Antoni Opolski

Orbity planet górnych w heliocentrycznym układzie Kopernika

Kopernik umieścił Ziemię na trzeciej orbicie, licząc od Słońca, co spowodowało podział układu planetarnego na dwie części:
1. dwie orbity mniejsze od ziemskiej, po których krążyły planety dolne, Merkury i Wenus;
2. trzy orbity większe od orbity Ziemi. Na tych orbitach znajdowały się planety górne, Mars, Jowisz i Saturn. Obserwowane ruchy planet należących do obu tych grup tak się różnią, że Kopernik słusznie traktuje je oddzielnie, stosując inne metody badań i obliczenia elementów ich orbit. We wszystkich jednak przypadkach musiał uwzględniać wpływ orbitalnego ruchu Ziemi na obserwowane zmiany pozycji planet wśród gwiazd. Kopernik wyraźnie to stwierdza (tłumaczenie „O obrotach" str. 238, 1976): „Wobec tego zatem, że istnieją dwie przyczyny, wskutek których równy ruch planety pokazuje się jako nierówny, mianowicie tak z powodu ruchu Ziemi, jak też z powodu własnego ruchu, wykażę każdą z nich w swoim rodzaju..." Kopernik zachowuje w pełni przyjęte założenia, że planety krążą po okręgach ruchem jednostajnym i zapowiada wyjaśnienie obserwowanych zjawisk przy zachowaniu tych założeń.

Obecnie przedstawimy badania orbit planet górnych, jakie znajdujemy w V księdze „O obrotach". Kopernik korzystał z faktu, że w momentach opozycji wyeliminowany jest wpływ położenia Ziemi na obserwowaną pozycję planety. Wyjaśnia to następująco:

„[...] gdy planeta będąc w opozycji do Słońca wpadnie na linię prostą średniego ruchu Słońca, gdzie jest pozbawiona wszelkiej owej różnicy, jaką powoduje ruch Ziemi. Takie oczywiście miejsca otrzymuje się, jak to wyżej zostało przedstawione, z obserwacji za pomocą astrolabiów przy zastosowaniu także obliczeń dla Słońca, aż się stanie wiadome, że planeta dotarła do przeciwległego mu miejsca." Tu należy zwrócić uwagę, że Kopernik mówi początkowo o opozycji względem Słońca, potem uściśla, że chodzi o linię wyznaczoną przez średni ruch Słońca, tak jakby Słońce znajdowało się w środku orbity Ziemi i pozornie przesuwało się jednostajnie po ekliptyce. Te pozycje słońca średniego były już obliczone na każdy dzień roku i należało porównać je z obserwowanymi ruchami planety. Przy tej procedurze konieczna była interpolacja i ostatecznie mogło się okazać, że obliczony moment opozycji nastąpił w ciągu dnia i nie był obserwowany. W dalszych rozważaniach Kopernik nie korzysta już ze słońca średniego. Zamiast niego, tak w tekście, jak i na rysunkach, pojawia się środek orbity Ziemi, ś.o.Z., który staje się punktem odniesienia dla wszystkich orbit planetarnych. Orbita nazywa się ekscentryczną, gdy jej środek nie pokrywa się z ś.o.Z., chociaż poprzednio orbita ziemska była ekscentryczna, ponieważ jej środek nie pokrywał się ze Słońcem. Elementami orbity planety stały się: rozstęp środków orbit Ziemi i planety oraz punkty perygeum i apogeum, wyznaczone na orbicie planety przez jej średnicę przechodzącą przez ś.o.Z.

Przy obliczaniu orbit planet górnych Kopernik korzystał z obserwacji astronomów starożytnych i własnych. Obecnie przedstawimy fragmenty obliczeń orbity Saturna na podstawie własnych obserwacji Kopernika. W tych rozważaniach Kopernik przyjął, że planety poruszają się w płaszczyźnie ekliptyki i do wyznaczenia ich pozycji wystarczy odległość kątowa, zwana długością, λ, mierzona od wybranej gwiazdy Barana, która w katalogu podanym przez Ptolemeusza była określona jako: „pierwsza z dwóch na rogu i pierwsza ze wszystkich". Obecnie gwiazda ta nazywa się γ Arietis, a początek liczenia długości ekliptycznych znajduje się w punkcie równonocy wiosennej ♈.

