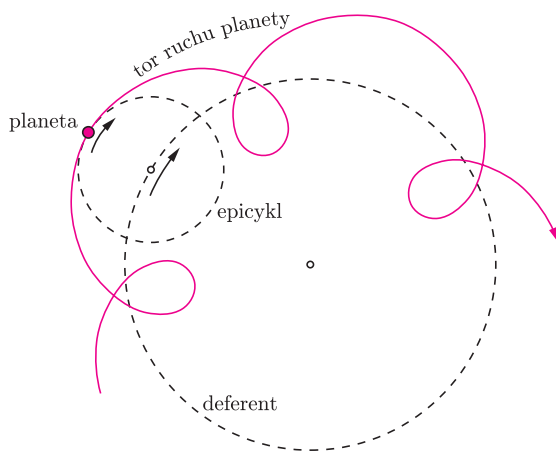


## Kopernik i co dalej

„Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię...”, fundamentalne odkrycie Kopernika nie zakończyło dyskusji na temat budowy i ruchów w Układzie Słonecznym. Wręcz przeciwnie, jeszcze dobrych kilka stuleci najwięksi uczeni musieli się mocno nagłować nad tym zagadnieniem.

**Ziemia – pępek świata.** Starożytni Grecy wyobrażali sobie, że Wszechświat jest kulisty i skończony. Arystoteles dzielił go na dwa światy, „podksiężycowy”, na który składała się Ziemia wraz z jej bliskim otoczeniem, oraz „nadksiężycowy” – obejmujący Księżyc, planety i Słońce, a kończący się na sferze gwiazd stałych. W każdym z obu światów rządziła inna fizyka; świat nadksiężycowy, w przeciwieństwie do podksiężycowego, uznawano za niezmienny i obowiązywał w nim ruch kołowy jednostajny. Według greckich filozofów Układ Słoneczny to nieruchoma Ziemia znajdująca się w środku Wszechświata oraz poruszające się wokół niej, po kolejnych sferach, Księżyc, Merkury,

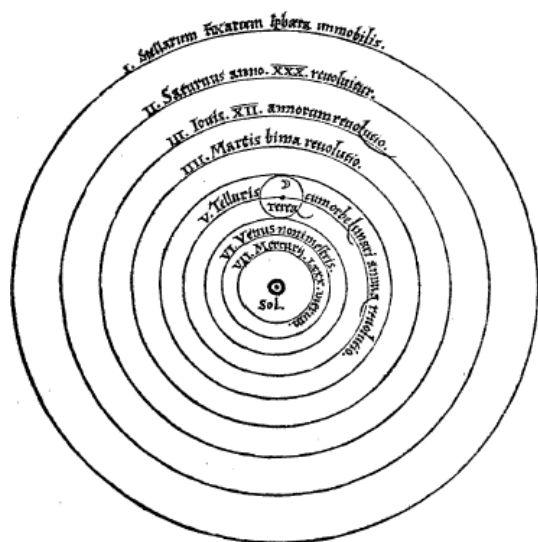
Wenus, Słońce, Mars, Jowisz i Saturn, ostatnia znana wówczas planeta. Postulowana jednostajność i kolistość ruchów w Kosmosie nie zawsze zgadzała się z obserwacjami. Ścisłej Słońce i Księżyc prawie się jej podporządkowywały, ale Merkury, Wenus, Mars, Jowisz i Saturn wyraźnie nie. Jednostajność biegu po okręgach starano się ratować, twierdząc, że poruszanie się danej planety jest zestawieniem kilku ruchów kołowych. Tak wprowadzono „deferenty” – niewspółśrodkowe koła, po których jednostajnie przesuwały się środki mniejszych kółek – „epicykli” i po tych epicyklach dopiero krążyły planety (rys. 1). Dla dokładności wymyślono jeszcze coś takiego, jak „punkty wyrównujące” – „ekwenty”. W taki sposób udało się dojść do wiernego opisu rzeczywistego biegu planet, chociaż – jak widać – mechanizmy ruchu w modelu geocentrycznym były bardzo skomplikowane.



