Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

Modelowanie sublimacji H_2O z jądra komety 46P/Wirtanen

Praca magisterska

Roman Ratajczak

Kierownik pracy: prof. dr hab. Tadeusz Michałowski

Poznań 2002

Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont permis que ce travail soit possible. Je remercie prof. Jürgen Klinger et dr. Emmanuel Desvoivres, qui ont encadré mes travaux de recherche. Merci également à l'ensemble des personnels du Laboratoire de Planétologie de Grenoble. MERCI!

Pragnę podziękować prof. Tadeuszowi Michałowskiemu za opiekę nad całością pracy. Osobne podziękowania za pomoc w trudnych chwilach i rozwiązanie licznych problemów składam na ręce dr. Tomasza Kwiatkowskiego, mgr Piotra Ligęzy, oraz mojego serdecznego przyjaciela i kolegi z roku Roberta Janickiego. Dziękuję wszystkim wykładowcom, którzy przez cztery lata studiów hartowali mój umysł i charakter, abym był gotowy do podejmowania trudnych życiowych decyzji i przezwyciężania wszelkich problemów. Specjalne podziękowania kieruję pod adresem mgr inż. Sławomira Zachciała, przyjaciela z odległych lat ławy szkolnej i podwórka, za dokonanie kilku małych „cudów" i za wszystkie straszne chwile, przez które przeszliśmy na górskich szlakach w Grenoble. Dziękuję wszystkim, bez których napisanie tej pracy byłoby niemożliwe.

„Pewnego dnia ludzie będą w stanie pokazać, w jakich rejonach komety mają swe drogi, dlaczego ich bieg jest tak odległy od innych gwiazd, jaka jest ich wielkość i konstytucja. ”

Lucjusz Anneusz Seneka

Spis treści

Wstęp **6**

1 Rys historyczny **7**
1.1 Od starożytności do współczesności 7
1.1.1 Obserwacje spektroskopowe i budowa komet 10
1.1.2 Jądro kometarne 11

2 Kometa Halleya **13**
2.1 Pierwsze misje do komet 13
2.2 Warkocze jonowe 14
2.3 Warkocz pyłowy 15
2.4 Atmosfera gazowa 15
2.5 Jądro komety Halleya 16

3 Misja Rosetta **18**
3.1 Cele misji 18

4 Model jądra komety **21**
4.1 Założenia modelu 21
4.1.1 Parametry fizyczne 22

5 Wyniki **26**
5.1 Rezultaty symulacji 26

6 Porównanie z obserwacjami **37**
6.1 Techniki obserwacyjne 37
6.2 Wyniki obserwacji i porównanie z modelem 37
6.3 Wnioski 38

7 Podsumowanie **41**

Bibliografia **43**

Spis rysunków

1.1 Kobierzec z Bayeux, XI wieczne płótno haftowane wełną ze scenami podboju Anglii przez Normanów. U góry widoczna kometa, która siedem stuleci później będzie zidentyfikowana przez E. Halleya jako okresowa i zostanie na jego cześć nazwana kometą Halleya. 8
1.2 Kometa C/1996 B2 Hyakutake 16 kwietnia 1996 (fot. U. Schmidtmann, Kreiensen, Niemcy). 9

2.1 Jądro komety Halleya, zdjęcie wykonane z pokładu sondy Giotto (ESA) 14
2.2 Model komety (C.J.Hamilton 1995) 15
2.3 Zdjęcie β-Pictoris, wykonane 3,6 m teleskopem ESO (La Silla) z widocznym dyskiem protoplanetarnym (Mouillet et al. 1997) . . . 17

3.1 Trajektoria sondy kosmicznej Rosetta (ESA) 20

4.1 Schemat dwu założonych modeli: a — jądro nierotujące; b — przybliżenie szybko rotującego jądra z osią obrotu prostopadłą do płaszczyzny orbity 22

5.1 Ewolucja energii [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra nierotującego 29
5.2 Ewolucja energii [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra szybko rotującego 29
5.3 Zależność temperatury [K] od odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra nierotującego 30
5.4 Zależność temperatury [K] od odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra szybko rotującego 30
5.5 Rozkład temperatury [K] w funkcji cosinusa kąta zenitalnego Słońca dla wybranych sześciu odległości heliocentrycznych; model jądra nierotującego 31

5.6 Rozkład temperatury [K] w funkcji cosinusa kąta zenitalnego Słońca dla wybranych sześciu odległości heliocentrycznych; model jądra szybko rotującego 31
5.7 Produkcja cząsteczek wody w jednej sekundzie z powierzchni 1 m^2 jako funkcja odległości heliocentrycznej [j.a.] dla trzech szerokości kometograficznych; model nierotującego jądra 32
5.8 Produkcja cząsteczek wody w jednej sekundzie z powierzchni 1 m^2 jako funkcja odległości heliocentrycznej [j.a.] dla trzech szerokości kometograficznych; model jądra szybko rotującego 32
5.9 Bilans energetyczny [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji temperatury [K] dla punktu odsłonecznego; model jądra nierotującego 33
5.10 Bilans energetyczny [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji temperatury [K] dla punktu odsłonecznego; model jądra szybko rotującego 33
5.11 Bilans energetyczny [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji temperatury [K] dla $z = 45°$; model jądra nierotującego 34
5.12 Bilans energetyczny [$W \cdot m^{-2}$] w funkcji temperatury [K] dla $z = 45°$; model jądra szybko rotującego 34
5.13 Ewolucja poszczególnych członów bilansu energetycznego i ich sumy [W] w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla całego jądra; model jądra nierotującego 35
5.14 Ewolucja poszczególnych członów bilansu energetycznego i ich sumy [W] w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla całego jądra; model jądra szybko rotującego 35
5.15 Bilans energii [W] dla całej powierzchni, w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] — porównanie rozważanych modeli 36
5.16 Całkowite tempo produkcji cząsteczek wody w ciągu jednej sekundy w zależności od odległości heliocentrycznej [j.a.] — porównanie 36

6.1 Symulacja aktywności komety w cząsteczkach na sekundę jako funkcja odległości heliocentrycznej [j. a.] dla jądra o promieniu R=1000 m i porównanie z rozważanym modelem 40

Wstęp

Obecnie uznaje sie jądra komet za jedne z najstarszych ciał Układu Słonecznego. Obserwacje wskazują, że ich rozmiary są rzędu kilku kilometrów, a masy rzędu 10^{10} do 10^{16} kg. Niewielka masa i znaczna odległość od Słońca podczas procesu formowania wskazują, iż komety są zbudowane z niezmienionej, prymitywnej materii protoplanetarnej. Podczas zbliżania do Słońca kometa wytwarza gazowo-pyłową otoczkę, która uniemożliwia bezpośrednią obserwację i badanie jądra z powierzchni Ziemi.

Najlepiej dotychczas zbadaną kometą jest kometa Halleya, w pobliże której wysłano liczne sondy kosmiczne w 1986 roku. Rezultaty tych misji pozwoliły lepiej zrozumieć zjawisko kometarne, ale jednocześnie pojawiło się wiele nowych, otwartych problemów.

Kometa 46P/Wirtanen jest celem sondy Rosetta, przygotowanej przez Europejską Agencję Kosmiczną. Założeniem misji jest dotarcie do komety, wejście na orbitę okołokometarną i lądowanie próbnika na powierzchni jądra. Planowane są liczne eksperymenty na orbicie i powierzchni komety począwszy od odległości 4 j.a. od Słońca, aż do peryhelium (1.06 j.a.).

W kontekście przyszłej misji Rosetta, interesującym jest przybliżenie warunków panujących w pobliżu jądra komety i na jego powierzchni.

Głównym celem tej pracy jest oszacowanie temperatury i produkcji cząsteczek wody (Q_{H_2O}) na powierzchni komety oraz porównanie z obserwacjami dla dwóch przyjętych modeli:

- model jądra nierotującego
- model szybko rotującego jądra, z osią obrotu prostopadłą do płaszczyzny orbity.

Obliczenia obejmują pół orbity komety, począwszy od aphelium (5.13 j.a.) do peryhelium (1.06 j.a.). Dodatkowo przeprowadzono symulację i oszacowano wielkość produkcji cząsteczek wody dla dwukrotnie zwiększonego promienia jądra komety. Obliczenia numeryczne i opracowanie modelu zostało wykonane i zaprezentowane podczas stażu odbytego w Laboratorium Planetologii w Grenoble, pod kierunkiem prof. Jürgena Klingera i dr. Emmanuela Desvoivres.

Rozdział 1

Rys historyczny

1.1 Od starożytności do współczesności

Komety od tysięcy lat przyciągały uwagę, fascynowały, zachwycały i przerażały ludzi. Nieprzewidziane pojawienie „gwiazdy z warkoczem”, kontrastującej z dobrze znanym nocnym niebem było uważane za zapowiedź przyszłych nieszczęść i wzbudzało strach. W czasach, gdy wojny, głód i epidemie były powszechne i częste, łatwo było powiązać pojawienie się komety z przyszłymi klęskami.

Najwcześniejsze udokumentowane obserwacje komety pochodzą z X wieku p.n.e. z Chin. Astronomowie chińscy skrupulatnie notowali wszelkie rzadkie zjawiska, jak kometa, czy supernowa. Przejścia komet przez konstelacje były odnotowywane z dość dużą dokładnością, a poszczególne „gwiazdy-miotły” zostały nawet sklasyfikowane. To właśnie Chińczycy jako pierwsi zauważyli, że warkocze komet mają kierunek odsłoneczny. Powodem pilności astronomów chińskich w obserwowaniu komet była astrologia i poszczególnym ich typom przypisywano odpowiedzialność za różnorodne nieszczęścia.

W tym samym okresie astronomowie babilońscy prowadzili również obserwacje komet, a nieliczne ich ślady w postaci glinianych tablic zapisanych pismem klinowym przetrwały do dziś.

