Roksal, Zenon

Geneza i ewolucja epicykliczno-deferencjalnego modelu ruchu Księżyca

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 45/3-4, 59-76

2000

Zenon E. Roskal
(Lublin)

GENEZA I EWOLUCJA EPICYKLICZNO-DEFERENCJALNEGO MODELU RUCHU KSIĘŻYCA

WSTĘP

Zaćmienia Słońca, ale również i zaćmienia Księżyca stanowiły szczególne wyzwanie stojące przed pierwszymi astronomami. Już pierwsi presokratycy (Tales, Anaksymander) zdawali sobie sprawę z tego, że zaćmienia uwarunkowane są odpowiednią konfiguracją Ziemi, Księżyca i Słońca. Pełniejszą wiedzę na ten temat zdobyli późniejsi uczeni (przede wszystkim Anaksagoras i Empedokles), ale dopiero kolejne generacje astronomów usiłowały podać nie tylko poglądowe, ale również matematyczne wyjaśnienie tych spektakularnych zjawisk[1]. To właśnie dzięki matematycznej (geometrycznej) teorii ruchu Słońca i Księżyca można było próbować dokonywać ilościowych predykcji. Teorie ruchu Słońca i Księżyca były też niezbędne do rozwiązania innego (praktycznego) zadania, a mianowicie problemu kalendarza.

Innym ważnym zagadnieniem było określanie współrzędnych obserwowanych obiektów. Opierając się na prostych pomiarach, można było ułożyć tablice, na podstawie których dopiero można było określać dla dowolnego momentu czasu położenia Słońca względem wybranego punktu na ekliptyce (np. punktu równonocy wiosennej, „punkt 0° Barana"). Słońce w swym biegu w zasadzie umożliwiało (poprzez pomiar czasu) wyznaczanie długości ekliptycznych ciał niebieskich, ale praktycznie metoda ta nie była dostępna, gdyż inne obiekty na niebie nie były widoczne w jego blasku. O wiele bardziej do tego celu nadawał

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki R. 45: 2000 nr 3–4 s. 59–76

się Księżyc, stąd też płynęło zainteresowanie teorią jego ruchu. Pełna i poprawna teoria ruchu Księżyca pozwalała bowiem na wyznaczenie współrzędnych ekliptycznych gwiazd i planet, co było warunkiem matematycznej teorii ich ruchów. Teoria ruchu Księżyca jest szczególnie ważna dla astronomii, ale również i dla historii astronomii przynajmniej z dwóch powodów. 1° Teoria ta ma wyjątkową pozycję w każdym systemie astronomicznym, gdyż bez względu na to, jaki w ogólności jest to system (geocentryczny, czy heliocentryczny) zawsze ruch Księżyca odnoszony jest do bezwzględnie (lub względnie) nieruchomej Ziemi. W związku z tym stanem rzeczy jest ona szczególnie interesująca wówczas, gdy chcemy porównywać geometryczną strukturę tych systemów z ich fizycznymi interpretacjami. 2° W związku z tym, że Księżyc jest obiektem położonym najbliżej Ziemi możemy oczekiwać, że nawet małe nieregularności w jego ruchu mogą być o wiele łatwiej odkryte niż w przypadku bardziej odległych obiektów. Faktyczne odkrycia kolejnych nieregularności w ruchu Księżyca, wyrażające się w dodawaniu kolejnych parametrów charakteryzujących jego ruch, miały też bezpośredni wpływ na rozwój metod i aparatu pojęciowego astronomii i były jednym z istotnych warunków powstania teorii heliocentrycznej. Wszystkie te okoliczności sprawiły, że zarówno w samej astronomii, jak i w historii astronomii model ruchu Księżyca był przedmiotem szczególnego zainteresowania[2].

Celem tego artykułu jest zebranie podstawowych informacji na temat genezy i ewolucji najbardziej rozpowszechnionej w astronomii przedkeplerowskiej teorii ruchu Księżyca, a mianowicie modelu epicykliczno-deferencjalnego. W oparciu o podstawowe źródła i opracowania zostaną zrekonstruowane zasadnicze elementy tego modelu, aczkolwiek szczegółowa dyskusja wszystkich matematycznych aspektów zostanie pominięta. Natomiast uwypuklone zostaną te aspekty (empiryczne i metodologiczne), które przyczyniły się do powstania teorii heliocentrycznej. Artykuł składa się z dwóch części. W pierwszej będą przeanalizowane okoliczności powstania pierwotnej wersji (Hipparch) epicykliczno-deferencjalnego modelu ruchu Księżyca oraz stosunkowo szeroko zostaną zaprezentowane, podstawowe dla dalszej analizy, kolejne trzy jego wersje pochodzące od Ptolemeusza. W części drugiej przedmiotem rozważań będzie krytyka tego modelu prowadzona zarówno w ramach astronomii geostatycznej (Ibn al-Shatir, Lewi ben Gerson, Tycho de Brahe), jak i heliostatycznej (Kopernik).

1. PIERWSZE WERSJE MODELU RUCHU KSIĘŻYCA

Pierwsze sformułowania epicykliczno-deferencjalnego modelu ruchu Księżyca pojawiły się w ramach procesu recepcji danych obserwacyjnych babilońskiej astronomii przez zorientowaną na tworzenie geometrycznych modeli astronomię grecką. Ważnym czynnikiem było też nowe podejście metodologiczne zapoczątkowane w szkole Platona[3] oraz rozwój geometrycznych modeli matematyki greckiej. Najprawdopodobniej Hipparch z Nikei (ok. 180–ok. 125 p.n.e) był pierwszym astronomem greckim, który w pełni uświadomił sobie możliwości konstrukcyjne zasady[4], wprowadzonej wcześniej przez Apolloniusza (ok. 250 p.n.e.). Zasada ta pozwalała traktować jako równoważne (kinematycznie) modele oparte na konstrukcji koła ekscentrycznego i modele złożone z epicyklu i deferentu[5]. Wykorzystując tę zasadę oraz dużej dokładności dane astronomów babilońskich[6], skonstruował on prosty[7] model ruchu Księżyca łączący geometryczne metody greckie z arytmetycznymi metodami babilońskimi. Ten prototyp epicykliczno-deferencjalnego modelu zgadzał się z dostępnymi mu obserwacjami zaćmień Księżyca i pozwalał przewidywać tego typu zjawiska w przyszłości z dokładnością około godziny, ale zasięg zaćmień Słońca nie był już tak dobrze szacowany. Niemniej był to bardzo duży postęp w stosunku do pierwszych predykcji formułowanych przez presokratyków. Model ten nie wymagał też wielu parametrów. Do podstawowych należały średnie prędkości kątowe środka epicyklu na deferencie i Księżyca na epicyklu oraz takie wielkości geometryczne, jak długość ekliptyczna apogeum (wysokość apogeum deferentu) oraz stosunek długości promieni deferentu i epicyklu (lub odpowiednio promień epicyklu i mimośród deferentu). Zgodnie z tym pierwszym modelem, ruch epicyklu wokół Ziemi odbywał się ze znaną średnią prędkością w długościach ekliptycznych, ale ruch Księżyca po epicyklu odbywał się wstecznie (tzn. zgodnie z obserwowanym ruchem anomalnym Księżyca). W oparciu o obserwację trzech zaćmień Księżyca, Hipparch wypracował geometryczną procedurę pozwalającą mu na wyprowadzanie niezbędnych parametrów ruchu, czyli względne rozmiary epicyklu i deferentu oraz prędkości Księżyca na epicyklu i środka epicyklu na deferencie. Chociaż nie zachowały się oryginalne prace Hipparcha zawierające jego model ruchu Księżyca, to wiele można zrekonstruować korzystając z *Almagestu*[8] Ptolemeusza (ok. 100–ok. 162 n.e.). Czwarta księga, w której Ptolemeusz dyskutuje ruchy Księżyca zawiera liczne wzmianki historyczne, w tym odniesienia do Hipparcha teorii ruchu Księżyca. Według Ptolemeusza, Hipparch określił stosunek promienia deferentu do promienia epicyklu jako 3122 1/2 : 247 1/2 na podstawie zbioru trzech niezależnych obserwacji zaćmienia Księżyca[9]. Równocześnie podaje, że używając tej samej metody komputacyjnej, ale stosując odmienny (jednakże równoważny) model koła ekscentrycznego, Hipparch otrzymał inny stosunek promienia deferentu do jego mimośrodu, a mianowicie[10] 3144 : 327 2/3. Ponieważ modele te powinny być równoważne, to i powyższe stosunki liczbowe powinny być równe. Ptolemeusz wyjaśnił istniejące rozbieżności możliwymi błędami w obliczeniach i obserwacjach Hipparcha. W szczególności wykazał, że Hipparch popełnił błąd 36 minut w obliczeniu pozycji Słońca i około 56 minut w oszacowaniu środkowego momentu zaćmienia Księżyca. Z kolei inne obliczenia Hipparcha zdumiewają wielką precyzją i często były bezkrytycznie dołączane przez Ptolemeusza do tekstu *Almagestu*. Do największych osiągnięć Hipparcha należy m.in. wyznaczenie górnego i dolnego przedziału odległości Księżyca od Ziemi w jednostkach promieni Ziemi. Zgodnie z przekazem Pappusa, Hipparch przedstawił dwa zestawy obliczeń. Według pierwszego, najmniejsza odległość wynosiła 71, największa zaś 83 jednostki. Według drugiego zestawu, wielkości te były odpowiednio równe: 62 i 72 2/3. Teoria Hipparcha realizowała cele, dla których została obmyślona, mimo że zawierała błędy, o których Hipparch zapewne wiedział, ale czy podjął jakiekolwiek kroki by zmienić ten stan rzeczy możemy się jedynie domyślać. Metoda zastosowana przez Hipparcha była jednak na tyle znakomita, że Ptolemeusz wykorzystał ją do swojej wersji modelu ruchu Księżyca (podobnie zresztą jak i liczbowe wartości wielu obserwacji Hipparcha, chociaż niektóre były błędne, o czym mógł się przekonać dokonując własnych pomiarów).

