

## O niemożliwości kosmologii w fizyce klasycznej

*Leszek M. Sokółowski*

*Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego*

### 1.

Co ma wspólnego atom z całym Wszechświatem? To, że według fizyki klasycznej jeden i drugi nie mogą istnieć. Z atomem sprawa jest jasna. Jeżeli wyobrazić go sobie, zgodnie z eksperymentami Rutherforda, jako coś podobnego do układu słonecznego, czyli że elektrony krążą wokół nieruchomego jądra niczym planety wokół Słońca, to nie może być obiektem trwałym. Według elektrodynamiki klasycznej ładunek biegnący po orbicie eliptycznej lub kołowej musi promieniować i w krótkim czasie nawinie się po spirali na jądro emitując olbrzymią ilość energii. Według mechaniki kwantowej towarzyszący elektronowi w tzw. stanie stacjonarnym kwantowy prąd elektryczny jest równy zeru i elektron nie promieniuje, więc tworzy się trwały układ związany – atom. Z Wszechświatem rzecz jest subtelniejsza: sprawiał on dziewiętnastowiecznej fizyce nieprzewyciężalne trudności. W fizyce zwykle interesujemy się aktualnym stanem wiedzy, a nie historią, cóż nas bowiem obchodzą kłopoty fizyków w XIX wieku? Kosmologia jest tu odstępstwem od reguły, ona jest jak sam Wszechświat: nie zrozumiemy dlaczego on jest dzisiaj taki jaki jest, jeżeli nie poznamy jego odległej przeszłości. Bez znajomości historii, pojmowanie kosmologii jest niepełne.

Czym właściwie jest Wszechświat? Aktualna jego definicja jest trudna, więc ją pominiemy i zadowolimy się dwiema uzupełniającymi się definicjami z encyklopedii. Pierwsza, astronomiczna, wylicza jego składniki. „Wszechświat, zwany też Kosmosem, to układ wszystkich obiektów astronomicznych, materii rozproszonej i pól fizycznych wraz z czasoprzestrzenią, którą wypełniają.” (Wielka Encyklopedia PWN, 2005) Druga, fizyczna, jest konceptualnie pełniejsza. „Wszechświat jest zbiorem wszystkich istniejących obiektów materialnych, czyli obiektów podległych prawom fizyki, niosących pewien rodzaj energii i mogących oddziaływać między sobą.” (Encyklopedia Nauki i Techniki, 2001) Definicja fizyczna wydaje się zadowalająca, jednak i ona ma ukryte wady i luki. Powiemy o nich przy innej okazji, teraz przyjmujemy, że z grubsza wiemy czym jest Wszechświat i zajmiemy się kwestią, czy fizyka jest w stanie dać zadowalający opis jego budowy i ewolucji. Odpowiedź nie jest wcale oczywista, bo fizyka ze swej istoty zajmuje się obiektami, których jest lub może być dowolnie wiele, a Wszechświat jest jeden i nie ma innych. Zasadna więc wydaje się teza, że fizyka winna dostarczyć teorii Wszechświata, która ze swej istoty opisuje tylko jeden obiekt, ten faktycznie istniejący i żaden inny. Niestety nikt nie wie, jak taką teorię skonstruować i chyba nieprędko ona powstanie. Pozosta-

je przyjąć, że fizyka będzie nadmiarowa: stworzy wiele rozmaitych teorii Wszechświata, zwanych jego modelami, krańcowo odmiennych i dopiero cały zespół obserwacji astronomicznych pozwoli z tego zbioru wybrać model najlepiej pasujący do rzeczywistości. Już ta teza – że sama fizyka będzie w stanie podać spójne i kompletne modele, z których będzie można wybrać ten właściwy – jest silna. W XIX wieku popularny był pogląd, do dziś wyznawany przez niektórych biologów, że istnieją trzy odrębne światy: mikroświat atomów, w owym czasie hipotetyczny, świat makroskopowy otaczających nas przedmiotów i organizmów żywych oraz megaświat wielkich obiektów astronomicznych. Światy te miały być rządzone odmiennymi prawami i przez to słabo ze sobą powiązane; fizyka miała się zajmować dwoma pierwszymi, a w mniejszym stopniu megaświatem. Tu trzeba powiedzieć wyraźnie: *przyroda jest jedna i rządzi nią jeden zestaw uniwersalnie słusznych praw fizyki, od atomów po największe obiekty astronomiczne.*

