{-27} \cdot 10^{87} = 10^{60}$ fotonów znajdowało się wewnątrz horyzontu danej cząstki i mogło z nią oddziaływać. W chwili $t = 10^{-35}$ s (c) h/R wynosiło ok. 10^{-27}, objętość horyzontu była znikomym ułamkiem 10^{-81} całości i tylko 10^6 fotonów było w kontakcie przyczynowym. W chwili 10^{-43} s (nie pokazanej) nie było żadnych cząstek wewnątrz horyzontu, ale całe pojęcie czasu może załamać się tutaj — w epoce grawitacji kwantowej. Wiemy, że Wszechświat był gładki w ok. 1 s po Wielkim Wybuchu. Jak doszło do tego, jeśli tylko nieznaczny ułamek cząstek mógł oddziaływać?

Ten wynik ma prostą, ale zaskakującą interpretację. Mówi on, że w miarę zbliżania się do Wielkiego Wybuchu cały Wszechświat — i wszystkie cząstki w nim — znajdą się w końcu poza odległością horyzontu h. Aby zobaczyć to jaśniej, załóżmy, że możemy obserwować wszystkie 10^{87} fotonów we Wszechświecie. Oznacza to, że cały Wszechświat leży wewnątrz naszego horyzontu, czyli że $h = R$ i $h/R = 1$. W 1 sekundę po Wielkim Wybuchu, h/R było równe ok. 10^{-9} i h^3/R^3 było równe 10^{-27}. Objętość horyzontu wynosiła tylko 10^{-27} całkowitej objętości, więc można było obserwować tylko 10^{60} fotonów, nieznaczny ułamek 10^{87}. W chwili 10^{-35} s, h/R wynosiło około 10^{-27}, objętość horyzontu stanowiła tylko 10^{-81} całkowitej objętości i tylko 10^6 fotonów można było znaleźć wewnątrz horyzontu. W chwili 10^{-43} s, w zasadzie żadne cząstki nie znajdowały się wewnątrz horyzontu.

Ponieważ dana cząstka nie może wymieniać informacji z jakąkolwiek inną cząstką, która leży na zewnątrz jej horyzontu, widzimy, że we wczesnym Wszechświecie właściwie wszystkie cząstki były starannie izolowane. W chwili 10^{-35} s dany foton mógł oddziaływać tylko ze swoimi najbliższymi 10^6 sąsiadami i nie wiedział nic o tym, co robiło pozostałe 10^{87} fotonów we Wszechświecie. Czy powinno to nas martwić?

Tak jak podkreślaliśmy, tu i gdzie indziej, obserwacje pokazują, że Wszechświat jest wysoce izotropowy. Wielu kosmologów uważa to za rzecz nadzwyczaj nieprawdopodobną, że Wszechświat rozpoczął ewolucję w sposób całkowicie izotropowy. Wydaje im się daleko bardziej prawdopodobne, że Wielki Wybuch nastąpił w sposób całkowicie chaotyczny i stopniowo izotropizował się, czyli stawał regularny. Kosmologowie, którzy skłaniają się ku temu punktowi widzenia, mogą być nazwani rzecznikami zasady największego prawdopodobieństwa. Niestety, problem horyzontu wpuszcza każdego członka kultu największego prawdopodobieństwa w niebagatelną ślepą uliczkę, gdyż Wszechświat nie mógłby w tym przypadku stać się izotropowy. Ponieważ cząstki bardziej odległe niż odległość horyzontu h nie mogły oddziaływać po Wielkim Wybuchu, nie istnieje w zasadzie żaden sposób, w który mogłyby one wygładzić nieregularności w skalach większych niż ta odległość. Pytanie stwarzane przez problem horyzontu może być wypowiedziane inaczej: dlaczego nasz obecny Wszechświat nie jest chaotyczny tak jak świat w ogóle, a biurokracje administracyjne w szczególności.

Jednej z odpowiedzi dostarczył radziecki astrofizyk J. B. Zeldowicz, który zakończył podobną dyskusję z T. Rothmanem wykrzykując: „Jestem przekonany, że Wszechświat zaczął się izotropowo!". Zeldowicz mógłby więc być nazwany wyznawcą zasady prostoty, która utrzymuje, że Wszechświat zaczął się w najprostszy możliwy sposób — od zupełnej izotropii. Jeśli Czytelnik skłania się ku temu punktowi widzenia, to nie ma potrzeby wyjaśniania izotropii Wszechświata — założył on ją od początku. Problem horyzontu staje się nieistotny: to prawda, że w pobliżu Wielkiego Wybuchu cząstki były niezdolne do porozumiewania się i przez to do izotropizacji Wszechświata, ale kontakt taki byłby zbędny, ponieważ Wszechświat już przedtem rozszerzał się izotropowo.

Wnioskujemy, że drugi problem, którego rozwiązania podejmuje się inflacja, może być także metafizyczny. Bóg rzekł: „Niech Wszechświat będzie izotropowy". Zarówno G. F. R. Ellis, jak T. Rothman wyznają kult największego prawdopodobieństwa, co oznacza, że problem horyzontu jest poważnym dylematem. Ponadto twierdzimy, że po chwili

namysłu problem płaskości redukuje się do problemu horyzontu [4]. Zatem, jeśli Czytelnik wierzy, że problem horyzontu nie jest pseudoproblemem, to jest zmuszony przyznać, że problem płaskości też nie jest pseudoproblemem. Z drugiej strony, liczba zagadek, które inflacja podjęła się rozwiązać, została zredukowana z dwóch do jednej. Bóg rzekł: „Subtelność lecz nie złośliwość".

3. Inflacja [5]

Dla tematu tego eseju nie jest konieczne badanie wszystkich bocznych uliczek pierwotnej „starej" inflacji Gutha ani „nowej" inflacji zaproponowanej niezależnie w latach 1982—83 przez A. Lindego z Radzieckiej Akademii Nauk oraz Albrechta i Steinhardta z Uniwersytetu Stanu Pennsylwania; ani nawet jeszcze nowszych: inflacji „pierwotnej", inflacji „supersymetrycznej" i ich niezliczonych odmian. Jednakże zrozumienie podstaw inflacji będzie użyteczne do tego, co mamy do powiedzenia potem.

Niech Czytelnik wyobrazi sobie, że jest mrówką pełzającą po opisanej wcześniej powierzchni balonu. W stanie nienadmuchanym balon może być tak mały, że krzywizna powierzchni będzie wyraźnie widoczna i Czytelnik będzie mógł całkowicie okrążyć jego kulę w krótkim czasie. Przypuśćmy, że balon zostaje nagle nadmuchany o trzydzieści lub czterdzieści rzędów wielkości, tzn. o czynnik 10^{30} albo 10^{40}, albo nawet 10^{100}. Jako skromnej mrówce poruszającej się pieszo, powierzchnia będzie się Czytelnikowi wydawała bardziej płaska niż stepy Azji, zaś horyzont, który przedtem był bardzo blisko, będzie teraz tak daleko, że nie będzie go widać.

Analogię z balonem wybraliśmy nieprzypadkowo. Scenariusz inflacyjny Gutha sugeruje, że bardzo podobnie działo się w prawdziwym Wszechświecie. W chwili z grubsza 10^{-35} s po Wielkim Wybuchu, Wszechświat przeszedł przez krótki okres wykładniczego rozszerzania się aż do momentu, powiedzmy, 10^{-30} sekund, w ciągu którego pierwotna kula ognista została rozdmuchana o przynajmniej trzydzieści rzędów wielkości. Naszkicujemy przebieg tego procesu za chwilę, lecz na razie ważne jest uświadomienie sobie, że takie nadmuchanie uczyniłoby Wszechświat nadzwyczaj płaskim. Powiedzieliśmy, że płaski Wszechświat to ten, który ma gęstość krytyczną. Dla Czytelnika powinno więc być wiarygodnym stwierdzenie, że okres inflacyjny doprowadza gęstość materii Wszechświata do wartości krytycznej. Innymi słowy, niezależnie od wartości gęstości przed inflacją, po inflacji gęstość jest z dobrym przybliżeniem krytyczna. Praktycznie biorąc, Wszechświat jest płaski i problem płaskości znika. Gęstość równa obecnie krytycznej jest najważniejszą przepowiednią scenariusza inflacyjnego i należy o tym koniecznie pamiętać.

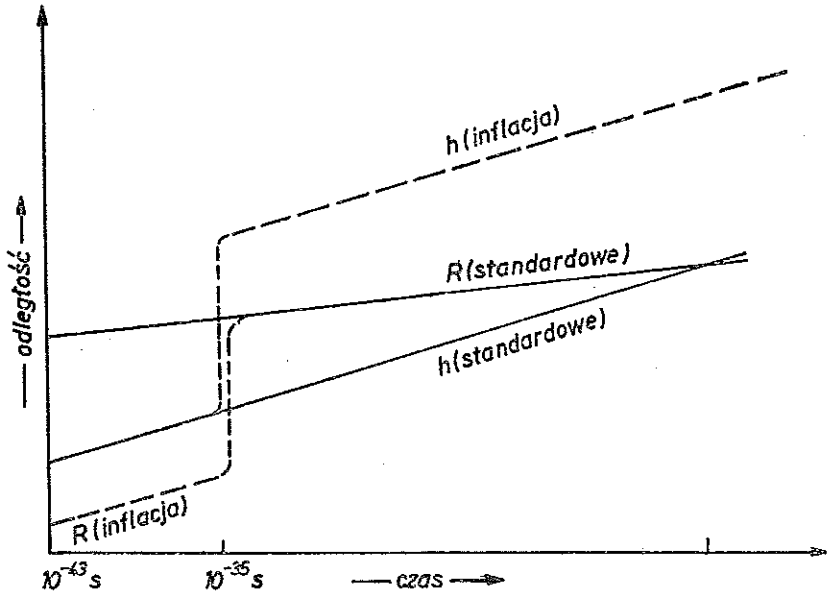
Za jednym zamachem znika też problem horyzontu. (Nie jest to niespodzianką, jeśli są one w gruncie rzeczy tym samym problemem). Proszę przypomnieć sobie, że w chwili

---

[4] Ta sprawa nie jest chyba jasno przedstawiana ani w literaturze naukowej, ani w popularnej, ale wydaje się nam, że te dwa problemy są tożsame.

