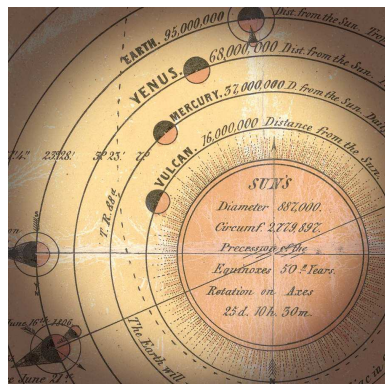


Uran, Neptun i Wulkan – trzy planety, z których jedna nigdy nie istniała, cz. III

Mateusz DEMBNY*, Grzegorz ŁUKASZEWICZ*, Igor PALUSIŃSKI**

* Instytut Matematyki Stosowanej i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

** Student, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski



Litografia przedstawiająca hipotetyczną planetę Wulkan okrążającą Słońce, autorzy: E. Jones & G.W. Newman, 1846



Budynek Obserwatorium, Cincinnati, Ohio
Autor: Analogue Kid z en.wikipedia, opublikowane na licencji CC BY 2.5



Obraz Merkurego podczas tranzytu przez tarczę Słońca, uchwycony przez teleskop SOT satelity Hinode, NASA, listopad 2006

Zakończeniem naszej trzyczęściowej serii artykułów jest bardzo pouczająca historia Wulkana. Wulkan to hipotetyczna planeta, która miała być odpowiedzialna za zaburzenie orbity Merkurego, podobnie jak Neptun ma wpływ na ruch Urana. Motywacją dla sformułowania hipotezy o Wulkanie był opisany w poprzedniej części sukces Urbaina Le Verriera, któremu udało się odnaleźć Neptuna w oparciu o badanie trajektorii Urana. Niewiele brakowało, by Francuz przeszedł do historii jako odkrywca dwóch planet Układu Słonecznego, gdyż problem z orbitą Merkurego pojawił się równoległe do zagadnienia ruchu Urana, a Le Verrier również i tutaj odegrał kluczową rolę.

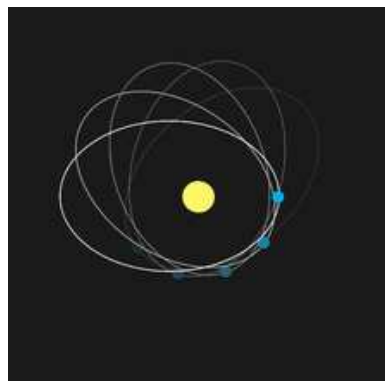
Problematyczna orbita Merkurego. W 1841 roku François Arago, dyrektor Obserwatorium Paryskiego, zasugerował, aby Le Verrier użył swoich niezwykłych zdolności do precyzyjnego obliczenia orbity Merkurego. Wówczas planeta ta była bardzo problematyczna, ponieważ jest najbliżej Słońca, a to utrudnia jej obserwację, gdyż przez większość czasu przyćmiewa ją słoneczny blask. Drugim powodem jest duży mimośród orbity tej planety, który dodatkowo zwiększał błędy obliczeniowe – spośród planet Układu Słonecznego Merkury ma największy mimośród (wynoszący $e = 0,2056$), czyli orbitę najbardziej odbiegającą od okręgu. Problem znalezienia trajektorii Merkurego spędzał sen z powiek astronomów od czasów Ptolemeusza. Le Verrier z przyjemnością zatem przystał na propozycję Arago. W swojej pracy wykorzystał ponad 400 obserwacji dokonanych w Obserwatorium Paryskim w latach 1801–1842. W roku 1843 opublikował raport zatytułowany *Détermination nouvelle de l'orbite de Mercure et de ses perturbations*, którego kontynuacją była wydana po dwóch latach książka *Theorie du Mouvement de Mercure*. Tam też uczony zamieścił przewidywania dotyczące możliwej trajektorii Merkurego.

