



Nagroda Nobla z fizyki za rok 2019 dla kosmologa

*Leszek M. Sokołowski
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego*

Ściśle biorąc, połowa nagrody, bo drugą połowę dostali dwaj astronomowie za odkrycie planety wokół gwiazdy podobnej do Słońca, o czym pisze ktoś inny. Cieszy, bo to pierwszy laureat, który jest fizykiem-kosmologiem i został nagrodzony za prace teoretyczne. Wszyscy poprzedni laureaci z fizyki poza Układem Słonecznym, byli nagradzani za odkrycia obserwacyjne: promieniowanie reliktowe, pulsary, fale grawitacyjne. Wprawdzie tegoroczni laureaci zajmowali się zupełnie odmiennymi rzeczami i łączy ich jedynie to, że obiekty ich zainteresowań leżą bardzo daleko od Ziemi, jednakże Komitet Noblowski zgrabnie ujął ich łącznie stwierdzając, że dostają nagrodę *za wkład w nasze zrozumienie ewolucji Wszechświata i miejsca Ziemi w kosmosie*, a w konkluzji swoich wyjaśnień uznał, że *ich odkrycia na zawsze zmieniły nasze wyobrażenia o świecie*.

Za teorię budowy i własności Wszechświata nagrodzony został Phillip James Edwin Peebles, urodzony w 1935 r., z pochodzenia Kanadyjczyk, przedstawiający się i podpisujący wiele swoich pism jako Jim Peebles. Całe swoje naukowe życie związał z uniwersytetem w Princeton, gdzie jest od kilkunastu lat emerytem i nosi dumny tytuł *Albert Einstein Professor Emeritus of Science at Princeton University*. Jego dokonania Komitet Noblowski objaśnia następująco:

Dociekania Jamesa Peeblesa w obszarze kosmologii fizycznej wzbogaciły całą tę dziedzinę badań i stworzyły podstawy dla przekształcenia w ciągu ostatnich pięćdziesięciu lat kosmologii z wiedzy spekulatywnej w naukę ścisłą. Rozwijane przez niego od połowy lat sześćdziesiątych konstrukcje teoretyczne stanowią bazę naszych obecnych poglądów o Wszechświecie.

James Peebles był w stanie zinterpretować zakodowane w kosmicznym promieniowaniu reliktowym właściwości dziecięcego Wszechświata i odsłonić nowe zjawiska fizyczne. W wyniku ukazał się nam Wszechświat, w którym 5% jego zawartości stanowi znana nam materia tworząca gwiazdy, planety i nas. Reszta, 95%, to nieznaną nam ciemna materia i ciemna energia. Są one tajemnicą i wyzwaniem dla dzisiejszej fizyki.

Przedostatnie zdanie jest raczej nietrafnie adresowane do laureata, bo Peebles ciemną energią, hipotetycznym tworem, którego istnienie jest nader wątpliwe, a własności zupełnie tajemnicze, nie zajmował się; on badał to, co rzeczywiste. Pomijając tę kwestię, chcę skomentować opinię Komitetu, że *jego odkrycia na*

zawsze zmieniły nasze wyobrażenia o świecie. Zacznę od wymienienia hasłowo jego głównych dokonań:

- 1964-65: ponownie przewidział istnienie i własności promieniowania reliktowego (CMBR),
- po 1965: był jednym z twórców teorii pierwotnej nukleosyntezy pierwiastków chemicznych,
- później zajął się powstawaniem galaktyk w bezpostaciowym gazie wodorowo–helowym,
- od 1974: poszukiwał możliwych śladów ciemnej materii w galaktykach i wokół nich (z J. Ostrikerem i A. Yahilem),
- badał stabilność dynamiczną galaktyk,
- jest autorem czterech podręczników kosmologii i podręcznika mechaniki kwantowej.

