



Machina Mundi

Obrazy i Pomiary Kosmosu od Kopernika do Newtona



Culture 2000

Muzeum Mikołaja Kopernika we Fromborku
czerwiec – wrzesień 2005

Machina Mundi

Obrazy i Pomiar Kosmosu od Kopernika do Newtona

Paolo Del Santo, Giorgio Strano*

* Pomimo jednakowej odpowiedzialności naukowej Paolo Del Santo jest autorem części B1 i C1 i odpowiednich pozycji katalogowych; Giorgio Strano jest natomiast autorem pozostałej części opracowania.

Przedmowa

Wprowadzenie

A – Dziedzictwo starożytnych; Geocentryczne systemy budowy Świata w latach 1450-1550

- 1.1 – System Ptolemeusza
- 1.2 – Nie-ptolemeuszowskie systemy geocentryczne
- 1.3 – Kompromisy

B – Nowe koncepcje budowy Świata

- 1 Teoria heliocentryczna
 - 1.1 – Mikołaj Kopernik
 - 1.2 – System kopernikowski
 - 1.3 – *Komentarzyk i Opowiadanie pierwsze*
 - 1.4 – Cenzura *O Obrotach*
- 2 Nowe obserwacje i system geo-heliocentryczny
 - 2.1 – Tycho Brahe
 - 2.2 – Rola obserwacji astronomicznych
 - 2.3 – System geo-heliocentryczny Tychona
- 3 Teleskop i prawdziwy system budowy Świata
 - 3.1 – Galileusz
 - 3.2 – Odkrycia niebieskie
 - 3.3 – System Jowisza i wyznaczenie długości geograficznej
 - 3.4 – Galileusz a system Kopernika

C – Nowa fizyka Wszechświata

- 1 Prawa, siły i harmonia Kosmosu
 - 1.1 – Jan Kepler
 - 1.2 – Trzy prawa ruchu planet
 - 1.3 – Fizyka nieba
 - 1.4 – Optyka Keplera
- 2 Prawo grawitacji i Wszechświat
 - 2.1 – Izaak Newton
 - 2.2 – Fizyka uniwersalna
 - 2.3 – Światło i optyka
 - 2.4 – Orbity komet i planet

Katalog Przedmowa

Jednym z najbardziej znanych cytatów z historii nauki są skromne słowa wypowiedziane przez sir Izaaka Newtona: „Gdybym miał widzieć dalej, to tylko stojąc na ramionach olbrzymów”. Odkrycia naukowe, bez względu na swą rewolucyjność i wspaniałość, nie są dokonywane tak po prostu. Postęp naukowy jest wypadkową wiedzy i osobistych poglądów badacza.

Tego właśnie dokonali astronomowie renesansu, torując drogę rewolucji naukowej. Poddając w wątpliwość istniejące systemy i dogmaty stworzyli z czasem podstawy współczesnej wiedzy na temat Kosmosu. Zdecydowaliśmy więc oprzeć projekt World View Network (Kształtowanie Współczesnych Poglądów na Budowę Świata) na naukowych olbrzymach: Mikołaju Koperniku, Tycho Brahe, Janie Keplerze, Galileuszu i Izaaku Newtonie. Podobnych postaci było rzecz jasna więcej jednak piątka ta dokonała największego postępu. Historia współczesnej teorii budowy Wszechświata została pomyślana jako podróż przez stulecia od Fromborka w północnej Polsce, przez wyspę Hven leżącą w przesmyku pomiędzy Danią i Szwecją, Pragę Świętego Cesarstwa Rzymskiego, centrum naukowe we Florencji do Cambridge i Woolstrophe. Znalezienie przez Newtona ostatniej części układanki - prawa powszechnej grawitacji było potwierdzeniem heliocentrycznej hipotezy Kopernika.

Dzisiaj w dobie integracji europejskiej współpraca naukowa między ośrodkami naukowo-badawczymi ma bardzo duże znaczenie. Historia tego, jak astronomowie renesansowi przekształcili astronomię z filozofii w naukę, jest żywym świadectwem znaczenia współpracy międzynarodowej, dając współcześnie żyjącym szansę przekonania się, że podstawowe zagadnienia i ogromna siła motywująca astronomii nie zmieniły się od wieków oraz, że podstawy budowy Wszechświata nadal są fascynujące. Współcześni badacze siedzący przed ekranami swoich komputerów są tak samo zafascynowani Wszechświatem jak Tycho i Galileusz, pracujący z kwadrantem i teleskopem.

Wystawa *Machina Mundi* powstała w wyniku współpracy muzeów, poświęconych historii astronomów Renesansu, i jest częściowo finansowana z funduszu Kultura 2000 UE. Dalsze informacje na temat projektu *Machina Mundi* można uzyskać na stronie internetowej projektu: www.worldviewnetwork.org.

Landskrona, 10 maja 2004

Göran Nyström
Project Manager World View Network

Wprowadzenie

Brak rzekomych dowodów szybkiego ruchu ziemskiego (stały wiatr ze wschodu, odchylenie na wschód spadających przedmiotów, itp.) był przyczyną powstania w starożytności poglądu, że Ziemia nie porusza się.

Wizualne postrzeganie sfery niebieskiej otaczającej obserwatora było podstawą drugiej teorii, mówiącej że Ziemia znajduje się dokładnie w centrum Kosmosu. Obserwacje okresowości i regularności niektórych zjawisk niebieskich (dzień wynikający z 24-godzinnego obrotu sfery niebieskiej ze wschodu na zachód, miesiąc i tydzień wynikający z faz księżyca, rok będący rezultatem zodiakalnej drogi Słońca) spowodowały powstanie trzeciej teorii o jednostajności i kolistości każdego ruchu niebieskiego.

Generalnie rzecz biorąc te trzy podstawowe teorie – nieruchomości Ziemi, centralnego położenia Ziemi oraz jednostajności i kolistości ruchów niebieskich – pokrywały się z pośrednimi lub wyrażanymi bezpośrednio wnioskami filozofów (Platona i Arystotelesa) oraz, kilka stuleci później, teologów, na temat roli człowieka we Wszechświecie. Postrzeganie przez ludzi wierzących Wszechświata jako dzieła Boga, którego zwieńczeniem było stworzenie człowieka, było szczególnie silne w Średniowieczu. Centralna pozycja Ziemi była utożsamiana z centralną pozycją człowieka w boskim planie eschatologicznym.

Wychodząc z powyższych trzech podstawowych zasad, astronomowie musieli wyjaśnić kilka dziwnych zjawisk. Zgodnie z teorią geocentryczną ruchy Słońca i Księżyca po Zodiaku były niemal jednostajne. Niestety ruchy pozostałych pięciu planet - "wędrówców", trudno nazwać jednostajnymi. Przykładowo Mars, przy okresie obiegu wynoszącym około dwóch lat, wydaje się zatrzymywać w swoim ruchu po Zodiaku, zmieniać kierunek ruchu na przeciwny, znowu zatrzymywać się, aby wreszcie wznowić ruch we wcześniejszym kierunku.

W starożytności, to dziwne "pozorne" zachowanie Marsa i innych planet rozumiane było jako skutek "rzeczywistych" przesunięć w przód i w tył dookoła nieruchomej Ziemi. Dwie główne typologie modeli planetarnych oparte były na założeniu, że mimo, iż ruch pojedynczej planety nie jest jednostajny, może on być postrzegany jako zestawienie dwóch, trzech lub większej liczby jednostajnych ruchów kołowych.

Eudoksos z Knidos (IV w. p.n.e.) był autorem pierwszej naukowej typologii modeli planetarnych. Wykorzystując zestaw trzech lub czterech współśrodkowych sfer dla każdej planety Eudoksos był w stanie wytłumaczyć wsteczny ruch Merkurego, Jowisza i Saturna po Zodiaku (Fig. 1). Kallippos z Kyzikos (IV w. p.n.e.) wprowadził zestaw modeli z kilkoma dodatkowymi sferami dla Księżyca, Słońca, Wenus i Marsa. Modele te były zbyt skomplikowane, aby mogły zostać użyte w obliczeniach. Dlatego też, ich zastosowanie było ograniczone do fizycznej koncepcji Wszechświata opracowanej przez Arystotelesa (384-322 p.n.e.). Grecki filozof uporządkował i połączył ze sobą siedem współśrodkowych modeli planetarnych Eudoksosa i Kallipposa w jednolity układ 55 krystalicznych sfer otaczających nieruchomą Ziemię.

Appolonios z Perge (III w. p.n.e.) opracował drugą typologię modeli planetarnych, używając w zasadzie jedynie zestawu dwóch kół. Hipparch z Nicei (II w. p.n.e.) i Klaudiusz Ptolemeusz (II w. n.e.) dopracowali modele Appoloniosa, zwane modelami „epicyklicznymi”. W formie przedstawionej przez Ptolemeusza w jego *Układzie matematycznym* czyli *Almageście* modele epicykliczne odniosły wielki sukces (Fig. 2). Podczas gdy modele Eudoksosa zostały niemal całkowicie zapomniane, modele epicykliczne okazały się niezwykle przydatne w obliczeniach. Do XVI w. modele Ptolemeusza stanowiły podstawę do opracowywania tablic planetarnych i efemeryd wykorzystywanych w celu ustalania przyszłych pozycji planet w Zodiaku.

A – Dziedzictwo starożytnych; Geocentryczne systemy budowy Świata w latach 1450-1550

W kompleksowej budowie Kosmosu zaprezentowanej przez Arystotelesa w dziele *O Niebie (De coelo)*, ciężka i podlegająca zmianom Ziemia była usytuowana nieruchomo w centrum Wszechświata. Była otoczona ośmioma grupami nie podlegających zmianom sfer niebieskich. Sfery te obracały się ruchem jednostajnym unosząc Księżyc, Słońce, planety i gwiazdy stałe wokół Ziemi (Fig. 3).

Teoria ta była niezmiernie atrakcyjna dla geocentrycznego nastawienia świata Islamu i Chrześcijaństwa w okresie Średniowiecza. Przede wszystkim osiem grup sfer zwieńczonych było sferą dziewiątą, „pierwszą ruchomą” wykorzystywaną dla fizycznego wyjaśnienia precesji punktu równonocy. Następnie dodano sferę dziesiątą, nieruchome „niebo empirejskie”, które uważane było za Dom Boga. Taka budowa Świata przyjęta została w *Boskiej Komедii* Dantego Alighieri (1265-1321). Ostatecznie niebo empirejskie zostało podzielone na zestaw dziewięciu metafizycznych sfer otaczających sfery niebieskie, odpowiadających dziewięciu stopniom hierarchii aniołów.

Z punktu widzenia astronomii, niektóre odkrycia dokonywane w drodze obserwacji podważały prawdziwość arystotelesowskiej budowy Świata. W szczególności były to:

- 1) brak potwierdzenia w obserwacjach symetrii orbit planetarnych, którą zakładały współśrodkowe modele Eudokosa i Kalliposa
- 2) obserwowana zmienna jasność planet podważała założenie, że znajdują się one na powierzchniach sfer, a odległość każdej planety od Ziemi jest stała.

Modele epicykliczne, opisywane przez Ptolemeusza w *Almageście* rozwiązywały te problemy. W szczególności wytłumaczył on zmienną jasność planet jako wynik rzeczywistej zmiany ich odległości od Ziemi. Mimo to modele planetarne opracowane przez Ptolemeusza zawierały kilka nieścisłości w porównaniu z danymi obserwacyjnymi. Przykładowo, islamscy astronomowie zdawali sobie sprawę, iż zmienność pozornej średnicy Księżyca, przewidziana w księżycowym modelu ptolemeuszowskim, przekraczała średnicę obserwowaną. Ponadto wszystkie modele planetarne opisywane w *Almageście* oparte były na serii kół, trudnych do wprowadzenia do systemu sfer niebieskich. Wszystkie koła niewspółśrodkowe, epicykle i ekwanty opracowane przez Ptolemeusza wydawały się często jedynie dziełem przypadku. W szczególności tak zwany „ekwant” wydawał się przeczyć stałej kolistości ruchów niebieskich. Dlatego wielu filozofów odrzucało istnienie ekwantu

Wiele problemów związanych z arystotelesowskimi i ptolemeuszowskimi koncepcjami budowy Wszechświata pozostawało nierozwiązanych. Prowadzona w związku z tym astronomiczna debata zapoczątkowała zmianę niektórych wyobrażeń na temat rzeczywistej budowy Kosmosu. Powszechny pogląd, iż tak zwana „rewolucja astronomiczna” przesądziła o dominacji systemu heliocentrycznego nad systemem geocentrycznym, opracowanym przez Arystotelesa i Ptolemeusza, stanowi jedynie przybliżenie prawdy historycznej. Trzy główne astronomiczne teorie geocentryczne pochodzą z lat 1450-1550.

A1.1 – Ptolemeuszowski system budowy Świata

W *Almageście* Ptolemeusz zaprezentował siedem modeli geometrycznych dla znanych od starożytności „planet”: Księżyca, Merkurego, Wenus, Słońca, Marsa, Jowisza i Saturna. Ogólnie rzecz biorąc pojedynczy model ptolemeuszowski obejmował duże niewspółśrodkowe koło otaczające nieruchomą Ziemię. Niewspółśrodkowe koło – zwane w Średniowieczu „deferentem” – utrzymywało środek mniejszego koła, „epicyklu”. Planeta znajdowała się na epicyklu i zakreślała skomplikowaną trajektorię. Była ona wyznaczana poprzez zestawienie ruchu środka epicyklu po deferencie – jednorodnego względem środka ekwantu – z jednostajnym ruchem planety po epicyklu.

Siedem modeli planetarnych Ptolemeusza okazało się niezmiernie użytecznych przy dokonywaniu obliczeń (Fig. 4). Jednakże nie można jednoznacznie stwierdzić, że tworzyły one część jakiegoś systemu. W innym dziele, pt. *Hipoteza planetarna*, Ptolemeusz próbował połączyć ze sobą te modele w całościowy system Świata. Mimo wysiłków, przy ówczesnym instrumentarium astronomicznym, nie był w stanie ustalić odległości wszystkich planet od Ziemi. Fakt ten sugerował brak możliwości określenia liniowych wymiarów promieni deferentu i epicyklu każdej planety. W celu wyjaśnienia tej niepewności Ptolemeusz zbudował modele

planetarne w oparciu o kilka założeń teoretycznych. Głównym z nich było ułożenie modeli jeden na drugim, bez pustych przestrzeni pomiędzy nimi.

A1.2 – Nie-ptolemeuszowskie modele geocentryczne

Panowanie ptolemeuszowskiego modelu budowy Świata nie było absolutne. Siedem modeli planetarnych zaprezentowanych w *Almageście* nie odpowiadało fizycznej wizji Wszechświata, w którą wierzyli filozofowie. W szczególności niektóre koła zawarte w takich modelach (deferenty niewspółśrodkowe) wydawały się podważać geocentryczną, sferyczną budowę nieba. Inne koła (ekwanty) pozostawały w sprzeczności z jednostajnością wszystkich ruchów niebieskich. Innymi słowy modele Ptolemeusza były niezgodne z podstawowymi teoriami zarówno Platona (IV w. p.n.e.) jak i Arystotelesa.

