

Meteory – przepustka w świat drobnej materii w Układzie Słonecznym

Mariusz WIŚNIEWSKI*

Około 5 miliardów lat temu z wielkiego obłoku pyłu i gazu narodził się nasz Układ Słoneczny. W wyniku łączenia się drobin materii w coraz to większe ciała powstały planety i ich księżyce. Nie cała materia została związana w tych ciałach. W przestrzeni otaczającej Słońce pozostały miliony planetoid, komet oraz niezliczona ilość głazów, kamyków, piasku, aż po drobny pył.

Materia, z której zbudowane są niewielkie obiekty Układu Słonecznego, jest bardzo zróżnicowana, a jej skład uzależniony jest od odległości od Słońca. W obszarze położonym wewnątrz orbity Jowisza znajdują się przeważnie obiekty skaliste. Poruszają się one na ogół w pasie planetoid, a nieliczne z nich zapędzają się w okolice Ziemi. Im dalej od Słońca, tym częściej spotkać można ciała zbudowane głównie z mieszaniny lodu, pyłu i gruzu. Lód przetrwał tu od czasów powstania Układu Słonecznego, gdyż w dużych odległościach od Słońca promieniowanie naszej gwiazdy jest za słabe, by spowodować jego odparowanie.

Ważnym czynnikiem wpływającym na formowanie się Układu Słonecznego był Jowisz, najbardziej masywna z planet. To za jego sprawą powstał pas planetoid pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza. Reszta drobnych ciał została wypchnięta aż za orbitę Neptuna, tworząc zewnętrzny pas planetoid, zwany pasem Kuipera. Najdalej położonym skupiskiem obiektów należącym do naszego układu planetarnego jest obłok Oorta. Przypuszcza się, że jest on głównym źródłem komet, które niespodziewanie pojawiają się na naszym niebie.

Drobna materia wypełniająca Układ Słoneczny to nie tylko ślad po dysku protoplanetarnym otaczającym młode Słońce. W przestrzeni międzyplanetarnej możemy natknąć się na drobinę, które opuściły powierzchnię większych ciał, takich jak komety czy planetoidy. Drobinę tę zwykle poruszają się po orbitach zbliżonych do tych, jakie miały ich ciała macierzyste. Tworzą zwarte strumienie opasujące Słońce eliptycznymi wstęgami.

Istnieje kilka sposobów, które umożliwiają małym fragmentom związanej materii powrót do przestrzeni międzyplanetarnej. W przypadku komet odpowiedni proces jest bardzo spektakularny. Kometa zbliżająca się do Słońca wystawiona jest na coraz silniejsze promieniowanie. W pewnym momencie lód, z którego zbudowana jest kometa, zaczyna parować, a powstająca para wodna wydostaje się na powierzchnię komety w postaci gejzerów. Ciśnienie gazów jest wystarczające, by z komety wyrzucone zostały również drobiniki pyłu, zwłaszcza że grawitacja na powierzchni małej komety jest niewielka, więc mała jest też prędkość wystarczająca do ucieczki z takiej komety.

Innym sposobem na pokonanie grawitacji jest wyrzut materii podczas zderzenia dwóch planetoid. W jego wyniku powstaje zazwyczaj niewielki krater na powierzchni, lecz, jeśli zderzające się ciała są porównywalnej wielkości, może dojść nawet do ich całkowitego rozpadu i powstania chmury drobnych obiektów. Od niedawna wiadomo jednak, że niewielkie planetoidy przypominają bardziej luźne zlepki kamieni i pyłu. Amortyzuje to uderzenia i, wbrew naszym dawnym wyobrażeniom, zwykle dochodzi do niegroźnego zlepiania się ciał w jedno. Obserwuje się też wiele planetoid podwójnych, które łagodnie zbliżyły się do siebie, a obecnie stykają się.

