

7. Planety

Dla setek minionych pokoleń obraz gwiazdzistego nieba był niemal taki sam, jaki jest i dla nas. Kilka tysięcy gwiazd, które dostrzegamy gołym okiem, tkwi niemal w tych samych miejscach względem siebie. Ten idealny ład zaburza jednak kilka obiektów, które, choć wyglądają jak gwiazdy, ciągle zmieniają swoją pozycję i czynią to bardzo dziwnie. Tymi obiektami są *planety*. Nie ulega wątpliwości, że dziwny ruch planet, obok zaćmień Słońca i Księżyca, był zjawiskiem, które istotnie przyczyniło się do traktowania nieba jako obiektu przyrodniczego. Przez setki lat badanie ruchu planet, tworzenie modeli i algorytmów pozwalających odgadywać ich położenie w dowolnym momencie było podstawowym zajęciem badaczy nieba.

Niemal każdej nocy można zobaczyć na niebie jedną z czterech najjaśniejszych planet: Wenus, Marsa, Jowisza lub Saturna. Gdzie ich szukać? Jak je odróżnić od gwiazd³⁶? Typowym sposobem radzenia sobie z tym problemem jest korzystanie z pomocy programów komputerowych lub astronomicznych kalendarzy. Nie ulega jednak wątpliwości, że o wiele bardziej użyteczne i satysfakcjonujące jest nabycie umiejętności samodzielnego odnajdywania planet na podstawie bardzo prostych przesłanek. Radzę spróbować. Cztery najjaśniejsze planety (Wenus, Mars, Jowisz, Saturn) można odróżnić od gwiazd na podstawie kilku cech. Po pierwsze, planety praktycznie nie migocą. Po drugie, Wenus (biała), Mars (czerwony) i Jowisz (biały) są bardzo jasne — zdecydowanie jaśniejsze od najjaśniejszych gwiazd. Najślabszy Saturn (żółty) ma jasność porównywalną z jasnością najjaśniejszych gwiazd. Wenus bywa widoczna tylko na zachodnim niebie niedługo po zachodzie Słońca (Gwiazda Wieczorna) lub na wschodnim, przed wschodem Słońca (Gwiazda Poranna, Jutrzenka). Wszystkie planety można zobaczyć tylko na południu, zachodzie lub wschodzie — a jeśli na zachodzie lub wschodzie, to dosyć blisko horyzontu. Ostatnią, najważniejszą cechą odróżniającą planety od gwiazd jest ich ruch. Dostrzeżenie ruchu wymaga jednak bardziej systematycznych obserwacji. Zanim zajmiesz się tym problemem, tak ważnym

³⁶Osobom rzadko spoglądającym w niebo może wydać się zaskakujące, że nawet pobieżne poznanie konfiguracji tworzonych przez gwiazdy pozwala niemal natychmiast dostrzec obecność planety. Wystarczy rzut oka na niebo, by dostrzec zaburzenie gwiazdowego porządku.

dla minionych pokoleń astronomów, popatrz uważnie na dowolną z odnalezionych planet, gdy znajduje się w pobliżu horyzontu, i sprawdź, czy prawdziwa jest podawana często informacja, że planety nie migocą, a jeśli już migocą, to nieporównanie słabiej niż gwiazdy. Jeśli twoje obserwacje potwierdzają tę informację, zastanów się nad możliwymi przyczynami tej różnicy i krótko opisz ostateczne konkluzje.

7.1. Badanie ruchu Marsa, Jowisza lub Saturna

Jeśli sytuacja na niebie umożliwi ci wybór planety, to należy wybrać tę, która po zachodzie Słońca jest najbliżej wschodniego horyzontu lub pojawia się ponad wschodnim horyzontem w godzinę lub dwie, trzy godziny po zachodzie Słońca. Obserwacje będą polegały na tym, by w jak najdłuższym okresie (kilka miesięcy), w kilkunastodniowych odstępach określać pozycję planety na tle gwiazd. W trakcie jednej obserwacji, oprócz zaznaczenia pozycji planety na mapie, trzeba będzie zmierzyć kąt pomiędzy kierunkiem na Słońce i na planetę.

