

## Komety – kosmiczne koty, cz. II

*Piotr Gronkowski, Marcin Wesołowski*

*Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,*

*Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy*

*Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego*

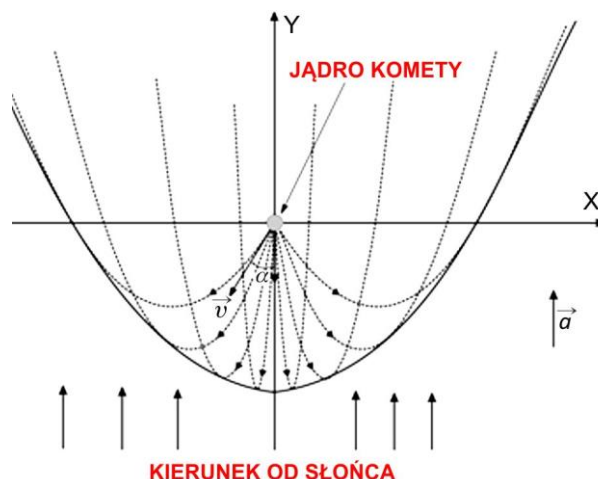
W pierwszej części artykułu zostały przedstawione podstawowe informacje dotyczące pochodzenia komet i struktury jądra komety. Zostały także zaprezentowane podstawowe równania dotyczące fizyki komet, które prowadzą do numerycznego modelowania aktywności sublimacyjnej tych ciał niebieskich.

### 1. Głowa komety

W poprzedniej części pokazano, że sublimujące gazy kometarne mogą unosić z powierzchni jądra lodowo-pyłowe ziarna, cząstki materii kometarnej. Dzieje się tak wtedy, gdy przy powierzchni jądra komety siła parcia sublimujących gazów kometarnych, działająca na unoszone ziarna kometarne, przewyższa działającą na nie siłę grawitacji pochodzącą od jądra komety. Rozwiązanie przedstawionego poprzednio równania ruchu takich cząstek w pobliżu jądra komety prowadzi do wniosku, że stosunkowo bardzo szybko uzyskują one swoje maksymalne prędkości graniczne rzędu 100 m/s. Dlatego dla uproszczenia dalszych rozważań założymy, że są one emitowane z jądra komety z prędkościami tego rzędu. Wykorzystamy ten fakt w prostym matematycznie opisie kształtu głowy komety. Należy pamiętać o tym, że w ogólnym przypadku w pewnym oddaleniu od jądra komety na uniesione z jego powierzchni ziarno kometarne działają następujące siły: grawitacja komety, grawitacja słoneczna, parcie gazów kometarnych oraz siła związana z ciśnieniem promieniowania słonecznego. Jeśli cząstka dostatecznie daleko oddaliła się od jądra komety, to okazuje się, że dominujące jest działanie ciśnienia promieniowania słonecznego. Wygląd głów kometarnych może być różny, jednak wspólną cechą dla większości komet jest to, że generalnie przyjmują one kształt jasnych chmur, których obwiednie mają kształt zbliżony do parabol. Ten kształt postaramy się szybko i prosto uzasadnić w oparciu o szkolną fizykę. Autorzy mają nadzieję, że proste matematyczne rozumowanie oparte jednak o naukowe podstawy, będzie interesujące dla tych uczniów szkół ponadgimnazjalnych, którzy interesują się astronomią. Przedstawione poniżej rozumowanie z przyczyn „technicznych” będzie jednak znacznym uproszczeniem opisu dynamiki ziaren – cząstek kometarnych w głowie komety.

Założmy, że kometa zbliżając się do Słońca, po orbicie będącej jedną z krzywych stożkowych, jest na tyle blisko niego, że zdążyła już wytworzyć głowę spowijającą jej jądro. Opiszemy geometrię głowy komety w układzie

współrzędnych XY takim, że w jego początku znajduje się jądro komety, a jej orbita zawiera się w płaszczyźnie układu (rys. 1).