Kamieniem probierczym dla wyników Le Verriera miał być tranzyt Merkurego przez tarczę Słońca w 1845 roku – częściowo widoczny we Francji, a całkowicie w Stanach Zjednoczonych. Tranzyt przez tarczę Słońca oznacza przejście jakiegoś ciała dokładnie pomiędzy Słońcem a Ziemią. Na przykład zaćmienie Słońca to nic innego jak tranzyt Księżyca przez tarczę Słońca. Le Verrier w 1845 roku wysłał swoje prognozy do Obserwatorium w Cincinnati, które wówczas było centrum pomiaru czasu dla Stanów Zjednoczonych. Obserwacji miał dokonać bardzo utalentowany astronom i przyszły generał amerykańskiej wojny domowej Ormsby M. Mitchel. Równoległego pomiaru dokonał William Lassell w obserwatorium w Liverpoolu (więcej o nim w artykule poświęconym Maxwellowi z Δ_{23}^1).

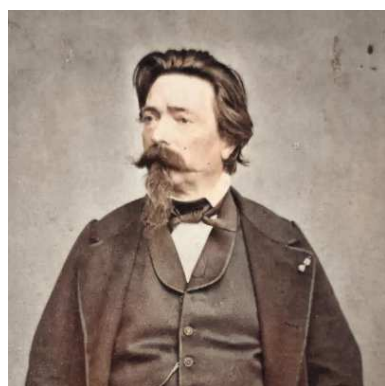
Merkury został zaobserwowany 16 sekund później, niż wskazywały na to wyliczenia Le Verriera. Mitchel był pod ogromnym wrażeniem tej dokładności, lecz Le Verrier był zawiedziony. Jego rachunki dopuszczały błąd rzędu co najwyżej dziesiątej części sekundy. To wystarczyło, żeby badacz stracił zaufanie do swoich wyników i wstrzymał publikację tablic dla Merkurego. Francuz porzucił badania nad Merkurym i przeniósł swoją uwagę na znalezienie orbit dwóch nowych komet, nie wiedząc, że problem, którego dotknął, wywoła niemałe zamieszanie. W tym samym czasie popularność zyskał Uran i zagadnienie nowej planety (opisane w poprzednich częściach artykułu). Problem ten wielce niepokoił Arago, który ponownie zwrócił się do Le Verriera.

Kolejna planeta Le Verriera? W roku 1859, po sukcesie związanym z odkryciem nowej planety – Neptuna, Le Verrier powraca do pracy nad Merkurym. Temat, z którym miał się tym razem zmierzyć, był nieco inny od tego, który mu został zlecony w 1841 roku. Był nim problem precesji orbity Merkurego. Aby wyjaśnić, na czym polega to zjawisko, przyjmijmy, że planety, zgodnie z prawem Keplera, poruszają się po elipsach. Zauważono, że orbita Merkurego nie jest zamknięta – wygląda tak, jakby elipsa, po której krąży Merkury, powoli obracała się wokół Słońca. W związku z tym m.in.

Precesją nazywa się również zjawisko zmiany osi obrotu obracającego się ciała, tutaj jednak używamy terminu precesja w innym sensie.



Precesja peryhelium Merkurego



Edmond Modeste Lescarbault



Domowe obserwatorium Edmonda Modesta Lescarbaulta w Orgères-en-Beauce, Eure-et-Loir (Francja), fotografia: L. Martin, 1863

położenie peryhelium (punktu orbity znajdującego się najbliżej Słońca) zmienia się w czasie. To właśnie ruch peryhelium nazywamy precesją. Le Verrier wyznaczył prędkość, z jaką obraca się peryhelium Merkurego: wynosi ona $565,0''$ na wiek ($1''$ to 1 sekunda łuku, czyli $\frac{1}{3600}^\circ$). Ponadto Francuz podjął się wyznaczenia wpływu, jaki na tę precesję mają inne planety Układu Słonecznego. Odpowiednie składowe tej prędkości to (w jednostkach $''$ /wiek):

Wenus	280,6
Jowisz	152,6
Ziemia	83,6
Pozostałe planety	5,2
Łączny wpływ planet:	522,0
Obserwowana precesja:	565,0
Różnica:	43,0