[5] W języku angielskim to samo słowo *inflation* oznacza (nieprzypadkowo) zarówno „inflację" w sensie omawianej tu teorii (i w sensie ekonomicznym), jak i „nadmuchiwanie" czy „nadymanie". W tłumaczeniu konieczne było używanie polskiej terminologii, która tę tożsamość słów (i pojęć) usuwa (przyp. tłum.)

10^{-35} s rozmiar horyzontu był w przybliżeniu 10^{27} razy mniejszy niż czynnik skali R i cząstki nie mogły oddziaływać. Gdyby horyzont był 10^{27} razy większy, albo odwrotnie, gdyby czynnik skali był 10^{27} razy mniejszy niż myślano przedtem, problem horyzontu zniknąłby. Jak pokazano na rys. 2, inflacja dopuszcza tę możliwość; we wczesnych chwilach czynnik skali R był, wbrew modelowi standardowemu, *mniejszy* niż rozmiar horyzontu, więc cząstki mogły oddziaływać i wygładzić nieregularności.

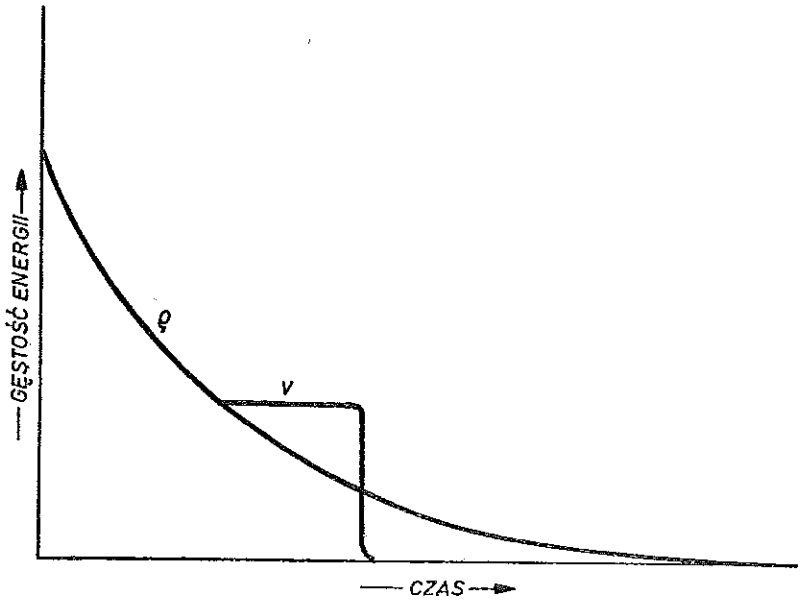


Rys. 2. Rozwiązanie problemu horyzontu przez inflację (wysoce schematyczne). Kosmiczny czynnik skali R i rozmiar horyzontu h w modelu standardowym są narysowane liniami ciągłymi. R i h są przyrównane do siebie w chwili obecnej, tak jak na rys. 1. W chwili 10^{-35} s h/R wynosiło ok. 10^{-27} i tylko 10^{6} fotonów mogło oddziaływać. Problem ten znika, jeśli w chwili 10^{-35} s R byłoby mniejsze o czynnik ok. 10^{27}. Inflacja (linie przerywane) pokazuje, jak można by to osiągnąć. W przeciwieństwie do modelu standardowego R jest początkowo mniejsze niż h o potrzebny czynnik, lecz w chwili 10^{-35} s zarówno R, jak h zostały rozdmuchane o przynajmniej 27 rzędów wielkości, jak pokazano na wykresie. Po inflacji, R i h ewoluują dalej jak w modelu standardowym, lecz horyzont jest wypchnięty daleko poza obecnie obserwowany Wszechświat.

Należy podkreślić, że inflacja dostarcza koniecznego, ale niewystarczającego „czynnika izotropizującego". Cząstki mają teraz okazję do oddziaływania, ale inflacja nie precyzuje, *jak* one oddziaływały. Trzeba albo przywołać inny mechanizm dla wyjaśnienia, jak Wszechświat stał się izotropowy (taki jak kwantowe tłumienie anizotropii dyskutowane w „Ogrodzie"), albo scenariusz inflacyjny powinien sam pokazać, że niezależnie od stanu początkowego Wszechświata wynik końcowy jest zawsze jednorodny i izotropowy. Powrócimy do tej ważnej sprawy.

Naszkicowaliśmy tu, co robi inflacja. Spróbujmy teraz dać Czytelnikom wyobrażenie, dlaczego inflacja następuje. Musimy znów odwołać się do analogii. Wiadomo, że jeśli wziąć kolbę z parą o bardzo wysokiej temperaturze i ochładzać ją stopniowo, to można ochłodzić ją daleko poniżej 100° C i nie zaobserwować skraplania. Para, która istnieje poniżej zwykłego punktu kondensacji 100°, jest nazywana przechłodzoną. Stan ten jest bardzo niestabilny i jeśli najmniejsza kropelka wody zostanie wprowadzona do kolby, para będzie szybko skraplała się wokół niej tak długo, aż cała zawartość kolby zmieni się w płynną wodę.

W swoim pierwotnym scenariuszu inflacyjnym Guth wystąpił z wnioskiem, że Wszechświat przeszedł przez podobną zmianę fazy. Wszechświat rozszerzał się, a jego składniki — fotony, elektrony, neutrina i inne cząstki — ochładzały się. Próżniowa energia czasoprzestrzeni ochładzała się także. W nowoczesnej fizyce próżnia czasoprzestrzeni nie jest bynajmniej pusta. Przeciwnie, jest to arena, na której cząstki mogą być tworzone i niszczone i która ma wiele własności możliwych do obliczenia i zmierzenia. Ze „stanem podstawowym" Wszechświata związana jest gęstość energii, która także zmienia się w miarę rozszerzania się Wszechświata. Pod pewnymi względami gęstość energii próżni jest podobna do gęstości energii związanej ze zwykłymi cząstkami. Otóż w chwili ok. 10^{-35} s zwykłe cząstki ochładzały się nadal, lecz energia próżni została „zawieszona" w stanie przechłodzonym, czyli metastabilnym (rys. 3). Według teorii względności prędkość eks-



Rys. 3. Prędkość rozszerzania się Wszechświata zależy od jego gęstości energii (ϱ). W modelu standardowym ϱ maleje jak pokazano i dlatego prędkość rozszerzania się Wszechświata spada. Inflacja postuluje, że w chwili 10^{-35} s energia próżni (V) osiąga stan metastabilny i nie zmniejsza się dalej. Gęstość energii Wszechświata jest teraz dużo wyższa niż w modelu standardowym i rozszerzanie następuje także szybciej. W pewnej chwili energia próżni spada do obecnej wartości i inflacja kończy się. Jedną z trudności tego scenariusza jest to, że nikt nie wie, jaka powinna być końcowa wartość energii próżni (patrz paragraf 4).

pansji Wszechświata zależy od gęstości energii jego zawartości. W modelu standardowym gęstość energii cząstek maleje w miarę rozszerzania się Wszechświata i prędkość rozszerzania się maleje także. Scenariusz inflacyjny sugeruje jednak, że energia próżni została „zawieszona" na wyższej stałej wartości niż działoby się to w modelu standardowym. Rozszerzanie odbywa się dalej z większą prędkością niż odbywałoby się w standardowym Wielkim Wybuchu. To właśnie jest inflacja. Jeśli energia próżni pozostaje stała przez długi czas, Wszechświat może rozszerzyć się o wymagany czynnik 10^{30} albo 10^{40}. W pewnej chwili rozpoczyna się kondensacja; „kropelka wody" zostaje wprowadzona do przechłodzonego układu, energia próżni szybko opada do wartości, którą miałaby w zwykłych okolicznościach i inflacja kończy się.

Powinniśmy zaznaczyć, że Guth nie wykonał szczegółowych rachunków, aby udowodnić, że przechłodzony stan Wszechświata *musiał* nastąpić. Zasugerował on, że zdarzenie to było *możliwe* i *jeśli* nastąpiło, to zaszła inflacja.

Powinniśmy także wspomnieć, że pierwotny scenariusz inflacyjny ma poważny problem. Guth uświadomił sobie, że spadek energii próżni nastąpiłby, podobnie jak skraplanie pary, w różnych chwilach dla różnych miejsc. Jednak w odróżnieniu od kolby z parą Wszechświat rozszerza się i tempo rozpadu próżni musi zrównać się z szybkością rozszerzania się Wszechświata, aby kondensacja została wszędzie zakończona. Guth stwierdził, że na ogół tak się nie działo i że wynikający stąd Wszechświat byłby bardzo nieregularny — niektóre jego części znajdowałyby się w jednym stanie, niektóre w drugim. Ponieważ obserwacje pokazują, że Wszechświat jest bardzo regularny, trudność ta wykluczyła „starą pierwotną" inflację.