Pierwsze poglądy na temat natury komet i ich pochodzenia wywodzą się ze starożytnej filozofii greckiej i rzymskiej. Najgłębszy wpływ na starożytne postrzeganie komet mieli Arystoteles (384 – 322 p.n.e.), Hippokrates (ok. 640 – 377 p.n.e.) i Seneka (ok. 4 p.n.e. – 65 n.e.). Arystoteles uważał komety za zjawiska ziemskie, ponieważ ich nieprzewidziane pojawienie przeciwstawiało się doskonałemu porządkowi ruchu pozostałych ciał na sferze niebieskiej. Według niego były to suche, ciepłe ziemskie wyziewy, które zapalały się na granicy czwartej — ognistej sfery na skutek tarcia i jako komety („gwiazdy z frędzlami”) były niesione wokół Ziemi przez kołowy ruch w piątej sferze. Nie wszyscy greccy filozofowie podzielali jego poglądy. Hippokrates uważał, że komety nie posiadają

Rysunek 1.1: Kobierzec z Bayeux, XI wieczne płótno haftowane wełną ze scenami podboju Anglii przez Normanów. U góry widoczna kometa, która siedem stuleci później będzie zidentyfikowana przez E. Halleya jako okresowa i zostanie na jego cześć nazwana kometą Halleya.

warkocza, a był on widoczny tylko gdy czyjeś spojrzenie odbijało się od wilgoci i trafiało do Słońca. Warkocz mógł być zatem obserwowany tylko na północy, bądź południu, gdyż w tropikach Słońce wysusza wilgoć i warkocz nie może się tworzyć. Później Seneka w swoich *Naturales quaestiones* wyraził pogląd, że komety należą do trwałych tworów przyrody, poruszających się jednostajnie po zamkniętych orbitach, znikając dopiero po przekroczeniu sfery planet. Odrzucił on koncepcje Arystotelesa o ziemskim pochodzeniu komet, argumentując, że gdyby były one zjawiskami atmosferycznymi, to ich pojawienie, wygląd i ruch byłyby zależne od warunków meteorologicznych, w szczególności od wiatru, co było sprzeczne z obserwacjami. Pomimo mocnych argumentów, poglądy Seneki zostały odrzucone i przez całą najtrudniejszą epokę dla rozwoju nauki, jaką było średniowiecze, obowiązującymi stały się poglądy Arystotelesa.

W średniowieczu zabobony dotyczące komet osiągnęły apogeum. Każde pojawienie komety było związane z wielkimi wydarzeniami epoki. Komety zapowiadały wielkie bitwy lub wojny, zwiastowały rozmaite nieszczęścia, w zależności od obszaru nieba, w którym się pojawiały. Często pojawienie komety było powiązane z odejściem wielkiego monarchy lub wodza. Starożytny empiryzm w średniowieczu ustąpił miejsca arystotelesowskim dogmatom, które zostały przejęte przez Kościół chrześcijański i stały się obowiązującymi. W zdecydowanej większości wszelkie rozważania na temat komet dotyczyły ich znaczenia a nie natury (Rys. 1.1).

Wraz z postępem nauki i udoskonalaniem przyrządów pomiarowych starano się rozstrzygnąć spór o naturze komet. Częściowe rozwiązanie problemu natury

Rysunek 1.2: Kometa C/1996 B2 Hyakutake 16 kwietnia 1996 (fot. U. Schmidtmann, Kreiensen, Niemcy).

komet nastąpiło dopiero pod koniec XVI wieku. W roku 1577 Tycho Brahe, Michael Mästlin, Thaddaeus Hagecius i Cornelius Gemma wyznaczyli odległość do komety na podstawie paralaksy, stwierdzając, że znajduje się ona dalej niż Księżyc. Jednak problem ruchu komet i ich fizycznej natury wciąż pozostawał nierozstrzygnięty.

Rozwiązanie problemu ruchu komet nastąpiło dopiero ponad 100 lat później. Jako pierwszy, swoje przekonanie, że komety z roku 1680 i 1681 są tym samym ciałem przed i po przejściu przez peryhelium, wyraził Georg Dörffel. Zagadkę dynamiki komet rozwiązał Izaak Newton, który przy pomocy dokładnych obserwacji dostarczonych przez Johna Flamsteeda wykazał paraboliczny ruch komety z 1680 roku na podstawie opracowanej przez siebie metody wyznaczania orbity z trzech obserwacji. Wkrótce potem, na podstawie metody Newtona, Edmond Halley obliczył orbity 24 komet, identyfikując komety z lat 1531, 1607 i 1682 jako ten sam obiekt. Halley przepowiedział powrót komety w końcu 1758 lub na początku 1759 roku. Wraz ze zbliżaniem się zapowiedzianej przez Halleya daty powrotu komety rozpoczął się wyścig, w którym najtęższe umysły matematyczne epoki starały się obliczyć dokładną orbitę komety i przewidzieć datę przejścia przez peryhelium. Clairaut, Lalande i Nicole-Reine Etable de la Bière biorąc pod uwagę perturbacje od Jowisza i Saturna obliczyli powrót komety z 33 dniowym błędem i ogłosili wyniki pracy na 6 tygodni przed ponownym odkryciem komety Halleya. W wieczór Bożego Narodzenia 1758 roku niemiecki miłośnik astronomii Johann Georg Palitzsch jako pierwszy odnalazł kometę w gwiazdozbiorze Ryb.

Pod koniec XVIII wieku wielu badaczy pracowało nad prostszymi metodami wyznaczania orbit komet, a zarazem trwały poszukiwania drugiej komety okresowej. Wiele komet zostało błędnie uznanych za okresowe, a jednocześnie kilka komet okresowych nie zostało rozpoznanych. Rozwinęła się nowa dziedzina na-

uki — mechanika nieba a komety zostały uznane trwałymi ciałami niebieskimi.

Kolejne stulecie przyniosło kilka ważnych odkryć dotyczących fizyki komet. Dokładne studia dynamiki komety Enckego wykazały, iż wielkość orbity i okres obiegu zmniejszają się z czasem. Część badaczy opowiedziała się za hipotezą oporu ośrodka, który przeciwdziałał ruchowi komety, inni przypisali to siłom odrzutowym strug materii wyrzucanych z głowy komety. Dwa kolejne ważne odkrycia były związane z kometą Bieli. W roku 1846 zaobserwowano jej rozpad na dwie części, a w 1852 podwójna kometa Bieli ukazała się po raz ostatni. Gdy w 1872 roku Ziemia przeszła bardzo blisko orbity nieistniejącej już komety, zaobserwowano deszcz meteorów, co ukazało wyraźny związek między resztkami komet a rojami meteorów i uświadomiło astronomom niebieskie pochodzenie meteorów.

Ważnym krokiem w astronomii dziewiętnastowiecznej było zastosowanie fotografii oraz uzyskanie pierwszych widm, które pozwalały stwierdzić, że komety częściowo świecą odbitym światłem słonecznym, a część światła powstaje w samej komecie. Na dokładne zrozumienie złożonej struktury i identyfikacji różnych pasm widmowych trzeba było jednak poczekać aż do końca lat dwudziestych XX wieku, kiedy to rozwinęła się mechanika kwantowa.

1.1.1 Obserwacje spektroskopowe i budowa komet

Spektroskopia jest bardzo ważną dziedziną w badaniu składu chemicznego warkoczy komet. Widma komet pozwalają na określenie składu chemicznego a nawet rozmiarów cząsteczek warkocza. Identyfikacja widma jest jednak bardzo skomplikowana, gdyż wymaga rozdzielenia licznych linii emisyjnych pochodzących od cząsteczek, atomów i jonów. Obecność jonów jest wynikiem fotodysocjacji macierzystych molekuł pod wpływem słonecznego promieniowania ultrafioletowego. Widmo komety zależy również od dopplerowskiego przesunięcia pola wzbudzającego promieniowania słonecznego. Zjawisko to jest nazywane efektem Swingsa i polega na tym, że natężenie poszczególnych linii kometarnego pasma widmowego zależy od ich położenia względem silnych słonecznych linii emisyjnych lub absorpcyjnych. Zatem rozkład natężeń jest różny u różnych komet, a nawet dla tej samej komety zmienia się w zależności od miejsca na orbicie.

Obserwacje widm kometarnych były prowadzone już w XIX wieku, jednak właściwa ich analiza mogła być przeprowadzona dopiero w latach 30-tych XX stulecia. Jeszcze przed rokiem 1950 odkryto linie widmowe cząsteczek takich jak: $C_2, CN, CH, OH, NH, NH_2$. Swings przypuszczał, że są to pochodne wody, amoniaku, metanu, azotu, tlenku i dwutlenku węgla, które występują w postaci lodu, gdy kometa jest daleko od Słońca.

Atmosfera ziemska nierównomiernie przepuszcza promieniowanie elektromagnetyczne. Dlatego pierwsze obserwacje widm w części ultafioletowej zostały wykonane dopiero w 1965 roku z pokładów rakiet (kometa C/1965 S1 Ikeya-

Seki). Pierwsze obserwacje z pokładu satelity OAO-2 wykazały, że w widmie komety C/1969 T1 Tago-Sato-Kosaka dominują linie wodoru Lyman-α. Okazało się, że kometę otacza wodorowe halo rozciągające się na miliony kilometrów, które jest wynikiem fotodysocjacji cząsteczek wody.

