

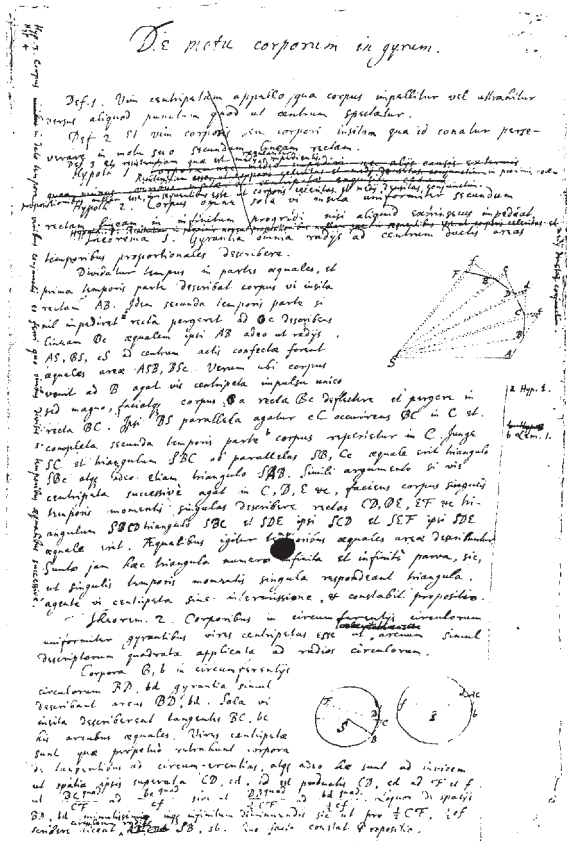
# Izaak Newton, pitagorejczycy i prawo powszechnego ciężenia

Tadeusz NADZIEJA, Zielona Góra

BBC przeprowadziła ankietę mającą na celu wybranie dziesięciu najwybitniejszych myślicieli drugiego tysiąclecia naszej ery. Na trzecim miejscu znalazł się Izaak Newton. Wszyscy jesteśmy jego uczniami; mimo upływu prawie trzystu lat od jego śmierci, powstania teorii względności i mechaniki kwantowej, nasze widzenie świata pozostaje newtonowskie. Wspomniane teorie ograniczyły tylko zakres stosowalności teorii Newtona, ale nie zakwestionowały jej prawdziwości. Ona sama nie oszczędziła w ten sposób swoich poprzedniczek; czy pamięta ktoś dzisiaj o wcześniejszych teoriach ruchu pochodzących od Arystotelesa, Jana Buridana, Mikołaja z Oresme czy Kartezjusza? Chyba tylko historycy nauki. Mechanika Newtona usunęła w niebyt wszystkie poprzednie, wrosła głęboko w świadomość nie tylko ludzi zajmujących się zawodowo nauką ale również w naszą codzienność. Nie obyło się to jednak bez trudności. O ile w samej Anglii nie było dużej opozycji, a jeśli się pojawiała, to skutecznie była zwalczana przez samego Newtona, to już na kontynencie sprawy miały się inaczej. We Francji obowiązywała teoria wirów Kartezjusza i jeszcze w 1740 roku Paryska Akademia Nauk, przyznając nagrodę D. Bernoulliemu, C. Maclaurinowi i L. Eulerowi za dokonania w rozwoju teorii Newtona, przyznała również nagrodę jezuitce Cavalieremu za jego wkład w teorię wirów. Werdykt umotywowano tym, że żadnej z wymienionych teorii nie można przyznać pierwszeństwa.

Fundamentalne dzieło Izaaka Newtona *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, później nazywane po prostu *Principia*, wyszło drukiem w 1687 roku. W XVII wieku terminem *philosophia naturalis* określano to, co dzisiaj nazwalibyśmy fizyką, można więc łaciński tytuł przetłumaczyć na język polski jako *Podstawy matematyczne fizyki*.

Z dzieła *De Motu Corporum in Gyrum*



*Principia* składają z trzech części; pierwsze dwie noszą tytuł *De Motu Corporum (O Ruchu Ciał)*, trzecia *De Mundi Systemate (O Systemie Świata)*. Są one rozwinięciem wcześniejszych ksiąg *De Motu Corporum. Liber Primus* i *De Mundi Systemate. Liber Secundus* napisanych w 1684 roku.

Wydawca *Principiów* Roger Cotes napisał po ich ukazaniu się *Drzwi zostały otwarte i mamy wstęp do poznania przyrody*. Ich wpływ nie ograniczał się jednak tylko do przyrodoznawstwa, ale obejmował całą naukę i myśl europejską; w tym filozofię, a nawet politykę.

Abdus Salam, wybitny fizyk pakistański, laureat nagrody Nobla, głosił tezę, że triumfalny pochód cywilizacji europejskiej rozpoczął się z datą publikacji *Principiów*. Wydaje się jednak, że jego początki sięgają o wiele dalej w przeszłość. Nauka, która jest wytworem Europejczyków, a na inne kontynenty została przeszczepiona bezpośrednio z Europy lub przez pośredników, powstała dwa tysiące lat przed *Principiami* i już wtedy rozpoczął się podbój innych cywilizacji przez europejską. Na początku proces ten był powolny, a faktem jest, że gwałtownego przyspieszenia nabral w początku XVIII wieku. Czy spowodowało to wydanie *Principiów*? Z pewnością nie tylko, choć w pośredni sposób miało na to wpływ.

