

Kometa Halleya już dawno zniknęła nam z oczu opuszczając sąsiedztwo Słońca (choć jeszcze ciągle jest obserwowana przez wielkie teleskopy), ale nadal budzi żywe zainteresowanie astronomów prowadząc coraz pewniej i głębiej na trop tajemnic świata komet i kosmogonii Układu Słonecznego. Czytelnicy *Delty* mieli już okazję wiele o niej się dowiedzieć (m.in. z tekstów opublikowanych w *Delcie* 3/1985), jednak wnikliwe badania przeprowadzone podczas jej ostatniego powrotu do Słońca dostarczyły tylu nowych danych, że trudno nie ponowić tu prezentacji słynnej komety w świetle najnowszych odkryć i lepszego dziś zrozumienia jej natury.

W pierwszej połowie marca 1986 roku flotyła statków kosmicznych (patrz tabela) przeleciała przez głowę komety Halleya dokonując ze stosunkowo niewielkiej odległości obserwacji jądra, pomiarów własności jego otoczenia plazmowego oraz analizy próbek materii przechwyconej na miejscu.

Sondy komety Halleya

Nazwa	Agencja organizująca misję	Data startu	Data zbliżenia do komety	Minimalna odległość od jądra (km)	Odległość heliocentr. (j.a.)	Prędkość mijania komety (km/s)
Vega 1	Interkosmos	15 XII 1984	6 III 1986	8890	0,79	79,2
Vega 2	Interkosmos	21 XII 1984	9 III 1986	8030	0,83	76,8
Giotto	Europejska Agencja Kosmiczna	2 VII 1985	14 III 1986	600	0,89	68,4
Suisei	Japoński Instytut Badań Kosmicznych	19 VIII 1985	8 III 1986	151 tys.	0,82	73,0
Sakigake	Japoński Instytut Badań Kosmicznych	8 I 1985	11 III 1986	6,99 mln	0,86	75,3

To pierwsze w dziejach sondowanie komety było wsparte zakrojona na wielką skalę i rozciągnięta w czasie kampanią obserwacyjną z powierzchni Ziemi, a także śledzeniem komety spoza atmosfery ziemskiej przez działające już od dawna obiekty kosmiczne, a nawet sztucznego satelitę Wenus. Jakie wyniki przyniósł ten bezprecedensowy szturm na komety Halleya?

Zdjęcia uzyskane za pomocą sond Giotto i Vega umożliwiły rekonstrukcję obrazu jądra. Zgodnie z oczekiwaniami stanowi ono pojedynczą bryłę materii o nieregularnym kształcie przypominającym wydłużony ziemniak. Jego rozmiary są większe niż się spodziewano: wielka oś sięga 15 – 16 km, a mała 8 – 10 km. Powierzchnia jądra okazała się bardzo ciemna, jej zdolność odbijania promieniowania (albedo) nie przewyższa 4 procent. Do pewnego stopnia tłumaczy to stosunkowo wysoką temperaturę powierzchni, którą oszacowano na około 320 K. Powierzchnia jądra nie może więc być pokryta – jak pierwotnie sądzono – lodem wodnym, którego temperatura sublimacji wynosi 180 – 200 K, lecz warstwą pyłu lub jakąś trudniej topliwą i najprawdopodobniej cienką skorupą, pod którą dopiero znajduje się lód. Prawie wszystkich gaz i pył emitowany z jądra pochodzi z kilku pojedynczych źródeł będących najprawdopodobniej pęknięciami lub szczelinami w tej skorupie. Z pomiarów tempa jego produkcji udało się ocenić całkowitą ilość materii traconej przez jądro podczas jednego zbliżenia komety do Słońca na około $5 \cdot 10^{11}$ kg. Próbując odpowiedzieć na pytanie, czy uzyskana w ten sposób wartość może wytłumaczyć (w ramach

przyjmowanego modelu tzw. sił niegrawitacyjnych) zaobserwowane wydłużanie się okresu orbitalnego komety o około 4 dni na obieg, stwierdzono, że obecna masa jądra powinna być równa około 10^{14} kg, co przy jego objętości wynoszącej około 500 km^3 daje gęstość zaledwie $0,2 \text{ g/cm}^3$. Czyżby więc jądro komety Halleya, będąc przecież w dużej części zbudowane z lodu, miało porowatą strukturę?