Rys. 1. Układ współrzędnych XY, w którym rozważamy ruch cząstek emitowanych z jądra komety. Przyjęto oznaczenia:  $\vec{v}$  – prędkość początkowa cząstki wyrzuconej z komety,  $\alpha$  – kąt, jaki wektor prędkości początkowej cząstki tworzy z kierunkiem ku Słońcu (z ujemną półosią OY),  $\vec{a}$  – przyspieszenie wyrzuconej cząstki pochodzące od ciśnienia promieniowania słonecznego

Załóżmy, że ziarno lodowo-pyłowe zostało wyrzucone z prędkością  $v$  z jądra komety pod kątem  $\alpha$  do kierunku ujemnej półosi OY. Zgodnie z naszym przybliżeniem odpowiednio daleko od komety poddane jest ono tylko działaniu siły parcia promieniowania słonecznego. Siła ta nadaje jej przyspieszenie o wartości  $a$  w ujemnym kierunku osi OY. Równania jej ruchu w przyjętym układzie odniesienia są następujące:

$$x = -vt \sin \alpha, \quad (1)$$

$$y = -vt \cos \alpha + \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

W powyższych równaniach  $t$  oznacza czas liczony od momentu emisji cząstki kometarnej z powierzchni jądra. Eliminując czas  $t$  z równań (1) i (2) uzyskamy następujące równanie:

$$y = -x \operatorname{ctg} \alpha + \frac{ax^2}{2v^2 \sin^2 \alpha}. \quad (3)$$

Torem ruchu emitowanych z jądra komety cząstek są zatem łuki parabol. Na podstawie otrzymanego równania, przy założeniu, że ziarna są emitowane z jądra komety z tą samą ustaloną prędkością  $v$ , lecz pod różnymi kątami  $\alpha$ ,

wnioskujemy, że ich tory będą tworzyły rodzinę parabol, której parametrem jest wartość kąta  $\alpha$ . Kształt głowy komety zostanie wyznaczony przez obwiednię tej rodziny. W matematyce wyższej istnieją pewne reguły oparte o rachunek różniczkowy, które pozwalają określać obwiednię zadanej rodziny krzywych. W naszym przypadku możemy jednak wykorzystać inną „szkolną” metodę. Z równań (1) i (2) możemy wyeliminować kąt  $\alpha$  w oparciu o „jedynekę trygonometryczną” uzyskując następujące równanie:

$$\frac{1}{4}a^2t^4 - (ay + v^2)t^2 + x^2 + y^2 = 0. \quad (4)$$

Otrzymane równanie czwartego stopnia ze względu na czas  $t$  jest równaniem, które możemy doprowadzić do następującego równania kwadratowego przez podstawienie  $t^2 = z$

$$\frac{1}{4}a^2z^2 - (ay + v^2)z + x^2 + y^2 = 0. \quad (5)$$

Wyróżnik tego równania jest równy:

$$\Delta = (ay + v^2)^2 - a^2(x^2 + y^2). \quad (6)$$

Równanie (6) ma rozwiązania rzeczywiste ze względu na czas  $t$  tylko wtedy, gdy jego wyróżnik jest nieujemny:  $\Delta \geq 0$ . Dlatego równanie obwiedni rodziny parabol wynikające z warunku  $\Delta = 0$ , można zapisać w postaci:

$$(ay + v^2)^2 - a^2(x^2 + y^2) = 0. \quad (7)$$

lub

$$y = \frac{ax^2}{2v^2} - \frac{v^2}{2a}. \quad (8)$$

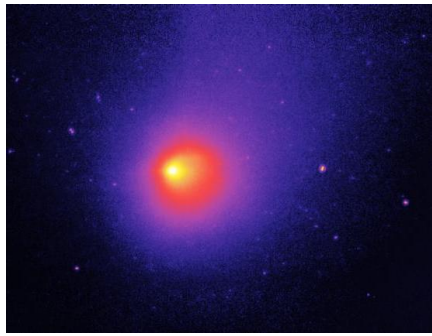
W ten sposób uzyskaliśmy równanie obwiedni torów cząstek wyrzuconych z jądra komety. Na podstawie tego równania wnioskujemy, że jest to parabola zwrócona gałęziami od Słońca, a więc w kierunku dodatnim osi OY. Na podstawie powyższego równania możemy określić promień głowy komety  $R_1$  mierzony w kierunku ku Słońcu, który znajdziemy z zależności  $R_1 = |y(0)| = v^2/2a$ . Promień głowy komety  $R_2$  liczony w kierunku prostopadłym do Słońca obliczymy podstawiając w równaniu (8)  $y = 0$ , wtedy  $R_2 = x(0) = v^2/a$ . Zatem promień głowy w kierunku osi OX jest dwukrotnie większy niż w kierunku osi OY, co jakościowo dość dobrze zgadza się z obserwacjami. Przedstawiony tu uproszczony model emisji ziaren kometarnych z jądra przypomina wypływ strumieni wody z fontanny i dlatego zwany jest niekiedy modelem fontannowym. Warto zauważyć, że równania (1)–(3) są analogiczne do znanych ze szkolnej fizyki równań rzutu ukośnego. Dzieje się tak, gdyż ruch cząsteczek wytryskujących z fontanny w różnych kierunkach jest przykładem rzutu ukośnego w jednorodnym ziem-

skim polu grawitacyjnym. W przypadku emisji cząstek z jądra komety analogiem przyspieszenia ziemskiego  $g$  jest przyspieszenie  $a$  pochodzące od siły związanej z ciśnieniem światła słonecznego. Ostateczny kształt „pióropusza wodnego” – fontanny wodnej jest zdeterminowany przez obwiednię parabolicznych strumieni wody. Tak więc, komety są niejako „gwiazdnymi fontannami”, co zgodne jest z naszymi estetycznymi impresjami towarzyszącymi nam w czasie kontemplacji widoku tych ciał kosmicznych na sferze niebieskiej.

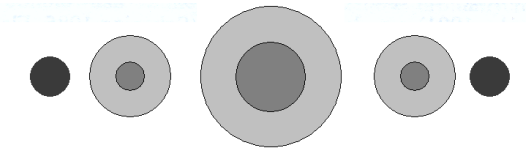
## 2. Wybuchy blasku komet

Bardzo interesującym zjawiskiem związanym z przejawami aktywności komet są wybuchy ich blasku. Pod pojęciem wybuchu blasku komety nie należy rozumieć eksplozji takiej, jak wybuch granatu, bomby czy miny, lecz tylko nagły wzrost blasku o więcej niż jedną wielkość gwiazdową, najczęściej rzędu  $2^m$ – $5^m$ . Czasami skok blasku może być wręcz dramatyczny, nawet o  $15^m$ , jak miało to miejsce w 2007 roku w przypadku wybuchu komety 17P/Holmes. Po raz pierwszy to zjawisko zainteresowało astronomów w latach dwudziestych XX wieku, gdy w 1927 roku dwóch astronomów niemieckich Arnold Schwassmann i Arno Arthur Wachmann, pracujących w obserwatorium astronomicznym w Hamburgu, odkryło kometa nazwaną później kometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Najprawdopodobniej miało to miejsce w czasie maksimum jednego z jej licznych wybuchów. Współcześnie często odnotowuje się wybuchy komet zarówno jednopojawieniowych jak i okresowych, jednak kometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (dalej w tekście nazywana 29P/SW1) jest najlepiej znaną przedstawicielką tej klasy obiektów kosmicznych. Obiega ona Słońce po prawie kołowej orbicie eliptycznej (o mimośrodku  $e = 0,045$ ), położonej pomiędzy orbitami Jowisza i Saturna. Odległość komety od Słońca zmienia się od 5,5 AU do 7,5 AU w czasie jej orbitalnego okresu wynoszącego około 16 lat. W swojej spokojnej „niewybuchowej fazie” kometa jest obiektem kosmicznym o jasności  $18^m$ – $19^m$ , o wyglądzie rozmytej tarczy, w której czasami można dostrzec słabo zauważalne centralne zgęszczenie. Wybuch jej jasności następuje nagle i w ciągu kilku godzin lub dni powstaje w jej głowie gwiazdopodobne jasne jądro, które rozszerza się z prędkością rzędu 100–400 m/s formując rodzaj tarczy planetarnej. Następnie przekształca się ono w kometarne halo (otoczkę) o zmniejszającej się na zewnątrz jasności powierzchniowej. W czasie maksimum wybuchu jasność komety jest o kilka wielkości gwiazdowych większa niż w fazie „nieaktywnej” i wynosi przeciętnie  $13^m$ – $14^m$ . Warto przypomnieć w tym miejscu, że jasność obiektów astronomicznych mierzymy w tzw. wielkościach gwiazdowych, przy czym im wielkość gwiazdowa jest bardziej przesunięta w kierunku wielkości ujemnych, tym ciało kosmiczne jest jaśniejsze. W czasie wybuchu jasności kometa odrzuca masę rzędu  $10^8$  kg, której energia w postaci energii kinetycznej rozszerzającej się otoczki jest rzędu  $10^{12}$  J. Widmo komety w jej fazie aktywnej „wybuchowej” jest odbitym przez cząstki pyłów i ziarna lodowe widmem sło-