## 2.

Pierwszym, który zadał pytanie, jak zbudowany jest Wszechświat i dlaczego jest taki, a nie inny, był astronom niemiecki Johannes Kepler. Odpowiedź, jakiej udzielił w 1596 roku w dziele *Mysterium cosmographicum* była równie pomysłowa, co fałszywa, więc ją pominiemy. Newton uznał, że siłą, która spaja Wszechświat i decyduje o jego budowie, jest grawitacja. Ten pogląd jest również dziś powszechnie przyjęty, bowiem z czterech oddziaływań fundamentalnych dwa, silne i słabe, są krótkozasięgowe, a dalekozasięgowe siły elektromagnetyczne nie grają większej roli, gdyż wszystkie obserwacje wskazują, że na odległościach astronomicznych, poczynając od rozmiarów galaktyki, materia jest globalnie elektrycznie obojętna.

Na rozwoju kosmologii silnie zaważyły pewne założenia filozoficzne i metodologiczne. Kosmologia narodziła się u samych początków greckiej filozofii i nauki w VI wieku p.n.e. O jej początkach, o sposobach myślenia jej twórców wiemy bardzo mało i nigdy więcej się nie dowiemy, bowiem niemal wszystkie dokumenty z tamtej epoki przepadły. Możemy jedynie snuć pewne przypuszczenia. Ówczesni filozofowie czuli się zapewne przytłoczeni olbrzymią różnorodnością i zmiennością zachodzących wokół nich zjawisk przyrodniczych, w których nie potrafili dostrzec jakiegoś porządku. Zarazem zdawali sobie sprawę, że świat chaotyczny i zmienny jest rozumowo nieopisywalny, że konieczne są jakieś globalne zasady porządkujące. Sugestii, gdzie ich szukać, dostarczało niebo: widać było na nim kilka obiektów, których ruchami rządziły dające się odkryć regularności (wielką rolę odegrało tu przewidzenie przez Talesa w 585 r. p.n.e. zaćmienia Słońca), zaś większość ciał niebieskich wydawała się absolutnie niezmienna i nieruchoma. Wynikiem długiego i krętego ciągu rozumowań była teza, że świat globalnie jest rządzony regułami harmonii, które czynią go regularnym, wiecznym i niezmiennym, a jedynie lokalnie widzimy

oszałamiające bogactwo zmiennych procesów. Ich zmienność też jest taka, by w sumie cały Wszechświat trwał w tej samej postaci.

Pogląd ten w zasadniczych zarysach przetrwał upadek cywilizacji starożytnej, przeszedł do Średniowiecza, a następnie został przejęty przez nowożytne nauki przyrodnicze. W XIX wieku przekonanie o wieczności materii i niezmienności Wszechświata uzyskało silne wsparcie w wielkich odkryciach tego czasu: prawie zachowania masy w chemii i prawie zachowania energii w fizyce. Początki fizyki nowoczesnej również niczego tu nie zmieniły. Gdy w 1917 r., dwa lata po sformułowaniu ogólnej teorii względności, Einstein przedstawił pierwszy relatywistyczny (tzn. zgodny z OTW) model Wszechświata, bez wahania wpisał się w tę dostojną tradycję: jego model był statyczny i świat w nim nie ewoluował.

Dodajmy, że teza ta była konceptualnie niespójna. Jeżeli przyjmiemy, że Wszechświat jest pewnym – bardzo specyficznym – układem fizycznym, czyli że podlega prawom fizyki, a nie stoi ponad nimi, to należało przyjąć, że to, czy jest on wieczny i niezmienny, czy też ewoluuje, winno wynikać z rządzących nim praw, a nie być przyjmowane *a priori* jako założenie wstępne. Ale to dziś, na mocy doświadczenia, jesteśmy tacy mądrzy, 90 lat temu nie było to wcale oczywiste.

