

Od chwili przejścia na emeryturę w 1983 r. prof. Antoni Opolski cały czas wykazuje aktywność oraz zainteresowanie tematyką astronomiczną. Szczególnie chętnie podąża śladami myśli Mikołaja Kopernika, studiując dzieło słynnego astronoma i czerpiąc z niego inspiracje do własnej pracy. W ostatnich latach zajął się analizą ruchów planet Układu Słonecznego. Pracę nad pętlami planet Profesor rozpoczął w 2011 roku, kontynuując ją do końca roku 2012. W tym okresie powstały obliczenia, rysunki, tabele oraz podstawowe opisy dla wszystkich planet. Całość zrobiona została odręcznie, przy użyciu kartki, ołówka i prostych przyborów geometrycznych. W 2011 r. Profesor zwrócił się do niżej podpisanych astronomów o pomoc w zredagowaniu materiałów. Przez kilka miesięcy mieliśmy zaszczyt i przyjemność spotykać się z Profesorem w Jego domu, by wspólnie pracować nad sformulowaniem cyklu prac o pętlach planet. W połowie 2012 r. powstał szczegółowy materiał dotyczący Jowisza. W ciągu wielu tygodni Profesor zmieniał i cyzelował tekst. Odręcznie poprawiał bądź wykonywał nowe, lepsze rysunki. W ten sposób powstał artykuł, który oddajemy w ręce czytelników. „Pętla Jowisza” powstały w 99. roku życia prof. Antoniego Opolskiego, by ukazać się drukiem w roku Jego 100 urodzin.

Tomasz Mrozek, Paweł Preś i Barbara Cader-Sroka
(Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego)

Pętle

Antoni Opolski

Jowisza

Wyobraźmy sobie młodego miłośnika astronomii, który dostał mapę nieba. Ogląda gwiazdozbiory, interesuje się równikiem i ekliptyką. Dziwi go, że na mapie brak jest orbit planet, choćby tych największych, Jowisza i Saturna. Przecież orbity te są doskonale znane, sondy kosmiczne dolatują do nich i z bliska fotografują ich powierzchnie. Wtedy dowiaduje się, że gdy obserwujemy ruch planet na niebie, widzimy ich ruch nie po prawdziwych orbitach, ale po pozornych. Zjawiają się regularnie, okresowo, ale za każdym razem w innym miejscu. Dlatego na mapie dla każdej planety mógłby być najwyżej pasek, który ograniczałby obszar sfery niebieskiej, gdzie się ona porusza.

W podręcznikach astronomii i w literaturze popularnej problem orbit pozornych jest zwykle pomijany albo wspomniany marginesowo. Planety poruszają się zwykle wzdłuż ekliptyki, w kierunku z zachodu na wschód. Ten



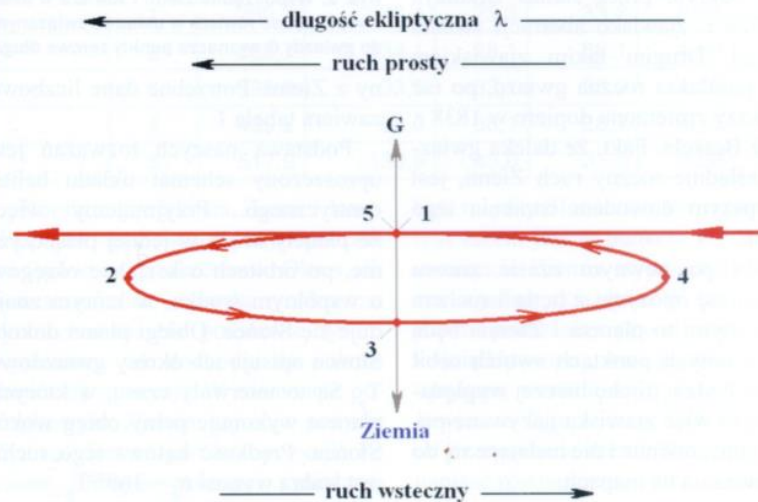
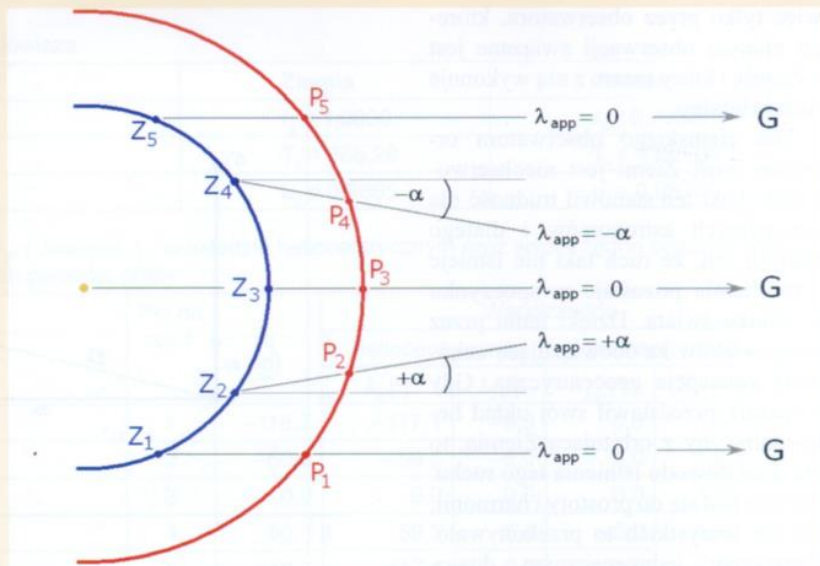
Pętla wykreślona na niebie przez Marsa i Urana w 2003 r. (fot. Tunç Tezel). Chcieliśmy w tym miejscu zamieścić analogiczne zdjęcie pętli Jowisza, ale wydaje się, że ... nikt dotychczas takiej fotografii nie wykonał. Jest okazja — Jowisz znów wchodzi na nasze niebo