Peebles zajmował się najważniejszymi problemami kosmologii, a ponieważ są to dokonania sprzed kilkudziesięciu lat, to nagroda niewątpliwie jest „za całokształt”. Tu jednak chcę się skoncentrować na jego najważniejszym osiągnięciu, na istotnym wkładzie w dokonanie przełomu, dzięki któremu kosmologia z peryferyjnego i kontrowersyjnego działu badań na pograniczu fizyki i astronomii, stała się kosmologią fizyczną, wiarygodną i doniosłą nauką o Wszechświecie, jedną z najintensywniej rozwijanych i budzącą wielkie zainteresowanie. W tym celu trzeba przedstawić w maksymalnym skrócie najważniejsze etapy i kłopoty naszych dociekań o świecie jako całości.

Kosmologia jest najstarszą z nauk przyrodniczych, narodziła się jako astronomia i fizyka oraz filozofia w poglądach pierwszych jońskich filozofów przyrody w VI wieku p.n.e. Było to naturalne, bo myśliciele ówczesni nie potrafili wydzielić – jak się to czyni obecnie – pojedynczego zjawiska przyrodniczego ze wszystkiego, co się dzieje i mówili o wszystkim jednocześnie. Później kosmologia grecka przyjęła postać geocentrycznego systemu świata. Kosmologia wykraczająca poza Układ Słoneczny i obejmująca „wszystko, co istnieje”, pojawiła się w połowie XIX wieku i przyjęła (w ślad za Newtonem) poprawnie, że siłą spajającą cały świat jest grawitacja. Z rozmaitych przyczyn uznano wtedy, że kosmiczna materia, niczym powietrze w pokoju, w którym to piszę, jest nieruchomym jednorodnym gazem (jego atomami są gwiazdy) wypełniającym dokładnie całą nieskończoną przestrzeń euklidesową. I tu pojawiła się zasadnicza trudność. Takiego nieskończonego i nieruchomego gazu nie da się opisać prawem powszechnego ciężenia Newtona. Wbrew swej nazwie, prawo to nie jest powszechne, czyli uniwersalne, bo nie stosuje się do nieskończonego ośrodka. Pod koniec XIX wieku kosmologia załamała się jako dziedzina nauki i uznano, że o Wszechświecie można dumać filozoficznie, lecz nie badać go metodami fizyki.

Przełom nastąpił w listopadzie 1915 r., gdy Einstein podał pełne sformułowanie nowej teorii grawitacji, ogólnej teorii względności (OTW). Dwa lata później, w 1917 r., zorientował się, że nowa teoria w naturalny sposób pokonuje przeszkodę, na jakiej wywróciła się grawitacja Newtona i można ją zastosować do

wszechświata wypełnionego jednorodnym gazem gwiazd. I dalej popełnił istotny błąd: bez wahania wpisał się w dostojną tradycję pochodzącą od pierwszych greckich filozofów, głoszącą, iż wszechświat jako całość jest niezmienny. Lokalnie, jak widzimy gołym okiem, zmian jest bez liku, lecz w sumie kasują się i całość trwa wiecznie niezmieniona. Grecy filozofowie mieli powody, by tak wierzyć, lecz w czasach Einsteina nie było to już konieczne. Co więcej, jego teoria stawiała mu opór i nie chciała opisywać świata statycznego. Zamiast zorientować się, że prawa fizyki są mądrzejsze od poglądów filozoficznych, Einstein tak wierzył w niezmiennosc Wszechświata, że zdecydował się zmodyfikować równania rządzące grawitacją (wprowadził tzw. stałą kosmologiczną) i stracił szansę na podanie jako pierwszy poprawnego (zgodnego z obserwacjami) relatywistycznego (tzn. zgodnego z OTW) modelu Wszechświata. (Termin „model” oznacza tu uproszczoną teorię Wszechświata, taką, jaką jest sens zbudować. Dokładnego opisu pola grawitacyjnego w każdym miejscu w Kosmosie nie zbudujemy nigdy, bo taki opis musiałby uwzględniać każde istniejące w świecie ciało, w tym każdego z nas, zatem byłby on przerażająco skomplikowany i nawet gdybyśmy dostali go w prezencie od Stwórcy, to byłby absolutnie nie do użycia. Grawitacyjny model Wszechświata i kosmicznej materii opisuje rzeczywistość w przybliżeniu, w skali odległości pomiędzy gromadami galaktyk; pojedynczych gwiazd, a nawet całych galaktyk on nie uwzględnia). Statyczny model wszechświata Einsteina z 1917 r. szybko wywrócił się z przyczyn teoretycznych i obserwacyjnych.