Ptolemeusz był faktycznym twórcą podstaw greckiej astronomii. Rozwijając idee swoich poprzedników (głównie Hipparcha, ale również m.in. Metona i Timocharisa), stworzył kompleksową teorię ruchu ciał niebieskich w kosmosie wywodząc ją ze spójnego zbioru kilku zasad. Wyprowadziwszy podstawowe parametry geometrycznych modeli ruchu ciał niebieskich ze wzbogaconych danych obserwacyjnych, mógł w oparciu o nie dokonywać udanych predykcji zjawisk. Wówczas zjawiska te nie były już postrzegane tylko w ramach schematów powtórzeń (jak w astronomii babilońskiej), ale były odczytywane jako konsekwencja podstawowych założeń systemu. W ramach swojego systemu Ptolemeusz rozwinął też teorię ruchu Księżyca. Próbując uzgodnić wcześniejsze teorie z własną, Ptolemeusz przedyskutował w IV księdze *Almagestu* przede wszystkim model Hipparcha. Swoje (trzy) wersje epicykliczno-deferencjalnego modelu ruchu Księżyca Ptolemeusz przedstawił w księdze V *Almagestu*. Jego teoria ruchu Księżyca opierała się przede wszystkim na dwóch podstawowych (raczej jakościowej natury) faktach obserwacyjnych. 1° W przeciwieństwie do Słońca, Księżyc może osiągać swoją maksymalną (średnią lub minimalną) prędkość kątową w dowolnym punkcie ekliptyki, tzn., że jego linia apsyd nie jest stała w przestrzeni. 2° Księżyc może osiągać maksymalną północną (lub południową) szerokość ekliptyczną, jak również zerową szerokość ekliptyczną w dowolnym punkcie ekliptyki, czyli że zaćmienia mogą zachodzić w każdym miejscu ekliptyki.

Uwzględnienie tych faktów prowadziło do znacznych komplikacji teorii ruchu Księżyca w stosunku do odpowiedniej teorii ruchu Słońca. Według Ptolemeusza, konieczne było zatem dodanie dwóch niezależnych anomalii (nierówności). Pierwsza (większa) anomalia była związana z odchyleniami w długości trwania czasu, w którym Księżyc powraca do tej samej prędkości. Druga (mniejsza) zależała od względnej pozycji Księżyca i Słońca, czyli że była funkcją elongacji (przyjmowała wartości maksymalne w kwadraturach i zerowała się w syzygiach). Jednakże zgodnie z Ptolemeuszem, druga nierówność zależy od pierwszej, ale pierwsza zależy już tylko od podstawowych parametrów modelu (w przeciwieństwie do drugiej nierówności pierwsza nie zależy od średniego ruchu Słońca). Dzięki tej własności Ptolemeusz mógł konstruować swój model tak jak w rachunku zaburzeń, tzn. mógł dodawać kolejne parametry (nierówności) do modelu czyniąc go bliższym rzeczywistości. W pierwszej wersji Ptolemeusz przyjął *pośredni* model epicykliczno-deferencjany. Założył, że Księżyc porusza się po epicyklu wstecznie, ruchem retrogradacyjnym (ze wchodu na zachód) ze średnią prędkością kątową ω_k, w przeciwną stronę niż środek epicyklu, który porusza się po deferencie ruchem prostym (z zachodu na wschód) ze średnią prędkością kątową ω_e. Prędkości te nie są jednak równe, tzn. $\omega_e \neq \omega_k$. Deferent z epicyklem leżą w płaszczyźnie nachylonej 5° do płaszczyzny ekliptyki (maksymalna szerokość ekliptyczna Księżyca). Linia węzłów księżycowych obraca się wokół centrum deferentu ze wschodu na zachód z prędkością kątową ω_w = 0° 3' na dobę. Model ten pozwalał na odtworzenie (przynajmniej jakościowo) podstawowych faktów obserwacyjnych, czyli prosty ruch w długościach i szerokościach ekliptycznych, ruch linii węzłów i ruch linii absyd. Ptolemeusz oczywiście nie poprzestał tylko na jakościowym wyjaśnieniu zjawisk, ale podał również ujęcie ilościowe. W tym celu ustalił podstawowe parametry modelu, m.in. średnie prędkości kątowe ω_e i ω_k, stosunek długości promieni deferentu i epicyklu *R /r*, oraz wyprowadził ostateczną formułę, z której w oparciu o stablicowane wartości na drodze podstawowych operacji arytmetycznych (dodawania i odejmowania) można było wyznaczyć długość i szerokość ekliptyczną Księżyca w dowolnym momencie czasu.

Analizując predykcje, na jakie pozwalał ten model, Ptolemeusz zauważył, że zgadzają się one z obserwacjami jedynie w *syzygiach* (tzn. w koniunkcji i opozycji Słońca i Księżyca). W *kwadraturach* błąd modelu w długościach ekliptycznych wynosił kilka stopni. Ten stan rzeczy był oczywiście niezadawalający i dlatego Ptolemeusz, próbując uzgodnić poprawiony model z pełniejszymi danymi obserwacyjnymi, jakimi dysponował, zaproponował kolejną (drugą) wersję modelu ruchu Księżyca. Modyfikacje teoretyczne szły w parze z usprawnieniami w technice obserwacyjnej niezbędnej, jego zdaniem, do zbadania drugiej poprawki (anomalii) w ruchu Księżyca. Właśnie dlatego Ptolemeusz rozpoczął V księgę od opisu nowego przyrządu zwanego *αστρόλαβον*[11], rodzaju sfery armilarnej składającej się z pewnej liczby wyskalowanych kół (odpowiadających podstawowym elementom sfery niebieskiej), z których można było odczytać długość i szerokość ekliptyczną badanego obiektu. Porównując odczyty z przyrządu z danymi wyliczonymi z modelu, zauważył, że w kwadraturach rozbieżności dochodzą do 7° 40' (po uwzględnieniu pierwszej poprawki 5°, pozostawała jeszcze rozbieżność rzędu 2° 40'). Korekta tych błędnych wskazań modelu mogła być zrobiona jedynie poprzez uwzględnienie drugiej nierówności (anomalii) później nazwanej ewekcją. Odkrycie tej nierówności oraz sposób uwzględnienia jej w modelu ruchu Księżyca pozostaje do dziś genialnym rozwiązaniem i świadczy o wielkości Ptolemeusza.