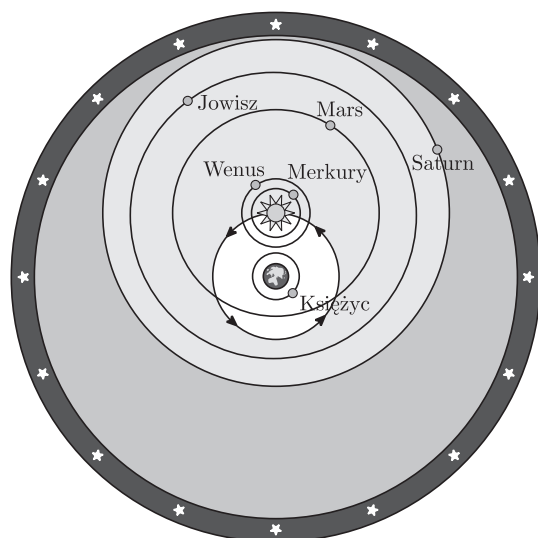
Rys. 1. Ruch planety w systemie geocentrycznym, przedstawiony za pomocą epicyklu i deferentu.

Jednak ruchy Merkurego i Wenus (będących zgodnie z naszą dzisiejszą wiedzą bliżej Słońca niż Ziemia) oraz Marsa, Jowisza i Saturna (dalej od Ziemi) wykazywały cechy wspólne, co w podejściu geocentrycznym nie łączyło się w logiczną całość. Należy jeszcze dodać, że w przypadku zagadnienia odległości Księżyca od Ziemi rachunki prowadzone na podstawie tego modelu dawały prawie dwukrotne zmiany tej odległości, chociaż widoczny rozmiar kątowy średnicy tarczy Srebrnego Globu nie zmienia się wiele więcej niż 10%. Nie mogło to ująć uwagi tak dobrym obserwatorom, jak antyczni astronomowie. Co więcej, warto zwrócić uwagę na to, że w starożytności także obserwowano, na przykład, przemieszczające się komety czy rozbłyski gwiazd, które dziś uznawane są za wybuchy supernowych. Z powodu przeświadczenia o niezmienności świata nadksiężycowego zjawiska te sklasyfikowano wówczas, co może nas zadziwić, jako meteorologiczne, to znaczy występujące w świecie podksiężycowym.

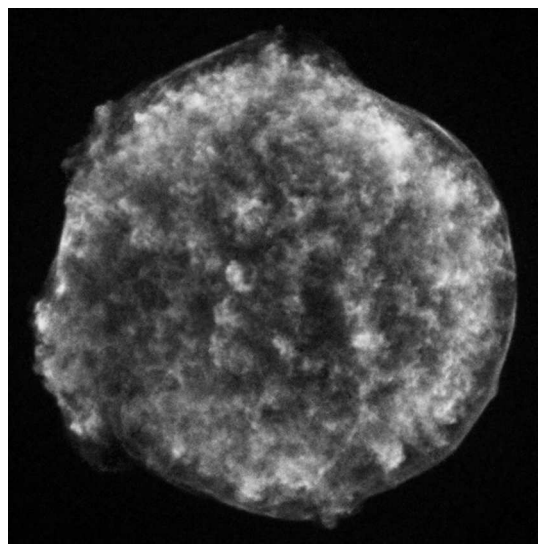
Pomimo tego, że takie podejście do budowy i mechanizmów ruchów we Wszechświecie nie okazało się właściwe, nie można zapominać o osiągnięciach całych pokoleń uczonych i astronomów starożytnych. Ich dokonania, poglądy i zaobserwowane fakty astronomiczne zebrał Ptolemeusz (II wiek n.e.) w dziele, które znane jest nam dzięki arabskiemu przekładowi pod nazwą *Almagest*. Właśnie tam znajduje się, między innymi, opis systemu, a raczej systemów geocentrycznych oraz katalog położeń 1022 gwiazd.



Rys. 2. System Kopernikański.



Rys. 3. System Tychona Brahego. Z – Ziemia, S – Słońce.



Fot. 1. Zdjęcie pozostałości Supernowej Tychona SN 1572, w promieniowaniu rentgenowskim, wykonane przez teleskop kosmiczny Chandra.