Czasy trzech obserwowanych przez Kopernika opozycji Saturna T oraz ich różnice ΔT wyrażone w latach egipskich, (po 365 dni), były takie, jak podano w tabeli 1.

Różnice czasów ΔT wyznaczają miary stopniowe łuków orbity α, zakreślonych przez Saturna. Dla ich wyznaczenia Kopernik używał obliczonych przez siebie tabel „Ruch komutacji Saturna” My moglibyśmy pomnożyć ΔT przez ruch roczny Saturna u=12°12′46′′13′′′ (por. „Urania” 1/99): $\alpha = u \cdot \Delta T$

Długości Saturna λ wyznaczone dla momentów opozycji określały kierunki ze środka orbity Ziemi, ś.o.Z., do planety. Różnice tych kierunków $\Delta\lambda$ były miarami kątów, których wierzchołkiem był ś.o.Z.

	λ	$\Delta\lambda$
A.	205°24′	
		$\delta\lambda_1$=68°01′
B.	273°25′	
		$\delta\lambda_2$=86°42′
C.	0°07′	

Dwa łuki α i dwa kąty $\delta\lambda$ były podstawą do obliczenia elementów orbity Saturna. Już z porównania tych danych widocznym było, że ś.o.Z. nie jest środkiem orbity Saturna. Gdyby tak było, to miary kątów $\delta\lambda$, jako środkowych, równałyby się odpowiednim miarom łuków α. A więc orbita Saturna jest ekscentryczna. Rys. 1 przedstawia tę orbitę z pozycjami planety oznaczonymi A, B, C. Punkt D oznacza środek orbity Ziemi, ś.o.Z. Samej orbity Ziemi i jej pozycji Kopernik nie zaznaczył. Ponieważ były to opozycje w stosunku do punktu D, więc Ziemia znajdowała się na liniach łączących ten

Tab. 1.

	T			ΔT	$\alpha = u \cdot \Delta T$
A.	1514 r.	5 maja	22 godz.		
				6,1933 l.eg.	α_1=75°39′
B.	1520 r.	13 lipca	12 godz.		
				7,2459 l.eg.	α_2=88°29′
C.	1527 r.	10 paźdz.	6 godz.		

punkt z odpowiednią pozycją planety A, B lub C.

Punkty na rys. 1. zostały połączone prostymi, a odcinek CD przedłużony do punktu E na okręgu. Powstała sieć trójkątów, które Kopernik kolejno rozwiązywał. Korzystał przy tym z twierdzeń: 1. Miara kąta wpisanego jest dwa razy mniejsza od miary łuku, na którym się opiera. 2. Stosunek długości boków trójkąta równa się stosunkowi sinusów przeciwległych kątów. Powtórzymy rozumowanie Kopernika, korzystając z funkcji sinus i cosinus, których Kopernik nie znał. Używał tylko tabeli cięciw w kole, co wymagało dłuższego toku rozumowania.

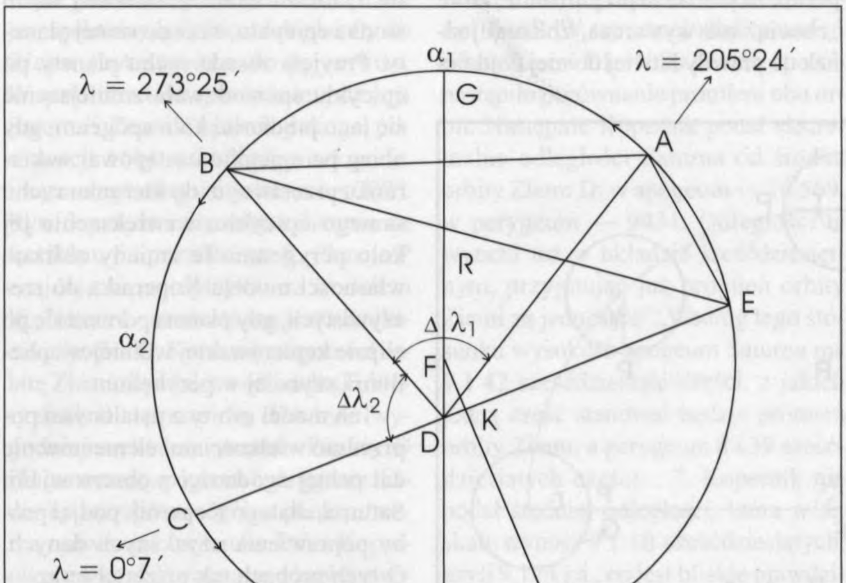
Kolejność obliczeń ustalona przez Kopernika jest następująca:

Trójkąt BDE. Znane kąty: E=½α_2, D=180°–$\Delta\lambda_2$, B=180°–(E+D).

Obliczamy BE/DE.

Trójkąt ADE. Znane kąty: E=½(α_1+α_2), D=180°–($\Delta\lambda_1$+$\Delta\lambda_2$), A=180°–(E+D).

Obliczamy DE/AE.



Rys. 1. Wyznaczenie ekscentryczności orbity Saturna.
F — środek orbity o promieniu R. A, B, C — trzy opozycje Saturna względem środka Ziemi D. H — perygeum, G — apogeum.

Z obliczonych wielkości wynika BE/AE.

Trójkąt ABE. Znane: kąt E=½α_1 i stosunek BE/AE.

Z twierdzenia Carnota wynika:
$(AB/AE)^2 = (BE/AE)^2 + 1 - 2(BE/AE)\cos E$.

Obliczamy AB/AE.

AB jest cięciwą opartą na łuku α_1 orbity Saturna. Jako promień tej orbity Kopernik przyjął R=10 000. W tej skali przy pomocy tabeli cięciw wyznaczył długość odcinka AB=12 266. Dzięki tej wielkości mógł kolejno obliczyć długości innych odcinków: DE=10 599, BE=15 664 i z tej cięciwy łuk BAE=103°7′. Łuk CBAE=α_2+103°7′=191°36′. Pozostała część okręgu CE=168°24′. Z tej wielkości wynika cięciwa CE=19898 i jej część CD=CE–DE=9299.

Uzyskane wyniki pozwoliły już ustalić przybliżone miejsce środka orbity Saturna, oznaczonego literą F. Środek ten znajduje się blisko środka cięciwy CE po tej jej stronie, nad którą rozciąga się łuk orbity większy od 180°. Kopernik umieszcza ten punkt na rysunku i przeprowadza średnicę przechodzącą przez środek orbity Ziemi D. Na końcach tej średnicy znajdują się apogeum G i perygeum H. Odcinek FD jest rozstawem środków orbit, który należy obliczyć. Zacytujemy teraz fragment tekstu Kopernika („O obrotach” str. 246). Fragment zaczyna się wprowadzeniem środka orbity Saturna:

„I niech nim będzie punkt F, przez który oraz przez D przeciągnijmy średnicę GFDH, a pod kątem prostym do CDE linię FKL. Jest zaś rzeczą widoczną, że prostokąt, który się zamyka w liniach CD i DE, jest równy prostokątowi o bokach GD i DH. Lecz prostokąt z GD i DH razem z kwadratem o boku FD równy jest kwadratowi z połowy linii GDH. Po odjęciu więc prostokąta z GD i DH albo równego mu prostokąta z CD i DE od kwadratu połowy średnicy pozostanie kwadrat z FD. Będzie zatem dana długość linii FD, a wynosi ona 1200 części, jakich promień GF będzie miał 10 000, lecz takich części, jakich w FG będzie 60, w FD byłoby 7 lub 12 sześćdziesiątych...”

Po przeczytaniu tego tekstu zadziwia nas optymizm Kopernika, który stwierdza, że to „jest rzeczą widoczną”. Czy na pewno w XVI w. dla wielu było to rzeczą widoczną? Przecież Kopernik bez jakiegokolwiek wyjaśnienia stosuje twierdzenie: Jeżeli cięciwy przecinają się wewnątrz okręgu, to punkt przecięcia dzieli je na części, których iloczyny są sobie równe. Dla nas dodatkową trudność sprawia nazywanie iloczynu odcinków prostokątem. Tak obecnie nie mówimy. Natomiast kwadrat w znaczeniu drugiej potęgi zachował swoje dawne znaczenie.