Wprowadzenie „nowej" inflacji przez Lindego oraz Albrechta i Steinhardta rozwiązało ten problem „wyjścia z wdziękiem". Mechanizm rządzący nową inflacją jest pojęciowo trudniejszy niż stara inflacja i nie będziemy wnikać w szczegóły (Czytelnik może zajrzeć do artykułu Gutha i Steinhardta w *Scientific American* z maja 1984). Wystarczy powiedzieć, że energia próżni istnieje także w tym scenariuszu i zachowuje dostatecznie wysoką wartość przez dostatecznie długi czas, aby napędzać inflację bardzo podobnie jak w pierwotnym modelu. Zasadnicza różnica polega na tym, że w nowej inflacji jeden mały pęcherzyk przestrzeni jest nadmuchiwany tak, że obejmuje cały obserwowalny Wszechświat — a nawet więcej. Nie widzimy nieregularności, ponieważ zostały wypchnięte daleko poza nasz horyzont.

Nowa inflacja ma dodatkową przewagę nad starą inflacją przez to, że rozwiązała trzecią kosmologiczną zagadkę. Jest to problem monopola. Teorie wielkiej unifikacji przewidują, że Wszechświat powinien być wypełniony monopolami magnetycznymi. Monopol magnetyczny można wyobrażać sobie jako izolowany ładunek magnetyczny, jak pojedynczy północny albo południowy biegun magnesu. Nikt nigdy nie widział czegoś takiego. Magnesy zawsze mają obydwa bieguny, północny i południowy. Nowa inflacja rozwiązuje ten dylemat w trywialny sposób. Mówi ona, że duża gęstość monopoli wyprodukowanych we wczesnym Wszechświecie zostaje po prostu rozcieńczona w okresie inflacji. Podczas gdy w standardowym modelu oczekiwalibyśmy, że będziemy znajdować monopole wszędzie, inflacja powiększa objętość przestrzeni w takim stopniu, że średnio należałoby oczekiwać jednego monopola w obserwowalnym Wszechświecie. Dotychczas go nie znaleźliśmy [6].

Niestety, rozpoznano szereg schorzeń nowego scenariusza inflacyjnego, z których wspomnimy dwa. Po pierwsze, Wszechświat najwyraźniej przechodzi w niewłaściwą próżnię. Mówiąc nieściśle, inflacja umieszcza nas we Wszechświecie, w którym fizyka „stanu podstawowego" nie jest tą fizyką, którą przewiduje obecnie faworyzowana teoria.

Po drugie, inflacja przewiduje, że pewne fluktuacje gęstości materii *będą* istniały po zakończeniu inflacji. Przewiduje też rozmiar tych fluktuacji. Otóż inni teoretycy uważają,

---

[6] W r. 1982 doniesiono (patrz *Physics Today*, czerwiec 1982, s. 17), że B. Cabrera zaobserwował w swoim detektorze sygnał zgodny z oczekiwanym dla monopola. Nikt dziś nie wierzy, że mógł to być monopol, ale nie podano dotąd wytłumaczenia tej „obserwacji" (przyp. tłum.).

że wiedzą, jak tworzą się galaktyki. Galaktyki są oczywiście fluktuacjami gęstości materii we Wszechświecie; gęstość materii jest wyższa wewnątrz galaktyk niż poza galaktykami. Teoretycy ci utrzymują, że pewien rozmiar fluktuacji jest potrzebny w chwili 10^{-30} s po Wielkim Wybuchu, aby rozpocząć proces formowania galaktyk. Okazuje się, że inflacja daje fluktuacje ok. 100 000 razy za duże. Z tego powodu większość kosmologów odrzuciła nową inflację i poszukuje jeszcze nowszych, poprawionych wersji.

Jeśli Czytelnik uważa, że jest oznaką najwyższej arogancji ze strony fizyków wiara, iż rozumieją oni powstawanie galaktyk w chwili 10^{-30} s wystarczająco dobrze, aby zaakceptować lub odrzucić teorię taką jak inflacja, to nie jesteśmy nieżyczliwi temu poglądowi i będziemy o tym mieli więcej do powiedzenia później.

4. Metaflacja

Scenariusz inflacyjny podjął się rozwiązania dwu problemów, horyzontu i płaskości, i po drodze przypadkiem rozwiązał trzeci, zagadkę monopoli. Lecz w rzeczywistości inflacja usiłuje zrobić znacznie więcej. Pierwotny scenariusz Gutha pokazał, że niezależnie od gęstości początkowej we Wszechświecie gęstość obecna powinna być krytyczna. Każdy model lub teoria, które pokazują, że stan końcowy układu jest niezależny od warunków początkowych, są bardzo potężne. Gdyby można było dowieść, że inflacja rozpoczęła od jakiegokolwiek wszechświata, bardzo chaotycznego, anizotropowego, niejednorodnego, i wyprodukowała izotropowy Wszechświat, który dziś obserwujemy, wówczas scenariusz ten dokonywałby bardzo wiele. Ponieważ to właśnie jest ukrytym programem inflacji, wielu fizyków-teoretyków wykazuje wielką stronniczość na jej korzyść. Niektóre popularne przedstawienia dawały już do zrozumienia, że inflacja jest sprawdzoną teorią. Zadajemy teraz to brzydkie pytanie: czy stronniczość ta jest uzasadniona i czy inflacja została w jakikolwiek sposób sprawdzona? Ostrzega się Czytelnika, że następujące dalej opinie są heretyckie i niewątpliwie ściągną na siebie gniew naszych kolegów.

Po pierwsze, powtarzamy, że problemy, które inflacja zamierzała rozwiązać, są innego rodzaju niż przepowiedzenie ruchu perihelium Merkurego lub linii widmowych helu, dla których możemy doświadczalnie zmierzyć poprawny wynik. Rzecz w tym, że prawie-płaskość Wszechświata robi na nas wrażenie rzeczy podejrzanej, podobnie jak fakt, że Wszechświat wydaje się izotropowy. Niestety, mamy do dyspozycji tylko jeden Wszechświat. Nie możemy zatem twierdzić, że wiemy z pewnością, jak zachowują się wszechświaty w ogóle, a więc nie możemy twierdzić, że przeciętny wszechświat powinien być płaski albo zakrzywiony, izotropowy albo anizotropowy. Wolno nam założyć, że kosmos zaczął się jako płaski i izotropowy, i w tym przypadku kwestie, ku którym zwraca się inflacja, znikają. Dlatego zagadnienia te są filozoficzne a nie fizyczne.

Po drugie, załóżmy, że wielkie zamierzenie inflacji jest poprawne: dowolny zbiór warunków początkowych przed inflacją daje w wyniku Wszechświat, w którym żyjemy. Oznacza to, że obserwując obecny Wszechświat nie możemy przewidywać wstecz i opisywać Wszechświata przed okresem inflacyjnym. Każdy wynik jest słuszny, ponieważ wszystkie dają obecny Wszechświat. Znaczy to, że na przykład dziedzina grawitacji kwan-

towej, która próbuje wypowiadać stwierdzenia o epoce przedinflacyjnej, musi z założenia robić niesprawdzalne przepowiednie. Nie jest to oczywiście argument przeciwko inflacji. Stwierdza on jednakże, że *albo* inflacja jest w błędzie, *albo* jakaś inna gałąź kosmologii staje się metafizyczna.

Należy zapytać, czy inflacja wykonuje swoje wielkie zamierzenie. Podczas gdy niektórzy teoretycy twierdzą, że inflacja zachodzi we wszechświatach anizotropowych i niejednorodnych, jedyne szczegółowe *rachunki* zostały dotychczas wykonane we wszechświatach izotropowych. Pokazaliśmy w paragrafie 2, że problem horyzontu nie może zostać rozwiązany we wszechświecie izotropowym, ponieważ nie ma tam problemu. Nie jest więc jasne, czy obecne rachunki logicznie rozwiązały cokolwiek. (Do czasu napisania tego artykułu wykonano kilka wstępnych obliczeń w kosmologiach anizotropowych i niejednorodnych ze sprzecznymi wynikami i jesteśmy zmuszeni uznać je za nieprzekonujące.)

Z komplementarnego punktu widzenia, niektóre spośród argumentów wysuniętych przeciwko inflacji wydają się także niesprawdzalne. Nowa inflacja została odrzucona, ponieważ wytwarzała fluktuacje w chwili 10^{-30} s, które stały w sprzeczności z wymaganiami pewnego modelu powstawania galaktyk. Na temat natury powstawania galaktyk istnieje tyle niezgodnych poglądów, nie wspominając o stanie Wszechświata w chwili 10^{-30} s, że jakikolwiek argument tego rodzaju nie może być uznany za oparty na solidnych zasadach fizycznych. A zatem, jeden niesprawdzony model został odrzucony z powodu innego niesprawdzonego modelu.

Ale czy istnieją jakiekolwiek eksperymentalne dowody inflacji? Można jedynie odpowiedzieć — nie. Poprawność samego modelu inflacji zależy w pierwszym rzędzie od poprawności teorii wielkiej unifikacji, które dostarczają mu podstaw. Standardowy model GUT uczynił zaskakującą przepowiednię, że proton powinien rozpadać się na lżejsze cząstki w skali czasowej ok. 10^{32} lat. Przeprowadzono zawiłe eksperymenty w celu zmierzenia tego zjawiska, ale do dziś rozpadu protonu nie zaobserwowano. Jeśli GUT trzeba będzie w końcu odrzucić, także inflacja zostanie odrzucona.