Najbardziej zaskakującym sposobem na opuszczenie planetoidy przez drobinę materii jest wyrzucenie jej pod wpływem rotacji. Sondy kosmiczne wysłane do badania planetoid zaobserwowały toczenie się głazów po ich powierzchni. Dla niewielkich, szybko rotujących planetoid siła odśrodkowa może minimalnie przewyższać siłę grawitacji.

Ziemia porusza się wśród planetoid oraz w gęszczu drobin o bardzo różnorodnej historii i rozmiarach. Każdego dnia nieustannie bombardowana jest przez materię kosmiczną. Przelot drobin materii, zwanych meteoroidami, przez atmosferę powoduje rozgrzanie na ich trasie powietrza do temperatur wystarczających do jonizacji atomów. Część trajektorii meteoroidu w atmosferze jest zatem widoczna jako świecąca smuga, zwana meteorem. Tylko dla bardzo dużych obiektów możemy dostrzec światło pochodzące bezpośrednio od ich rozgrzanej materii. Jej skład chemiczny można wtedy określić na podstawie obserwowanego widma.

Atmosfera ziemską stanowi zatem gigantyczny detektor materii międzyplanetarnej. Obserwując ślad nakreślony w przestrzeni przez przelatujące ziarnko piasku, jesteśmy w stanie powiedzieć, skąd ono do nas przyleciało, jaka była jego historia, a nawet czy zobaczymy więcej jemu podobnych.

Meteory obserwowano od niepamiętnych czasów. Mimo to aż do XIX wieku nie wiadomo, jaka jest prawdziwa natura tego zjawiska. Przełomem w badaniach nad meteorami była noc z 12 na 13 listopada 1833 roku. Wystąpił wówczas ogromny deszcz meteorów. Po raz pierwszy zauważono, że wszystkie meteory wylaływały z jednego miejsca na niebie, znajdującego się w gwiazdozbiornie Lwa. Wyjaśnienie zjawiska jako pierwszy podał Denison Olmsted. Wykazał, że zrzutowanie na sferę niebieską równoległych torów meteoroidów daje złudzenie, że wybiegają one z jednego miejsca, zwanego radiantem. Roje noszą nazwy od gwiazdozbiornów, w których znajduje się ich radiant, stąd meteory o radiantem w gwiazdozbiornie Lwa nazywamy Leonidami. Szybko okazało się, że to nie pierwsze takie zjawisko, a wzmogłą aktywność Leonidów

*Pracownia Komet i Meteorów

obserwowano również w latach 902, 934, 967, 1037, 1202, 1366, 1533 i 1799. Na przełomie 1865 i 1866 roku Wilhelm Tempel i Horace P. Tuttle odkryli komety, która porusza się po orbicie prawie takiej samej jak Leonidy. Jasne stało się, że roje meteorów tworzone są przez komety. Wkrótce także inne komety powiązane zostały z obserwowanymi na niebie rojami meteorów.

Niebo „meteorowe” dynamicznie się zmienia. Świadczy o tym chociażby fakt, że wzmożona aktywność Leonidów obserwowana była tylko w niektórych latach. Zmiany w ilości obserwowanych meteorów występują dla wszystkich źródeł. Niektóre z nich znikają, inne nagle pojawiają się, nigdy wcześniej nieobserwowane. Dzieje się tak za sprawą ewolucji orbit meteoroidów oraz ich ciał macierzystych.