Licząca 2500 lat wiara w niezmiennność Wszechświata załamała się nagle. W 1929 r. astronom amerykański, Edwin Hubble, ogłosił odkrycie prawa powszechnej ucieczki galaktyk (galaktyki rozbiegają się radialnie od nas z prędkościami wprost proporcjonalnymi do ich odległości), a pod jego wpływem Einstein uznał w 1931 r., że Wszechświat ewoluuje. Nie zostało to jednak powszechnie przyjęte. Prawo Hubble'a doskonale pasuje do najprostszego, niestatycznego relatywistycznego modelu Wszechświata, podanego w latach 1922–1924 przez Aleksandra Friedmanna z Sankt Petersburga. W modelu Friedmanna Wszechświat ma początek: wyłania się z tzw. osobliwości czasoprzestrzeni, nazwanej później Wielkim Wybuchem. Ten eksplozywny początek budził silny opór. Powodów było szereg, jednym z nich było naiwnie interpretowane prawo zachowania energii. Nie tylko filozofowie zaciekle zwalczali, jeszcze w latach pięćdziesiątych zeszłego wieku, ideę, że Wszechświat miał początek. W latach 1946–1953 znany fizyk amerykański, George Gamow, usilnie propagował teorię powstawania pierwiastków chemicznych w reakcjach syntezy termojądrowej we wczesnym Wszechświecie, wkrótce po Wielkim Wybuchu. Spotkał się z niechęcią, niedowierzaniem i obojętnością, a jedyną twórczą reakcją było opracowanie przez grupę astrofizyków angielskich konkurencyjnej teorii syntezy pierwiastków w gwiazdach. (Dziś wiemy, że obie strony miały częściowo rację: hel powstał w większości tuż po Wielkim Wybuchu, a pierwiastki cięższe są tworzone w masywnych gwiazdach.) W napisanym ok. 1955 r. i długo cenionym podręczniku OTW, rosyjski fizyk, Władimir Fock, napisał, że kosmologia jest bliższa *science-fiction* niż poważnej fizyce.

Kolejna zmiana była nagła. W 1965 r. Amerykanie Arno Penzias i Robert Wilson dokonali – całkiem przypadkowo – jednego z największych odkryć XX wieku: zarejestrowali tzw. reliktove promieniowanie kosmiczne, czyli mikrofalowe promieniowanie elektromagnetyczne, będące reliktem wczesnego Wszechświata, gdy był on mały, gęsty i gorący. To był moment narodzin fizycznej kosmologii. W ciągu paru lat opracowano Standardowy Model Kosmologiczny, obowiązujący (z pewnymi modyfikacjami) do dziś, a kosmologia stała się pełnoprawnym działem fizyki (i astronomii), jednym z najszybciej rozwijających się i fascynujących.

### 3.

Wróćmy do fizyki klasycznej, obowiązującej do początków XX wieku. Skoro obowiązywała w niej doktryna o wieczności i niezmienności Wszechświata jako całości, to możliwe były tylko dwa jego modele.

#### I. Wszechświat – wyspa materii

Przestrzeń fizyczna jest przestrzenią euklidesową, innej możliwości nie dopuszczano (ani nie rozważano poważnie). W tej przestrzeni materia w postaci rojowiska gwiazd zajmuje skończony obszar tworząc „wyspę” otoczoną pustką rozciągającą się do nieskończoności. Tę chmurę gwiazd utożsamiano z naszą galaktyką, czyli Drogą Mleczną; ewentualnie wokół niej mogły znajdować się mniejsze wysepki materii, zwane „mgławicami pozagalaktycznymi” (Hubble udowodnił w 1924 r., że są one odrębnymi galaktykami, mniej lub bardziej podobnymi do naszej.)

Taka wyspa materii nie może trwać wiecznie niezmienniona z dwu powodów. Po pierwsze, przyciąganie grawitacyjne powoduje, że gwiazdy nie mogą być nieruchome. Takie zbiorowisko ciał szybko zapadnie się (tzw. kolaps grawitacyjny) do punktu będącego środkiem jego masy. Trwały (przynajmniej przez jakiś czas) może być tylko układ przypominający Układ Słoneczny: wszystkie gwiazdy krążą wokół wspólnego środka masy. Ale takich ruchów gwiazd nie obserwowano. Najszybsza jest gwiazda Barnarda w gwiazdozbiornie Wężownika, która przesuwa się po niebie z prędkością 10 sekund kątowych na rok, inne są dużo powolniejsze. Wysunięto więc hipotezę, że pobliskie gwiazdy są przypadkowo powolne, a szybkie gwiazdy są zbyt daleko, by ich ruchy dostrzec.

Drugi zarzut dotyczy tej chmury gwiazd, krążących, każda niezależnie od pozostałych (czyli nie jest to wirowanie wspólne jak w wodnym wirze), wokół środka masy, który byłby wówczas prawdziwym środkiem Wszechświata. Taka chmura jest nietrwała niczym kropla wody w powietrzu zawierającym mało pary wodnej. W kropli molekuly bezustannie się zderzają i w zderzeniach zyskują lub tracą energię kinetyczną. Niektóre molekuly blisko powierzchni kropli zyskują w ten sposób tak dużą prędkość, iż są w stanie pokonać przyciąganie ze strony pozostałych i uciekają z kropli w postaci pary wodnej. Coś podobnego

