

**Tadeusz PABJAN**

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych  
ul. Sławkowska 17, 31–016 Kraków

## ***PARADOKS GRAWITACYJNY***

Refleksja nad strukturą wszechświata pojawiała się zarówno w filozoficznych, jak i ściśle naukowych analizach na długo przed powstaniem odrębnej dyscypliny naukowej, zajmującej się tym zagadnieniem, to znaczy kosmologii relatywistycznej. Dyscyplina ta rozwinęła się dorywczo nieoczekiwanie w pierwszej połowie XX wieku, a o jej powstaniu zdecydowały zasadniczo dwa podstawowe czynniki: sformułowanie przez Alberta Einsteina ogólnej teorii względności, która pozwoliła ustalić i wyjaśnić związek zachodzący pomiędzy obecną we wszechświecie materią i odkształceniem czasoprzestrzeni; oraz postęp technologiczny, który umożliwił przeprowadzanie zaawansowanych obserwacji astronomicznych, dostarczających informacji o globalnym rozkładzie materii we wszechświecie, i pozwalających na weryfikację wyników z teorii modeli kosmologicznych. Z perspektywy czasu można jednakże wskazać również na inne czynniki, które bezpośrednio przyczyniły się do powstania tej dziedziny. Jednym z nich z całą pewnością były właśnie filozoficzno-naukowe dyskusje dotyczące problemów kosmologicznych, które toczyły się zwłaszcza w XVIII i XIX wieku, i które przygotowały grunt pod precyzyjne sformułowanie dyskutowanych trudności w ramach XX-wiecznej kosmologii relatywistycznej.

Zasadniczym celem niniejszego studium będzie zaprezentowanie kilku wybranych sformułowań tak zwanego paradoksu grawitacyjnego (paradoksu Seeliger), który przez blisko dwa wieki stanowił jedną z najważniejszych tego typu interpretacyjnych trudności. Paradoks ten pojawia się w wyniku zastosowania newtonowskiej teorii grawitacji do

największego z możliwych układów fizycznych — to znaczy do wypełnionego materią wszechświata. Ostateczne wyjaśnienie tego problemu stało się możliwe dopiero dzięki zastosowaniu do zagadnień kosmologicznych ogólnej teorii względności.

### 1. KOSMOLOGICZNY DYLEMAT NEWTONA

Ewolucję nowożytnych poglądów na budowę wszechświata w zasadniczy sposób przyspieszyła rewolucja kopernikańska, która usunęła Ziemię z uprzywilejowanego, centralnego miejsca wszechświata. W procesie tym istotną rolę odegrały również poglądy Giordano Bruno i Tomasza Diggesa, dzięki którym nowożytna nauka pożegnała się na dobre ze sferą gwiazd stałych, i zaczęła traktować wszechświat w kategoriach ogromnej — być może nieskończonej — przestrzeni, wypełnionej gwiazdami podobnymi w swej naturze do Słońca. Trzecim istotnym epizodem tej ewolucji była teoria Newtona, wprowadzająca do opisu wszechświata pojęcie grawitacji.

Izaak Newton początkowo — to znaczy wtedy, gdy pracował nad opublikowanymi w roku 1687 *Principiami* — nie interesował się problemami, który we współczesnej nomenklaturze określa się mianem problemów kosmologicznych. Co prawda, w roku 1695 napisał on niewielką pracę zatytułowaną *De mundi systemate*, która została włączona do *Principiów* (i opublikowana w roku 1728 jako osobne dzieło), i która w zamyśle autora miała dotyczyć tego typu zagadnień, jednakże na omawiany w niej „system świata” składają się przede wszystkim planety, księżycy planet, komety i inne ciała Układu Słonecznego. Jeśli chodzi o gwiazdy, to Newton, posługując się opracowaną w 1668 roku przez Jamesa Gregory’ego metodą fotometryczną, polegającą na porównaniu odbitego światła Słońca i światła gwiazd, wykazał, że gwiazdy znajdują się znacznie dalej od Układu Słonecznego, niż kiedykolwiek wcześniej zakładano<sup>1</sup>.

Newton uznał, że odległość ta jest na tyle duża, że grawitacyjny wpływ gwiazd na krążące wokół Słońca planety jest zaniedbywanie

---

<sup>1</sup>Por. J.D. Fernie, „The Historical Search for Stellar Parallax”, *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 69 (1975), s. 158–161.

mały, i dlatego można go pominąć przy obliczeniach dotyczących ruchu tych ciał niebieskich. Słuszność tego wniosku potwierdził opracowany przez Newtona test dla sił zewnętrznych, oddziałujących na planety Układu Słonecznego: jeśli gwiazdy byłyby blisko, to generowane przez nie siły grawitacyjne powinny powodować możliwe do wykrycia przesunięcia orbit każdej z planet. Brak takich przesunięć należało — zdaniem Newtona — interpretować jako dowód na to, że siły zewnętrzne są zanedbywanie małe, i że gwiazdy rzeczywiście znajdują się bardzo daleko od Układu Słonecznego<sup>2</sup>. Na doniosłość i wagę problematyki, dotyczącej wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy samymi gwiazdami, uwagę Newtona zwrócił dopiero Richard Bentley w roku 1692.