Głównym czynnikiem powodującym zmianę orbity meteoroidów jest wpływ grawitacyjny planet, a w szczególności Jowisza. Oprócz tego na drobiny materii działają efekty niegravitacyjne. Radialnie od Słońca skierowana jest siła związana z ciśnieniem promieniowania. Ma ona szczególnie duże znaczenie dla bardzo małych drobin, o dużym stosunku powierzchni do masy. Małe drobiny są wywiewane ze strumienia meteoroidów niczym liście na wietrze. Na średniej wielkości drobin działa efekt Poyntinga–Robertsona. Poruszając się po swojej orbicie, rozpraszają one na wszystkie strony promieniowanie słoneczne, co powoduje ich spowalnianie i, co za tym idzie, zacieśnianie się ich orbit. Dla nieco większych obiektów występuje efekt Yarkovsky’ego, polegający na zmianie ich prędkości orbitalnych. W trakcie ruchu orbitalnego meteoroidy obracają się także wokół swej osi. Powierzchnia ciała znajdująca się po stronie dziennej jest nagrzewana, a następnie stygnie, kiedy znajdzie się po stronie nocnej. Emisja fotonów podczas stygnięcia w zależności od kierunku rotacji powoduje przyspieszenie bądź spowalnianie ciała w jego ruchu orbitalnym. Wszystkie te efekty sprawiają, że różne drobiny, opuszczające komety bądź planetoidę, będą miały w przyszłości różne orbity.

Badania nad wpływem efektów niegravitacyjnych na meteoroidy nie byłyby możliwe bez obserwacji meteorów. Dzięki wyznaczaniu poziomu aktywności rojów możliwe jest porównywanie teoretycznych modeli ewolucji strumieni drobin materii wyrzucanych przez komety z faktycznym ich zachowaniem się.

Na podstawie obserwacji meteorów można również poznać rozmiary drobin tworzących strumienie. Im obiekt wpadający w atmosferę jest większy oraz im szybciej się porusza, tym jaśniejszy pozostawia po sobie ślad. Dowiadujemy się w ten sposób, jakie cząstki są wyrzucane z jąder kometarnych, gdy strumień pochodzi od komety, lub jakie cząstki uciekają z powierzchni planetoid. Tak poznajemy szczegóły procesów erozji tego typu obiektów.

Obserwując meteory, można również badać skład chemiczny materii kosmicznej. Duże odłamki, płonące w atmosferze, w wyświecanym blasku ujawniają linie widmowe pierwiastków, z jakich są zbudowane. Największe z nich mają szansę przedrzeć się przez

atmosferę i spaść na powierzchnię Ziemi. Takie kamienie z kosmosu nazywane są meteorytami. Badania nad składem i strukturą meteorytów przyczyniają się do lepszego zrozumienia historii Układu Słonecznego.

Kolekcje meteorytów zgromadzone w muzeach, ośrodkach badawczych i u kolekcjonerów wciąż wielokrotnie przewyższają masą i różnorodnością próbki dostarczone podczas wypraw księżycowych oraz misji sond kosmicznych. Informacja o składzie obiektu w połączeniu z ustaleniem orbity, po jakiej poruszało się ciało, pozwala zajrzeć w najdalsze zakątki układu planetarnego bez ruszania się z Ziemi.

Meteority dzielimy na cztery główne grupy. Chondryty są pierwotną materią ocalałą z czasów powstawania Układu Słonecznego i charakteryzują się małą gęstością. Achondryty to materia pochodząca z powierzchni planetoid, składająca się głównie z pozlepianego gruzu. Meteority żelazne powstały w jądrach dużych planetoid, a zbudowane są z kryształów żelaza i niklu. Wreszcie meteority żelazno-kamienne powstały najprawdopodobniej z mieszaniny materiału z jądra i płaszcza większych planetoid. Budowa materii meteoroidu ma wpływ na jego zachowanie się podczas lotu w atmosferze. Meteority o zwartej budowie świecą jednolicie przez większość swojego lotu. Mają też największą szansę na wylądowanie na Ziemi, gdyż meteoroidy o luźnej konsystencji ulegają szybkiemu rozpadowi na drobne kawałki, czyli fragmentacji. Materia kometarna charakteryzuje się występowaniem wielu gwałtownych pojaśnień podczas lotu. Niestety, ze względu na dominującą zawartość lodu oraz duże prędkości wejścia w atmosferę szansa na uzyskanie tej materii ze spadku jest praktycznie zerowa.