Obserwacje widma w części podczerwonej są utrudnione z dwóch powodów: po pierwsze — maksimum emisji przypada na średnią podczerwień, dla której atmosfera jest nieprzeźroczysta, po drugie — maksimum promieniowania instrumentów przypada na ten sam przedział. Pierwsze obserwacje, podobnie jak w części ultrafioletowej zostały wykonane podczas przejścia komety C/1965 S1 Ikeya-Seki. Kilka grup obserwatorów stwierdziło występowanie linii neutralnego żelaza, niklu, potasu, chromu, manganu, wanadu, kobaltu, miedzi oraz wapnia. Z późniejszych analiz jasności powierzchniowej oszacowano wielkość cząstek pyłu kometarnego na około 0.1 mikrometra. Analiza widma komety 1970 II Bennett w podczerwieni pozwoliła odkryć otoczkę z pyłu krzemowego o średnicy ziaren ok. 10 mikrometrów. Później podczas przejścia komety Halleya, analizując podczerwoną część widma, stwierdzono w jej atmosferze obecność cząsteczek wody i innych związków organicznych.

Pierwsze radiowe obserwacje komety (C/1973 E1 Kohoutek) zostały przeprowadzone w latach 1973, 1974. Na ich podstawie stwierdzono w komie obecność takich związków jak: cyjanek metylu, cyjanowodór, amoniak i rodnik OH.

W widmie komety C/1996 B2 Hayakutake zostało wykryte wysokoenergetyczne promieniowanie X, jednak mechanizm jego powstawania nie został zadowalająco wyjaśniony.

1.1.2 Jądro kometarne

W XIX wieku na ogół uważano, że głowa komety jest zwartym ciałem. Zjawisko powstawania warkoczy próbował wyjaśnić Pierre-Simon de Laplace twierdząc, że zmrożona materia komety w sąsiedztwie Słońca zaczyna sie topić a następnie paruje tworzac gazową atmosferę. Po odkryciu związku komet z rojami meteorów pojawił się model komety-roju małych cząstek poruszających się po stałej orbicie.

W latach 1950, 1951 Fred Whipple opublikował dwie prace, w których zaproponował uznawany obecnie model jądra komety. Założył on, że jądro jest pojedynczym, zwartym ciałem o rozmiarach kilku kilometrów, złożonym z różnych rodzajów lodu zmieszanego z pyłem. Podczas zbliżania do Słońca lód zaczyna sublimować tworząc jonowy warkocz komety odpychany przez wiatr słoneczny, a cząstki pyłu odpychane przez ciśnienie promieniowania tworzą warkocz pyłowy. Rodzaje lodu, jakie Whipple brał pod uwagę, to: H_2O, CH_4, NH_3, CO_2 i HCN. Whipple wprowadził swój model, aby wyjaśnić obserwowane efekty niegrawitacyjne w ruchu komety Enckego, oraz obecność zaobserwowanych w widmie związków.

Jądro komety jest niedostępne dla bezpośrednich obserwacji z powierzchni Ziemi z powodu otaczającej je materii. Z drugiej strony, w dużej odległości od Słońca jest za małe i zbyt słabe aby można je obserwować. Radioastronomia nie pozwala na uzyskanie zadowalającej dokładności w wyznaczeniu rozmiarów jądra ze względu na zależność powracającego sygnału od odległości geocentrycznej. Sygnał powracający jest bardzo słaby i jądro może być wykryte tylko na niewielkich odległościach geocentrycznych. Z tych powodów parametry fizyczne jądra, jak masa i gęstość, nie są dobrze znane. Masę można wyznaczyć przez obliczenie sił niegrawitacyjnych w ruchu komety. Odgazowywanie jądra komety jest znaczące po stronie odsłonecznej, co w rezultacie powoduje reakcję siły skierowaną przeciwnie do Słońca. Siła ta, choć nieznaczna, wystarczy aby zaburzyć ruch jądra na orbicie okołosłonecznej na skalę od kilku tygodni do kilku miesięcy.

Rozdział 2

Kometa Halleya

2.1 Pierwsze misje do komet

Wiedza o jądrze komety jest bardzo ograniczona. Wszelkie naziemne techniki obserwacji pozwalają na przybliżone wyznaczanie składu chemicznego atmosfery komety i szacowanie wielkości ziaren pyłu kometarnego. Wielkości tworzące fizyczny model jądra, jak: gęstość, kształt, struktura warstwy powierzchniowej, stosunek masy pyłu do masy lodu, aktywność powierzchni czy albedo, można co najwyżej przybliżać przez dopasowanie wyników obserwacji do założonego modelu.

Historyczny krok w badaniu komet został dokonany, gdy w 1985 roku pierwsza sonda kosmiczna — ICE (International Cometary Explorer) — przecięła warkocz plazmowy komety 21P/Giacobinni-Zinner w odległości 7800 km od jądra. Zbliżenie to było zapowiedzią przyszłych misji do komety Halleya w 1986 roku, która została wybrana jako cel dla sześciu statków kosmicznych wyposażonych w różnego rodzaju przyrządy pomiarowe. Przygotowania do tych misji trwały już od dłuższego czasu, a wybór padł na kometę Halleya, gdyż jest bardzo aktywna i ma bardzo dokładnie wyznaczoną orbitę.

Oczekiwanie na kolejny powrót komety przemieniło sie w rywalizację o pierszeństwo odkrycia. Pierwsze próby odnalezienia komety podjęto już w 1977 roku. Opracowywano efemerydy dla komety, starając się jak najdokładniej uwzględnić wszelkie zaburzenia. Wynikiem tych starań był niemal dokładnie przewidziany moment przejścia komety przez peryhelium. Kilka grup badaczy niezależnie obliczyło czas przejścia z błędem kilku godzin. Korzystając z dokładnej efemerydy, David Jewitt i Edward Danielson odkryli kometę 16 października 1982 roku w odległości 8 sekund kątowych od przewidzianej pozycji.

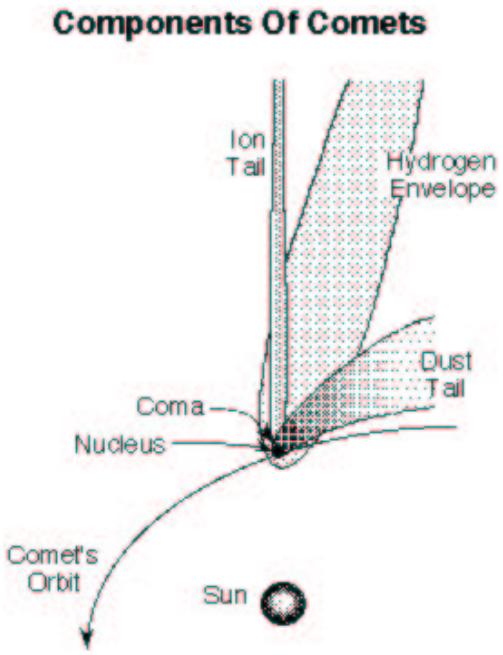
6 i 9 marca 1986 roku radzieckie sondy Wega 1 i Wega 2 minęły jądro komety Halleya w odległości odpowiednio 8890 i 8030 km. Dwie japońskie sondy Suisei i Sakigake przeleciały 8 i 11 marca w odległości 151000 i 7 mln km. Jako ostatnia

Rysunek 2.1: Jądro komety Halleya, zdjęcie wykonane z pokładu sondy Giotto (ESA)

jądro komety Halleya minęła sonda Europejskiej Agencji Kosmicznej. Dnia 14 marca sonda Giotto zbliżyła się do komety Halleya na odległość 596 kilometrów, uzyskując efektowne obrazy jądra komety (Rys. 2.1). Ponadto, na całym świecie zorganizowano kampanię obserwacyjną, w której wzięło udział ponad 1000 astronomów i prawie 1200 miłośników astronomii w okresie widoczności komety od 1982 do 1989 roku. Dokonano również wielu obserwacji z pokładów okołoziemskich satelitów, satelity krążącego wokół Wenus i wystrzeliwanych rakiet.

2.2 Warkocze jonowe

Detektory plazmy umieszczone na pokładach sond już w odległości 8 milionów kilometrów od jądra wykryły jony odmienne od występujących w wietrze słonecznym. Bliżej jądra napotkano znacznie wolniejsze i cięższe naładowane cząstki komety, unoszone z wiatrem słonecznym w kierunku od Słońca. W odległości 1.1 miliona kilometrów sondy wykryły front fali uderzeniowej, w którym strumień wiatru słonecznego stawał się bardziej turbulentny. Końcową barierą dla wiatru słonecznego z wmrożonym weń słonecznym polem magnetycznym była tzw. jonopauza — strefa, poza którą gęstsze cząsteczki i jony komety blokują mniej gęsty wiatr słoneczny. Podczas aktywności komety w latach 1985–86 zaobserwowano co najmniej 20 zjawisk odłączenia warkoczy plazmowych. Zjawisko to tłumaczy się zmianami biegunowości pola magnetycznego Słońca.



Rysunek 2.2: Model komety (C.J.Hamilton 1995)

2.3 Warkocz pyłowy

Badania ziaren pyłu otaczającego jądro komety Halleya pozwoliły wyróżnić dwie grupy cząstek:

- frakcja lżejsza, tzw. cząstki $CHON$, składające się głównie z węgla, wodoru, tlenu i azotu, traktowane jako przejściowe między ciężkimi cząsteczkami a małymi ziarnami pyłu (do 10^{-16}g)
- frakcja kamienna — ziarna krzemianowe bogate w krzem, magnez i żelazo, do wielkości około 1 cm i masie do 0.17 g.

Analiza zgromadzonych danych wykazała, iż jądra wielu ziaren krzemowych pokrywa płaszcz materii organicznej podobnej do $CHON$.