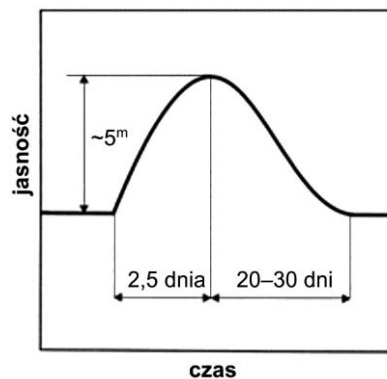
necznym, czasami widoczna jest także emisja  $\text{CO}^+$ . Po pewnym czasie, rzędu 5–25 dni, wygląd komety powraca do pierwotnego stanu. Nie odkryto zmian orbity komety związanych z jej wybuchem. Generalnie wybuchy innych komet mają podobny przebieg, jak komety 29P/SW1. Co ciekawe, częstotliwość ich występowania nie wykazuje klarownej zależności od odległości komety od Słońca. Większość ich ma miejsce w odległościach heliocentrycznych mniejszych niż 4 AU; ale zdarzają się wyjątki, takie jak właśnie kometa 29P/SW1, kometa 1P/Halley czy kometa C/1961 R1 Humason.



Fot. 1. Zdjęcie komety 29/P Schwassmann-Wachmann 1 (foto NASA)



Rys. 2. Schemat zmian wyglądu komety w czasie wybuchu



Rys. 3. Zmiany jasności komety w czasie wybuchu



Fot. 2. Kometa 1P/Halley podczas ostatniego zbliżenia do Słońca w 1986 roku (foto NASA)

Aby wyjaśnić przyczynę zjawiska rozbłysku, a w szczególności źródło jego energii, zaproponowano szereg hipotez. Można je podzielić na dwie kategorie:

- a) hipotezy oparte na zewnętrznych źródłach energii inicjującej wybuch,
- b) hipotezy oparte na wewnętrznych źródłach tej energii.

Do pierwszej grupy potencjalnych przyczyn były proponowane takie zjawiska, jak zderzenia jąder komet z innymi małymi ciałami krążącymi w Układzie Słonecznym (asteroidy czy meteoroidy), wpływ na komety strumieni silnego wiatru słonecznego lub ultrafioletowego promieniowania Słońca. Do drugiej grupy mogą należeć wybuchowe reakcje chemiczne, zachodzące w jądrze komety, powodujące destrukcję części powierzchni jądra komety, gdy ciśnienie par substancji lotnych, uwieczonych w jego obszarach podpowierzchniowych, przewyższy wytrzymałość powierzchniowych warstw jądra komety lub transformację kometarnego wodnego lodu amorficznego do postaci krystalicznej. Dokładna analiza proponowanych hipotez należących do grupy a) pokazuje, że proponowane mechanizmy albo są bardzo mało prawdopodobne, albo nie mogą wyjaśnić szeregu charakterystyk rozważanego zjawiska. I tak hipoteza zderzeniowa okazuje się niesłychanie mało wiarygodna. Również fakt, że nie obserwuje się lokalnego maksimum częstości występowania wybuchów jasności komet w okolicach pasa asteroidów, gdzie prawdopodobieństwo ich zderzeń z drobnymi ciałami krążącymi w Układzie Słonecznym jest największe, generalnie stawia ją pod znakiem zapytania. Oczywiście do kolizji komet z ciałami Układu Słonecznego na pewno może dochodzić – świadczy o tym zderzenie komety D/Shoemaker-Levy 9 z Jowiszem w 1994 roku, ale nie jest to główny mechanizm napędzający aktywność wybuchową komet. Podobnie 11-letni cykl aktywności Słonecznej nie wykazuje klarownej korelacji z częstością występowania wybuchów jasności komet. Dodatkowo, dokładne badania statystyczne zjawiska nie potwierdzają również jednoznacz-

