

Komety – kosmiczne koty, cz. I

Piotr Gronkowski, Marcin Wesołowski

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,

Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy

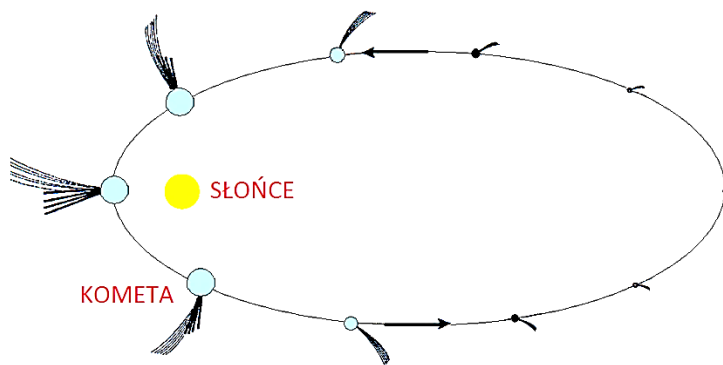
Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego

Wstęp

Układ Słoneczny tworzą Słońce, które jest jego centralnym ciałem oraz powiązane z nim grawitacyjnie planety, księżycy planetarne, planety karłowate, planetoidy, komety, meteoroidy oraz pył i gaz międzyplanetarny. Szczególne miejsce wśród składników Układu Słonecznego zajmują komety. Mimo relatywnie małej masy mogą czasami lśnić na nocnym niebie bardzo silnym blaskiem przykuwając uwagę obserwatorów. Te małe ciała kosmiczne należą do najbardziej zmiennych, trudno przewidywalnych, a jednocześnie najpiękniejszych obiektów wchodzących w skład Układu Słonecznego. Komety penetrujące wewnętrzne obszary Układu Słonecznego pochodzą z dwóch rezerwuarów. Pierwszy z nich to tzw. Obłok Oorta – jest to sferyczna warstwa o promieniu rzędu 10 000 AU¹ otaczająca Słońce. Drugie źródło jąder kometarynych to znacznie bliższy region – tzw. dysk Kuipera, który rozpościera się w odległości rzędu 40 AU od Słońca. Perturbacje pochodzące od najbliższych gwiazd zmuszają jądra kometaryne tworzące obłok Oorta do zmiany orbit na krzywe stożkowe zanurzające się głęboko we wnętrze Układu Słonecznego. Analogiczną rolę wobec jąder kometarynych zawartych w dysku Kuipera pełnią perturbacje pochodzące od wielkich planet, które powodują, że orbity kometaryne ulegają zmianom prowadzącym do głębszego penetrowania Układu Słonecznego. Przyjmuje się powszechnie, że komety są pozostałością – echem pierwotnego okresu formowania się Układu Słonecznego i ze względu na swoje małe rozmiary nie uległy istotnym zmianom od chwili swego powstania na skutek grawitacji, ciepła wewnętrznego czy też zderzeń z meteoroidami. Szczególnie tzw. komety długookresowe docierające po raz pierwszy z obłoku Oorta w pobliże Słońca zawierają najbardziej pierwotną materię, z której został uformowany nasz Układ Słoneczny. Komety długookresowe będąc świadkami narodzin Układu Słonecznego stanowią więc zapis jego formowania się z pierwotnej mgławicy. Pełnią one zatem bardzo ważną rolę w badaniach kosmogonicznych dotyczących powstania Układu Słonecznego dostarczając nam wielu informacji o warunkach i procesach towarzyszących jego narodzinom. Z drugiej strony oddziaływanie warkoczy kometarynych z wiatrem słonecznym sprawia, że są one naturalnymi sondami między-