Warto wspomnieć o okolicznościach tego zdarzenia. Bentley był wówczas kapłanem biskupa Worcesteru. W roku 1692 zlecono mu wygłoszenie pierwszego z serii wykładów Boyle'a<sup>3</sup>. Wykłady te zostały ufundowane przez filozofa i teologa Roberta Boyle'a, który w swoim testamencie przeznaczył część majątku na zorganizowanie corocznych odczytów poświęconych obronie religii chrześcijańskiej przed zarzutami ateistów i wyznawców innych religii. Bentley nadał swojemu wykładowi wymowny tytuł „Odrzucenie ateizmu”, a przygotowując się do jego wygłoszenia, wysłał do Newtona list z pytaniem, czy zawarta w *Principiach* teoria dostarcza tego typu apologetycznych argumentów, do których on sam mógłby się w swoim wykładzie odwołać. Newton, który w tym okresie był jednym z najbardziej znaczących i zarazem najbardziej przekonanych przedstawicieli fizykoteologii, odpowiedział, że pisząc swoje dzieło miał „wzrok skupiony na takich zasadach, które mogą służyć przekonywaniu ludzi do wiary w Boga”<sup>4</sup>. Oprócz pytania o argumenty apologetyczne, Bentley zamieścił jednakże w swoim liście również szereg pytań, dotyczących technicznych szczegółów, związanych z ruchem planet, czasem życia gwiazd, oraz naturą samego oddziaływania grawitacyjnego. Zwłaszcza

---

<sup>2</sup>Por. J. North, *Historia astronomii i kosmologii*, Książnica, Katowice 1997, s. 253.

<sup>3</sup>Zob. R. Bentley, *Eight Boyle Lectures on Atheism*, Garland, New York 1976.

<sup>4</sup>I. Newton, „Four Letters to Richard Bentley”, w: *Theories of the Universe*, M.K. Munitz (red.), The Free Press, Glencoe 1957, s. 211.

ostatni z tych problemów zdawał się szczególnie absorbować Bentley'a. Chciał on wiedzieć, jaki scenariusz zdarzeń Newton przewiduje dla sytuacji, w której gwiazdy są równomiernie rozmieszczone w przestrzeni wszechświata i poruszają się pod wpływem własnej grawitacji. Wiele wskazuje na to, że to właśnie pytania Bentley'a miały istotny wpływ na kształtowanie się kosmologicznych poglądów Newtona. Zwróciły bowiem jego uwagę na zagadnienia pominięte podczas pierwszej redakcji *Principiów*.<sup>5</sup>

Odpowiedź, jakiej Newton udzielił Bentley'owi w liście datowanym na 10 grudnia 1692 roku, dostarcza chronologicznie pierwszego sformułowania paradoksu grawitacyjnego, który współcześnie znany jest również pod nazwą paradoksu Seeliger'a. Zdaniem Newtona, grawitacja materii obecnej we wszechświecie, którego przestrzeń byłaby skończona, powinna doprowadzić do tego, że wszystkie gwiazdy, planety i materia międzygwiazdowa zaczną poruszać się w kierunku własnego środka masy, co ostatecznie doprowadzi do połączenia się wszystkich mas obecnych we wszechświecie w jedną wielką masę o kształcie sferycznym. Jeśli jednak przestrzeń wszechświata jest nieskończona, to ten sam proces doprowadzi do powstania nieskończenie wielu tego typu sferycznych ciał, rozmieszczonych w tej przestrzeni w sposób równomierny. Mechanizm ten — zdaniem Newtona — wystarczy to wyjaśnienia powstania ciał niebieskich, o ile wszechświat jest nieskończony; wyjaśnienie to zawodzi jednakże, gdy przyjmie się jego skończoność:

Jeśli chodzi o pierwsze pytanie [dotyczące grawitacji], to wydaje się, że jeśli materia Słońca i planet, i cała pozostała materia wszechświata, byłaby równomiernie rozmieszczona po całym niebie, a każda jej cząstka odznaczałaby się wrodzonym ciężeniem w kierunku całej reszty, a cała przestrzeń zawierająca rozmieszczoną materię byłaby skończona, to materia na zewnątrz tej przestrzeni dążyłaby ze względu na swoją grawitację w kierunku materii będącej wewnątrz, i w konsekwencji zapadłaby się do środka całej przestrzeni, i tam utworzyłaby jedną wielką sferyczną masę. Jeśli jednak materia byłaby równomier-

---

<sup>5</sup>Por. J. Baryszew, P. Teerikorpi, *Wszechświat. Poznawanie kosmicznego ładu*, Wydawnictwo WAM, Kraków 2005, s. 62–69.

nie rozłożona w nieskończonej przestrzeni, to nigdy nie utworzyłaby jednej masy, ale część z niej zebrałaby się w jedną masę, a inna część w drugą, tworząc w ten sposób nieskończoną liczbę wielkich mas, rozrzuconych równomiernie w znacznych odległościach w całej tej nieskończonej przestrzeni. W taki też sposób mogło powstać Słońce i gwiazdy stałe<sup>6</sup>.