Czy *Principia* były wielkim skokiem, czy raczej drobnym, ale ważnym krokiem, który pozwolił

przekroczyć pewną granicę w naszym rozumieniu Wszechświata? Czy znajdują się w nich całkowicie nowe i zaskakujące odkrycia jak np. dokonane ponad dwieście lat później odkrycie fal radiowych czy promieniotwórczości? Czy idee w nim zawarte miały bezpośredni wpływ na powstanie nowych wynalazków zmieniających jakościowo życie? Warto odpowiedzieć na te pytania.

Wydaje się, że trudno myśleć o *Principiach* jako o skoku w całkowicie nieznanym obszarze, raczej jako o istotnym kroku, przekraczającym pewne granice, przygotowania do którego czyniono od dwóch tysięcy lat. Prawa dynamiki sformułowane przez Newtona były już częściowo znane Janowi Buridanowi, a Herodot wspomina, nie powołując się niestety na żadne źródła, o tym co dzisiaj nazywamy pierwszym prawem Newtona. Niektórzy przypisują odkrycie prawa powszechnego ciężenia Robertowi Hooke'owi. Nie można też mówić o jakimś natychmiastowym wpływie teorii Newtona na rozwój cywilizacji materialnej, jej sukcesy dotyczyły bowiem głównie mechaniki nieba. Cóż więc zrobił Newton, że z jego imieniem wiążemy prawa mechaniki, czy prawo powszechnego ciężenia?

Wydaje się, że główny jego sukces polegał na stworzeniu teorii, będącej pierwszą udaną realizacją idei pitagorejskiej, która narodziła się w basenie Morza Jońskiego około 2000 lat przed Newtonem. W największym skrócie ideę tę można streścić słowami: świat jest wyjaśnialny, rządzi nim prawa, które można sformułować w języku liczb, figur, brył oraz zależności między nimi.

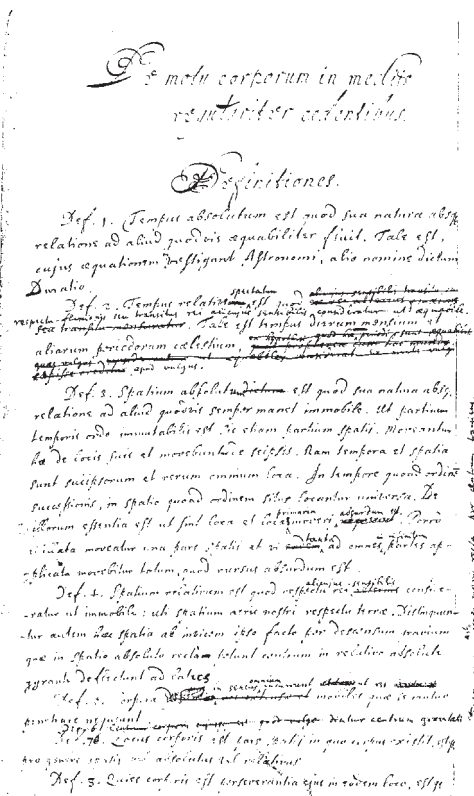
Kto dał początek tej idei, najprawdopodobniej nie docieknijemy już nigdy; niektórzy wskazują na legendarnego Heraklita z Efezu, inni na Demokryta z Abdery (V/IV w.p.n.e.) i jego nauczyciela Leucypa, który miał pisać: *Nic nie dzieje się bez przyczyny, lecz wszystko z jakiejś racji i konieczności*. Przyczyny zaś pojmował jako materialne, nie odwołujące się do celów zjawisk lub woli bogów. Dzisiaj po sukcesach tej idei patrzymy na nią jako na coś oczywistego, niemal trywialnego, ale nie była ona taką w czasach, kiedy się rodziła.

Cofnijmy się o 2500 lat w rejon wybrzeża Morza Jońskiego; życiem jego mieszkańców rządziła wówczas całkowicie niezrozumiała dla nich zjawiska przyrody. Aby jakoś uporządkować swój świat, tworzą mitologię. Bogowie

więc decydują o ich losie, ale i oni są w stanie go zmienić modlitwą, ofiarą lub prośbą. Stworzenie bogów dawało jakąś iluzję wpływu na bieg wydarzeń, nie zaspokajało jednak pragnienia przewidywania bliższej lub dalszej przyszłości. Czasami to się udawało, jak Talesowi z Miletu, który w 585 r. p.n.e. przepowiedział zaćmienie Słońca. Była to raczej konsekwencja pewnych obserwacji, a nie teorii, która wyjaśniałaby nie tylko ruch Słońca, ale i planet, które błądziły po nieboskłonach.

Od zamierzchłych czasów ludzie zbierali i porządkowali obserwacje, w tym również obserwacje astronomiczne, patrząc w niebo i utrwalając wyniki swoich spostrzeżeń. Ciekawe jak wyglądałaby nasza cywilizacja, gdyby niebo nad Ziemią pokryte było, jak na Wenus, całkowicie chmurami? Czynione obserwacje były jednak bardzo niepewne i nieprecyzyjne, brak było odpowiednich przyrządów, standaryzacji jednostek i zegarów. Ptolemeusz twierdził, że może zmierzyć kąt z dokładnością do 4' (czterech minut), a Kopernik powiadał, że łatwo się pomylić o 10'. Dopiero Tycho Brahe osiągnął dokładność pomiaru 1'-2', a Heweliusz nawet (0,5)'. Jest rzeczą zadziwiającą, że przy ówczesnym stanie technik obserwacyjnych Hipparch (II w. p.n.e.) był w stanie odkryć precesję. Szacował on przesunięcie punktu wiosennej równonocy na 1 stopień w stulecie,

Z dzieła *De Motu Corporum in Medijs regulariter cedentibus*



faktycznie jest nieco więcej, około 1,4 stopnia. Dokonał on tego odkrycia porównując tablice Aristyllosa i Timocharisa ułożone około 300 lat p.n.e., a zawierające pozycje kilkuset gwiazd względem ówczesnego punktu wiosennego zrównania dnia z nocą. Układając nowy katalog gwiazd spostrzegł on, że wszystkie gwiazdy są równo przesunięte względem punktu równonocy. Nasunęło mu to przypuszczenie, że to nie gwiazdy zmieniły swoje pozycje, a punkt równonocy przesunął się po ekliptyce. Było to najdonośniejsze odkrycie astronomów starożytnych.