**Revolucja *De revolutionibus*...** Mikołaj Kopernik (1473–1543) zaproponował inną budowę Układu Słonecznego. Według niego planety miały obiegać Słońce po orbitach kołowych, a dodatkowo Ziemia, wokół której krąży tylko Księżyc, kręci się dookoła własnej osi raz na dobę (rys. 2). Dalej podkreślał, że to się tylko wydaje, iż firmament obraca się wokół Ziemi, a trasa Słońca po Zodiaku to także tylko pozór. Wobec ogromu pracy rachunkowej astronom z Torunia obserwacji wykonywał stosunkowo niewiele. Do opisu rzeczywistych ruchów ciał niebieskich używał aparatu matematycznego oraz pojęć epicykli i deferentów, którymi posługiwały się pokolenia uczonych antycznej Grecji, a później Arabów. Za nimi przyjmował też kolistość i jednostajność ruchów planet. Z początku myślał, że do opisu korowodu planet wystarczą mu 34 koła, to jednak okazało się nadmiernie optymistyczne, potrzebował o wiele więcej. Zwróćmy także uwagę na to, że kołowe tory planet w jego modelu nawet nie miały środków w Słońcu. Tak więc w szczegółach system Kopernikański okazał się bardzo złożony. Likwidacja wyróżnionej centralnej pozycji Ziemi we Wszechświecie, a także zaprzeczenie jej nieruchomości było sprzeczne z Pismem Świętym, zatem nie do przyjęcia przez teologów.

Pierwsze skrótkowe sformułowania tezy Kopernika pojawiły się w jego *Komentarzyku*, który powstał pomiędzy 1507 a 1514 rokiem, a następnie w *Opowiadaniu pierwszym*, którego autorem był G.J. von Lauchen (1514–1574) znany również jako Rheticus (Retyk), w 1540 roku. Dzieło *De revolutionibus orbium coelestium...*, czyli *O obrotach ciał niebieskich...*, najprawdopodobniej było już gotowe w 1532 roku, ale doczekało się wydania dopiero w tym samym roku, w którym zmarł Kopernik.

**Wilk syty, ale czy owca cała?** Tycho Brahe (1546–1601) – zawiadaczający szlachcic duński, ze słynną srebrno-złotą protezą nosa, zniszczonego w pojedynku, przez dwadzieścia lat wykonywał niezliczone obserwacje ciał niebieskich. Sporządził katalog opisujący położenia 1004 gwiazd. Jego pomiary wykonywane nieuzbrojonym okiem były niezwykle dobre, bo ich dokładność ocenia się na 1 minutę kątową. Były one najlepsze w całej erze przedteleskopowej.

Tycho Brahe próbował uzgodnić obserwowaną rzeczywistość z teologią. W tym celu wymyślił połączenie systemu geocentrycznego z heliocentrycznym, w taki sposób, że nieruchoma Ziemia miała znajdować się w środku Wszechświata, Księżyc i Słońce ją obiegały, wraz z resztą planet zataczających okręgi dookoła Słońca (rys. 3).

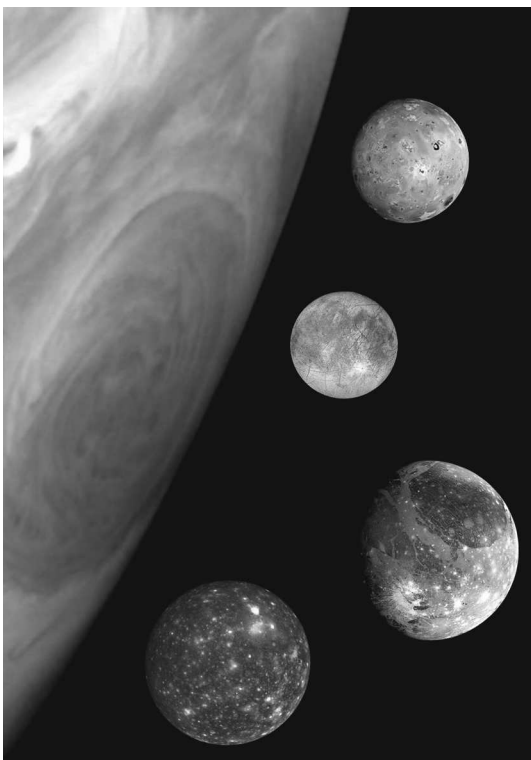
Wśród licznych jego osiągnięć na uwagę zasługują szczególnie dwa odkrycia wywnioskowane z pomiarów paralaksy. Pierwsze, że widoczny w 1572 roku rozbłysk na niebie (my wiemy, że był to rozbłysk supernowej SN 1572 – fot. 1) nie był zjawiskiem atmosferycznym, a zdarzył się wśród gwiazd stałych. Doszedł do tego, otrzymawszy z pomiarów zerową paralaksę na tle Kasjopei. A drugie, że zaobserwowana w 1577 roku kometa to obiekt, który obiega Słońce, przecinając sfery głównie Wenus i Marsa, a nie zjawisko okołozemskie. Było to fundamentalnie ważne, gdyż Starożytni te zjawiska zaliczali do świata podksiężycowego, blisko Ziemi. W taki sposób astronom zdetronizował antyczną zasadę niezmienności świata nadksiężycowego.