Stwierdzenie, że Wszechświat powinien mieć dokładnie gęstość krytyczną, jest jedyną sprawdzalną przepowiednią, którą czyni inflacja, i przepowiednia ta wydaje się być fałszywa. Metafizyczne aspekty propozycji wysuniętych w celu naprawienia tej sytuacji staną się szczególnie jasne w dalszym ciągu niniejszego tekstu.

Powiedzieliśmy w paragrafie 2, że prawie wszystkie badania wskazują, iż obecna gęstość Wszechświata jest znacznie mniejsza od krytycznej. Mówiąc dokładniej, obserwowana obfitość helu może być wytworzona tylko wtedy, gdy gęstość materii barionowej (neutronów i protonów) wynosi ok. 3—4% wartości krytycznej. Badania ruchów gromad galaktyk mogą podnieść tę liczbę do mniej więcej 10%.

Stajemy już przed dylematem — albo odrzucamy inflację jako sprzeczną z obserwacjami, albo postulujemy jakąś nieobserwowalną formę materii, która musi uzupełnić 90% masy Wszechświata. Kosmologowie-teoretycy wybrali tę drugą drogę. Najoczywistszymi kandydatami są neutrina o niezerowej masie, które uważano za odkryte w r. 1980 (*Analog*, 25 maja 1981). Nawet takie neutrina nie mają bardzo dużej masy. Jest ich za to bardzo dużo — neutrina przewyższają liczebnie protony i neutrony w naszym Wszechświecie w stosunku około miliarda do jednego. Gdyby te neutrina miały masę z grubsza 10 elektronowoltów, czyli 1/50000 masy elektronu, całkowita gęstość masy w postaci neutrin

byłaby wystarczająca do zapełnienia luki między gęstością obserwowaną a krytyczną. Wyniki z r. 1980, w których twierdzono, że neutrina mają masę, nie zostały jednakże odtworzone i jesteśmy zmuszeni wyciągnąć wniosek, że mamy mało dowodów, o ile mamy jakiekolwiek, istnienia takich cząstek.

Teoretycy nie dają się odstraszyć. Teorie wielkiej unifikacji i ich nowsze odpowiedniczki, SUSY-GUT [7], przepowiadają, że wiele dotychczas nie wykrytych cząstek istniałoby w chwili 10^{-35} s po Wielkim Wybuchu. Cząstki te mogły rozpaść się na lżejsze cząstki, podobne do masywnych neutrin, które zapełniłyby Wszechświat i wytworzyły brakującą gęstość. Podkreślamy, że nie ma dowodów na istnienie tych cząstek. Czytelnik może przyjąć punkt widzenia teoretyka: cząstki przewidywane przez GUT i SUSY-GUT będą wkrótce odkryte i cały kompleks GUT-inflacyjny zostanie obroniony. Pokażemy zaraz, że taki pogląd pogarsza tylko cały problem z punktu widzenia astronoma.

Teoria Wielkiego Wybuchu przewiduje, że Wszechświat rozpoczął się w skończonej przeszłości. Dokładny wiek zależy od tempa rozszerzania się, które z kolei zależy od gęstości materii i od tego, czy Wszechświat składa się głównie z barionów, czy z promieniowania (cząstek, które zasadniczo zachowują się jak fotony i poruszają się z prędkościami świetlnymi lub prawie świetlnymi). Jeśli model inflacyjny jest słuszny, i jeśli przeważająca część materii Wszechświata zawiera się w barionach, nie jest trudno pokazać, że wiek Wszechświata musi wynosić $t = 2/(3H)$. H jest tutaj sławną stałą Hubble'a, która wiąże odległość galaktyki z prędkością, z jaką galaktyka pozornie oddala się od nas. Konkretnie, „prawo Hubble'a" stwierdza, że $v = Hd$, gdzie d jest odległością galaktyki, a v jest prędkością oddalania się. Gdybyśmy dla przykładu wzięli odległość do najdalszej galaktyki i podzielili ją przez prędkość oddalania się v, otrzymalibyśmy pewien czas, H^{-1}. Ponieważ podzieliliśmy rozmiar obserwowalnego Wszechświata przez prędkość jego rozszerzania się, nie jest niespodzianką, że czas H^{-1} jest przybliżonym wiekiem Wszechświata. Należy pamiętać, że samo H jest *odwrotnością* wieku Wszechświata; im większe H, tym mniejszy wiek Wszechświata i vice versa.

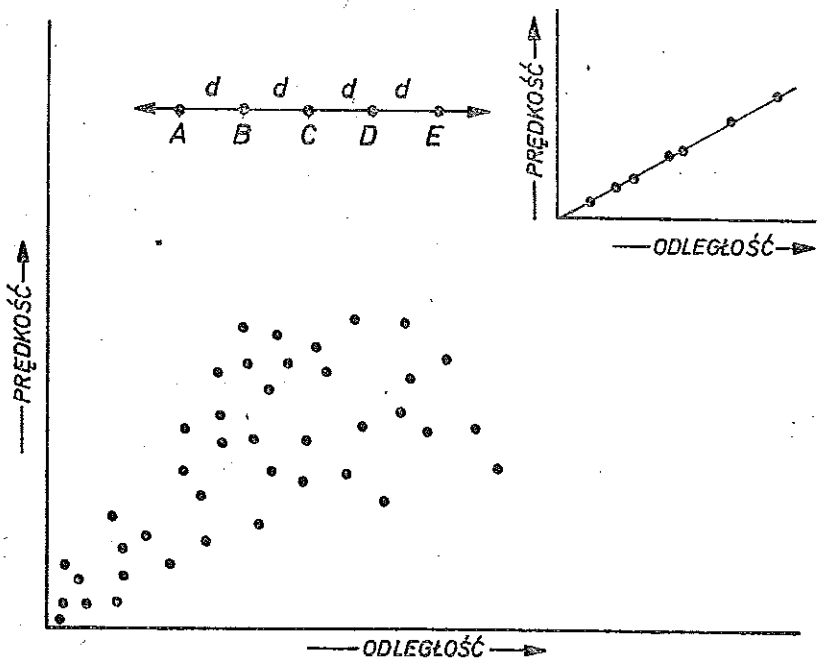
Stała Hubble'a musi być mierzona doświadczalnie. W zasadzie jest to łatwa sprawa: rysujemy po prostu wykres prędkości wielu galaktyk w funkcji ich odległości. Nachylenie takiego wykresu będzie równe H (patrz rys. 4). Niestety, nie jest tak łatwo określić odległości do galaktyk i w rezultacie stała H nie jest znana bardzo dokładnie. H jest zwykle zapisywane w jednostkach kilometr/sekunda/megaparsek. Ponieważ zarówno kilometry, jak i megaparseki reprezentują odległości i skracają się, jest to raczej perwersyjny sposób zapisywania 1/sekunda. De Vaucouleurs systematycznie twierdził, że wartość H jest większa niż 100 km/sek/Mpc, lecz większość badaczy wierzy, że H jest bliższe 50 km/sek/Mpc. Widzieliśmy niewiele przypadków twierdzenia, że H jest mniejsze od 45, a wcale nie było takich ocen w ostatniej dekadzie. Aby dać Czytelnikowi wyczucie liczb, $H = 50$ km/sek/Mpc przekłada się na ok. $5 \cdot 10^{-11}$ lat^{-1}. Według scenariusza inflacyjnego wiek Wszechświata wynosi wtedy $t = (2/3)H^{-1} = 14$ miliardów lat.

Dlaczego zrobiliśmy tę dygresję? Z pewnością jest rzeczą rozsądną wierzyć, że wiek gwiazd musi być mniejszy niż wiek Wszechświata. Penny i Dickens otrzymali ostatnio wiek 14-18 miliardów lat dla gromady kulistej znanej pod nie przemawiającą do wyobraźni

[7] Supersymetryczne teorie wielkiej unifikacji (przyp. tłum.).

nazwą NGC 6752 (NGC jest skrótem od New General Catalogue [8]). Widać, że dolna granica ich pomiaru, 14 miliardów lat, czyni wiek tej gromady dokładnie równym wiekowi Wszechświata! To jest w najlepszym wypadku niewiarygodne, ponieważ utworzenie gwiazd musi zająć *pewien* czas po Wielkim Wybuchu. Allan Sandage sugeruje, że potrzebny jest czas ok. $(1/5)H^{-1}$. Aby objąć gromadę kulistą NGC 6752, która ma przynajmniej 14 miliardów lat, wiek Wszechświata musi wynosić przynajmniej $t = 14+(1/5)H^{-1}$ lat. Używając wzoru inflacyjnego dla t, otrzymujemy $(2/3)H^{-1} \geqslant 14+(1/5)H^{-1}$ lat. Jeśli rozwiążemy to względem H, to odkryjemy, że możemy zmieścić NGC 6752 tylko wtedy, gdy H jest mniejsze niż ok. 33 km/sek/Mpc, co przeczy wszystkim ostatnim pomiarom.