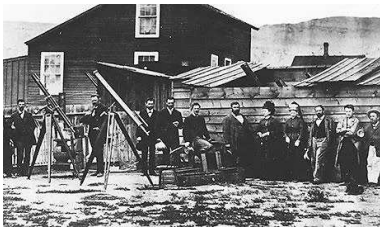
Le Verrier był zdumiony tym wynikiem. Gdzie podziały się brakujące $43,0''$ /wiek ruchu obrotowego peryhelium Merkurego? Doświadczenie z Neptunem podsunęło mu pomysł, że być może odpowiada za to nieznaną planetę, której nie uwzględniono. Z punktu widzenia Le Verriera rozsądnie było umieścić nową planetę między Słońcem a Merkurym. Jak już wspomnieliśmy, ze względu na bliskość Słońca Merkury jest trudny do obserwacji – można dojrzeć go jedynie tuż przed wschodem lub tuż po zachodzie Słońca. Gdyby nowa planeta leżała jeszcze bliżej Słońca niż Merkury, to jej obserwacja byłaby jeszcze trudniejsza, a to wyjaśniałoby, dlaczego nikt do tej pory nie zwrócił na nią uwagi. W roku 1859 Le Verrier opublikował przewidywania dotyczące hipotetycznej planety. Zgodnie z nimi miała ona mieć zbliżoną masę do Merkurego oraz o połowę mniejszą orbitę. Gdy astronomowie całej Europy poznali te parametry, rozpoczęły się łowy na nową planetę.

Wulkanomania. W grudniu 1859 roku Le Verrier otrzymał list od doktora Edmonda Modeste'a Lescarbaulta, francuskiego lekarza, który w wolnych chwilach amatorsko zajmował się astronomią. Ten pasjonat astronomii zbudował obserwatorium w swoim domu w miejscowości Orgères-en-Beauce, w środkowej Francji, oraz utrzymywał korespondencję z różnymi towarzystwami naukowymi. W liście do Le Verriera Lescarbault napisał, że zaobserwował jego planetę podczas tranzytu przez tarczę Słońca, 26 marca 1859 roku. Le Verrier rzucił wszystko i wyruszył na spotkanie z astronomem-amatorem. W jego gabinecie zażądał okazania wszystkich obserwacji nowej planety, przetestował użyty przez lekarza sprzęt oraz przeegzaminował Lescarbaulta z wykorzystanych technik pomiaru. Wypytał nawet sąsiadów, czy lekarz jest człowiekiem godnym zaufania. Po wnikliwym przebadaniu wszystkich okoliczności odkrywca Neptuna nie zauważył błędów w dostarczonych przez Lescarbaulta materiałach, osobiście powtórzył obliczenia, metody pomiaru czasu okazały się trafne, a użyty teleskop (teleskop refrakcyjny o średnicy 95 mm) sprawny. Ostatecznie Le Verrier opuścił gabinet Lescarbaulta przekonany o prawdziwości obserwacji, na podstawie których oszacował okres obiegu nowej planety wokół Słońca na 19 dni i 7 godzin (dla porównania: okres obiegu Merkurego to około 88 dni).

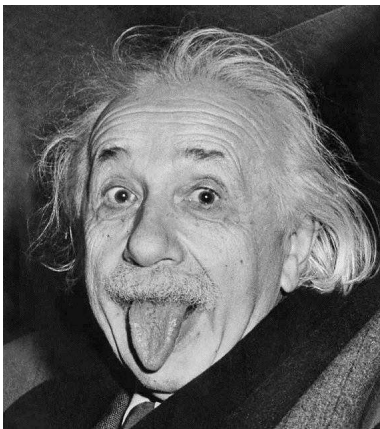
Drugiego stycznia 1860 roku Le Verrier ogłosił odkrycie kolejnej planety. Dla Francji było to wydarzenie bardziej satysfakcjonujące niż odkrycie Neptuna: francuski astronom zaobserwował to, co inny Francuz przewidział. W ciągu miesiąca nowa planeta otrzymała nazwę – Wulkan. „Wulkan” pochodzi od imienia rzymskiego boga ognia, stąd świetnie pasuje do planety znajdującej się tuż obok Słońca. W ciągu paru miesięcy od ogłoszenia najnowszego odkrycia Le Verrier otrzymał sporą ilość listów od innych astronomów. Twierdzili oni, że dokonali obserwacji plam słonecznych, które w istocie mogły być Wulkanem w czasie tranzytu. W kilku listach zawarte zostały nawet wcześniejsze, nieopublikowane obserwacje, z najstarszą sięgającą roku 1762. Mijały lata, a wielu astronomów pozostało sceptycznych wobec istnienia nowej planety. Podnosili oni argumenty, że obserwacje plam słonecznych są niewystarczające do uznania tych plam za planetę. Ponadto, jeśli Wulkan, zgodnie z obliczeniami, ma orbitę około 20-dniową, to liczba zaobserwowanych tranzytów powinna być rzędu setek, a nie dziesiątek, jak do tej pory. Ostatecznym sprawdzianem dla teorii o Wulkanie miało być całkowite zaćmienie Słońca 28 lipca 1878 roku.