Do zaznaczania pozycji planety wystarczy jedna lub dwie spośród mapek Ekl.1–Ekl.6, zamieszczonych w dodatku C. Mapa, na której będzie zaznaczana pozycja planety, powinna mieć taką skalę, by 1 cm mapy odpowiadał kątowi od $0,5^\circ$ do 1° . By uzyskać taką skalę, należy odpowiednio powiększyć mapę lub jej fragment. Do wyznaczenia kąta pomiędzy Słońcem i planetą wystarczy prosty, lecz duży kątomierz, podobny do tego opisanego w dodatku A. Pomiaru kąta pomiędzy kierunkami do Słońca i planety należy dokonać, gdy będzie to najłatwiejsze, czyli gdy planeta będzie widoczna przed zachodem Słońca lub po jego wschodzie. Jeśli taka sytuacja się nie nadarzy, konieczne będzie skorzystanie z tego samego kątomierza, lecz wzbogaconego o dodatkowy element (patrz dodatek A, rys. A.3). Do przybliżonego określenia kierunku na Słońce, gdy znajduje się ono pod horyzontem, można wykorzystać tylko zasadę określającą konstrukcję tego przyrządu: wszystkie obiekty poruszają się względem horyzontu tak, jakby były położone na sferze obracającej się jednostajnie wokół osi o stałym położeniu względem horyzontu. By ją skutecznie wykorzystać do określenia pozycji niewidocznego Słońca, wystarczy znać: prędkość kątową obrotu sfery nieba, miejsce zachodu Słońca oraz czas, który upłynął od chwili zachodu Słońca. Rezultatem kilkumiesięcznych obserwacji będą: daty obserwacji, pozycje planety na tle gwiazd dla każdej daty, kąt pomiędzy kierunkiem na planetę i Słońce podczas jednej obserwacji.

Analizę wykonanych obserwacji rozpocznij od zwrócenia uwagi na położenie zaznaczonych pozycji planety względem ekliptyki. Położenie ekliptyki pokazuje każdy atlas nieba, a na mapach Ekl.1–Ekl.6 reprezentuje ją linia przecinająca ukośnie siatkę współrzędnych. Uwzględniając skalę mapy, oszacuj przeciętną kątową odległość planety od ekliptyki i odpowiedz, czy wynik twoich obserwacji jest zgodny z następującym, jakże ważnym stwierdzeniem: *Płaszczyzny orbit prawie wszystkich*

planet Układu Słonecznego niemal pokrywają się z płaszczyzną orbity Ziemi³⁷. Na przykład nachylenie płaszczyzny orbity Marsa do płaszczyzny orbity Ziemi wynosi $1,8^\circ$, Jowisza $1,3^\circ$, Saturna $2,5^\circ$. Jeśli kątowa odległość pozycji obserwowanej planety od ekliptyki odczytana z mapy przewyższa podane wartości, zastanów się nad możliwymi przyczynami takiej niezgodności.

Na podstawie zaobserwowanych pozycji planety na tle gwiazd i wartości kąta pomiędzy kierunkami na planetę i Słońce, wyznaczonej podczas jednej obserwacji, można wykonać bardzo pouczający rysunek pokazujący położenia Słońca, Ziemi i planety w rzucie na płaszczyznę orbity Ziemi. Rysunek taki ułatwi zrozumienie ruchu planety³⁸, a przede wszystkim umożliwi oszacowanie promienia jej orbity, kierunku ruchu i okresu obiegu wokół Słońca. Uzyskanie tych ważnych informacji będzie możliwe po przyjęciu trzech założeń dotyczących ruchu Ziemi i badanej planety: a) planeta obiega Słońce po okręgu, którego środkiem jest Słońce, b) kątowa prędkość jej ruchu orbitalnego jest stała, c) płaszczyzny orbit planety i Ziemi niemal się pokrywają. Rysunek, o którym mowa, należy wykonać w następujący sposób. Przyjmij, że płaszczyzna kartki pokrywa się z płaszczyzną orbity Ziemi i orbity planety. Zaznacz pozycję Słońca i narysuj okrąg wyobrażający orbitę Ziemi. W dowolnym punkcie tego okręgu (orbity) zaznacz punkt pokazujący położenie Ziemi podczas pierwszej obserwacji. Wiedząc, że orbitalna prędkość kątowa Ziemi ω_Z wynosi niemal dokładnie $1^\circ/\text{dobę}$ ($\omega_Z = 360^\circ/365,25 \text{ dób}$), oblicz i zaznacz położenia Ziemi na orbicie odpowiadające datom kolejnych obserwacji. Zaznacz też kierunek ruchu Ziemi. Następnie narysuj kierunek Ziemia–planeta dla daty, w której był wykonany pomiar kąta pomiędzy Słońcem i planetą, zwracając uwagę na odpowiednie położenie planety względem Słońca (w chwili pomiaru kąta planeta mogła być na prawo lub na lewo od Słońca). Datę wykonania tego pomiaru oznaczmy symbolem D0. Kierunki Ziemia–planeta dla pozostałych dat obserwacji