Przeprowadziliśmy to obliczenie dla wszechświata, w którym dominuje materia barionowa. Teoretycy postulują jednak, że owe oczekujące odkrycia cząstki z teorii GUT i SUSY-



Rys. 4. Prawo Hubble'a. Wstawka (a) pokazuje jednowymiarowy jednorodny rozszerzający się Wszechświat z równoodległymi galaktykami A, B, C, D, E... Załóżmy, że galaktyka A obserwuje galaktykę B, w odległości d, oddalającą się z prędkością v. Z założenia o jednorodności (wszystkie punkty są równoważne), B będzie widziała galaktykę C oddalającą się z prędkością także równą v. Zatem A widzi, że C, odległa o $2d$, oddala się z prędkością $v+v = 2v$. Jakikolwiek rozszerzający się Wszechświat jednorodny powinien ujawniać prawo Hubble'a: prędkość oddalania się galaktyki powinna być wprost proporcjonalna do jej odległości od obserwatora, $v = Hd$.

Gdyby rzeczywisty Wszechświat był doskonale jednorodny i gdybyśmy mogli dokładnie mierzyć odległości do galaktyk, to moglibyśmy narysować v jako funkcję d dla wielu galaktyk i otrzymać wykres taki jak (b). Nachylenie wykresu jest równe H, stałej Hubble'a. Odwrotność stałej Hubble'a, H^{-1}, ma wymiar odległość/prędkość = czas. Czas ten jest przybliżonym wiekiem Wszechświata. Rzeczywisty świat nie jest tak prosty. O prędkości oddalania się galaktyki wnioskujemy z jej przesunięcia ku czerwieni, co wydaje się słusznym założeniem. Odległość do galaktyki nie może jednak być bezpośrednio mierzona. Jednym z podejść pośrednich jest pomiar pozornej jasności pewnych gwiazd w galaktyce. Jeśli założymy, że znamy prawdziwe jasności tych gwiazd z teorii albo z pomiarów gwiazd sąsiednich, to odległość d można obliczyć. Obliczenia takie są nadziane niepewnościami i typowy wykres v w zależności od d mógłby wyglądać jak (c). Która linia prosta najlepiej pasuje do danych?

[8] Nowy Katalog Generalny (przyp. tłum.).

-GUT w rzeczywistości dominują w gęstości materii. Te cząstki są relatywistyczne, czyli zachowują się jak promieniowanie. Rozszerzanie się wszechświata odbywa się z większą prędkością pod wpływem cząstek relatywistycznych niż pod wpływem barionów i można łatwo pokazać, że inflacyjny wszechświat „zdominowany przez promieniowanie" ma wiek równy tylko $t = (1/2)H^{-1}$. Jeżeli $H = 50$, to wynika stąd, że wiek Wszechświata wynosi tylko 10 miliardów lat i NGC utworzyła się przynajmniej 4 miliardy lat przed Wielkim Wybuchem! Aby uwzględnić NGC 6752 w taki sposób, jak powyżej, musimy obniżyć H do 21 km/sek/Mpc, wartości gruntownie sprzecznej ze wszystkimi dowodami.

W tym stanie rzeczy jedynym sposobem uratowania inflacji, jeśli nie zamierzamy odrzucić obserwacji astronomii gwiazdowej, jest zmodyfikowanie równań teorii względności. Jedną z obecnych sugestii jest wprowadzenie na powrót niesławnej stałej kosmologicznej do równań pola (patrz „Ogród"). Stała ta jest dowolną liczbą wstawioną do równań, która może zmienić prędkość rozszerzania się, a zatem wiek Wszechświata. Einstein wprowadził stałą kosmologiczną pierwotnie po to, aby uczynić swój model wszechświata statycznym — co, jak wierzył, było własnością rzeczywistego Wszechświata. Po odkryciu rozszerzania się Wszechświata, odrzucił on tę stałą jako „największy błąd" swojego życia. Tym niemniej, jeśli założymy, że stała istnieje i ma małą wartość, jej wpływ na Układ Słoneczny będzie niewykrywalny, lecz może ona wydłużyć życie Wszechświata wystarczająco, aby usunąć sprzeczność wieku we Wszechświecie inflacyjnym.

Okazuje się jednak, że stała kosmologiczna jest efektywnie tym samym, co gęstość energii próżni dyskutowana w paragrafie 3. Założenie, że dzisiejsza wartość gęstości energii próżni jest mała, lecz niezerowa, stwarza dalsze trudne pytania — całkiem niezależnie od faktu, że nie ma na nią żadnych dowodów oprócz potrzeby rozwiązania problemu wieku. Konkretnie, z punktu widzenia GUT, gdy próżnia wyjdzie ze swojego stanu metastabilnego po inflacji, nie istnieje żaden znany powód, dla którego stała kosmologiczna powinna zmaleć dokładnie do zera, do bardzo małej wartości niezerowej, albo do bardzo dużej wartości. Jeśli jej wartość jest niezerowa, to dlaczego jest obecnie tak mała, że aż niewykrywalna? Proszę zauważyć, że jest to nie mniejsza i nie większa zagadka niż problem płaskości, którego rozwiązania inflacja podjęła się od początku! Jeśli wprowadzimy stałą kosmologiczną dla uniknięcia sprzeczności wieku, to po prostu zamieniamy problem płaskości na problem gęstości energii próżni: dlaczego gęstość energii próżni jest tak bliska zera?

Ze stałą kosmologiczną stowarzyszona jest druga trudność: jest to stała. Poprzez równania Einsteina wpływa ona na zachowanie się czasoprzestrzeni i każdej cząstki we Wszechświecie; mimo to, ponieważ jest to *stała*, nic nie ma na nią wpływu. Takie zachowanie przeczy podstawowemu pojęciu akcji i reakcji, które jest sercem mechaniki Newtona. Einstein wbudował pojęcie akcji i reakcji do teorii względności pokazując, że czasoprzestrzeń nie jest absolutna i niezmienna, ale jest kształtowana przez obiekty znajdujące się w niej. Równocześnie kształt czasoprzestrzeni określa, jak obiekty poruszają się. Równania Einsteina są rzeczywiście dokładnie tymi równaniami, które pokazują, jak materia wpływa na geometrię Wszechświata i vice versa. Z tego punktu widzenia, wprowadzenie stałej kosmologicznej jest zdecydowanym krokiem wstecz. Akcja i reakcja wydaje się rozsądną zasadą, której można wymagać od teorii: dowolny byt, który może wpływać na inny byt, powinien sam być pod wpływem tego oddziaływania. Jeśli stała kosmologiczna jest naprawdę stała, to zasada akcji i reakcji jest złamana.

Pozostawiamy Czytelnika z następującymi myślami. W kosmologii powstała osobliwa sytuacja. W ciągu ostatnich czterech lat [9] fizycy pracowali ciężko nad teorią, która podjęła się rozwiązania dwóch problemów, być może nie istniejących. Teoria ta nie ma dowodów, które by ją popierały, a jedyna przepowiednia, jaką robi, wydaje się błędna. W celu pogodzenia obserwacji z tą teorią, trzeba wynaleźć nowe cząstki, których nie zaobserwowano. Założenie, że cząstki te istnieją, doprowadza teorię do jeszcze poważniejszej sprzeczności z obserwacjami, chyba, że wprowadzi się następną wielkość, której także nie zaobserwowano. Ta następna wielkość wprowadza ze sobą zagadkę równoważną tej, dla rozwiązania której teoria została pierwotnie wynaleziona. Mimo to, ponieważ teoria ta jest w pewnym sensie ładna, wielu teoretyków było gotowych obyć się bez brzytwy Ockhama i zaakceptować dodatkowe zawiłości.

Jest oczywiście za wcześnie, aby wydać ostateczny wyrok w sprawie inflacji, która jest bezsprzecznie przyjemna pod względem estetycznym. Lecz także bezsprzecznie fizyka zaczęła się zbliżać do granicy, przy której nie jest już oparta na dowodach doświadczalnych i nie robi przewidywań możliwych do sprawdzenia. Gdy granica ta zostanie przekroczona, zostawimy poza nami świat fizyki i wkroczymy do królestwa metafizyki. Równocześnie jednak uznajemy, że tylko dwudziestowieczni uczeni rozpoznają różnice między tymi dwiema dziedzinami. Newton zgodziłby się może z Karolem Wojtyłą z Rzymu, który, gdy wyjaśniono mu teorię inflacji, zauważył: „To dobry pomysł, być może użyjemy go następnym razem".

Tłumaczył *Andrzej Krasiński*

Centrum Astronomiczne PAN
im. M. Kopernika
Warszawa

Uwagi do artykułu T. Rothmana i G. F. R. Ellisa

Koncepcja inflacji wczesnego Wszechświata jest programem badawczym współczesnej fizyki. Realistyczna teoria inflacji, tzn. odpowiedź na pytanie, jak rzeczywiście biegła historia bardzo młodego Wszechświata, wymaga użycia pełnej teorii wszystkich oddziaływań fundamentalnych cząstek elementarnych, jest więc celem odległym. Aktualnie rozważane modele inflacyjne, wskutek swej prymitywności, deformują tę historię i jej skutki w sposób zupełnie niekontrolowany. Fizycy zajmujący się inflacją uwzględniają coraz to nowe czynniki w tym procesie: różne wersje dynamiki przejścia fazowego, większą ilość pól skalarnych, krzywiznę przestrzeni, itp. Okazuje się, że uwzględnienie każdego nowego czynnika wywiera istotny wpływ na ten proces i powstający w ten sposób ciąg poprawek jest słabo, jeśli w ogóle, zbieżny.