Rzymski bóg ognia Wulkan, rzeźba autorstwa Bertela Thorvaldsena



James Watson (szósty od prawej) oraz Thomas Edison (drugi od prawej) oglądali zaćmienie w 1878 roku, niedaleko miasta Rawlins, Wyoming



Albert Einstein, fotografia zrobiona w jego 72 urodziny, 14 marca 1951 r., autor: Arthur Sasse

Orbitując tak blisko Słońca, Wulkan powinien znajdować się na niebie w zasięgu 8° od niego, a podczas zaćmienia gwiazdy i planety wokół Słońca stają się bardzo dobrze widoczne. Niestety Le Verrier nie dożył tego wydarzenia, zmarł 23 września 1877 roku. Środowisko astronomiczne podzieliło się na dwa obozy: sceptyków oraz szczerze wierzących w istnienie Wulkana. Wśród zagorzałych zwolenników teorii o Wulkanie był utalentowany kanadyjsko-amerykański astronom James Craig Watson, odkrywca 22 asteroid, który w ramach testamentu utworzył Medal Jamesa Craiga Watsona, nagrodę przyznaną do dziś, co trzy lata, przez Amerykańską Narodową Akademię Nauk za wkład w astronomię. W opozycji do Watsona był jego wieloletni rywal Christian H.F. Peters, niemiecko-amerykański astronom, uczeń Gaussa, pionier w badaniu i odkrywaniu planetoid, których łącznie odkrył 48. Watson przeprowadził ekspedycję na zachód, do stanu Wyoming, skąd planował obserwować zaćmienie. Uczestnicy wyprawy, w tym młody Thomas Edison, niecierpliwie wyczekiwali, aż Księżyc zajmie pozycję między Słońcem a Ziemią.

W końcu doszło do zaćmienia, a James Watson z radością ogłosił, że zobaczył gwiazdopodobny obiekt, którego nie było w jego tablicach. Stwierdził, że to Wulkan się ujawnił. Wyznaczył dla znalezionej planety okres obiegu, równy 38 dni, oraz dokonał prognoz przyszłych tranzytów. Obserwacja Watsona została wsparta przez Lewisa Swifta, znakomitego amerykańskiego astronoma, odkrywcę 13 komet oraz setek mgławic, z których większość później okazała się galaktykami. Swift również twierdził, że zobaczył Wulkana podczas tego samego zaćmienia.

Czytelnik, który zna Układ Słoneczny oraz tytuł tego artykułu, domyśla się, że jest to obraz niepełny. Mianowicie, obserwacje wymienione wyżej były jedynymi obserwacjami pozytywnymi. Reszta astronomów, obserwując zaćmienie w 1878 roku, nie zobaczyła nic szczególnego. W kwietniu 1879 roku Peters opublikował raport *Some critical remarks on so-called intra-mercurial planet observations*, w którym zganił Watsona za błędy w metodach badawczych oraz użycie nieprecyzyjnych przyrządów pomiarowych. Ponadto uznał, że Watson w istocie zobaczył pobliską gwiazdę θ -Cancri, a nie planetę przewidzianą przez Le Verriera. We wspomnianym raporcie Peters podobnie krytykuje Swifta, a nawet stwierdza, że obserwacje Swifta i Watsona się wykluczają. W ciągu następujących lat brak obserwacji tranzytów przewidzianych przez Watsona oraz brak innych dowodów skłoniły prawie wszystkich astronomów do odrzucenia hipotezy o istnieniu Wulkana. Skąd zatem brakujący składnik $43,0''/\text{wiek}$ odpowiedzialny za precesję orbity Merkurego?