W Średniowieczu fizyczna niedorzeczność modeli ptolemeuszowskich powodowała tworzenie różnych hipotez. W XIII i XIV w. kilku wybitnych islamskich astronomów — Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274), Mu'ayyad al-Din al-'Urdu (zmarł 1266) i Qubt al-Din al-Shirazi (1236-1311) z obserwatorium Maraga oraz 'Ali ibn Ibrahim ibn Muhammad ibn al-Shatir (1304 - ok. 1375) z Damaszku — opracowało systemy sfer idealnie zastępujące niewspółśrodkowe deferenty i ekwanty.

Pod koniec XV i na początku XVI stulecia upowszechnianie się wiedzy zawartej w *Almageście* wywołało podobne reakcje w Europie. Jeden z umiarkowanych krytyków Ptolemeusza, Hans Müller z Królewca (1436-1476), znany również jako Regiomontanus, zbudował kilka prostych modeli koncentrycznych dla Słońca i Księżyca. We Włoszech ptolemeuszowskim modelom planetarnym towarzyszyły inne modele przywołujące zasady sfer współśrodkowych Eudoksosa i Kallipposa. To silne pragnienie przywrócenia idealnie okrągłych sfer wyznawane i realizowane było przez Giovaniego Battista Amico (1511-1538), Alessandro Achillini (1463-1512) i Gerolamo Fracastoro (1483-1553). Powstające w wyniku tego modele współśrodkowe były jednakże niezwykle skomplikowane. Przykładowo niektóre modele Fracastora dla wyjaśnienia ruchu jednej planety wymagały zastosowania ogromnej liczby 11 obracających się sfer.

A1.3 – Kompromisy

Jako że modele ptolemeuszowskie były nadzwyczaj użyteczne w przewidywaniu pozycji planet, wyrzeczenie się ich nie było rzeczą prostą. Stosując podejście instrumentalne, geometryczne systemy opisane w *Almageście* mogły być wykorzystane jedynie jako matematyczne wzory, niezależne od rzeczywistej budowy Świata. Mimo wszystko ptolemeuszowskie modele planetarne mogły być traktowane jako części fizycznego systemu planetarnego. Islamski astronom Abu al-Hasan ibn al-Haytham (ok. 965 - ok. 1040) był pierwszym, który opisał to wspaniałe rozwinięcie *Almagestu* i *Hipotezy planetarnej*.

Pojedynczy model Ptolemeuszowski mógł być traktowany jako pewien rodzaj części systemu “kul cząstkowych”. Generalnie rzecz biorąc planety były przytwierdzone do kuli epicyklu, a epicykl był równikowym wycinkiem małej kuli. Kula epicyklowa znajdowała się w pustej przestrzeni pomiędzy dwoma dużymi kulami niewspółśrodkowymi. Sfery te obracały się ruchem jednostajnym — ibn al-Haytham odrzucił ptolemeuszowski ekwant — w pustej przestrzeni pomiędzy dwoma kolejnymi kulami, których środki pokrywały się z Ziemią. Różnica prędkości dwóch kul niewspółśrodkowych była przyczyną obrotu kuli epicyklu wokół jego własnej osi i Ziemi ze stałą prędkością, pozornie po niewspółśrodkowym deferencie.

Z jednej strony system ten, odpowiadający stanowi faktycznemu w przypadku Wenus, Marsa, Jowisza i Saturna, był uproszczony dla Słońca. Z drugiej strony jednak system stał się bardziej skomplikowany dla Merkurego i Księżyca, dodając kilka par kul niewspółśrodkowych. Bez względu na przypadek zewnętrzne i wewnętrzne kule współśrodkowe uznawane były za zewnętrzne i wewnętrzne granice sfery pojedynczej planety.

Ten system geocentryczny uratował istotę doktryny Ptolemeusza i spotkał się z uznaniem. W Europie Georg Peurbach (1423-1461) wykorzystał go w dziele *Teoretyka planet* (*Theoricae novae planetarum*), opublikowanym po jego śmierci w 1472 r. przez Regiomontanus. Dzieło to był wielokrotnie wznawiane, tłumaczone i komentowane (Fig. 5). Ponadto w XVI i XVII stuleciu zbudowano kilka interesujących mosiężnych modeli deferentowych kul cząstkowych (Fig. 6).

B – Nowe systemy budowy Świata

W XVI stuleciu w debacie na temat prawdziwego systemu budowy Świata pojawiły się nowe wątki. Błędy i fizyczna niespójność systemu Ptolemeusza zostały wykryte przez kilka uniwersytetów, stając się tam elementami dalszej dyskusji. W ten sposób główne ośrodki propagujące astronomię Ptolemeusza stały się jednocześnie środowiskiem, w którym rozpoczęły się radykalne zmiany poglądów na budowę Świata.

Dwie nowe kosmologie osłabiły ściśle geocentryczną doktrynę. Zostały opracowane, odpowiednio przez Mikołaja Kopernika (1473-1543), który studiował astronomię w Krakowie, Bolonii i Ferrarze oraz Tycho Brahe (1546-1601), który odbył studia astronomiczne w Kopenhadze i Lipsku.

W swoim dziele *O obrotach sfer niebieskich (De revolutionibus orbium coelestium)* Kopernik wyjaśnił opracowaną przez siebie nową koncepcję budowy Świata, w celu przywrócenia zasady jednostajności i kółkości ruchów planet naruszonej przez Ptolemeusza. Kopernik wykonał we Fromborku niewiele obserwacji astronomicznych, wykorzystując instrumenty podobne do ptolemeuszowskich. Mimo to w oparciu o zasady teoretyczne i filozoficzne zamienił role Słońca i Ziemi. Po około dwóch tysiącleciach dominacji systemu geocentrycznego Słońce zostało przeniesione do nieruchomego centrum wszechświata, a Ziemia uzyskała status planety. Zmiana ta była rewolucyjna z wielu punktów widzenia: astronomicznego, fizycznego, teologicznego, itd. Nowa teoria nie była jednak całkowicie nowatorska, Kopernik zachował sfery krystalicznych starożytnej tradycji arystotelesowskiej i znaczną część geometrii używanej przez greckich i islamskich astronomów.

Tycho próbował przywrócić idealną jednostajność i kółkość ruchów planetarnych w inny sposób. Prawdziwie podziwiał Kopernika jako matematyka, lecz był zwolennikiem doktryny geocentrycznej z powodów fizycznych i teologicznych. Tycho zbudował udoskonalone przez siebie instrumenty na wyspie Hven i wykorzystując je wprowadził nowy impuls do astronomii praktycznej. Razem ze swoimi asystentami systematycznie śledził drogi planet przez przeszło 20 lat. Ten długofalowy program obserwacyjny był nieodzowny dla osiągnięcia całkowitej zgodności modeli planetarnych z danymi doświadczalnymi. W wyniku tego Tycho był w stanie nakreślić geo-heliocentryczny system budowy Świata, w którym nieruchoma Ziemia znajdowała się w centrum Wszechświata, Słońce krążyło wokół Ziemi, zaś pozostałe planety wokół Słońca. System ten był zarówno śmiały jak i rewolucyjny. Sugerował, że niektóre koła planetarne przecinały się. Fakt ten położył ostatecznie kres teorii krystalicznych sfer niebieskich (Fig. 7).

Na początku XVII w. żaden z tych nowych systemów budowy Świata nie wydawał się jednoznacznie lepszy od systemu ptolemeuszowskiego. Przewidywana wygoda była jedynym powodem wyboru jednego z opisywanych powyżej modeli planetarnych. Z tego punktu widzenia debata na temat budowy Świata miała jedynie znaczenie czysto praktyczne i matematyczne.

Taki stan zastał Galileusz (Galileo Galilei, 1564-1642) kiedy pojawił się na "scenie" astronomicznej. Wprowadzenie przez Galileusza teleskopu jako narzędzia astronomicznego zmieniło znaczenie słowa „obserwacje”. Teleskop nie był instrumentem wyskalowanym, tak jak miało to miejsce w przypadku przyrządów Ptolemeusza, Kopernika i Tycho. Przy jego zastosowaniu można było natomiast dokonać analiz budowy znanych ciał niebieskich oraz odkryć nowe. Galileusz natychmiast zrozumiał, że te możliwości nowego instrumentu mogą nie tylko przesunąć granice znanego Wszechświata, lecz również umożliwić poznanie jego rzeczywistej budowy. W swym astronomicznym arcydziele, *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata (Dialogo sopra i due massimi sistemi del Mondo)*, przyznał, że jest zwolennikiem systemu Kopernika, wyrażał się z sarkazmem o systemie arystotelesowsko-ptolemeuszowskim, a o Tycho nie wspominał w ogóle. Takie stanowcze stanowisko wywołało gwałtowną reakcję Kościoła katolickiego w stosunku do Galileusza i teorii Kopernika.

B1 – Teoria heliocentryczna

Zwykle nowa teoria naukowa przedstawiana jest w celu wytłumaczenia zjawisk znanych od długiego czasu, których nie można było wyjaśnić do tej pory lub, które wyjaśniane były w sposób niezadowolający. Jednak w czasach Kopernika nie odkryto żadnych zjawisk, zarówno astronomicznych jak i fizycznych, które

mogłyby stanowić śmielsze wyjaśnienie idei ruchu Ziemi zarówno obrotowego wokół własnej osi jak i obiegowego po „wielkim kole” dookoła Słońca. Ponadto z technicznego punktu widzenia teoria heliocentryczna, jako taka, nie była w stanie wyjaśnić ruchów niebieskich w sposób lepszy od swojej geocentrycznej konkurentki. Obie teorie są kinematycznie, tj. geometrycznie, równoważne. Z punktu widzenia filozofii system kopernikowski był niezmiernie trudny do przyjęcia: poruszenie Ziemi oznaczało usunięcie człowieka z jego tradycyjnej uprzywilejowanej pozycji w centrum Wszechświata. Poza tym przyjęcie ruchu Ziemi pociągało za sobą odrzucenie dobrze ugruntowanej fizyki Arystotelesa „miejsc naturalnych”. Dlaczego zatem Kopernik przedstawił teorię heliocentryczną? I przede wszystkim, dlaczego niektórzy jemu współcześni przyjęli tę teorię na długo przedtem, zanim została ona udowodniona. Odpowiedź na te pytania może stanowić fakt, iż nowa budowa Kosmosu oferowała, przynajmniej na dużą skalę, znacznie prostszy i bardziej racjonalny Wszechświat, pozbawiony absurdalności i trudności systemu Ptolemeusza.

Kopernik wierzył w istnienie sfer krystalicznych, spadek po tradycji greckiej i islamskiej. Najbardziej skomplikowane rozwiązania techniczne zastosowane przez Kopernika w celu wyjaśnienia nieregularności ruchów planetarnych miały również pochodzenie islamskie. Z tych powodów wielu historyków nauki uważa go za ostatniego astronoma starożytnego, a nie za pierwszego nowożytnego. Kopernik korzystał po prostu z wiedzy i przyrządów, które były dostępne w jego czasach (nie miał innej możliwości!) i jest autorem nowej teoretycznej syntezy, syntezy która rozpoczęła tak zwaną rewolucję w astronomii.

B1.1 – Mikołaj Kopernik

Mikołaj Kopernik, lub Koppernigk (Fig. 8), który zlatynizował swoje nazwisko do Nicolaus Copernicus, urodził się w 1473 r., w Toruniu, w Polsce. Kiedy miał 10 lat zmarł jego ojciec, Mikołaj trafił pod opiekę brata matki, Łukasza Watzenrode, późniejszego biskupa warmińskiego. W 1491 r. Kopernik wstąpił na Uniwersytet Jagielloński, znany z osiągnięć w nauczaniu matematyki i astronomii, a w 1496 r. wyjechał do Włoch. Tam wstąpił na Uniwersytet Boloński, gdzie uczył się na wykłady astronoma Domenico Maria z Nowary (1454-1504). W roku jubileuszowym 1500 Kopernik wyjechał do Rzymu, gdzie wygłosił publicznie wykład z matematyki i astronomii. Wiosną 1501 r. powrócił do Polski i objął urząd kanonika warmińskiego. Latem tego samego roku pojechał z powrotem do Włoch, na Uniwersytet w Padwie, a następnie na Uniwersytet w Ferrarze, gdzie w 1503 r. uzyskał doktorat z prawa kanonicznego. W następnym roku zamieszkał na zamku Lidzbarskim, gdzie pełnił funkcje osobistego sekretarza i lekarza swojego wuja, biskupa Łukasza. W 1509 r., Kopernik opublikował łaciński przekład listów poświęconych moralności, bizantyjskiego pisarza (VII n.e.). W 1512 r. ostatecznie osiedlił się we Fromborku, gdzie obserwował niebo ustawiając instrumenty na wypoziomowanej płycie (pavimentum) w ogrodzie swojej kanonii. Prawdopodobnie w tych latach Kopernik napisał niepublikowaną broszurę *Komentarzyk (Commentariolus)*, w którym wyjaśnił zasady systemu heliocentrycznego. Około 1525 r. napisał *Rozprawę o bicu monety (De monetae cudendae ratione)*. W 1540 r. uczeń Kopernika Joachim Retyk opublikował *Opowiadanie pierwsze (Narratio prima)*, krótką prezentację teorii mistrza. Kopernik zmarł 24 maja 1543 r., w tym też roku zostało opublikowane jego najważniejsze dzieło *O obrotach*

B1.2 – System kopernikowski

System heliocentryczny – nakreślony już przez Arystarcha z Samos (III n. e.) – opiera się na założeniu o nieruchomości i centralnym położeniu Słońca, dookoła którego krążą wszystkie planety. Wśród planet znajduje się również Ziemia, uważana do tej pory za nieruchomą, znajdująca się w środku Wszechświata. Poza tym Ziemia okrążając Słońce jednocześnie obraca się w ciągu 24 godzin wokół własnej osi. Jedynie Księżyc, zgodnie ze starożytną teorią geocentryczną, krąży wokół Ziemi (Fig. 9).

Poprzez “zdegradowanie” Ziemi do pozycji planety Kopernik zaproponował prostą i bardziej racjonalną budowę Wszechświata, w którym niewytłumaczalne „monstra” Kosmosu ptolemeuszowskiego zostały sprowadzone do roli pozorów.

W nowej budowie Wszechświata zjawiskiem pozornym jest dobowy ruch ciał niebieskich ze wschodu na zachód, spowodowany w rzeczywistości obrotem Ziemi wokół własnej osi w przeciwnym kierunku; pozorną jest również roczna droga Słońca po Zodiaku, spowodowana ruchem obiegowym Ziemi; pozorny jest wsteczny ruch planet po Zodiaku, spowodowany zestawieniem ich własnych ruchów wokół Słońca z ruchem obiegowym Ziemi (Fig. 10).