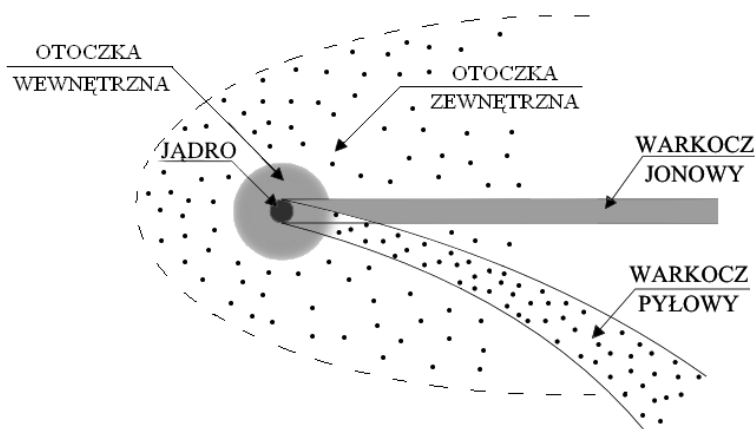
¹ AU – symbol jednostki astronomicznej. W przybliżeniu odpowiada ona średniej odległości Ziemi od Słońca. Często w obliczeniach przyjmowana jest jej przybliżona wartość równa 150 mln km.

planetarnej. Zachowanie się plazmowych warkoczy kometarnych dostarczyło najwcześniejszych informacji o istnieniu wiatru słonecznego. Przytoczone fakty sprawiają, że poznawanie struktury i ewolucji tych ciał kosmicznych jest wyjątkowo pasjonującą przygodą intelektualną dla wielu astronomów. Podstawowym, najważniejszym składnikiem komety jest jądro, trwała struktura, która pełni rolę nośnika masy kometarnej. Jądra komet okrążają Słońce po orbitach będących w przybliżeniu elipsami, parabolami lub hiperbolami. Jądra komet przybierają kształt nieregularnych brył o wymiarach od kilkuset metrów do kilkudziesięciu kilometrów. Zbudowane są z lodu wodnego zawierającego domieszki takich zestalonych substancji jak: lody tlenu i dwutlenku węgla, amoniaku oraz niewielkiej ilości innych związków chemicznych. Oprócz tego jądra komet zawierają wmrózone okruchy skalne oraz pyły. Najprawdopodobniej struktura jąder kometarnych jest porowata. Gdy kometa zbliża się po raz pierwszy z głębi Kosmosu do Słońca, jej początkowo zimne jądro pod wpływem promieniowania słonecznego nagrzewa się. Fala ciepła indukowana przez promieniowanie słoneczne stopniowo w miarę zbliżania się komety ku Słońcu przenika z powierzchni jądra do jego wnętrza powodując sublimację zamrożonych gazów kometarnych. Lody kometarne sublimują w swojej naturalnej kolejności zgodnie z temperaturami parowania. W głębokich, zimnych warstwach z jądra mogą sublimować najbardziej lotne substancje, takie jak H_2 , N_2 , CH_4 , CO . W płytszych, nieco cieplejszych warstwach parują dwutlenek węgla oraz amoniak, gdyż najbardziej lotne substancje zdążyły już wyparować. W relatywnie najcieplejszych powierzchniowych warstwach jądra sublimują te substancje, które jeszcze w nich przetrwały, a więc są najmniej lotne, m.in. H_2O oraz H_2O_2 . Przedstawiony powyżej mechanizm sublimacji utrzymuje porowatą strukturę jądra oraz sprzyja istnieniu w atmosferze komety gazów o różnym tempie sublimacji, co powszechnie obserwuje się w przypadku komet zbliżających się wystarczająco blisko do Słońca. Opisana powyżej aktywność sublimacyjna komety powoduje, że stopniowo zbliżając się do Słońca rozbudowuje ona swoją strukturę – generalnie do trzech składowych: głowy z zawartym w jej wnętrzu jądrem oraz warkoczy: pyłowego i jonowego (rys. 1 i 2). Następnie kometa po przejściu przez peryhelium oddala się od Słońca, jej aktywność sublimacyjna maleje, a jądro staje się ponownie zimną lodowo-pyłową bryłą. Za każdym powrotem w pobliże Słońca kometa traci pewien ułamek swojej masy. W końcu po odpowiednio dużej liczbie obiegów wokół Słońca jądro pozbawione wystarczającej ilości lodu pełniącego rolę kleju spajającego pyły i mniejsze lub większe okruchy czy też bryły skalne rozpada się na małe fragmenty składowe, które pod wpływem oddziaływań perturbacyjnych planet formują rój meteoroidów.