kierunek nazywamy kierunkiem prostym. Pozycję planety określamy jedną współrzędną, zwaną długością ekliptyczną λ . Jest to kąt, którego jedno ramię jest na stałe skierowane np. do wybranej gwiazdy, a drugie do planety i porusza się wraz z nią. Przy ruchu prostym długość ekliptyczna planety wzrasta z czasem. Gdy wyjątkowo planeta pozornie porusza się w stronę przeciwną, to kierunek jej ruchu nazywamy wstecznym, a jej długość ekliptyczna wtedy maleje z czasem. Druga współrzędna planety, szerokość ekliptyczna β , zmienia się w małych granicach i w naszych rozważaniach rzadko z niej korzystamy.

Obserwator ziemski wyznacza pozycję planety przez nawiązanie do pozycji „sąsiednich” gwiazd. Określenie „sąsiednie” jest mylące. Chodzi tu o bliskość kierunków z Ziemi do planety i do gwiazd. Zwróćmy jednak uwagę na odległości. Ziemia krąży wokół Słońca po orbicie zbliżonej do okręgu o promieniu równym jednostce astronomicznej, $r_z = 1$ j.a. W ciągu pół roku Ziemia zmienia swoją pozycję o średnicę tej orbity, czyli o 2 j.a. Planety górne, krążące dalej od Słońca niż Ziemia, zmieniają odległość do Ziemi w granicach kilkunastu j.a. Natomiast bliskie gwiazdy są w odległościach rzędu 5×10^5 j.a. Na zmniejszonym modelu wygląda to następująco: jeżeli 1 j.a. = 150×10^6 km zmniejszymy do 1 cm, to układ planetarny do Saturna będzie miał średnicę ok. 20 cm, a bliskie gwiazdy będą odległe o ok. 5 km. Ziemia i planety poruszają się, ale przesunięcia te są zbyt małe, aby w sposób widoczny zmienić kierunki do gwiazd. Dlatego przyjmujemy, że kierunki do nich pozostają stałe, niezależnie od punktu orbity ziemskiej, z którego dokonujemy obserwacji. Na rysunkach w dalszym ciągu tego artykułu kierunki do wybranej gwiazdy są przedstawione jako równoległe strzałki, co wygląda tak, jakby gwiazda przesuwała się razem z obserwatorem. Błąd, który możemy przy tym popełnić, jest mniejszy od rocznej paralaksy gwiazdy, a więc mniejszy od 1”.

Skąd biorą się pętle

Na rys. 1a przedstawiamy powstawanie pozornej pętli i złudzenia ruchu wstecznego planety górnej. Zaznaczono na nim pozycje Ziemi $Z_1 - Z_5$ na jej orbicie w pięciu charakterystycz-



Rys. 1. a) Powstawanie pętli. $Z_1 - Z_5$: pozycje Ziemi na orbicie w pięciu charakterystycznych momentach czasu. $P_1 - P_5$: pozycje planety zewnętrznej w tych samych momentach. G — kierunek do gwiazdy; b) Schemat pozornej pętli planetarnej widocznej na sferze niebieskiej, skróconej perspektywie. Z — kierunek do Ziemi. Cyfry 1-5 odpowiadają pozycjom $P_1 - P_5$ na rys. 1a

nych momentach. Widoczny jest stały wzrost długości ekliptycznej Ziemi λ_z , obserwowanej ze Słońca. Podobny jest stały wzrost heliocentrycznej długości λ_p planety.