Druga wersja modelu jest oczywiście o wiele bardzie skomplikowana niż pierwsza, a wiąże się to właśnie z uwzględnieniem *ewekcji*. Mówiąc najprościej, poprawka ta sprowadza się do takich zmian w modelu, które, po pierwsze, pozwalałyby na pozorne zmiany rozmiarów epicyklu (większe w *kwadraturach*, mniejsze w *syzygiach*, co w praktyce oznacza, że w *kwadraturach* środek epicyklu jest bliżej Ziemi niż w *syzygiach*) oraz, po drugie, uwzględniały fakt, że *ewekcja* jest funkcją elongacji Księżyca, co wskazuje na powiązania ruchu Księżyca z ruchem Słońca (dlatego model musi uwzględniać również mechanizm, który pozwalałby na wzajemne powiązanie ruchu środka epicyklu ze średnim ruchem Słońca i może być zinterpretowany jako niewykorzystana inspiracja do stworzenia układu heliocentrycznego). Pierwszy postulat Ptolemeusz realizował zamieniając koncentryczny deferent pierwszej wersji modelu na ekscentryczny w drugiej wersji, zaś drugi postulat przyjmując, że ekscentrycznie położony środek deferentu biegnie po dodatkowym epicyklu. Tak poprawiony model dawał dużo lepsze wyniki dla ruchu Księżyca, ale tylko – jak się później okazało – w pewnych charakterystycznych długościach ekliptycznych (*kwadraturach* i *syzygiach*). Test drugiej wersji modelu w *oktantach* pokazał, że szczególnie dla kątów 57° i 123° predykcje modelu znowu rozchodzą się z wynikami obserwacji. Aby uzgodnić predykcje z wynikami obserwacji nie trzeba było jednak tym razem, jak w przypadku drugiej poprawki, wprowadzać nowych parametrów do modelu, ale tylko małe korekty drugiej wersji modelu.

W trzeciej wersji Ptolemeusz zaproponował małą korektę epicyklu zwaną przez niego πρόσνευσις. W związku z tym wprowadził nowe pojecie, tzw. *średnie apogeum*. W dotychczasowej praktyce astronomicznej liczono średnią anomalię Księżyca prawoskrętnie (zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara), zaczynając od punktu na epicyklu znajdującego się w opozycji do Ziemi (punktu *prawdziwego apogeum*). Ptolemeusz zaproponował liczenie anomalii od nowego punktu, tzw. *średniego apogeum*. Punkt ten oscylował wokół punktu *prawdziwego apogeum*. Dzięki temu Ptolemeusz mógł uzyskać taką sytuację, w której model pozostawał niezmienny w *kwadraturach* i *syzygiach*, gdzie już dobrze pracował, a był zmodyfikowany tam (w *oktantach*), gdzie wykazywał rozbieżności. Przemieszczenie punktu apogeum skutkowało bowiem efektywnym zwiększeniem średniej anomalii Księżyca w taki sposób, że narastała ona asymetrycznie w stosunku do zmiany elongacji. Poprawka ta była jednak bardziej wyrazem geniuszu matematycznego Ptolemeusza, niż rzeczywiście poprawiała zdolności predykcyjne modelu. Stało się tak zapewne dlatego, że w trakcie uogólniania (wyrównywania) danych obserwacyjnych lub, być może, w trakcie dostosowywania ich do ostatecznej wersji modelu Ptolemeusz dokonał niefortunnego kompromisu, którego istota pozostaje do dzisiaj nieznana. Niemniej trzecia wersja modelu była na tyle doskonała, że pozwalała już na przewidywanie praktycznie dowolnych pozycji ekliptycznych Księżyca. Poprzez przemieszczenie płaszczyzny deferentu i płaszczyzny epicyklu (średnio o ok. 5°) model dość dobrze przewidywał również zmiany położeń Księżyca w szerokościach ekliptycznych.

Model ten zawierał poza tym jednak bardzo istotną wadę, o której zapewne Ptolemeusz wiedział. W *kwadraturach* i *syzygiach* model przewidywał bowiem zbyt duże różnice w odległości Księżyca od Ziemi (odpowiednio 33 i 64 promieni ziemskich)[12]. Z prognoz tych wynikało, że widoczna średnica kątowa Księżyca powinna być średnio 2 razy większa w *kwadraturach* niż w *syzygiach*, co było ewidentnie nieprawdziwe. Z drugiej strony, wartość średniej odległości Księżyca od Ziemi była zbliżona do średniej odległości centrum epicyklu i wynosiła 60 27/60 promieni Ziemi. Wartość ta była o wiele bliższa wartości współcześnie akceptowanej i dużo lepsza od wielkości proponowanej przez Arystarcha (19 promieni Ziemi), Posejdoniosa (52,4 promienia Ziemi), czy nawet Hipparrcha, co świadczy o niewątpliwym postępie wiedzy astronomicznej w tym okresie. Możemy przypuszczać, że Ptolemeusz był zapewne świadomy niedoskonałości modelu, który ostatecznie zaproponował, ale być może nie potrafił ich usunąć. Niektóre najbardziej widoczne niedoskonałości modelu zostały zauważone i skorygowane już w ramach astronomii arabskiej (Ibn al-Sztir), później zaś w ramach astronomii średniowiecznej (Gersonides, Kopernik), ale osobliwości ruchu Księżyca w *oktantach* związane z trzecią poprawką Ptolemeusza do modelu epicykliczno-deferencjalnego były ignorowane aż do końca XVI w., czyli aż do prac Tychona de Brahe.

2. KRYTYKA MODELU PTOLEMEJSKIEGO

Pierwsze poważne próby udoskonalenia modelu epicykliczno-deferencjalnego ruchu Księżyca pojawiły się w okresie rozkwitu astronomicznej szkoły arabskiej w Maradze[13], założonej przez Nâsir ad-Dïna al-Tusï (ok. 1201–ok. 1274). Jeden z najbardziej wybitnych astronomów tej szkoły – Ibn al-Szatir (1304–1375/6) – wykorzystując koncepcje teoretyczne al-Tusiego w poważnym stopniu zmodyfikował model ruchu Księżyca pochodzący od Ptolemeusza używając metody, która pozwalała zastąpić mimośrodowy deferent i ekwant przez układ deferentu i dwóch epicykli. Deferent o promieniu 1,0;0 porusza się z zachodu na wschód ze średnią prędkością 13°13,45' 39,40" na dobę. Pierwszy epicykl ma promień o długości 6;35, zaś promień drugiego epicyklu wynosi odpowiednio 1;25. W konsekwencji, poprawiona konstrukcja wraz z poprawionymi parametrami ruchu pozwalała na usunięcie rażących niezgodności w modelu Ptolemeusza. Zgodnie z modelem Ibn al-Shatira, odległość Księżyca od Ziemi w *syzygiach* wynosiła 54 promieni Ziemi i odpowiednio w *kwadraturach* 52 promieni Ziemi. Średnia wartość obserwowanej średnicy kątowej Księżyca wynosiła 32' 54,33" i mieściła się w przedziale 29' 2,15" ÷ 37' 58,2" nie budząc również większych zastrzeżeń[14].