Pomimo trudności teoretycznych i braku jakichkolwiek śladów, że inflacja rzeczywiście miała miejsce, wielu jej zwolenników propaguje tę koncepcję jako prawdę dowiedzioną. Przeciwko tym nadgorliwcom skierowany jest polemiczny artykuł Ellisa i Rothmana i tylko

[9] Artykuł został napisany w r. 1985 (przyp. tłum.).

w sensie polemiki z nimi należy rozumieć intensywnie używany argument o „metafizyczności" koncepcji inflacji i niektórych innych aktualnych teorii (z metafizyką w rozumieniu filozoficznym ma to niewiele wspólnego).

Jako zimny kompres dla zbyt rozgorączkowanych entuzjastów inflacji artykuł ten jest bardzo wskazany, należy jednak powiedzieć, że Autorzy w celach polemicznych wyjmują swe argumenty z szerszego kontekstu współczesnej fizyki i kosmologii, przez co idea inflacji ukazuje się — dla kontrastu — w zbyt niekorzystnym świetle. Wydaje się więc uzasadnione skomentowanie niektórych twierdzeń i argumentów.

1. Przez inflację rozumie się zjawisko wykładniczego wzrostu w czasie kosmicznego czynnika skali, przy czym zjawisko to jest wywołane oddziaływaniem grawitacyjnym materii innej niż relatywistyczne cząstki elementarne. Towarzyszące temu efekty mogą być różne, w szczególności niekoniecznie muszą zachodzić przejścia fazowe. Tymczasem Autorzy mylnie, opierając się na wczesnych pracach, sądzą, że inflacja wymaga przyjęcia teorii wielkich unifikacji (GUT).

2. Autorzy przeciwstawiają koncepcję inflacji koncepcji kwantowej grawitacji, twierdząc, że albo pierwsza jest fałszywa albo druga stanowi „metafizyczną" część kosmologii. Zarzut byłby trafny, gdyby kwantowa grawitacja miała służyć wyłącznie do opisu hipotetycznej ery przed epoką inflacji. Tak jednak nie jest i teoria ta ma być samodzielną, fundamentalną teorią fizyki, przy czym najwcześniejszy Wszechświat był (według powszechnej dziś opinii) naturalnym miejscem jej zastosowania: Kwantowa teoria grawitacji, pomimo ogromnych wysiłków, nadal jest marzeniem fizyków, a nie faktem, zatem nie można mówić o jakichkolwiek jej konkretnych przewidywaniach. W szczególności teza Autorów, że proces inflacji zatrze *wszystkie* ślady ery kwantowej grawitacji, jest nieuzasadniona. Tego po prostu nie wiemy. Autorzy artykułu sądzą tak, bowiem niektórzy zwolennicy inflacji są rzeczywiście przekonani, jakoby *każdy* zbiór danych początkowych, tzn. *każde* rozwiązanie równań Einsteina, prowadził do zjawiska inflacji, a w konsekwencji dawał aktualny Wszechświat. Jest to pogląd ewidentnie fałszywy. Wystarczy wziąć zamknięty model Friedmana o parametrach planckowskich: osiąga on maksymalne rozmiary po czasie nieco większym od czasu Plancka, a następnie zapada się. W takim świecie energia relatywistycznych cząstek zawsze będzie dominować nad energią kwantowej próżni i zjawisko inflacji nie wystąpi. Wbrew bezkrytycznym entuzjastom, modele inflacyjne wcale nie muszą mieć tej własności, aby były wartościowe. Zaletą koncepcji inflacji jest to, że opisuje ona aktualny — bardzo szczególny — Wszechświat jako wynik dość szerokiej klasy warunków początkowych, poza którą pozostaje jednak równie duży zapewne zbiór innych warunków początkowych. Podobnie, dany stan równowagi termodynamicznej zbiornika wody można otrzymać z wielu bardzo różnych początkowych stanów nierównowagowych (woda mogła być wlewana wieloma strumieniami z różnymi prędkościami i temperaturami), ale są też stany pierwotne, które dany końcowy stan równowagowy wyklucza (przejście od nich jest sprzeczne z prawami termodynamiki).

3. Kluczowy zarzut Autorów opiera się na oszacowaniu wieku Wszechświata. Model inflacyjny daje, jak dotąd, jedno tylko konkretne przewidywanie: gęstość materii kosmicznej winna być równa krytycznej, a to z kolei prowadzi do zbyt krótkiego (w porównaniu z wiekiem gromad kulistych) wieku Wszechświata. Przyjrzyjmy się zatem dokładniej tej kwestii.

Według ogólnie przyjętego poglądu Wszechświat aktualnie znajduje się w erze galaktycznej, tzn. że w kosmicznej materii dominują cząstki nierelatywistyczne (bariony lub inne cząstki o niezerowej masie spoczynkowej). Niech era galaktyczna zaczyna się w chwili t_r od Wielkiego Wybuchu, w tym momencie gęstość energii materii wynosiła ϱ_r, a czynnik skali był równy R_r. Przyjmując zgodnie z modelem inflacyjnym, że świat jest nieomal płaski, całkujemy równanie Friedmana

$$\dot{R}^2 = \frac{\dot{\alpha}^2}{R}; \quad \alpha^2 \equiv \frac{8\pi G}{3}\varrho_r R_r^3,$$

i otrzymujemy

$$R = [\tfrac{3}{2}\alpha(t-t_r)+R_r^{3/2}]^{2/3}$$

oraz funkcję Hubble'a

$$H \equiv \frac{\dot{R}}{R} = \alpha\left[\frac{3}{2}\alpha(t-t_r)+R_r^{3/2}\right]^{-1}.$$

Dla dużych t, H dąży do zera. Oznaczając chwilę obecną przez t_0 i $H_0 \equiv H(t_0)$, mamy obecny wiek ery galaktycznej

$$t_0-t_r = \frac{2}{3\alpha}\left(\frac{\alpha}{H_0}-R_r^{3/2}\right).$$

Ponieważ wszyscy są zgodni co do tego, że era galaktyczna trwa już długo, tzn. $t_0 \gg t_r$, dostajemy jej wiek równy

$$t_0-t_r \approx t_0 \approx \frac{2}{3H_0},$$

czyli ok. 14 mld lat. Oznacza to, że zbadana przez Penny'ego i Dickensa gromada kulista jest starsza i powstała jeszcze w erze pregalaktycznej, tzn. w czasach, gdy materia była zdominowana przez cząstki relatywistyczne (np. fotony). Era pregalaktyczna (hadronowa, leptonowa i radiacyjna) trwała łącznie nie więcej niż milion lat i nawet gdyby wydłużyć ją stukrotnie (co według standardowego modelu jest nieprawdopodobne), to byłoby to bez znaczenia dla naszej kwestii.

Jako jedyne rozwiązanie sprzeczności, Rothman i Ellis widzą odrzucenie przypuszczenia, że świat jest przestrzennie płaski, a tym samym odrzucenie koncepcji inflacji i przyjęcie, że gęstość kosmicznej materii jest dużo mniejsza od krytycznej. Oznaczałoby to, że żyjemy we Wszechświecie otwartym, w którym wiek ery galaktycznej wynosi

$$t_0 \approx \frac{1}{H_0} = 21 \text{ mld lat.}$$

Liczbę tę otrzymuje się w wyniku dość grubego przybliżenia, toteż prawdziwy wiek leży gdzieś pomiędzy 14 a 21 mld lat.

Wprowadźmy parametr $\Omega(t)$ będący stosunkiem gęstości materii kosmicznej w danym momencie do gęstości krytycznej i przyjmijmy, że ukryta „brakująca masa" nie istnieje,

czyli że obecnie $\Omega_0 \approx 0{,}1$. Czy wyklucza to jednoznacznie modele inflacyjne? Zdaniem Autorów — tak, ale w rzeczywistości nie jest to takie pewne. Istnieje nieskończenie wiele światów Friedmana i możemy sparametryzować je bezwymiarową wielkością

$$\varepsilon \equiv \frac{c^2\hbar^2 k}{(k_B T R)^2},$$

która zachowywana jest podczas ewolucji adiabatycznej (T jest najpierw temperaturą kosmicznej plazmy, a w erze galaktycznej — temperaturą promieniowania reliktowego). We wszechświecie otwartym $k = -1$, wówczas dla planckowskich wartości: $T = 10^{32}$ K i $R = 10^{-33}$ cm otrzymujemy $\varepsilon \approx -1$, zatem $-1 \lesssim \varepsilon \lesssim 0$. Dla wszechświatów zamkniętych $k = +1$, czyli że $0 \lesssim \varepsilon \lesssim 1$. Punktem granicznym między nimi jest jeden wszechświat — płaski — dla którego $\varepsilon = k = 0$. „Przeciętny" wszechświat winien mieć ε wyraźnie różne od 0, tymczasem naszemu Wszechświatowi przypisana została wartość $|\varepsilon| \approx 10^{-58}$ i zadaniem modeli inflacyjnych jest wyjaśnienie, dlaczego znajdujemy się tak blisko granicy. Zjawisko inflacji nie zmienia geometrii, tzn. nie zamienia świata otwartego w płaski, lecz jedynie przesuwa (dzięki procesom nieadiabatycznym) pierwotną — przeciętną — wartość ε w pobliże zera. Wynika stąd, że Ω_0 winno być bliskie, lecz różne od 1. Dokładną wartość $\varepsilon = 0$ i $\Omega_0 = 1$ możemy mieć tylko w świecie, który zawsze był płaski, lecz prawdopodobieństwo, że trafiliśmy właśnie do niego, jest równe zeru.