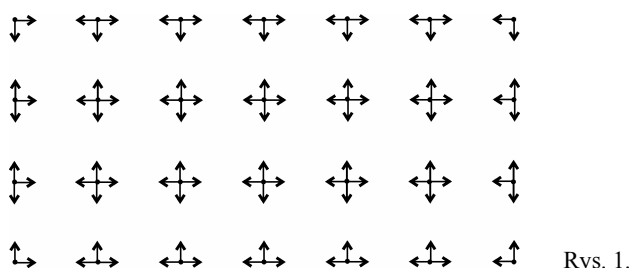
dzieje się w chmurze gwiazd. Całkowita energia chmury jest sumą energii kinetycznych gwiazd i energii potencjalnych ich oddziaływań grawitacyjnych,

$$E_c = \sum_i \frac{1}{2} m_i v^2 + \sum_i m_i U(\mathbf{r}_i, t) = \text{const} < 0, \quad (1)$$

sumujemy po wszystkich gwiazdach.  $U(\mathbf{r}_i, t)$  jest wypadkowym potencjałem grawitacyjnym w punkcie  $\mathbf{r}_i$ , w którym w chwili  $t$  znajduje się gwiazda o masie  $m_i$ , pochodzącym od wszystkich pozostałych gwiazd. Gwiazdy ruszają się, więc potencjał jest zmienny, natomiast całkowita energia  $E_c$  jest zachowana w czasie, bowiem nie ma oddziaływań z otoczeniem i jest ujemna, gdyż układ jest grawitacyjnie związany. W odróżnieniu od molekuł w wodzie gwiazdy nie zderzają się (prawdopodobieństwo kolizji jest znikome), mogą natomiast znacznie zbliżyć się do siebie. Energia każdej z gwiazd, suma kinetycznej i potencjalnej, jest zmienna w czasie. W trakcie zbliżeń gwiazdy mogą wymieniać się energią kinetyczną. (Podobne zjawisko jest wykorzystywane do napędzania rakiet w dalekich lotach kosmicznych. Np. rakieta lecąca do Jowisza parokrotnie przelatuje koło Ziemi lub Marsa i za każdym razem pole grawitacyjne planety przyspiesza ją.) Przy takich zbliżeniach niektóre gwiazdy zyskują tak dużo energii, że ich prędkość przekracza drugą prędkość kosmiczną, czyli pokonują przyciąganie ze strony całej chmury gwiazdowej i uciekają z niej do nieskończoności. Całkowita energia chmury maleje o energię uniesioną przez zbiegłą gwiazdę. Gwiazd stopniowo ubywa w chmurze, a pozostające w niej mają energie coraz mniejsze (są ujemne i mają coraz większy moduł). Gdy większość gwiazd rozproszy się do nieskończoności, resztkę chmury zapadnie się w kolapsie grawitacyjnym. Ten proces „parowania” gwiazd z pierwotnej chmury jest niezmiernie powolny, trwa miliardy miliardów lat, lecz nie ma to znaczenia. Ponad wiek temu uważano, że Wszechświat jest nieskończenie stary i trwa wciąż w tej samej postaci. Nie może to być zatem Wszechświat wyspowy.

## II. Wszechświat jednorodny

Większą popularność zyskał model, w którym Wszechświat jest jednorodny i izotropowy, czyli statyczna materia wypełnia równomiernie całą nieskończoną przestrzeń. Idea pochodzi zasadniczo od Newtona. Wyobraźmy sobie nieskończony układ identycznych gwiazd (czyli o równych masach i rozmiarach), które rozmieszczone są w węzłach sieci sześciennej, a więc w dokładnie równych odległościach (rys. 1). Siły grawitacyjne działające na każdą gwiazdę ze strony pobliskich gwiazd równoważą się dokładnie, pozostaje więc ona w spoczynku. Zapytany w tej kwestii, Newton stwierdził, że taka nieskończona sieć gwiazd jest w równowadze i pozostanie statyczna. Sieć nie może mieć brzegu, bo siły działające na brzegowe gwiazdy nie są zrównoważone, musi więc być nieskończona.



Rys. 1.