nej jego korelacji z odległością komety od Słońca. Dlatego wpływ Słońca trudno uznać za główną przyczynę zjawiska.

Pierwszą z kolei hipotezą związaną z wewnętrznymi przyczynami zjawiska był mechanizm oparty na założeniu, że niektóre składniki jądra kometarnego mogą w sprzyjających warunkach ulec transformacji w materiał silnie wybuchowy. Wiadomo, że w skład jądra komety wchodzi wolne rodniki, takie jak NH czy OH. Rodnik NH jest stabilny w odpowiednio niskich temperaturach, lecz na skutek ogrzewania transformuje się do azotku amonu  $\text{NH}_4\text{N}_3$ , który w temperaturze 148 K staje się substancją silnie wybuchową. Potrzebnym źródłem energii cieplnej miałyby być protony słoneczne. Inny rodnik OH przechodzi w  $\text{H}_2\text{O}_2$  w temperaturze 77 K. Mieszanina nadtlenu wodoru z pyłem węglowym jest silnie wybuchowa i przy dostatecznie dużej koncentracji rodników OH można oczekiwać silnych eksplozji. Jednak dla zapewnienia wzrostu blasku komety o  $2^m$ – $3^m$  koncentracja rodników w kometach wydaje się być zdecydowanie za niska. Powyższy mechanizm jest również silnie zależny od temperatury, co oznacza, że wybuchy komet byłyby bardzo wyraźną funkcją ich odległości heliocentrycznych. Chemiczne eksplozje mogłyby być jedynie źródłem krótkotrwałych rozbłysków na samym początku wybuchu blasku, ale nie mogą go podtrzymywać w relatywnie długim okresie jego trwania.

Drugim mechanizmem należącym do grupy b) był tzw. mechanizm ciśnieniowy, zaproponowany w celu wyjaśnienia wybuchów blasku komety 29/PSW1. Temperatura powierzchni jądra tej komety w odległości heliocentrycznej 5,5 AU wynosi około 130 K. W tej temperaturze zaczyna sublimować  $\text{CH}_4$ . Intensywne sporadyczne parowanie tej substancji może prowadzić do zwiększenia ciśnienia w zagłębieniach struktury porowatej komety i oderwania się od jądra pewnej części zewnętrznej warstwy. W różnych odległościach heliocentrycznych inne substancje stanowiące domieszki lodu wodnego mogłyby być odpowiedzialne za wybuchy, lecz mechanizm byłby zawsze podobny; substancje bardziej lotne niż lód wodny, parując w jamach podpowierzchniowych jądra, powodują znaczny wzrost ciśnienia uwięzionego w nich gazu. Jeżeli jego wartość przewyższy wytrzymałość materiału kometarnego na rozzerwanie, może to doprowadzić do zniszczenia warstwy okrywającej jamy i wyrzutu materii gazowo-pyłowej. Odsłonięcie warstw głębszych, bogatszych w substancje lotne, prowadzi do gwałtownego wzrostu tempa sublimacji i zwiększenia ilości materii w halo komety. Tym samym całkowity przekrój rozproszeniowy cząstek, stanowiących głowę komety, gwałtownie rośnie i kometa rozprasza znacznie więcej światła słonecznego. W ostateczności obserwujemy wybuch blasku komety. Proponowany mechanizm wydaje się realistyczny i w oparciu o niego można wyjaśnić niektóre charakterystyczne cechy wybuchów komety 29P/SW1. Jednak nie można go uznać za jedyny mechanizm odpowiedzialny za wybuchową aktywność wszystkich komet. Po pierwsze, zgodnie z tym mecha-