**Nie koło, lecz elipsa.** Johannes Kepler (1571–1630), aby wyznaczyć orbitę Marsa, najpierw musiał opracować własną teorię ruchu Ziemi, a dopiero potem na podstawie położenia Marsa, zebranych przez Tychona Brahego, mógł szukać jego toru. Kosztowało go to całe lata mrówczej pracy. Jako pierwsze odkrył prawo stałości prędkości polowej, znane pod nazwą

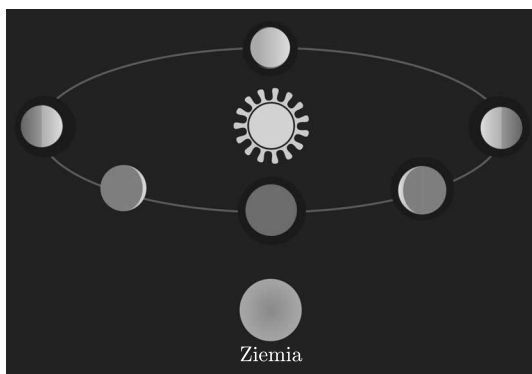
drugiego prawa Keplera. Następnie wykorzystując je, wyliczał orbitę Marsa, ale rachunki w najlepszym razie dawały odstępstwo 8 minut kątowych od danych obserwacyjnych Tycho Brahego, a jak pamiętamy, niepewność tych pomiarów określa się na zaledwie 1 minutę kątową. Kepler pracował więc dalej i dopiero próba dopasowania elipsy, ze Słońcem w jednym z ognisk, dała dobrą zgodność. Starożytne przesłanie o doskonałym ruchu kołowym jednostajnym we Wszechświecie, wobec faktów doświadczalnych, musiało prysnąć jak bańka mydlana.

Kepler spekulował, że przyczyną odkrytego przez niego ruchu miałyby być siła popychająca planety, mająca charakter magnetyczny, działająca w płaszczyźnie, w której się one poruszają. Słońce miało znajdować się w środku takiego „wiru”. W taki sposób powstała tak zwana teoria wirów. Jednym z głównych wyznawców tego trendu był Kartezjusz (1596–1650), skąd wynikało szczególnie przywiązanie do niej Francuzów. Teoria ta królowała w nauce do czasu zwycięstwa teorii grawitacji Newtona.

**Luneta i nowe fakty.** Galileusz (1564–1642), w jednym zdaniu, podobno ostatnim, które wypowiedział, stwierdził, że „A jednak się kręci” – czyli do końca, konsekwentnie opowiadał się za systemem Kopernika. Do tego wniosku doprowadziły go obserwacje nieba za pomocą teleskopu, które to urządzenie właśnie on po raz pierwszy skierował w kosmos w 1609 roku. Za pomocą lunety zobaczył znacznie więcej niż ktokolwiek, kto spoglądał w niebo gołym okiem. Stwierdził, że Droga Mleczna to nie obłok, ale ogromna liczba skrzących się gwiazd. Wypatrzył cztery księżyce obiegające Jowisza (rys. 4). Jako pierwszy człowiek oglądał ciekawą strukturę powierzchni naszego Księżyca. Zaobserwował zgrubienia wokół równika Saturna (dla nas to pierścienie) i co ostatnie, ale, być może, nawet najważniejsze – zauważył fazy Wenus, analogiczne do faz Księżyca (rys. 5). Występowania faz Wenus nie dało się wyjaśnić w ramach systemu geocentrycznego, ale z zasady działania układu heliocentrycznego było widoczne wprost. Odkrycie naturalnych satelitów Jowisza zaskoczyło zwolenników geocentryzmu, gdyż trudno było im przejść do porządku dziennego nad faktem, że wokół jakiegokolwiek innego obiektu niż Ziemia mogą krążyć ciała niebieskie. W *Dialogach o najważniejszych systemach*... zestawiał układ geocentryczny i pogląd Kopernikański, opowiadając się zdecydowanie za tym drugim. Mędrzec drogo zapłacił za obstawanie przy swoich poglądach. Skazany przez inkwizycję na areszt domowy w willi pod Florencją, spędził w odosobnieniu prawie całe ostatnie dziesięciolecie życia.