Jednakowe zachowanie sześciu planet, które poruszają się w tym samym kierunku wokół Słońca, w prosty sposób wyjaśniało zjawiska, dla których system ptolemeuszowski nie był w stanie znaleźć rozwiązania. Na przykład, dlaczego odległość kątowna od Słońca (elongacja) Wenus i Merkurego, przeciwieństwie do innych planet, nie przekracza wartości kąta prostego? W podejściu heliocentrycznym zjawisko to nie jest spowodowane wewnętrzną różnicą ich zachowań, lecz po prostu faktem, że orbity tych dwóch planet zawierają się w orbicie Ziemi.

Traktowany jako całość system Kopernika jest prosty i spójny. Mimo to w szczegółach technicznych jest równie skomplikowany, jak system Ptolemeusza lub nawet bardziej. Kopernik kurczowo trzymał się zasady jednostajności ruchów planet, która charakteryzowała wczesną astronomię grecką i którą Kopernik usilnie pragnął zachować. Aby tego dokonać, odrzucił ekwant, ptolemeuszowskie urządzenie kinematyczne, które w rzeczywistości, pogwałcało ideę jednostajności ruchów. Ponadto Kopernik wierzył w istnienie niektórych zjawisk – takich jak na przykład rzekoma niejednostajność precesyjnego ruchu punktów równonocy – całkowicie nieistniejąca, spowodowana jedynie błędami obserwacyjnymi jego poprzedników. Fakty te zmusiły Kopernika do wprowadzenia wielu dodatkowych kół. Dlatego w ostatecznej wersji systemu opisanej w *O obrotach* całkowita ich liczba będzie znacznie większa niż trzydzieści cztery koła, dzięki którym astronom optymistycznie zapowiedział w *Komentarzyku*, że będzie w stanie wyjaśnić zjawiska niebieskie.

Nieruchomość Słońca i ruch Ziemi stały w jawnej sprzeczności nie tylko ze zdrowym rozsądkiem, lecz również, co było kwestią znacznie bardziej poważną, z Pismem Świętym. W odniesieniu do tego problemu anonimowa przedmowa „Do czytelnika na temat hipotez niniejszego dzieła” *O obrotach*, napisana przez luterańskiego teologa Andreasa Osiandera (1498-1572), jest bardzo ważna. W tym krótkim utworze Osiander, kompletnie przekręca intencje autora, prezentując teorię heliocentryczną jako czysto matematyczną hipotezę, pomocną w „tłumaczeniu zjawisk”, nie mającą jednak żadnych cech rzeczywistego zjawiska fizycznego.

Taka instrumentalna interpretacja jest dowodem trudnych relacji pomiędzy kopernikanizmem a Chrześcijaństwem, tak w Kościołach Protestanckich jak i później w Kościele Katolickim.

B1.3 –Komentarzyk i Opowiadanie pierwsze

W 1877 r. Maksymilian Curtze odkrył w Cesarskiej Bibliotece w Wiedniu sześć stron manuskryptu zatytułowanego *Mikołaja Kopernika Komentarzyk o hipotezach ruchów ciał niebieskich* (*Nicolai Copernici de hypothesibus motuum caelestium a se constitutis commentariolus*). Kilka lat później inny egzemplarz *Komentarzyka* odkryto w Bibliotece Obserwatorium Astronomicznego w Sztokholmie, a w latach 70-tych XX wieku trzecią odnaleziono w szkockim Aberdeen. Żaden z tych egzemplarzy nie został napisany ręką Kopernika.

Komentarzyk jest pierwszym pisemnym świadectwem teorii Kopernika, pozbawionym „dowodów matematycznych”, zarezerwowanych dla większego dzieła. Broszura nie została opatrzona datą, dlatego niektórzy historycy astronomii uważali, że została napisana po *O obrotach*. Jednakże w latach 20-tych dwudziestego wieku Ludwik A. Birkenmajer odkrył pewien zapis w inwentarzu osobistej biblioteki Macieja z Miechowa (1457-1523), profesora Uniwersytetu Jagiellońskiego, który brzmiał: „Sześciostronicowy manuskrypt, którego autor twierdzi, że Ziemia porusza się, a Słońce jest nieruchome”. Nie ma wątpliwości, że wpis ten odnosi się do *Komentarzyka* Kopernika. Inwentarz opatrzony jest datą 1 maja 1514, dlatego broszura nie mogła zostać napisana po tej dacie (i prawdopodobnie nie przed rokiem 1507).

Możemy zakładać, że *Komentarzyk* nie miał dużego nakładu i otrzymali go jedynie najbliżsi przyjaciele Kopernika. Wiadomo, że w 1575 r. Tycho otrzymał jeden z egzemplarzy. W 1539 r., młody protestancki profesor z Uniwersytetu w Wittenberdze, który usłyszał o nowej teorii heliocentrycznej, przyjechał do Kopernika i został jego uczniem. Astronomem tym był Georg Joachim von Lauchen (1514-1574), który zlatinizował swoje nazwisko do „Rheticus”, które zostało zapożyczony przez niego od nazwy austriackiego regionu Raecji. Kilka miesięcy po swoim przyjeździe Reticus napisał krótki traktat – w formie listu do swojego nauczyciela i przyjaciela Johanna Schönera (1477-1547) – dotyczący niepublikowanego jeszcze wtedy dzieła *O obrotach*. Pozycja zatytułowana *Opowiadanie pierwsze* (*Narratio prima*) opublikowana została anonimowo w 1540 r. w Gdańsku.

Opowiadanie pierwsze okazało się takim sukcesem, że drugie wydanie, opatrzone już nazwiskiem autora, ukazało się w następnym roku w Bazylei, a trzecie jako dodatek do drugiej edycji *O obrotach* z 1566 r. (Fig. 11).

B1.4 – Cenzura *O obrotach*

Niezmiernie wrogi stosunek Marcina Lutera i Filipa Melanchthona do nowej kosmologii jeszcze przed opublikowaniem *O obrotach* nie jest reprezentatywnym przykładem przyjęcia idei Kopernika przez świat protestancki. Uniwersytety protestanckie zasadniczo przyjęły instrumentalną interpretację Osiandera i *O Obrotach* stało się ważnym podręcznikiem astronomicznym. Reakcja Kościoła Katolickiego była jednak znacznie bardziej represyjna. W marcu 1616 r. w rezultacie drugiego procesu Galileusza, Święta Kongregacja Indeksu (watykańskie ciało odpowiedzialne za cenzurę książek) wydała dekret umieszczający *O Obrotach* na liście ksiąg zakazanych „do czasu wprowadzenia poprawek” (*donec corrigatur*). „Do czasu wprowadzenia poprawek” było standardowym wyrażeniem i w praktyce oznaczało całkowity zakaz publikacji. Jednakże przypadek *O obrotach* był wyjątkowy. Głównie ze względu na swoją techniczną treść dzieło zostało jedynie okrojone. W 1620 r. Kongregacja Indeksu wydała kolejny dekret zatwierdzający poprawki konieczne do wprowadzenia w tekście książki.

Do czasów dzisiejszych przetrwało łącznie 500 egzemplarzy pierwszej i drugiej edycji (Norymberga 1543, Bazylea 1566), o których wiadomo, z czego około 400 znajduje się w Europie. Mimo, iż ich obecny rozkład geograficzny nie odpowiada rozkładowi z lat dwudziestych siedemnastego stulecia, w większości przypadków możliwe jest ustalenie ich pochodzenia. Interesującym faktem jest to, że podczas gdy jedynie 8% książek zostało ocenzurowanych zgodnie z dekretem z 1620 r., we Włoszech procent ten sięgnął 60%. Co dziwniejsze, żadna z książek znajdujących się w Hiszpanii i Portugalii, zdecydowanie katolickich krajach, nie została ocenzurowana.

Dekret cenzurujący książki, zawierające zapisy o ruchu Ziemi, został zniesiony dopiero w 1757 r., jednak pozycje wydrukowane wcześniej, w tym *O Obrotach* i galileuszowski *Dialog*, pozostały zakazane aż do 1835 r.

B2 – Nowe obserwacje i system geo-heliocentryczny

Historycy pomniejszają zwykle osiągnięcia naukowe Tychona. Wskazują na upodobanie tego astronoma do „astronomii praktycznej”. W rzeczywistości Tycho od czasu swojej młodości prowadził systematyczne obserwacje gwiazd i planet.

Nie opracowanie przez Tychona dobrze rozwiniętego systemu budowy Świata spowodowane zostało raczej zewnętrznymi okolicznościami, niż słabym zainteresowaniem astronoma tematem. Jego choroba i wczesna śmierć w Pradze położyła kres wszelkim opracowaniom modeli planetarnych, które astronom planował zawrzeć w nowym systemie budowy Świata. Mimo to osiągnięcia teoretyczne Tychona są imponujące. Zalicza się do nich przede wszystkim udoskonalenie tradycyjnych metod obserwacyjnych. Tycho ustalił również nadksiężycowe położenie zjawisk przejściowych, takich jak „nowe gwiazdy” i komety.

Innymi słowy Tycho podważył arystotelesowską koncepcję niezmienności i nieskazitelności nieba. Po drugie na podstawie faktu krążenia komet wokół Słońca i tego, iż minimalna odległość Marsa do Ziemi była czasami mniejsza niż odległość tej planety od Słońca, obalili tradycyjny pogląd, iż planety przenoszone są przez grupę sfer krystalicznych. Po trzecie Tycho i jego asystent Christen Sørensen Longberg (1562–1647), znany również jako Longomontanus, odnieśli sukces odkrywając i obliczając główne nieregularności ruchu Księżyca dookoła Ziemi.

B2.1 – Tycho Brahe

Tycho Brahe (Fig. 12) był z pochodzenia szlachcicem. Urodził się na zamku Knutstorp w Skanii (Dania, obecnie Szwecja) 14 grudnia 1546 r. W młodości Tycho studiował na Uniwersytetach w Kopenhadze, Lipsku, Wirtembergu i Bazylei. W 1572 r. zaobserwował nową gwiazdę, która pojawiła się w konstelacji Kasjopei i zdołał udowodnić jej nadksiężycową pozycję. W celu wykorzystania astronomicznych zdolności Tychona król Danii Fryderyk II (1534-1588) przyznał mu wyspę Hven w Øresund. Astronom zamieszkał na niej w 1576 r. i tam właśnie obserwował wielką kometa z 1577 r. Później udowodnił również, że kometa była ciałem niebieskim krążącym wokół Słońca.

Na Hven Tycho zbudował dwa obserwatoria astronomiczne: Uraniborg i Stjerneborg, ukończone odpowiednio w 1580 i 1584 r. (Fig. 13). Te dwa obserwatoria mieściły bardzo dokładne instrumenty,

systematycznie wykonywane i wykorzystywane przez Tycho i jego asystenta w obserwacjach astronomicznych planet i gwiazd. W 1597 r. astronom popadł w poważny konflikt z nowym duńskim królem Chrystianem IV (1577-1648) i opuścił Hven wraz ze swoimi współpracownikami zabierając przyrządy. Przyjechał do Pragi w 1599 r., gdzie Cesarz Rudolf II (1552-1612) uczynił go Cesarskim Matematykiem. W Pradze Tycho próbował dopracować swój nowy geo-heliocentryczny system budowy Świata, nie udało mu się jednak tego dokonać, zmarł 24 października, 1601 r.

B2.2 – Rola obserwacji astronomicznych

Zdaniem Tychona precyzyjne i systematyczne obserwacje były nieodzowne do zreformowania astronomii. Skoncentrował swoje wysiłki na pomiarach paralaks i współrzędnych ciał niebieskich.

Stereoskopowy wzrok człowieka może być przykładem pomocnym w zrozumieniu, czym jest paralaksa. Obserwacji obiektu znajdującego się w niewielkiej odległości od obserwatora towarzyszy duży efekt paralaksy. Gdy zamykamy na przemian raz lewe raz prawe oko, obiekt przemieszcza się wyraźnie na tle dalszych przedmiotów. Natomiast obserwacja obiektu znajdującego się w dalekiej odległości od obserwatora obarczona jest słabym lub zerowym efektem paralaksy. W tym przypadku przesunięcie obiektu jest niezauważalne. Wartość przesunięcia jest proporcjonalna do kąta utworzonego przy obiekcie przez linie proste poprowadzone od oczu obserwatora, jest to kąt paralaksy. Kąt ten jest znaczny przy obserwacji obiektów znajdujących się w bliskiej odległości, natomiast niewielki przy obserwacji obiektów dalekich.

Tycho jako pierwszy ustalił wartość paralaksy dla nowej gwiazdy z 1572 r. Ponieważ, jak wierzyli filozofowie arystotelesowscy, wszystkie zjawiska przejściowe miały przyczyny meteorologiczne, paralaksa nowej gwiazdy powinna być większa od paralaksy księżyca. Stosując duży instrument z opactwa Herrevard, Tycho ustalił położenie nowej gwiazdy, kiedy pojawiała się w różnych miejscach horyzontu. Pozycja nowej gwiazdy względem jasnych gwiazd Kasjopei nie zmieniła się, dlatego paralaksa nowej gwiazdy była mało znacząca. W swojej broszurze *O nowej gwiazdzie (De stella nova, 1573)* Tycho twierdził, wbrew zwolennikom teorii Arystotelesa, że obserwowane zjawisko przejściowe było bardzo odległe od Ziemi. Nowa gwiazda znajdowała się prawdopodobnie w sferze gwiazd stałych

Gdy w 1577 r. na niebie pojawiła się jasna kometa, Tycho próbował po raz drugi ustalić paralaksę. Jednak kometa przesuwała się dzień po dniu względem gwiazd, w związku z czym prowadzenie pomiarów było niezmiernie trudne. Przetworzenie danych zajęło astronomowi około jedenastu lat. Ostatecznie udowodnił, że paralaksa komety była minimalna. Znowu, podobnie jak w przypadku nowej gwiazdy, filozofowie arystotelesowscy byli w błędzie. W swojej książce *O najnowszych zjawiskach świata niebieskiego (De Mundi aetherei recentioribus phaenomenis, 1588)* Tycho pisze, że kometa nie jest fenomenem meteorologicznym oraz, że znajduje się powyżej Księżyca i, co więcej, obiega ona Słońce po kołowej orbicie (Fig. 14).

W końcu w 1582 r. Tycho zmierzył paralaksę Marsa. Ustalił, że paralaksa tej planety bywa czasem mniejsza od paralaksy Słońca. Ponieważ w ptolemeuszowskiej budowie Świata Mars znajdował się zawsze powyżej Słońca, Tycho nabrał pewności, że klasyczny system geocentryczny był błędny. Astronom nie przejmował się tym, że twierdzenie to opierało się na niepewnych założeniach. W rzeczywistości paralaksy Słońca i Marsa były niemierzalne nawet przy zastosowaniu najbardziej zaawansowanych w tym czasie instrumentów obserwatorium Uraniborg.