³⁷Wyjątkiem od podanej reguły jest Pluton (odkryty dopiero w 1930 r.), którego płaszczyzna orbity jest nachylona do płaszczyzny orbity Ziemi pod kątem 17° . Pluton wyróżnia się spośród planet jeszcze innymi cechami: znaczną ekscentrycznością orbity, nietypową gęstością materii i prędkością ruchu obrotowego. W ostatnich latach, po odkryciu istnienia tzw. *pasa Kuipera*, Pluton przestał być traktowany jak typowa planeta, a zaczyna być widziany jako wyjątkowo duży składnik pasa Kuipera — obiekt przypominający duże jądro kometarne.

³⁸Przez większość czasu planety odleglejsze od Słońca niż Ziemia poruszają się w lewo względem gwiazd (przeciwnie do kierunku ruchu gwiazd względem horyzontu). W dniach, gdy Ziemia i planeta są położone po tej samej stronie Słońca (gdy planeta jest bliska „opozycji”), Ziemia, obiegająca Słońce z większą prędkością kątową, zaczyna wyprzedzać planetę. Skutkiem tego z Ziemi obserwujemy początkowo zatrzymanie planety, a następnie zmianę kierunku jej ruchu na przeciwny (planeta porusza się w prawo względem gwiazd). Po tym następuje ponowne zatrzymanie ruchu i powrót do ruchu w lewo.

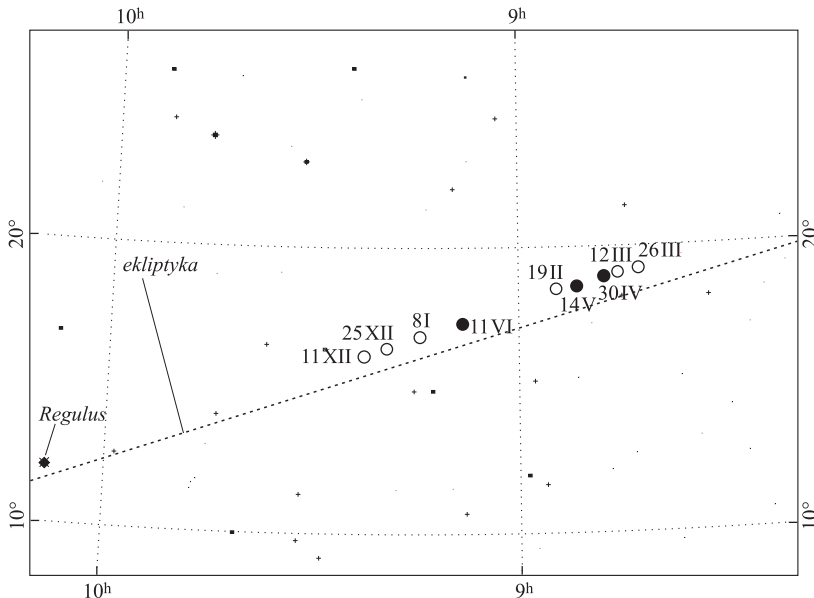
Najprostszym sposobem zilustrowania takiego zachowania się planet jest inscenizacja. Czas potrzebny na jej przeprowadzenie może być krótszy niż słowne i tablicowe próby wyjaśnień. Dwoje uczniów: „Ziemia” i „Planeta”, porusza się po okręgach wokół trzeciego ucznia „Słońca”. Stosunek promieni okręgów, po których chodzą uczniowie, i prędkości kątowych ich poruszania się powinien być w przybliżeniu zgodny z wartościami dla konkretnej planety. „Ziemia”, poruszając się wokół „Słońca”, powinna cały czas patrzeć na „Planetę” i opisywać jej ruch na tle ścian lub bardziej odległych przedmiotów.

można narysować, znając pozycję planety zaznaczoną na mapie i kierunek do planety w dniu D0 (kąt pomiędzy kierunkiem Ziemia–planeta w dniu D0 i kierunkiem Ziemia–planeta dla innej daty można wyznaczyć na podstawie skali mapy). Rysując kierunki Ziemia–planeta dla kolejnych dat, zwracaj uwagę na to, czy planeta jest położona na lewo, czy na prawo od położenia podczas wcześniejszej obserwacji.