Rys. 4. Cztery księżyce Jowisza odkryte przez Galileusza.



Rys. 5. Fazy Wenus obserwowane z Ziemi.

**Niedaleko pada jabłko od jabłoni.** Jedną z głównych zasług Izaaka Newtona (1642–1727) dla rozwoju nauki było stworzenie mechaniki newtonowskiej. Impulsami do działań w tej dziedzinie, oprócz, oczywiście, jego własnej ciekawości naukowej i dobrej znajomości zastanego ówczesnego stanu wiedzy, były – między innymi – wymiana zdań z jego adwersarzem, Robertem Hooke’em, na temat istoty grawitacji, a także pytania o kształt torów komet, powstałe w związku z odkryciem komety przez jego admiratora, Halleya. Pierwszym potwierdzeniem tego, że Newton znajdował się na dobrej drodze, było wyprowadzenie z siły grawitacji – siły centralnej malejącej z kwadratem odległości, eliptyczności orbit planetarnych i stałości prędkości polowej, czyli pierwszych dwóch praw Keplera. W wydanej w 1686 roku pierwszej księdze *Principiów*... Newton zawarł przede wszystkim prawo powszechnego ciążenia i swoje trzy zasady mechaniki oraz opisywał kolejne rozpracowywane zagadnienia. Chyba najważniejsze w tym dziele było fundamentalne stwierdzenie, że te same prawa fizyki rządzą materią w całym Wszechświecie, czym ostatecznie zlikwidował arystotelejski podział na światy pod- i nadksiężycowy.

**Turniej Młodych Fizyków**

Rozpoczął się Turniej Młodych Fizyków 2012. Zawody dla uczniów szkół ponadgimnazjalnych, o charakterze komplementarnym wobec Olimpiady Fizycznej. W Turnieju uczestniczą pięcioosobowe drużyny. Najlepsza z nich wyjedzie na Turniej Międzynarodowy, który odbędzie się w Niemczech (w 2011 roku Międzynarodowy Turniej odbył się w Iranie, polska drużyna zdobyła w nim brązowe medale). Szczegółowe informacje o Turnieju Młodych Fizyków są dostępne na stronie internetowej

<http://ptf.fuw.edu.pl/tmf.html>

Ewentualne zapytania można kierować pod adresem

[tmf@ifpan.edu.pl](mailto:tmf@ifpan.edu.pl)

Termin nadsyłania prac:

**31 stycznia 2012 r.**

**Przykładowe tematy do opracowania:**

**Przecinanie powietrza**

Podczas wirowania kawałka nici lub np. żyłki nylonowej z zamocowanym na końcu ciężarkiem daje się słyszeć wyraźny dźwięk. Zbadaj, w jaki sposób ten dźwięk powstaje oraz od jakich parametrów zależy.

**Jasne fale**

Oświetl płaski zbiornik z wodą. Gdy na jej powierzchni zostaną wytworzone fale, można będzie zobaczyć jasne i ciemne wzory na dnie zbiornika. Zbadaj zależność między falami a obserwowanymi wzorami.

**Bąbelki**

Czy jest możliwe pływanie na powierzchni wody, w której występuje dużo bąbelków? Zbadaj, jak pływanie przedmiotu zależy od obecności bąbelków.

**Granularny rozbryzg**

Gdy kulka stalowa spada na powierzchnię suchego piasku, obserwuje się rodzaj piaskowego rozbryzgu, po którym może nastąpić wyrzucenie pionowej kolumny piasku. Odtwórz to zjawisko i je wyjaśnij.



W szczegółach zaś wytłumaczył, na przykład, nieregularności w ruchu Księżyca, uwzględniając wzajemne oddziaływania grawitacyjne trzech obiektów: Słońca, Ziemi i Księżyca. Kontynuując tę myśl, słusznie sugerował, że w celu wyliczenia teoretycznej orbity Saturna, zgodnej z obserwowaną, należy rozważać siły działające pomiędzy Słońcem, Jowiszem i Saturnem. Zadanie takie zyskało sobie nazwę zagadnienia trzech ciał i było tak trudne, że sam geniusz wyraził się, że „przekracza, jeśli się nie mylę, siłę jakiegokolwiek umysłu ludzkiego”.