Obserwacji starożytni zebrali sporo. Jak podaje Symplicjusz (VI w.n.e.) – na podstawie świadectw Porfiriusza (III w.n.e.) – po zajęciu Babilonu przez Aleksandra Kallistnes przesłał Arystotelesowi obserwacje babilońskie za 1903 lata. W niektórych dokumentach pisano nawet o 31000 lat, ale to można przypisać li tylko fantazji starożytnych. Faktem jest, że Ptolemeusz posłużył się obserwacjami babilońskimi z lat 721 i 720, zatem tylko czterysta lat starszymi od czasów podbojów Aleksandra. Nawet dzisiaj te 400 lat robi wrażenie, jeśli pomyślimy jak mało mamy konkretnych danych liczbowych dotyczących np. gospodarki w Polsce w XVII wieku. Można się też domyślać, że Ptolemeusz innych danych nie mógł wykorzystać ze względu na wspomniani brak standaryzacji i różnice w kalendarzach różnych kultur. Podobne trudności napotykał wiele wieków później Kopernik – wydaje się, że bazując na dostępnych mu danych obserwacyjnych było rzeczą niemożliwą stworzenie zgodnego z nimi i spójnego modelu ruchu planet. Próby budowy takich modeli podejmowano o wiele wcześniej. Pierwsza z nich, system geocentryczny, jest dziełem Eudoksosa z Knidos (IV w.p.n.e.); inny, heliocentryczny, pochodzi od Arystarcha, ucznia Arystotelesesa. Obaj byli pitagorejczykami – tak nazywano wtedy zwolenników, a nawet można powiedzieć wyznawców idei legendarnego Pitagorasa z Samos. On sam nie pozostawił żadnych pism, a te, które się pojawiały były tylko apokryfami i jego idee znamy z przekazów późniejszych.

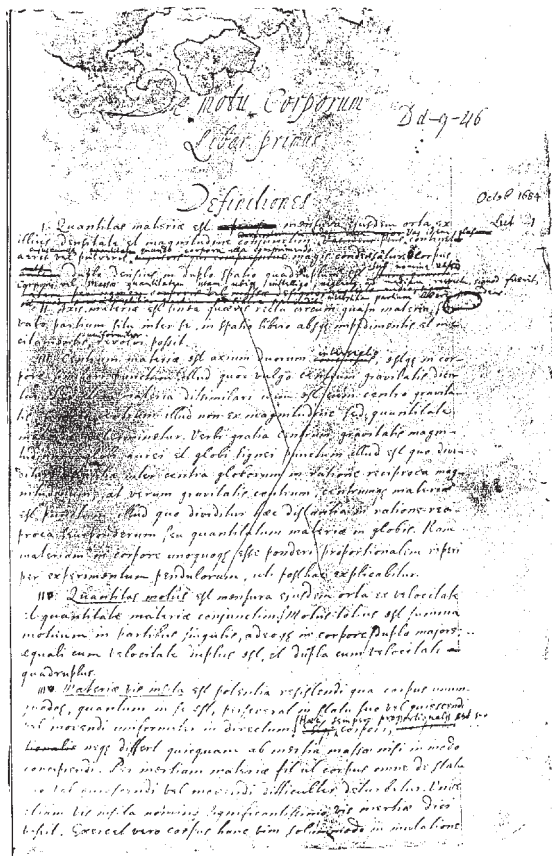
Związek, który powstał z jego lub jego uczniów inicjatywy, miał charakter, jak dziś byśmy to ujęli, szkoły naukowej ze sporą dozą mistycyzmu i pierwiastków religijnych. Pisał o pitagorejczykach Arystoteles:

*Przejawszy się matematyką, jęli uważać, że zasady jej są zasadami wszelkiego bytu, ponieważ zaś w niej liczby są rzeczą z natury pierwszą, a oni mniemali, że widzą w liczbach liczne podobieństwa z tym, co jest i co się staje, uważali liczby za rzecz pierwszą w całej naturze, pierwiastki liczb za pierwiastki bytu, niebiosa całe za harmonię i liczbę. Ich idee wywarły wielki wpływ na rozwój, między innymi, astronomii. Jak się wydaje odkrycie kulistości Ziemi jest ich dziełem.*

Zatrzymajmy się chwilę nad tym odkryciem.

W podręcznikach z geografii do szkoły powszechnej z lat sześćdziesiątych, nie tylko w polskich, przedstawiano całkowicie fałszywie wyobrażenia starożytnych o kształcie Ziemi, jako płaskim dysku spoczywającym na żółwiach. Tymczasem prawie wszyscy uczeni starożytności jak i średniowiecza potwierdzali fakt sferyczności Ziemi. Były oczywiście wyjątki – w starożytności Anaksymenes, a później nauczyciel cesarza Konstantyna Lactantius (245–325 n.e.) oraz znany tylko z dzieła *Topographia Christiana* mnich Cosmas Indicopleustes (VI w.n.e.). Ten ostatni wysmiewa pogląd o kulistości Ziemi pisząc: *czy może być ktoś na tyle głupi, aby wierzyć, że istnieją ludzie, których kończyny znajdują się ponad ich głowami, że drzewa mogą rosnąć w dół, a deszcz, śnieg i grad pada do góry?* Ale wśród uczonych, zwolennicy tego typu argumentów byli zawsze w mniejszości, a odkrycia, że starożytni wyobrażali sobie Ziemię jako płaski dysk,