2.4 Atmosfera gazowa

Największym obłokiem gazu był sięgający 10 milionów kilometrów obłok neutralnego wodoru. Został on zaobserwowany przez spektrometry pracujące w ultrafiolecie, m.in. przez kilka rakiet, liczne satelity Ziemi i japońską sondę Suisei. Na podstawie obserwacji wodoru można oszacować wielkość emisji cząsteczek

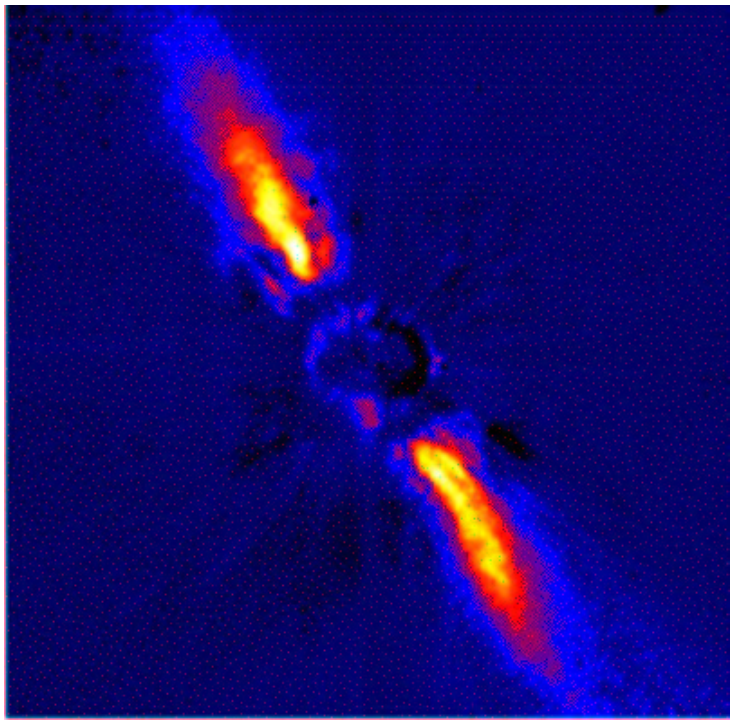
wody sublimujących z jądra komety. Tempo sublimacji cząsteczek wody jest najlepszym wskaźnikiem aktywności jądra, gdyż para wodna stanowi około 80% całkowitej ilości gazu uwalnianego w okresie widoczności komety. Prowadzono również liczne obserwacje rodnika OH w ultrafiolecie, zakresie widzialnym i radiowym z satelitów, rakiet i z obserwatoriów naziemnych. Radzieckie sondy dokonały bezpośrednich obserwacji cząsteczek wody w podczerwieni, z których oszacowano produkcję pary wodnej na 80% produkcji wszystkich gazów. Kolejnym gazem pod względem ilości, zaobserwowanym w podczerwieni, był tlenek węgla. Tempo jego produkcji zostało oszacowane na 10–20% tempa produkcji pary wodnej. Wzrost produkcji tlenku węgla został odnotowany niespodziewanie w większych odległościach od jądra. Naukowcy przypisali to istnieniu wtórnego źródła tych cząstek w samej komie — rozpadającym sie cząstkom $CHON$. Potwierdzeniem tej tezy były obserwacje strug gazu CN i C_2 w wewnętrznej części komy. Kolejne cząsteczki, choć nie zaobserwowane bezpośrednio, ale wynikające z danych jonowego spektrometru masowego, to amoniak NH_3 i metan CH_4. Innym zaobserwowanym związkiem był kwas cyjanowodorowy HCN, oraz cząsteczki formaldehydu H_2CO. Prawdopodobnie macierzyste cząstki pochodzące z jądra są źródłem wszystkich atomów, jonów i cząsteczek zidentyfikowanych w widmie komety Halleya. Tempo produkcji gazów wynosiło około $1.3 \cdot 10^{30}$ cząsteczek na sekundę, z czego około 78% to woda.

2.5 Jądro komety Halleya

Najlepsze zdjęcia komety Halleya zostały wykonane przez sondę Giotto. Ze złożonej mozaiki wykonanych fotografii, po komputerowej obróbce, oceniono kształt jądra jako wydłużony, o wymiarach 15×8×8 kilometrów, a albedo na 0.04. Uzyskane obrazy pozwoliły odróżnić duży, płytki krater i wzgórze, a niejednostajna linia terminatora ujawniła nieregularności powierzchni. Aktywność wykazywało tylko około 10% powierzchni jądra. Początkowo okres obrotu jądra, oszacowany ze zmian jasności obłoku wodoru, oceniono na 2.2 doby, jednak po dokładniejszej analizie wartość zmieniono na 7.4 doby.

Misje do komety Halleya dostarczając wielu ważnych informacji jednocześnie potwierdziły model zaproponowany w 1950 roku przez Freda Whipple'a. Obecnie zakłada sie, że komety powstawały z pierwotnej materii dysku protoplanetarnego podczas formowania się Układu Słonecznego, w zewnętrznej jego części — około 25–100 j.a. od Słońca. Następnie perturbacje grawitacyjne od Urana i Neptuna zwiększyły ich orbity, usuwając na bardzo duże odległości heliocentryczne. Miejsce formowania i masy komet wskazują, że pierwotny materiał, z którego zostały utworzone nie został znacząco zmieniony w procesach chemicznych i grawitacyjnych. Dokładne badanie komet może zatem dostarczyć wielu informacji o

warunkach panujących we wczesnym stadium formowania naszego układu i jego ewolucji. Model ten uwiarygadniają obserwacje dysków protoplanetarnych wokół młodych gwiazd (Rys. 2.3). W najbliższej przyszłości planuje się kolejne misje do komet, m. in. misja Europejskiej Agencji Kosmicznej do komety 46P/Wirtanen.



Rysunek 2.3: Zdjęcie β-Pictoris, wykonane 3,6 m teleskopem ESO (La Silla) z widocznym dyskiem protoplanetarnym (Mouillet et al. 1997)

Rozdział 3

Misja Rosetta

3.1 Cele misji

Okresowa kometa 46P/Wirtanen została odkryta 15 stycznia 1948 roku przez Carla A. Wirtanena na kliszy fotograficznej jako obiekt siedemnastej wielkości gwiazdowej, o orbicie typowej dla komet z rodziny Jowisza. Dwa zbliżenia z Jowiszem w 1972 i 1984 zmniejszyły odległość peryhelium z 1.61 j.a. do 1.26, a następnie do 1.08 j.a. W rezultacie kometa stała się dostępna dla wielu obserwatorów podczas przejść przez peryhelium w latach 1986 i 1991. Obecnie odległość peryhelium wynosi 1.06 j.a., a okres obiegu 5.64 lat.

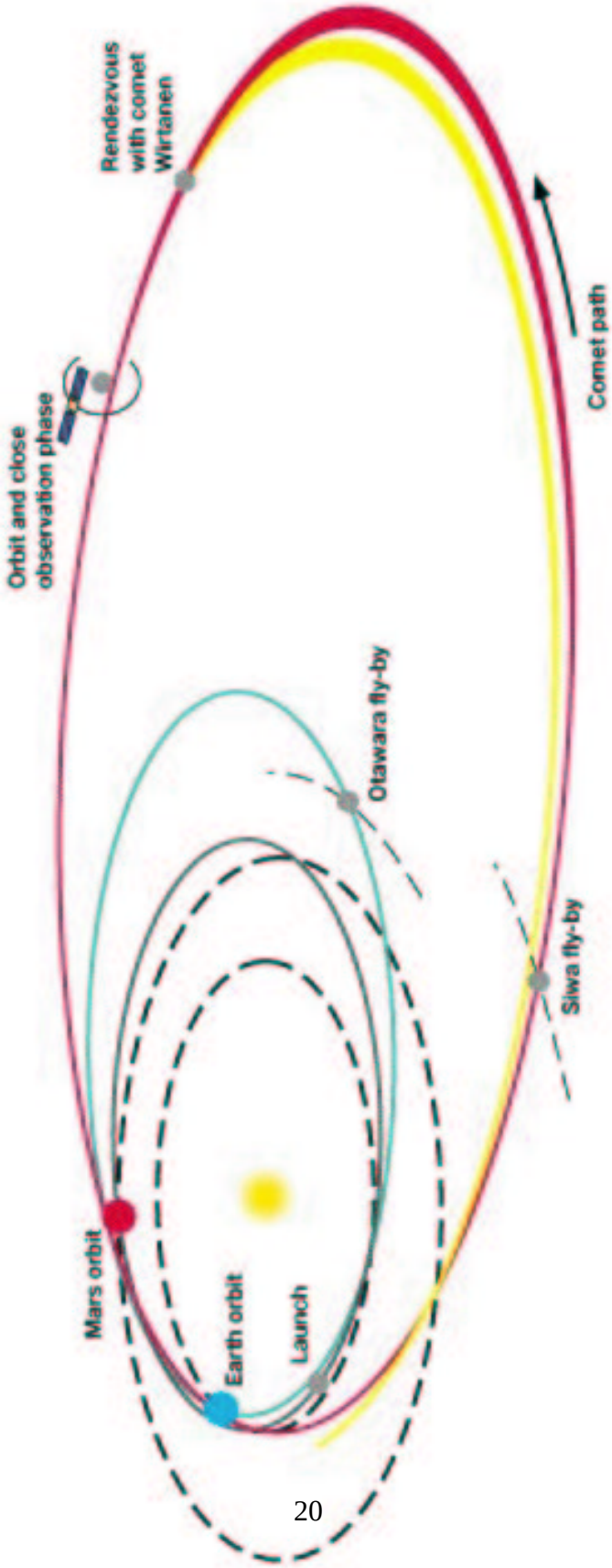
Kometa 46P/Wirtanen jest celem misji kosmicznej Rosetta. Głównym zadaniem misji organizowanej przez Europejską Agencję Kosmiczną jest lądowanie na powierzchni jądra. Start sondy planowany jest na styczeń 2003. Satelita osiągnie cel w 2011 roku wchodząc na orbitę okołokometarną, następnie w roku 2012 planowane jest lądowanie na powierzchni komety. Misja zakończy się w lipcu 2013. Jej zadaniem jest przeprowadzenie serii eksperymentów na orbicie i powierzchni komety.