Ten model wydawał się bardziej realistyczny, mimo że astronomia wcale go nie podtrzymywała; obserwacje raczej sugerowały wszechświat wyspowy. Dopiero w XIX wieku zorientowano się, że podobnie jak model konkurencyjny, napotyka na nieprzezwyciężalne trudności. Pierwsza jest oczywista: jest to twór niestabilny niczym przysłowiowy domek z kart. Jeżeli którakolwiek z gwiazd przesunie się nieznacznie poza położenie równowagi, to wypadkowa siła przyciągania będzie ją coraz bardziej oddalać od tego miejsca, a jej własna grawitacja zadziała jak dodatkowa siła na wszystkie inne gwiazdy, bliskie i dalekie. W rezultacie cały nieskończony układ gwiazd wypadnie niemal natychmiast z równowagi i rozpadnie się na nieskończenie wiele różnej wielkości układów lokalnych, w których gwiazdy będą krążyć wokół lokalnych środków ciężkości, a sąsiadujące układy będą obiegać wspólne środki ciężkości, obszary zagęszczone zapadną się, a wokół nich utworzą się strefy rozrzedzone lub puste itd.

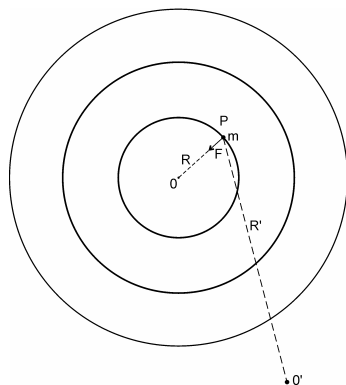
Ten argument wystarcza całkowicie, by odrzucić model Wszechświata jednorodnego. W fizyce układy niestabilne pojawiają się rzadko i trwają bardzo krótko. Wszechświat na pewno nie jest takim układem. Jednak przy badaniu modelu jednorodnego pojawiła się druga trudność, bardziej niepokojąca niż niestabilność i niezależna od niej. Ujmujemy ją stwierdzeniem: *teoria grawitacji Newtona nie stosuje się do nieskończonego jednorodnego rozmieszczenia materii.*

Odkładamy więc na bok poszukiwania modelu Wszechświata i zajmiemy się uzasadnieniem tego twierdzenia. Dla wygody zamiast rojowiska gwiazd rozpatrujemy ciągłą materię (gaz, ciecz) wypełniającą przestrzeń ze stałą gęstością masy  $\rho$ . Taki nieskończony ośrodek jest jednorodny, tzn. żaden punkt nie jest wyróżniony i jest izotropowy, czyli żaden kierunek nie jest wyróżniony. W układzie o skończonych rozmiarach zawsze są jakieś punkty wyróżnione, np. środek masy. W tym nieskończonym ośrodku umieścimy obserwatora w dowolnie wybranym punkcie  $P$ ; zadaje on pytanie, jaką siłą grawitacyjną działa cały ośrodek na znajdujące się w  $P$  ciało o masie  $m$ . Obserwator ten rozumuje następująco. Wybiera pewien punkt  $O$  jako centrum i zakreśla wokół niego koncentryczne sfery o rosnących promieniach. Punkt  $P$  leży na sferze o promieniu  $R$  (rys. 2). Załóżmy, że słuszne jest prawo ciężenia Newtona. Wynika z niego ważne twierdzenie: jeżeli ciągły rozkład masy jest sferycznie symetryczny

(a taki jest w szczególności rozkład ze stałą gęstością) względem centrum  $O$ , to siły grawitacyjne pochodzące od mas znajdujących się dalej od  $O$  niż punkt  $P$  znoszą się wzajemnie i w  $P$  działa tylko siła przyciągania masy zawartej w kuli o środku w  $O$  i promieniu  $R$ . Zewnętrznych względem  $P$  warstw kulistych jest nieskończenie wiele i siła grawitacyjna każdej z nich jest w  $P$  dokładnie równa zeru. Masa zawarta w kuli, na powierzchni której znajduje się obserwator, jest równa  $M = (4/3)\pi R^3 \rho$  i przyciąga znajdującą się w  $P$  masę  $m$  siłą

$$F = \frac{GMm}{R^2} = \frac{4\pi}{3} Gm\rho R \quad (2)$$

skierowaną od  $P$  do  $O$ . Ale przecież punkt  $O$  został wybrany jako centrum zupełnie dowolnie i nie jest w fizycznie wyróżniony! Wybierzmy jako centrum punkt  $O'$  odległy o  $R'$  od  $P$ ; wówczas identycznym rozumowaniem wykazemy, że w  $P$  działa wypadkowa siła wprost proporcjonalna do  $R'$  i skierowana wzdłuż  $PO'$ !



Rys. 2.