Odpowiadając na list Newtona, Bentley sprecyzował swoje pytanie dotyczące zachowania materii, na którą działa siła powszechnej grawitacji: jeśli racją uzasadniającą to, że materia nie zapada się pod wpływem grawitacji do jednej wielkiej masy sferycznej, jest nieskończoność przestrzeni wszechświata, to i tak niewyjaśnionym problemem pozostaje ruch samej materii. Jeśli materia rozmieszczona jest w nieskończonym wszechświecie w sposób idealnie równomierny, to co decyduje o tym, że cząstki zaczynają się poruszać pod wpływem grawitacji, i dlaczego cząstki poruszają się po takiej a nie innej trajektorii? Kolejny list Newtona, datowany na 17 stycznia 1693 roku, przyniósł odpowiedź na pytanie Bentley'a: grawitacyjna stabilność nawet pojedynczej cząstki materii jest tak nieprawdopodobna, jak ustawienie igły na lustrze; tym bardziej więc nieprawdopodobne jest idealnie równomierne rozmieszczenie wszystkich cząstek wszechświata, gwarantujące jego grawitacyjną stabilność:

Że może być cząstka zawsze równomiernie przyciągana ze wszystkich stron, i z tego powodu pozostająca w całkowitym spoczynku, wydaje się mi przypuszczeniem tak nieprawdopodobnym, jak możliwość pionowego ustawienia najostrzejszej igły na lustrze. [...] A o wiele trudniej wyobrazić sobie, że wszystkie cząstki w nieskończonej przestrzeni będą tak dokładnie rozlokowane, iż pozostaną w idealnej równowadze. Sądzę że byłoby to tak trudne jak pionowe ustawienie nie tylko jednej igły, ale nieskończonej ich liczby (tak wielkiej, jak wielka jest liczba cząstek w nieskończonej przestrzeni). Jest to jednak możliwe dla Boskiej mocy<sup>7</sup>.

Jak widać, Newton uporał się z paradoksem grawitacyjnym, odwołując się do obecności Boga, który odpowiada za grawitacyjną stabil-

---

<sup>6</sup>I. Newton, „Four Letters to Richard Bentley”, dz. cyt., s. 211–212.

<sup>7</sup>Tamże, s. 214.

ność materii nieskończonego wszechświata. Materia ta nie jest rozłożona w sposób jednorodny, ale wszechświat pozostaje w równowadze, ponieważ to właśnie Bóg go w niej utrzymuje. Bezpośrednią interwencję Stwórcy, który nadaje materii równowagę grawitacyjną, Newton określił w swej korespondencji z Davidem Gregory mianem „nieustannego cudu”<sup>8</sup>. To, że we wszechświecie istnieją gwiazdy i układy planetarne, dowodzi jednak, że Bóg nie zapewnia grawitacyjnej stabilności wszystkim cząstkom materii, ale tylko niektórym ich układom. Newton zaznaczył, że opisany w jego pierwszym liście mechanizm powstawania gwiazd dotyczy tej materii, której Bóg nie rozmieścił w sposób idealnie równomierny, i której nie zapewnił grawitacyjnej stabilności<sup>9</sup>. Stwórca zapewnia jednakże tę stabilność gwiazdom, które przyciągają się wzajemnie, a pomimo to pozostają w spoczynku w nieskończonej przestrzeni wszechświata.

Stanowisko Newtona trudno jest zrozumieć bez odwoływania się do postulowanej przez tego fizyka nadzwyczajnej interwencji Boga, który nieustannie zapewnia grawitacyjną stabilność materii wszechświata. Przykładem autora, który właśnie w taki sposób interpretuje poglądy Newtona, jest Marco Capria, który stwierdza, że w największej skali nieskończonego newtonowskiego wszechświata możliwa jest dynamiczna równowaga materii, ponieważ globalnie pole grawitacyjne zanika, i jedynie lokalnie daje o sobie znać niestabilność grawitacyjna, która odpowiada za powstawanie gwiazd<sup>10</sup>. Wydaje się, że tego typu interpretacja w istotny sposób upraszcza poglądy Newtona, ponieważ — co widać z przytoczonych fragmentów korespondencji z Bentley’em — uczony ten zakładał, że bez aktywnego udziału „mocy Boskiej”

---

<sup>8</sup>Zob. W. Skoczny, „Dziedzictwo fizykoteologii we współczesnej myśli chrześcijańskiej”, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 13 (1991), s. 79–85.

<sup>9</sup>„Yet I grant it possible, at least by a divine power; and if they were once to be placed, I agree with you that they would continue in that posture without motion forever, unless put into new motion by the same power. When, therefore, I said that matter evenly spread through all space would convene by its gravity into one or more great masses, I understand it of matter not resting in an accurate poise”; I. Newton, „Four Letters to Richard Bentley”, dz. cyt., s. 214.