Einstein – niszczyciel planet. Zgodnie z metodą naukową, gdy teoria przestaje odpowiadać obserwacjom, powinno się zmienić teorię. Jednak uczeni opisani w tej serii artykułów: Bessel, Arago, Le Verrier, Adams, Airy, Watson i Swift zrobili coś zupełnie przeciwnego, co można uznać za zatrważające. Będąc pod presją autorytetu Newtona, zaczęli szukać nowych faktów, aby podtrzymać niedokładną teorię. Le Verrier w przypadku Neptuna miał szczęście, jednak Wulkan ujawnił wadę takiego podejścia. Wystarczająco dużo odwagi miał Einstein, który w 1915 roku ogłosił ogólną teorię względności i postawił grawitację relatywistyczną w miejsce Newtonowskiej. Zgodnie z ogólną teorią względności przyciąganie grawitacyjne jest konsekwencją zakrzywienia geometrii czasoprzestrzeni przez masę.

Dodatek trzeci do przełomowego dzieła Einsteina o ogólnej teorii względności (zob. [Einstein]) nosi nazwę *The experimental confirmation of the general theory of relativity*. W tym załączniku Einstein oprócz krótkiego opisu swojego podejścia do teorii naukowej i jej związków z obserwacjami przedstawia rozwiązanie trzech problemów, które pojawiały się w fizyce doświadczalnej XIX i XX wieku. Jedno zagadnienie dotyczyło zaginania się trajektorii światła przy przejściu przez pole grawitacyjne. Dokładniej, promień światła przechodzący blisko ciała niebieskiego odchyła się w jego stronę. Teoria względności wytłumaczyła w ten sposób różnice w obserwacji położenia gwiazd na niebie w zależności od umiejscowienia Słońca. Zdjęcia wykonane w różnych okresach sugerowały różne położenia tych samych gwiazd. Innym punktem tego załącznika była próba wyjaśnienia zjawiska przesunięcia ku czerwieni (*redshift*)

polegającego na tym, że linie widmowe promieniowania elektromagnetycznego docierającego z niektórych gwiazd lub galaktyk są przesunięte w stronę mniejszych częstotliwości. Z ogólnej teorii względności wynika, że światło pokonujące przyciąganie grawitacyjne (pochodzące np. od źródła, które je wysyła) traci energię, czyli jego długość fali się zwiększa. Jest to tzw. grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni, dodatkowo przyczyną przesunięcia jest relatywistyczny efekt Dopplera oraz rozszerzanie się Wszechświata.

Wreszcie interesujący nas problem ruchu peryhelium Merkurego znalazł rozwiązanie w ogólnej teorii względności. Jeśli zamiast prawa Newtona użyjemy w obliczeniach teorii grawitacji Einsteina, odkrywamy, że ruch planet po orbitach wokół ciał niebieskich wykazuje pewne zaburzenie związane z zakrzywianiem się czasoprzestrzeni wokół tych ciał. Zaburzenie to nazywamy dziś precesją relatywistyczną i odpowiada ono za brakujący składnik prędkości ruchu peryhelium Merkurego.

Einstein wyznaczył, że precesja relatywistyczna, wyrażona w radianach na okres obiegu Merkurego, jest dana wzorem

$$24\pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)},$$

gdzie a to półosć wielka orbity, T – okres obiegu, c – prędkość światła, e – mimośród orbity. Podstawiając parametry znane dla Merkurego: $a = 5,791 \cdot 10^{10}$ m, $T = 7,601 \cdot 10^6$ s, $c = 2,997 \cdot 10^8$ m/s, $e = 0,2056$, oraz zmieniając jednostki na te użyte przez Le Verriera, otrzymamy, że precesja relatywistyczna dla Merkurego wynosi $42,9''$ /wiek. Ten wynik stanowi odpowiedź na pytanie zadane na końcu poprzedniego podrozdziału.