Rozumowanie to jest więc fałszywe. Twierdzenie, na którym się ono opiera, jest matematycznie poprawne, natomiast fałszywe jest jego założenie, a mianowicie, że w nieskończonym ośrodku słuszne jest prawo ciążenia Newtona. Zauważmy, że z założenia ten ośrodek jest idealnie izotropowy. Gdyby w jakimkolwiek punkcie działała wypadkowa siła grawitacyjna, to jej kierunek byłby wyróżnionym kierunkiem (przynajmniej w tym miejscu). Zatem w każdym punkcie siły grawitacyjne muszą się dokładnie znosić, tak jak zauważył to Newton. Nie mogą to być jednak siły dane jego prawem powszechnego ciążenia, gdyż na podstawie powyższego rozumowania wynika z niego niezerowa siła wypadkowa zależna od dowolnie wybranego centrum, co prowadzi do sprzeczności.

#### 4.

Stwierdzenie, że prawo powszechnego ciążenia nie jest całkiem powszechne, brzmi zaskakująco, więc zajmiemy się nim dokładniej. Prawa fizyki rządzące

dynamiką rozmaitych zjawisk mają postać równań różniczkowych mających nieskończony zbiór rozwiązań. Niektóre z tych rozwiązań są szczególnie fizycznie (i matematycznie) ważne i zostały odkryte (eksperymentalnie lub rozważaniami heurystycznymi) wcześniej niż same równania; nadawano więc im nazwę praw fizyki (praw empirycznych). Prawo oddziaływania elektrostatycznego ładunków zostało odkryte przez Charlesa Coulomba w 1785 r., 80 lat wcześniej niż równania Maxwella, dla których jest rozwiązaniem fundamentalnym. Johannes Kepler podał trzy prawa ruchu planet na początku XVII wieku, a dopiero pod koniec tego stulecia Newton udowodnił, iż są one rozwiązaniami jego równań ruchu z siłą grawitacyjną. Również prawo ciążenia Newtona nie jest prawem w dzisiejszym rozumieniu prawa fizyki, lecz rozwiązaniem fundamentalnym równania podanego w 1813 r. przez Simeona Poissona. W odróżnieniu od równań Maxwella, wyrażających dynamikę elektromagnetyzmu, czyli klasy zjawisk daleko szerszej niż zjawiska elektrostatyczne opisane prawem Coulomba, równanie Poissona nie jest podstawą nowej, szerszej teorii grawitacji i zostało wprowadzone dla lepszego opisu matematycznego zjawisk podległych prawu powszechnego ciążenia. Obecnie przez newtonowską teorię grawitacji rozumie się teorię statycznego pola grawitacyjnego opisanego potencjałem spełniającym równanie Poissona.

Siła działająca w polu grawitacyjnym na masę  $m$  jest równa  $\mathbf{F} = m \mathbf{g}$ , gdzie wektor  $\mathbf{g}$  jest natężeniem tego pola i jest gradientem potencjału,  $\mathbf{g} = -\text{grad } U$ , czyli we współrzędnych kartezjańskich w pewnym inercyjnym układzie odniesienia wektor ten ma składowe

$$\mathbf{g} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right). \quad (3)$$

W obszarze wypełnionym ciągłą materią z gęstością masy  $\rho(x,y,z)$  potencjał grawitacyjny podlega równaniu

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)U = 4\pi G \rho. \quad (4)$$

Wyrażenie w nawiasie nazywamy *operatorem różniczkowym Laplace'a (laplasjanem)* działającym na funkcje i przyporządkowującym im sumę ich drugich pochodnych cząstkowych; oznaczamy go  $\Delta$ . Równanie Poissona brzmi więc

$$\Delta U = 4\pi G \rho. \quad (5)$$

Z równania tego widać, że potencjał jest wyznaczony przez gęstość materii z dokładnością do addytywnej stałej, tzn.  $U$  i  $U + U_0$  są fizycznie tym samym rozwiązaniem dla dowolnej stałej  $U_0$ . W obszarze poza materią równanie Poissona redukuje się do równania Laplace'a  $\Delta U = 0$ .



Rozpatrzmy rozwiązanie równania (4) w nieskończonym jednorodnym ośrodku ze stałą gęstością masy  $\rho$ . Z symetrii zagadnienia wynika, że fizycznie sensownym rozwiązaniem musi być znikające natężenie pola,  $\mathbf{g} = \mathbf{0}$ . Odpowiada mu stały potencjał, np.  $U = 0$ . Wtedy lewa strona równania (4) znika,  $\Delta 0 = 0$ , zatem znika jego prawa strona i  $\rho = 0$ . Dostajemy sprzeczność, bowiem założyliśmy dodatnią gęstość masy. *Równanie Poissona nie ma fizycznie sensownych rozwiązań dla nieskończonego jednorodnego ośrodka.*