<sup>10</sup>Zob. M.M. Capria, „The Rebirth of Cosmology: From the Static to the Expanding Universe”, w: *Physics Before and After Einstein*, M.M. Capria (red.), IOS Press, Amsterdam 2005, s. 130.

stabilne rozmieszczenie wszystkich gwiazd nieskończonego wszechświata, w którym oddziaływania grawitacyjne idealnie się równoważą, jest praktycznie niemożliwe.

Co prawda, w przywołanym fragmencie Newton odwołuje się nie do gwiazd, ale do „cząstek materii”, jednakże wniosek, dotyczący znikomo małego prawdopodobieństwa grawitacyjnej równowagi pomiędzy rozmieszczonymi w nieskończonej przestrzeni cząstkami materii, pozostaje tak samo słuszny w odniesieniu do gwiazd, będących skupiskami cząstek materii, na które z każdej strony oddziałuje siłą grawitacji nieskończenie wiele innych tego typu skupisk materii. Słuszność tej interpretacji potwierdzają dalsze fragmenty listu do Bentley’a z 17 stycznia 1693 roku, w którym Newton zaznacza, że istnieje materia, której Bóg nie nadał „dokładnej równowagi” (*accurate poise*), i o której w pierwszym z cytowanych listów on sam pisał, że „na skutek własnej grawitacji zbierze się w jedną lub więcej wielkich mas”, ale istnieją również takie fragmenty materii, które moc Boska utrzymuje w „ustalonych miejscach” w stanie idealnej równowagi, i które „na zawsze będą trwać w tej pozycji bez ruchu, chyba że zostaną wprowadzone w ruch przez tę samą [Boską] moc”<sup>11</sup>.

## 2. PROBLEM GRAWITACJI W KOSMOLOGII XIX WIEKU

Aby uporać się z kłopotliwym problemem paradoksu grawitacyjnego, Newton musiał założyć, że wszechświat jest nieskończony i w miarę jednorodny, i na dodatek — że grawitacyjną stabilność gwiazdom zapewnia sam Bóg. Chociaż trudność tę udało się w pełni rozwiązać dopiero na gruncie XX-wiecznej kosmologii relatywistycznej, to szczegółowej analizie fizycy poddali ją już w wieku XIX. W sposób najbardziej trafny i zarazem kompetentny paradoks grawitacyjny przedstawił i opracował niemiecki astronom Hugo von Seeliger. Wiele wskazuje na to, że to właśnie on jako pierwszy zwrócił uwagę na kosmologiczne konsekwencje newtonowskiej hipotezy, dotyczącej nieskończo-

---

<sup>11</sup>I. Newton, „Four Letters to Richard Bentley”, dz. cyt., s. 214.

ności wszechświata<sup>12</sup>. W roku 1895 astronom ten wykazał, że newtonowskiego prawa grawitacji nie można stosować bez żadnych modyfikacji do nieskończonego wszechświata, w którym materia rozłożona jest w sposób równomierny<sup>13</sup>. Obliczenie wartości siły grawitacyjnej, wywieranej na dowolne ciało, oznacza bowiem konieczność całkowania po wszystkich masach nieskończonego wszechświata, a taki zabieg nigdy nie daje jednoznacznego wyniku, ponieważ tego typu całka jest rozbieżna<sup>14</sup>. Zdaniem Seeligera, wynik ten oznacza, że w wypełnionym materią nieskończonym wszechświecie nie istnieje jednoznacznie określona newtonowska siła grawitacji: „prawo Newtona, zastosowane do nieskończonego wielkiego wszechświata, prowadzi do trudności nie do pokonania i nierozwiązywalnych sprzeczności, jeśli materia rozproszona we wszechświecie jest w nieskończonej ilości”<sup>15</sup>.

Aby uporać się z tą trudnością, Seeliger zaproponował własne, oryginalne rozwiązanie paradoksu grawitacyjnego. W punkcie wyjścia swojej argumentacji zilustrował problem konfliktu pomiędzy newtonowską teorią grawitacji i ideą nieskończonego, wypełnionego materią wszechświata, przykładem, w którym wykazał, że potencjał grawitacyjny dostatecznie dużego obszaru wypełnionej materią przestrzeni może przyjmować dowolnie wielkie wartości. Wniosek ten prowadzi jednakże do paradoksalnych konsekwencji: w newtonowskim wszechświecie nieskończona siła grawitacyjna sprawia, że materia może w skończonym czasie osiągnąć nieskończoną prędkość ruchu. Taki ruch jest — zdaniem Seeligera — równie trudny do zaakceptowania, jak nieskończony wszechświat, w którym pod wpływem grawitacji wszystkie ciała łączą się w jedną wielką sferyczną masę:

---

<sup>12</sup>Zob. E.R. Paul, *The Milky Way Galaxy and Statistical Cosmology, 1890–1924*, Cambridge University Press, Cambridge 1993, s. 55–79.

<sup>13</sup>Por. H. von Seeliger, „Über das Newtonsche Gravitationsgesetz”, *Astronomische Nachrichten*, 137 (1895), s. 129–136.