W latach 1922-24 rosyjski matematyk Aleksander Friedmann podaje model ewoluującego rozszerzającego się („ekspandującego”) wszechświata i to on stanowi matematyczną podstawę dzisiejszej kosmologii.

W 1924 r. Amerykanin Edwin Hubble wykazuje, że tajemnicze „mgławice pozagalaktyczne” to odrębne galaktyki, podobne do naszej Drogi Mlecznej; Wszechświat odtąd postrzegamy jako rojowisko nie gwiazd, lecz galaktyk.

W 1927 r. na scenie pojawia się belgijski duchowny Georges Lemaître (1894-1966). Ponownie odkrywa ekspandujący jednorodny izotropowy model kosmologiczny Friedmanna, który po krytyce wyrażonej przez Einsteina poszedł w odstawkę. Lemaître czyni następny krok: dotąd kosmologia była matematyczna – zajmowała się kosmiczną grawitacją, czyli geometrią czasoprzestrzeni. On inicjuje kosmologię fizyczną, mówiącą, co się dzieje z materią w tym świecie. Skoro czasoprzestrzeń rozszerza się, powiada Lemaître, to materia rozbiega się i odległości między ciałami kosmicznymi rosną. Podaje liniowe prawo Lemaître’a–Hubble’a oddalania się ciał i opierając się na dostępnych mu wynikach obserwacji, szacuje wartość stałej Lemaître’a–Hubble’a w tym prawie na dziewięć razy większą niż wartość obecnie przyjmowana.

W 1929 r. Hubble, opierając się na obserwacjach cudzych i własnych, ogłasza „powszechną ucieczkę galaktyk” (stąd nazwy „prawo Hubble’a” i „stała Hubble’a” przez kilkadziesiąt lat powszechnie występujące w literaturze).

W 1931 r. Einstein uznaje, że Wszechświat ewoluuje, bo rozszerza się. Po 25 wiekach załamuje się tradycja postrzegania całego Kosmosu jako globalnie niezmiennego. Filozofia ustępuje miejsca fizyce.

W 1931 r. Lemaître argumentuje, że jeżeli w rozszerzającym się Wszechświecie będziemy cofać się w czasie, to kosmiczna materia w końcu zbiegnie się do jednego punktu. I na odwrót, Wszechświat rozpoczął ekspansję (narodził się) w wyniku wybuchu tego „pierwotnego atomu”.

Einstein i naukowy opiekun Lemaître’a, sławny astrofizyk angielski Arthur Eddington, odnieśli się nieufnie do koncepcji pierwotnego atomu, niepodobnego do znanej materii i nie wiadomo dlaczego eksplodującego. To nadmiernie przypominało religijną kreację świata. Prawa zachowania materii (masy) i energii musiały być w tym osobliwym punkcie czasoprzestrzeni złamane. Model Friedmanna–Lemaître’a miał dodatkowy kłopot: jeżeli czas liczyć od momentu wybuchu, to pomiar stałej Lemaître’a–Hubble’a (Hubble ok. 1936 r.) dawał wiek Wszechświata mniejszy niż wiarygodnie ustalony geologicznie wiek Ziemi.

