

Michał Heller

Wydział Filozoficzny PAT
Kraków

ZAGADNIENIA KOSMOLOGICZNE PRZED EINSTEINEM

1. WPROWADZENIE

Kosmologia relatywistyczna niewątpliwie należy do największych osiągnięć XX w. Stanowi także interesujący przedmiot studiów dla historyków i filozofów nauki, którzy niemal bezpośrednio mogli obserwować kształtowanie się nowej gałęzi nauki — od pierwszych czysto teoretycznych i mocno spekulatywnych prób do dobrze ugruntowanej dyscypliny z rozbudowaną, i ciągle poszerzającą się bazą obserwacyjną. Praca Einsteina z 1917 r. odegrała w tym procesie kluczową rolę. Wprawdzie zaproponowany w niej model kosmologiczny ma dziś już tylko historyczne znaczenie, ale stanowił on próbę rozwiązania dobrze postawionego problemu, który zapoczątkował cykl dociekań teoretycznych z ważnymi konsekwencjami obserwacyjnymi. Praca Einsteina nie wyrosła jednak z pustki, lecz była dobrze osadzona w poprzedzających ją kosmologicznych spekulacjach. Celem niniejszego studium jest zwrócenie uwagi na najważniejsze wątki tych spekulacji i ukazanie ich związku z zagadnieniami, jakie później pojawiły się w kosmologii.

W historycznej pamięci kosmologów przetrwały trzy problemy dyskutowane w XIX wieku: paradoks Olbersa (dlaczego nocne niebo nie świeci?), paradoks Seeligera (dlaczego wszechświat jest

grawitacyjnie stabilny?) i zagadnienie śmierci ciepłej wszechświata. Wszystkie te trzy problemy miały kontynuacje w dwudziestowiecznej kosmologii i można je uważać za zaczątki później rozwijanych wątków. Ale spekulacji kosmologicznych było oczywiście znacznie więcej. Wprawdzie kosmologii nie traktowano wówczas jako prawdziwej nauki, ale to nie przeszkadzało różnym uczynom, także astronomom, snuć kosmologicznych hipotez lub fantazji, choć czynili to najczęściej w książkach popularno–naukowych i popularnych odczytach. Ludzie nie związani z nauką czynili to jeszcze chętniej, jak zresztą czynią to do dziś. Z tym, że wówczas mieli oni większe szanse na posłuch, ponieważ kosmologiczne standardy nie były jeszcze ustalone.

2. PARADOKS OLBERSA

Ale i te trzy „klasyczne problemy kosmologiczne” XIX w. były widziane inaczej niż obecnie. Rozważmy na przykład paradoks Olbersa. Znany był od czasów Newtona, choć to Olbers nadał mu rozgłos. Ale bynajmniej tego rozumowania nie uważano za paradoks. Wśród astronomów panowało wówczas przekonanie, że przestrzeń międzygwiazdowa jest wypełniona dość gęstym gazowym ośrodkiem. I to on pochłania światło gwiazd, czyniąc nocne niebo ciemnym. Dopiero, gdy na początku XX w. okazało się, że przestrzeń międzygwiazdowa jest znacznie bardziej przezroczysta niż dotychczas sądzono, ciemność nocnego nieba zaczęła budzić zdziwienie. W 1917 r. Shapley traktował to już jako dylemat: albo obszar przestrzeni wypełniony gwiazdami jest skończony, albo nocne niebo powinno świecić jednostajnym blaskiem. Thompson (Lord Kelvin) w r. 1901 zaproponował inne rozwiązanie. Jeżeli wiek wszechświata jest skończony i wynosi np. X lat, to światło od obiektów, położonych od nas dalej niż X lat świetlnych, nie może do nas dochodzić i paradoks zostaje zlikwidowany¹. Było to

¹W. Thompson, “On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space”, *Philosophical Magazine*, 2, 1901, 161.

historycznie pierwsze poprawne rozwiązanie paradoksu Olbersa. Ale dopiero znacznie później Herman Bondi zwrócił uwagę na fakt, że tradycyjne wyjaśnienie, odwołujące się do gazu wypełniającego przestrzeń międzygwiazdową, nie rozwiązuje sprawy. „Co [bowiem] — pisał on — dzieje się z energią zaabsorbowaną przez gaz? Będzie ona oczywiście ogrzewała gaz dopóki nie osiągnie on takiej temperatury, że będzie wypromieniowywał tyle, ile otrzymuje, a więc nie będzie redukował średniej gęstości promieniowania”².