Gdy połączymy równoczesne pozycje Ziemi i planety — te same cyfry — i porównamy te kierunki z kierunkami z Ziemi do gwiazdy G, okaże się, że wyznaczone w ten sposób pozorne długości planety λ_{app} wykazują czasem ruch wsteczny. Od P_2 przez P_3 do P_4 długość λ_{app} maleje od $+\alpha^\circ$ przez 0° do $-\alpha^\circ$. Jest to wynik tego, że szybsza Ziemia wyprzedza powolniejszą planetę, która pozostając w tyle, stwarza wrażenie, że się cofa.

Te same cyfry od 1 do 5 oznaczają

odpowiednie punkty pętli (rys. 1b):

1 — początek pętli, planeta przesuwa się ruchem prostym;

2 — ruch prosty ustaje, planeta chwilowo zatrzymuje się i jest stacjonarna, po czym zaczyna się ruch wsteczny;

3 — ruch wsteczny trwa, Ziemia znajduje się na jednej linii między Słońcem a planetą, która znajduje się wówczas najbliżej Ziemi, w odległości równej różnicy promieni orbit planety r_p i Ziemi r_z ;

4 — koniec ruchu wstecznego, stacjonarność, a potem początek ruchu prostego;

5 — pętla się zamknęła.

Pętla i ruch wsteczny widziane są

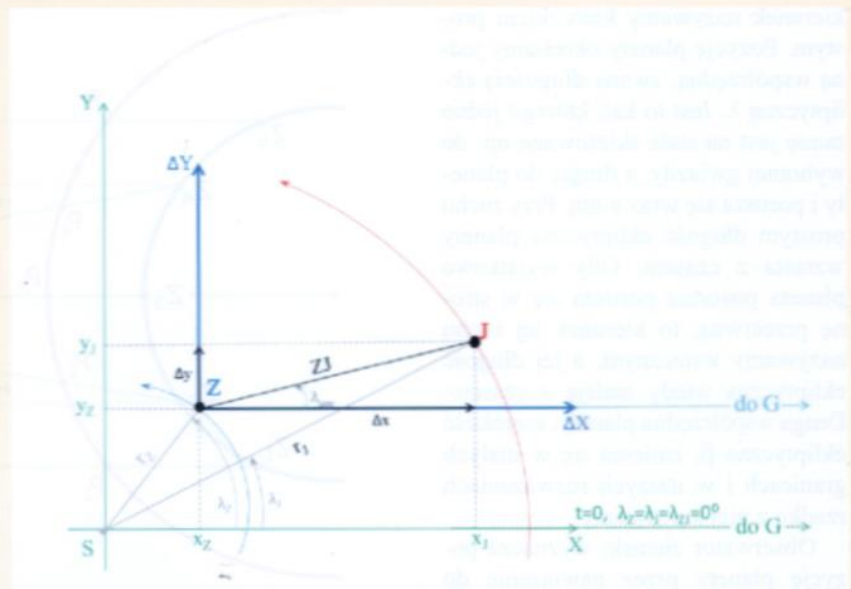
więc tylko przez obserwatora, którego miejsce obserwacji związane jest z Ziemią i który razem z nią wykonuje ruch orbitalny.

Dla ziemskiego obserwatora orbitalny ruch Ziemi jest nieobserwowalny. Fakt ten stanowił trudność dla starożytnych astronomów i dlatego przyjęli oni, że ruch taki nie istnieje i że Ziemia pozostaje w spoczynku w środku świata. Dzięki temu przez wiele wieków za obowiązującą uchodziła koncepcja geocentryczna. Gdy Kopernik przedstawił swój układ heliocentryczny z orbijującą Ziemią, to nie miał dowodu istnienia tego ruchu. Odwoływał się do prostoty i harmonii, ale nie wszystkich to przekonywało. Pierwszym jednoznacznym dowodem istnienia ruchu orbitalnego Ziemi było odkrycie przez Jamesa Bradleya w 1728 r. zjawisko aberracji światła gwiazd. Drugim takim zjawiskiem była paralaksa roczna gwiazd, po raz pierwszy zmierzona dopiero w 1838 r. przez Bessela. Fakt, że daleka gwiazda naśladuje roczny ruch Ziemi, jest najlepszym dowodem istnienia tego ruchu.

Gdy po pewnym czasie znowu pojawi się opozycja z pętlą i ruchem wstecznym, to planeta i Ziemia będą już w innych punktach swoich orbit i pętla będzie trochę inaczej wyglądała. Są to więc zjawiska nazywane pozornymi, zmienne i nie nadające się do zaznaczania na mapach.

Na przykład Jowisz

Jako przykład ruchu planety górnej omówimy ruch Jowisza, obserwowany



Rys. 2. Współrzędne Ziemi i Jowisza w układzie heliocentrycznym (zielone osie, S — Słońce) i współrzędne Jowisza w układzie związanym z Ziemią (niebieskie osie, Z — Ziemia). Kierunek do gwiazdy G wyznacza punkty zerowe długości ekliptycznych λ_z , λ_j i λ_{sun}

ny z Ziemi. Potrzebne dane liczbowe zawiera tabela 1.