Rys. 1. Ewolucja komety wzdłuż jej eliptycznej orbity

Badanie struktury fizycznej i ewolucji komet wymaga korzystania z wielu dziedzin fizyki i astronomii, takich jak mechanika nieba, termodynamika i spektroskopia, bardzo zaawansowanego aparatu matematycznego związanego między innymi z teorią równań różniczkowych oraz stosowania zaawansowanych metod numerycznych. Celem tego artykułu jest jednak przybliżenie wszystkim czytelnikom, a w szczególności nauczycielom fizyki pracującym w szkołach ponadgimnazjalnych, współczesnych poglądów na fizykę komet i zachęcenie ich do wykorzystania nabytej wiedzy w swojej pracy dydaktycznej z młodzieżą szkolną. Dlatego w niniejszym artykule zostaną zaprezentowane w miarę prosty sposób – możliwy do przekazania młodzieży szkolnej wykazującej zainteresowanie przedmiotami matematyczno-fizycznymi – wybrane elementy „warsztatu teoretycznego kometologów”, czyli rozważań teoretycznych związanych z astrofizyką komet.



Rys. 2. Rozbudowana w pobliżu Słońca struktura jądra komety. Głowę komety stanowią otoczki wewnętrzna i zewnętrzna, spowijające jej jądro

1. Podstawowe równania opisujące fizykę komet

1.1. Ruch jądra komety względem Słońca

Jak już wspomniano, komety obiegają Słońce po orbitach będących krzywymi stożkowymi. Jeżeli są to parabole lub hiperbole, to takie komety nazywamy jednopojawieniowymi, a jeśli są to elipsy, to mamy do czynienia z kometami okresowymi. Komety obiegające Słońce po orbitach eliptycznych nazywamy krótkookresowymi, jeśli ich okres obiegu P jest krótszy niż 200 lat. Natomiast jeśli spełnia on warunek $P > 200$ lat to wtedy mówimy o kometach długookresowych. Dynamika komety zdeterminowana jest głównie przez grawitację Słońca, jednak przy odpowiednio dokładnym wyznaczeniu orbity należy również uwzględnić siły grawitacyjne działające na kometę pochodzące od planet (perturbacje planetarne) oraz tzw. oddziaływania niegrawitacyjne, których źródłem są zjawiska związane z sublimacją jądra, jego rotacją lub gwałtownymi wyrzutami materii z jego warstw podpowierzchniowych. Uwzględniając wymienione oddziaływania równanie ruchu jądra komety względem Słońca można przedstawić w następującej formie:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{GM_s}{r^3} \vec{r} - \sum_{i=1}^8 \frac{GM_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} (\vec{r} - \vec{r}_i) + \vec{a}_{ngr}. \quad (1)$$

Przyjęto oznaczenia: \vec{r} , \vec{r}_i są odpowiednio wektorami wodzącymi komety i planet w układzie współrzędnych, w którego początku znajdują się Słońce o masie M_s , G jest stałą grawitacji, M_i są masami planet Układu Słonecznego ($i = 1, 2, \dots, 8$), \vec{a}_{ngr} jest przyspieszeniem pochodzącym od oddziaływań niegrawitacyjnych.

1.2. Bilans energetyczny na powierzchni jądra komety

Wygląd komety zależy głównie od jej odległości od Słońca, gdyż ta determinuje moc energii promienistej docierającej do powierzchni jądra komety, a to z kolei wpływa bezpośrednio na tempo sublimacji lodów kometarnych. Fundamentalne znaczenie dla opisu zachowania się komety ma więc bilans energetyczny dla powierzchni jej jądra. Powierzchnia jądra komety uzyskuje energię promieniowania słonecznego, która w ogólności jest wykorzystana na energię wypromieniowaną przez jądro (głównie w podczerwieni), ciepło sublimacji materii kometarnej oraz ciepło przewodzone do wnętrza komety. Dlatego równanie równowagi energetycznej dla jednostkowej powierzchni jądra komety przyjmuje formę:

$$\frac{S_{\odot} (1-A) \cos \theta}{d^2} = \varepsilon \sigma T^4 + \left(\frac{dZ}{dt} \right) \frac{L}{N_0} + K \left| \frac{dT}{dR} \right|_{R_N}. \quad (2)$$