Teraz można przystąpić do wyznaczenia promienia orbity planety. Tak jak to było sugerowane wcześniej, zakładamy, że Ziemia i planeta poruszają się po okręgach, ze stałymi prędkościami kątowymi. Zatem również ich prędkości liniowe będą stałe i stałe powinny być też stosunki dróg przebytych przez Ziemię i planetę w takim samym czasie. Jeśli więc s_Z^{ij} będzie oznaczało drogę przebytą przez Ziemię pomiędzy obserwacjami o numerach i, j , zaś s_p^{ij} — drogę przebytą w tym samym okresie przez planetę, to dla dowolnej pary i, j musi być spełniony warunek:

$$\frac{s_p^{ij}}{s_Z^{ij}} = \frac{v_p(t_j - t_i)}{v_Z(t_j - t_i)} = \frac{v_p}{v_Z} = \text{const.} \quad (1)$$

Drogę s_p^{ij} przebytą przez planetę, odpowiadającą drodze s_Z^{ij} przebytej w tym samym czasie przez Ziemię, wyznaczają punkty przecięcia kierunku Ziemia–planeta dla obserwacji i, j z orbitą planety. Znalazienie promienia orbity planety będzie więc polegało na narysowaniu okręgu o takim promieniu, aby warunek (1) był jak najlepiej spełniony. Zakończeniem analizy wyników będzie zaznaczenie na orbicie planety kierunku jej ruchu orbitalnego i oszacowanie okresu obiegu planety wokół Słońca (do wyznaczenia okresu obiegu wystarczy pomiar kątowej drogi, którą przebyła planeta pomiędzy pierwszą i ostatnią obserwacją).



Rys. 7.1. Mapa fragmentu nieba z zaznaczonymi pozycjami Jowisza; $\circ$ — pozycje Jowisza, gdy przemieszczał się względem gwiazd ze wschodu na zachód (w prawo), $\bullet$ — gdy przemieszczał się z zachodu na wschód (w lewo)

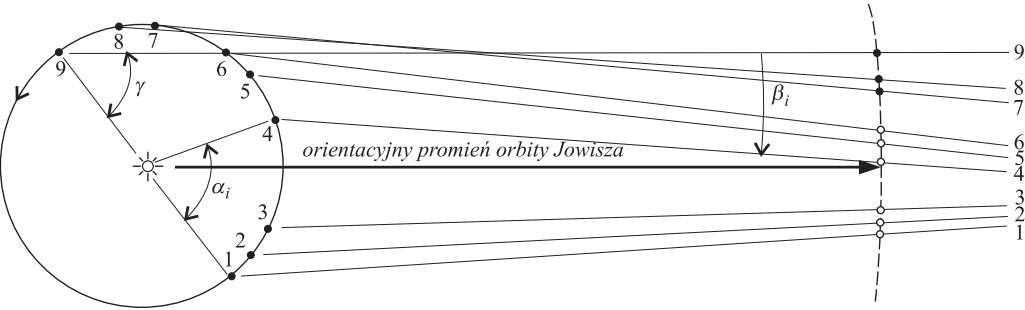
Aby zilustrować opisaną procedurę opracowywania wyników obserwacji, rozważmy następujący przykład: Obserwacje Jowisza były wykonywane w okresie od 11 XII 2002 r. do 11 VI 2003 r. Kąt pomiędzy kierunkiem do Słońca i do Jowisza został zmierzony w dniu 11 VI i wynosił ok. 57° . Położenia Jowisza na tle gwiazd były zaznaczane na mapie nieba (rys. 7.1). Jak wynika z zanotowanych pozycji i dat, w okresie obserwacji zmienił on kierunek ruchu względem gwiazd. Na podstawie tych danych przygotowana została tabela 7.1.