nizmem, wybuchy komet powinny grupować się w tych odległościach heliocentrycznych, które odpowiadają rozpoczęciu intensywnej sublimacji przez substancje odpowiedzialne za wybuchy. Po drugie, różne substancje, mogące potencjalnie inicjować wybuchy, występują w kometach w różnej koncentracji, co prawdopodobnie prowadziło do istotnych morfologicznych różnic w przebiegu zjawiska. Inaczej mówiąc, przebieg wybuchów i ich częstotliwość występowania byłyby prostymi funkcjami odległości heliocentrycznej komety, czego jednak nie potwierdza zebrany bogaty materiał obserwacyjny. Również kruchość i mała wytrzymałość materii kometarnej czyni możliwość uwięzienia znacznych ilości molekuł pary w zagłębieniach struktury porowatej komet dość problematyczną.

Trzeci, należący do drugiej grupy, proponowany mechanizm jest związany z hipotezą, że pierwotnym budulcem komet był lód wodny w postaci amorficznej, a nie krystalicznej. Hipoteza ta wynika z faktu, że jądra komet były formowane w wyniku akrecji międzygwiazdowego pyłu i granул w warunkach niskiej temperatury i ciśnienia. W tych warunkach preferowaną termodynamicznie strukturą lodu wodnego jest jego odmiana amorficzna. Lód amorficzny może ulegać konwersji do formy krystalicznej o strukturze kubicznej i reakcja ta jest wysoce egzotermiczna. Tempo konwersji jest rosnącą funkcją temperatury. Rozpoczyna się około 120 K i powyżej 140 K staje się bardzo szybkie i wydajne energetycznie. Ponieważ lód amorficzny ma nieco inną gęstość niż kubiczny, więc przejście to powoduje naprężenia niszczące powierzchnię jądra. Wtedy mogą być odsłaniane jego głębsze warstwy bogate w bardziej lotne substancje niż lód wodny, które zaczynają gwałtowniej sublimować, gdyż temperatura powierzchni jądra wzrosła dzięki egzotermicznej transformacji lodu amorficznego. W ostateczności doprowadzić to może do znacznego zwiększenia blasku komety, czyli wybuchu jej jasności. Proponowany mechanizm, mimo że najbardziej spójny, również był krytykowany za pewne swoje słabe strony. Po pierwsze, transformacja lodu amorficznego w kubiczny jest efektywna dopiero przy około 140 K, a więc znacznie powyżej oczekiwanej temperatury dla powierzchni jądra wielu komet, które uległy wybuchom (m.in. 29P/SW1 i 1P/Halley). Po drugie, przyjmując ten mechanizm, należy odpowiedzieć na pytanie, co po pewnym czasie hamuje ten proces? Być może krystalizacja dociera do miejsc o słabej przewodności cieplnej lub ilość uwięzionych molekuł stosunkowo zimnych par w zagłębieniach struktury porowatej jest tak duża, że reakcja staje się endotermiczna. Po trzecie czy w kometach przebiegających blisko Słońca cały lód ulega krystalizacji po jednym zbliżeniu? Mimo wielu znaków zapytania związanych z hipotezą transformacji wodnego lodu amorficznego, której początków należy szukać jeszcze w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, do dzisiaj powstają w oparciu o nią coraz bardziej zaawansowane teoretyczne próby wyjaśnienia przyczyn rozpatrywanego zjawiska wybuchów blasku komet. Należy jednak pamiętać, że obecnie zwraca się uwagę na jeszcze dwa inne jej słabe