W 1590 r., umieściwszy swoje instrumenty w podziemnym obserwatorium Stjerneborg, Tycho zaczął przeprowadzać gruntowne pomiary nieba. Wraz ze swoimi asystentami mierzył współrzędne gwiazd i planet z dokładnością, której astronomia "gołego oka" nigdy wcześniej nie osiągnęła. Opuszczenie przez Tychona wyspy Hven w 1597 r. wiązało się z przerwaniem jego pracy. Mimo to w 1598 r. zdołał przedstawić zebrane uprzednio dane w katalogu 1004 gwiazd. Tycho spodziewał się, że ten niezmiernie precyzyjny katalog zastąpi katalog 1025 gwiazd przedstawiony przez Ptolemeusza w jego *Almageście*.

W 1598 r., oczekując na przyjęcie w Pradze, astronom przesłał cesarzowi Rudolfowi II kopię manuskryptową nowego katalogu gwiazdnego wraz z cenną drukowaną książką *Mechanika odnowionej astronomii (Astronomiae instauratae mechanica)*. Książka opisywała obserwacje i instrumenty Tychona i stanowi najważniejsze źródło wiedzy na ten temat, które przetrwało do naszych czasów. Budynki Uraniborga i Stjerneborga zostały zniszczone w XVII wieku w celu odzyskania materiałów budowlanych. Natomiast astronomiczne instrumenty obserwacyjne zaginęły w Pradze w czasie Wojny Trzydziestoletniej.

B2.3 – Geo-heliocentryczny system Tychona

Teoretyczne zainteresowania Tychona sięgały poza ustalenie odległości zjawisk przejściowych od Ziemi. Gdy w 1572 r. ustalił, że nowa gwiazda była zjawiskiem nadksiężycowym, udowodnił tym samym, że zmienność nie jest czymś nadzwyczajnym na niebie. Analogiczne ustalenie nadksiężycowości komety z 1577 r. dodało jeszcze więcej dowodów do tej niebieskiej zmienności. Ponadto, krążąc wokół Słońca, kometa musiała przechodzić przez niektóre sfery niebieskie ptolemeuszowskiego systemu budowy Świata: zwłaszcza przez sfery Wenus i Marsa. Fakt ten podważył istnienie sfer tych planet, a także istnienie sfer krystalicznych jako takich. Jednak istnienie kul nie miało większego znaczenia w modyfikacji ptolemeuszowskich modeli planetarnych.

Ponieważ Tycho był dobrze zaznajomiony z teorią budowy Świata Kopernika, zdawał sobie sprawę z wielkiej różnicy pomiędzy systemem heliocentrycznym a geocentrycznym. W systemie Ptolemeusza planety były ułożone jedna na drugiej, począwszy od Ziemi. Epicykl Marsa znajdował się zawsze pomiędzy sferami Słońca i Jowisza. Z tego powodu Mars, znajdując się zawsze nad Słońcem, miał zawsze mniejszą paralaksę niż Słońce. W systemie kopernikowskim odwrotnie, planety były ułożone jedna nad drugą począwszy od Słońca. Mars krążył pomiędzy sferami Ziemi i Jowisza. Dlatego też, kiedy Mars i Ziemia znajdowały się po przeciwnych stronach Słońca (tj. Mars ukazywał się w koniunkcji ze Słońcem), Słońce znajdowało się bliżej Ziemi niż Mars. Natomiast gdy Mars i Ziemia były po tej samej stronie Słońca (tj. Mars ukazywał się w opozycji do Słońca), Mars był bliżej Ziemi niż Słońce. Oznaczało to, że paralaksa Marsa powinna być odpowiednio mniejsza i większa niż paralaksa Słońca.

Gdy w 1582 r. Tycho zmierzył paralaksę Marsa, stwierdził, że jest ona większa od paralaksy Słońca. Myślał, że zebrał dowody na to, że planeta znajdująca się w opozycji do Słońca znajdowała się bliżej Ziemi niż samego Słońca. To sugerowało, że geocentryczny system Ptolemeusza był jednoznacznie błędny. Czy jednak teoria Kopernika mogła być prawdziwa? Tycho myślał, że nie, ponieważ Kopernik również musiał się mylić. Astronom był przekonany, że Ziemia nie porusza się. Zgadzaając się z dynamiką Arystotelesa, Tycho podejrzewał, że ruch Ziemi powinien być łatwy do zaobserwowania. Przykładowo ciężarek spuszczonej ze szczytu wieży powinien uderzyć w zachodnią podstawę tej budowli. Jako, że ciężarek spadał dokładnie na środku podstawy wieży, Ziemia musiała być nieruchoma.

Ta fizyczna konkluzja była zgodna z religijnymi wierzeniami Tychona. Jeżeli Ziemia poruszałaby się, wtedy Pismo Święte powinno przekazywać coś innego. Jahwe zatrzymałby Ziemię, a nie Słońce, a trzeciego dnia Jezus, idąc do Słońca, nie „wstąpiłby”, lecz „zstąpiłby” na niebiosa. W swoim liście do Christophera Rothmann'a (1550 - ok. 1608) Tycho nazwał wszystkie te sentencje teologicznymi absurdami. Z tego powodu opracował on nowy system budowy Świata, odmienny od ptolemeuszowskiego i kopernikowskiego. System ten powinien być zgodny ze wszystkimi obserwacyjnymi, fizycznymi i religijnymi dowodami, którymi dysponował Tycho. W nowym systemie nieruchoma Ziemia znajdowała się w centrum Świata. Księżyc i Słońce, jedyne dwa ciała niebieskie, które nie wykazywały wstecznych ruchów po Zodiaku, dopełniały swego obiegu dookoła Ziemi. Pozostałe znane planety – Merkury, Wenus, Mars, Jowisz i Saturn – krążyły dookoła Słońca (Fig. 15).

System ten był zarówno zgodny z fizyką arystotelesowską jak i z Biblią. Ponadto był również zgodny z rzekomo wyznaczoną przez Tychona paralaksą Marsa. Rzeczywiście, w tak zwanym tychowskim systemie budowy Świata – tak jak w przypadku systemu kopernikowskiego – Mars mógł znajdować raz bliżej raz dalej od Słońca.

B3 – Teleskop i prawdziwa budowa Świata

Zainteresowania Galileusza rozciągały się niemal na wszystkie dziedziny wiedzy naukowej. Uczony od swojej młodości, zajmował się w szczególności badaniem ciał znajdujących się w równowadze, w ruchu oraz sił odpowiedzialnych zarówno za stan równowagi jak i za ruch. Ostatnia książka Galileusza poświęcona temu tematowi, *Dialogi i dowodzenia matematyczne* (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638), była najważniejszym dziełem w jego życiu. Dała początek klasycznej dynamice.

Astronomiczna aktywność Galileusza miała nieco inne szczególne znaczenie. Nie opracował on ani nowego systemu budowy Świata, ani nowego obliczeniowego modelu planetarnego. Z koncepcyjnego punktu widzenia potwierdzał po prostu doktrynę kopernikowską prezentowaną w *O obrotach*. Pierwsza próba zastosowania dynamiki galileuszowskiej do ciał niebieskich powinna zostać przypisana nie Galileuszowi, lecz

Giovanniemu Alfonso Borelliemu (1608-1679). Jednak zastosowanie nowego narzędzia astronomicznego – teleskopu – dało Galileuszowi możliwość zebrania nowych dowodów, potwierdzających prawdziwość heliocentrycznej teorii budowy Świata. Kierując udoskonalony teleskop na niebo, uczyony dodał nowe znaczenie do słowa „obserwacje”. Tradycyjne precyzyjne pomiary wartości kątowych zostały „otoczone” obserwacjami fizycznego aspektu ciał niebieskich. Oskarżenie Galileusza przez Kościół, proces i potępienie za heretycką obronę fizycznej rzeczywistości systemu kopernikowskiego, nie powstrzymało rozwoju nowej gałęzi obserwacji.

B3.1 – Galileo Galilei

Galileo Galilei – Galileusz - (Fig.16) urodził się w 15 lutego 1564 r. w Pizie. Porzucił studia medyczne na Uniwersytecie w Pizie i poświęcił swoje życie matematyce. Uzyskawszy znaczne uznanie w tej dziedzinie wiedzy w latach 1589-1592 kierował Katedrą Matematyki na Uniwersytecie w Pizie. Następnie wyjechał do Padwy, gdzie został „lektorem matematyki”.

Przez krótki okres jego zainteresowanie astronomią ograniczało się do całkowitego popierania teorii Kopernika. Galileusz zajmował się również mechaniką, hydrostatyką i magnetyzmem, zaprojektował i wykonał kilka nowych instrumentów naukowych.

W swoim *Gwiazdnym Posłańcu* (*Sidereus nuncius*, 1610) opisywał zadziwiające odkrycia astronomiczne, których dokonał przy pomocy teleskopu w latach 1609-1610. Dzięki tej broszurze astronom uzyskał patronat Wielkiego Księcia Toskanii, Cosimo II de' Medici (1590-1621). W 1610 r. Wielki Książę mianował Galileusza nadwornym filozofem i matematykiem i wezwał go do Florencji. Nowe odkrycia astronomiczne dokonywane przez uczonego do roku 1613 sprawiły, że zrozumiał on, iż system przedstawiony przez Kopernika był prawdziwy. Jednakże opinie wyrażane publicznie przez Galileusza na temat teorii Kopernika podejrzewane były o herezję. Na skutek tego w 1616 r. kardynał Roberto Bellarmino (1542-1621) ostrzegł go, aby nie bronił publicznie poglądów Kopernika, jednoznacznie wrogich ortodoksom biblijnym. Niestety w 1632 r. Galileusz zdecydował, że nadszedł czas na opublikowanie *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowskim i kopernikowskim*. Po tym wydarzeniu został wezwany do Rzymu w celu stawienia się przed Inkwizycją. Proces zakończył się w 1633 r. potępieniem Galileusza i odwołaniem przez niego wcześniejszych stwierdzeń.

Astronom został skazany na dożywotni areszt domowy w Arcetri, w pobliżu Florencji. Ostatnie lata życia spędził na opracowywaniu podstaw mechaniki. Wyniki swojej pracy opublikował w *Dialogach i dowodzeniach matematycznych*. Zmarł w Arcetri 8 stycznia 1642 r.

B3.2 – Odkrycia niebieskie

O dziwnym instrumencie wykonanym przez pewnego flamandzkiego optyka Galileusz usłyszał prawdopodobnie w 1608 r. Dwie szklane soczewki przymocowane były na końcach kartonowej rury. Optyczną właściwością pierwszej z soczewek było skupianie równoległych promieni świetlnych w jednym punkcie, co obecnie nazywamy właśnie skupianiem. Druga soczewka miała dokładnie odwrotną właściwość, sprawiała, że równoległe promienie światła rozpraszają się.

Zestawienie takich dwóch soczewek we flamandzkich instrumentach pozwalało na uzyskanie maksymalnie trzykrotnego powiększenia dalekich obiektów. Galileusz doświadczalnie udoskonalił przyrząd, stosując w nim dobrze wypolerowane soczewki. Różnicując charakterystyki geometryczne soczewek skupiających obiektyw i rozpraszających soczewek okularu w 1609 r. zbudował instrument o około trzydziestokrotnym powiększeniu. Galileusz kierował swój teleskop nie tylko na dalekie obiekty ziemskie, lecz również na ciała niebieskie. Niezwykłe zastosowanie instrumentu odkryło nowe aspekty Świata pozaziemskiego (Fig. 17).

W swoim *Gwiazdnym posłańcu* Galileusz opisuje niesamowite odkrycia astronomiczne, dokonane w latach 1609-1610 za pomocą instrumentu zwanego teleskopem. Pierwsze z nich: gwiazdy widoczne stanowią jedynie niewielką część wszystkich istniejących gwiazd. W szczególności Droga Mleczna nie jest wyjątkową masą chmur, a są to niezliczone słabo świecące gwiazdy, niewidoczne dla „gołego oka”. Drugie: Księżyc nie jest idealnie okrągłym ciałem, jest podobny do Ziemi, znajdują się na nim wielkie płaskie obszary, które graniczą z wysokimi łańcuchami górskimi (Fig. 18). Trzecie: istnieją cztery słabo świecące gwiazdy podążające za planetą Jowisz w jej biegu po Zodiaku. Gwiazdy te krążą wokół tej planety, a czas jednego obiegu po orbicie jest dla

każdej z nich inny. Galileusz nazwał je „gwiazdami medycejskimi” na cześć Wielkiego Księcia Toskanii, Cosimo II de’ Medici.

W latach 1610-1611 Galileusz dokonał kolejnych odkryć. Czwarte: podobnie jak Księżyc Słońce nie jest „grzecznym” okrągłym ciałem. Jego powierzchnia jest miejscowo pokryta pewną liczbą zmieniających się ciemnych plam, być może chmurami unoszącymi się nad jasnym gruntem. Piąte: wygląd planety Saturn jest bardzo dziwny. Nie ma ona pojedynczej, lecz potrójną bryłę planetarną z dwoma dziwnymi zgrubieniami po przeciwnych stronach centralnej części kulistej. Galileusz nie był w stanie wyjaśnić czym są owe zgrubienia. Szóste: Planeta Wenus jest bardzo podobna do Księżyca, przechodzi kompletną serię faz. Czasem planeta widoczna jest w pełni, czasem widać ją na w pół oświetloną, innym razem widoczny jest jedynie wąski półksiężyc.

Galileusz zaprezentował teleskop i swoje odkrycia Senatowi Weneckiemu, Dworowi Medycejskiemu oraz Jezuitom z Kolegium Rzymskiego. Podarował też bardzo wiele teleskopów szlachcie i ludziom zamożnym we Włoszech i za granicą. Ponadto po wydaniu *Gwiezdnego posłańca* Galileusz wyjaśnił naturę odkryć niebieskich w innych publikacjach, na przykład w *Opisie i Demonstracjach Plam Słonecznych i ich zmianach* (*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*, 1613). W odkrycia te było bardzo trudno uwierzyć, Galileusz musiał często przekonywać sceptyków, że soczewki teleskopu nie wywołują halucynacji. W 1611 r. test teleskopu przekonał jezuitę Christofera Schüssel’a (1537–1612), znanego również jako Clavius, o prawdziwości odkryć Galileusza. Stało się oczywiste, że potrzebne jest przeprowadzenie rewizji ptolemeuszowskiej budowy Świata.

B3.3 – System Jowisza i wyznaczanie długości geograficznej

Po dziesięciu latach uważnych obserwacji Galileusz był w stanie precyzyjnie ustalić promienie orbitalne i okresy obiegu czterech gwiazd medycejskich. Sukces ten astronom zawdzięcza trzem specjalnie przez siebie skonstruowanym narzędziom obserwacyjnym i matematycznym. Inni astronomowie nie potrafili uzupełnić teleskopu podobnymi narzędziami. Z tego powodu Jan Kepler (1571-1630) i Nicolas Claude Fabri de Peiresc (1580-1637) uznali za niemożliwe ustalenie elementów orbit gwiazd medycejskich.