**Mechanicy nieba.** W przypadku rozważania trzech ciał trzeba było małymi krokami rozpracowywać zagadnienie, rozważać przypadki szczególne (na przykład, że jedno z ciał ma znikomą masę lub że masy rozmieszczone są w specjalny sposób), a także stosować inne sposoby upraszczające zagadnienie, jak, na przykład, metodę zaburzeń. Równocześnie z pracami nad problemem trzech ciał rozwijały się inne trendy w mechanice teoretycznej, a postępy aparatu matematycznego, rachunku różniczkowego i całkowego rozszerzały możliwości twórcze mechaników nieba. Istotne zasługi w budowaniu teorii na potrzeby matematycznego opisu ruchów obiektów w Układzie Słonecznym położyli uczeni Oświecenia: Szwajcar Leonhard Euler oraz Francuzi: Alexis Claude de Clairaut, Jean d’Alembert, Joseph Louis Lagrange, Pierre Simon de Laplace. Chociaż w połowie XVIII wieku podejrzewano istnienie jeszcze jakiejś nieznannej siły oprócz siły grawitacji, mającej wpływ na ruch Księżyca, to wkrótce udowodniono jedynowładztwo siły ciężkości Newtona. Nie mniej ważne było, że Euler uściślił pojęcie punktu materialnego, prędkości, przyspieszenia – tak jak to dziś rozumiemy, odkrył zasadę zachowania pędu. To również on pierwszy zapisał równania Newtona w znanej nam postaci:  $\vec{F} = m\vec{a}$  i nieco później sformułował podstawowe pojęcia i zrezygnował z teorii bryły sztywnej. Pracował także nad ogólnym problemem trzech ciał, ale rozwiązał go w szczególnym przypadku dla trzech ciał ułożonych na linii prostej. Następnie Lagrange, między innymi, opracował inny szczególny przypadek, dla ciał w wierzchołkach trójkąta równobocznego. W latach 60. XVIII wieku osiągnięcia mechaniki teoretycznej pozwoliły już, między innymi, na ukoronowanie prac rozpoczętych przez samego Newtona, mających na celu bardzo dokładne przewidywanie przyszłych położenia Księżyca na tle gwiazd stałych w nocy i w odniesieniu do położenia Słońca w dzień. Dzięki temu udało się stworzyć tablice tych wielkości, za pomocą których nawigatorzy po raz pierwszy w historii mogli skutecznie i dokładnie określać długość geograficzną położenia statków na oceanach.

**Następne planety.** Uran widziany był wcześniej przez różnych astronomów, ale dopiero William Herschel w 1781 roku stwierdził, że nie jest to gwiazda stała, i ostrożnie sugerował, że może to być kometa. W konsekwencji już wkrótce astronomowie zorientowali się, że jest to kolejna planeta, pierwsza odkryta od czasów starożytnych.

Następna planeta, Neptun, podobnie jak Uran, także była już wcześniej obserwowana, choćby przez samego Galileusza, ale bez świadomości, co to za obiekt. Orbita Urana wykazywała pewne odstępstwa od toru wyliczonego z oddziaływań grawitacyjnych Słońca i znanych planet. Wytłumaczeniem okazało się istnienie jeszcze jednej, nieodkrytej planety. Orbitę tego obiektu wyznaczyli w tym samym czasie John Couch Adams i Urbain Le Verrier, z tym że obliczenia Francuza były lepsze. Neptuna, według jego wskazówek, bardzo szybko zidentyfikowano na niebie 23 września 1846 roku w obserwatorium w Berlinie.

Właściwie na tym można by zakończyć tę historię, gdyż dziś Międzynarodowa Unia Astronomiczna uznaje 8 planet: Merkurego, Wenus, Ziemię, Marsa, Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna. Jednak w 1930 roku obserwując niebo z Arizony, odkryto niewielkie ciało niebieskie o średnicy tylko 2300 km, nazwane Plutonem. W 1978 roku zauważono jego największy księżyc, około 2 razy mniejszy od niego, a w 2005 roku jeszcze dwa inne małe księżyce. Przez 76 lat Plutona uznawano za dziewiątą planetę, ale w 2006 roku zdegradowano go z tej pozycji, przyznając status planety karłowatej.

*Małą Deltę przygotowała Bronisława ŚREDNIAWA*