Z matematycznego punktu widzenia równanie Poissona ma rozwiązania w tym ośrodku. Wybierzmy dowolnie punkt  $O$  jako początek układu współrzędnych  $(x, y, z)$  i wprowadźmy zmienną radialną  $r$  zależnością  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ . Można sprawdzić (aczkolwiek wymaga to dłuższego rachunku), że rozwiązaniem sferycznie symetrycznym względem  $O$  jest funkcja

$$U(r) = \frac{2\pi}{3} G\rho r^2, \quad \text{a stąd} \quad \mathbf{g} = -\frac{4\pi}{3} G\rho \mathbf{r}. \quad (6)$$

Jak należało się spodziewać, jest to znaleziona poprzednio siła skierowana do  $O$ , czyli rozwiązanie fizycznie nieakceptowalne.

Trzeba z naciskiem stwierdzić, że newtonowska teoria grawitacji jest fizycznie sensowna i potwierdzona licznymi obserwacjami tylko wtedy, gdy oddziałujące grawitacyjnie ciała zajmują skończony obszar przestrzeni. Przy dodatkowych założeniach teoria ta stosuje się też do sytuacji, gdy materia wypełnia całą przestrzeń, lecz jej gęstość maleje dostatecznie szybko z odległością liczoną od pewnego punktu i asymptotycznie zmierza do zera dla nieskończonej odległości. *Opis oddziaływań grawitacyjnych w nieskończonym jednorodnym ośrodku materialnym jest poza zasięgiem teorii newtonowskiej.*

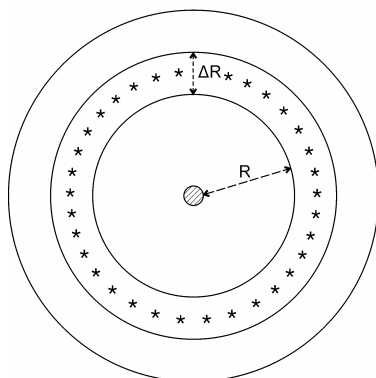
Konkluzja ta była w XIX wieku dla kosmologii zabójcza. Wszechświat, wprawdzie fizycznie jak najbardziej realny, okazał się układem, do którego znane prawa fizyki – w owym czasie uważane za uniwersalne i ostateczne – nie stosują się. Kosmologia nie mogła być nauką fizyczną.

## 5.

Dodajmy, jakby tego było mało, że oprócz sprzeczności pomiędzy ideą wiecznego i niezmiennego Wszechświata a newtonowską teorią grawitacji, kosmologia doznała w owym czasie spektakularnego ciosu z zupełnie innej strony. Był nim paradoks Olbersa, zwany też fotometrycznym.

Założmy, że nieskończony, jednorodny i statyczny Wszechświat spaja siła różna od siły grawitacyjnej Newtona. Ile światła gwiazd dociera do nas? Pytanie to zadawali kolejno Johannes Kepler w 1610 r. i odkrywca sławnej komety, Edmund Halley ok. 1721 r.; ich odpowiedź była zdumiewająca. Niemiecki lekarz i astronom, Heinrich Olbers, nadał mu formę paradoksu: *dlaczego nocne niebo jest ciemne?* Policzmy to robiąc dwa upraszczające założenia, które nie zmieniają wyniku. Założmy, że gwiazdy świecą z jednakową mocą zwaną ja-

snością absolutną gwiazdy  $L$ ; jest to energia emitowana izotropowo w ciągu 1 sekundy, np. jasność Słońca jest równa  $4 \cdot 10^{33}$  erg/s. Rozważmy cieką kulistą warstwę otaczającą Ziemię o promieniu  $R$  i grubości  $\Delta R$  dużo mniejszej od  $R$ , zatem znajdujące się w niej gwiazdy są w tej samej odległości od nas (rys. 3).



Rys. 3.

Gwiazdy obserwujemy za pomocą teleskopu z kulistym zwierciadłem, zatem teleskop może jednocześnie rejestrować światło ze wszystkich kierunków. Światło gwiazdy odległej o  $R$  rozkłada się równo na sferze o promieniu  $R$ , więc ilość światła  $l$  tej gwiazdy padająca w ciągu 1 s na zwierciadło o polu powierzchni  $S$  (zwana „jasnością widomą” gwiazdy) jest równa

$$l = \frac{S}{4\pi R^2} L. \quad (7)$$

W jednostce objętości jest  $n$  gwiazd, a liczba gwiazd w badanej warstwie o objętości  $V$  jest równa  $N = nV = 4\pi R^2 \Delta R n$ . Teleskop rejestruje łączną moc widomą gwiazd w tej warstwie równą  $Nl = nL\Delta R$  – ta moc nie zależy od  $R$ ! Wynik ten jest zrozumiały: wprawdzie moc widoma pojedynczej gwiazdy maleje jak  $R^{-2}$ , za to liczba gwiazd w warstwie rośnie jak  $R^2$ . Każda warstwa, bliska czy daleka, daje na Ziemi tyle samo światła. W nieskończonym świecie warstw jest nieskończenie wiele, zatem z nocnego nieba powinno docierać na Ziemię nieskończona ilość światła! To zdumiało wspomnianych astronomów.