Galileusz skonstruował przede wszystkim tak zwany „mikrometr”, tj. wyskalowaną linijkę wystającą z rury teleskopu i przesuwaną wzdłuż niej. Gdy patrzył jednocześnie przez teleskop i na mikrometr, ten drugi optycznie nakładał się na system Jowisza. Dlatego też Galileusz był w stanie zmierzyć względną odległość każdej gwiazdy medycejskiej od Jowisza. Po drugie Galileusz nakreślił mapę polarną systemu Jowisza. Wykorzystując ową mapę, zwaną „jowilabium”, ustalał pozycję orbitalną gwiazdy medycejskiej mierząc, po prostu jej względną odległość od planety. Po trzecie, Galileusz nakreślił jeszcze jedną mapę polarną, mapę polarną Układu Słonecznego, przedstawiającą heliocentryczne orbity Ziemi i Jowisza. Przy pomocy tej mapy astronom ustalił inkreментy/dekrementy, które należało uwzględnić przy ustalaniu heliocentrycznej pozycji orbitalnej gwiazd medycejskich niezależnie od pozycji Ziemi na jej orbicie (Fig. 19).

Powód, dla którego Galileusz tak gorliwie zajmował się tym problemem, miał częściowo naukowy częściowo praktyczny charakter. W ciągu kilku lat od odkrycia Galileusz wpadł na pomysł, iż gwiazdy medycejskie mogą pomóc rozwiązać znany od starożytności problem określania długości geograficznej miejsc na Ziemi. Od 1612 r. uczony rozpoczął przesyłanie Dworowi Hiszpańskiemu, za pośrednictwem Sekretarza Majątku Wielkiego Księcia Toskanii, raportów o astronomicznej metodzie wyznaczania długości geograficznej w czasie żeglugi. Gwiazdy medycejskie miały wypełnić brak długo działających dokładnych zegarów mechanicznych, nieodzownych dla ustalenia różnicy długości geograficznej dwóch miejsc. Ponieważ gwiazdy te krążyły ruchem jednostajnym wokół Jowisza, można je było uznać za niezmiernie dokładny zegar niebieski.

Stanowisko dworu hiszpańskiego było bardzo sceptyczne, astronom nie otrzymał żądanej jednoznacznej odpowiedzi. Dlatego też, nie czując się zobowiązanym do czegokolwiek, w 1636 r. wysunął ponownie propozycję holenderskim: Kompanii Handlowej i Generalnym Posiadłościom, które wyznaczyły nagrodę w wysokości 30 000 złotych eskudo za opracowanie metody wyznaczania długości geograficznej podczas żeglugi.

Projekt Galileusza zakładał, że każdy statek musi być wyposażony w pomost równoważący. Obserwator musiałby na nim stać, mając na sobie specjalny wysuwany hełm. Wówczas byłby, odizolowany od rzucania i kołysania statku, obserwowałby gwiazdy medycejskie przez teleskop, wypatrując ich wzajemnych koniunkcji lub zaćmień. Czasy takich astronomicznych zdarzeń mogły być z łatwością uprzednio obliczone i zapisane w tabelach.. Różnica pomiędzy czasem lokalnym a czasem zawartym w tabeli byłaby mierzona specjalnym

zegarem wahadłowym skonstruowanym przez Galileusza. Proporcja pomiędzy różnicą czasu a różnicą długości geograficznej dawałaby pożądaną wynik.

Podobnie jak dwór hiszpański Holenderskie Posiadłości Generalne oceniły tę propozycję sceptycznie. Dlatego w 1639 r. Galileusz ciągle czekał na odpowiedź. W praktyce, pomimo innowacyjności pomysłu Galileusza, wyznaczanie długości geograficznej podczas żeglugi musiało poczekać na skonstruowanie przez Johna Harrisona (1693-1776) chronometrów morskich.

B3.4 – Galileusz a system Kopernika

Nie wszystkie odkrycia astronomiczne Galileusza miały taki sam wpływ na debatę na temat prawdziwej budowy Świata. Z jednej strony teoria „ziemskiego” charakteru Księżyca i Słońca „zmagala się” z doktryną niezmienności nieba. Z drugiej strony gwiazdy medycejskie potwierdziły istnienie ciał krążących wokół planet, podobnie jak Księżyc okrążający Ziemię. Pomimo to żadne z tych odkryć nie stanowiło jednoznacznego potwierdzenia geocentrycznej lub heliocentrycznej budowy Świata. Odkrycie faz Wenus utwierdziło Galileusza w przekonaniu o słuszności teorii Kopernika.

Galileusz rozpoczął teleskopowe obserwacje Wenus w 1610 r. Planeta obserwowana wieczorem, po koniunkcji ze Słońcem, widoczna była w pełni. Jednak, gdy osiągnęła maksymalną pozorną odległość od Słońca, była oświetlona tylko w połowie. Następnie, gdy Wenus ponownie zbliżała się do Słońca, wyglądała jak cienki półksiężyc. Sekwencja tych faz odwracała się, kiedy planeta pojawiała się rano przed wschodem słońca.

Obserwacje te stały w sprzeczności z klasyczną geocentryczną budową Świata. W systemie Ptolemeusza, Wenus poruszała się po epicyklu, którego środek znajdował się na prostej łączącej Ziemię ze Słońcem. Ponadto epicykl Wenus znajdował się zawsze poniżej Słońca. W takim geometrycznym układzie planeta musiałaby być zawsze widoczna pod światło, a w takiej sytuacji musiałaby wyglądać jak bardzo cienki półksiężyc. Przeciwnie, kompletna seria faz obserwowana przez teleskop, była w zgodzie z obiegiem Wenus wokół Słońca (Fig. 20).

Fazy Wenus były dowodowym argumentem obserwacyjnym mocniej użytym przez Galileusza w 1632 r. w obronie systemu kopernikowskiego niż cztery gwiazdy medycejskie. Niezmiernie ciekawą rzeczą jest, iż pomimo tytułu swojej książki *Dialog o dwu najważniejszych układach świata*, Galileusz opisuje jedynie systemy Ptolemeusza i Kopernika (Fig. 21). Ponieważ w systemie geo-heliocentrycznym wszystkie planety krążyły wokół Słońca, opisywanie faz Wenus nie byłoby użyteczne dla wyjaśnienia różnic pomiędzy systemami Kopernika i Tychona. Galileusz był dobrze zaznajomiony z pracami Tychona i problemami naukowymi, które mogłyby spowodować ich przywołanie. Dlatego też celem lepszej obrony teorii Kopernika, nigdy nie wspominał o systemie geo-heliocentrycznym w swoim *Dialogu*.

Galileusz załagodził religijny konflikt wyłaniający się pomiędzy zapisami biblijnymi a kopernikowską kosmologią, przyjmując stanowisko jednego ze swoich przyjaciół księdza Paolo Sarpi (1552-1623). Zdaniem Galileusza i Sarpiego Pismo Święte po prostu uczy ludzi „jak dostać się do nieba, a nie jak niebo działa”. W 1616 r. ta teologiczna interpretacja oraz obrona teorii Kopernika sprawiła, że Galileusz dostał ostrzeżenie od kardynała Bellarmino. W 1632 r. zlekceważenie tego ostrzeżenia przez astronoma, które stanowił druk *Dialogu*, spowodowało postawienie go przed Inkwizycją.

Papieża Urbana VIII (1568-1644) rozwścieczyło nie tylko rozumowanie, lecz również polemiczna forma *Dialogu*. Rzeczywiście Galileusz zaprezentował nowe podejście do problemów fizycznych wyjątkowo uszczypliwie i ironicznie w stosunku do filozofów arystotelesowskich scholastycznych.

W *Dialogu* Galileusz stworzył postać Simplicio, głupiego rozmówcy Salviatiego i Sagredo, który miał reprezentować ów prąd filozoficzny. Niestety Urban VIII, podobnie jak cały Kościół katolicki, był fundamentalnie arystotelesowski.

C – Nowa fizyka Świata

Kopernik i Tycho badali jedynie pobieżnie fizyczne aspekty ruchów planet. Z jednej strony zainteresowanie astronomów fizyką było z początku motywowane chęcią udowodnienia ruchu bądź nieruchomości Ziemi. Z drugiej strony zmiana punktu widzenia postulowana przez Kopernika w *O obrotach* — tj. od geocentryzmu do heliocentryzmu — sprawiła, że konieczna stała się rewizja fizyki nieba. Obok Kopernika i Tychona wyznawcą starej doktryny astronomicznej był jeden z ojców nowożytnej fizyki, Galileusz. Starożytni wierzyli, że planety okrążają ruchem jednostajnym nieruchomą Ziemię po kolistych orbitach. Sposób myślenia Galileusza był podobny, wierzył on, że planety wraz z Ziemią poruszały się po kolistych orbitach wokół nieruchomego Słońca (Fig. 22).

Zmiana starego punktu widzenia przebiegała w szczególny sposób – było to poszukiwanie tajemniczej ukrytej istoty Kosmosu. Jan Kepler, zanim został jednym z błyskotliwych asystentów Tychona, zdążył już wydać na ten temat książkę. W *Tajemnicy kosmosu (Mysterium Cosmographicum)* wysunął hipotezę, iż wielościany foremne stanowią klucz do zrozumienia kopernikowskiego systemu Świata. W czasie aktu Stworzenia Bóg wykorzystał wielościany foremne do ustalenia wzajemnych odległości sfer niebieskich. Jednakże istniało jedynie pięć regularnych wielościanów: czworościan, sześciąt, ośmiościan, dwunastościan i dwudziestościan. Dlatego też Bóg rozmieścił wokół Słońca jedynie sześć sfer planetarnych – dedukował Kepler.

Podobne teorie zawsze stanowiły silne źródło inspiracji. Po śmierci Tychona Kepler rozpoczął analizę jego danych obserwacyjnych, aby znaleźć bardziej satysfakcjonujące wytłumaczenie budowy Wszechświata. Analizie tych danych Kepler poświęcił wiele lat, po których odkrył trzy prawa geometryczne rządzące ruchami planet. W wyniku odkrycia Keplera tradycyjna doktryna kolistości i jednostajności ruchów niebieskich została obalona. Trzy nowe prawa planetarne wiązały się z nowym problemem, w jaki sposób mogą powstawać eliptyczne i niejednostajne ruchy, obserwowane u planet? Kepler wysunął wiele propozycji w celu wytłumaczenia tej fizycznej tajemnicy, skrywanej przez trzy prawa ruchu planet. Prawdopodobnie ruchy planet mogły być powodowane przez światło słoneczne lub siłę magnetyczną, odpowiedzialną również za harmonię muzyczną.

Ciągłe poszukiwanie fizycznej istoty Wszechświata ograniczyło interpretacyjny potencjał Keplera. Dlatego też na pytania, które pozostawały otwarte, odpowiedzi musiał udzielić inny wybitny filozof naturalny czy, jak kto woli, „naukowiec”. Działalność Izaaka Newtona (1642-1727) niemal idealnie dzieliła się pomiędzy astronomię, fizykę, matematyką, filozofię, alchemię, teologię i historię. Szeroki zakres zainteresowań sprawił, że Newton połączył ziemskie zjawiska, takie jak jabłko spadające z drzewa, ze zjawiskami astronomicznymi, takimi jak niekończące się „spadanie” Księżyca na Ziemię. To ujednoczenie fizyki ziemskiej i niebieskiej, podjęte przez Galileusza jedynie częściowo, umożliwiło Newtonowi ogłoszenie prawa grawitacji. Za ruch planet nie było odpowiedzialne ani światło słoneczne, ani siła magnetyczna. Powszechna zasada, iż każda materia oddziałuje na inną materię siłami przyciągania, stanowiła idealne wyjaśnienie faktu, że planety poruszają się zgodnie z prawami Keplera. Rzeczywiście fakt ten był geometryczną konsekwencją prawa grawitacji i trzech ziemskich praw dynamiki, opisanych przez Newtona w *Matematycznych zasadach filozofii przyrody (Philosophiae naturalis principia mathematica)*.

W krótkim czasie fizyka Newtona stała się nieodzowna do rozwiązania wielu klasycznych problemów: przede wszystkim, dla ustalania i przewidywania rzeczywistej drogi planet wokół Słońca. Jednakże rozwinięcie fizyki Newtona w „mechanice nieba” stało się koncepcyjnym narzędziem rozwiązywania wielu nowych problemów astronomicznych. Czasami problemy te przynosiły nieoczekiwane rezultaty, takie jak odkrycie planet: Neptuna (1846) i Plutona (1930). W ten sposób została wytyczona droga do zrozumienia budowy i przyszłej ewolucji Wszechświata.

C1 – Prawa, siły i harmonia Kosmosu

Historycy nauki często zwracają uwagę na mistycyzm Keplera, zarówno pitagorejski jak i chrześcijański. Nie jest to jednakże jedyna cecha wyróżniająca sposób myślenia Keplera. Astronom był mocno

przekonany, iż to Wszechmogący stworzył świat według określonego planu architektonicznego, opartego na zasadach matematycznych, które człowiek jest w stanie poznać i zrozumieć. Wiara ta skłoniła Keplera do poszukiwania przyczyn, dla których liczba planet była równa sześć. Próbował on także odnieść ich odległości od Słońca do pięciu geometrycznych brył foremnych (Fig. 23). Mimo wszystko, wyczerpujące obliczenia i niezliczone nieudane próby, dzięki którym Keplerowi udało się rozwiązać zagadkę ruchu Marsa, świadczą o tym, że przykładał on wielką wagę do obserwacji. Jan Kepler nie był jednakże astronomem praktycznym i wykorzystywał ogromną ilość obserwacji wykonanych przez Tychona, którego był asystentem. Dla Keplera teoria była prawdziwa jedynie wtedy, gdy w pełni zgadzała się z danymi obserwacyjnymi; w przeciwnym wypadku musiała zostać odrzucona i zastąpiona nową. W swoich niezliczonych modelach, za pomocą których próbował wytłumaczyć ruch Marsa, wielokrotnie redukowałam założenia teoretyczne do minimum, pozwalając, aby obserwacje „przemówiły”. Gdy Kepler zrozumiał wreszcie, że ruch Marsa można wyjaśnić jedynie przyznając, że jego orbita nie jest kolistą, nie zawahał się porzucić najświętszego aksjomatu tradycyjnej astronomii.