Z dzieła *De Motu Corporum Liber Primus*



dokonano po 1870 roku. Przed nim prawie żaden podręcznik geografii nie wspomina o jakich koncepcjach płaskiej Ziemi, po nim – niemal każdy. Nawet teraz, na przełomie XX i XXI wieku, autorzy podręczników z geografii mają kłopoty z umieszczeniem w nich odpowiednich argumentów przemawiających za kulistością Ziemi. Słyszałem o naradzie takich autorów, którzy po długiej i burzliwej dyspucie doszli do wniosku, że najwygodniej będzie zamieścić zdjęcie Ziemi zrobione z kosmosu! Opowiedziałem tę historyjkę jednemu ze znajomych matematyków – po namyśle powiedział: zdjęcie nie wystarczy, przedstawia ono bowiem tylko rzut dwuwymiarowy Ziemi, który jest kołem, a to nie dowodzi jeszcze jej kulistości!

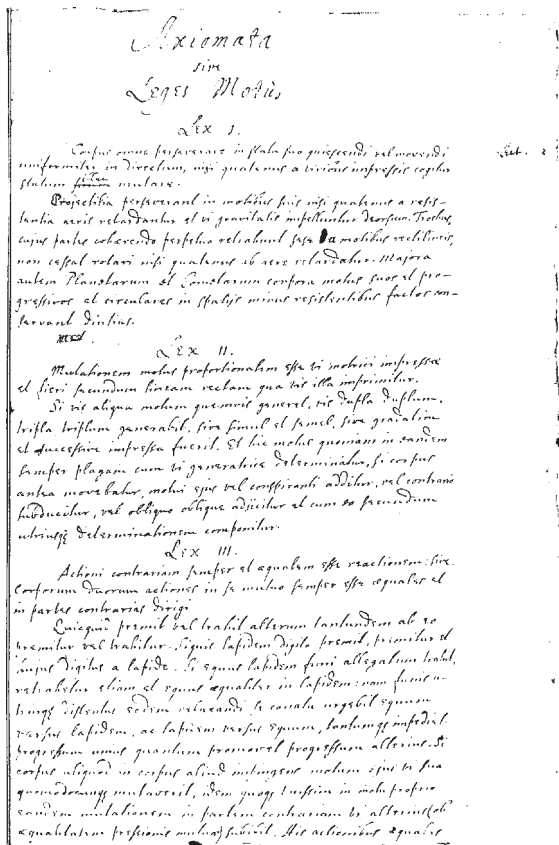
Wróćmy do idei pitagorejczyków. Ich wiara w możliwość wyrażenia podstawowych własności świata za pomocą liczb była na owe czasy wyjątkowa i patrząc z naszego punktu widzenia pozbawiona podstaw. Nie podzielał tej wiary Arystoteles, który uważał, że matematyka jest pożyteczna do określenia stosunku pomiędzy pewnymi zjawiskami, ale nie może ona wyrazić *istotnej natury* rzeczy i procesów fizycznych, jest bowiem abstrakcyjna i nie bierze pod uwagę istniejących nieredukowalnych jakościowych zjawisk. Przyrodoznawstwo Arystotelesa miało charakter jakościowy, pitagorejczycy szli w kierunku fizyki ilościowej, dzisiaj powiedzielibyśmy – matematycznej. Chcieli sprowadzić różnice jakościowe do różnic struktury geometrycznej, liczby, ruchu, a więc do różnic ilościowych. Ich teoria nie notowała jeszcze sukcesów i ludzie przychylali się raczej do poglądów Arystotelesa, a jego autorytet na całe wieki wywierał doniosły wpływ na życie intelektualne Europy.

Idee pitagorejczyków żyły jednak cały czas, a w średniowieczu zaczęły przeżywać swój renesans. Do ruchu intelektualnego, którego przedstawiciele nazywano neoplatonikami lub neopitagorejczykami, należały wybitne jednostki. Neopitagorejczykiem był Galileusz, który pisał: *twierdzą, że w ciałach zewnętrznych nie istnieje nic, co wywołuje u nas smaki, zapachy i dźwięki, oprócz rozmiarów, kształtów, liczb i szybkich lub powolnych ruchów.* Źródło tych myśli znajdujemy u pitagorejczyków, jak i w *Timajosie* Platona.

Jak się wydaje, Galileusz w swej filozofii poszedł dalej niż Platon, możnaby rzec – za daleko. O ile bowiem Platon twierdził, że świat fizyczny jest niedoskonałą kopią transcendentnego świata form matematycznych, a więc fizyka nie zawiera wiadomości absolutnie prawdziwych, ale tylko prawdopodobne, to Galileusz, wręcz przeciwnie, uważał, że realny świat składa się z bytów matematycznych, które mogą być poznane z absolutną pewnością. Pisał on: *filozofia napisana jest w wielkiej księdze, która stoi otworem przed naszymi oczyma, to znaczy we Wszechświecie; jednakże nie może być ona odczytana, dopóki nie nauczymy się języka i nie zapoznamy się z pismem, którym jest napisana. Napisana jest w języku matematycznym, a literami są trójkąty, koła i inne figury geometryczne, bez znajomości których człowiek nie może zrozumieć ani jednego słowa.*

Takie stanowisko Galileusza miało swoje konsekwencje. Jak wiadomo, starożytni uważali koło za najdoskonalszą figurę, a więc planety mogły krążyć tylko po okręgach, jeśli coś się nie zgadzało z obserwacjami – dodawali nowe okręgi, które poruszały się po starych, a jak trzeba było, pojawiały się następne itd. Z tej mistyki kół nie wyzwolił się ani Kopernik, ani Galileusz. Pierwszy zrobił to Kepler, który pisał w dziele *Epistome astronomiae Copernicanae*, że ciała niebieskie, jako ciała, muszą odchyłać się od toru doskonałego koła, ponieważ ruchy ich nie są dziełem umysłu, lecz przyrody, tym samym nie są idealnymi bytami platońskimi.