Wracając do wyznaczenia rozstawu środków orbit FD, przedstawimy je następująco: cięciwa CE i średnica GH, która też jest cięciwą, przecinają się w punkcie D, który dzieli je na części CD i DE oraz GD = R + FD i DH = R – FD. Zgodnie z zacytowanym twierdzeniem spełnione jest równanie:

$$CD \times DE = GD \times DH = (R + FD) \times (R - FD) = R^2 - (FD)^2.$$

$$(FD)^2 = R^2 - CD \times DE.$$

Długości CD i DE zostały już wyznaczone, a R = 10 000, więc po przeliczeniu Kopernik uzyskał FD = 1200.

Tu nasuwa się refleksja. Na przykładzie tego fragmentu dzieła Kopernika jest dla nas „rzeczą widoczną”, że praca ta, prócz twórczości koncepcyjnej, wymagała wielu lat żmudnych, nużących obliczeń. Nawet proste działania na wielocyfrowych liczbach wykonywane systematycznie i konsekwentnie były dużym, długo trwającym wysiłkiem, na który Kopernik się zdobył, by przedstawić swoją wizję świata.

Lecz wróćmy do orbity Saturna. Linia FKL poprowadzona prostopadle do cięciwy CDE podzieliła ją na połowy: CK = KE = ½CE. Z tego wynika CK = 9949 oraz DK = CK – CD = 650. W ten sposób Kopernik obliczył długości dwóch boków małego trójkąta prostokątnego DFK, co umożliwiło wyznaczenie innych jego elementów. Istotnym było ustalenie miary kąta DFK, czyli łuku HL, która ma wielkość 32°45′. Dzięki niej udało się określić położenie perygeum H i apogeum G w stosunku do obserwowanych opozycji. Punkt L dzieli łuk CHE na połowy.

Dlatego łuk CHL = ½×168°24′ = = 84°12′.

Łuk od trzeciej opozycji C do peryhelium H:

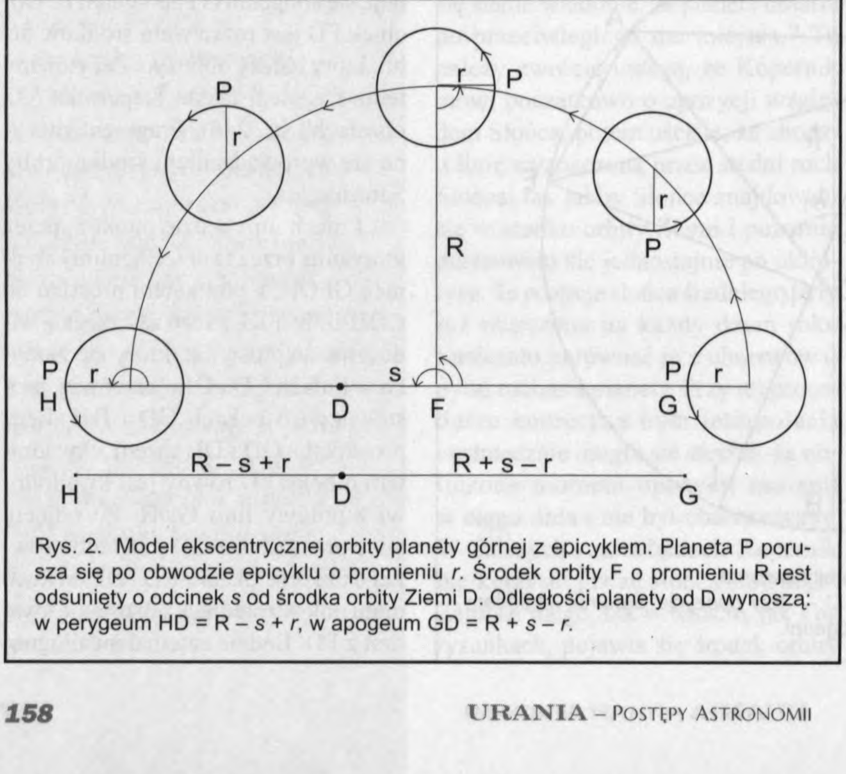
łuk CH = 84°12′ – 32°45′ = 51°21′.