<sup>14</sup>Szczegółową analizę argumentacji Seeligera przeprowadza J.D. Norton w artykule: „The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory”, w: *The Expanding World of General Relativity*, H. Goenner, J. Renn, J. Ritter, T. Saner (red.), Birkhäuser, Boston 1999, s. 271–324.

<sup>15</sup>H. von Seeliger, „Über das Newtonsche Gravitationsgesetz”, art. cyt., s. 132.

We wszechświecie muszą pojawić się nieskończenie wielkie przyspieszenia, i dotyczy to każdego możliwego do pomyślenia rozkładu masy. W konsekwencji prowadzi to do ruchów, które rozpoczynają się ze skończoną prędkością i w skończonym czasie prowadzą do nieskończenie wielkich prędkości. Wniosek ten albo jest całkowicie absurdalny, albo prowadzi do bezpośredniego naruszenia teorii mechaniki [klasycznej]<sup>16</sup>.

Aby pozbyć się paradoksu, należy — zdaniem Seeligera — w taki sposób zmodyfikować prawo powszechnego ciężenia, aby grawitacja malała wraz z rosnącą odległością szybciej, niż to wynika ze wzorów Newtona. Modyfikacja ta miała dotyczyć wielkich, międzygwiazdnych odległości i nie naruszać reguł, obowiązujących dla planet układu Słonecznego, w przypadku których oryginalne prawo odwrotnych kwadratów dawało przewidywania zgodne z obserwacjami astronomicznymi. Aby uzyskać taki efekt, należało do znanego wzoru na siłę oddziaływania grawitacyjnego

$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{Mm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

dodać człon o postaci  $\exp(-\Lambda r)$ , odpowiadający za to, że w znacznej odległości od ciała źródłowego o masie  $M$  inne ciało o masie  $m$  będzie poruszać się w taki sposób, jak gdyby oprócz przyciągającej siły grawitacyjnej doświadczało również siły, która osłabia to przyciąganie. Poprawiony przez Seeligera wzór Newtona przedstawia się następująco:

$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{Mm}{r^2} e^{-\Lambda r} \frac{\vec{r}}{r},$$

gdzie  $r$  jest odległością pomiędzy ciałami, a  $\Lambda$  — pewną stałą o dodatniej wartości, będącą czynnikiem pomniejszającym wartość siły grawitacji. Seeliger próbował oszacować wartość stałej  $\Lambda$  w oparciu o astronomiczne obserwacje ruchu planet. Jego zdaniem, nawet minimalna ale niezerowa wartość tego parametru pozwoliłaby uniknąć paradoksu grawitacyjnego, a zarazem wyjaśniłaby anomalie, związane z ruchem planet — na przykład takie, jak znany od dawna problem przesuwaną się orbity Merkurego. Oszacowania Seeligera nie były jednakże

---

<sup>16</sup>H. von Seeliger, „On Newton's Law of Gravitation”, *Popular Astronomy*, 5 (1897/98), s. 546.

poprawne: ustalana wartość  $\Lambda$ , które wyjaśniałyby zmianę peryhelium Merkurego ( $\Lambda = 0,00000038$ ), powodowała jednocześnie niepożądane przesunięcia orbit pozostałych planet<sup>17</sup>.

Seeliger nie był jedynym autorem, który zaproponował modyfikację prawa powszechnego ciężenia. W XIX wieku na ten sam pomysł wpadło co najmniej kilku innych fizyków, choć — zdaniem Kragha — żaden z nich nie proponował zmiany równań Newtona w kontekście problemów kosmologicznych, a jedynie w tym celu, aby rozwiązać niewyjaśnione wcześniej problemy astronomii planetarnej<sup>18</sup>. Dobrego przykładu tego typu modyfikacji dostarcza dzieło *Mécanique céleste* francuskiego filozofa i fizyka Pierre'a Simona Laplace'a, który już w roku 1825 wprowadził eksponencjalny czynnik do równania określającego siłę grawitacji<sup>19</sup>. Z kolei przykładem podważającym słuszność konkluzji Kragha są publikacje niemieckiego fizyka i matematyka, Carla Neumanna. Uczony ten zaproponował w 1896 roku zmianę równań Newtona, i motywem jego propozycji nie był żaden z problemów astronomii planetarnej, ale właśnie paradoks grawitacyjny, pojmowany jako zagadnienie typowo kosmologiczne<sup>20</sup>. Neuman przeprowadził analizę newtonowskiego prawa grawitacji w kontekście problemu równowagi elektrostatycznej, i w wyniku tej analizy doszedł do wniosku stwierdzającego konieczność modyfikacji tego prawa w odniesieniu do zagadnień kosmologicznych:

---

<sup>17</sup>Zdaniem Nortona, Seeliger nie traktował poważnie możliwości poprawnego oszacowania parametru  $\Lambda$  w oparciu o obserwacje astronomiczne, ani tym bardziej wyjaśnienia anomalii planetarnych na podstawie czynnika, który powinien się ujawniać na znacznie większych odległościach: „In any case, Seeliger did not take very seriously the possibility that he had found an explanation for the anomalous motion of Mercury. The astronomical anomalies were only superficially connected with his cosmological considerations. If it works, he remarked, it does so by chance, only formally and without deeper foundation”; J.D. Norton, „The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory”, art. cyt., s. 295.