Podstawą naszych rozważań jest uproszczony schemat układu heliocentrycznego. Przyjmujemy więc, że planety krążą w jednej płaszczyźnie, po orbitach o kształcie okręgów o wspólnym środku, w którym znajduje się Słońce. Obiegi planet dokoła Słońca opisują ich okresy gwiazdowe T_p . Są to interwały czasu, w których planeta wykonuje pełny obieg wokół Słońca. Prędkość kątowna tego ruchu jest stała i wynosi $u_p = 360^\circ/T_p$.

Układ współrzędnych heliocentrycznych jest zbudowany następująco (rys. 2). Środkiem układu jest Słońce S. Jako oś X przyjmujemy prostą, na

której znajdują się planety tworzące opozycję. Oś Y prowadzimy prostopadle do osi X. Moment opozycji przyjmujemy za początek skali czasu, $t = 0^d$. Planety poruszają się po swoich orbitach z prędkościami kątowymi: Ziemia — u_z , Jowisz — u_j . Ich promienie wodzące zakreślają kąty, które są heliocentrycznymi długościami ekliptycznymi tych planet:

dla Ziemi

$$\lambda_z = u_z t \quad (1)$$

i dla Jowisza

$$\lambda_j = u_j t \quad (2)$$

Długości heliocentryczne λ i promienie orbit r są współrzędnymi biegunowymi planet. Współrzędne prostokątne w tym układzie oznaczamy jako x_z, y_z — dla Ziemi i x_j, y_j — dla Jowisza. Związki między tymi współrzędnymi są następujące:

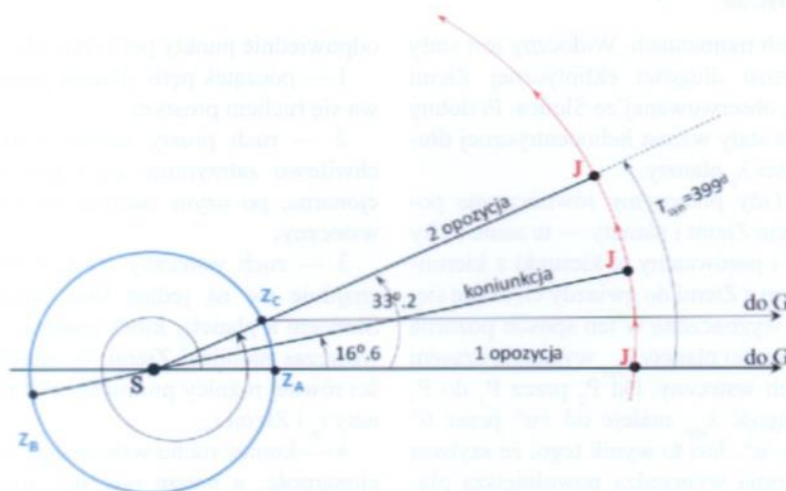
$$x_z = r_z \cos \lambda_z = r_z \cos u_z t$$

$$y_z = r_z \sin \lambda_z = r_z \sin u_z t$$

$$x_j = r_j \cos \lambda_j = r_j \cos u_j t$$

$$y_j = r_j \sin \lambda_j = r_j \sin u_j t$$

Dla ustalenia współrzędnych Jowisza względem Ziemi wprowadzimy układ współrzędnych ziemski. Środkiem tego układu jest punkt obserwacyjny na Ziemi, przez który prowadzimy dwie prostopadłe do siebie osie, ΔX i ΔY . Oś ΔX jest równoległa do osi X układu heliocentrycznego i skierowana również do gwiazdy G. Układ ten porusza się wraz z Ziemią w jej ruchu orbitalnym dokoła Słońca.



Rys. 3. Ruchy Ziemi, Z, i Jowisza, J, w układzie heliocentrycznym między dwoma opozycjami, czyli w czasie jednego okresu synodycznego $T_{syn} = 399^d$

Tabela 1. Parametry orbitalne Ziemi i Jowisza

	Ziemia	Jowisz
Rozmiar orbity [j.a.]	$r_z = 1,0000$	$r_j = 5,2028$
Gwiazdowy okres obiegu Słońca [dni]	$T_z = 365,26$	$T_j = 4333,29$
Heliocentryczna prędkość kątowna [$^{\circ}/d$]	$u_z = 0,9865$	$u_j = 0,08304$

Tabela 2. Długość ekliptyczna Ziemi, λ_z , i Jowisza, λ_j , w układzie heliocentrycznym oraz współrzędne pozorne Jowisza w układzie geocentrycznym dla wybranych punktów orbity