punkty. Jeden z nich związany jest z kwestią czy lód amorficzny dotrwał w kometach od chwili ich powstania do naszych czasów. W czasie długiego czasu rzędu milionów lat, który był typowym czasem formowania się jąder kometarnych w pierwotnej mgławicy, z której powstawał Układ Słoneczny, wodny lód amorficzny mógł ulec konwersji do postaci kubicznej nawet w temperaturze około 85 K. Obecnie nie ma bezpośrednich astrofizycznych dowodów za lub przeciw istnieniu lodu amorficznego w kometach wykazujących wybuchową aktywność. Na przykład wspomniana już wielokrotnie kometa 29P/SW1 okrąża Słońce w średniej odległości około 6 AU, mając temperaturę powierzchni rzędu 110–130 K i dlatego znajduje się ona w pobliżu granicy strefy stabilności lodu amorficznego. Reakcja konwersji wodnego lodu amorficznego do postaci krystalicznej jest silnie egzotermiczna w przypadku, gdy nie jest on domieszkowany innymi substancjami. Jednak w kometach najprawdopodobniej zawiera on różne domieszki innych związków chemicznych. Wtedy, jak pokazują badania laboratoryjne, bilans energetyczny tej reakcji może zmienić się dość dramatycznie. Tempo wydzielania energii może ulec znacznemu zmniejszeniu lub nawet w skrajnych wypadkach reakcja konwersji może stać się endotermiczna! Tak więc hipoteza transformacji wodnego lodu amorficznego jako główna przyczyna zjawiska wybuchów jasności komet ma pewne ograniczenia. Prawdopodobnie transformacja amorficznego lodu wodnego może być przyczyną rozpatrywanego zjawiska w odniesieniu do komet młodych, w których lód amorficzny nie zdążył ulec całkowitej przemianie. Natomiast w odniesieniu do komet starszych, w których lód amorficzny całkowicie uległ krystalizacji, przyczyna ich wybuchów musi być inna. W ostatnich latach ukazało się kilka prac, w których zwraca się uwagę na inną możliwą przyczynę wybuchów jasności komet. Otóż przyczyną zjawiska może być szeroko pojęta termodestrukcja jądra komety. Po pierwsze pod wpływem promieniowania słonecznego w lodowym, krystalicznym jądrze komet mogą powstawać różnego rodzaju naprężenia, stanowiące przyczynę destrukcji warstw powierzchniowych jąder kometarnych, odrzucenia w przestrzeń kosmiczną warstw powierzchniowych jądra i odsłonięcia warstw głębszych, co w ostateczności jak było już wspomniane, może prowadzić do istotnego wzrostu blasku komet. Drugim przejawem destrukcji materii kometarnej może być termodestrukcja lodowo-pyłowych ziaren kometarnych, zarówno położonych na powierzchni jądra komety, jak i uniesionych w jej atmosferę przez molekuly sublimujących lodów kometarnych. Otóż lodowo – pyłowe ziarna kometarne mogą zawierać inkluzje wmrzniętych substancji (CO, CO<sub>2</sub>), które są bardziej lotne niż lód wodny. Gdy kometa zbliża się stopniowo do Słońca materiał inkluzji zaczyna sublimować i w pewnym momencie ciśnienie jego pary nasyconej może przewyższyć wytrzymałość na rozrywanie spowijających je lodów. Lodowo – pyłowe ziarna kometarne mogą ulec destrukcji – rozpadowi na mniejsze odłamki, których powierzchnia jest znacznie większa niż ziaren macierzystych. W ten sposób bardzo duże zwiększenie

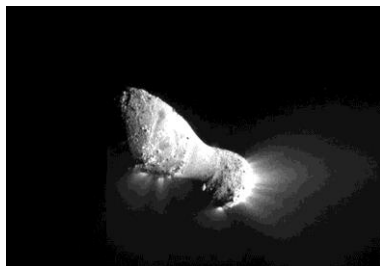
powierzchni odbijającej światło słoneczne może doprowadzić również do wybuchu blasku komety.