Parowanie gazów z jądra komety pod wpływem promieniowania słonecznego powoduje wystąpienie lekkiego odrzutu. Może on być skierowany w różne strony w zależności od tego, jak jądro komety wiruje, ale w każdym przypadku będzie powodował zakłócenia ruchu niemożliwe do przewidzenia na podstawie prawa grawitacji. Są to właśnie anomalie niegrawitacyjne. Podobne efekty może dawać odrywanie się drobnych fragmentów od wirującego jądra komety.

Porównanie obrazów jądra wykonanych w kilkudniowych odstępach za pomocą trzech sond kosmicznych potwierdziło wstępniejsze ustalenia dotyczące okresu jego obrotu. Zarówno wykonana współcześnie cyfrowa analiza zdjęć

komety z poprzedniego pojawienia się w 1910 roku, jak też periodyczność zmian struktury obłoku wodorowego otaczającego jądro stwierdzona za pomocą sondy Suisei wskazuje, że wynosi on 2,2 dnia. Wielkim zaskoczeniem są więc rezultaty naziemnych obserwacji fotometrycznych komety Halleya, wykonanych w marcu i kwietniu 1986 roku, z których wynika, że okres rotacji jądra jest równy 7,4 dnia. Wiarygodność tej ostatniej wartości potwierdziły także dane przekazane przez sondę wenusjańską Pioneer-Venus, która śledziła komety w pobliżu perihelium, gdy nie była ona widoczna z Ziemi. Powstała kontrowersja próbuje się wyjaśnić np. przyjęciem teoretycznie możliwej rotacji wydłużonego jądra względem jego dłuższej osi z okresem 7,4 dnia i jednoczesnego obrotu precesyjnego tej bryły wokół osi nachylonej do osi rotacji pod kątem 77° w okresie 2,2 dnia. Problem rotacji jądra komety Halleya pozostaje jednak nadal otwarty.

O składzie chemicznym jądra można wnioskować jedynie na podstawie analizy wydobywających się z niego pyłów i gazów tworzących głowę komety. Trzeba jednak pamiętać, że o ile skład pierwiastkowy cząstek pyłu nie ulega w zasadzie zmianom z odległością od jądra, to w przypadku molekuł gazu sytuacja jest odwrotna: w miarę oddalania się od jądra pierwotne, czyli tzw. macierzyste molekuly w różnych łańcuchach reakcji chemicznych rozpadają się na prostsze i trwalsze związki oraz jonizują się.

Ważnym odkryciem okazało się stwierdzenie występowania w pyłe kometarnym bardzo wielu cząstek o najmniejszych

masach, jakie mogły być jeszcze rejestrowane przez odpowiednie detektory, tzn. 10^{-17} g (największe cząstki, jakie zdołano zarejestrować, miały masy rzędu 1 g). Ich materia wykazała znaczną zawartość pierwiastków o małej liczbie atomowej, a w szczególności węgla (C), wodoru (H), tlenu (O) i azotu (N). Nazwano je cząstkami CHON dla podkreślenia podobieństwa ich składu do chemizmu meteorytów zwanych chondrytami węglistymi, uznanych za najbardziej pierwotną materię Układu Słonecznego. Odkrycie bogatych w węgiel cząstek CHON rozwiązało m.in. problem deficytu węgla w kometach. Dotychczasowe analizy widm wielu komet wskazywały bowiem na co najmniej trzykrotnie mniejszą zawartość węgla w gazie kometarnym niż gdziekolwiek indziej w Układzie Słonecznym. Zawartość innych pierwiastków stwierdzonych w pyłe, m.in. krzemu (Si), żelaza (Fe), magnezu (Mg), sodu (Na), siarki (S), jest zbliżona do ich średniej obfitości kosmicznej. C, H, O i N są podstawowym budulcem prostych molekuł organicznych, które z kolei mogą tworzyć substancje smołopodobne. Ich powstawaniem na powierzchni jądra można próbować tłumaczyć jego małe albedo.