Pozycja	Pkt na rys.1	t_d [d]	Współrzędne			
			heliocentryczne		geocentryczne	
			λ_z [$^{\circ}$]	λ_j [$^{\circ}$]	λ_{app} [$^{\circ}$]	ZJ [j.a.]
$\lambda_{app} = 0^{\circ}$ przed opozycją	1	-118,7	-117,1	-9,9	0,0	5,58
stacjonarność przed opozycją	2	-60,3	-59,5	-5,0	5,0	4,69
pierwsza opozycja	3	0,0	0,0	0,0	0,0	4,20
stacjonarność po opozycji	4	60,3	59,5	5,0	-5,0	4,69
$\lambda_{app} = 0^{\circ}$ po opozycji	5	118,7	117,1	9,9	0,0	5,58
koniunkcja	K	199,3	196,6	16,6	16,6	6,20
$\lambda_{app} = 33,2^{\circ}$, przed drugą opozycją	1	280,2	276,4	23,3	33,2	5,58
stacjonarność przed drugą opozycją	2	338,7	334,1	28,1	38,1	4,69
druga opozycja	3	398,9	33,5	33,1	33,0	4,20
stacjonarność po drugiej opozycji	4	459,2	93,0	38,1	28,1	4,70
$\lambda_{app} = 33,2^{\circ}$ po drugiej opozycji	5	517,9	130,9	43,0	33,2	5,59

W rozważaniach tych pomijamy dobowy obrót Ziemi dokoła własnej osi.

W układzie ziemskim ustalamy współrzędne Jowisza względem Ziemi:

— współrzędne prostokątne Δx i Δy :

$$\Delta x = x_j - x_z = r_j \cos u_{jt} - r_z \cos u_{zt} \quad (3)$$

$$\Delta y = y_j - y_z = r_j \sin u_{jt} - r_z \sin u_{zt} \quad (4)$$

— współrzędne biegunowe: pozorną długość ekliptyczną Jowisza, λ_{app} i odległość od Ziemi do Jowisza ZJ.

Dla dalszych rozważań konieczne jest przejście od współrzędnych heliocentrycznych do ziemskich. Można tego dokonać przy pomocy współrzędnych prostokątnych obu układów. Przejścia takie ustalamy, korzystając z rys. 2. Związki między tymi wielkościami są następujące:

$$\Delta x = ZJ \cos \lambda_{app}$$

$$\Delta y = ZJ \sin \lambda_{app}$$

$$\operatorname{tg} \lambda_{app} = \Delta y / \Delta x \quad (5)$$

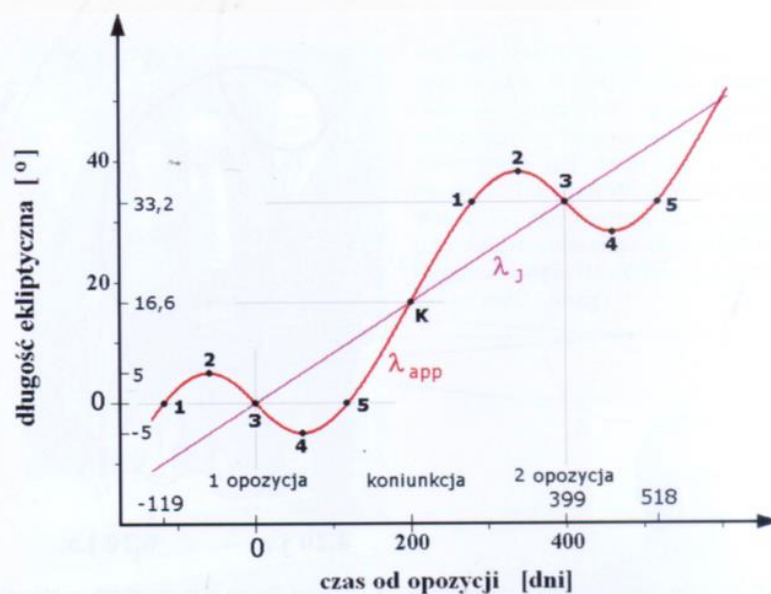
$$(ZJ)^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad (6)$$

Równania (1) — (6) stanowią komplet wzorów, z których będziemy korzystać, aby obliczyć λ_z , λ_j , λ_{app} i ZJ dla dowolnego momentu czasu. Wyliczone z nich wielkości liczbowe λ_z , λ_j , λ_{app} i ZJ dla kilku charakterystycznych momentów zawarte są w tabeli 2.