Tabela 7.1. Wyniki obserwacji ruchu Jowisza

Numer obserwacji	Data obserwacji	Położenie Ziemi (kąt, o który obróciła się Ziemia od 11 XII 2002) $\alpha_i = \omega_Z(t_i - t_0)$, $t_0 = 11 \text{ XII}$	Położenie Jowisza (kątowna odległość β_i Jowisza od kierunku z 11 VI 2003), wartości β_i odczytane z mapy
1	11 XII	0°	$-3,7^\circ$
2	25 XII	14°	$-2,8^\circ$
3	8 I	28°	$-1,6^\circ$
4	19 II	70°	$+3,5^\circ$
5	12 III	91°	$+5,7^\circ$
6	26 III	105°	$+6,5^\circ$
7	30 IV	140°	$+5,2^\circ$
8	14 V	154°	$+4,2^\circ$
9	11 VI	182°	0°

W trzeciej kolumnie tabeli są podane obliczone wartości kątów, o które przebiegała Ziemia w swoim ruchu wokół Słońca pomiędzy pierwszą obserwacją a następnymi ($\alpha_i = \omega_Z(t_i - t_0)$, gdzie $t_0 = 11 \text{ XII}$). Czwarta kolumna tabeli zawiera odległości kątowne β_i pomiędzy pozycją Jowisza w dniu 11 VI i jego pozycjami podczas pozostałych obserwacji. Kąty te zostały wyznaczone z mapy na podstawie jej skali. Znak plus oznacza, że Jowisz jest położony na prawo od pozycji w dniu 11 VI, znak minus — że na lewo. Znając kątowne wartości α_i , β_i , można było wykonać rys. 7.2, którego płaszczyzna pokrywa się z płaszczyznami obu orbit.

Rys. 7.2



Pozycja Ziemi w dniu 11 XII (obserwacja nr 1) została wybrana dowolnie. Położenia Ziemi podczas kolejnych obserwacji zostały zaznaczone na podstawie danych z trzeciej kolumny tabeli. Następnie został narysowany kierunek Ziemia–Jowisz w dniu 11 VI (obserwacja nr 9), gdyż dla tej daty zmierzono kąt γ pomiędzy Jowiszem i Słońcem ($\gamma \approx 57^\circ$). Kierunki Ziemia–Jowisz dla pozostałych dat obserwacji zostały narysowane na podstawie wartości zawartych w czwartej kolumnie. Okrąg wyobrażający orbitę Jowisza najlepiej spełniający warunek (1) został narysowany linią przerywaną. Po zmierzeniu promieni obu orbit można stwierdzić, że promień orbity Jowisza wynikający z tych obserwacji jest ok. 5,3 razy większy niż promień orbity Ziemi ($\approx 5,3$ AU). Mierząc kątową drogę pokonaną przez Jowisza od 11 XII 2002 r. do 11 VI 2003 r., na okres obiegu otrzymamy wartość ok. 12,7 lat. Gdyby obserwacje i ich analiza były staranniejsze (dokładniejsza mapa i lokalizacja Jowisza, dokładniej wykonany rysunek), ostateczny rezultat byłby z pewnością bliższy wartościom, które są powszechnie akceptowane ($r_p \approx 5,2$ AU, $T \approx 11,8$ lat).

7.2. Badanie ruchu Wenus

Obserwacje Wenus należy prowadzić o zmierzchu lub o świcie. Konieczne będzie wykonanie 6 do 8 obserwacji, rozłożonych w miarę równomiernie na przestrzeni dwóch, trzech miesięcy. Celem każdej obserwacji będzie wyznaczenie kąta pomiędzy Słońcem i Wenus oraz naniesienie pozycji Wenus na mapę nieba. Okres wykonywania obserwacji powinien być tak wybrany, aby obejmował moment wystąpienia maksymalnej odległości kątowej między Słońcem i Wenus³⁹. Jedna z obserwacji powinna zostać przeprowadzona właśnie w tym momencie. Ze względów organizacyjnych obserwacje Wenus warto połączyć z wykonywaniem zadań z rozdziału 1.

Pomiar kąta pomiędzy kierunkami na Słońce i Wenus można przeprowadzić prostym narzędziem, choćby takim, jak opisane w dodatku A. Oprócz wartości kąta należy określić błąd jego wyznaczenia. Trzeba uczynić wszystko, by był on jak najmniejszy. Pozycję Wenus względem gwiazd można określić dwiema metodami. Jeśli odległość Wenus od Słońca będzie duża i planeta będzie dostatecznie wysoko nad horyzontem, to w jej pobliżu mogą być widoczne jasne gwiazdy. Wtedy naniesienie pozycji Wenus na mapę umożliwi bezpośrednią obserwację (gołym okiem lub za pomocą lornetki). Jeśli dostrzeżenie lub zidentyfikowanie gwiazd w pobliżu Wenus nie będzie możliwe, to w chwili gdy Słońce jest pod horyzontem, należy odnaleźć