Jak bardzo Ω_0 winno być bliskie 1, zależy od modelu inflacyjnego. Zależność Ω od czasu (i temperatury) dana jest wzorem

$$\frac{1-\Omega}{\Omega} = \frac{3}{8\pi G}\frac{1}{\varrho}\left(\frac{s}{S}\right)^{2/3},$$

gdzie ϱ jest gęstością materii kosmicznej, $s \propto T^3$ jest gęstością entropii tej materii, która jest w równowadze termicznej (obecnie tylko promieniowanie reliktowe), a $S = R^3 s$ jest entropią tej materii zawartej w rozszerzającym się sześcianie o krawędzi $R(t)$. Przy tym $S = \text{const}$ dla ewolucji adiabatycznej.

Epoka inflacyjna, kiedy to Wszechświat rozwijał się nieadiabatycznie, trwała od t_1 do t_2. Temperatura na początku i na końcu była niemal taka sama, $T_1 \approx T_2$, natomiast kosmiczny czynnik skali wzrósł Z razy, $R_2' = ZR_1$, $Z \gg 1$. Wynika stąd, że parametr Ω wzrósł od wartości Ω_1 do Ω_2 według wzoru

$$\frac{1-\Omega_2}{\Omega_2} = \frac{1}{Z^2}\frac{1-\Omega_1}{\Omega_1}.$$

Później, gdy efekty zjawisk nieadiabatycznych można zaniedbać, mamy

$$\frac{1-\Omega}{\Omega} = \text{const}\cdot T^{-2}.$$

Dla sukcesu modeli inflacyjnych, tzn. dla rozwiązania problemów płaskości i horyzontu, decydująca jest wartość Z, czyli ile razy wzrosną rozmiary Wszechświata podczas krótkiej epoki inflacyjnej. W standardowych modelach inflacyjnych, opartych na koncepcji przejść fazowych w teoriach GUT, uważa się, że $T_1 = T_2 \approx 10^{14}$ GeV i wówczas musi być $Z \gtrsim 10^{28}$. Przypuśćmy, że na początku ery inflacyjnej, w chwili t_1, świat był przeciętnym światem otwartym o gęstości materii wyraźnie różnej od krytycznej, np. $\Omega_1 = 10^{-4}$.

Po zakończeniu inflacji świat jest niemal płaski, $\Omega_2 = 1-10^{-52}$, lecz dalsza ewolucja odchyla wartość Ω od 1 tak, że obecnie $\Omega_0 \approx 0{,}1$.

Większość modeli inflacyjnych jest nadmiernie efektywna, dając $Z \gg 10^{28}$. Na przykład, dla $Z = 10^{100}$ (można otrzymać liczby dużo większe) i $\Omega_1 = 10^{-4}$ dostajemy $\Omega_2 = 1-10^{-196}$ oraz $\Omega_0 = 1-10^{-143}$, czyli że konieczne jest wprowadzenie ukrytej brakującej masy, dziesięciokrotnie przewyższającej masę materii świecącej. Widzimy zatem, że istnienie tej materii jest dla scenariuszy inflacyjnych pożądane, ale odpowiedź na zasadnicze pytanie — czy $\Omega_0 \approx 0{,}1$ wyklucza inflację, zależy od modelu.

Na zakończenie powiedzmy to, czego Ellis i Rothman z oczywistych względów nie chcieli przyznać: kwestionowanie jakiegoś modelu kosmologicznego w oparciu o oceny wieku Wszechświata brzmi dla większości kosmologów niezbyt przekonywająco. Przecież, gdyby wiek gromady kulistej, podany przez Penny'ego i Dickensa, obniżyć o jedną czwartą, to problem znika. Co istotniejsze, nawet gdyby wszyscy eksperci uznali, że praca ich jest w pełni wiarogodna, nie przesądzałoby to jeszcze sprawy — istnieje bowiem sławny precedens ze stałą Hubble'a.

W 1936 r. Edwin Hubble ocenił wartość H_0 na 526 km s^{-1} Mpc^{-1}, z zaniedbywalnie małym błędem. Dawało to wiek Wszechświata poniżej 2 mld lat, dwukrotnie mniejszy od wieku Ziemi czy Słońca. Uznano to powszechnie za argument przeciwko istnieniu Wielkiego Wybuchu; stąd też pojawiła się hipoteza „wszechświata stacjonarnego" Bondiego i Hoyle'a. Hubble był pierwszym autorytetem w astronomii pozagalaktycznej i nikomu nie przyszło na myśl, że mógł się pomylić. W ciągu następnych czterdziestu lat kolejno odkrywane błędy systematyczne zredukowały wartość H_0 dziesięciokrotnie i sprzeczność zniknęła.

Dorzućmy jeszcze, gwoli niewypaczania historii, że idea brakującej masy nie jest wcale wytworem modeli inflacyjnych, lecz jest od nich co najmniej dwadzieścia lat starsza. Prowadzone od końca lat pięćdziesiątych pomiary tzw. parametru deceleracji uporczywie wskazują na wszechświat zamknięty z $\Omega_0 > 1$. Od pewnego czasu uważa się, że pomiary te obarczone są znacznymi błędami systematycznymi i wiara w to, że żyjemy w zamkniętym świecie, została nadszarpnięta. Sytuacja obserwacyjna jest bardzo niejasna i rozstrzygnięcie, jaka jest faktyczna gęstość materii nastąpi chyba w odległej przyszłości. W każdym razie argumenty oparte na ocenie wieku różnych układów gwiazdowych mogą mieć jedynie charakter pomocniczy.

Leszek M. Sokołowski

Obserwatorium Astronomiczne UJ
Kraków

Komentarz tłumacza do uwag L. M. Sokołowskiego

Artykuł Rothmana i Ellisa (R+E) jest chyba pierwszą w literaturze światowej próbą zanegowania wartości naukowej dotychczasowych „sukcesów" modeli inflacyjnych. Próba ta jest rzetelna od strony warsztatowej, choć ubarwiona złośliwostkami, na które entuzjaści inflacji solidnie zapracowali.

Rozważmy najpierw trzy zarzuty L. M. Sokołowskiego.

1. Autorzy stwierdzają, że poprawność modeli inflacyjnych Gutha i Albrechta-Steinhardta zależy od poprawności wielkich teorii unifikacji (GUT) i jeśli GUT zostaną obalone przez eksperyment, to modele te — najwcześniejsze, ale równocześnie najgłośniej rozreklamowane i najdokładniej zrozumiane przez teoretyków — będą automatycznie obalone także. R+E sygnalizują Czytelnikom istnienie nowszych modeli inflacyjnych (por. pierwszy i przedostatni akapit par. 3) i nie można czynić Autorom zarzutu, że ignorują je przez niewiedzę. Nie jest możliwe dyskutowanie w artykule popularnym wszystkich najnowszych wyników — artykuł rozrósłby się do księgi, ani nie jest to w tym przypadku potrzebne. *Wszystkie* modele inflacyjne są bowiem wyprowadzone ze spekulatywnych, nie potwierdzonych eksperymentalnie teorii fizycznych i wraz z tymi teoriami mogą zostać obalone (np. inflacja supersymetryczna upadnie lub ostanie się tylko wraz z teorią supersymetrii).

2. To nie Autorzy artykułu postawili tezę, że proces inflacji zatrze ślady po erze grawitacji kwantowej. Teza ta jest logicznym wnioskiem z ukrytego programu inflacji: pokazać, że obecny stan Wszechświata nie zależy wcale albo zależy w niewielkim stopniu od danych początkowych z ery przedinflacyjnej. Niezależnie zaś od prawdziwości lub fałszywości tej tezy model inflacyjny jest w kłopocie, bo *jeśli inflacja wystąpiła*, to:

a) albo istnieje jednoznaczny związek między danymi z okresu przedinflacyjnego a obecnym stanem Wszechświata i inflacja nie rozwiązuje żadnego ze swoich słynnych Problemów,

b) albo inflacja zaciera, mniej lub bardziej skutecznie, informację o tych danych, a wtedy rzeczywiście tracimy możliwość obserwacyjnego testowania przepowiedni kwantowej grawitacji. Kwantowa teoria grawitacji mogłaby mieć bowiem zastosowanie tylko w dwu sytuacjach: we Wszechświecie przedinflacyjnym albo we wnętrzu czarnej dziury. Tylko tam mogą wystąpić dostatecznie duże gęstości materii i dostatecznie silne pola grawitacyjne. Dopóki jednak wierzymy teorii Einsteina, która mówi, że dowolny obserwator dopiero w nieskończonej przyszłości odbierze sygnał z powierzchni czarnej dziury, a nigdy nie odbierze sygnału spod jej powierzchni, dopóty wczesny Wszechświat będzie jedynym teoretycznie dostępnym laboratorium dla kwantowej grawitacji.

Jeśli więc inflacja ma nas odciąć od informacji o wczesnym Wszechświecie, to stajemy przed dylematem: albo nie nastąpiła inflacja, albo kwantowa teoria grawitacji będzie (po jej stworzeniu) czynić przepowiednie niesprawdzalne metodami fizyki. Jest to dylemat o charakterze filozoficznym raczej niż fizycznym, ale, w odróżnieniu od szeroko rozreklamowanych Problemów (też filozoficznych...), które inflacja jakoby rozwiązała, ten problem został przez inflację stworzony, a najelegantsze jego rozwiązanie polega na odrzuceniu modeli inflacyjnych. Jest pożądane, aby Czytelnicy wiedzieli, że istnieje klasa tego rodzaju problemów. Fakt, że pewne wszechświaty Robertsona-Walkera mogą zapaść się z powrotem bez osiągnięcia początku ery inflacji, nie pozostaje w żadnym związku z dyskutowanymi tu kwestiami.