Tym sposobem Einstein położył kres teorii o istnieniu Wulkana i dokonała się historia trzech planet, z których jedna nigdy nie istniała. Historia, która potrzebowała blisko dwóch stuleci, aby znaleźć swój finał.

Bibliografia

- [Baum, Sheehan] Richard Baum, William Sheehan, *In Search of Planet Vulcan*, Springer, 1997.
 [Cornejo] Adrián G. Cornejo, *A Lagrangian Solution for the Precession of Mercury's Perihelion*, International Journal of Astronomy, 2014.
 [Einstein] Albert Einstein, *Relativity: The Special and General Theory*, New York, Henry Holt and Company, 1920.
 [Fellows] Paul Fellows, *The Hunt for Planet Vulcan*, YouTube, 2020, https://www.youtube.com/watch?v=UwLZC_guYKQ.
 [Lequeux] James Lequeux, *Le Verrier – Magnificent and Detestable Astronomer*, Springer, 2013.
 [Levenson] Thomas Levenson, *The Hunt for Vulcan*, Random House Trade, 2016.
 [Zepherus] Zepherus, *Vulcan | The Planet That Didn't Exist*, YouTube, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=iJyweEcpsGc>.



Zadania

Przygotował Dominik BUREK

M 1762. Pewną liczbę kostek domina o wymiarach 1×2 położono na szachownicy 100×100 tak, aby żadne dwie kostki się nie stykały bokami ani rogami. Pola: lewe dolne i prawe górne nie są pokryte przez domino. Czy zawsze można przejść z lewego dolnego pola do prawego górnego, wykonując ruchy tylko w górę i w prawo do pól sąsiadujących, omijając wszystkie kostki?
Rozwiązanie na str. 9

M 1763. Udowodnić, że z dowolnego czworokąta wypukłego \mathcal{F} można wyciąć trzy czworokąty podobne do \mathcal{F} w skali $\frac{1}{2}$.
Rozwiązanie na str. 15

M 1764. Udowodnić, że dla dowolnych liczb całkowitych dodatnich a_1, a_2, \dots, a_n zachodzi nierówność

$$\left\lfloor \frac{a_1^2}{a_2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{a_2^2}{a_3} \right\rfloor + \dots + \left\lfloor \frac{a_n^2}{a_1} \right\rfloor \geq a_1 + a_2 + \dots + a_n.$$

Rozwiązanie na str. 16

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1083. Zewnętrzna ściana budynku zbudowana jest z cegły i ma grubość $d_1 = 0,3$ m. Współczynnik przewodnictwa cieplnego cegły $\kappa_1 = 1,2$ W/(m·K). Przed zbliżającą się zimą ścianę postanowiono ocieplić poprzez dodanie zewnętrznej warstwy styropianu o grubości $d_2 = 0,01$ m i współczynniku przewodnictwa cieplnego $\kappa_2 = 0,033$ W/(m·K). Ile razy zmaleje utrata ciepła przez ścianę po jej ociepleniu? Przyjmij, że przed ociepleniem i po nim wewnętrzna powierzchnia ściany ma temperaturę T_2 , a zewnętrzna temperaturę $T_1 < T_2$.
Rozwiązanie na str. 8

F 1084. Wewnętrzny promień jednorodnej, grubej rury wynosi $r_0 = R$, a zewnętrzny $r_1 = 2R$. Wewnętrzna powierzchnia rury utrzymywana jest w temperaturze T_0 , a zewnętrzna w temperaturze $T_1 < T_0$. Ile wynosi temperatura w połowie grubości rury? Wskazówka: W każdym punkcie wewnątrz rury strumień ciepła jest równoległy do promienia rury i proporcjonalny do wartości pochodnej temperatury wzdłuż promienia obliczanej w tym punkcie.
Rozwiązanie na str. 6