Innym średniowiecznym astronomem modyfikującym model Ptolemeusza był Levi ben Gerson (Gersonides) (1288–1344). W swoich pracach astronomicznych[15] rozwijał tradycję astronomiczną Abrahama bar Hiyya (ok. 1100–1135), Abrahama ibn Ezry (ok. 1090–ok. 1167), Avicenny (980–1037) i Averroesa (1126–1198), ale przede wszystkim Ptolemeusza. Charakterystyczne dla niego było jednak to, że niewolniczo nie naśladował tej tradycji, ale twórczo ją przekształcał. Przede wszystkim nie zgadzał się ze stanowiskiem Ptolemeusza, które zakładało, że konstrukcje koła ekcentrycznego oraz deferentu z epicyklem są geometrycznie równoważne. W przeciwieństwie do tego stanowiska, Levi Ben Gerson twierdził, że (w szczególności w przypadku ruchu Księżyca) obie te konstrukcje można odróżnić przy pomocy danych obserwacyjnych. Charakterystyczne jest również to, że przedkładał własne obserwacje, często prowadzone z wykorzystaniem nowych instrumentów obserwacyjnych oraz udoskonaleń teoretycznych[16], nad obserwacje starożytne, w szczególności te, które przytaczał Ptolemeusz w swoim *Almageście*. Najbardziej krytykował jednak ptolemejską wersję modelu ruchu Księżyca, podkreślając że jest ona nie do przyjęcia, gdyż nie zgadza się z obserwacjami.

Tymi samymi motywami (tzn. brakiem pełnej zgodności predykcji modelu z obserwacjami) kierował się również Kopernik. Jego modyfikacja (trzeciej wersji) Ptolemeusza epicykliczno-deferencjalnego modelu ruchu Księżyca pod względem koncepcji konstrukcyjnej była identyczna z modyfikacją Ibn al-Szatira. Trudno jest jednak przesądzać na ile wersja Kopernika modelu ruchu Księżyca zaprezentowana w IV księdze *De Revolutionibus* jest zapożyczeniem koncepcji Ibn al-Szatira, ale nie ulega wątpliwości, że pod względem geometrycznym modele były identyczne (deferent z dwoma epicyklumi)[17]. Kopernik, krytykując model Ptolemeusza, przede wszystkim zaatakował koncepcję ekwantu, która była nie do pogodzenia – jego zdaniem – z (platońską) zasadą ruchów jednostajnych[18]. Istotny aspekt jego krytyki dotyczył również błędnie przewidywanych przez ten model paralaks Księżycowych (i w efekcie źle szacowanych odległości Księżyca od Ziemi w kwadraturach). W swoim dziele Kopernik powołał się na dwie własne obserwacje[19]. Pierwsza pochodziła z 27 września 1522 r. i dawała paralaksę Księżyca równą 50' (różnica pomiędzy predykcją płynącą z modelu Ptolemeusza sięgała 17'), druga była wykonana 7 sierpnia 1524 r. i dawała wartość paralaksy równą 1° 5', podczas gdy przewidywania modelu Ptolemeusza dawały 1° 38' (różnica 33'). Różnice te były zatem niewielkie i mogły być częściowo wyjaśnione przez refrakcję, ale dla Kopernika stanowiły one tylko dodatkowe potwierdzenie jego wcześniejszych domysłów co do ostatecznej struktury świata.

Chociaż Kopernika teoria ruchu Księżyca była najmniej kontrowersyjna i jako taka mogła być najszerzej zaakceptowana, to jednak również budziła poważne kontrowersje w kręgu astronomów. *Tablice Pruskie*, obliczone przez E. Reinholda, na podstawie modelu Kopernika oferowały tylko względnie lepszą dokładność i wymagały w wielu miejscach daleko idących poprawek. Ten stan rzeczy próbował radykalnie zmienić Tycho de Brahe realizując program radykalnej odnowy astronomii, głównie w oparciu o nowe wyniki obserwacji astronomicznych uzyskanych w jego obserwatorium na wyspie Hven[20]. Trudno powiedzieć, czy Tycho prowadził systematyczne badania Księżyca w ramach swojego ogólnego programu odnowy astronomii, ale faktem jest, że uważnie obserwował widoczne w Hven zaćmienia Księżyca (obserwacji dokonywały trzy niezależne grupy obserwatorów). W ciągu pierwszych pięciu lat od 1581 r., czyli od momentu realizacji programu odnowy astronomii, przeprowadził w sumie około 150 obserwacji Księżyca[21], ale tylko nieliczne z nich zostały wyrażone we współrzędnych ekliptycznych, a jeszcze mniej było porównanych z predykcjami modelu (ptolemejskiego lub kopernikańskiego).

Trzeba też mieć na uwadze fakt, że Tycho ostrożniej atakował epicykliczno-deferencjalny model ruchu Księżyca w wersji Kopernika niż działo się to w przypadku pozostałych modeli systemu heliocentrycznego. Wynikało to m.in. i z tego, że kopernikańska korekta modelu epicykliczno-deferencjalnego odnosiła się tylko do ruchu w długościach ekliptycznych, pozostawiając niezmienioną tę część modelu, która zajmowała się ruchem Księżyca w szerokościach ekliptycznych (i którą właśnie interesował się Tycho rozwijając swoją teorię paralaksy). Tradycyjnie przyjmowano, idąc za Ptolemeuszem, że płaszczyzna deferentu jest nachylona do płaszczyzny ekliptyki o 5°. Ogólnie można powiedzieć, że ta część modelu była jednak notorycznie błędna[22]. Jednakże rozbieżności jakie pojawiały się były najczęściej rzędu 15' oraz pozostawały poza zasięgiem starożytnych i średniowiecznych technik obserwacyjnych, których dokładność była właśnie tego rzędu.

Tycho de Brahe, korzystając z udoskonalonych przyrządów astronomicznych, obserwował ruch Księżyca zarówno w długościach, jak i szerokościach ekliptycznych. Od dawna pracował też nad udoskonaleniem technik (bezpośredniego) wyznaczania paralaks (z intencją wykorzystania ich m.in. do wyznaczenia odległości komet od Ziemi). W dużej mierze udało mu się to dzięki uwzględnieniu poprawki związanej z refrakcją, ale ostateczny sukces zależał od poprawnej teorii ruchu Księżyca w szerokościach ekliptycznych. Na początku 1587 r. (9 stycznia), a więc około pięć lat od rozpoczęcia badań, Tycho odkrył, że przyjmowana dotychczas wartość nachylenia płaszczyzny orbity Księżyca (5°) w stosunku do płaszczyzny ekliptyki jest poprawna jedynie w *syzygiach*, a w *kwadraturach* jest za mała. Bardziej poprawna według niego wartość tej wielkości powinna wynosić 5° 15'. Wówczas udało się mu uzgodnić (w granicach jego standardów dokładności pomiarów, tzn. mniej niż 4') teorię z doświadczeniem. Jednakże dopiero 13 lat po rozpoczęciu realizacji swoje programu (dokładnie 28 października 1594 r.) Tycho trafił na trop odkrycia zupełnie nowej poprawki w ruchu Księżyca, która później została nazwana *wariacją*. Uświadomił sobie wówczas, że większa wartość nachylenia orbity Księżyca do ekliptyki stwierdzona przez niego nie jest efektem jej narastania od czasów Ptolemeusza, ale efektem cyklicznych zmian w ciągu każdego miesiąca synodycznego. Ta nierównomierność ruchu Księżyca w szerokościach ekliptycznych, związana z oscylacją węzłów księżycowych, nazywa się właśnie *wariacją*.