Z dzieła *De Motu Corporum Liber Primus*





Od Galileusza już tylko krok do Newtona, niektórzy autorzy – skłonni do mistycyzmu i wierzący w wędrówkę dusz – uważają za znamienne, że Newton urodził się w roku śmierci Galileusza 1642. Sprawa wymaga wyjaśnienia; w dniu urodzin Newtona papieska reforma kalendarza nie dotarła jeszcze do Anglii i według obowiązującego, urodził się on 25 grudnia 1642 roku, natomiast według zreformowanego, 4 stycznia 1643 r.

Do XVII wieku idee pitagorejczyków nie odnotowały spektakularnego sukcesu. Powstawały modele ruchu planet, lepiej lub gorzej zgodne z obserwacjami, ale albo tak samo złożone jak modele starożytnych (Kopernik, Tycho de Brache), lub prostsze (Kepler), ale bez jakiegokolwiek próby głębszego zrozumienia praw rządzących ich ruchem. Nie było nawet ilościowego i jakościowego opisu tak prostego zjawiska, jak spadek swobodny ciała. Dzisiaj sądzimy, że wyjaśnił to definitywnie Galileusz, choć – gdy sięgnąć do jego tekstów – zmieniał on swoje zdanie wielokrotnie.

Newton stworzył program badawczy, który jest realizacją idei pitagorejskich, pierwszą i całkowicie udaną. Rdzeń tego programu składa się z czterech przypuszczeń – trzech praw ruchu i prawa powszechnego ciężenia. Rdzeń ten był wyjątkowo skutecznie broniący przez samego Newtona i jego następców. Jeśli dane obserwacyjne nie były zgodne z teorią, usiłowano znaleźć błąd w metodach obserwacyjnych, trochę w myśl zasady, że jeśli fakty przeczą teorii, to tym gorzej dla faktów. Wiadomo na przykład, że Newton miał ogromne kłopoty z pogodzeniem danych obserwacyjnych ruchu Księżyca, dokonanych przez Flamsteeda, ze swoimi obliczeniami. Skłoniło go to do krytyki metod obserwacyjnych Flamsteeda, a następnie ich udoskonalenia. Czasami jednak, gdy rozbieżności między teorią i obserwacjami były za duże, chował swoje rękopisy do szuflady na wiele lat.

Newton nie cenił ludzi, którym, jak sądził, brakowało wytrwałości i talentu, aby rozwinąć ze swego odkrycia program badawczy. Tak też prawdopodobnie myślał o Hooke'u, który odkrył, że siła oddziaływania grawitacyjnego między dwoma materialnymi kulami jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości ich środków i właściwie na tym poprzestał; pewnie nie z braku talentu, ale czasu. Brakowało mu też narzędzi, którymi dysponował Newton. Narzędzia te to rachunek różniczkowy i całkowy. Oręż, który zapewnił realizację idei starożytnych opisu przyrody w języku liczb i pojęć geometrycznych. Niewiarygodna skuteczność metody i narzędzi Newtona sprawiła, że tysiące ludzi, a później setki tysięcy, teraz miliony, zaczęły ich używać do rozwiązywania różnych problemów, nie tylko z dziedziny przyrodoznawstwa. Późniejszy rozwój tych metod, ich udoskonalanie, był już tylko sprawą czasu.

Przejdźmy do tego, co zawierają *Principia*. Newton zajmuje się w nich mechaniką punktu materialnego, wprowadza prawa ruchu, prawo powszechnego ciężenia i wyprowadza z nich prawa Keplera, a z nich dedukuje postać siły grawitacji, znajdziemy tam początki teorii krzywych algebraicznych, zagadnień wariacyjnych, teorii ruchu cieczy i gazów, zagadnienia odwrotne. My zajmiemy się tylko jednym z tych zagadnień, które odgrywa centralną rolę w badaniach Newtona – Prawem Powszechnego Ciężenia.

W jawny sposób zostało ono sformułowane w Księdze III, gdzie znajdujemy Twierdzenie VIII: *Jeśli materiał z jakiego zrobione są przyciągające się dwie kule jest jednorodny w równych odległościach od ich środków, to siła przyciągania między nimi jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości ich środków.* Wcześniej czytamy Twierdzenie VII: *Siła przyciągania działa między każdymi dwoma ciałami i jest proporcjonalna do masy każdego z nich.* A przed tymi twierdzeniami Newton pisze: (Tw. I) *Sily, które powodują, że księżyce Jowisza na swojej drodze odchylają się od ruchy prostoliniowego i utrzymywane są na swoich orbitach, skierowane są do środka Jowisza i są proporcjonalne do kwadratu ich odległości od tego środka.* Podobną treść ma Tw. II dotyczące ruchu planet wokół Słońca i Tw. III o ruchu Księżyca wokół Ziemi. Uzasadnia on te twierdzenia powołując się na fakty udowodnione w Księdze I, gdzie z praw Keplera wyprowadza Prawo Powszechnego Ciężenia (Tw. II i Zadanie

VI w Księdze I). Dziwi nieco ta kolejność przedstawienia rzeczy, bo przecież, powiedzielibyśmy dzisiaj, że z Tw. VIII i VII wynikają Tw. I, II i III. Teraz wiemy więcej, przyzwyczailiśmy się też do innego sposobu argumentacji, a może być też tak, że zatraciliśmy wrażliwość, którą obdarowany był Newton.