Od 1948 r. kosmologia fizyczna Lemaître’a miała groźnego konkurenta: wybitny astronom angielski Fred Hoyle (1915-2001) zaproponował teorię stanu stacjonarnego Wszechświata. Przestrzeń się rozszerza, galaktyki rozbiegają się („uciekają”), więc gęstość materii powinna maleć. Hoyle wysunął koncepcję, że istnieje niewyczerpywalne źródło materii, kreujące w całej przestrzeni Kosmosu atomy dokładnie w takiej liczbie, by skompensować ich ubytek wskutek ekspansji. Wszechświat jest w tym sensie w ruchu, a jednocześnie nie zmienia się. Ta koncepcja nigdy nie uzyskała porządnej podstawy fizycznej (co kreuje nowe atomy i to w ściśle wymaganej ilości?), lecz miała atrakcyjny walor – usuwała niechcianą przez większość fizyków i astronomów pierwotną osobliwość czasoprzestrzeni, czyli początek świata. Hoyle użył tej niechęci jako argumentu za swoją teorią również wobec szerszej publiczności: w audycji popularnonaukowej radia BBC w 1949 r. stwierdził, że według poglądów Lemaître’a świat zaczął się od „wielkiego bum!”. To drwiące określenie („big bang!”) miało zdyskredytować te poglądy. Hoyle nie przewidział, że dwadzieścia lat później szydercza nazwa awansuje i stanie się poważnym terminem naukowym powszechnie stosowanym w literaturze fachowej (wymogi języka polskiego sprawiły, że przekład jest poważniejszy i brzmi „Wielki Wybuch”). W owym czasie niektórzy nazywali Lemaître’a „eksplozywnym jezuitą”.

Od wczesnych lat czterdziestych kosmologią fizyczną opartą na modelu Friedmanna–Lemaître’a interesował się amerykański fizyk rosyjskiego pochodzenia, George Gamow (1904-1968), do tego czasu znany z dokonań w fizyce jądrowej: podał kwantowomechaniczną teorię rozpadu jądra z emisją cząstki alfa (jądro helu) oraz przedstawił kroplowy model jądra atomowego. W latach 1946-1953 Gamow wraz ze współpracownikami, swoim doktorantem Ralphem Alpherem, Robertem Hermanem i znanym astrofizykiem niemieckim, Hansem Bethem (1906-2005), opublikował około 20 prac o fizyce Wielkiego Wybuchu i jego konsekwencjach. Gamow widział tu dwa zagadnienia: skąd się wzięły pier-

wiastki chemiczne i czy po Wielkim Wybuchu pozostały jakieś ślady świadczące o jego zajściu? Odnosnie pierwszej kwestii uznał, że pierwiastki nie istniały w obecnych ilościach od samego początku, lecz zostały wytworzone wkrótce po nim. W 1948 r. powstaje teoria $\alpha\beta\gamma$ syntezy pierwiastków w bardzo wczesnym Wszechświecie (nazwa nie pochodzi od nazw cząstek promieniowania jądrowego, alfa – jądra helu, beta – elektronów i gamma – fotonów, lecz od nazwisk Alpher, Bethe, Gamow; Bethe został dopisany przez Gamowa w tym celu, o co do końca życia Alpher miał do niego żal). Gamow założył, że na samym początku materia składała się wyłącznie z protonów i neutronów, a wszystkie pierwiastki powstały przez wychwyt kolejno pojedynczych neutronów, poczynając od oddzielnych protonów. Teoria była błędna i podawała w miarę poprawnie tylko ilości wodoru, jego izotopu deuteru i helu, czyli niewiele.

Po drugie, Gamow zastanawiał się, czy pierwotna mieszanina protonów i neutronów była zimna czy gorąca. Początkowo sądził, że była zimna, lecz potem uznał, że bardzo gęsta (świat był skurczony do bardzo małej objętości) plazma była gorąca, co było konieczne dla zajścia reakcji syntezy jądrowej. W gorącej naładowanej elektrycznie plazmie było promieniowanie elektromagnetyczne pozostające w równowadze termodynamicznej z plazmą, zatem można mu przypisać temperaturę tej plazmy. W miarę rozszerzania się przestrzeni plazma rozrzedza się i ochładza, podobnie maleje temperatura promieniowania, co przejawia się tym, że długość fali każdego fotonu jest rozciągana w takim samym stopniu jak sama przestrzeń. Gdy temperatura spadnie do ok. 6000 K, elektrony łączą się ze swobodnymi protonami (których jest większość), znika naładowana plazma, a na jej miejsce pojawia się neutralny gaz wodorowo-helowy, który dla światła jest bardziej przejrzysty od powietrza. Fotony przestają oddziaływać z materią i rozchodzą się swobodnie w tym gazie. Rojowi fotonów nadal przypisujemy temperaturę, która stale maleje w miarę rozszerzania się Wszechświata. Zatem dzisiaj w całej przestrzeni kosmicznej powinno istnieć promieniowanie o niskiej temperaturze, będące reliktem tamtej gorącej epoki.