Odkrycie *wariacji* przez Tychona nie poddaje się jednak łatwej charakterystyce. Przede wszystkim trudno jest ocenić, co było bezpośrednią przyczyną tego odkrycia i w związku z tym, jak należy interpretować to odkrycie (w schematach interpretacyjnych hipotetyzmu, czy może indukcjonizmu?)[23]. Uwzględnienie *wariacji* w teorii ruchu Księżyca prowadziło do kolejnych modyfikacji epicykliczno-deferencjalnego modelu. Zgodnie z koncepcją Tychona, ażeby oddać oscylację bieguna orbity Księżycowej w ciągu miesiąca synodycznego, należy dodać dodatkowy epicykl. Tycho próbował modyfikować model Kopernika, który już posiadał dwa epicykle i dlatego ostateczna wersja jego modelu była o wiele bardziej skomplikowana, ale i tak nie uwzględniała wszystkich jego odkryć i dopiero Kepler (ale już w ramach systemu heliocentrycznego, w którym została wykorzystana teoria krzywych stożkowych Apolloniusza) potrafił zebrać wszystkie odkrycia Tychona w jedna spójną teorię. Jednakże z punktu widzenia historii astronomii nowa teoria ruchu Księżyca, będąca konsekwencją odkrycia *wariacji*, jest bardziej trwałym i ponadczasowym dokonaniem Tychona de Brahe niż dokładność jego obserwacji.

Przypisy

[1] Szczegółowo zagadnienia te były badane m.in. przez historyków filozofii starożytnej. Por. m.in. Ch. H. K a h n : *On Early Greek Astronomy*, „The Journal of Hellenic Studies" 90: 1970 s. 99–116; D. O ' B r i e n : *The Relation of Anaxagoras and Empedocles*. „The Journal of Hellenic Studies" 88: 1968 s. 94–113; t e n ż e : *Derived Light and Eclipses in the Fifth Century*, „The Journal of Hellenic Studies" 88: 1968 s. 114–127; D. R. D i c k s : *Solstices, Equinoxes, & the Presocratics*. „ The Journal of Hellenic Studies" 86: 1966 s. 26–40.

[2] Niektóre zagadnienia greckich geometrycznych modeli ruchu Księżyca (w niniejszym artykule utożsamiam pojęcia modelu matematycznego i teorii) dyskutowano (m.in. Sédillot, Biot, Arago, Damoiseau, Libri, Munk, Reinaud, de Slane, Chasles, Leverrier) bardzo intensywnie już w latach 1836–1871 we Francuskiej Akademii Nauk. Problem ten porusza również (ale w sposób niezbyt kompetentny) w swojej monumentalnej pracy

P. D u h e m (*Le Systèm du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*. t. 1, Paris: Hermann 1913 s. 494). Dużo uwagi poświęcają temu zagadnieniu autorzy klasycznych już opracowań dotyczących historii astronomii. Por. m.in. J. B. J. D e l a m b r e (*Histoire de l'astronomie ancienne*. v.1–2, Paris 1817); P. T a n n e r y (*Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*. Paris 1893); J. L. E. D r e y e r (*History of the Planethary Systems from Thales to Kepler*. New York: Dover Publications 1953). Z prac nowszych problematykę związaną z greckimi (geometrycznymi) modelami ruchu Księżyca oraz ich recepcją w astronomii średniowiecznej i nowożytnej omawiają m.in. P. d e l S a n t o , G. S t r a n o : *Observational Evidence and the Evolution of Ptolemy's Lunar Model*. „Nuncius" 11/1: (1996) s. 94–112; B. R. G o l d s t e i n : *Levi ben Gerson's Preliminary Lunar Model*. „Centaurus" 18: 1974 s. 275–288; B. R. G o l d s t e i n : *Levi ben Gerson's Lunar Model*. „Centaurus" 16: 1972 s. 257–284; W. H a r t n e r : N*asir al-Dd'n alTūsd's Lunar Theory*. „Physis" 11: 1969 s. 287–304; V. M. P e t e r s e n : *The Three Lunar Models of Ptolemy*. „Centaurus" 14: 1969 s. 142–171; G. J. T o o m e r : *The Size of the Lunar Epicycle According to Hipparchus*. „Centaurus" 12: 1967 s. 145–150; V. R o b e r t s : *The Solar and Lunar Theory of Ib ash-Shātir. A Pre-Copernican Copernican Model*. „Isis" 48: 1957 s. 428–432. Por. również O. N e u g e b a u e r : *The Exact Sciences in Antiquity*. New York: Dover Publications 1969 s. 191–198, 206–207.

[3] Często przyjmuje się, na podstawie relacji parypatetyckiego filozofa Sozygenesa (ok. 50 p.n.e.), ale znanej nam z pism Simplicjusza (ok. 500 n.e.–ok. 549 n.e.), że to właśnie Platon postulował poszukiwanie teorii astronomicznej pozwalającej wyjaśnić obserwowane ruchy planet jako pozorne. Niektórzy historycy nauki wątpią jednak w wiodąca rolę Platona w kształtowaniu standardów metodologicznych astronomii greckiej, sugerując wręcz, że zgodnie z prawdą historyczną wiek Platona powinno się raczej nazywać wiekiem Eudoksosa (rzeczywistego realizatora postulatu Platona. Trzeba mieć również na uwadze – zgodnie z wcześniejszym świadectwem Geminosa (ok. 70 p.n.e.) – że to już pitagorejczycy ze starej szkoły jako pierwsi uznali za wręcz nieprzyzwoite twierdzenie dopuszczające możliwość, że za chaotycznymi ruchami nie kryje się racjonalna i matematycznie prosta rzeczywistość. W świetle tych faktów ciągle kontrowersyjna pozostaje rola Platona, jaką odegrał w kształtowaniu się astronomii. Tacy historycy nauki jak S. S a m b u r s k i (*The Physical World of the Greeks*. New York: The Crowell-Collier Publishing Company 1962 s. 59–63) dezawuują wkład Platona w rozwój astronomii, wskazując że przez dowartościowanie roli spekulacji kosztem obserwacji Platon wręcz opóźnił rozwój nauk ścisłych. Według innych (G. E. R. L l o y d : *Early Greek Science*, tłum. pol. J. L e s i ń s k i : *Nauka grecka od Talesa do Arystotelesa*. Warszawa: „Prószyński i S-ka" 1998 s. 78–80; A. G r e g o r y : *Astronomy and Observation in Plato's Republic*. „Studies in History and Philosophy of Science" 27/4: 1996, s. 470), postulat korzystania z obserwacji, zarówno w samej astronomii, jak i szerzej, w badaniu przyrody, odgrywał zawsze kluczową rolę w metodologii platońskiej, a sam Platon wniósł duży wkład w nowe rozumienie astronomii jako nauki matematycznej. Por. także I. B u l m e r - T h o m a s : *Plato's Astronomy*. „Classical Quarterly" 34: 1984 s 107–112;

A. P. D. Mourelatos: *Astronomy and Kinematics in Plato's Project of Rationalist Explanation*. „Studies in History and Philosophy Science" 12: 1981 s. 1–32.

[4] Ściśle biorąc (według Ptolemeusza, *Almagest* ks. XII, roz. 1), Apolloniusz odkrył zależność pomiędzy prędkością kątową planety krążącej po epicyklu ω_p i prędkością kątową środka tego epicyklu ω_e biegnącego po deferencie, pozwalającą odtwarzać pozorne zatrzymywanie się planet. Twierdzenie to (ks. XII, roz. 1 *Almagestu*) głosi, że w ruchu planety *P* po epicyklu istnieje takie jej położenie *S* określone przy pomocy zależności (we współczesnej notacji): $^1/_2\, SP : ZS = \omega_p : \omega_e$, przy którym prędkość kątowa planety obserwowanej ze środka Z deferentu równa się zeru. Powyższa interpretacja twierdzenia Apolloniusza wynika ze współczesnego dowodu tego twierdzenia opartego na konstrukcji równoległoboku prędkości. Szczegóły tego dowodu można znaleźć w B. L. Van der Waerden: *Science Awekening*. Gröningen 1954 s. 238. Por. O. Pedersen: *A Survey of the Almagest*. Odense: Odense University Press 1974 s. 331–332; J. North: *The Fontana History of Astronomy and Cosmology*. London: Fontana Press 1994 s. 89–92. Por. też C. Ptolemy: *The Almagest*. »Great Books of Western World 16«, tłum. ang. R. C. Taliaferro, Chicago-London-Toronto-Geneva: *Encyclopaedia Britanica*, Inc. The Univeresity of Chicago 1952 s. 391–397.