Ponieważ w czasach Bondiego znane już było zjawisko „rozszerzania się wszechświata”, mógł on zaproponować nowe rozwiązanie: przesunięcie ku czerwieni, związane z ucieczką galaktyk, redukuje energię otrzymywaną przez ziemskiego obserwatora, co może likwidować paradoks. Rozwiązanie to dość powszechnie uważano za obowiązujące w kosmologii relatywistycznej, dopiero Edward Harrison w swoich dogłębnych studiach wykazał, że poprawność tego rozwiązania zależy od fizyki konkretnego modelu kosmologicznego, np. jest słuszne dla modelu stanu stacjonarnego, w którym średnia droga swobodna fotonu jest większa niż odwrotność stałej Hubble’a, ale nie jest słuszne dla wszystkich modeli ekspandujących typu Wielkiego Wybuchu³.

3. PARADOKS SEELIGERA

Paradoks grawitacyjny, nazywany dziś paradoksem Seeligera, także był już znany Newtonowi, który w liście do Bentleya pisał, że stabilny rozkład równomiernie rozmieszczonych we wszechświecie cząstek, przyciągających się grawitacyjnie, jest tak trudny do utrzymania jak ustawienie nieskończonej liczby igieł ostrzami na

²H. Bondi, *Kosmologia*, PWN, Warszawa 1965, s. 30.

³E. Harrison, “Olbers Paradox in Recent Times”, [w:] *Modern Cosmology in Retrospect*, [red.:] B. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergia, A. Messina, Cambridge University Press, Cambridge 1990, ss. 34–45.

powierzchni lustra⁴. W r. 1895 niemiecki astronom, Hugo von Seeliger argumentował, że idea nieskończonego wszechświata równomiernie wypełnionego materią jest nie do pogodzenia z newtonowskim prawem grawitacji⁵. Jego argument sprowadzał się do tego, że chcąc obliczyć siłę grawitacyjną wywieraną na ciało próbne, trzeba całkować po wszystkich masach obecnych we wszechświecie, a całka taka jest rozbieżna. Jako środek zaradczy Seeliger zaproponował modyfikację prawa ciężenia powszechnego polegającą na dodaniu do wyrażenia na potencjał grawitacyjny $\phi(r) = -M/r$ członu $-\Lambda r$ ze „stałą kosmologiczną” Λ . Podobną zmianę prawa ciężenia zasugerował rok później Carl Neumann.

Dokładnie ten sam problem pojawił się w pierwszej pracy kosmologicznej Alberta Einsteina z 1917 r. Motywacja wprowadzenia stałej kosmologicznej do równań pola przez Einsteina pozornie była inna niż w przypadku Seeligera czy Neumanna. Einstein poszukiwał statycznego rozwiązania równań pola i dość szybko spostrzegł, że rozwiązanie takie istnieje tylko wówczas, gdy do równań wprowadzi się odpowiednią dodatnią stałą. Wkrótce jednak okazało się, że był to w istocie ten sam problem — problem stabilności pola grawitacyjnego. Rozwiązanie Einsteina jest statyczne ale niestabilne: jakakolwiek, dowolnie mała, zmiana wartości stałej kosmologicznej powoduje albo zapadanie się, albo ekspansję Einsteinowskiego świata. A to z kolei na ogół produkuje osobliwości. Zagadnienie osobliwości wikało się wówczas w paradoksy i niezrozumienia⁶; dopiero w latach sześćdziesiątych udowodnienie twierdzeń o istnieniu osobliwości przez R. Penrose’a, S.W. Hawkinga i innych wyjaśniło sytuację. Do dziś pozostaje

⁴“Four Letters to Richard Bentley” [w:] *Theories of the Universe*, [red.:] M.K. Munitz, The Free Press, Collier Macmillan Publishers, New York—London 1965, s. 214.

⁵Por. S.L. Jaki, „Das Gravitations-Paradoxon des unendlichen Universums”, *Sudhoffs Archiv* 63, 1979, 105–122.

⁶O historii problemu osobliwości w kosmologii relatywistycznej por.: J. Earman, J. Eisensteadt, “Einstein and Singularities”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 30B, 1999, 185–235.

zagadnieniem otwartym, czy osobliwości w modelach kosmologicznych przetrwają wprowadzenie kiedyś kosmologii kwantowej.