### Podsumowanie

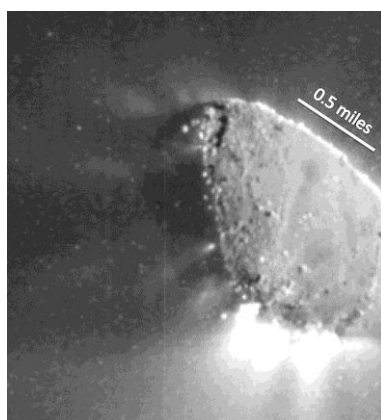
Komety, ciała kosmiczne o mglistych, nieostrych zarysach, obdarzone często warkoczami (lub ogonami), pojawiające się na niebie niespodziewanie i relatywnie szybko przesuujące się na tle gwiazdozbiorów, od niepamiętnych czasów budziły wielkie zainteresowanie ludzkości. Z powodu swojego wyglądu były często przez starożytnych nazywane „włochatymi gwiazdami”. Wygląd zakrzywionych warkoczy pyłowych komet kojarzono niekiedy z karzącym mieczem. To dlatego w dawnych wiekach komety wzbudzały zabobonny strach jako zapowiedź klęsk i katastrof. Pomimo tego, już od czasów Arystotelesa próbowano ich pochodzenie wytłumaczyć w sposób naturalny. Początkowo jednak przeważał pogląd, że są to zjawiska o ziemskim pochodzeniu, które zachodzą w atmosferze naszej planety. Dopiero badania takich astronomów jak: Brahe, Kepler, Hewelisz\*, Newton i Halley rozpoczęły nowoczesny rozdział badań kometarnych. W niniejszym artykule zostały przedstawione podstawowe równania opisujące fizykę komet oraz ciekawe zjawisko wybuchów ich blasku. W chwili obecnej wydaje się, że głównym powodem tego zjawiska dla komet zawierających wodny lód amorficzny jest jego przemiana w postać krystaliczną, a dla komet zawierających wodny lód krystaliczny – szeroko pojęta termodestrukcja materiału kometarnego. Pamiętać należy jednak o tym, że inne proponowane dotychczas mechanizmy mogą również w sprzyjających warunkach wywoływać znaczne wzrosty blasku tych ciał niebieskich. Przeprowadzone w ciągu dwóch ostatnich dziesięcioleci badania teoretyczne, w tym symulacje komputerowe, badania laboratoryjne, obserwacje teleskopowe oraz szczególnie misje kosmiczne do komet bardzo wzbogaciły naszą wiedzę dotyczącą tych kosmicznych nomadów. Tak więc odkryto np. wyrzuty materii z komet w postaci „dżetów” przypominających zjawisko ziemskich gejzerów, a sondy kometarne pozwoliły na bezpośrednie badanie materii kometarnej. Zdarza się niekiedy, że komety potrafią zachowywać się w sposób dość „kapryśny”. W 2013 roku słynna kometa C/2012 S1 (ISON) miała okazać się wyjątkowo jasnym ciałem kosmicznym w okresie przejścia przez swoje peryhelium. Niestety, nic takiego nie miało miejsca, gdyż uległa ona rozpadowi. Śledzenie orbit tych ciał niebieskich i badanie ich ewolucji przynosiło, przynosi i pewnie nadal będzie przynosić astronomom wiele zaskakujących niespodzianek. Dlatego astronomowie zajmujący się badaniem komet mówią czasami, że są one jak koty – mają ogony i robią to na co mają ochotę.

---

\* Jan Heweliusz z Gdańska w 1668 roku wydał dzieło *Cometografia*.



Fot. 3. Zdjęcia jądra komety Hartley 2 wykonane z sondy kosmicznej Deep Impact (foto NASA)



Fot. 4. Widoczne strugi gazu (dżety), które są wyrzucane z jądra komety 103P/ Hartley (foto NASA)

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., 1995, *Astrofizyka układów planetarnych*, PWN, Warszawa.
- [2] Hughes D., 1990, Cometary outbursts. A review, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 31, 69–94.
- [3] Gronkowski P., 2002, *Wybuchy komet w znacznych odległościach od Słońca*, Wyd. Uniwersytetu Rzeszowskiego.
- [4] Gronkowski P., 2005, 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.
- [5] Mc-Fadden L., Weissman P., Johnson T. (ed.), 2007, *Encyclopedia of the Solar System*, second edition, ELSEVIER, Amsterdam.
- [6] Gronkowski P., 2014, The outbursts of the comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1: A new approach to the old problem, *Astronomische Nachrichten*, 2, 124–134.

Redakcja poleca artykuł Krzysztofa Ziółkowskiego „Lądowanie na komecie”, *Urania* 5/2015, t. LXXXVI, 12–18.