³⁹Datę D maksymalnego oddalenia Wenus od Słońca można obliczyć z zależności $D = D_0 + n \cdot 583$ [doby], gdzie n jest liczbą naturalną, D_0 zaś to 10 kwietnia 2004 dla obserwacji prowadzonych o zmierzchu, a dla obserwacji prowadzonych o świcie to 1 września 2004. Jeśli obserwacje będą prowadzone o zmierzchu, to należy rozpocząć je na trzy tygodnie przed wyznaczoną datą i kończyć nie wcześniej niż sześć, siedem tygodni po tej dacie, jeśli o świcie — to rozpocząć na siedem tygodni przed wyznaczoną datą i kończyć nie wcześniej niż trzy tygodnie po niej.

na niebie i na mapie dwie lub trzy gwiazdy najbliższe Wenus, lecz znajdujące się w ciemniejszej części nieba (na wschód od Wenus, gdy obserwacje są prowadzone o zmierzchu, lub na zachód od niej — jeśli o świcie), i zmierzyć kąt pomiędzy każdą z nich i Wenus. Wartości tych kątów i znajomość skali mapy umożliwią zaznaczenie pozycji planety na mapie. Gwiazdy, względem których będzie ustalana pozycja Wenus, nie powinny tworzyć na niebie linii prostej, a ich odległości katowe od Wenus nie powinny przekraczać 30° . Wokół zaznaczonej na mapie pozycji należy narysować okrąg określający niepewność lokalizacji. Opisane tu czynności powinno się wykonywać na jednej z map Ekl.1–Ekl.6 zamieszczonych w dodatku C, powiększonych trzy- lub czterokrotnie.

Po wykonaniu wszystkich obserwacji przyjrzyj się położeniu zaznaczonych pozycji Wenus względem płaszczyzny ekliptyki. Odpowiedz, czy potwierdzają one informację podawaną w podręcznikach, że nachylenie orbity Wenus do płaszczyzny ekliptyki wynosi $3,4^\circ$. Jeśli są sprzeczne, zastanów się nad możliwymi powodami rozbieżności.

Jeśli uznasz, że płaszczyzna orbity Wenus z dokładnością do kilku stopni pokrywa się z płaszczyzną orbity Ziemi, to w na podstawie wyników obserwacji będzie można wykonać szkic podobny do opisanego w poprzednim zadaniu. Tak jak wówczas, na kołowej orbicie Ziemi należy zaznaczyć pozycje Ziemi wynikające z daty obserwacji, a następnie narysować kierunki Ziemia–Wenus, korzystając z wartości kąta pomiędzy kierunkami do Słońca i do Wenus, mierzonego podczas każdej obserwacji. Na podstawie rysunku odpowiedz na pytanie, czy obserwacje dopuszczają możliwość ruchu Wenus wokół Słońca po kołowej orbicie ze stałą prędkością kątową? Czy, inaczej mówiąc, można narysować taki okrąg, by stosunki dróg przebytych przez Wenus i Ziemię w tych samych okresach były stałe (patrz poprzednie zadanie)?

Jeśli obserwacje dopuszczają kołowość orbity Wenus, wykonaj polecenia:

- Narysuj odpowiedni okrąg wyobrażający orbitę Wenus i zaznacz położenia planety odpowiadające datom obserwacji oraz kierunek jej ruchu orbitalnego.
- Wyznacz okres obiegu Wenus wokół Słońca.
- Opierając się na posiadanej wiedzy matematycznej, zastanów się nad wzajemnym położeniem Słońca, Wenus i Ziemi w chwili, gdy kąt między kierunkami Ziemia–Wenus i Ziemia–Słońce jest największy. Oblicz, jaki jest w tym momencie kąt γ pomiędzy kierunkami Wenus–Słońce i Wenus–Ziemia. Korzystając z obliczonej wartości γ i zmierzonej wartości kąta pomiędzy Słońcem i Wenus w chwili ich największego oddalenia, wyznacz promień kołowej orbity Wenus, przyjmując promień orbity Ziemi jako jednostkę. Narysuj orbitę Wenus. Jeśli tak wyznaczony promień orbity będzie się znacznie różnił od promienia wyznaczonego w punkcie 1, zastanów się nad możliwymi przyczynami takiej rozbieżności.