Lewa strona powyższego równania oznacza moc promieniowania elektromagnetycznego Słońca, pochłanianego przez jądro komety, pierwszy człon prawej strony równania reprezentuje moc wypromieniowaną z jądra komety, drugi człon oznacza moc przeznaczoną na sublimację lodów kometarnych, a trzeci człon jest mocą przewodzoną do wnętrza komety. Symbol $\left. \frac{dT}{dR} \right|_{R_N}$ oznacza wartość bezwzględną gradientu temperatury tuż pod powierzchnią jądra komety. Symbole wykorzystane po lewej stronie równania: S_{\odot} oznacza stałą słoneczną dla odległości heliocentrycznej równej 1 AU, A – albedo jądra (współczynnik odbicia światła), θ – kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię jądra komety, d – odległość komety od Słońca. Symbole wykorzystane po prawej stronie równania: ε – współczynnik emisji, σ – stała Stefana-Boltzmanna, T – temperatura powierzchni jądra, $\frac{dZ}{dt}$ – tempo sublimacji lodów kometarnych, L – ciepło sublimacji, N_0 – liczba Avogadra, a K – przewodność cieplna materii kometarnej, R_N – promień jądra komety.

Wyrażenie po lewej stronie równania przedstawia moc absorbowaną przez powierzchnię jądra. Pierwszy składnik po prawej stronie wyraża moc wypromieniowaną, drugi składnik tej strony to moc wykorzystana na sublimację, a trzeci jest ciepłem przewodzonym z powierzchni do wnętrza komety w ciągu jednej sekundy. W tym miejscu należy zauważyć, że istnieją skomplikowane formuły opisujące tempo sublimacji materii kometarnej jako funkcji temperatury powierzchni jądra komety, jego struktury oraz ciśnienia nasyconych par sublimujących lodów kometarnych. Przy rozwiązywaniu równania (2) należy uwzględnić również równania orbity komety podających zależność odległości heliocentrycznej komety od czasu oraz równanie stanu Clausiusa-Clapeyrona dla par nasyconych sublimujących substancji. Obliczenie tempa sublimacji $\frac{dZ}{dt}$ z rozważanego równania umożliwia określenie ilości materii w głowie komety i dlatego pozwala przewidywać zmiany jasności komety w funkcji jej odległości heliocentrycznej. Ma to istotne znaczenie dla opisu ewolucji komety w czasie jej obiegu wokół Słońca.

1.3. Dynamika pyłów kometarnych

Jądro komety jest konglomeratem lodów oraz pyłów i okruchów skalnych. Dlatego też cząstki – ziarna kometarne – mogą mieć skomplikowaną strukturę pyłowo-lodową. Molekuły sublimujących lodów kometarnych, bombardując te cząstki leżące na powierzchni jądra komety, mogą zmusić je do ekspansji w kierunku na zewnątrz głowy komety. Inaczej mówiąc, na cząstki kometarne położone na powierzchni jądra komety działa siła parcia uderzających w nie molekuł sublimujących lodów. Oprócz tego poddane są one działaniu siły gra-

witacji komety. Inne oddziaływania, takie jak ciśnienie promieniowania słonecznego oraz grawitację słoneczną przy powierzchni jądra komety w opisie ich dynamiki, można w pierwszym przybliżeniu zaniedbać. Dlatego równanie ruchu ziaren unoszonych z powierzchni jądra komety można przedstawić w postaci:

$$\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d \frac{dv_d}{dt} = \pi a^2 \frac{C_D}{2} \rho_g (v_g - v_d)^2 - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d M_N \frac{G}{R^2}. \quad (3)$$