W dalszym ciągu Kopernik ustalił położenie apogeum G na 35°36′ po pierwszej opozycji A i 40°3′ przed drugą opozycją B.

Przedstawione wyniki uważał Kopernik za pierwsze przybliżenie, które „chociaż nie wystarcza, zbliżeni jednak do prawdy łatwiej do niej dojdziemy”. To drugie przybliżenie wygląda następująco: orbita planety górnej składa się z ekscentrycznego okręgu i małego epicyklu, Rys. 2. Planeta P porusza się po obwodzie epicyklu o promieniu *r*, którego środek opisuje okrąg o promieniu R dookoła środka F. Oba ruchy są jednostajne i mają taki sam okres, jeżeli ruch planety mierzymy od promienia wodzącego łączącego środek epicyklu z punktem F. Dzisiaj tę sytuację określimy, że okres ruchu planety po epicyklu jest dwa razy krótszy od okresu obiegu epicyklu dookoła środka F. Środek orbity Ziemi, D, jest oddalony od F o odcinek DF = *s*. Obliczony dla Saturna rozstęp środków DF = 1200 zmniejszył Kopernik do $s = 900$, a resztę przyjął za promień epicyklu $r = 300$. Ten stosunek $s:r = 3:1$, stał się zasadą dla wszystkich orbit planet górnych.

Średnica orbity, przechodząca przez środki D i F, wyznaczyła punkty perygeum H i apogeum G. Ruch planety P po epicyklu jest tak zsynchronizowany z ruchem samego epicyklu, że w apogeum planeta znajduje się na wewnętrznej stronie epicyklu, a w perygeum na zewnętrznej. Dlatego ekstremalne odległości planety od D wynoszą w perygeum HD = R – *s* + *r*, w apogeum GD = R + *s* – *r*. Wprowadzenie epicyklu do modelu orbity spowodowało, że obliczone poprzednio ruchy roczne i dzienne odnosiły się do środka epicyklu, a nie do samej planety. Przyjęta zasada ruchu planety po epicyklu spowodowała zmniejszenie się jego prędkości koło apogeum, gdy obieg po epicyklu następował w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu samego epicyklu, i zwiększenie jej koło perygeum. Te zmiany zbliżają własności modelu Kopernika do rzeczywistych, gdy planeta porusza się po elipsie keplerowskiej wolniej w aphelium i szybciej w peryhelium.

Ten model orbity z ustalonymi poprzednio wielkościami elementów nie dał pełnej zgodności z obserwacjami Saturna, dlatego Kopernik podjął próby poprawienia uzyskanych danych. O tych próbach tak pisze: „I teraz — żeby się streszczać i nie obarczać czytelnika dłuższymi wywodami i żeby się nie wydawało, że więcej dołożyłem starań do odkrywania bezdroży niż do bezpośredniego pokazania prostej drogi — wszystko to prowadzi z ko-