Występowanie w gazie kometarnym zidentyfikowanych uprzednio związków chemicznych zostało niemal w pełni potwierdzone przez badania przeprowadzone w trakcie sondowania komety Halleya. Odkryto ponadto wiele nowych molekuł i jonów. Przede wszystkim trzeba podkreślić, że kometa Halleya jest w zasadzie pierwszą kometą, w której udało się wyraźnie stwierdzić istnienie molekuł H_2O . Dotychczasowe obserwacje – np. linii emisyjnych w widmach komet rodnika OH, którego molekułą macierzystą jest H_2O – wskazywały na nie jedynie pośrednio. Uzyskanie obecnie bezpośredniego dowodu na to, że głównym składnikiem jądra komety jest lód wodny, stanowi więc potwierdzenie ogólnej koncepcji lodowego jądra, sformułowanej w 1950 roku przez amerykańskiego astronoma Freda Whipple'a. Duże znaczenie ma także bezpośrednia detekcja molekuł dwutlenku węgla (CO_2), którego obfitość oceniono jednak na zaledwie 2 – 3 procent zawartości wody. W jądrze musi on występować w postaci suchego lodu zmieszanego z lodem wodnym. Znacznie więcej – aż do 20 procent – znaleziono tlenku węgla (CO). CO i CO_2 tłumaczą obserwowaną aktywność komety w dużych odległościach od Słońca, bowiem temperatura sublimacji suchego lodu jest dużo niższa niż lodu wodnego.

Do ciekawych wniosków doprowadziło odkrycie strumieni cyjanowych (CN) w głowie komety Halleya. Dostrzeżenie ich korelacji z niemożliwymi do zaobserwowania z Ziemi strumieniami pyłowymi cząstek CHON, o których była wyżej mowa, wydaje się wskazywać, że źródłem rodników CN są nie tylko molekuły wydobywające się z jądra komety, lecz także nowo odkryta populacja pyłu kometarnego. Gaz cyjanowy może się tworzyć w wyniku fotolizy związków organicznych węgla i azotu zawartych w cząstkach CHON. Potwierdza to zarówno spadek zawartości C, H, O i N w cząstkach pyłu w miarę ich oddalania się od jądra, jak też stwierdzenie, że tempo produkcji rodnika CN jest większe niż molekuły HCN, która była dotychczas uważana za jego główną molekułę macierzystą.

Jak wiadomo, ultrafioletowe promieniowanie Słońca oraz wiatr słoneczny jonizują gaz w głowie komety. Jednym

z najważniejszych odkryć wykonanych za pomocą sond Vega i Giotto była identyfikacja jonów H_3O^+ , które – zgodnie z wcześniejszymi przypuszczeniami teoretycznymi – okazały się dominujące wśród jonów obszaru okołojądrowego. Spośród wielu innych jonów, których istnienie udało się wykazać, wymieńmy: H_2O^+ , OH^+ , C^+ , CH^+ , O^+ , Na^+ , C_2^+ , S^+ , Fe^+ . Szczególnie interesujące wydaje się stwierdzenie obecności bardzo wielu jonów węgla i niemal zupełnego braku jonów azotu. Warto zwrócić uwagę, że wyjątkowej obfitości jonów C^+ nie da się wytłumaczyć jedynie fotojonizacją atomów węgla pochodzących z fotodysocjacji molekuł CO, CO_2 i CH_4 . Przypuszcza się więc, że atomy węgla są również uwalniane bezpośrednio z powierzchni jądra, a także z cząstek pyłu. Jest to jeszcze jeden przyczynek do rozwiązania zagadki deficytu węgla w kometach oraz małego albedo powierzchni jądra.

Wzajemne oddziaływanie materii kometarnej z wiatrem słonecznym jest badane i opisywane metodami fizyki plazmy. Spotkanie plazmy kometarnej z plazmą wiatru słonecznego charakteryzują przede wszystkim dwie podstawowe granice okalające od strony Słońca jądro komety. Pierwszą jest fala uderzeniowa, poza którą porusza się z prędkością naddźwiękową niezakłócona plazma wiatru słonecznego. Wewnątrz drugiej, zwanej powierzchnią kontaktową lub jonopauzą i rozprzestrzeniającej się znacznie bliżej jądra niż fala uderzeniowa, znajduje się jedynie plazma kometarna. Przestrzeń między nimi wypełniona jest mieszaniną jonów kometarnych i pochodzących ze Słońca. W wyniku eksperymentów plazmowych, przeprowadzonych za pomocą sond kosmicznych, stwierdzono, że w przypadku komety Halleya słaba fala uderzeniowa, mająca postać rozmytej i silnie turbulენტnej strefy przejściowej, znajduje się w odległości około 1,1 mln km od jądra. Jonopauzę natomiast przecięła jedynie sonda Giotto podczas zbliżenia się do jądra w odległości 4700 km i oddalając się od niego w odległości 3800 km (pozostałe sondy przeleciały zbyt daleko). Dane te potwierdziły w zasadzie wcześniejsze oszacowania teoretyczne. Ponadto zostały odkryte dwie inne powierzchnie nieciągłości, nie przewidywane wcześniej: jedna zarejestrowana w odległości około 150 tys. km od jądra i druga w odległości około 350 tys. km od niego.