Prześledźmy rozumowanie Newtona. Księgę III zaczyna od sformułowania następujących zasad:

*Nie należy przyjmować w przyrodzie innych przyczyn niż te, które są konieczne i wystarczające do objaśnienia zjawisk.*

*Jeśli tylko to możliwe, należy przypisać te same przyczyny tym samym zjawiskom przyrody.*

Dalej następuje jedno z kluczowych rozumowań, które uzasadnia, że siła utrzymująca Księżyc na orbicie jest tą samą siłą, która powoduje spadek kamienia na Ziemię. Jeśli bowiem oznaczymy przez  $R$  promień Ziemi,  $r$  odległość Księżyca od środka Ziemi,  $g_s$  przyspieszenie jakie powoduje przyciąganie ziemskie w odległości  $s$  od środka Ziemi, to  $g_r/g_R = R^2/r^2$ . Znając  $R, r, g_R$  możemy wyliczyć przyspieszenie  $g_r$ , które musi być równe przyspieszeniu odśrodkowemu  $4\pi^2 r/T^2$ , jakiego doznaje Księżyc w czasie ruchu po orbicie wokół Ziemi. Przez  $T$  oznaczyliśmy okres obiegu Księżyca. Gdyby  $g_r = 4\pi r/T^2$ , to na mocy wypisanych wcześniej zasad moglibyśmy przypisać siłom powodującym utrzymywanie się Księżyca na orbicie i sprawiającym, że ciała spadają na Ziemię, tę samą naturę. Dzisiaj, kiedy wszystkie parametry potrzebne do wykonania obliczeń są dokładnie znane, sprawa jest prosta. Nie była jednak taką dla Newtona. Przeprowadził on odpowiednie obliczenia w 1666 roku, ale ich wyniki go nie zadowalały. W 1682 roku dowiedział się o pomiarach równika dokonanych przez Picarda i wtedy, używając nowej wartości promienia ziemskiego, otrzymał zgodność przyspieszenia  $g_r$  z przyspieszeniem odśrodkowym.

Zastanówmy nad istotnymi elementami w Prawie Powszechnego Ciężenia. Jest w nim pojęcie siły działającej na odległość, masy oraz zależności siły od odległości. Zwłaszcza pierwsze dwa z nich, w owym czasie, mogły budzić wiele oporów i prowadzić do burzliwych polemik. Przypomnijmy, że pojęcie siły, z którym stykamy się od dzieciństwa, niepokoiło fizyków do końca XIX wieku. Krytykował je Helmholtz, Kirchhoff, a Hertz napisał traktat z mechaniki bez wprowadzania siły jako pojęcia pierwotnego.

Zacznijmy od pojęcia masy: *Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctima* – tymi słowami zaczyna Newton Księgę I. W tłumaczeniu na polski: *Ilość materii (dzisiaj powiedzielibyśmy raczej – masa) jest miarą tejże, proporcjonalną do jej gęstości i objętości.* Wprowadzenie masy ciała było pomysłem Newtona, choć, jak się wydaje, bliski sformułowania tego pojęcia był Jan Buridan (XIV w.), który w dziele *Quaestiones in Libros Metaphysicae* pisał, że *impetus* jest proporcjonalny do *materia prima*, co dzisiaj można rozumieć, że pęd (energia kinetyczna) jest proporcjonalny do masy. Terminu *quantitas materiae* użył wcześniej Idzi z Rzymu, określając nim ciężar ciała.

Mimo olbrzymiego wpływu na rozwój całej nowożytnej cywilizacji *Principia* nie są nie tylko lekturą obowiązkową na studiach matematyczno – fizycznych, ale chyba prawie wcale nie są czytane. Przyczyna jest taka, że treści w nich zawarte zostały „przetłumaczone” przez Bernoullich, Cauchy’ego, Lagrange’a, Laplace’a i innych na język epsilonów i delt, czyli ogólnie rzecz biorąc, na język współczesnej analizy matematycznej i równań różniczkowych. Z jakichś powodów język ten wyparł geometryczne rozumowania Newtona. Być może zadecydowała o tym jego pozorną prostotą i fakt, że wiedza wyrażona w tym języku jest łatwiej przekazywalna, a tym samym szybciej się rozprzestrzenia, a z nią i język, w którym jest przekazywana. Nie tylko uczniowie, lecz również nauczyciele, gdy mają okazję, idą na łatwiznę. Wydaje się jednak, że coś nieuchwytnego, czym przeopjone są całe *Principia*, zostało w ten sposób zgubione. Sprawa ma się trochę tak, jak z przeczytaniem *Pana Tadeusza* woryginalie, a zapoznaniem

się z nim w książeczce dla maturzystów dostępnej w dworcowym kiosku. Rozumowania Newtona są trudne, trzeba się do nich przyzwyczaić, przemyśleć, a to wymaga czasu i wysiłku.