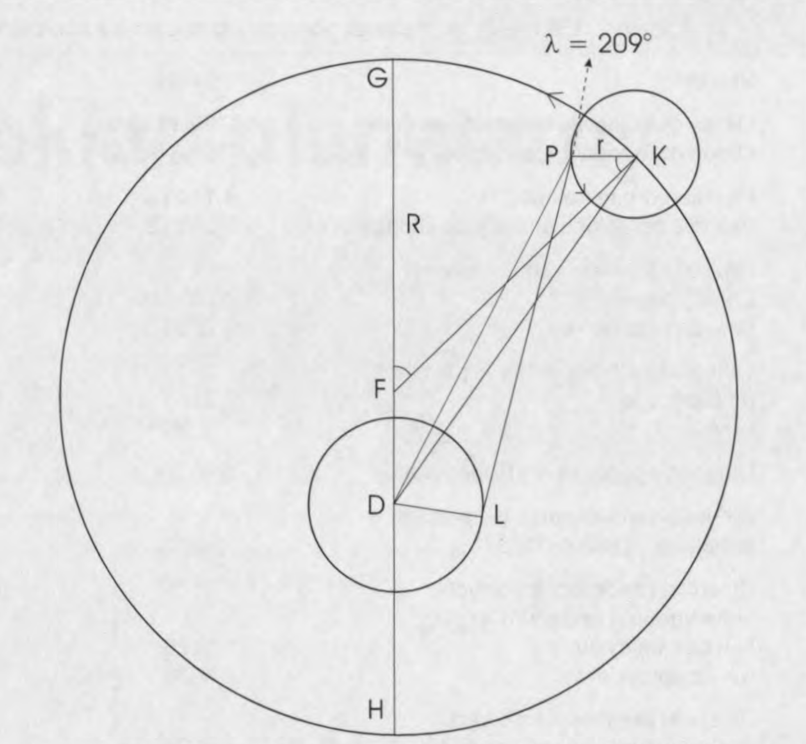


Rys. 2. Model ekscentrycznej orbity planety górnej z epicyklem. Planeta P porusza się po obwodzie epicyklu o promieniu *r*. Środek orbity F o promieniu R jest odsunięty o odcinek *s* od środka orbity Ziemi D. Odległości planety od D wynoszą: w perygeum HD = R – *s* + *r*, w apogeum GD = R + *s* – *r*.

nieczności..." Te konieczne zmiany, do których doszedł Kopernik, po wielu chyba błędnych próbach, były następujące: pełną zgodność z obserwacjami Saturna osiągnął Kopernik, przyjmując rozstęp środków orbit $s = 824$, promień epicyklu $r = 285$, łuk od opozycji A do apogeum 38°50′, długość apogeum od „pierwszej gwiazdy Barana", $\lambda = 240°21'$.

Po ustaleniu elementów orbity Saturna Kopernik mógł porównać rozmiary orbit Ziemi i planety. Była to istotna nowość. Poprzednicy Kopernika porównywali tylko elementy jednej orbity. Nie mogli np. ustalić, ile razy orbita Merkurego jest mniejsza od orbity Saturna. Dopiero w układzie Kopernika pojawił się promień orbity Ziemi, który został użyty jako jednostka do mierzenia długości odległości między planetami. Jest to wielka zasługa Kopernika, który odkrył i wykorzystał tę możliwość. Od tego czasu promień orbity Ziemi, z małymi uściśleniami, pełni rolę jednostki astronomicznej, j.a.

Przy wyznaczaniu elementów orbit planet wykonywano obserwacje w momentach opozycji celem uniknięcia wpływu pozycji Ziemi. Natomiast wyznaczanie względnych rozmiarów orbit Ziemi i planety wymagało dokonania obserwacji wtedy, gdy pozycja Ziemi najbardziej wpływa na obserwowane położenie planety. Warunek ten jest spełniony, gdy kierunek planety do Ziemi jest styczny do jej orbity. W pobliżu takiej właśnie pozycji Saturna i Ziemi Kopernik dokonał obserwacji 1514 r. 24 lutego o 5 godz. i wyznaczył długość Saturna $\lambda = 209°$. Rys. 3 przedstawia orbitę Saturna ze środkiem F i promieniem R. Planeta P znajduje się na epicyklu ze środkiem K. Ziemia L umieszczona jest na orbicie o środku D. Kopernik narysował orbitę Ziemi zbyt daleko od środka F, który znalazł się poza nią. Tak było wygodniej wykonać rysunek. Punkty G i H oznaczają apogeum i perygeum. Linie łączące poszczególne punkty tworzą znowu sieć trójkątów, które Kopernik rozwiązał, korzystając z zaobserwowanej długości Saturna i z wielkości obliczonych. Pominiemy szczegóły tych uciążliwych obliczeń, podobnych do prezentowanych poprzednio. Ich końcowym etapem było rozwiązanie trójkąta PDL. W tym trójkącie kąt przy



Rys. 3. Porównanie promieni orbit Saturna i Ziemi. F — środek orbity Saturna o promieniu R. Saturn P znajduje się na epicyklu o środku K i promieniu r. D — środek orbity Ziemi, która znajduje się w punkcie L. H — perygeum, G — apogeum.