Badaniami meteorów zajmuje się wiele ośrodków na świecie, między innymi NASA oraz ESA. W Polsce zainteresowani tematyką meteorów skupieni są wokół Pracowni Komet i Meteorów (PKiM). Stowarzyszenie to prowadzi projekt o nazwie Polish Fireball Network (PFN), czyli Polska Sieć Bolidowa, którego celem jest obserwacja zjawisk mogących zakończyć się spadkiem meteorytów, oraz znalezieniem tych meteorytów. Oprócz tego kamery pracujące w ogólnopolskiej sieci rejestrują setki słabych zjawisk. Do obserwacji wykorzystywany jest specjalnie przygotowany sprzęt fotograficzny oraz czułe kamery wideo. Na podstawie obserwacji przeprowadzane są szczegółowe analizy zachowania się rojów meteorów.

Obserwacje mające na celu określenie intensywności strumieni meteorów wykonywane są przede wszystkim technikami wizualnymi i radiowymi. Wciąż najdoskonalszym detektorem meteorów jest ludzkie oko. Standardowe metody prowadzenia obserwacji wizualnych oraz analizowania danych pozwalają na ich porównywanie z wynikami uzyskiwanymi przez inne grupy badaczy oraz z wynikami z lat wcześniejszych. Stosowanie nasłuchu radiowego umożliwia wykonywanie obserwacji niezależnie od pogody i pory dnia. Niestety, proste obserwacje radiowe nie pozwalają określić pochodzenia poszczególnych rejestrowanych zjawisk.

Każdy może włączyć się do działań prowadzonych przez Pracownię Komet i Meteorów. Wartościowe naukowo obserwacje wizualne nie wymagają żadnych nakładów finansowych, a jedynie poświęcenia kilku godzin i spędzenia ich pod rozgwieżdżonym niebem. Udział w projekcie PFN wymaga już pewnych nakładów, koniecznych do uruchomienia stanowiska obserwacyjnego umożliwiającego automatyczne zbieranie danych. Czekają też na chętnych wiele materiałów do przeanalizowania.

Dobrym punktem startu może być udział w Projekcie Perseidy 2010, organizowanym przez PKiM. Tegoroczne maksimum roju Perseidów wystąpi w okolicach sierpniowego nowiu Księżyca. Nasz satelita nie będzie więc przeszkadzał podczas obserwacji i na ciemnym niebie zobaczymy setki meteorów należących do tego roju.

Z tej okazji w Urzędowie w dniach 7–21 sierpnia zorganizowane zostanie dwutygodniowe spotkanie, którego celem będzie obserwacja tego największego wakacyjnego roju meteorów. Uczestnicy spotkania zapoznają się z metodami prowadzenia obserwacji oraz sposobem analizy zebranych wyników. Udział w spotkaniu jest bezpłatny. Dodatkową atrakcją spotkania będzie Ogólnopolski Zlot Miłośników Astronomii (OZMA), który w tym roku zawita do Urzędowa w dniach 12–15 sierpnia.

Więcej informacji o meteorach, działalności Pracowni Komet i Meteorów, oraz sposobach prowadzenia obserwacji i możliwościach współpracy można znaleźć na stronie www.pkim.org. Zachęcamy do kontaktu z Pracownią poprzez adres e-mail pkim@pkim.org.

Czwarty okrąg

Michał KIEZA

Załóżmy, że mamy dane trzy okręgi parami styczne oraz czwarty styczny do każdego z nich (istnieją dwa takie okręgi – jeden z nich jest zazwyczaj styczny wewnątrz, a w szczególnym przypadku może okazać się prostą). Przez b_i dla $i = 1, 2, 3, 4$ oznaczmy kolejno ich krzywizny (krzywizna okręgu jest co do wartości bezwzględnej równa odwrotności promienia). W naszej sytuacji przyjmujemy, że krzywizny pierwszych trzech są dodatnie, a krzywizna czwartego okręgu jest dodatnia w przypadku, gdy jest on styczny zewnętrznie do pozostałych trzech, ujemna, jeśli jest styczny wewnętrznie, oraz równa 0, jeśli zdegeneruje się on do prostej. Wówczas zachodzi równość