C1.1 – Jan Kepler

Jan Kepler (Fig. 24) urodził się 16 maja 1571 r. w Weil der Stadt, w Wirttembergii. Był osobą skromną, jego ojciec był żołnierzem najemnym, a matka niepiśmienną córką gospodarza. Wątki i chorowity rozpoczął karierę w Kościele, dzięki stypendium studiował na Uniwersytecie w Tybindze. Tam znany astronom Michael Mästlin (1550-1631) zapoznał go z teorią Kopernika, której Kepler stał się gorącym zwolennikiem. W 1594 r. przeniósł się do Grazu, aby objąć posadę Matematyka regionu Styria i profesora w lokalnej szkole protestanckiej. W 1596 r. opublikował *Tajemnicę Kosmosu*, w której próbował powiązać sfery planetarne z pięcioma geometrycznymi bryłami foremnymi. Z powodu kontrreformacji Kepler musiał opuścić Graz wraz ze swoją żoną Barbarą Müller, którą poślubił w 1597 r. Schronienie znalazł na Węgrzech, skąd po czasie wrócił do Grazu, nie przyjmując jednakże z powrotem wiary katolickiej. W 1600 r. astronom wyjechał do Tychona, na zamek Benátky w pobliżu Pragi. W następnym roku Tycho mianował Keplera swoim asystentem, po tym jak jego dotychczasowy asystent i uczeń Longomontanus wyjechał studiować na Uniwersytecie kopenhaskim. Gdy Tycho zmarł, Kepler zastąpił go na stanowisku Matematyka Cesarskiego. W 1611 r. zmarł siedmioletni syn Keplera, a później jego żona. W tym samym roku katolicki cesarz Rudolf II abdykował na rzecz swojego brata Macieja, który w przeciwieństwie do Rudolfa nie tolerował protestantów. Z tego powodu Kepler musiał opuścić Pragę. W 1612 r. został mianowany oficjalnym Matematykiem w Linz (obecnie w Austrii), a w następnym roku poślubił Susanne Reuttinger. W 1615 r. matka Keplera została oskarżona o czary. Astronom wyjechał z Linzu w 1626 r. do Ulm, a następnie w 1628 r., na zaproszenie hrabiego Albrechta von Wallenstein, osiadł w Żaganii. W 1630 r. Kepler wyjechał do Regensburga (Ratyzbony) w Bawarii, domagając się wypłaty zysków z druku swoich *Tablic rudolfskich* (Fig. 25). Tam też zmarł w październiku tego samego roku.

C1.2 – Trzy prawa ruchu planet

Od przybycia na zamek Benátky Kepler pracował nad stworzeniem teorii Marsa, co zajęło mu pięć lat (mimo, iż większą część 1603 r. poświęcił fizyce). Tycho i Longomontanus opracowali wspólnie model ruchu Marsa, który sprawdzał się bardzo dobrze jeżeli chodzi o pozycję w długości, ale gorzej jeżeli chodzi o szerokość. W celu rozwiązania tego problemu Kepler wprowadził ponownie ptolemeuszowski ekwant. Postanowił jednakże nie umieszczać środka koła orbitalnego planety dokładnie w połowie drogi pomiędzy Słońcem a ekwantem (tak zwane „przepełnienie mimośrodu”), zamiast tego postanowił określić jego pozycję w drodze obserwacji. Były mu więc potrzebne co najmniej cztery pozycje Marsa (a nie, jak w przypadku Ptolemeusza, tylko trzy). Kepler wykorzystał więc opozycje zaobserwowane przez Tychona w latach 1587, 1591, 1593 i 1595. Uzyskana w ten sposób orbita planety nie była doskonalsza od opracowanej przez Tychona i Longomontanusa, dlatego Kepler powrócił do przepełnienia mimośrodu. W tym czasie zdał sobie sprawę, że aby zrozumieć ruch Marsa musi znać dokładną pozycję obserwatora. Innymi słowy konieczne było określenie dokładnej orbity Ziemi. Aby tego dokonać, astronom opracował innowacyjną metodę obserwacji, którą zastosował wykorzystując cztery obserwacje Marsa przeprowadzone w odstępach co 687 dni, tj. w okresach gwiazdowego obrotu Marsa. Inaczej mówiąc, było to obserwowanie z Ziemi tego samego punktu orbity Marsa. Otrzymując tym sposobem zadawalającą teorię ruchu Ziemi, Kepler zajął się z powrotem problemem ruchu Marsa, tym razem podszedł do tego zagadnienia z fizycznego punktu widzenia. Od czasu *Tajemnicy Kosmosu*

astronom uważał, że planety porusza siła odwrotnie proporcjonalna do ich odległości od Słońca. Mimo przyjęcia tych fałszywych założeń, Keplerowi udało się odkryć podstawowe prawo ruchu planet, znane dzisiaj jako *Drugie Prawo Keplera*. Głosiło ono, że planety krążą wokół Słońca w taki sposób, że odcinek łączący planetę ze Słońcem (tak zwany „promień wodzący”) zakreśla równe pola w równych odstępach czasu (Fig. 26).

Nowa teoria ruchu Marsa, oparta na świeżo odkrytym prawie, dała obliczone pozycje planety, różniące się o 8' (minut kątowych) od pozycji obserwowanych. Osiem minut kątowych to w astronomii „gołego oka” bardzo niewielka wartość (odpowiada to kątowi, pod którym moneta jeden Euro widoczna jest z odległości 10 metrów!), jednak nie w obserwacjach Tycho. Następnie Kepler odkrył, że Mars nie porusza się po orbicie kołowej, lecz po torze w kształcie owalu, który był elipsą, do czego astronom również później doszedł. Kepler odkrył prawo, zwane dzisiaj *Pierwszym Prawem Keplera*, (mimo, że zostało ono odkryte po prawie równych obszarów): orbity planet są elipsami, ze Słońcem w jednym z ognisk. Kepler przedstawił te dwa prawa w swojej *Nowej Astronomii (Astronomia nova)*, opublikowanej w roku 1609, w tym samym, w którym Galileusz skierował swoje teleskopy w niebo. Później Kepler odkrył *Trzecie Prawo*, które przedstawił w *Harmonii światów (Harmonice mundi)*, opublikowanej w 1619 r., w którym okresy obiegu planet są uzależnione od ich odległości od Słońca. Oznacza to, że kwadraty tych okresów są proporcjonalne do sześcianów wielkich półosi orbit planet.

C1.3 – Fizyka nieba

Odkrywając eliptyczny kształt orbit i prawo równych obszarów, Kepler obalił definitywnie aksjomat kolistości i jednostajności ruchów niebieskich. Odkrycia te stały się punktem wyjściowym do nowej analizy fizycznych przyczyn zachowania się planet. Tak, jak zostało to już wyżej wspomniane, od czasu *Tajemnicy Kosmosu*, Kepler zakładał istnienie siły rozchodzącej się od Słońca. Siła ta, nie będąca siłą przyciągania jak grawitacja Newtona, tylko siłą pchającą lub ciągnącą planety – miała działać jedynie w płaszczyźnie ich orbit, wytwarzając rodzaj wiru. Wir taki poruszałby jednakże planety po orbitach kołowych, koncentrycznych względem Słońca. Dlaczego zatem orbity planet nie są kołowe? Aby odpowiedzieć na to pytanie Kepler przyjął założenie, że planety są „ogromnymi sferycznymi magnesami”. Z drugiej strony w sławnym dziele *O magnesie (De magnete)*, wydanym w 1600 r., William Gilbert (1544-1603) udowodnił, że jest to prawdą w odniesieniu do Ziemi, która według teorii heliocentrycznej jest planetą. Oś każdej z planet jest skierowana zawsze z tym samym kierunkiem, z jednym biegunem przyciąganym przez Słońce, a drugim odpychanym. W połowie orbity, w której „przyjaciel Słońca” – jak Kepler nazywał przyciągający biegun – skierowany był w stronę Słońca, planeta zbliżała się do gwiazdy aż do peryhelium (punktu minimalnej odległości od Słońca). Od tego momentu „niezgodny” biegun skierowany był w stronę Słońca, i w pozostałej części orbity planeta była odpychana aż do aphelium (punktu największej odległości od Słońca) (Fig. 27). Teoria ta, która i dzisiaj może wydawać się innowacyjna, była z historycznego punktu widzenia bardzo ważna, ponieważ stanowiła pierwszą poważną próbę wyjaśnienia ruchu planet z fizycznego punktu widzenia.

C1.4 – Optyka Keplera

Chociaż nazwisko Keplera jest nierozdzielnie związane z prawami ruchu planet, wniósł on także bardzo istotny wkład do optyki (jak również do matematyki). W 1604 r. opublikował dzieło zatytułowane *Uzupełnienia do Witelona, które wykładają część optyczną astronomii (Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur)*. Witelo – XIII-wieczny polski fizyk i filozof napisał tekst zatytułowany *Perspektywa (Perspectiva)*, jak nazywana była wtedy optyka. Dzieło to, oparte w znacznej mierze na *O położeniach (De aspectibus)* Ibn al-Haytham’a, miało wraz ze *Wspólną Perspektywą (Perspectiva communis)* Johna Peckham’a (ok. 1232-1292) stać się najważniejszym średniowiecznym traktatem poświęconym optyce. Dzieło Keplera było w rzeczywistości czymś więcej niż „uzupełnieniem” do dzieła Witelona – stanowiło podstawę nowożytnej optyki geometrycznej (Fig. 28).

W swym późniejszym dziele, *Dioptryka (Dioptrice)*, opublikowanym w 1611 r. astronom zastosował zasady optyczne do teleskopu, nowego wynalazku, za pomocą którego krótko przedtem dokonał swych niezwykłych odkryć Galileusz. W *Dioptryce* Kepler zaproponował nowy rodzaj okularu złożonego z soczewek skupiających (dwuwypukłych lub płasko-wypukłych). Teleskop „galileuszowski” (lub „duński”), którego okular składa się z soczewek rozpraszających (dwuwklęsłych lub płasko-wklęsłych), pozwalający na uzyskanie obrazu prostego (nieodwrotnego), charakteryzuje się bardzo ograniczonym polem widzenia (patrz fig. 37). Teleskop

„keplerowski” (lub „astronomiczny”) przedstawia natomiast obserwowane obiekty jako obrazy odwrócone, jednak jego pole widzenia jest znacznie większe i jaśniejsze (patrz fig. 38). Ponadto większe pole widzenia pozwalało na osiąganie większych powiększeń. Z tych powodów rozwiązanie to w ciągu kilku dziesięcioleci całkowicie zastąpiło konstrukcję Galileusza.

C2 – Prawo grawitacji a Wszechświat

Izaak Newton był zafascynowany mechaniką, optyką i matematyką, nawet bardziej niż Galileusz. Ponadto większość jego prac poświęcona była takim dziedzinom, jak historia, alchemia czy egzegeza biblijna. Dlatego też Newtona trudno jednoznacznie nazwać astronomem. W istocie dokonał on bardzo niewielu obserwacji teleskopowych i nie stworzył żadnego systemu budowy Świata. Mimo to nie można odmówić Newtonowi miejsca w historii astronomii, a dokładniej rzecz biorąc, na końcu długiego procesu zwanego rewolucją astronomiczną. Newton zrewidował gruntownie fizykę odziedziczoną przez europejskich renesansowych filozofów naturalnych po starożytnych.

Arystoteles ustalił różnicę pomiędzy fizyką ziemską a kosmiczną. Prawa pierwszej obowiązywały w środowisku ziemskim (zmiennym i śmiertelnym); prawa drugiej były słuszne jedynie w środowisku pozaziemskim (nie podatnym na zmiany i wiecznym). Ta dwoistość pozostała niepodważona do czasu próby udowodnienia przez Galileusza, że Ziemia znajduje się w ruchu. Galileusz wysunął hipotezę istnienia jednej fizyki, jednak nie zastosował ziemskiej fizyki do obszaru pozaziemskiego. W przeciwieństwie do niego Newton ustanowił ogólne prawa fizyczne, które były jednocześnie rezultatem i demonstracją istnienia jednolitego Świata ziemsko -pozaziemskiego.

C2.1 – Izaak Newton

Izaak Newton (Fig. 29) urodził się w 25 grudnia 1642 r. w Woolsthorpe, w angielskim hrabstwie Lincolnshire. Po ukończeniu szkoły średniej w Grantham studiował matematykę na Trinity College w Cambridge. W latach 1665-1666 dżuma zmusiła go do powrotu do Woolsthorpe, gdzie poświęcił się matematyce i fizyce. Newton powrócił do Cambridge w roku 1667, a w 1669 objął po swoim mistrzu Izaaku Barrow (1630-1677) katedrę matematyki.

W tym czasie Newton zdążył już po raz pierwszy wypróbować swoją teorię grawitacji. Zgadzał się z Kartezjuszem (René Descartes 1596-1650) co do tego, że planety krążą wokół Słońca w eterycznym wirze, nie był jednak do końca przekonany w niektórych sprawach takich, jak na przykład eliptyczny kształt orbit planetarnych.

W latach 1671-1672 Newton zajmował się alchemią, wtedy to zaprezentował Royal Society teleskop zwierciadlany i nową teorię składu światła białego. Od 1679 r. poszerzył swoje badania o dynamikę. Zainteresowanie Newtona na dynamiczne aspekty ruchu planet skierował Robert Hooke (1635-1702/3). Podejście to pozwoliło Newtonowi zorientować się, że drugie prawo Keplera było wynikiem działania siły centralnej odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości. W 1684 r. Edmond Halley (1656-1742) dał Newtonowi nowy impuls do badania sił centralnych działających na planety i komety. W wyniku tego w 1687 r. Newton opublikował swoje najważniejsze dzieło *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, w którym przedstawił trzy zasady dynamiki i uniwersalne prawo grawitacji.

W okresie późniejszym uczony brał aktywny udział w życiu publicznym, został wybrany na członka parlamentu angielskiego i zajął stanowisko Zarządcy Mennicy. Newton był również członkiem wszystkich liczących się europejskich akademii nauk, w 1703 r. był przewodniczącym Royal Society, a w 1705 r. otrzymał tytuł Baroneta. Zmarł 20 marca 1727 r.

C2.2 – Fizyka uniwersalna

Dialog o dwu najważniejszych układach świata i *Dialogi i dowodzenia matematyczne* Galileusza wprowadziły nowe podejście do fizyki. Nauka nie mogła rozwijać się dalej w oparciu o autorytet Arystotelesa. Dalszy rozwój był możliwy jedynie w oparciu o praktyczne obserwacje i racjonalne dowody. Ponadto praca Galileusza wyrobiła w jego bezpośrednich i pośrednich uczniach przekonanie, że prawa fizyczne nie ograniczają się do określonego środowiska Świata: ziemskiego czy pozaziemskiego. Wczesnym zastosowaniem zasady powszechności fizyki Galileusza (Fig. 30) była książka Borelliego *Teorie na temat planet medycejskich opracowane w oparciu o przypadki fizyczne*, w której potraktował on zjawiska niebieskie tak samo jak ziemskie.

Podczas swego pobytu w Woolsthorpe w czasie epidemii dżumy Newton czytał prawdopodobnie Galileusza i Kartezjusza, rozpoczynając jednocześnie opracowywanie tematów większej części swoich przyszłych badań. Jak powszechnie wiadomo, zjawisko grawitacji zostało udowodnione przez upadek jabłka z drzewa zasadzonego w ogródku przydomowym Newtona. Epizod ten skłonił uczonego do rozważenia, czy przypadkiem siła wywołwana masą Ziemi, odpowiedzialna za upadek jabłka z drzewa, nie wywołuje również wiecznego „spadania” Księżyca na Ziemię. Newton zweryfikował tę hipotezę, stosując trzecie prawo Keplera (prawo okresów i odległości). Uczony zastosował to prawo do jabłka i Księżyca, odległych odpowiednio jeden i około 60 promieni ziemskich od środka przyciągania. W wyniku tego odkrył, że siła grawitacji zmniejsza się proporcjonalnie do odwrotności kwadratu odległości od środka przyciągania. Newton nie był jednakże pewny słuszności tego pochopnego wniosku, opartego jedynie na badaniu Księżyca. Nie ujawnił publicznie swojego wniosku do momentu, w którym był w stanie przeprowadzić uaktualnione obliczenia i przedstawić inne dowody.