planecie P wynosi 5°44′. Pod takim kątem widoczny byłby z Saturna promień orbity Ziemi DL. Pozostałe kąty w tym trójkącie miały miary: przy L 106°41′, przy D 67°35′. Przy założeniu, że promień orbity Saturna R = 10 000, bok trójkąta PD okazał się równy 10465. W tej samej skali promień orbity Ziemi DL=1090. W ten sposób nastąpiło porównanie promieni obu orbit. Następnie Kopernik podał ekstremalne odległości Saturna od środka orbity Ziemi D: w apogeum — 10 569, w perygeum — 9431. Odległości te wyraził też w układzie sześćdziesiętnym, przyjmując już promień orbity Ziemi za jednostkę: „Według tego stosunku wysokość apogeum Saturna ma 9 i 42 sześćdziesiąte części, z jakich jedną część stanowić będzie promień orbity Ziemi, a perygeum 8 i 39 sześćdziesiątych części....". Kopernik nie podał średniej odległości, która w tej skali wynosi 9 i 10 sześćdziesiątych, czyli 9,174 j.a., co jest bliskie prawdziwej, wynoszącej 9,546 j.a. Bardziej interesował Go wpływ ruchu Ziemi na pozycje Saturna. Z ekstremalnych odległości obliczył największe zmiany kierunku, czyli paralaksy Saturna; w apogeum 5°55′, w perygeum 6°39′.

W ten sam sposób Kopernik opracował orbity Jowisza i Marsa. Końcowe wyniki dla wszystkich trzech planet górnych zawiera tabela, w której wszystkie długości podane zostały w jednostkach astronomicznych, j.a. Dla kompletu dodano okresy obiegów gwiazdowych wyznaczone poprzednio, por. „Urania" 1/99.

Celem oceny poprawności i dokładności wyników Kopernika, porównamy je z odpowiednimi wielkościami wynikającymi z danych współczesnych.

Promień kołowej orbity Kopernika R jest porównywalny ze średnią odległością planety od Słońca, czyli połową dużej osi orbity eliptycznej a. Widoczna jest dobra zgodność tych wielkości. Warto jednak przypomnieć, że tak okresy gwiazdowe T, jak i wielkości R, za wyjątkiem promienia orbity Marsa, nie zostały bezpośrednio podane przez Kopernika, lecz wynikają z jego danych.

Kierunki ze środka orbity Ziemi do apogeów, określane przez długości λ podane przez Kopernika, powinny być zbliżone do kierunków od Słońca do apheliów. Możemy tutaj wykorzystać fakt, że odległość środka orbity Ziemi

Tabela 2. Elementy orbit planet górnych wg Kopernika i porównywalne wielkości współczesne

Planeta	Saturn	Jowisz	Mars
Okres gwiazdowy, dane Kopernika	10759,17 dni	4332,65 dni	686,98 dni
Okres gwiazdowy, współczesny	10759,31 dni	4332,59 dni	686,98 dni
Promień orbity kołowej, R	9,174 j.a.	5,219 j.a.	1,520 j.a.
Średnia odległość planety od Słońca, *a*	9,546 j.a.	5,203 j.a.	1,524 j.a.
Rozstęp środków orbit kołowych Ziemi i planety, *s*	0,783 j.a.	0,358 j.a.	0,222 j.a.
Promień epicyklu, *r*	0,262 j.a.	0,119 j.a.	0,076 j.a.
Odległość środka orbity eliptycznej od Słońca, *c*	0,534 j.a.	0,252 j.a.	0,142 j.a.
$(s+r)/c$	1,96	1,89	2,10
Długość apogeum wg Kopernika, λ	240°21′	159°0′	119°40′
Zredukowana długość ekliptyczna aphelium, $\lambda(1520)$–25°37′	238°2′	160°59′	121°36′
Stosunki prędkości kątowych w perygeum i apogeum, u_{pg}/u_{ag}:			
I — bez epicyklu	1,26	1,20	1,49
II — z epicyklem	1,33	1,26	1,64
Stosunki prędkości kątowych w peryhelium i aphelium, u_{ph}/u_{ah}	1.26	1.21	1.46