<sup>18</sup>Por. H.S. Kragh, *Conceptions of Cosmos. From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology*, Oxford University Press, Oxford 2007, s. 108–110.

<sup>19</sup>Zob. P.S. Laplace, *Mécanique céleste*, vol. V, Bachelier, Paris 1825, s. 445–452.

<sup>20</sup>Por. C. Neumann, *Allgemeine Untersuchungen über das Newton'sche Princip der Fernwirkungen mit besonderer Rücksicht auf die elektrische Wirkungen*, Teubner, Leipzig 1896.

Modyfikacja prawa Newtona może okazać się konieczna nie tylko w świecie obiektów bardzo małych, ale również bardzo dużych — na przykład wtedy, gdy mowa o nieskończonej przestrzeni wszechświata wypełnionej gwiazdami w sposób w przybliżeniu jednorodny. Taki wszechświat można traktować jako nieskończenie wielką sferę o w przybliżeniu stałej gęstości. Ta nieskończenie wielka jednorodna sfera, reprezentująca wszechświat w największej jego skali, popychałaby — na podstawie prawa Newtona — poszczególne ciała niebieskie, takie jak Słońce, Merkury, Wenus, Ziemia, Mars etc., w stronę swojego środka. [...] Ponieważ jednak powierzchnia dyskutowanej sfery wszechświata znajduje się w nieskończoności, jej środek ma całkowicie nieokreślone położenie. A zatem siły, wywierane przez tę sferę na poszczególne ciała niebieskie, byłyby tak samo całkowicie nieokreślone co do swojego kierunku i natężenia — co oczywiście jest absurdem<sup>21</sup>.

Co istotne, tematyka kosmologiczna odniesiona to newtonowskiej teorii grawitacji pojawia się w publikacji Neumanna jednie w przytoczonym powyżej fragmencie tekstu, i na pozostałych 293 stronach jego dzieła próżno szukać wzmianek dotyczących omawianego zagadnienia. Uwaga ta jest o tyle istotna, że rzuca ona światło na spór Neumanna i Seeligera dotyczący tego, który z nich jako pierwszy wpadł na pomysł zmodyfikowania prawa Newtona w celu rozwiązania paradoksu grawitacyjnego, a także na spór historyków nauki związany z tym, czym nazwiskiem należy paradoks ten określać. Jeśli chodzi o pierwszą z tych trudności, to Naumann w przypisie do ostatniego z cytowanych zdań zaznaczył, że co prawda Seeliger rok wcześniej ogłosił podobną ideę, jednakże on sam wspomniał o niej w jednej ze swoich publikacji już w roku 1874<sup>22</sup>. Kilku autorów rzeczywiście oddaje palmę pierwszeństwa Naumannowi<sup>23</sup>, chociaż istnieją poważne wątpliwości co do tego,

---

<sup>21</sup>Tamże, s. 1–2.

<sup>22</sup>„Already a long time ago these matters were remarked on by me in the Abhandl[ungen] der K[öniglichen] Sächs[ischen] Ges[ellschaft] der Wiss[enschaften], 1874, page 97, 98”; tamże, s. 2. Cytat w angielskim tłumaczeniu za: J.D. Norton, *The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory*”, art. cyt., s. 281.

<sup>23</sup>Zob. np. M. Jammer, *Concept of Space*, Harvard University Press, Cambridge 1961, s. 127.

czy wspomniany przypis podaje wiarygodną informację<sup>24</sup>. Z kolei drugą trudność w niektórych publikacjach rozwiązuje się określając paradoks grawitacyjny mianem paradoksu Seeliger-Neumanna; w większości jednak opracowań nazwisko Neumanna opuszcza się ze względu na to, że jego wypowiedzi na temat dyskutowanego paradoksu prowadzą się jedynie do kilku przytoczonych powyżej zdań, a ponadto analizy Seeligera przewyższają je w zdecydowany sposób zarówno swoją dokładnością, jak i objętością.

Niezależnie od Seeligera i Neumanna wagę kosmologicznych problemów w ramach newtonowskiej teorii grawitacji dostrzegł również w tym samym okresie William Thomson (Lord Kelvin). Na jesieni roku 1884 przeprowadził on serię wykładów z fizyki, które po latach zostały zredagowane i opublikowane w roku 1904<sup>25</sup>. W wykładzie XVI, poświęconym problemowi eteru i grawitacji, Thomson stwierdził, że w nieskończonym wszechświecie, wypełnionym materią o niezerowej gęstości, „większość ciał powinna doznawać nieskończenie wielkiej siły grawitacyjnej”<sup>26</sup>, a następnie przeprowadził odpowiednie obliczenia, które potwierdzają jego wyjściową hipotezę. Zaznaczył również, odnosząc swoje analizy do eteru (sądził on, że eter charakteryzuje się niezerową gęstością, i że grawitacja oddziałuje na niego tak samo jak na inne postaci materii), że „jeśli istnieją wzajemne oddziaływania pomiędzy częściami wypełniającego przestrzeń eteru, to będzie on [grawitacyjnie] niestabilny, chyba że okaże się nieskończenie odporny na

---

<sup>24</sup>Na temat publikacji z roku 1874, która rzekomo miała zawierać dowód na to, że Neumann jako pierwszy wskazał na dyskutowaną trudność, Norton pisze: „It is by no means obvious where in the paper Neumann addresses gravitational problems of cosmology. I cannot say that the discussion is not there, buried somewhere in the paper’s lengthy and technical discussion of electrodynamic forces. But I can say that I could not find it and that, if it is there, it is not given any prominence whatever”; J.D. Norton, „The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory”, art. cyt., s. 282.