1. Eksperymenty orbitalne
   Podczas zbliżania do komety przeprowadzone zostaną doświadczenia określające wybór najlepszej orbity. Po jej osiągnięciu Rosetta wykona mapę topografii powierzchni komety, niezbędną do wyboru przybliżonego miejsca lądowania próbnika. Mapa jest również potrzebna przy określaniu orbity wolnej od śmieci, pyłu i strumieni wypływającego gazu. Następnie planowane jest wysłanie lądownika. Kolejne doświadczenia mają na celu analizę składu atmosfery komety. Podczas każdego okrążenia sonda będzie przecinać warkocz jonowy i pyłowy komety, badając efekt wiatru słonecznego i skład pyłów kometarnych.

2. Eksperymenty powierzchniowe

> Po lądowaniu próbnika RoLand na powierzchni komety planowane są eksperymenty nad składem chemicznym i fizyczną charkterystyką powierzchni oraz ich zmiennością w czasie. Badana będzie temperatura, przewodnictwo cieplne i elektryczne oraz sejsmiczne i akustyczne właściwości powierzchni. Zaplanowano również eksperymenty związane z określeniem składu chemicznego pod powierzchnią — na głębokości 0.2 metra, badania struktury cząsteczkowej, mineralogicznej i morfologii materiału kometarnego.

Dodatkowo, do programu misji Rosetta włączono bliski przelot obok dwu planetoid. Pierwszym celem podczas ośmioletniego lotu będzie manewr przyspieszający przy grawitacyjnej asyście Marsa. Sonda, przy wykorzystaniu pola grawitacyjnego planety zostanie przyspieszona i skierowana w pobliże Ziemi, gdzie kolejna asysta grawitacyjna skieruje ją w stronę planetoidy 4979 Otawara. Po wykonaniu zdjęć przy dużym zbliżeniu, trajektoria statku zostanie skorygowana tak, aby wrócił w pobliże Ziemi, gdzie kolejna asysta grawitacyjna skieruje go na właściwą orbitę. Podczas lotu w kierunku komety nastąpi zbliżenie z planetoidą 140 Siwa. Po wykonaniu serii zdjęć planetoidy sonda osiągnie kometę 46P/Wirtanen w odległości 4 j.a. od Słońca i 2.6 j.a. od Ziemi (Rys. 3.1).



Rysunek 3.1: Trajektoria sondy kosmicznej Rosetta (ESA)

Rozdział 4

Model jądra komety

4.1 Założenia modelu

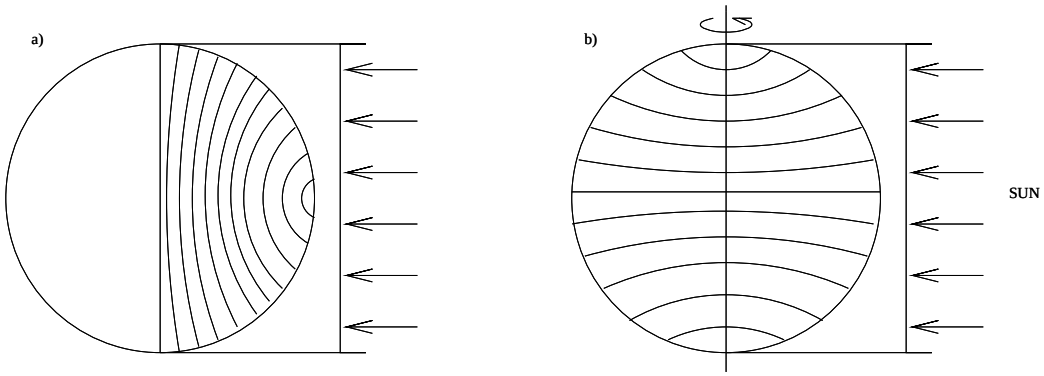
W kontekście misji Rosetta interesujące jest przybliżenie warunków panujących na powierzchni komety i w najbliższym otoczeniu. W tym celu został napisany program, obliczający na podstawie bilansu energetycznego produkcję cząsteczek wody i temperaturę warstwy powierzchniowej dla dwóch założonych modeli. Opracowane modele jąder kometarnych oparte są na wielu upraszczających założeniach, które zostały wymuszone słabą znajomością rzeczywistych parametrów.

Przyjęte do obliczeń modele zakładają sferyczny kształt jądra składającego się z lodu wodnego. Temperaturę i sublimację cząsteczek wody obliczono jako funkcję odległości heliocentrycznej i kąta zenitalnego Słońca, używając dwóch tzw. jednowymiarowych modeli (jednowymiarowość oznacza tu, że całkowanie równań odbywa się tylko po jednej zmiennej — w obu rozpatrywanych przypadkach jest to szerokość kometograficzna):

- sferyczny model jądra nierotującego, którego powierzchnia odsłoneczna (półsfera) podzielona została na 90 pierścieni — położenie pierścieni odpowiada dziewięćdziesięciu różnym kątom zenitalnym Słońca

- przybliżenie sferycznego, szybko rotującego jądra, z osią obrotu prostopadłą do płaszczyzny orbity; powierzchnia jest opisana przez 90 północnych i 90 południowych szerokości kometograficznych, a strumień energii słonecznej padający na powierzchnię jądra w jednostce czasu został uśredniony na całą sferę.

Dla każdej odległości heliocentrycznej całkowita ilość sublimujących cząsteczek wody jest obliczana jako suma lokalnej produkcji dla wszystkich elementów na powierzchni. Rozkład tych elementów przedstawia Rys. 4.1.



Rysunek 4.1: Schemat dwu założonych modeli: a — jądro nierotujące; b — przybliżenie szybko rotującego jądra z osią obrotu prostopadłą do płaszczyzny orbity

Model nie uwzględnia erozji powierzchniowej, która jest wynikiem sublimacji oraz procesu odczepiania się ziaren materiału kometarnego. Efekt ten jest zależny od szerokości kometograficznej, gdyż większe szerokości otrzymują mniejszy strumień energii. Asymetria ta może zmienić kształt jądra po kilku obiegach komety.

Obserwacje wskazują, że lód wodny stanowi około 80% masy jądra, zatem założenie jednorodnego składu chemicznego nie wprowadza dużego błędu w szacowaniu ilości sublimujących cząsteczek. Większym przybliżeniem jest założenie aktywności całej powierzchni jądra. W rozpartywanych przypadkach strumień energii słonecznej jest równy zero na biegunach i tylko najbliższe ich okolice (obszary od ok. $85°$ szerokości) uznane są za nieaktywne.

4.1.1 Parametry fizyczne

Bilans energetyczny

Temperatura na powierzchni komety jest obliczana na podstawie bilansu energetycznego (Delsemme 1982):

$$\frac{S(1-al)}{r_h^2}\cos z = \epsilon\sigma T^4 + L^S_{H_2O}\cdot Z_{H_20} \tag{4.1}$$

gdzie:

- S — stała słoneczna (1388 $J\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}$)
- r_h — odległość heliocentryczna
- al — albedo

- T — temperatura powierzchni
- ϵ — zdolność emisyjna
- σ — stała Stefana
- z — kąt zenitalny Słońca
- Z_{H_20} — tempo sublimacji, czynnik określający ubytek materii na jednostkę powierzchni w jednostce czasu
- $L^S_{H_2O}$ — ciepło właściwe sublimacji lodu.

Bilans uwzględnia emisję promieniowania termicznego powierzchni, jak również energię absorbowaną w procesie sublimacji. W równaniu zostało pominięte przewodnictwo cieplne i zmiana entalpii, gdyż wkład tych wielkości do bilansu energii jest niewielki.

Tempo sublimacji dane jest równaniem (Delsemme 1982):

$$Z_{H_20} = \frac{1}{1+\frac{1}{\kappa}}\theta \cdot P^S_{H_2O}\sqrt{\frac{m_{H_2O}}{2\pi k_B T}} \tag{4.2}$$

gdzie:

- m_{H_2O} — masa cząsteczkowa wody
- κ — stosunek gęstości lodu wodnego do pyłu:

$$\kappa = \frac{\tilde{\rho}_{H_2O}}{\tilde{\rho}_d} \tag{4.3}$$

- $\tilde{\rho}_{H_2O}$, $\tilde{\rho}_d$ — rzeczywista gęstość H_2O i pyłu.

θ — współczynnik lepkości zmierzony przez Haynesa (Haynes *et al.*1992):

$$\theta = -2.1 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.042(T > 20K). \tag{4.4}$$

$P^S_{H_2O}$ — ciśnienie uwalnianej pary wodnej na powierzchni, oszacowane na podstawie równania Clausiusa-Clapeyrona:

$$P^S_{H_2O} = \vartheta \cdot e^{[\frac{-E}{k_B \cdot T}]} \tag{4.5}$$

gdzie:

- ϑ — parametr odpowiadający ciśnieniu charakterystycznemu:

$$\vartheta = 3.56 \cdot 10^{12} Pa \tag{4.6}$$

- E — energia aktywacji:

$$\frac{E}{k_B} = 6141.667K. \tag{4.7}$$

Ciepło właściwe sublimacji lodu wodnego obliczone na podstawie danych doświadczalnych przez Delsemme i Millera (1971) wyrażone jest równaniem:

$$L^S_{H_2O} = 2.886 \cdot 10^6 - 1116 \cdot T[J \cdot kg^{-1}]. \tag{4.8}$$

Większość parametrów fizycznych występujących w równaniu 4.1 jest wyznaczona doświadczalnie, często z dużym marginesem błędu.

1. Albedo
   Pomiary albeda materii kometarnej zostały wykonane w trakcie misji Giotto. Dla kąta fazowego około $90°$ wartość albeda jest rzędu 4% (Keller *et al.* 1987). Inną metodą jest oszacowanie rozproszenia światła przez ziarna w warkoczu pyłowym komety (Levasseur-Regourd 1998). Na tej podstawie wartość albeda mieści się w przedziale:

   $$0.04 \leq al \leq 0.15 .$$

2. Zdolność emisyjna
   Podobnie jak albedo, współczynnik zdolności emisyjnej jest znany tylko w przybliżeniu. Hage i Greenberg (1990) na podstawie prac analitycznych sugerowali, że jest on bliski jedności. Wcześniej wartość współczynnika dla substancji niemetalicznych została oszacowana pomiędzy 0.85 a 0.95 (Kuchling 1985).