Wewnątrz obszaru ograniczonego falą uderzeniową wiatr słoneczny – wiejący na zewnątrz z prędkością około 400 – 500 km/s – jest stopniowo wyhamowywany, a pole magnetyczne wzmacniane. Według pomiarów magnetometru sondy Giotto maksymalne natężenie pola magnetycznego wyniosło 57 nT w odległości 16 400 km od jądra przed największym zbliżeniem się do niego i 65 nT w odległości 8200 km po minięciu jądra. Dla porównania dodajmy, że na zewnątrz fali uderzeniowej natężenie pola magnetycznego wynosi 5 – 8 nT. Ważnym odkryciem było stwierdzenie, że pole magnetyczne nie przenika przez jonopauzę i na przestrzeni warstwy przejściowej o grubości kilkuset km spada do zera. Najbliższe sąsiedztwo jądra jest więc tzw. jamą magnetyczną.

Strukturę plazmowego otoczenia komety Halleya charakteryzują nie tylko wymienione granice, ale także różne zjawiska turbulენტne i oscylacje natężenia pola magnetycznego oraz innych parametrów plazmy generowane przez jony pochodzenia kometarnego. Niektóre

kometarne cząstki neutralne mogą bowiem oddalić się od jądra na znaczne odległości, zanim zostaną przez wiatr słoneczny pochwycone i zjonizowane. Detektory sond Vega i Giotto rejestrowały te tzw. "pick-up" jony aż do odległości 10 mln km, a satelita ICE „dostrzegł” je nawet w odległości 30 mln km od jądra komety Halleya. Jony te wzbudzają w plazmie wiatru słonecznego fale o niskiej częstotliwości, które były rejestrowane przez odpowiednie analizatory do odległości kilku mln km od jądra. Występowanie fal o wyższych częstotliwościach, wywołanych niestabilnościami plazmy związanymi z tymi

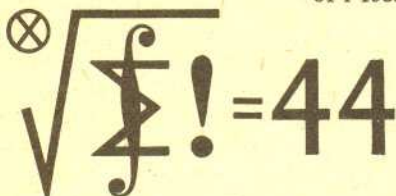
jonami, stwierdzono natomiast aż do odległości 30 mln km od jądra.

I wreszcie trzeba wspomnieć, że zarówno sondy Suisei i Sakigake, jak też i inne obiekty kosmiczne, które obserwowały komety Halleya, potwierdziły istnienie wokół niej obłoku wodorowego rozciągającego się aż do odległości mniej więcej 10 mln km od jądra. Zakończmy więc uwagę, że kometa Halleya znajdując się w pobliżu perihelium rozrasta się do rozmiarów przewyższających rozmiary samego Słońca.

Klub 44

Termin nadsyłania rozwiązań:

31 I 1989



Czołówka ligi zadaniowej „Klub 44 M”
po uwzględnieniu ocen rozwiązań
zadań 169 (WT=1,35) i 170 (WT=2,26)
z numeru 4/1988

Henryk Kasprzak	- Żary	44,91pkt
Andrzej Pawłowski	- Zabrze	44,46pkt
Krzysztof Jedziniak	- Katowice	43,60pkt
Adam Russel	- Krosna	42,55pkt
Kazimierz Serbin	- Sanok	40,12pkt
Adam Prześdziecki	- Warszawa	38,50pkt

Panu Kasprzakowi, który wchodzi do Klubu 44 z numerem 56, gratulujemy znakomitego stylu: na uzyskane 44 punkty słożyły się rozwiązania 20 zadań, wszystkie bez wyjątku opracowane bezbłędnie i elegancko, wszystkie oceny maksymalne.