<sup>25</sup>W. Thomson (Lord Kelvin), *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, C.J. Clay & Sons, London 1904. Wykład XVI ukazał się w roku 1901 w czasopiśmie *Philosophical Magazine*.

<sup>26</sup>Tamże, s. 267. XVI wykład Thomsona ukazał się w roku 1901 w czasopiśmie *Philosophical Magazine* jako artykuł zatytułowany „On Ether and Gravitational Master through Infinite Space”.

siły zgniatające lub rozciągające”<sup>27</sup>. W cytowanym wykładzie Thomson wspomniał o możliwości modyfikacji prawa powszechnego ciężenia, która pozwoliłaby uporać się z problemem grawitacyjnego kolapsu wszechświata; nie zaproponował jednak żadnego konkretnego sposobu realizacji tego pomysłu.

Oprócz postulowania zmiany prawa grawitacji, uczeni przełomu XIX i XX wieku wskazywali również na inne sposoby uporania się z paradoksem grawitacyjnym, które sprowadzały się do modyfikacji założeń, leżących u podstaw newtonowskiego modelu kosmologicznego. Tytułem przykładu: rezygnację z założenia jednorodności rozkładu materii w przestrzeni nieskończonego wszechświata zaproponował w 1870 roku astronom Richard Proctor<sup>28</sup>, z kolei za odrzuceniem nieskończoności wszechświata opowiedział się w roku 1908 inny astronom, Carl Charlier<sup>29</sup>. Obydwa te rozwiązania miały za zadanie wyjaśnienie zarówno paradoksu grawitacyjnego, jak i innej zagadki kosmologicznej tego okresu — paradoksu Olbersa, zwanego również paradoksem nocnego nieba<sup>30</sup>.

### 3. UWAGI NA ZAKOŃCZENIE

Wyjaśnienie paradoksu grawitacyjnego umożliwiła dopiero kosmologia relatywistyczna, to znaczy kosmologia zbudowana na fundamencie ogólnej teorii względności. Twórca tej teorii, Albert Einstein, doskonale zdawał sobie sprawę z problemów kosmologii opartej na mechanice Newtona i na jego teorii grawitacji; wskazywał również na Seeligera jako na tego, który jako pierwszy szczegółowo te problemy przedyskutował<sup>31</sup>. Zaproponowane przez Seeligera rozwiązanie para-

---

<sup>27</sup>W. Thomson (Lord Kelvin), *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, dz. cyt., s. 266.

<sup>28</sup>R. Proctor, *Other Worlds than Ours*, Longmans, London 1870.

<sup>29</sup>C.V.L. Charlier, “Wie eine unedliche Welt aufgebaut sein kann”, *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 4 (1908), s. 1–15.

<sup>30</sup>Na temat tego paradoksu, por. np. L. Jaki, *The Paradox of Olbers' Paradox*, Herder, New York 1969.

<sup>31</sup>Zob. A. Einstein, *Relativity. The Special and the General Theory*, Penguin Books, New York 2006, s. 97–98.

doksu Einstein uznał za interesujące, choć nie pozbawione istotnych wad: co prawda pozwala ono uwolnić się od problemów z grawitacją, ale za wyjątkowo wysoką cenę „modyfikacji i komplikacji praw Newtona, co nie ma ani empirycznego, ani teoretycznego uzasadnienia”<sup>32</sup>.

Tymczasem już w pierwszej pracy kosmologicznej Einsteina z roku 1917<sup>33</sup>, pomimo tego, że nie dotyczyła ona wprost paradoksu grawitacyjnego, znalazło się rozwiązanie do złudzenia przypominające propozycję Seeliger, tyle tylko że zinterpretowaną w kategoriach nowej, relatywistycznej teorii grawitacji. Zadanie dodanego do równań pola członu kosmologicznego ze stałą  $\Lambda$  (nazywaną odtąd stałą kosmologiczną) było bowiem identyczne do tego, które Seeliger wyznaczył członowi o postaci  $exp(-\Lambda r)$ , dodając go do równania Newtona: obydwie te elementy miały przeciwdziałać sile grawitacji. Twórca teorii względności zapewne nie przez przypadek posłużył się identycznym symbolem jak ten, który występuje w pracy Seeligera. Wprawdzie motywacja Einsteina była nieco inna niż Seeligera, jednakże ostatecznie okazało się, iż w obydwu przypadkach problem był taki sam, i sprowadzał się do problemu stabilności pola grawitacyjnego<sup>34</sup>.