4. *TERMODYNAMIKA WSZECHŚWIATA*

Trzecią grupą zagadnień kosmologicznych poruszanych w XX w. były zagadnienia związane z zastosowaniem termodynamiki do Wszechświata jako całości. Nauka o ciepłe niemal od samego początku nasuwała myśl o takich zastosowaniach. Już Jean Baptiste Joseph Fourier, w swojej klasycznej pracy o teorii ciepła podjął się stworzenia fizyki układu słonecznego (czyli „świata” w ówczesnym rozumieniu) przy pomocy tej teorii. Robert Mayer, uznawany za odkrywcę zasady zachowania energii uważał, że świadczy ona przeciw materializmowi i ateizmowi. W 1850 r. Rudolf Clausius sformułował drugą zasadę termodynamiki jako tendencję do wyrównywania się temperatur i niemożliwości skonstruowania maszyny, która przenosiłaby ciepło z ciała o niższej temperaturze do ciała o wyższej temperaturze. Cztery lata później przeformułował tę zasadę, używając funkcji, którą dopiero w 1865 r. nazwał funkcją entropii. To od Clausiusa pochodzą sformułowania: pierwszej zasady termodynamiki — „energia świata jest stała” i drugiej zasady termodynamiki — „entropia świata dąży do maksimum”. Obydwa te sformułowania wyraźnie traktują świat (*die Welt*) jako układ termodynamiczny (choć w swoich innych pracach Clausius rzadko używał takiego „globalnego języka”). William Thompson jeszcze chętniej rozwijał kosmologiczne zastosowania termodynamiki. Chętnie także wyciągał z nich wnioski teologiczne. Z zasady rozpraszania energii wnioskował o „pewnej epoce w skończonej przeszłości, dla której stanu energii nie można wydedukować z żadnych antecedensów przy pomocy naturalnych praw”⁷. Thompson przyznawał, że doszedł do swojej koncepcji, czytając pracę Fouriera, w której zwracał on

⁷ *Mathematical and Physical Papers*, vol. 2, Cambridge University Press, Cambridge, 1884, ss. 37–38.

uwagę na fakt, że równanie przemian cieplnych nie ma rozwiązań dla ujemnych wartości parametru czasu. A więc istnieje zerowa wartość parametru czasu, począwszy od której przemiany cieplne mają sens.

Twierdzenie o „śmierci cieplnej Wszechświata” pojawiło się w pismach Hermanna Helmholtza. Utrzymywał on, że gdy wszechświat osiągnie stan równowagi, „wszystkie naturalne procesy muszą ustać”. Trudno się dziwić, że tak daleko idące wnioski wyciągane z drugiej zasady termodynamiki rozpełtały niekończące się dyskusje zarówno o charakterze filozoficzno–światopoglądowym, jak i o bardziej fizycznych aspektach całego zagadnienia. Gdy chodzi o te ostatnie, dyskutowano zwłaszcza dwa problemy: Po pierwsze, czy wszechświat można uważać za układ izolowany? Po drugie, na ile uprawnione jest ekstrapolowanie praw fizyki lokalnej (zasad termodynamiki) na cały wszechświat? Dla przykładu odnotujmy zdanie Ernesta Macha, który utrzymywał, że żadna wypowiedź o wszechświecie jako całości nie może być sensowna. Twierdzenia „naukowe” o wszechświecie — pisał — „wydają mi się gorsze niż najgorsze filozoficzne twierdzenia”⁸.

Nowe wątki do dyskusji wniosło statystyczne sformułowanie termodynamiki przez Ludwiga Boltzmann. Rekurencyjne twierdzenia Poincaré’go (układ powraca nieskończenie wiele razy dowolnie blisko stanu, w którym się już kiedyś znajdował) dostarczyło teoretycznego wsparcia do dosyć popularnej wówczas koncepcji „wiecznych powrotów świata”⁹. Ernst Zermelo dopatrywał się sprzeczności pomiędzy twierdzeniem Poincaré’go a ekstrapolacją praw termodynamiki do całego Wszechświata. Zarówno sam Poincaré, jak i Boltzmann zwrócili mu uwagę, że rozwiązanie leży w statystycznym charakterze zasad termodynamiki. Mówią one

⁸*Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, 2 wyd. Barth, Leipzig 1909, ss. 36–37.

⁹Por. mój art.: „Idea wiecznych powrotów: od Zawirskiego do dziś”, *Filozofia Nauki* 11, 2003, 5–22.

zawsze tylko o probabilistycznym zachowaniu układów w długiej skali czasowej.

Boltzmann zaproponował interesujący sposób usunięcia sprzeczności pomiędzy kosmologicznymi wnioskami z drugiej zasady termodynamiki a przekonaniem o wieczności i przestrzennej nieograniczoności wszechświata. Wszechświat już dawno osiągnął stan równowagi termicznej, ale ponieważ możemy wyobrazić sobie, że jest „tak wielki jak tylko chcemy”, należy przyjąć, że istnieją w nim małe (w porównaniu z całością) fluktuacje — odchylenia od stanu równowagi. „Nasz świat” jest taką fluktuacją, w której entropia lokalnie rośnie¹⁰. Boltzmann rozwinął tę koncepcję w swoim fundamentalnym podręczniku¹¹.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że Boltzmann można uznać za prekursora modnej dziś ideologii „wieloświata” (multiverse) — koncepcji, wedle której „nasz świat” jest tylko jednym z (nieskończenie) wielu istniejących światów. Każda Boltzmannowska fluktuacja może być odrębnym światem. „Zbiór wszystkich światów” bywa dziś rozmaicie rozumiany i jest przywoływany do pełnienia różnych funkcji ideologicznych.