Zapoznajmy się z jednym z jego rozumowań z Księgi II, dowodem Tw. XIX. Jest to znany powszechnie fakt, a sam dowód jest prosty. Tw XIX głosi:

*Masy wahadeł o równych długościach mają się do siebie jak iloczyn ich ciężarów i kwadratów okresów drgań.* Dla ułatwienia wprowadziłem oznaczenia w nawiasach, których nie ma u Newtona. Dowód przebiega następująco: Prędkość, jaką dana siła nadaje danej masie w zadany czas, proporcjonalna jest do siły i odwrotnie proporcjonalna do masy. Wynika to z drugiego prawa dynamiki. Jeśli wahadła mają jednakową długość, to siły ( $F$ ) wprawiające w ruch wahadła, przy jednakowym odchyleniu od pionu proporcjonalne są do ciężaru; założmy, że dwa ciała w czasie drgań opisują równe drogi i drogi te podzielone są na równe części; wtedy czasy ( $\Delta t$ ) przebywania ciała w tych częściach są proporcjonalne do okresu drgań ( $T$ ), a prędkości ( $v$ ) przechodzenia przez odpowiednie części drogi są wprost proporcjonalne do działających sił i okresu drgań oraz odwrotnie proporcjonalne do mas ( $m$ ). Wynika stąd, że masy są proporcjonalne do sił i okresów drgań oraz odwrotnie proporcjonalne do prędkości. Ale prędkości są odwrotnie proporcjonalne do czasu, a zatem, wynika stąd, że wielkości, które są proporcjonalne do czasu i odwrotnie proporcjonalne do prędkości, są proporcjonalne do czasu. Otrzymujemy stąd wniosek, że masy są proporcjonalne do sił i kwadratu czasu, t.j. do ciężaru wahadła ( $c_w$ ) i kwadratu okresu drgań.

Zapiszmy to rozumowanie używając współczesnej symboliki: oznaczając symbolem  $\sim$  znak proporcjonalności, mamy  $\Delta t \sim T$ ,  $v \sim F\Delta t/m$ , a więc  $v \sim FT/m$ , stąd  $m \sim FT/v$ . Mamy też  $v \sim 1/\Delta t$ , skąd  $1/v \sim \Delta t \sim T$ . W rezultacie dostajemy  $m \sim FT^2$ , ale  $F \sim c_w$  co pociąga  $m \sim c_w T^2$ .

Po tym dowodzie zamieszczony jest wniosek: jeśli okresy drgań są jednakowe, to stosunek masy ciał jest równy stosunkowi ich ciężarów.

W Księdze III Newton opisuje doświadczenie potwierdzające z dokładnością do 1/1000, że masa jest proporcjonalna do ciężaru. Eksperyment ten został potwierdzony przez Bessela w 1828 roku.

Działanie siły grawitacji na odległość niepokoiło nie tylko Newtona. W starożytności usiłowano wyjaśnić ten problem obserwując swobodny spadek ciał, czy wzajemne oddziaływania magnesów. Ptolemeusz rozpatrywał możliwość oddziaływania na odległość, przypisując wpływowi Księżyca przyplwy i odpływy morza.

Od czasów Arystotelesa do czasów Kopernika obowiązywała koncepcja tzw. naturalnego miejsca i zachowania całości – zgodnie z nią ciało ciężkie jest przyciągane do swego naturalnego miejsca – środka Wszechświata, który pokrywa się ze środkiem Ziemi. Innymi słowy, grawitacja była naturalnym dążeniem Ziemi do zachowania swej całości (*integrity*).

Podobnie tłumaczono zachowanie się magnesu. Pierre de Maricourt (XIII) pisał w jednym z listów: *magnes dąży do zachowania całości lepiąc części w całość*. Frascator w dziele *De sympathia et antipathia rerum* (1555) pisze, że jeśli dwie części całości rozdzielimy, to każda z nich emituje substancję rozciągającą się w przestrzeni i powodującą złączenie tych substancji. Tłumaczył w ten sposób oddziaływania na odległość – grawitację oraz oddziaływania magnetyczne.

Zauważmy, że pojawiła się tutaj tajemnicza substancja, która rozciąga się w przestrzeni i jest źródłem oddziaływania. Pomysł nie był nowy, już wcześniej Jan z Jandun (XIV w.) w dziele *De caelo* przeczył możliwości oddziaływania na odległość, a działanie magnesu tłumaczył propagowaniem tzw. *species magnetica*. Ideę tę zaczerpnął prawdopodobnie od Awerroesa, który twierdził, że *species magnetica*, która wychodzi z magnesu, zmienia żelazo, nadając mu moc poruszania się samemu.

Od arystotelesowskiej koncepcji miejsca i zachowania całości nie uwolnił się również współczesny Newtonowi Robert Hooke. W pracy *An Attempt to prove the annual motion of the Earth* (1674) pisał: *Wszystkie ciała niebieskie, bez wyjątku, posiadają siłę skierowaną do ich środka; dzięki temu zachowują swoje części i uniemożliwiają ich ucieczkę, jak to widzimy na Ziemi.*

Część autorów starożytnych i średniowiecznych uznawała działanie na odległość za niemożliwe. Jan Buridan w *Questiones de coelo et mundo* wspomina o opinii pewnych ludzi, którzy *mówią, że miejsce jest przyczyną ruchu ciężkiego ciała na skutek przyciągania; podobnie jak magnes przyciąga żelazo.* Jan Buridan zaatakował tę opinię stwierdzając, że przyciąganie miejsca nie jest podobne do zachowania się magnesu i żelaza *ponieważ, gdy żelazo jest blisko magnesu, od razu zaczyna się poruszać szybciej, niż gdyby było bardziej oddalone, tak się jednak nie dzieje z ciężkimi ciałami w związku z ich miejscem naturalnym.*

Inny zarzut w zagadnieniu, czy naturalne miejsce wywiera jakikolwiek rodzaj siły na poruszające się ciało postawił Albert Saksończyk (XIV w.). Zwrócił on uwagę, że takiej sile cięższe ciało przeciwstawiałoby większy opór niż lżejsze, a więc spadałoby wolniej, co jest sprzeczne z doświadczeniem.