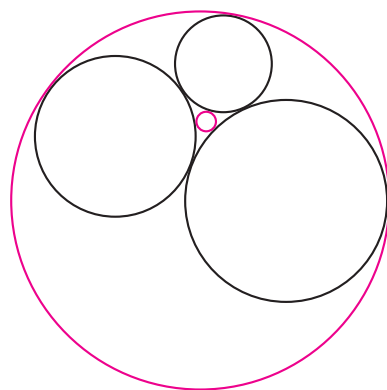
$$b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 = \frac{1}{2}(b_1 + b_2 + b_3 + b_4)^2.$$

Zależność tę odkrył w 1643 roku Kartezjusz i opisał ją w liście do księżniczki Elżbiety Czeskiej, córki Elżbiety Stuart i Fryderyka V. Rozwiązując równanie kwadratowe, możemy stąd łatwo obliczyć krzywiznę czwartego okręgu, znając krzywizny pozostałych trzech – większy z dwóch pierwiastków odpowiada wewnętrznemu okręgowi, a mniejszy zewnętrznemu. Czytelnik Wnikliwy zapewne widzi również, że jeśli będziemy znali wzory opisujące krzywizny obu dorysowanych okręgów w zależności od krzywizn pozostałych trzech, to dowiedzimy prawdziwości formuły Kartezjusza.

Twierdzenie Kartezjusza odkrył na nowo w 1842 roku angielski matematyk Phillip Beecroft. Żeby było zabawniej, twierdzenie zostało jeszcze raz odkryte w 1936 roku przez Fredericka Soddy'ego (skądinąd laureata Nagrody Nobla w dziedzinie chemii za teorię rozpadu atomu i prace nad izotopami). Na jego cześć dwa okręgi styczne do danych trzech są nazywane okręgami Soddy'ego. Soddy był tak zafascynowany pięknem owej zależności, że ujął ją w swoim wierszu *The Kiss Precise*, a ponadto uogólnił ten wynik na przestrzeń. Rok później Thorold Gosset podał uogólnienie na dowolny wymiar – jeśli mamy w przestrzeni n -wymiarowej $n + 2$ sfery $(n - 1)$ -wymiarowe, to zachodzi analogiczna zależność ze stałą $1/n$.

W literaturze istnieje kilka różnych dowodów formuły Kartezjusza albo, równoważnie, wzoru na krzywiznę czwartego okręgu, jednakże wszystkie wymagają mniej lub bardziej żmudnych rachunków. W tym miejscu chciałbym przedstawić rozumowanie, które właściwie bez żadnych rachunków pozwala wyznaczyć krzywiznę czwartego okręgu w zależności od krzywizn trzech pozostałych. Posłużymy się w tym celu inwersją. Krótko przypomnijmy zatem definicję i potrzebne własności.

Inwersja względem okręgu o środku O i promieniu r to przekształcenie, które każdemu punktowi $P \neq O$ przyporządkowuje punkt P' leżący na półprostej OP i spełniający warunek $OP \cdot OP' = r^2$. Można próbować wyobrażać sobie inwersję jako próbę wykonania symetrii względem okręgu. Ponieważ całą nieskończoną część płaszczyzny na zewnątrz okręgu trzeba po przekształceniu zmieścić wewnątrz, więc obszary leżące daleko od zera przy inwersji są ściskane – im dalej, tym mocniej.



Rys. 1

Fragment wiersza Fredericka Soddy'ego
The Kiss Precise:

Four circles to the kissing come.
The smaller are the benter.
The bend is just the inverse of
The distance from the centre.
Though their intrigue left Euclid dumb
There's now no need for rule of thumb.
Since zero bend's a dead straight line
And concave bends have minus sign,
The sum of the squares of all four bends
Is half the square of their sum.

(*Nature* 137, 1021 (1936)).