Konfiguracje Słońca, Ziemi i Jowisza pojawiają się w ustalonym porządku i powtarzają okresowo. Okres ich powtarzania się nazywamy okresem synodycznym. Na podstawie rys. 3 wyjaśnimy, jak dochodzi do powtórzenia się opozycji. W momencie początkowym Ziemia zajmuje pozycję Z_A , zaś Jowisz jest w opozycji. Po czasie równym okresowi synodycznemu T_{syn} następuje druga opozycja, czyli Ziemia znowu zajmie pozycję na

linii między Słońcem a Jowiszem, ale tym razem jest w punkcie Z_C . W tym momencie Ziemia wyprzedziła Jowisza o jedno okrążenie. W tym czasie Ziemia poruszała się po orbicie z prędkością kątowną u_z , więc jej długość ekliptyczna wzrosła o $T_{syn} u_z$, a długość Jowisza o $T_{syn} u_j$ i jest o 360° mniejsza od przesunięcia Ziemi. Możemy więc napisać równanie:

$$T_{syn} u_z = T_{syn} u_j + 360^{\circ}$$



Rys. 4. Długości ekliptyczne Jowisza pozorne λ_{app} i heliocentryczne λ_j w zależności od czasu

Z tego wynika:

$$T_{\text{syn}} = 360^\circ / (u_Z - u_J) = 398,9^d \\ = 1 \text{ rok} + 33,6^d$$

W czasie T_{syn} przyrost długości ekliptycznej Ziemi wynosi

$$\Delta\lambda_Z = T_{\text{syn}} u_Z = 392,2^\circ = 360^\circ + 33,2^\circ$$

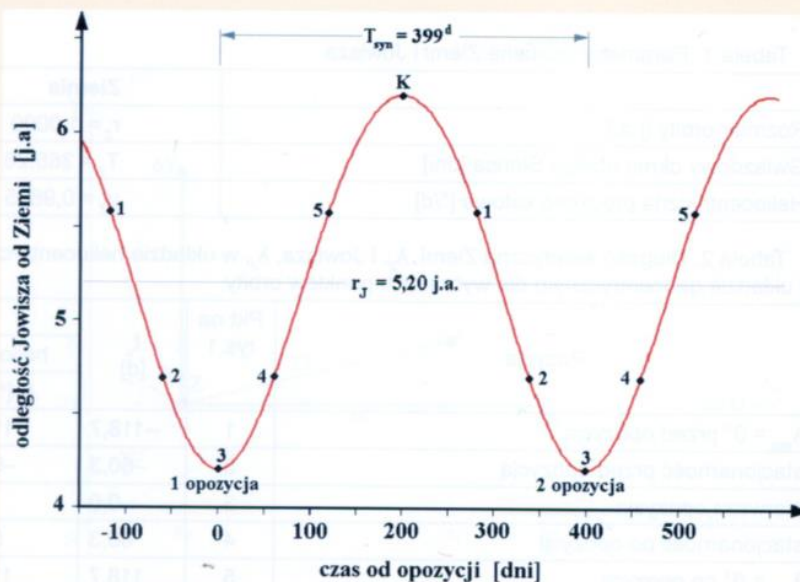
a Jowisza

$$\Delta\lambda_J = T_{\text{syn}} u_J = 33,2^\circ.$$

W połowie okresu synodycznego, gdy Ziemia wyprzedza Jowisza o 180° , powstaje druga konfiguracja liniowa, zwana koniunkcją albo złączeniem. Ziemia znajduje się na jednej linii z Jowiszem i Słońcem, ale na pozycji Z_B . Wtedy długość ekliptyczna Jowisza wynosi $33,2^\circ/2 = 16,6^\circ$, a Ziemi $16,6^\circ + 180^\circ = 196,6^\circ$.

Rys. 4 przedstawia długości ekliptyczne Jowisza λ_{app} w zależności od czasu. Prócz ruchu prostego widoczne są epizody ruchu wstecznego. Na wykresie zaznaczono pięć charakterystycznych punktów, znanych nam z rys. 1.

Prócz tych pięciu punktów na rys. 4 zaznaczono pozycję Jowisza w czasie koniunkcji (K), $t_K = 199,5^d$, $\lambda_{\text{app}} = 16,6^\circ$. Jowisz jest wtedy za Słońcem i w największej odległości od Ziemi wynoszącej $ZJ = r_J + r_Z = 6,20$ j.a. Okres synodyczny kończy druga opozycja o współrzędnych $t = T_{\text{syn}} = 399^d$,



Rys. 5: Zmiany odległości Jowisza od Ziemi ZJ w czasie

$\lambda_{\text{app}} = 33,2^\circ$ z zespołem punktów charakterystycznych, analogicznym do tych przy pierwszej opozycji.