3. Dla najbardziej znanych modeli inflacyjnych jest sprawą życia i śmierci, aby gęstość materii we Wszechświecie była równa krytycznej. Z postulatem tym wynik Penny'ego i Dickensa jest sprzeczny. Jeśli natomiast nie upieramy się, aby gęstość materii była równa krytycznej, to stosunek gęstości rzeczywistej do gęstości krytycznej, Ω, jest swobodnym

parametrem modelu i zmniejszając go możemy wydłużać wiek Wszechświata dowolnie. Przy $\Omega = 0{,}1$, co jest największą wartością zgodną z aktualnymi przekonaniami astronomów, wiek gromady NGC 6752 mieści się w wieku Wszechświata z dużym zapasem. Jeśli nawet istnieją takie modele inflacyjne, w których obecna wartość Ω może być mała, to są one nowe i mało znane, natomiast najgłośniejszą reklamę zrobiono tym modelom, w których Ω *musi* być bardzo bliskie 1. L. M. Sokołowski słusznie zauważa, że nie należy zbyt poważnie traktować wyników pomiarów astronomicznych, gdyż tkwią w nich zwykle błędy systematyczne nieznanej wielkości. Bardzo też słusznie wspomina o pseudoproblemie wieku Wszechświata wynikłym z nadmiaru takiej powagi. Należy jednak być konsekwentnym. Albo uznajemy, że *wszystkie* wyniki obserwacji astronomicznych są w dużym stopniu niepewne i nie należy przejmować się ich sprzecznością z naszymi ulubionymi teoriami, albo traktujemy *wszystkie* jednakowo poważnie. Przy tym pierwszym podejściu nie ma potrzeby martwić się zbyt małą ilością świecącej materii (oczywiście astronomowie znowu źle interpretują obserwacje) ani zbyt dużym wiekiem gromady NGC 6752 (sprawa wyjaśni się z czasem). Przydzielanie różnym wynikom wiarygodności w sposób wybiórczy i faworyzujący inflację jest jednak przykładem stronniczości, która w naukach przyrodniczych nie powinna mieć miejsca. Jeśli wierzymy, że obserwowany Wszechświat jest „za bardzo jednorodny", co prowadzi do „Problemu horyzontu" wymagającego wyjaśnienia, to musimy również poważnie potraktować problem wieku NGC 6752, aż do czasu rozwiązania go przez lepsze obserwacje albo lepszą teorię ewolucji gromad kulistych. Do tego czasu jest to rzeczywisty problem, którego najprostsze rozwiązanie polega na odrzuceniu modeli inflacyjnych.

To prawda, że pojęcie „brakującej masy" wprowadzono już dawno i w związku z innymi koncepcjami filozoficznymi w kosmologii. Modele inflacyjne nie o to są jednak oskarżane, że pojęcie to wprowadziły, lecz o to, że bez „brakującej masy" stają się sprzeczne z obserwacjami. Autorzy nie mieli więc potrzeby osadzać tego pojęcia w kontekście historycznym i nie dokonali „wypaczenia historii", lecz koniecznego skrótu, pomijając nieistotne aspekty problemu.

W związku z powyższą uwagą czuję się zmuszony do protestu przeciwko zastosowanej przez mojego przedmówcę metodzie dyskusji. Autorzy dokonali w swoim artykule szeregu skrótów i uproszczeń, aby utrzymać jego objętość w rozsądnych granicach, i powstrzymali się od komentowania niektórych zagadnień, wychodząc z założenia (oczywistego przecież w artykule popularnym), że nie warto rozpraszać uwagi czytelnika dygresjami, które nie będą dla niego automatycznie zrozumiałe, a których nie zamierzają rozbudowywać o obszerne wyjaśnienia. Tymczasem przedmówca konsekwentnie przedstawia takie skróty jako świadectwa niedostatecznej wiedzy Autorów o temacie („... mylnie, opierając się na wczesnych pracach, sądzą...", „Autorzy artykułu sądzą tak, bowiem... (...) Jest to pogląd ewidentnie fałszywy.", „Jako jedyne rozwiązanie (...) widzą...", „Zdaniem Autorów..."). Podważa on więc zaufanie Czytelników do kompetencji Autorów i na takiej okrężnej drodze chce dodatkowo osłabić siłę ich argumentów. Wiarygodność argumentów powinna być oceniana jedynie w oparciu o ich treść fizyczną i logiczną spójność i Autorzy zasługiwaliby na poważne potraktowanie, nawet gdyby byli zupełnymi nowicjuszami. Tak jednak nie jest. George Ellis jest wśród żyjących obecnie specjalistów od teorii względności

jednym z największych autorytetów. Autorytet jego wynika z dużego ilościowo i nieskazitelnego jakościowo dorobku naukowego. Wszystkie jego dotychczasowe prace cechowały się wielką erudycją w zakresie podejmowanych tematów. Posądzenie go o źle przygotowany atak na modele inflacyjne, oparty na niedostatecznym wyborze literatury, nie znajduje żadnych podstaw w jego dotychczasowych pracach, ani w omawianym tu artykule.

Kpiący ton niektórych fragmentów artykułu jest, moim zdaniem, bardzo właściwą reakcją na przesadną reklamę, jaką zrobiono modelom inflacyjnym — już tym najwcześniejszym, co do których także mój przedmówca wydaje się zgadzać, że były dopiero sformułowaniem, a nie zakończeniem pewnego programu badawczego. Artykuł o modelach inflacyjnych ukazał się nawet (w r. 1982) w czasopiśmie informacyjnym *Newsweek*, gdzie przedstawiono je jako ostateczne rozwiązanie rzekomo zasadniczych trudności nękających kosmologię. Tymczasem, jak widać z „Metaflacji", wśród znawców kosmologii bynajmniej nie ma zgody ani co do tego, że słynne Problemy były naprawdę problemami, ani co do tego, że inflacja Problemy te rozwiązuje. W tej sytuacji reklamowanie inflacji na forum publicznym jest przedwczesne (przy założeniu, że w przyszłości modele inflacyjne zostaną uznane za teorię fizyczną) lub całkiem niewłaściwe (jeśli zostaną odrzucone jako nieudana próba). We współczesnej fizyce teoretycznej czynione są liczne inne próby stworzenia nowych teorii; jako przykłady można wymienić supersymetrię i supergrawitację, teorie Kaluzy-Kleina w n wymiarach ($n>5$) czy bardzo ostatnio modną teorię superstrun. Jest to sytuacja normalna, bynajmniej nie nowa w historii fizyki, która świadczy o sile życiowej tej nauki i jej zdolności do dalszego rozwoju. Nawet entuzjaści tych prób zachowują się jednak z powściągliwością wynikającą z poczucia odpowiedzialności wobec laików i z przekonania, że dobrze sformułowana i sprawdzona eksperymentalnie teoria nie potrzebuje reklamy w *Newsweeku* ani w *New York Timesie*, ponieważ *w odpowiedniej chwili* trafi do podręczników. Modele inflacyjne należą do tej samej kategorii prób, o nie znanym jeszcze wyniku, i od ich autorów oczekuje się takiej samej powściągliwości. Oczekiwanie to nie zostało niestety spełnione. Logiczną konsekwencją nadmiernej autoreklamy musiał być artykuł krytyczny ujawniający słabości modeli inflacyjnych i sprowadzający dyskusję o ich zaletach i wadach do właściwych proporcji.

Zauważmy na zakończenie, że proponowane przez inflację rozwiązanie słynnych Problemów kosmologii jest, z punktu widzenia teorii względności, trywialne. Modele inflacyjne postulują bowiem, że we wczesnym Wszechświecie dominującym oddziaływaniem materii było dalekozasięgowe odpychanie, prowadzące do wykładniczego wzrostu objętości dowolnie wybranej porcji materii. Rozwiązanie równań pola grawitacyjnego opisujące ten efekt i wykorzystane w modelach Gutha i Albrechta-Steinhardta zostało znalezione w r. 1917 przez de Sittera. Pod względem własności geometrycznych jest ono jeszcze prostsze i bardziej nietypowe (w zbiorze rozwiązań równań Einsteina) niż rozwiązania Friedmana-Lemaitre'a używane jako standardowe modele kosmologiczne. Ma ono 10-parametrową grupę symetrii i jest jednorodne oraz izotropowe w 4 wymiarach, podczas gdy rozwiązania Friedmana-Lemaitre'a mają 6-parametrową grupę symetrii i są jednorodne oraz izotropowe w 3 wymiarach przestrzennych. W rozwiązaniu de Sittera dalekozasięgowe odpychanie opisuje stała kosmologiczna o odpowiednio dobranym znaku. Jedynym nowym elementem wprowadzonym przez modele inflacyjne jest mikroskopowy opis od-

działywań wewnątrz materii, które makroskopowo dają taki sam efekt jak odpychająca stała kosmologiczna. Jest to więc jedynie nowy opis źródła pola grawitacyjnego w modelu czasoprzestrzeni znanym od dawna.

Andrzej Krasiński

Centrum Astronomiczne PAN
im. M. Kopernika
Warszawa