W 1948 r. Gamow ogłosił, że promieniowanie reliktowe powinno istnieć, a Alpher i Herman wyliczyli, że obecnie ma ono temperaturę $T \approx 5$ K, zatem dominują w nim fotony mikrofalowe (długość fali rzędu 1 mm). Oba te wyniki Gamow przedstawił w 1948 r. na zjeździe Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego; spotkał się z ogólnym niedowierzaniem. Nie jest całkiem pewne dlaczego; przypuszczalnie dominowała niechęć do idei początku Wszechświata, ponadto były to początki radioastronomii i wykrycie promieniowania termicznego o tak niskiej temperaturze było skrajnie trudne (aczkolwiek nie niemożliwe). Grupa Gamowa, niezrażona niechęcią, kontynuowała badania.

W 1949 r. Gamow poprawnie ustalił, że synteza protonów i neutronów w deuter zaczyna się wtedy, gdy temperatura plazmy i fotonów obniży się na tyle, że fotony nie będą w stanie rozbijać nowo powstałych jąder deuteru. Alpher i Herman powtórzyli swoje rachunki i zmienili aktualną temperaturę promieniowania relikтового na $T = 28$ K, czyli oddalili się od faktycznej wartości.

W 1953 r. rachunki te wykonał Gamow i obniżył tę temperaturę do $T \approx 7$ K. W tym samym roku zmienił zainteresowania i zajął się biofizyką. Badania w kosmologii fizycznej faktycznie ustały.

W latach pięćdziesiątych XX wieku w dość wąskim kręgu astronomów pozagalaktycznych i kosmologów koncepcje Lemaître'a i grupy Gamowa były znane, lecz spotykały się z niedowierzaniem. Silniejsza była hipoteza świata stacjonarnego Hoyle'a, ale i ona nie zyskała szerokiego uznania. Rosyjski fizyk Władimir Fock (1898-1974) w znanym podręczniku OTW (z 1955 r.) określił kosmologię jako dziedzinę science-fiction. Kosmologię wczesnego Wszechświata dodatkowo pogrążyła kwestia pochodzenia pierwiastków. W 1957 r. Fred Hoyle we współpracy z małżeństwem Margaret i Geoffreyem Burbidge oraz Williamem Fowlerem wykazał, że wszystkie pierwiastki o jądrach cięższych od helu (za wyjątkiem litu i berylu) są syntetyzowane w gwiazdach, głównie tych cięższych; obecnie jest to powszechnie przyjęta teoria powstawania pierwiastków.

Przypuszczalnie w latach 1955-57 dokonano dwukrotnie przypadkowego odkrycia promieniowania relikтового, we Francji i w ZSRR; w obu przypadkach nie rozpoznano, co znaleziono.

Pomimo niechętnego nastawienia do kosmologii, sprawy powoli dojrzywały. Po 1960 r. kosmologią zainteresował się wybitny fizyk amerykański, Robert H. Dicke (1916-1997), teoretyk i konstruktor nowych przyrządów pomiarowych. Wrócił on do idei promieniowania relikтового i oszacował jego obecną temperaturę na ok. 40 K. Również w ZSRR koncepcja wczesnego Wszechświata (choć może nie samego jego początku) zaczęła być poważnie rozpatrywana. W 1962 r. Jakow Zeldowicz (1914-1987), zajmujący się wcześniej teorią szybkiego spalania i jej zastosowaniem do broni jądrowej, przerzucił się na politycznie bezpieczniejsze tematy i rozważał hipotezę zimnego Wielkiego Wybuchu. Z kolei młodzi astrofizycy, Igor Nowikow i A. Doroszkiewicz wrócili w latach 1963-64 do idei Gamowa, Alpera i Hermana i zaproponowali poszukiwania promieniowania relikowego.