W powyższym równaniu: a – promień, ρ_d – gęstość ziarna kometarnego, v_d – prędkość ziarna kometarnego, t – czas liczony od momentu wyrzutu ziarna kometarnego z jądra, natomiast ρ_g i v_g reprezentują gęstość i prędkość molekuł sublimujących lodów kometarnych. Oprócz tego M_N – oznacza masę jądra komety, R – odległość cząstki od środka komety, G jest stałą grawitacji, C_D oznacza współczynnik oporu, który dla strumienia swobodnych molekuł przyjmujemy jako równy 2. Pierwszy składnik prawej strony równania opisuje siłę, z jaką molekuły gazu bombardują cząsteczki lodowo-pyłowe, drugi składnik określa siłę grawitacji, z jaką kometa działa na ziarno. Należy zaznaczyć, że dla uproszczenia rozważań przyjęto, że jądro komety ma kształt kulisty. Po przekształceniach algebraicznych równanie (3) można doprowadzić do następującej formy:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{\alpha \left(\frac{dR}{dt}\right) - \beta \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \gamma}{R^2}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\alpha = -\frac{3 \left(\frac{dZ}{dt}\right) \mu m_0 R_N^2}{2a \rho_d}, \quad \beta = \frac{\alpha}{2v_g}, \quad (5)$$

$$\gamma = GM_N - \frac{\alpha v_g}{2}, \quad v_g = \sqrt{\frac{\kappa k T}{\mu m_0}}.$$

W powyższych relacjach przyjęto następujące oznaczenia: μ jest masą cząsteczkową sublimujących lodów, a m_0 jednostką masy atomowej. Wykładnik adiabaty oznaczono przez κ , T jest temperaturą wyrażoną w kelwinach, k jest stałą Boltzmann. Inne oznaczenia są takie same jak w równaniu (3). W równaniu (5) założono, że cząsteczki gazu kometarnego osiągają prędkości dźwięku blisko powierzchni jądra komety. Przyjęta wartość wydaje się być rozsądnym kompromisem pomiędzy dwoma istniejącymi w literaturze skrajnymi opisami wpływu gazu kometarnego. W oparciu o powyższe równania można w łatwy sposób wyznaczyć maksymalny promień a_{max} cząstki lodowo-pyłowej, która jeszcze może być uniesiona przez molekuły sublimującej materii kometarnej.

Kładąc w równaniu (4) $\frac{d^2R}{dt^2} = 0$ oraz $\frac{dR}{dt} = 0$ dla $R = R_N$, łatwo znajdziemy, że:

$$a_{max} = \frac{9 \left(\frac{dZ}{dt} \right) \mu m_0 v_g}{16 \pi G R_N \rho_N \rho_d}. \quad (6)$$

Na podstawie powyższego równania wnioskujemy, że maksymalny promień cząstki kometarnej, która może być uniesiona z powierzchni jądra jest proporcjonalny do tempa sublimacji, które z kolei jest funkcją odległości heliocentrycznej komety. Szczegółowa analiza wzoru (6) prowadzi do wniosku, że dla szerokiego zakresu odległości heliocentrycznych komety promienie największych cząstek a_{max} emitowanych z komet są rzędu 10^{-6} m do 10^{-3} m. Należy zauważyć, że w powyższych rozważaniach pominięto ewentualną rotację jądra komety.

W drugiej części artykułu zostaną opisane dwa zagadnienia. Pierwsze dotyczyć będzie modelowania kształtu głowy komety przy użyciu prostego aparatu matematycznego. Drugie zagadnienie dotyczyć będzie zjawiska wybuchu blasku komet. Zostaną tam przedstawione różne mechanizmy dotyczące tego zjawiska.

Powyższy artykuł powstał podczas realizacji dwóch grantów Dziekana Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego UR: WMP/GD-08/2015 oraz WMP/GMN-21/2015.

Literatura

- [1] Artymowicz P., *Astrofizyka układów planetarnych*, PWN, Warszawa 1995.
- [2] Hughes D., *Cometary outbursts*. A review, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 31, 69–94, 1990.
- [3] Gronkowski P., *Wybuchy komet w znacznych odległościach od Słońca*, Wyd. Uniwersytetu Rzeszowskiego, 2002.
- [4] Gronkowski P., *The source of energy of the Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 outburst activity: the test of the summary*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 360, 1153–1161, 2005.
- [5] Mc-Fadden L., Weissman P., Johnson T. (ed.), *Encyclopedia of the Solar System, second edition*, ELSEVIER, Amsterdam 2007.