3. Stosunek gęstości pyłu do lodu
   Dolna wartość współczynnika została określona podczas misji Giotto jako bliska jedności (Keller 1995). Pomiary jednak zostały wykonane w warkoczu komety i mogą odbiegać od wartości rzeczywistej dla jądra. Graniczne wartości współczynnika wynoszą:

   $$0.1 \leq \kappa \leq 10.$$

4. Promień
   Obserwacje komety 46P/Wirtanen kosmicznym teleskopem Hubble'a pozwoliły określić promień jądra na 0.58 km, przy założonym albedo 0.04 (Lamy 1996).

Najważniejsze parametry fizyczne zastosowane w modelu zostały przedstawione w Tablicy 4.1.

PARAMETRY		
Półoś wielka	a	3.099 j.a.
Mimiśród	e	0.657
Promień jądra	R	600 m
Albedo	al	0.04
Zdolność emisyjna	ϵ	0.9
Stosunek gęstości pyłu do H_2O	κ	1
Oś obrotu		prostopadła do płaszczyzny orbity

Tablica 4.1: Parametry fizyczne zastosowane w modelu

Rozdział 5

Wyniki

5.1 Rezultaty symulacji

Praca przedstawia rezultat symulacji komputerowej dla dwóch omówionych modeli komety 46P/Wirtanen. Obliczenia zostały wykonane przy pomocy programu napisanego w FORTRANIE 90 i obejmują odcinek orbity od aphelium (5.13 j.a.) do peryhelium (1.06 j.a.). Rozkład temperatury i sublimację cząsteczek wody na powierzchni komety otrzymano w wyniku całkowania numerycznego równania bilansu energetycznego jako funkcji odległości heliocentrycznej komety i kąta zenitalnego Słońca, przy dodatkowych założeniach jednorodnego składu chemicznego (H_2O) i aktywności całej powierzchni jądra. Przyspieszenie niegrawitacyjne w ruchu komety zostało pominięte. Ponadto przedstawiono zmienność czynników bilansu, odpowiadających za sublimację i promieniowanie termiczne warstwy powierzchniowej komety.

Wyniki obliczeń przedstawione zostały na rysunkach 5.1–5.16. Najważniejszym rezultatem pracy jest oszacowanie ilości sublimujących cząsteczek wody z powierzchni komety w jednostce czasu. Ponadto pokazany został rozkład energii i temperatury na powierzchni dla rozpatrywanych modeli. Obliczone wielkości zostały zestawione tak, aby uwidocznić ich zmienność dla poszczególnego modelu w zależności od odległości heliocentrycznej, kąta zenitalnego Słońca, bądź temperatury. Dokonano również porównania wyników bilansu energii i produkcji cząsteczek wody dla obu przypadków.

Rysunki 5.1 i 5.2 przedstawiają ewolucję energii na jednostkę powierzchni w funkcji odległości heliocentrycznej dla trzech różnych kątów zenitalnych Słońca. Wyraźnie widać wzrost energii przypadającej na jednostkę powierzchni dla mniejszych szerokości kometograficznych. Efekt niesymetrycznie rozłożonej energii jest przyczyną nierównomiernej erozji powierzchniowej, co z czasem przyczynia się do zmiany kształtu jądra komety. Dla obu przypadków energia padająca na strefy okołobiegunowe jest zaniedbywalna, co wiąże się ze znikomą sublima-

cją lodu wodnego. Przy porównaniu wykresów dla rozpatrywanych modeli widać, że dla modelu nierotującego energia przypadająca na jednostkę powierzchni jest ponad trzykrotnie większa niż dla modelu z rotującym jądrem.

Na rysunkach 5.3, 5.4 pokazano zależność temperatury warstwy powierzchniowej komety od odległości heliocentrycznej dla trzech różnych szerokości kometograficznych. Temperatura powierzchni osiąga największą wartość w punktach odsłonecznych, a jej wartość różni się o około 10 K dla obu modeli. Znacznie większa różnica temperatur występuje dla szerokości okołobiegunowych. Widoczna jest również zmiana w przebiegu krzywych dla szerokości $z = 45°$.

Rysunki 5.5 i 5.6 przedstawiają rozkład temperatury na powierzchni jądra dla sześciu odległości heliocentrycznych w funkcji cosinusa kąta zenitalnego Słońca. Kształt krzywych jest zupełnie odmienny dla obu modeli. Maksimum temperatury przypada w miejscach najbardziej nasłonecznionych i jest wskaźnikiem najaktywniejszych obszarów jądra. Dla modelu rotującego spadek temperatury wraz ze wzrostem kąta zenitalnego Słońca następuje dużo szybciej niż dla modelu nierotującego.

Produkcję cząsteczek wody z jednego metra kwadratowego powierzchni w jednej sekundzie, dla trzech szerokości kometograficznych, w funkcji odległości heliocentrycznej przedstawiają rysunki 5.7 i 5.8. Jak wskazywały poprzednie wykresy, proces sublimacji zachodzi najintensywniej w okolicach odsłonecznych i dla rotującego jądra zmniejsza się znacznie szybciej przy wzrastającym kącie zenitalnym Słońca. Ponadto warto zauważyć, że niewielka różnica temperatur w obu przypadkach (ok. 10 K) spowodowała ponad trzykrotny wzrost ilości sublimujących cząsteczek wody.

Wykresy 5.9–5.12 pokazują bilans energii dla dwóch szerokości kometograficznych w funkcji temperatury. Zmienność dwu czynników bilansu, odpowiadających za wypromieniowanie energii termicznej oraz sublimację, jest widoczna dla różnych kątów zenitalnych, a zarazem dla obu rozważanych modeli. Dla pierwszych trzech przypadków, przy temperaturze powierzchni bliskiej 200 K w bilansie zaczyna przeważać czynnik odpowiadający za sublimację, w ostatnim zaś ($z = 45°$, model rotującego jądra) temperatura nie osiąga granicznej wartości, przez co w bilansie ważniejszą rolę odgrywa promieniowanie termiczne.

Bilans energii dla całej powierzchni komety w funkcji odległości heliocentrycznej został przedstawiony na rysunkach 5.13 i 5.14. Dla modelu nierotującego, sublimacja zaczyna dominować w bilansie energii w okolicach 2.5 j.a., natomiast w modelu rotującym sublimacja daje większy wkład dopiero w odległości bardzo bliskiej peryhelium (ok. 1.2 j.a.).

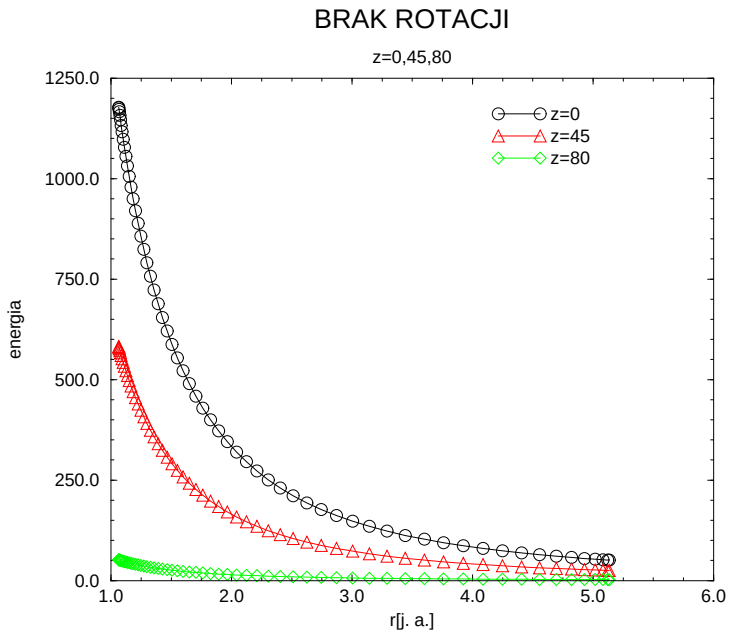
Rysunek 5.15 jest zestawieniem całkowitego bilansu energii dla dwóch rozważanych modeli w funkcji odległości heliocentrycznej. Energia dla szybko rotującego modelu jądra jest blisko czterokrotnie większa od nierotującego. Jest to wynikiem założenia, że strumień całkowitej energii słonecznej jest uśredniony na

całej powierzchni sfery.

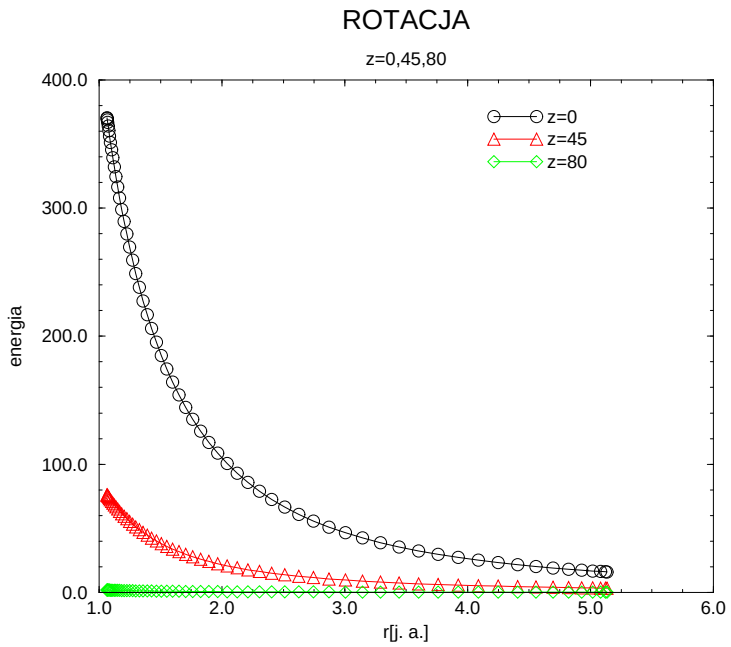
Na rysunku 5.16 przedstawiono porównanie całkowitej produkcji cząsteczek wody w zależności od odległości heliocentrycznej. Wartości maksymalne dla rozważanych modeli wynoszą:

- $Q_{H_2O} = (9.4 \pm 0.3) \cdot 10^{27}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$] — dla modelu nierotującego
- $Q_{H_2O} = (9.8 \pm 0.3) \cdot 10^{27}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$] — dla modelu szybko rotującego jądra.