Panu Pawłowskiemu gratulujemy ukończenia czwartej już czterdziestoczwartopunktowej rundy.

Liga zadaniowa Wydziału Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i Redakcji „Delfy”

Skrót regulaminu

Każdy może nadsyłać rozwiązania zadań z numeru n w terminie do końca miesiąca $n + 2$. Szkice rozwiązań zamieszczamy w numerze $n + 4$. Można nadsyłać rozwiązania czterech, trzech, dwóch lub jednego zadania (każde na oddzielnej kartce), można to robić co miesiąc lub z dowolnymi przerwami. Rozwiązania zadań z matematyki i z fizyki należy przysyłać w oddzielnych kopertach, umieszczając na kopercie dopisek: **Klub 44 M** lub **Klub 44 F**. Oceniamy zadania w skali od 0 do 1 z dokładnością do 0.1. Ocenę mnożymy przez współczynnik trudności danego zadania: $WT = 4 - 3S/N$, gdzie S oznacza sumę ocen za rozwiązania tego zadania, a N - liczbę osób, które nadesłały rozwiązanie choćby jednego zadania z danego numeru w danej konkurencji (**M** lub **F**) - i tyle punktów otrzymuje nadsyłający. Po zgromadzeniu 44 punktów, w dowolnym czasie i w którejkolwiek z dwóch konkurencji (**M** lub **F**), zostaje on członkiem Klubu 44, a nadwyżka punktów jest zaliczana do ponownego udziału. Trzykrotne członkostwo - to tytuł **Weterana**.

Szczegółowy regulamin został wydrukowany w numerze 1/1988.

Zadania z matematyki nr 179, 180

Redaguje dr Marcin E. KUCZMA

179. Wyznaczyć wszystkie pary liczb rzeczywistych $x, y \geq 0$ spełniające równanie

$$\sqrt[3]{\frac{x + \sqrt{xy} + y}{3}} = \sqrt{\frac{\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{y^2}}{2}}$$

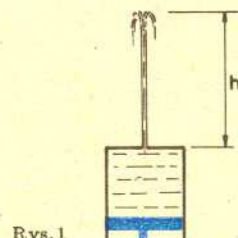
180. Figurę złożoną z trzech kwadratów jednostkowych, otrzymaną z kwadratu 2×2 przez wycięcie naroża, nazwijmy trimino. Wykazać, że szachownicę $2^n \times 2^n$, z której wycięto jedno pole, można pokryć nie zachodzącymi na siebie płytkami trimino ($n \geq 1$ jest dowolną liczbą naturalną).

Zadanie 180 zaproponował pan Werner Mnich z Opola.

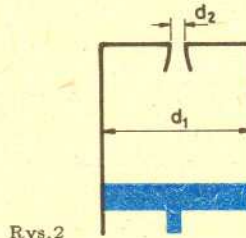
Zadania z fizyki nr 77, 78

Redaguje dr Andrzej NADOLNY

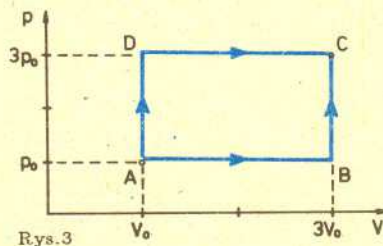
77. Obliczyć, jaką co najmniej siłą F trzeba działać na tłok strzykawki (rys.1), aby wylatujący z niej strumień wody wznosił się na wysokość $h = 5$ m? Średnica tłoka wynosi $d_1 = 30$ mm, a średnica otworu w ścianie, przez który wylatuje woda, $d_2 = 1$ mm. Czy zaopatrzenie otworu w dyszkę jak na rysunku 2 (bez zmiany średnicy wylotowej d_2) będzie miało wpływ na wartość siły F oraz na prędkość przesuwu tłoka?



Rys.1



Rys.2



Rys.3

78. Jeden kilomol jednoatomowego gazu doskonałego poddano przemianę ze stanu określonego ciśnieniem p_0 i objętością V_0 do stanu określonego parametrami $3p_0$ oraz $3V_0$ na dwa różne sposoby (rys.3):

- 1) $A \rightarrow B \rightarrow C$,
- 2) $A \rightarrow D \rightarrow C$.

Obliczyć stosunek ciepła pobranego przez gaz w obu wariantach tej przemiany.