W 1964 r. sprawy gwałtownie przyspieszyły. Robert Dicke sformował grupę do badań kosmologicznych złożoną z radioastronomów Davida Wilkinsona (1935-2002) i P. G. Rolla oraz teoretyka J. Peeblesa. Peebles prawidłowo wykonał obliczenia i przewidział istnienie termicznego promieniowania relikowego osiągającego maksimum natężenia dla mikrofal rzędu 1 mm, zatem grupa Dickego przystąpiła do konstruowania radioteleskopu dostosowanego do obserwacji takiego promieniowania, dochodzącego do Ziemi nie z jednego kierunku, lecz z całej sfery niebieskiej. Mieli pecha.

Nieco wcześniej, w pobliskich Laboratoriach Bella dwaj fizycy, Arno Penzias i Robert Wilson, zbudowali czułą antenę do detekcji fal radiowych odbitych od satelity telekomunikacyjnego Echo, zatem interesowała ich łączność satelitarna, a nie jakiegokolwiek badania astrofizyczne. Ich antena nadawała się do łapania bardzo słabych sygnałów na mikrofalach. Dla fal o długości 7,35 cm odkryli uporczywy szum dochodzący z całego nieba, którego nie byli w stanie usunąć

pomimo intensywnych starań. Mieli szczęście (iskrę bożą?), iż nie uznali tego za złośliwość rzeczy martwych, lecz za coś ważnego. Opisy dalszego biegu wydarzeń różnią się w szczegółach, lecz różnice te nie są istotne. Penzias dowiedział się od znajomego fizyka, że niejaki Peebles napisał artykuł, jeszcze nie opublikowany, krążący w preprincie (w czasach przed Internetem prace naukowe zanim ukazały się po recenzji w czasopiśmie naukowym, były przez autorów rozsyłane do głównych ośrodków badawczych w postaci druku zwanego preprintem), który może być im pomocny. Penzias przeczytał artykuł i skontaktował się z szefem grupy, Dickem i zaprosił go do ich radioteleskopu. Dicke obejrzał wyniki pomiarów Penziasa i Wilsona i stwierdził, że są zgodne z przewidywaniami Peeblesa – zarejestrowali promieniowanie reliktowe. Teoria spotkała się w końcu z obserwacjami.

Uzgodniono, że obie grupy opublikują odrębne artykuły cytujące się nawzajem. W 1965 r. w czołowym czasopiśmie astrofizycznym *Astrophysical Journal Letters* ukazały się obok siebie dwie krótkie prace. Pierwsza, zatytułowana *Cosmic black-body radiation*, licząca tylko pięć stron, podpisana na końcu (jak list) kolejno przez Dickego, Peeblesa, Rolla i Wilkinsona, wykląda zwięźle teorię promieniowania relikтового. Autorzy zaczynają od wymienienia możliwych hipotez kosmologicznych: teorii stanu stacjonarnego, wpływu zjawisk kwantowych na gęstą plazmę (do dziś w tej kwestii jest dużo więcej zuchwałych pomysłów niż uzasadnionych twierdzeń) oraz świata przestrzennie zamkniętego, który wielokrotnie przechodzi cykl rozszerzania się do maksymalnych rozmiarów, a potem kurczenia się do minimum, dzięki czemu istnieje dowolnie długo i nie ma początku. Następnie (pomijając teorię Hoyle'a) stwierdzają, że wystarczy rozważyć przeszłość, gdy świat był mały i bardzo gęsty, więc powinien być być bardzo gorący i przedstawiają zwięźle „termiczną historię” świata i jej stan obecny: istnieć winno promieniowanie termiczne jako relikտ tamtej epoki. Tu powołują się na obserwacje Penziasa i Wilsona („informacja prywatna”), bo ich antena (budowana przez Rolla i Wilkinsona) jeszcze nie mierzy. Powołują się na będący w druku artykuł Peeblesa, grupę Gamowa i paru innych autorów; brakuje odwołań do Friedmanna i Lemaître'a.