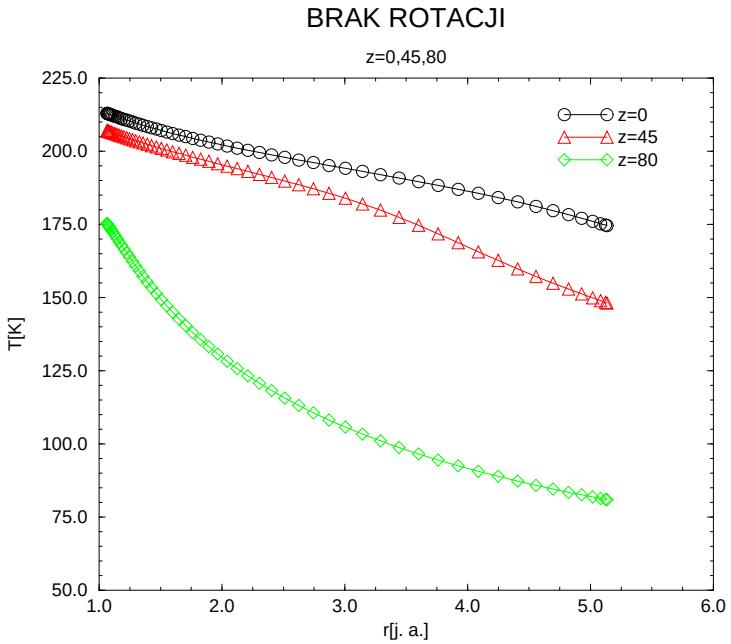
Pomimo znacznie mniejszej energii na powierzchni jądra, symulacja produkcji cząsteczek wody dla modelu rotującego daje nieznacznie większy wynik od modelu nierotującego. Wynik ten jest uzasadniony innym rozkładem energii i większą powierzchnią sublimacji. Można powiedzieć, że aktywność jądra komety 46P/Wirtanen w peryhelium, obliczona na podstawie dwóch modeli jest rzędu 10^{28} cząsteczek na sekundę.



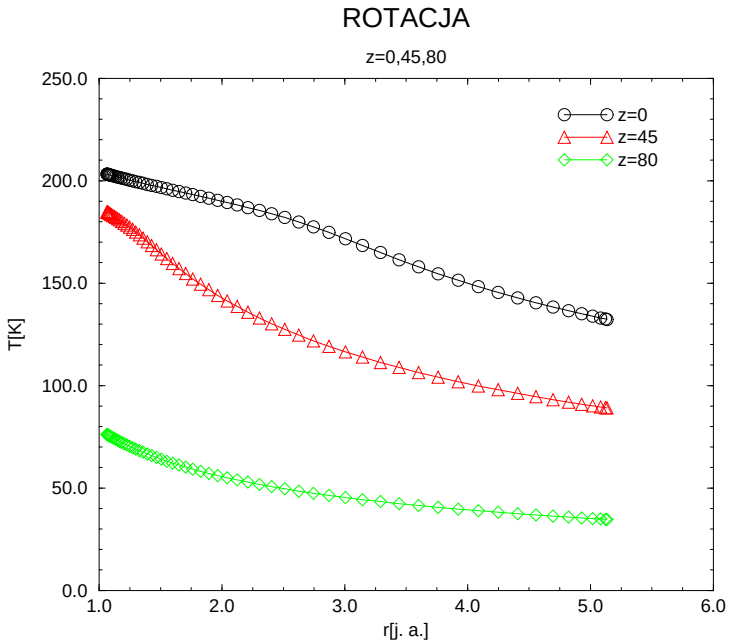
Rysunek 5.1: Ewolucja energii $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra nierotującego



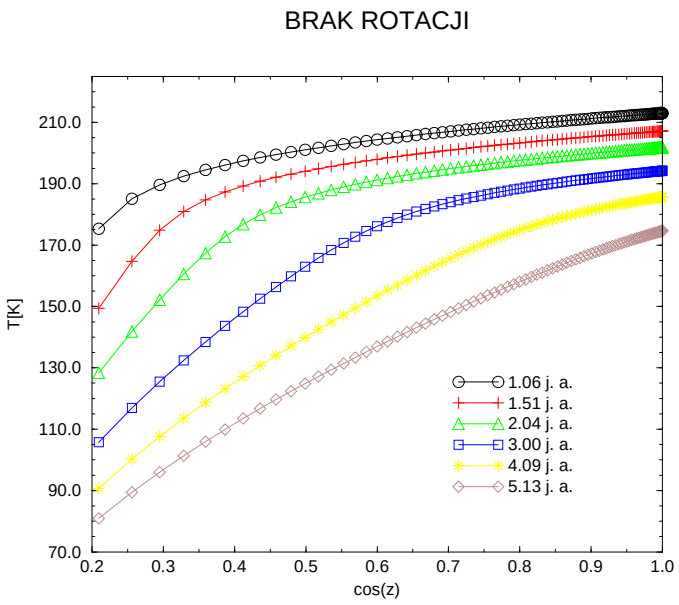
Rysunek 5.2: Ewolucja energii $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra szybko rotującego



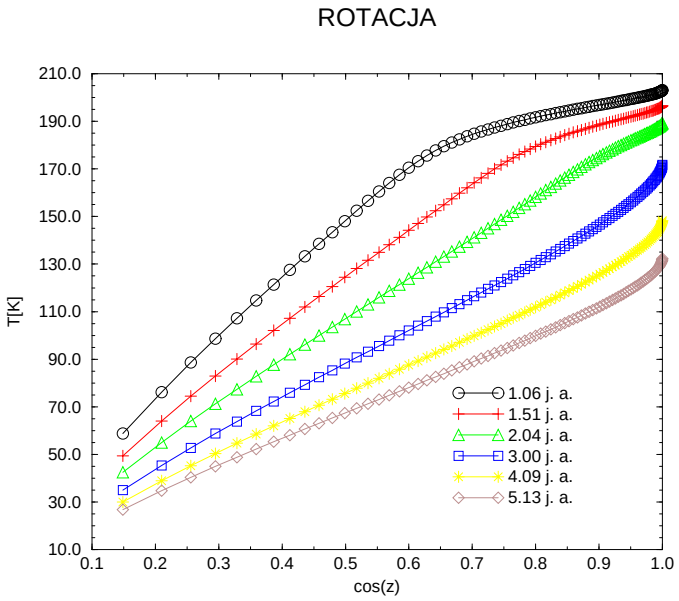
Rysunek 5.3: Zależność temperatury [K] od odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra nierotującego



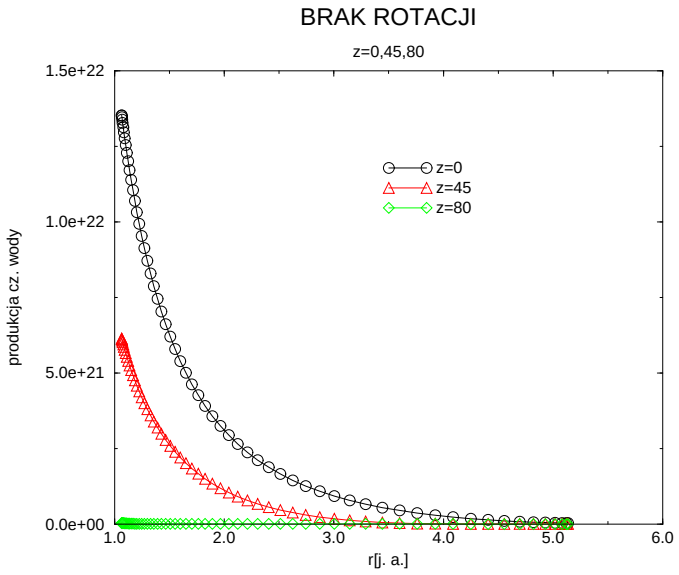
Rysunek 5.4: Zależność temperatury [K] od odległości heliocentrycznej [j.a.] dla $z = 0°, 45°, 80°$; model jądra szybko rotującego



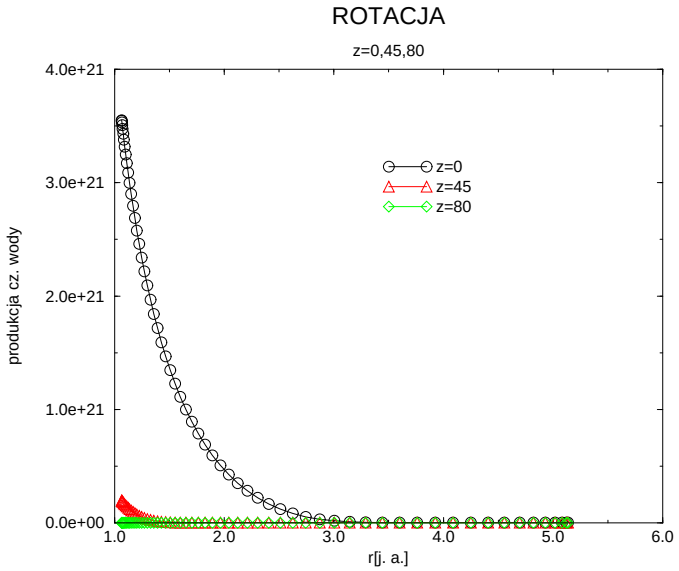
Rysunek 5.5: Rozkład temperatury [K] w funkcji cosinusa kąta zenitalnego Słońca dla wybranych sześciu odległości heliocentrycznych; model jądra nierotującego