W 1679 r. Hooke, sekretarz Royal Society, ponownie skierował zainteresowanie Newtona na dynamikę orbit planetarnych. Hooke zasugerował, że ruch po orbicie może być traktowany jako ruch złożony. Należało wziąć pod uwagę dwie składowe: pierwsza styczna do orbity, druga skierowana w kierunku centralnego ciała przyciągającego. Konfrontacja z Hooke’em skłoniła Newtona do rewizji wielu założeń dynamicznych (przykładowo przypuszczenie, że upuszczone ciało powinno spadać ruchem spiralnym w kierunku środka grawitacji). Ostatecznie Newton udowodnił matematycznie, że ciało, na które działa siła centralna proporcjonalna do odwróconego kwadratu odległości, musi poruszać się zgodnie z pierwszym i drugim prawem Keplera, tzn. po elipsie i zakreślając równe pola w równych odstępach czasu. Dlatego prawa Keplera stanowiły astronomiczny dowód istnienia siły grawitacji proporcjonalnej do odwrotnego kwadratu odległości planet od masy Słońca.

Newton opisał swoje prawo grawitacji w *Matematycznych zasadach filozofii przyrody*, wydrukowanych po raz pierwszy w 1687 r. W książce tej Newton podaje dokładne definicje terminów takich jak ‘masa’, ‘ciężar’, ‘bezwładność’, ‘siła’, itp. Ponadto Newton przedstawił swoje dobrze znane trzy prawa (zasady) ruchu w postaci matematycznej. Udowodnił, że te obowiązujące w środowisku ziemskim zasady, po połączeniu z teorią powszechnego ciężenia, stanowią idealne wyjaśnienie faktu, iż planety poruszają się zgodnie z trzema prawami Keplera. *Matematyczne zasady* stanowiły nie tylko rozwinięcie mechaniki Galileusza w nowej fizyce, oznaczały one również likwidację arystotelesowskiej różnicy pomiędzy światem ziemskim a pozaziemskim.

Forma i treść *Matematycznych zasad* Newtona doprowadziła do nowego rozumienia fizyki całego Wszechświata. W XVIII wieku ta nowa fizyka uznawana była za solidną podstawę, nieodzowną do zbudowania tzw. „mechaniki nieba”. Ta nowa dziedzina nauki miała swoich wybitnych propagatorów, zwłaszcza francuzów: Pierre-Charles’a Le Monnier (1715-1799), Joseph’a Jérôme Le Français de Lalande (1732-1807), Joseph’a Louis Lagrange (1736-1813) i Pierre’a Simon’a de Laplace (1749-1827).

C2.3 – Światło i optyka

W dziedzinie obserwacji teleskopowych w ciągu XVII stulecia dokonał się znaczny postęp. Skonstruowano nowe rodzaje teleskopów, dodających do tradycyjnego teleskopu Keplerowskiego system soczewek prostujących i nowe złożone okulary. Przykładowo Christiaan Huygens (1629-1695) wprowadził teleskop z okularem dwusoczewkowym. Modyfikacja ta pozwoliła mu odkryć pierwszego satelitę Saturna i wyjaśnić, iż dwa zgrubienia zaobserwowane przez Galileusza po bokach tej planety są jakby uchwytami dużego pochylego pierścienia. Huygens opisał obie te obserwacje w *Systemie Saturna* (*Systema Saturnium*, 1659), wywołując długą polemikę z włoskim optykiem Eustachio Divini (1610-1685) i jezuitą Honoré Fabri (1607-1688).

Podobne innowacje zaowocowały skonstruowaniem teleskopów o większym powiększeniu, jednakże jakość obrazów obiektów, obserwowanych przez nie, nie była najlepsza. Z powodu istnienia wielu pozbawionych ostrości, nakładających się na siebie kolorowych obrazów, obserwowane obiekty były zamazane. W celu zmniejszenia kłopotów związanych z tą obserwacyjną niedogodnością (Fig. 31), zwaną dzisiaj „aberracją chromatyczną”, fachowcy tacy jak włoski optyk Giuseppe Campani (1635-1715), czy polski astronom Jan Heweliusz (1611-1687), projektowali zwykle teleskopy wyjątkowo długie.

Rzeczywiście cienka soczewka obiektywu połączona z kilkumetrową rurą pozwalała na uzyskanie obrazów wyraźniejszych od uzyskiwanych z wykorzystaniem grubych soczewek obiektywu, zastosowanych w krótkiej rurze teleskopu. Naturalnie pilna potrzeba skierowania bardzo długiej rury na obiekty niebieskie wiązała

się z koniecznością opracowania skomplikowanej oprawy, która znacznie zmniejszała wydajność stosowania tak długich instrumentów.

W swoim liście do Royal Society, odczytany publicznie w 1672 r., Newton przedstawił eksperyment badania światła białego przy zastosowaniu dwóch szklanych trójkątnych pryzmatów. Pierwszy szklany pryzmat rozszczepiał pojedynczy promień światła białego na wiele kolorowych składników, podczas gdy drugi pryzmat nie mógł już rozszczepić otrzymanych składników na dalsze. Ponadto można było zaobserwować, że pojedynczy pryzmat odchyłał niebieskie promienie bardziej niż czerwone. Wnioski, które wyciągnął z tego eksperymentu, odniesione do obrazu utworzonego przez soczewki obiektywu teleskopu, wyjaśniały przyczynę aberracji chromatycznej. Podobnie jak pryzmat, soczewki obiektywu rozszczepiały światło na jego kolorowe składniki. W praktyce obiektyw tworzył wiele kolorowych obrazów tej samej planety lub gwiazdy. Obrazy te nie były tworzone w tej samej odległości od soczewek: obraz niebieskawy znajdował się bliżej obiektywu niż czerwony.

W wyniku tych badań Newton zdał sobie sprawę, że każdy teleskop z soczewką spełniającą rolę obiektywu zawsze będzie obciążony aberracją chromatyczną. Dlatego zbudował nowy rodzaj teleskopu, zaprezentowany następnie Royal Society, w którym soczewka obiektywu została zastąpiona wklęsłym zwierciadłem kulistym. Promienie świetlne skupiane przez lustro były odbijane wzdłuż osi optycznej w kierunku ogniska. Odbijane promienie nie docierały jednakże do ogniska, były one przechwytywane przez drugie płaskie małe zwierciadło i odchylane ukośnie do skupiającej (dwuwypukłej) soczewki okularu, umieszczonej w otworze rury teleskopu (Fig. 32). Zastosowanie zwierciadła odbijającego promienie światła zamiast soczewki załamującej je pozwoliło na uniknięcie aberracji chromatycznej. Dlatego do momentu, w którym dostępne stały się achromatyczne kombinacje soczewek, metoda skracania długości teleskopów Newtona cieszyła się ogromnym uznaniem.

Newton nie był pierwszym, który skonstruował teleskop katoptryczny (wykorzystujący zwierciadła). W połowie siedemnastego wieku James Gregory (1638-1675) i Guillaume Cassegrain (1625-1712) skonstruowali dwa inne modele teleskopów katoptrycznych. Obaj konstruktorzy zastosowali w swoich teleskopach paraboliczne zwierciadła obiektywowe, pozwalające na uzyskanie idealnego obrazu. Konstrukcje te różniły się także od teleskopu Newtona kształtem lustra wtórnego. Teleskopy Gregory'ego i Cassegrain'a miały odpowiednio, eliptyczne i hiperboliczne zwierciadło wtórne.

C2.4 – Orbity komet i planet

Teoria powszechnego ciężenia opisywała siłę przyciągania pomiędzy dwoma dowolnymi masami. Trzy zasady dynamiki tłumaczyły, jakie siły wywołują zmiany w stanie ciała. Połączenie tych dwóch teoretycznych wniosków było w astronomii niezwykle owocne.

Łączne zastosowanie tych praw mogło być stosowane do analizy pojedynczego ciała krążącego wokół innego większego ciała, na przykład planety lub komety dookoła Słońca. Przykładowo w 1684 r. Halley zapytał Newtona o orbitę, po jakiej planeta poruszałaby się pod wpływem siły odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości. Newton odpowiedział, że byłaby to elipsa, a następnie przesłał Halley'owi odpowiednie obliczenia. Badając komety Newton wywnioskował, że orbity komet są parabolami lub niezwykle wydłużonymi elipsami. Wniosek ten sprawił, że Halley zdał sobie sprawę, iż znacznie wydłużona elipsa była właśnie orbitą komety, która pojawiła się w 1682 r.

Jak wyznawał Newton w swoich *Matematycznych zasadach*, odkrycie, że kometa taka jest okresowa było zasługą Halley'a. Faktycznie ta szczególna kometa (znana dzisiaj jako kometa Halley'a) zbliża się do Słońca co siedemdziesiąt pięć lat.

Połączenie teorii powszechnego ciężenia z trzema zasadami dynamiki mogło być również stosowane do analizy wpływu trzeciego ciała na zasadniczą orbitę eliptyczną ciała krążącego wokół ciała większego. Newton był przykładowo w stanie wytłumaczyć fizyczną przyczynę głównych nierówności, które Ptolemeusz i Tycho odkryli wcześniej w orbicie Księżyca. Powodem tych nierówności były siły grawitacji działające w trójelementowym układzie Słońce – Księżyc - Ziemia. Newton poszedł dalej sugerując, że nieregularności obserwowane w ruchu Saturna mogą być powodowane przez przyciąganie grawitacyjne Jowisza w trójelementowym układzie Słońce – Jowisz - Saturn.

Ten kierunek badań okazał się w XVIII-tym i XIX-tym stuleciu niezwykle efektywny (Fig. 33). Przypadkowe odkrycie siódmej planety - Urana przez organistę i astronoma amatora William'a Herschel'a

(1738-1822) 13 marca 1781 r. przesądziło o sukcesie teleskopu zwierciadlanego. Jednakże odkrycie ósmej planety, Neptuna, w 1846 r. dokonane niezależnie przez Johna Couch'a Adams'a (1819-1892) i Urbain'a Jean'a Joseph'a Le Verrier'a (1811-1877) przypieczętowało sukces fizyki Newtona, stosowanej dla ruchów planet. Było to tym bardziej prawdą, że to ostatnie odkrycie zostało dokonane poprzez odwrócone zastosowanie newtonowskiej analizy systemu złożonego z trzech ciał. Ponieważ zaobserwowano, że Uran nie porusza się dokładnie po przewidywanej dla niego orbicie, wywnioskowano, że kurs planety musi być odchylany przez grawitacyjne przyciąganie nie odkrytej do tej pory ósmej planety.

KATALOG PODRÓŻUJĄCYCH EKSPONATÓW

A – Dziedzictwo starożytnych;

Geocentryczne systemy budowy Świata w okresie 1450-1550

A1.1.1 – Uproszczone planetarium ptolemeuszowskie (Opera Laboratori Fiorentini - OLF).

Okrągła tablica (o średnicy około 80 cm), na której znajdują się epicykle planetarium Ptolemeusza. Zębatkowy instrument prezentuje część systemu Świata (Ziemia, Wenus, Słońce, i Mars), opisanego przez Ptolemeusza w *Hipotezie planetarnej*.

W planetarium można zobaczyć: 1) epicyklowo-deferentowe modele Wenus i Marsa; 2) zastosowanie tych modeli do wytłumaczenia wstecznego ruchu każdej z planet po Zodiaku (w szczególności Marsa); 3) „upakowanie” modeli planetarnych opracowane przez Ptolemeusza; 4) szczególną rolę Słońca w synchronizacji ruchów planet w systemie geocentrycznym.

A1.1.2 – Rekonstrukcja przyrządu paralaktycznego (OLF).

Instrument ten (Fig. 34), opisany przez Ptolemeusza w *Almageście*, w Średniowieczu zwany również ‘triquetrum’ (trójkątem) zbudowany jest z trzech prostych prętów (o długości ok. 2 metrów). Główny pręt jest umocowany pionowo w ciężkiej podstawie. Pozostałe dwa pręty połączone bolcami poruszają się w płaszczyźnie południkowej.

Ptolemeusz zastosował przyrząd paralaktyczny w celu wyznaczenia odległości Księżyca od Ziemi. Spoglądając przez otwory przeziernikowe zrekonstruowanego modelu, można dokonać prostej obserwacji odległości kątowej Księżyca od Zenitu. Rekonstrukcja instrumentu paralaktycznego pozwala przekonać się o trudnościach astronomicznych obserwacji “gołym okiem”.

B – Nowe systemy budowy Świata

B1 – Teoria heliocentryczna

B1.2.1 – Uproszczony model planetarium zębatkowego Kopernika (OLF).

Uproszczony model planetarium znajduje się na okrągłej tablicy (o średnicy około 80 cm). Zębatkowe urządzenie przedstawia część systemu budowy Świata (Ziemia, Wenus, Słońce i Mars), opisanego przez Kopernika w *O obrotach*.

W planetarium można zobaczyć: 1) heliocentryczne orbity Wenus, Marsa i Ziemi; 2) zastosowanie teorii heliocentrycznej dla wytłumaczenia wstecznego ruchu Marsa po Zodiaku (a bardziej ogólnie planet zewnętrznych); 3) wyjaśnienie, z heliocentrycznego punktu widzenia, powodu ograniczonej odległości kątowej Wenus (a bardziej ogólnie planet wewnętrznych) od Słońca.

B1.2.2 – Rekonstrukcja kopernikowskiego astrolabium armilarnego (OLF).

Przyrząd ten (Fig. 35), opisany już przez Ptolemeusza w *Almageście*, był od tego czasu wykorzystywany przez wielu astronomów renesansowych, „trafiając” ostatecznie do dzieła Kopernika *O obrotach*. Instrument to układ złożony z sześciu drewnianych pierścieni obracających się wokół różnych osi, reprezentujących główne okręgi sfery niebieskiej.

Kopernik utrzymywał, że armilarne astrolabium wykorzystał dla wyznaczenia współrzędnych Księżyca, planet i gwiazd stałych. Ustawiając odpowiednio pierścienie i spoglądając przez otwory przeziernikowe przyrządu, można dokonać prostej obserwacji różnicy długości dwóch ciał niebieskich lub szerokości jednego. W ten sposób rekonstrukcja astrolabium armilarnego pozwala przekonać się o trudności astronomicznych obserwacji “gołym okiem”.

B2 – Nowe obserwacje i system geo-heliocentryczny

B2.2.1 – Rekonstrukcja “trójkątnego sekstansu” Tychona (OLF).