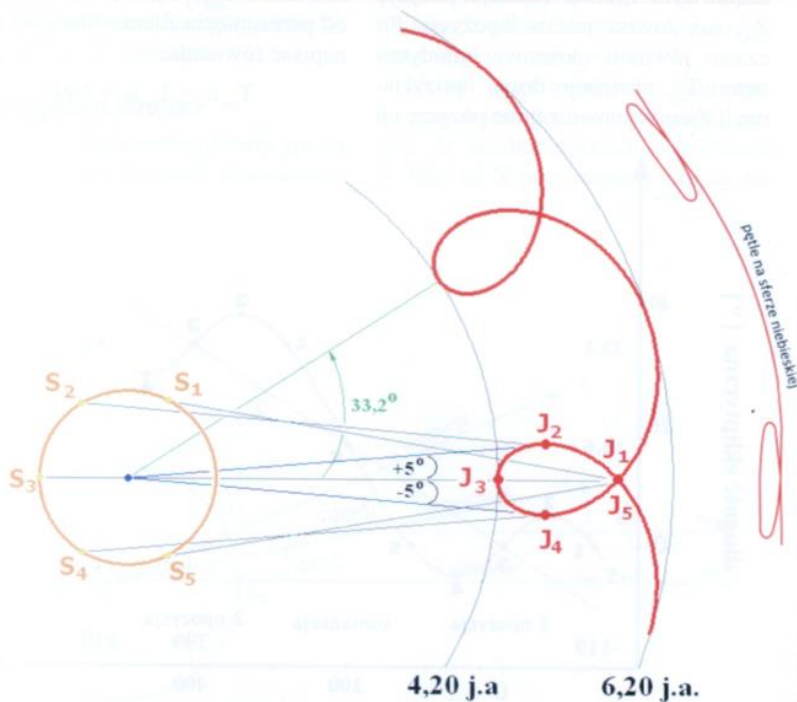
Na rys. 4 pokazano także przebieg heliocentrycznej długości ekliptycznej Jowisza λ_J . Jest to linia prosta o nachyleniu odpowiadającym stałej wielkości prędkości kątowej $u_J = 0,083^\circ/d$.

Rys. 5, przedstawia przebieg czasowy odległości Jowisza od Ziemi, ZJ. Widoczne są dwa minima w czasie dwóch sąsiednich opozycji oraz środkowe maksimum w czasie koniunkcji.

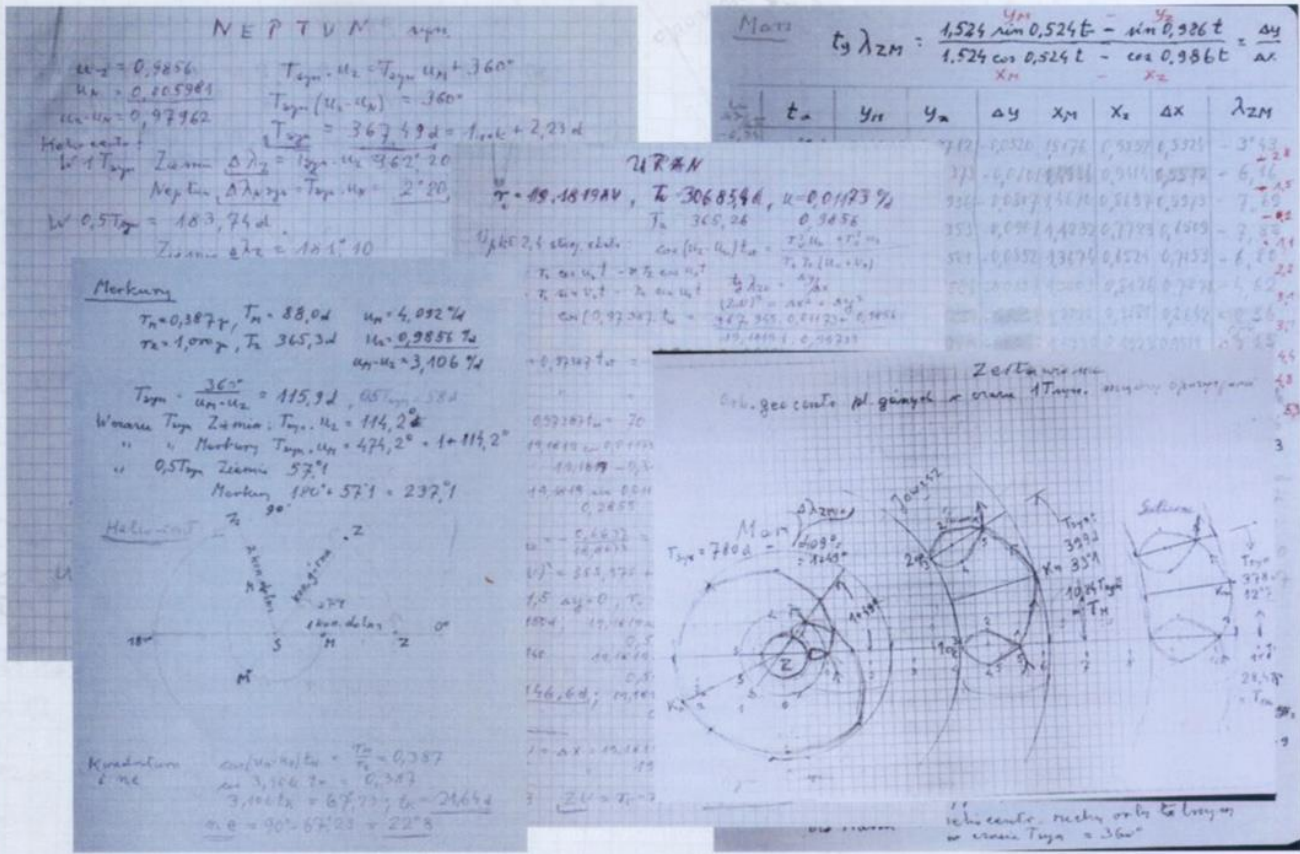
Zaznaczono też położenie ustalonych poprzednio punktów 1—5 oraz średnią odległość Jowisza od Słońca.