Paradoks ciemnego nieba jest spektakularny. Ktoś zauważył przytomnie, że gwiazdy nie są punktowe i każda tworzy na niebie kołową tarczę, więc gwiazdy bliższe przysłaniają dalsze. To niewiele pomaga. Przyjmijmy, że wszystkie gwiazdy mają tę samą średnicę równą  $a$  i ustawmy pewną liczbę gwiazd na sferze o promieniu  $R$  tak, by ją całą pokryły, wówczas dalszych gwiazd nie widać. Każdą gwiazdę widzimy wtedy na niebie jako tarczę o polu  $(\pi/4)a^2$ . Liczba gwiazd potrzebnych do pokrycia całej sfery jest równa

$$\frac{4\pi R^2}{\frac{\pi}{4}a^2} = \frac{16R^2}{a^2} \quad (8)$$

i rośnie z promieniem tej sfery jak  $R^2$ . Z kolei jasność widoma każdej z nich maleje jak  $R^{-2}$ , zatem ilość światła docierającego do nas jest jednakowa, niezależnie od tego, czy ta sfera jest daleko, czy blisko. Umieścimy ją w odległości  $R = 150$  mln km, czyli w odległości Słońca od Ziemi. Średnicę Słońca widzimy z Ziemi pod kątem  $\alpha = a/R = 9,3 \cdot 10^{-3}$  radianów, czyli  $0,53^\circ$ . Sferę niebieską o tym promieniu można pokryć za pomocą

$$\frac{16R^2}{a^2} = \frac{16}{\alpha^2} \cong 184.000 \quad (9)$$

tarcz słonecznych. Zatem całe niebo winno świecić jak 184.000 słońc. Tak oczywiście nie jest.

Francuski astronom Jean Philippe Cheseaux wysunął w 1774 r. hipotezę, że przestrzeń międzygwiazdowa nie jest pusta, że zawiera chmury gazu i pyłu. Obłoki pyłowe mogą działać jak lustro i odbijać światło dalekich gwiazd, tak że widzimy tylko nieliczne gwiazdy bliskie. To wyjaśnienie było w tym czasie przekonujące, bowiem nie istniała jeszcze termodynamika. Gdy sformułowano jej podstawy, astronom angielski John Herschel obalił argument Cheseaux. Żadne ciało, a zwłaszcza obłok pyłu, nie może działać jak idealne lustro i odbijać całego padającego na nie promieniowania; musi część energii pochłoniąć i nagrzać się. W normalnych warunkach lustro jest chłodzone przez pobliskie ciała, np. powietrze i nagrzewania nie zauważamy. Międzygwiazdowy pył oświetlany przez pobliską gwiazdę będzie się stopniowo nagrzewał i sam promieniował (najpierw w podczerwieni), aż do osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej, w którym będzie tyle samo pochłaniać, co emitować, czyli świecić jak ta gwiazda. Niebo powinno zatem być pokryte częściowo tarczami gwiazd, a częściowo – równie jasnymi obłokami pyłu.

Tego rozumowania już w żaden sposób nie można było obalić. Podejmowano rozmaite rozpaczliwe próby wyjaśnienia paradoksu Olbera, ale były one nieskuteczne. W ramach fizyki klasycznej i przy założeniu wiecznej niezmienności Wszechświata jest on obiektem nieopisywalnym za pomocą fizyki i wszelkie próby w tym kierunku napotykały trudności nie do przewyżczenia, z których najbardziej spektakularną jest paradoks fotometryczny.

Dla porządku dodajmy, że fizyka relatywistyczna i kwantowa poradziła sobie z tymi kłopotami. Jeżeli dziś kosmologia ma jakiś problem, to jest nim zagadkowa ciemna energia.

### Literatura

Leszek M. Sokołowski, *Elementy kosmologii dla nauczycieli, studentów i dociekliwych uczniów*, ZamKor, Kraków 2005.