[5] Zgodnie z komentarzem Teona ze Smyrny (ok. 130 n.e.), Hipparch postawił współczesnym mu matematykom problem polegający na podaniu wyjaśnienia zgodności predykcyjnych, jakie dają z jednej strony model epicykliczno-deferencjalny, z drugiej zaś model koła ekscentrycznego. Ptolemeusz referuje tę zasadę w IV księdze (roz. 5) *Almagestu*, dz. cyt. s. 120–122.

[6] Babilończycy w epoce Seleucydów posiadali już bardzo precyzyjne schematy komputacyjne pozwalające poprawnie przewidywać niektóre zjawiska astronomiczne, m.in. zaćmienia Słońca i Księżyca. Schematy te miały jednak czysto arytmetyczny charakter w przeciwieństwie do astronomii greckiej, która od początku przedkładała nad schematy arytmetyczne modele geometryczne. W szczególności Babilończycy odkryli, że po okresie 6 585 1/3 dni powtarza się cykl zaćmień Księżyca. Okres ten zawiera 223 miesiące synodyczne (okres, po którym Księżyc powraca do tej samej fazy), 239 miesięcy anomalistycznych (okres, po którym Księżyc powraca do tej samej prędkości kątowej), 242 miesięcy smoczych (okres, po którym Księżyc powraca do tego samego węzła orbity) i 241 miesiące syderyczne (okres, po którym Księżyc powraca do tej samej pozycji wśród gwiazd). Później, już na gruncie astronomii greckiej, wprowadzono w celu uniknięcia ułamków, nowy cykl zwany εξελιγμός. Cykl ten został opisany przez Geminosa (I w. p.n.e.), szczegółowo pisze też o nim Ptolemeusz (*Almagest*, ks. IV, roz. 2). Był on 3-krotnością cyklu 18 letniego (rok gwiazdowy) i zawierał 19 756 dni. Hipparch, jak pisze Ptolemeusz, znalazł później bardziej poprawne wartości (4 267 miesięcy syderycznych = 4 573 miesięcy anomalistycznych). Okrył też różnicę pomiędzy długością roku gwiazdowego i zwrotnikowego. Długość roku zwrotnikowego wyznaczył na 365 $^1/_4$ – $^1/_{300}$ doby. Oszacowanie to było wynikiem odkrytej przez niego nowej (bardziej poprawnej) wartości cyklu: 111 035 dni = 3 760 miesięcy synodycznych. Wartości te pozwalają również na wyznaczenie podstawowego parametru modelu epicykliczno-deferencjalnego, a mianowicie prędkości kątowej środka epicyklu na kole deferentu. W przeciwieństwie

do analogicznego modelu dla ruchu Słońca, prędkość środka epicyklu na deferencie nie jest równa (jest trochę większa) prędkości ciała niebieskiego na epicyklu. Por. W. H a r t - n e r : *Eclipse Periods and Thales'Prediction of Solar Eclipse. Historic Truth and Modern Myth.* „Centaurus“ 14: 1969 s. 60–71; G. H u x l e y : *Aristarchus of Samos and Graeco-Babylonian Astronomy.* „Greek and Byzantine Studies“ 5: 1964 s. 123–131. D. P a n - c h e n k o : Tales's Prediction of a Solar Eclipse. „Journal for the History of Astronomy“ T. 25:1994 s. 275–288. Por. również O. N e u g e b a u e r : *The Exact Sciences in Antiquity.* New York: Dover Publications 1969 s. 103–110.

[7] Określenie takie może być mylące, gdyż model epicykliczno-deferencjalny występuje w dwóch różnych wersjach. W pierwszej wersji prędkości kątowe deferentu i epicyklu mają tę samą orientację (znak), w drugiej mają różne orientacje (znaki). W pierwszej wersji ruch odbywa się z zachodu na wschód (w późniejszej terminologii łacińskiej: *secundum ordinem signorum*) a model nazywa się wówczas prostym lub bezpośrednim. W drugiej wersji ruch odbywa się ze wschodu na zachód (*contra ordinem signorum*) i model taki nazywa się wówczas pośrednim.

[8] Oryginalny grecki tytuł tego dzieła jest następujący: *Μηματικης Σύντάξεως βιβδα τγ*, co można by przetłumaczyć jako: *Matematyczny zbiór w trzynastu księgach.* Później znano to dzieło pod tytułem *Μεγάλη σύνταξις*, czyli *Wielki zbiór*. Z czasem przymiotnik μεγᾶλη zastąpiono innym bliskoznacznym przymiotnikiem μεγίστη, który to oddano w tłumaczeniu arabskim jako *al-madżisti* (*Kitâb al-madżisti*), wersja zlatynizowana przybrała zaś postać *Almagest*. Historia arabskich przekładów dzieła Ptolemeusza zawiera wiele niejasności (m.in. nie wiadomo z całą pewnością kto i kiedy po raz pierwszy przełożył to dzieło na język arabski). Najpoważniejszym kandydatem wydaje się być żydowski uczony Sahl al-Tabarï (ok. 810 n.e.), aczkolwiek istnieje wiele świadectw przemawiających za istnieniem wcześniejszych przekładów. Inne tłumaczenie, jednakże opierające się nie na oryginale greckim, ale na przekładzie syryjskim, ukazało się w Bagdadzie w latach 829–830 i było dziełem al-Hajjāja ibn Yusufa. To właśnie temu tłumaczeniu zawdzięczamy obecny tytuł *Almagest*, jednakże najbardziej rozpowszechniona arabska wersja *Almagestu* była tłumaczeniem bezpośrednio z oryginału greckiego pochodzącym od Ishāqa ibn Hunaina (zm. 910/911). Tłumacz ten co prawda nie miał specjalistycznego przygotowania astronomicznego, ale tłumaczenie jego było przejrzane i poprawione przez znakomitego astronoma Thābita ibn Qurra (827 – 901). W oparciu o to tłumaczenie powstało wiele późniejszych parafraz tego tekstu, najbardziej wpływową okazała się parafraza pochodząca od astronoma Jābira ibn Afflaha (Gebera). Na łacińskim zachodzie przed XII wiekiem Ptolemeusz znany był tylko ze wzmianek u Pliniusza Starszego i innych, późniejszych, kompilatorów, m.in. Izydora z Sewilli. Ten stan rzeczy radykalnie zmienił się w następnych wiekach. Już w połowie XII wieku (1175), w Toledo ukazało się najbardziej rozpowszechnione w średniowiecznej Europie łacińskie tłumaczenie pochodzące od Gerarda z Kremony (w 1909 r., niezależnie od siebie, Lockwood i Bjørnobo odkryli wcześniejsze, bo pochodzące z 1160 r. łacińskie tłumaczenie *Almagestu* bezpośrednio z greki). Tłumaczenie to zostało wydrukowane później pod tytułem *Geberi Filii Affla Hispalensis De astronomia libri IX. in quibus Ptolemśum, alioqui doctissmum, emendauit*, w postaci apendyksu do dzieła Piotra Apianusa pt.