Nawet współczesny Newtonowi Huygens twierdził, że idea, zgodnie z którą ciała przyciągają się wzajemnie z olbrzymich odległości w sposób natychmiastowy, jest absurdalna, a Leibniz, dużo łagodniej, określił ją mianem tajemniczej. Część uczonych owych czasów była zdumiona tym, jak Newton mógł zadać sobie tyle trudu, przeprowadzając taką ilość dociekań i trudnych obliczeń, które nie miały żadnych innych podstaw niż sama ta idea.

Nie brakowało też, dużo wcześniej, śmiałych uogólnień koncepcji naturalnego miejsca. Czołowy neoplatonik XV wieku Mikołaj z Kuzy twierdził, że ciężenie jest zjawiskiem lokalnym i każda gwiazda jest ośrodkiem przyciągania zdolnym do utrzymania razem swoich części. Gilbert w *De Magnetic* (1600 r.) pisał podobnie – *ruch w polu ciężkości jest dążeniem do połączenia się w całość rozdzielonych części* i dodaje – *ruch ten, który jest ruchem tylko w kierunku swego źródła, nie jest przypisany tylko Ziemi, ale również jest cechą Słońca, Księżycy i innych ciał niebieskich.*

Nie było też zgodności, co do tego, jaka jest zależność siły, z jaką działa naturalne miejsce na dane ciało. Arystoteles uważał, że ciężar ciała rośnie wraz z jego zbliżaniem się do niego; za nim podzielał ten pogląd wielu np. święty Tomasz; istniał też inny punkt widzenia, reprezentowany np. przez Alberta Wielkiego; zgodnie z nim ciężar nie zależy od odległości od centrum Wszechświata.

Wilhelm Ockham dopuszczał zasadę działania na odległość, tak jak Słońce oświetlając Ziemię działa na odległość. Od tej geometrycznej analogii związanej z rozprzestrzenianiem się promieni słonecznych już tylko krok do stwierdzenia, że siła oddziaływania grawitacyjnego (magnetycznego) podobnie jak intensywność światła, jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Prawdopodobnie taką właśnie analogią kierował się Robert Hooke pisząc we wspomnianej wcześniej pracy, że siła grawitacji jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od środka Ziemi. Z kolei Kepler zakładał, że w przeciwieństwie do światła, które rozchodzi się w każdym kierunku, grawitacja działa tylko w płaszczyźnie równika. Wyciągał stąd wniosek, że wielkość siły grawitacji, z jaką Słońce działa na planetę, jest odwrotnie proporcjonalna do ich odległości.

Zależność siły oddziaływania grawitacyjnego od odległości Newton wyprowadził z praw Keplera i wydaje się, że właśnie jemu udało się to jako pierwszemu. Spory historyków nauki na ten temat trwają jednak nadal. Teraz sprawa wydaje się prosta, korzystamy ze wzoru Bineta wyrażającego zależność siły w ruchu w polu centralnym od trajektorii ruchu, a następnie posilkujemy się prawami Keplera. Dla Newtona i jemu współczesnych problem był o wiele trudniejszy, a jego pokonanie wymagało nielada zdolności i pomysowości.



Podsumowując: teoria grawitacji Newtona była pierwszą udaną próbą realizacji idei pitagorejskich opisu zjawisk przyrodniczych z pomocą abstrakcyjnych pojęć matematyki. Jej sukcesy dowiodły tezy, że można stworzyć model zjawisk, które przebiegają w niewyobrażalnych odległościach od nas i są poza horyzontem czasowym życia na Ziemi.

Zakończmy słowami z listów jednego z najwybitniejszych spadkobierców tradycji jońskiej Alberta Eisteina (na drugim miejscu w ankiecie BBC); w liście do J.E. Switzera pisze on: *Rozwój nauki zachodniej opiera się na dwóch wielkich osiągnięciach: wynalezieniu formalnego logicznego systemu przez filozofów oraz odkryciu możliwości określenia związku przyczynowego za pomocą systematycznego eksperymentu (renesans). Moim zdaniem nic dziwnego, że mędrcy chińscy nie dokonali tych odkryć. Dziwne raczej to, że oba te odkrycia zostały w ogóle dokonane*, a w liście do Marcela Grossmanna czytamy: *To uspaniałe uczucie odkryć jedność złożonych zjawisk, które wydają się być całkowicie niezwiązane ze sobą.*

Pierwszą wersję maszynopisu przeczytali prof. P. Biler i prof. R. Duda, czyniąc wiele uwag, za które jestem im głęboko wdzięczny.

### Literatura

1. A.C. Crombie, *Nauka średniowieczna i początki nauki nowożytnej*, Warszawa 1960, PAX.
2. R. Dugas, *History of Mechanics*, New York 1988, Dover.
3. D.L. Goodstein, J.R. Goodstein, *Zaginiony wykład Feynmana*, Warszawa 1997, Prószyński i S-ka.
4. J. Kierul, *Izaak Newton*, Wrocław 1996, Quadrvivium.
5. T.S. Khun, *Przewrót kopernikański*, Warszawa 1966, PWN.
6. I. Lakatos, *Pisma z filozofii nauk empirycznych*, Warszawa 1995, PWN
7. I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, (tłumaczenie rosyjskie Ł. S. Kryłowa), Moskwa 1989, Nauka.
8. M.P. Rudzki, *Gwiazdy i budowa wszechświata*, Kraków 1912, Akademia umiejętności.
9. D.J. de Solla Price, *Węzłowe problemy nauki*, Warszawa 1965, PWN.
10. W. Tatarkiewicz, *Historia filozofii*, Warszawa 1995, PWN.