Bezpośrednio po niej następuje licząca niepełne dwie strony praca pod (przesadnie) skromnym tytułem *A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s*, podpisana przez Penziasa i Wilsona, informująca, że rejestrują szum radiowy z całego nieba na fali 7,35 cm. Zakładając, że jest to równowagowe promieniowanie termiczne (czego z pomiaru na jednej długości fali niepodobna ustalić), to z jego natężenia na tej długości fali wyliczają, że ma ono temperaturę około 3,5 K. Skąd się ono wzięło – odsyłają do poprzedzającej pracy grupy Dickego.

Dla kosmologii fizycznej, i w ogóle dla kosmologii, to był prawdziwy przełom. W bardzo krótkim czasie ogół ekspertów uznał, że model Friedmanna–Lemaître'a jest poprawnym opisem rzeczywistego świata, że istniał młody, gęsty i gorący świat wypełniony plazmą cząstek elementarnych, w którym nie było gwiazd ani planet. Jedynie Hoyle (a z nim paru wiernych uczniów) z uporem bu-

dzącym bardziej zażenowanie niż podziw, do końca życia bronił koncepcji świata stanu stacjonarnego, usiłując podać czysto astrofizyczne, a nie kosmologiczne wyjaśnienie istnienia termicznego promieniowania mikrofalowego. Nie udało się to się ani jemu, ani nikomu innemu. Co więcej, argument, który przez wiele lat uderzał w model Friedmanna–Lemaître’a i wspierał koncepcję Hoyle’a, teraz obrócił się przeciwko niej. Chodzi o istnienie osobliwego punktu (o nieskończonej krzywiznie), z którego miał narodzić się, czyli wyłonić, świat. Przez czterdzieści lat uważano to za dziwactwo, matematyczny artefakt, coś niefizycznego, prawdziwą osobliwość. Wszechświat stanu stacjonarnego, wprawdzie obciążony podejrzaną kreacją materii nie wiadomo jak, był od osobliwości wolny, więc wydawał się bardziej strawny. Jednak w drugiej połowie lat sześćdziesiątych Roger Penrose i Stephen Hawking udowodnili czysto matematyczne twierdzenia, że przy bardzo sensownych założeniach o kosmicznej materii, czasoprzestrzeń w OTW zawierają punkty osobliwe. Przeciwnie, czasoprzestrzeń wolne od osobliwości są rzadkie i specyficzne. Model Friedmanna–Lemaître’a przestał być dziwactwem, stał się normą.

W ciągu paru następnych lat Peebles i inni wykonali bardzo szczegółowe obliczenia procesów pierwotnej nukleosyntezy pierwiastków. Zarazem kosmologia oparta na czasoprzestrzeni Friedmanna–Lemaître’a ma kłopot: według niej cała kosmiczna materia ma postać ciągłego jednorodnego gazu, a przecież istnieją gwiazdy i ich skupiska, galaktyki. Konieczna była w ramach tej kosmologii teoria skupiania się gazu w makroskopowe ciała – teoria formowania struktur. Teoria ta jest do dzisiaj niezakończona, w jej rozwijaniu istotny wkład miał noblista Peebles.

Obecnie kosmologia nadal intensywnie się rozwija, a liczba książek popularnonaukowych na jej temat świadczy o ogromnym nią zainteresowaniu, większym niż fizyką ciała stałego, która jest podstawą techniki komputerów, laptopów i smartfonów. Zaiste jest to prawdziwie bezinteresowna ciekawość świata.