Instrumentum primi mobilis, Norimbergae 1534. Oprócz tego istniały też inne łacińskie tłumaczenia z XIII, początków XIV i XV w. Kanoniczne wydanie greckiego tekstu *Almagestu* przygotował J. L. Heiberg (*Claudii Ptolemaei opera quae exstant omnia. Syntaxis Mathematica*. V. I. pars 1–2. Lepizig: Bibl. Teubneriana 1898, 1903). Współcześnie dostępne są tłumaczenia *Almagestu* na podstawowe języki europejskie: francuski (M. Halma), niemiecki (K. Manitius) i angielski (R. C. Taliaferro). Najnowsze tłumaczenie *Almagestu* na język angielski jest dziełem G. J. Toomera (*Ptolemy's Almagest*. London: Springer Verlag 1984). Por. G. Sarton: *Introduction to the History of Science*. V. 1. Baltimore 1927, s. 600, 611; J. Vernet: *L'astronomie dans l'"Islam occidental*. „Archives Internationale d'Histoire des Sciences" 16: 1963 s. 225–240; O. Pedersen: *A Survey of the Almagest*. Odense: Odense University Press 1974 s. 13–25.

[9] Wybór tej metody był podyktowany koniecznością uwolnienia się od błędu przy ocenie położenia Księżyca pochodzącego głównie od średniej równikowej paralaksy horyznotalnej i refrakcji. Zaćmienia Księżyca użyte w tej metodzie nie muszą być ani całkowite, ani kolejne, gdyż w kulminacji zaćmienia Księżyc zawsze jest w pozycji o 180° przesunięty w stosunku do pozycji Słońca, którą to pozycję z kolei można łatwiej wyznaczyć z modelu ruchu Słońca (epicykl z deferentem, lub ekscentryk). Modele takie wyjątkowo dobrze aproksymują orbity eliptyczne (dają przybliżenie rzędu 1'). Metoda ta pozwalała na wyznaczenie brakujących parametrów modelu, tzn. stosunku promieni epicyklu i deferentu oraz długości ekliptycznej apogeum. Matematyczne szczegóły metody trzech zaćmień zrekonstruowne są m.in. w P. Santo, G. Strano: *Observational Evidence and the Evolution of Ptolemy's Lunar Model*. „Nuncius" 11/1: (1996) s. 95–101.

[10] Wartości te pododaję za Almagestem (ks. IV, roz. 11), Ptolemeusz, dz. cyt. s. 139–142. Por. też. G. J. Toomer: *The Size of the Lunar Epicycle According to Hipparchus*. „Centaurus", 12: 1967 s. 147; J. P. Britton: *Models and precision: the quality of Ptolemy's observations and parameters*. London-New York: Garland Publishing Inc. 1992 s. 40–47; P. Tannery: *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*. Paris 1893 s. 206–208.

[11] Przyrządu tego nie należy utożsamiać z astrolabium (który to przyrząd również znał Ptolemeusz), jednym z najbardziej popularnych przyrządów pomiarowych używanym nie tylko w astronomii, ale stosowanym również do pomiarów w kartografii i astronawigacji. Szczegółowo na temat astrolabium we wczesnym okresie rozwoju astronomii pisze O. Neugebauer: *The Early History of the Astrolabe*. „Isis" 46: 1955 s. 240–256.

[12] Liczby tę były wyprowadzone z pomiarów paralaksy Księżyca za pomocą przyrządu paralaktycznego, który pozwalał mierzyć pozorną kątową odległość Księżyca od zenitu (linijka paralaktyczna). Konstrukcja tego instrumentu pomiarowego została opisana przez Ptolemeusza w *Almageście* (ks. V, roz. 12). Ptolemeusz przytacza jeden pomiar paralaksy. Pomiar ten był wykonany w Aleksandrii 1 X 35 n.e. o godz. 17^{50}. Wynik pomiaru był równy 50° 55'. Ta empiryczna wielkość była następnie punktem wyjścia kalkulacji wykonanej w oparciu o teorię Słońca i Księżyca. W wyniku obliczeń można było podać wartość paralaksy Księżyca równą 1° 7' oraz wartość średniej równikowej paralaksy horyzontalnej 1° 26'. Wynik ten jest błędny, gdyż współcześnie akceptowana wartość średniej równikowej paralaksy horyzontalnej jest równa 0° 57'. Z obliczeń

Ptolemeusza wykonanych w ramach jego modelu wynikało, że paralaksa powinna wahać się od 53' 34" do 1° 1' 30", co daje powyższe liczby. Ptolemeusz, dz. cyt., s. 167–171. Por. O. Pedersen: *A Survey of the Almagest*. Odense: Odense University Press 1974 s. 203–217.

[13] W ramach działalności tej szkoły powstało bardzo dobrze wyposażone (m.in. w wielki kwadrant murowany, linie paralaktyczne, sferę armilarną oraz kwadranty ustawione w azymucie) obserwatorium astronomiczne w Maradze. Pod wieloma względami ta instytucja naukowa miała współczesną strukturę, posiadała też bardzo bogato wyposażoną bibliotekę naukową. Por. m.in. G. Saliba: *The Role of Maragha in the Development of Islamic Astronomy: A Scientific Revolution Before the Renaissance*. „Revue de synthèse" 4/3–4: 1987 s. 361–373.

[14] Powyższe dane podaję za: V. Roberts: T*he Solar and Lunar Theory of Ib ash-Shātir. A Pre-Copernican Copernican Model*. „Isis" 48: 1957 s. 432.

[15] Jego główne traktaty astronomiczne stanowią zaledwie pierwszą część 5 tomu jego zasadniczego dzieła *Walki Boga*, ale objętościowo porównywalne są z całością dzieła. Hebrajski tekst tego dzieła został wydany (*Milchamot Ha-schem*, Leipzig 1866), ale część astronomiczna nie została opublikowana i pozostaje w rękopisie. Por. także B. R. Goldstein: *Astronomical and Astrological Themes in the Philosophical Works of Levi ben Geron*. W: B. R. Goldstein: *Theory and Observation in Ancient and Medieval Astronomy*. London: Variorum Reprints 1985 s. 221–224; B. R. Goldstein: *Theory and Observation in Medieval Astronomy*. „Isis" 63: 1972 s. 39–47; B. R. Goldstein: *Ibn al-Muthannā's Commentary on the Astronomical Tables of al-Khwārizmi*. New Haven 1967.

[16] Levi ben Gerson przede wszystkim udoskonalił wynaleziony wcześniej w XIII w., najprawdopodobniej przez Jakuba ben Makir, przyrząd złożony z dwóch krzyżujących się prętów służący do pomiarów kątów pomiędzy dwoma obiektami, zwany „laską Jakuba" (*baculus Jacobi*). Gersonides wyposażył ten przyrząd w skalę diagonalną. Do obserwacji przesileń słonecznych używał zaś *camera obscura*. Rozwijał też trygonometrię (napisał po hebrajsku, przetłumaczony później na łacinę, traktat z trygonometrii planinarnej), zapoczątkowaną w pierwszej połowie XIV w., w ramach oksfordzkiej szkoły astronomicznej przez Jana Maudith (ok. 1310), Tomasza Bradwardine'a (zm. 1349) i Ryszarda z Wallingfordu (ok. 1292 – 1355). Autorzy ci znali pojęcie tangensa i stosowali zapomnianą na Zachodzie hindusko-arabską technikę komputacyjną znaną z tablic astronomicznych al-Zarqualego, polegającą na zastosowaniu w trygonometrii planinarnej sinusów w miejsce cięciw stosowanych w tradycji geometrii greckiej sięgającej czasów Hipparcha. Por. A. C. Crombie: *Augustine to Galileo*, v. 1. *Science in the Middle Ages V–XIII Centuries*. London: The Heinemann Group of Publishers 1959 s. 96–97.