“Sextans trigonicus” (Fig 36), tj. ‘trójkątny sekstans’, był jednym z najbardziej wszechstronnych przyrządów Tychona na wyspie Hven. Sekstans, którego pierwotna długość boku wynosiła około 170 cm, wykonany był z drewna, wyposażony w mosiężną podziałkę wyskalowaną od 0° do 60°. Instrument był wyważony na przegubie kulowym, dlatego można go było łatwo skierować na dowolny punkt nieba. Dwóch obserwatorów, spoglądających jednocześnie przez przezierniki przyrządu, mogło obserwować jednocześnie dwa ciała niebieskie i zmierzyć dokładnie ich odległość kątową. Również zrekonstruowany sekstans trójkątny daje możliwość przeprowadzenia tej prostej obserwacji. Dzięki temu każdy może przekonać się, jakie możliwości dawał sekstans trójkątny, nowe przezierniki Tychona, podziałka skalowana według punktów trawersalnych.

B2.2.2 – Stereoskopy wyjaśniające zależność paralaksa-odległość (OLF).

Dwie pary stereoskopów objaśniają, czym jest paralaksa ukazująca różne widoki nieba. Wizualne obiekty pierwszej “arystotelesowskiej” pary stereoskopów to: 1) rama gwiazdna, bliski Księżyc, podksiężycowa nowa gwiazda i chmury, 2) rama gwiazdna, bliski Księżyc, podksiężycowa kometa i chmury. Wizualne obiekty drugiej pary stereoskopów Tychona to: 1) rama gwiazdna, nadksiężycowa nowa gwiazda, bliski Księżyc, i chmury, 2) rama gwiazdna, nadksiężycowa kometa, bliski Księżyc, i chmury. Schematy obliczania torów promieni w układzie optycznym paralaks dla różnych obiektów są nakładane na każdy stereoskop.

Spoglądając przemienne raz przez pierwszą raz przez drugą parę stereoskopów, można zapoznać się ze znaczeniem koncepcji nowych gwiazd i komet Arystotelesa i Tychona. Jednocześnie możliwe jest intuicyjne zrozumienie relacji pomiędzy małą paralaksą a dużą odległością.

B2.3.1 – Uproszczona wersja planetarium Tychona (OLF).

Uproszczony model planetarium znajduje się na okrągłej tablicy (o średnicy około 80 cm). Zębatkowe urządzenie przedstawia część systemu budowy Świata (Ziemia, Wenus, Słońce i Mars) przedstawionego przez Tychona w *Najnowszych zjawiskach świata niebieskiego*.

W planetarium można zobaczyć: 1) geocentryczne modele Wenus i Marsa; 2) zastosowanie tych modeli do wyjaśnienia wstecznego ruchu planet (w szczególności Marsa) po Zodiaku; 3) przestrzenną relację, potwierdzoną przez Tychona, jak sam utrzymywał w obserwacjach, tzn. że Mars znajduje się bliżej Ziemi, kiedy jest w opozycji do Słońca, niż kiedy znajduje się w koniunkcji ze Słońcem.

B3 –Teleskop i rzeczywista budowa Świata

B3.2.1 – Teleskop; 1610-1630, Galileusza; drewno, skóra; długość, 980 mm; kopia (IMSS).

W latach 1610-1630 Galileusz skonstruował pewną ilość teleskopów, które rozdawał lub sprzedawał ludziom szlachetnie urodzonym i zamożnym. Do naszych czasów przetrwały zaledwie dwa z tych instrumentów, będących obecnie przechowywane w Muzeum Instytutu Historii Nauki we Florencji. Ekspонат to kopia najznamienitszego i najbardziej kompletnego teleskopu Galileusza (patrz Fig. 17). Powiększenie oryginalnego przyrządu było mniej więcej dwudziestokrotne, jego pole widzenia było jednak niezmiernie małe. Galileusz dokonał swych odkryć prawdopodobnie teleskopem przypominającym wyżej wspomniany.

B3.2.2 – Obserwowanie biegu promieni w układzie optycznym teleskopu Galileusza (OLF).

Dwa przekroje soczewek pleksyglasowych przymocowane są do prostokątnej tablicy. Przekrój dużego obiektywu jest płasko-wypukły, przekrój okularu jest płasko-wklęsły. Źródło światła na osi optycznej systemu soczewek wysyła pięć równoległych promieni. Trzy wewnętrzne promienie są białe; dwa skrajne odpowiednio czerwony i zielony. W rezultacie możliwe jest obserwowanie torów promieni w układzie optycznym teleskopu Galileusza (Fig. 37). Promienie świetlne zbiegają się do ogniska, poza soczewką obiektywu, a następnie układają się równolegle do siebie poza soczewką okularu. Ponadto każdy może przerwać drogi promieni palcem w każdym punkcie i zobaczyć skutek takiego działania na obraz.

B3.3.1 – Przekrój działającego teleskopu Galileusza wyposażonego w mikrometr (OLF).

Kopia teleskopu Galileusza przecięta wzdłuż. Brakująca część została zastąpiona przezroczystą pół-rurą pleksiglasową. Soczewki są zamocowane i przyrząd działa należycie (powiększenie około 20x). Do każdej soczewki poprowadzone są czerwone strzałki, tworząc graficzny opis ich geometrycznych kształtów. Przyrząd wyposażony jest w suwakowy mikrometr w formie opisanej przez Giovanni'ego Alfonso Borelli'ego (1608-1679).

Teleskop skierowany jest w stronę odległego zdjęcia systemu Jowisza. System taki można zaobserwować spoglądając przez teleskop i przy pomocy mikrometru zmierzyć odległość gwiazd medycejskich od planety. Można zaobserwować: 1) powiększenie teleskopu Galileusza; 2) małe pole widzenia instrumentu; 3) pionowe ustawienie oglądanego obrazu.

B3.3.2 – Jovilabium; XVII w.; mosiądz; 400 x 195 mm; kopia, (IMSS).

W latach 1610-1620 Galileusz opracował dwa systemy prostego redukcji danych uzyskanych za pomocą teleskopu i mikrometru. Pierwszy był wyskalowaną mapą systemu Jowisza ograniczoną liniami równoległymi - liniami wzroku obserwatora przecinającymi okrągłe orbity gwiazd medycejskich. Galileusz wykorzystał tę mapę do przekształcenia liniowych odległości mierzonych za pomocą mikrometru w oryginalne kąty jowicentryczne, osiągane przez te gwiazdy na orbitach. Drugi system stanowił mapę heliocentrycznych orbit Ziemi i Jowisza. Przy zastosowaniu tej mapy Galileusz obliczył kąt Słońce – Jowisz - obserwator, zwany także "prostapereza". Kąt ten należało algebraicznie dodać do kątów jowicentrycznych, aby otrzymać pozycje heliocentryczne gwiazd medycejskich.

W XVII stuleciu te dwa systemy zostały połączone w wyjątkowym mosiężnym 'jovilabium' (patrz fig. 19). Duży okrągły talerz przyrządu pochodzi z pierwszego systemu Galileusza i przedstawia system Jowisza. Inne ruchome części przyrządu pochodzą z drugiego systemu. W szczególności dwa małe okrągłe talerze, przedstawiające heliocentryczne orbity Ziemi, rączka reprezentująca pozycję obserwatora i pręt łączący rączkę z dużym okrągłym talerzem przedstawiającym linię wzroku obserwatora. Cztery tabele numeryczne, jedna dla każdej gwiazdy medycejskiej, stanowią uzupełnienie mosiężnego przyrządu. Tabele te zawierają okresowe dane stosowane dla ustalenia obserwowanych konfiguracji towarzyszy Jowisza.

B3.4.1 – Geocentryczne i heliocentryczne fazy Wenus (OLF).

Na tablicy znajdują się dwa statyczne modele planetarne Wenus: ptolemeuszowski i kopernikowski. W każdym z modeli nieprzezroczysta lampa prezentuje Słońce. Długie wąskie lustro, skierowane w stronę Słońca, jest zamocowane na Ziemi przedstawionej za pomocą małej piłki. Lustro tworzy z płaszczyzną modelu kąt 45° . Osiem białych piłek o średnicy około trzech centymetrów prezentuje różne pozycje Wenus na epicyklu planety w systemie Ptolemeusza i na heliocentrycznej orbicie planety w systemie Kopernika (jak również systemie w Tychona).

Obserwując Wenus poprzez te dwa lustra można zobaczyć różne fazy planety w geocentrycznej i heliocentrycznej (lub w geo-heliocentrycznej) budowie Świata.

C – Nowa fizyka Wszechświata

C1 – Prawa, siły i harmonia Kosmosu

C1.2.1 – Wielościany foremne i sfery niebieskie (R. Folicaldi).

Ten drewniany model przedstawia trójwymiarowy układ zaprojektowany przez Keplera w celu wyjaśnienia odległości poszczególnych planet od Słońca w systemie kopernikowskim (patrz Fig. 23). W *Tajemnicy Kosmosu*, swojej pierwszej książce opublikowanej w 1596 r., Kepler próbował odnieść odległości planet do pięciu brył foremnych. Prezentowany model jest zrekonstruowany dokładnie według opisu wielkiej tarczy z *Tajemnicy Kosmosu*.

C1.2.2 – Keplеровski ruch planety (OLF).

Model składa się z eliptycznej orbity osadzonej na stożkowej podstawie. Model odtwarza ruch danej planety wokół Słońca zgodnie z dwoma pierwszymi prawami Keplera (patrz Fig. 26). W szczególności drugie prawo Keplera uzyskiwane przy pomocy zwanego „uproszczonego równania Keplera” (przemieszczając planetę jednostajnie względem „pustego” ogniska elipsy); jest to dobre przybliżenie prawdziwego prawa. Kilka małych dzwonek, rozmieszczonych na orbicie odpowiednio do kilku sektorów elipsy o równych powierzchniach, dzwoni podczas przechodzenia planety. W wyniku tego w równych odstępach czasu słychać dzwonięcie.

C1.4.1 – Obserwowanie biegu promieni w układzie optycznym teleskopu Keplera (OLF).

Dwa przekroje soczewek pleksiglasowych przymocowane są prostokątnej tablicy (Fig. 38). Zarówno duża soczewka obiektywu jak i małego okularu są dwuwypukłe. Źródło światła na osi optycznej systemu soczewek wysyła pięć równoległych promieni światła. Trzy wewnętrzne promienie są białe; dwa skrajne odpowiednio czerwony i zielony. W rezultacie możliwe jest obserwowanie biegu promieni w układzie optycznym teleskopu keplerowskiego. Promienie świetlne zbiegają się w ognisku za soczewką obiektywu. Następnie są przechwytywane przez soczewkę okularu i ustawiane równoległe względem siebie. Przy tym skrajne promienie czerwony i zielony są odwracane (tj. tworzony przez nie obraz jest w pozycji „do góry nogami”). Ponadto każdy może przerwać drogi promieni palcem w każdym punkcie i zobaczyć skutek takiego działania na obrazie.

C1.4.2 – Przekrój działającego teleskopu Keplera (OLF).

Model teleskopu Keplera przecięty wzdłuż. Brakująca część została zastąpiona przezroczystą pół-rurą pleksiglasową. Soczewki są zamocowane i przyrząd działa należycie (powiększenie ok. 20x). Do każdej soczewki poprowadzone są czerwone strzałki, tworząc graficzny opis ich geometrycznych kształtów.

Teleskop skierowany jest w stronę odległego zdjęcia obiektu ziemskiego. Spoglądając przez teleskop można zobaczyć: 1) powiększenie teleskopu Keplera; 2) wielkość pola widzenia tego rodzaju instrumentu; 3) odwrócone ustawienie oglądanego obrazu.

C2 – Prawo grawitacji a Wszechświat

C2.3.1 – Skład światła: pryzmat (OLF).

Dwa szklane pryzmaty zamocowane na kwadratowej tablicy. Promień białego światła pada na pierwszy pryzmat, (przesuwany za pomocą rączki). W skutek tego rozszczepiany jest na kolorowe składniki, a następnie rzutowany na biały ekran. Obracając lekko pryzmat można modyfikować kierunek załamane go promienia i szerokość uzyskiwanego „spektrum”. Gdy obrócimy pryzmat dalej spektrum rzutowane jest przez szczelinę i drugi pryzmat. Dlatego możliwa jest weryfikacja eksperymentu Newtona odnośnie składu światła. Jednokolorowe promienie wybrane do przejścia przez szczelinę nie są już rozszczepiane na dalsze składowe po przejściu przez drugi pryzmat.

C2.3.2 – Obserwowanie biegu promieni w układzie optycznym teleskopu Newtona (OLF).

Dwa przekroje zwierciadeł przymocowanych do prostokątnej tablicy (Fig. 39). Duży przekrój obiektywu jest wklęsły; przekrój zwierciadła wtórnego jest płaski. Mały przekrój skupiającej soczewki dwuwypukłej umieszczony jest z boku. Źródło światła na osi optycznej systemu soczewek emituje pięć równoległych promieni światła. Trzy wewnętrzne promienie są białe, dwa skrajne odpowiednio czerwony i zielony. W rezultacie możliwe jest obserwowanie przebiegu torów promieni w układzie optycznym teleskopu Newtona. Wszystkie promienie świetlne (za wyjątkiem środkowego, przerywanego przez małe płaskie lustro) zbiegają się do ogniska przed lustrem obiektywu. Następnie promienie te są odbijane w bok przez zwierciadło płaskie i biegną równoległe po przejściu przez umieszczoną z boku soczewkę okularu. Dodatkowo każdy może przerwać drogi promieni palcem w każdym punkcie i zobaczyć skutek takiego działania na obrazie.

C2.3.3 – Teleskop Newtona; kopia instrumentu z 1766 r. (OLF).

Newton nie skonstruował swojego teleskopu w celu wykonywania za jego pomocą obserwacji, lecz głównie po to, aby zademonstrować jak można uniknąć powstawania aberracji chromatycznej w zwykłych

teleskopach „dioptrycznych” (wykorzystujących jedynie soczewki). Newton wykonał swój pierwszy teleskop katoptryczny w 1668 r. Instrument ten nie przetrwał do naszych czasów, podobnie jak teleskop zaprezentowany Royal Society pod koniec 1671 r. Jedynie niektóre części drugiego instrumentu zostały wykorzystane w teleskopie zaprezentowanym przez Royal Society w 1766 r. Ekspонат to kopia zaprezentowanego w tym roku przyrządu, nadal przechowywanego w Royal Society w Londynie.

C2.3.4 – Przekrój działającego teleskopu newtonowskiego (OLF).

Teleskop Newtona przecięty wzdłuż. Jedna część rury podobna jest do skopiowanego teleskopu Newtona; brakująca część została zastąpiona przezroczystą pół-rurą pleksiglasową. Zwierciadła i soczewka okularu są zamocowane i przyrząd działa należycie (powiększenie ok. 20x). Do każdego zwierciadła i do soczewki poprowadzone są czerwone strzałki, tworząc graficzny opis ich geometrycznych kształtów.

Teleskop skierowany jest w stronę odległego zdjęcia obiektu ziemskiego. Spoglądając przez teleskop można zobaczyć: 1) powiększenie teleskopu Newtona; 2), duże pole widzenia tego instrumentu; 3) odwrócone ustawienie oglądanego obrazu.