Z powodów, które do dzisiaj pozostają wdzięcznym tematem analiz dla historyków i filozofów nauki, Einstein chciał znaleźć takie rozwiązanie równań pola, które będzie odpowiadać wszechświatowi statycznemu, czyli nie podlegającemu ani ekspansji, ani kontrakcji. Rozwiązanie takie pojawiało się tylko wtedy, gdy równania zostały uzupełnione o stałą, której fizyczna interpretacja jest taka sama jak w przypadku Seeligera: stanowi ona czynnik osłabiający działanie siły grawitacji. Wkrótce jednak okazało się, że statyczny model wszechświata jest nie-

---

<sup>32</sup>“We purchase our emancipation from the fundamental difficulties mentioned, at the cost of a modification and complication of Newton’s law which has neither empirical nor theoretical foundation. We can imagine innumerable laws which would serve the same purpose, without our being able to state a reason why one of them is to be preferred to the others; for any one of these laws would be founded just as little on more general theoretical principles as is the law of Newton”; tamże, s. 98.

<sup>33</sup>A. Einstein, „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie”, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1(1917), s. 142–152.

<sup>34</sup>Por. M. Heller, „Zagadnienia kosmologiczne przed Einsteinem”, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 37 (2005), s. 32–40.

stabilny. Nawet najmniejsza zmiana wartości stałej  $\Lambda$  prowadzi albo do kontrakcji, albo do ekspansji wszechświata, a jakiegokolwiek próby utrzymania go w stanie równowagi są tak samo trudne jak próby pionowego ustawiania igieł na powierzchni lustra. Ale niestabilność tego modelu kosmologicznego nie była jego największym problemem: kiedy obserwacje E. Hubble'a i innych astronomów potwierdziły ucieczkę galaktyk, będącą niezaprzeczalnym dowodem na to, że wszechświat jednak nie jest statyczny, Einstein uznał wprowadzenie stałej kosmologicznej do równań pola za największą pomyłkę swojego życia. Paradoksalnie, pomyłka ta okazała się wyjątkowo szczęśliwa, choć sam Einstein nie zdążył się o tym przekonać. Stała kosmologiczna wróciła bowiem do łask w drugiej połowie XX wieku w związku z obserwacjami supernowych, z których wynika, że wszechświat rozszerza się coraz szybciej, a także z próbami kwantowania pola grawitacyjnego.

Ostateczna odpowiedź na pytanie o to, dlaczego grawitacja nie zamienia całej materii wszechświata w jedną gigantyczną masę o kształcie sferycznym, związana jest z interpretacją faktu, jakim jest ekspansja wszechświata. Fakt ten wyjaśnia paradoks grawitacyjny, chociaż „techniczne szczegóły” tego wyjaśnienia ciągle jeszcze są przedmiotem analiz, które przeprowadza się w ramach konkretnych modeli kosmologicznych<sup>35</sup>. W modelach tych uwzględnia się niestabilność grawitacyjną, która prowadzi do lokalnych osobliwości (istnienie tego typu osobliwości wynika z twierdzeń udowodnionych przez R. Penrose'a i S.W. Hawkinga), natomiast to, czy grawitacja zatrzyma kiedyś ekspandującą czasoprzestrzeń, i czy proces kontrakcji faktycznie zakończy się osobliwością globalną, obejmującą całą materię wszechświata i całą jego czasoprzestrzeń, zależy od wielu — jak na razie nie znanych z dostateczną dokładnością — parametrów, z których najważniejszym jest średnia gęstość materii. Postęp technologiczny umożliwia jednakże nieustanne doskonalenie technik obserwacyjnych, które pozwalają na przeprowadzanie coraz lepszych i coraz bardziej dokładnych testów modeli ko-

---

<sup>35</sup>Zob. np. N. Ionescu-Pallas, I. Simaciu, M.I. Piso, „Search for a solution of Seeliger's gravitational paradox in the framework of General Relativity Theory”, *Proceedings of the Romanian Academy A*, 6/2 (2005), [http://www.acad.ro/sectii2002/proceedings/doc\\_2005\\_2/07-Pallas.pdf](http://www.acad.ro/sectii2002/proceedings/doc_2005_2/07-Pallas.pdf).

smologicznych. Nie jest więc wykluczone, że omawiane zagadnienie znajdzie w niezbyt odległej przyszłości jakieś nowe rozwiązanie, które pozwoli dopisać do historii paradoksu grawitacyjnego kolejne, interesujące rozdziały.

### *SUMMARY*

#### *THE GRAVITATIONAL PARADOX*

Philosophical as well as scientific disputes about the role gravitation plays in the structure of the universe took place long before the high-tech cosmology emerged. One of the main topics of these disputes was the problem of the so-called gravitational paradox, which appears when one applies the Newtonian laws of gravity to the whole material content of the universe. According to these laws, gravitation should cause a global collapse what is obviously inconsistent with observations. Various formulations of this paradox are analyzed and their historical context is presented.