od Słońca wynosi tylko 0,017 j.a. i może być pomijana przy dużych rozmiarach orbit. Natomiast przeliczenia wymagają długości ekliptyczne, stosowane obecnie do wyznaczania kierunków apheliów. Należało więc ich współczesne długości ekliptyczne zredukować na epokę Kopernika $\lambda(1520)$ i odjąć od nich ówczesną długość ekliptyczną γ Ari, λ=25°37′, ponieważ od tej gwiazdy liczone były długości używane prze Kopernika. Dlatego w tabeli podane zostały wielkości λ i $\lambda(1520)$ –25°37′. Porównanie to wykazuje również dobrą zgodność, świadczącą o poprawności wyników Kopernika.

Jako ostateczny sprawdzian możemy porównać stosunki ekstremalnych prędkości kątowych planet, czyli ich ruchów dziennych, obserwowanych ze środka orbity Ziemi, tak jak to wyznaczał Kopernik, z takimi samymi stosunkami, które byłyby widoczne ze Słońca w wyniku rzeczywistych ruchów planet. W przypadku orbit Kopernika w pierwszym przybliżeniu, gdy planety poruszały się po orbitach ze stałymi prędkościami liniowymi, prędkości kątowe były odwrotnie proporcjonalne do odległości od środka orbity Ziemi. Gdy oznaczymy je u_{pg} i u_{ag} odpowiednio dla planet w perygeum i apogeum, to ich stosunek wynosi:

$$\frac{u_{pg}}{u_{ag}} = \frac{R+(s+r)}{R-(s+r)},$$

gdzie $s+r$ oznacza rozstęp środków orbit w pierwszym przybliżeniu. W drugim przybliżeniu Kopernik podzielił odcinek $s+r$ w stosunku 3:1 i te części przyjmował jako nowy rozstęp środków s i promień epicyklu r. Dla tego przypadku przy obliczaniu stosunku prędkości kątowych trzeba uwzględnić poprawki wynikające z ruchu planety po epicyklu. Otrzymane wielkości można porównać ze stosunkiem rzeczywistych prędkości, widocznych ze Słońca — u_{ph}, gdy planeta jest w peryhelium i u_{ah}, gdy planeta jest w aphelium:

$$\frac{u_{ph}}{u_{ah}} = \frac{a+c}{a-c},$$

gdzie c jest odległością środka orbity od Słońca, które jest wspólnym ogniskiem wszystkich orbit eliptycznych. W tabeli podane są te wielkości. Widać, że już w pierwszym przybliżeniu Kopernik dobrze odtworzył rzeczywiste stosunki ekstremalnych prędkości kątowych. Zgodność występuje, gdy $(s+r)/c = 2$, czyli, gdy środek orbity kołowej znajduje się w drugim ognisku orbity eliptycznej, co w przybliżeniu jest spełnione. Ale widocznie jakieś inne powody skłoniły Kopernika do wprowadzenia epicykli. Może zależało Mu na zmniejszeniu rozrzutu środków orbit. Przy rozstępach $s+r$ środek orbity Saturna znalazł się poza orbitą Ziemi, środki orbit Jowisza i Marsa między orbitami Wenus i Merkurego. A więc koło Słońca zrobiło się pusto, co chyba psuło idealny obraz układu opisany w I księdze. Zmniejszenie rozstępów i wprowadzenie epicykli poprawiło nieco obraz środka układu, chociaż pogorszyło zgodność stosunków prędkości kątowych. Ostatecznie środek orbity Saturna znalazł się koło orbity Wenus, Jowisza koło Merkurego, a Marsa — wewnątrz tego najmniejszego okręgu otaczającego Słońce.

Literatura:

Polska Akademia Nauk, *Mikołaj Kopernik*, Dzieła Wszystkie II, PWN, Warszawa 1976.

C.W. Allen, *Astrophysical Quantities*, University of London, The Athlone Press, 1955.

A. Opolski, *Urania-PA*, 1, 1999.

Prof. Antoni Opolski jest astrofizykiem, emerytowanym dyrektorem Instytutu Astronomicznego Uniwersytetu Wrocławskiego i byłym prezesem Polskiego Towarzystwa Astronomicznego.