Trudno powstrzymać się od myśli, jak bardzo dwudziestowieczny rozwój kosmologii i fizyki zdystansował powyższe spekulacje. Jeżeli zestawimy spektakularne osiągnięcia dzisiejszej kosmologii z twierdzeniem Macha, że jakakolwiek wypowiedź o wszechświecie jest bardziej bezsensowna niż twierdzenia filozofów, to natychmiast ujawnia się przepaść dzieląca naukę tamtych czasów i naukę współczesną.

Jest rzeczą symptomatyczną, że żadnemu z ówczesnych krytyków drugiej zasady termodynamiki nie przyszło nawet na myśl, w jaki sposób może ją ograniczyć nauka przyszłości. W latach trzydziestych XX w. Richard Tolman jako pierwszy zauważył, że druga zasada termodynamiki w kontekście ogólnej teorii względ-

¹⁰L. Boltzmann, “On Certain Questions of the Theory of Gases”, *Nature*, 51, 1895, 483–485.

¹¹*Vorlesungen über Gastheorie*, cz. II, Barth, Leipzig 1885.

ności (tzn. w obecności pola grawitacyjnego) powinna zostać uogólniona, a warunek równowagi termodynamicznej przeformułowany tak, by zależał nie tylko od różnic temperatur lecz również od różnic potencjałów grawitacyjnych. Czy warunek ten jest spełniony, czy nie — zależy od konkretnego modelu kosmologicznego. Tolman opracował podstawy termodynamiki relatywistycznej, która w zastosowaniach kosmologicznych zastępuje termodynamikę klasyczną¹² (o czym popularyzatorzy kosmologii często zapominają).

5. UWAGI NA ZAKOŃCZENIE

Powszechnie uważa się opublikowanie pierwszej kosmologicznej pracy Einsteina w 1917 r. za początek naukowej kosmologii. Jest to niewątpliwie początek kosmologii relatywistycznej, ale jeśli nawet nie kosmologia jako nauka, to w każdym razie autentyczne zagadnienia kosmologiczne istniały już wcześniej. Paradoxs Olbersa, paradoks Seeliger'a i zastosowania termodynamiki do wszechświata, przypomniane krótko w niniejszym artykule, są tego wymownym dowodem. Istnieje jednak zasadnicza różnica pomiędzy zagadnieniami kosmologicznymi, tak jak były one traktowane w XIX w. (i wcześniej) i tak jak były one traktowane w kosmologii XX w. (i są traktowane współcześnie). W kosmologii przedrelatywistycznej punktem wyjścia było zaobserwowanie pewnego „niepokojącego” zjawiska (ciemność nocnego nieba, dobrze określone lokalnie pole grawitacyjne) lub sformułowanie pewnego, obowiązującego lokalnie, prawa fizyki (druga zasada termodynamiki), następowała potem ekstrapolacja do obszarów bezpośrednio niedostępnych obserwacji i wyciąganie wniosków o „wszechświecie jako całości”. Metodologia współczesnej kosmologii jest zupełnie odmienna. Najpierw konstruuje się model kosmologiczny, tzn. wybiera się jakieś rozwiązanie równań Einsteina

¹²Por. R.C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Clarendon Press, Oxford 1934.

i dokonuje się jego kosmologicznej interpretacji. Dopiero w ramach konkretnego modelu można rozpatrywać konkretne zagadnienia, np. rozwikływać paradoks Olbersa lub badać, czy w *danym modelu* nastąpi śmierć cieplna wszechświata, czy nie. Oczywiście problem ekstrapolacji nadal pozostaje głównym metodologicznym problemem kosmologii, ale bogactwo danych obserwacyjnych, napływających coraz większym strumieniem wraz z postępem technik obserwacyjnych, pozwala coraz lepiej testować modele kosmologiczne, tym samym czyniąc zabiegi ekstrapolacji coraz bardziej podległymi empirycznej kontroli. Jednak pasja poznawcza człowieka nigdy nie pozwoli mu zatrzymać się na granicy tego, co obserwowalne w danej epoce. Zawsze będą istnieć „śmiałe spekulacje”, łamiące wszelkie metodologiczne reguły (np. dziś idea „wieloświata”). Właśnie tej pasji nauka zawdzięcza swoje istnienie.

SUMMARY

COSMOLOGICAL QUESTIONS BEFORE EINSTEIN

Einstein's first cosmological work, published in 1917, marked the beginning of relativistic cosmology, but it was well founded on earlier questions concerning the world as a whole. The paper presents three such topics: the Olbers paradox, the Seeliger paradox, and speculations concerning cosmological consequences of thermodynamics together with some of their repercussions in relativistic cosmology.