[17] O związkach koncepcji Ibn al-Szātira z modelem ruchu Księżyca Kopernika przekonani są raczej N. M. Swerdlow (*The Derivation and First Draft of Copernicus's Planethary Theory: A Translation of the Commentariolus with Commentary*, „Proceedings of the American Philosophical Society" 117: 1973 s. 423–512; O. Neugebauer (N. M. Swerdlow, O. Neugebauer: *Mathematical Astronomy in Copernicus's »De Revolutionibus«*. New York: Springer 1984 s. 47); V. Roberts (dz.

cyt., s. 432) oraz J. N o r t h (dz,. cyt., s. 280, 290). Odmiennego zdania jest m.in. J. Dobrzycki. Według niego: „Nie ma przesłanek, które świadczyłyby o zapożyczeniu tego rozwiązania przez Kopernika. Można sądzić, że zbieżność powstała wskutek przyjęcia przez obu badaczy takich samych założeń wyjściowych, zwłaszcza zaś uznania jednostajnego ruchu kołowego za jedynie dopuszczalny w kinematyce ciał niebieskich". J. D o b r z y c k i : *Mikołaj Kopernik*. W: E. R y b k a (red.): *Historia astronomii w Polsce*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk: Ossolineum 1975 t. 1 s. 152.

[18] W rozdziale 2 IV księgi *De Revolutionibus*, krytykując koncepcję ekwantu, Kopernik wyraźnie odwołuje się do podstawowego założenia ówczesnej astronomii, a mianowicie do (platońskiej) zasady jednostajnych ruchów po okręgu jako do zasady regulatywnej: „Jeżeliby więc tak było, co odpowiemy na twierdzenie, że ruch ciał niebieskich jest równomierny i tylko jako zjawisko wydaje się nierównomierny, jeżeli widomy ruch równy epicyklu będzie w rzeczy samej nierówny i zajdzie kompletne przeciwieństwo do ustalonej i przyjętej zasady? Jeżeli natomiast ktoś twierdził, że epicykl porusza się równomiernie wokół środka Ziemi i że to wystarczy do utrzymania równomierności, to jakaż tedy będzie owa równomierność na obcym kole, po którym ruch jego nie odbywa się, lecz na własnym kole ekcentrycznym?". M. K o p e r n i k : *Dzieła wszystkie*. T. 2 *O obrotach*, tłum. M. Brożek, S. Oświęcimski, Warszawa: PWN 1976 s. 172. Por. także R. C o l e : *Ptolemy and Copernicus*, „Philosophical Review" 71: 1962 s. 476–482.

[19] W księdze I *O obrotach* Kopernik podaje, że minimalna odległość Księżyca od Ziemi jest większa niż 49 promieni Ziemi (tzn. zawiera się pomiędzy 49 a 50), ale później informacji tej nie potwierdza swoimi obserwacjami. Zgodnie z późniejszymi obserwacjami przyjmuje, że minimalna odległość Ziemi od Księżyca jest równa (52;17) 52 17/60 promieni Ziemi. Współcześnie przyjmuje się, że pozioma równikowa paralaksa geocentryczna waha się pomiędzy 53',9 i 61',5, co daje wartość średnią 57' 2",5. Przy takich paralaksach minimalna odległość Księżyca od Ziemi jest równa 356 tys. km (55,87 średniego promienia Ziemi). Por. komentarz A. B i r k e n m a j e r a w: M. K o p e r n i k : *Dzieła wszystkie*, t. 2, s. 351.

[20] W lutym 1576 r. król Danii Fryderyk II podarował Tychonowi wyspę Hven na duńskim Sundzie. Zapewnił też finansowanie obserwatorium astronomicznego, które tam wkrótce powstało. Obserwatorium to nazywało się *Uraniborg* i było wyposażone w najlepsze w ówczesnym czasie obserwacyjne instrumenty astronomiczne, a mianowicie przyrząd paralaktyczny Ptolemeusza, sferę armilarną, sekstanty, oktanty oraz kwadranty azymutalne. Obserwatorium tworzyło kompleks zabudowań, w skład których wchodziła m.in. nie tylko papiernia, drukarnia oraz pomieszczenia dla licznych asystentów, ale również i ogród botaniczny. Szerzej o życiu i działalności naukowej Tychona de Brahe ma wyspie Hven pisze m.in. J. R. C h r i s t i a n s o n : *Tycho Brahe in Scandinavian Scholarship*. „History of Science", 36: 1998, s. 467–484. Por. także O. P e d e r e s e n : *Tycho Brahe og astronomiens genfřdsel*. Aarchus: Steno Museets Venner 1997. Por. także H. R a e d e r , B. S t r ö m g r e n : *Tycho Brahe's Description of his Instruments and Scientific Works as given in Astronomiae Instauratae Mechanicae*. Kopenhaga 1946.

[21] Obserwacje Księżyca przeprowadzone przez Tychona można znaleźć w 11 tomie jego dzieł zebranych (J. L. E. D r e y e r : *Tychonis Brahe Dani Opera Omnia*. Copenhagen: Libraria Glydendaliana 1913–1929).

[22] Błędy modelu zależały od kątowej odległości pomiędzy Księżycem i węzłem (β) oraz odległości kątowej węzła od Słońca (φ). Według modelu Ptolemeusza (we współczesnej notacji), szerokość ekliptyczną Księżyca można było wyznaczyć ze wzoru: $5° \sin\beta$. Według współczesnych ujęć, zależność tę wyraża wzór: $5° 9' \sin\beta + 9' \sin(\beta - 2\varphi)$. Por. V. E. T h o r e n : *An Early Instance of Deductive Discovery: Tycho Brahe's Lunar Theory*. „Isis" 58: 1967 s. 20.

[23] Por. V. E. T h o r e n : *Tycho Brahe's Discovery of the Variation*. „Centaurus" 12: 1967 s. 154; V. E. T h o r e n : *An Early Instance of Deductive Discovery: Tycho Brahe's Lunar Theory*. „Isis" 58: 1967 s. 19–36. Szerzej o życiu i odkryciach Tychona de Brahe pisze autor klasycznej już monografii na ten temat J. L. E. D r e y e r : *A Picture of Life and Work in the Sixteenth Century*. New York: Dover Pub. 1963. Por. także V. E. T h o r e n : *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*. Cambridge: Cambridge University press 1990.

Zenon E. Roskal

ON THE ORIGINS AND EVOLUTION OF THE LUNAR THEORY

The lunar theory is particularly important not only for astronomy but also for the history of astronomy, and that for more reasons than one. The lunar model is concerned with the parallax, distance and size of the Moon, computation of eclipses and, therefore, has a special position in any theoretical system of astronomy. On the other hand, it must necessarily be geocentric, regardless of the geocentric or heliocentric character of the system in general. From this point of view, the lunar theories of the various systems are particularly interesting for a comparison of the geometrical properties of such systems without respect to their physical interpretation. Ptolemy's lunar model produced reasonably good results for the Moon's longitude but there is an enormous variation in the distance of the Moon from the Earth. The major contribution to the lunar theory by Ibn ash-Shātir and Copernican lies exactly in the elimination of this Ptolemaic fault. Copernicus altered significantly the Ptolemaic model of the Moon's motion in longitude. His work was a virtual prerequisite to an improved theory of latitudes, but it by no means assured accomplishment of the task. Tycho de Brahe had learned the Copernican lesson of double epicycles but he was led to look more deeply into the Moon's motion, in latitude as well as longitude. He never managed to fit all of his discoveries into a satisfying model of the Moon's motion, although what he did for lunar theory was nevertheless of immense importance.

The first part of this article is devoted to the classical method introduced by Hipparchus for the determination of the preliminary lunar model and to the methods and procedures by which Ptolemy was led to the definitive form of his lunar model. In the

second part of this article the attempts (by Ibn ash-Shātir, Levi ben Gerson, Copernicus and Tycho de Brahe) to correct the obvious discrepancies between Ptolemy's lunar model and the observations are presented.