Zobaczmy, jak skomplikuje się ruch Jowisza, gdy przyjmiemy pozorną nieruchomość Ziemi. Na rys. 6 jako stałą przyjmujemy pozycję Ziemi. Łączymy ją z Jowiszem zgodnie z obliczonymi współrzędnymi: długościami λ_{app} i odległościami ZJ. Tak wyznaczone pozycje Jowisza J_1 — J_5 , połączone, kolejno utworzą pozorną pętlę o długości J_1 — J_3 wynoszącej 1,38 j.a. i szerokości J_2 — J_4 równej 0,82 j.a.

Równocześnie należy umieścić Słońce na orbicie kołowej okrążającej nieruchomą Ziemię. Pozycje Słońca będą przeciwne do pozycji Ziemi w układzie heliocentrycznym $\lambda_S = \lambda_Z \pm 180^\circ$. Odległość Jowisza od Słońca pozostaje stała i równa promieniowi orbity heliocentrycznej Jowisza r_J . Trójkątne konfiguracje, które powstawały w układzie heliocentrycznym, są nadal widoczne w układzie ziemskim. Na rys. 6 zaznaczono również skrócone perspektywicznie pętle Jowisza widoczne na sferze niebieskiej. Cykl zmian konfiguracji



Rys. 6. Ruch Jowisza w układzie ziemskim. S_1 — S_5 : pozycje Słońca w momentach, w których Ziemia na rys. 1a zajmuje miejsca Z_1 — Z_5 . Pętle 1J—5J widoczne są w płaszczyźnie orbity Jowisza, pętle skrócone perspektywicznie widoczne są na sferze niebieskiej



Rękopisy prof. Opolskiego z którymi musieli zmierzyć się autorzy niniejszego opracowania

trwa od jednej opozycji do drugiej, co stanowi okres synodyczny.

Na rys. 6 widać, że odległość Jowisza od nieruchomej Ziemi zmienia się od 4,20 j.a. w opozycji do 6,20 j.a. w koniunkcji. Przyrost długości w czasie między kolejnymi opozycjami wynosi $\Delta\lambda_{app} = 33^\circ 12'$. Małym zmiennym elementem pętli jest długość łuku ruchu wstecznego. W przypadku Jowisza jest to 10° .

Mimo skomplikowanego przebiegu zmian, średni ruch dzienny Jowisza z całego okresu synodycznego jest taki sam jak stały ruch heliocentryczny u_j :

$$\bar{u}_j = \frac{\Delta\lambda_{app}}{T_{syn}} = \frac{33^\circ 12'}{398,9^d} = 0,083^\circ/d = u_j$$

Stosunek okresów T_J/T_{syn} równa się stosunkowi przyrostów odpowiednich długości:

$$\frac{T_J}{T_{syn}} = \frac{\Delta\lambda_{SJ}}{\Delta\lambda_{app}} = \frac{360^\circ}{33^\circ 12'} = 10,9$$

Z tego wynika, że gdy w ruchu heliocentrycznym Jowisz wykonuje spokojnie cały obieg dookoła Słońca, w układzie ziemskim wykonałby prawie 11 skomplikowanych cykli ruchów w okresach synodycznych.

Może to miał na myśli Kopernik, gdy przedstawił prostotę i harmonię ruchów planet w układzie heliocentrycznym w porównaniu z ich ruchami wokół nieruchomej Ziemi.

Od redakcji:

Gorąco polecamy powtórzenie rachunków Autora również dla innych planet. Wzory (1) — (6) wstawione w arkusz Excela zapewnią nam znakomitą rozrywkę na szarą, deszczową niedzielę. Sprawdziliśmy!



Profesor Antoni Opolski w dniu setnych urodzin w towarzystwie współtwórców uroczystej oprawy tego Jubileuszu w Uranii, wrocławskich heliofizyków (od lewej) Barbary Cader-Sroki, Tomasza Mrozka i Michała Tomczaka, obecnie dyrektora Instytutu Astronomicznego Uniwersytetu Wrocławskiego. Na zdjęciu zabrakło Pawła Presia (niżej)