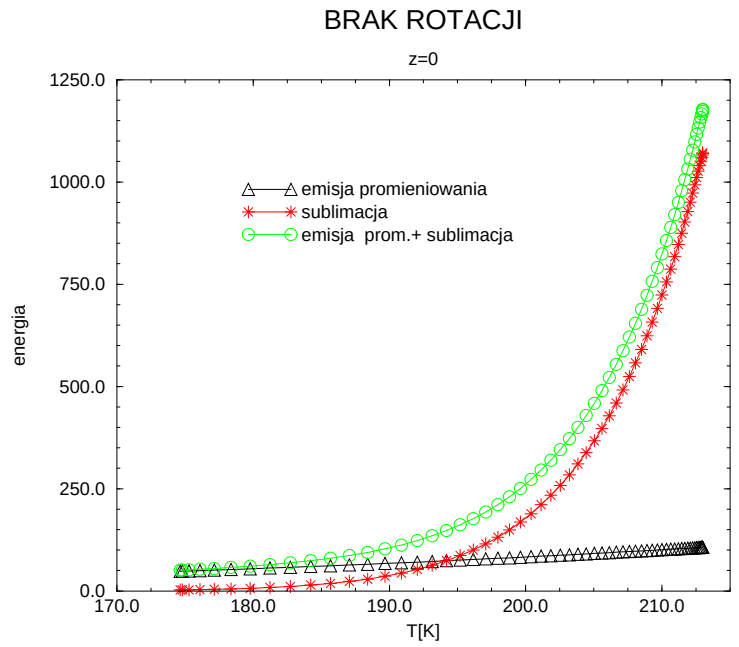
Rysunek 5.6: Rozkład temperatury [K] w funkcji cosinusa kąta zenitalnego Słońca dla wybranych sześciu odległości heliocentrycznych; model jądra szybko rotującego



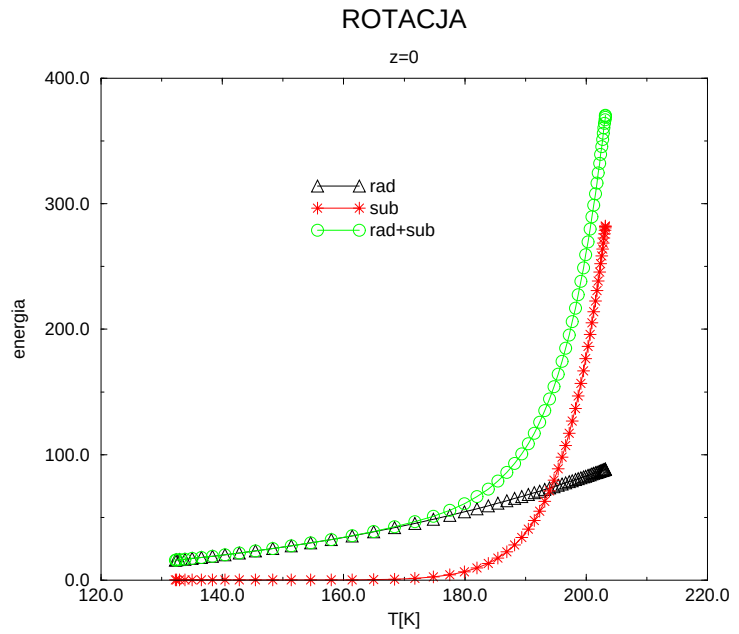
Rysunek 5.7: Produkcja cząsteczek wody w jednej sekundzie z powierzchni 1 m^2 jako funkcja odległości heliocentrycznej [j.a.] dla trzech szerokości kometograficznych; model nierotującego jądra



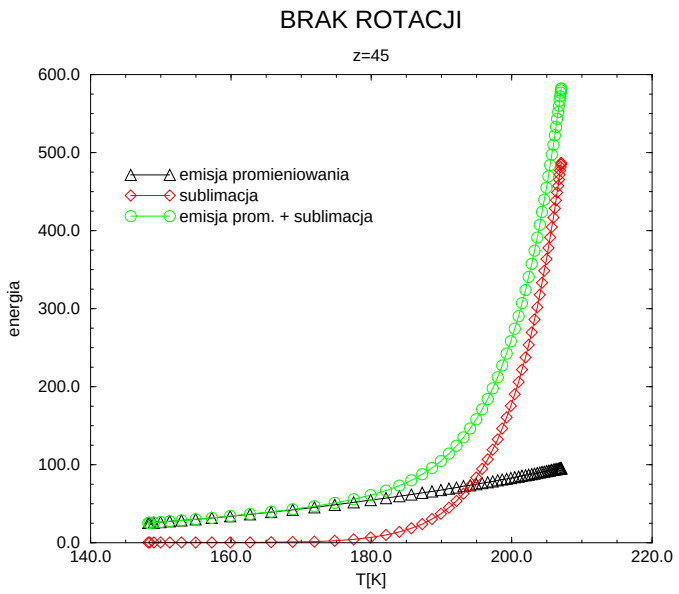
Rysunek 5.8: Produkcja cząsteczek wody w jednej sekundzie z powierzchni 1 m^2 jako funkcja odległości heliocentrycznej [j.a.] dla trzech szerokości kometograficznych; model jądra szybko rotującego



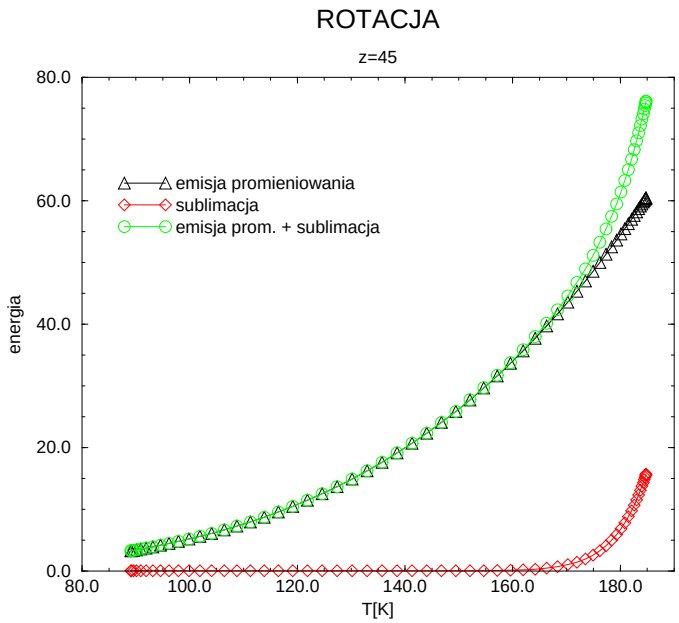
Rysunek 5.9: Bilans energetyczny $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji temperatury [K] dla punktu odsłonecznego; model jądra nierotującego



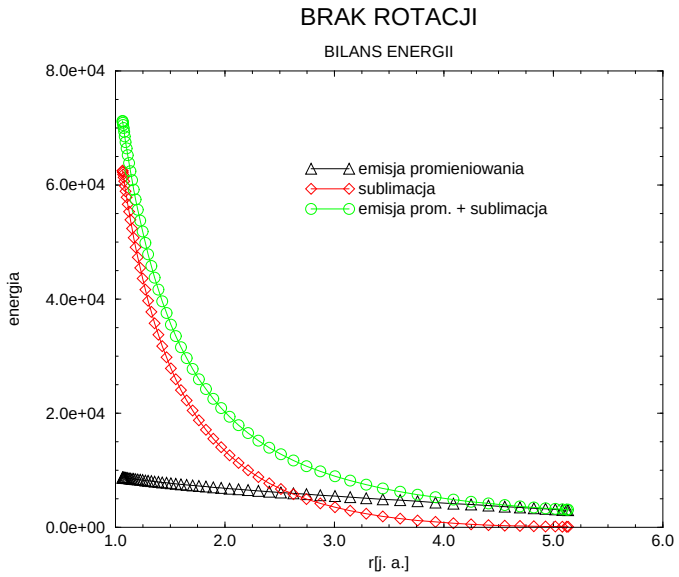
Rysunek 5.10: Bilans energetyczny $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji temperatury [K] dla punktu odsłonecznego; model jądra szybko rotującego



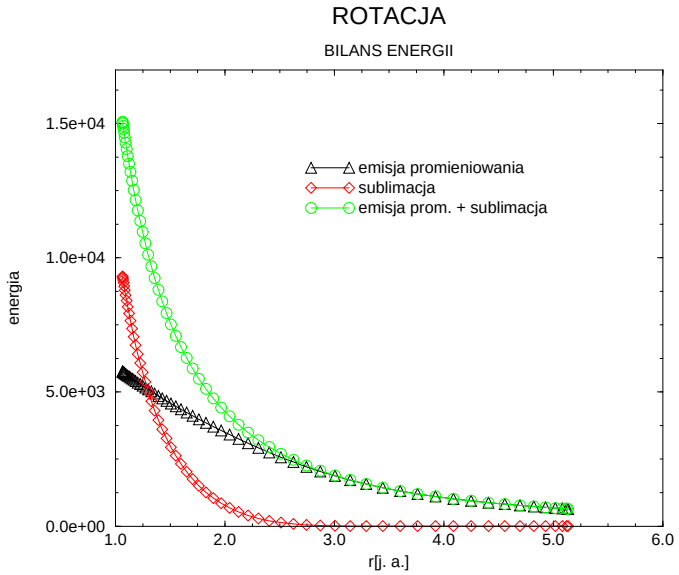
Rysunek 5.11: Bilans energetyczny $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji temperatury [K] dla $z = 45°$; model jądra nierotującego



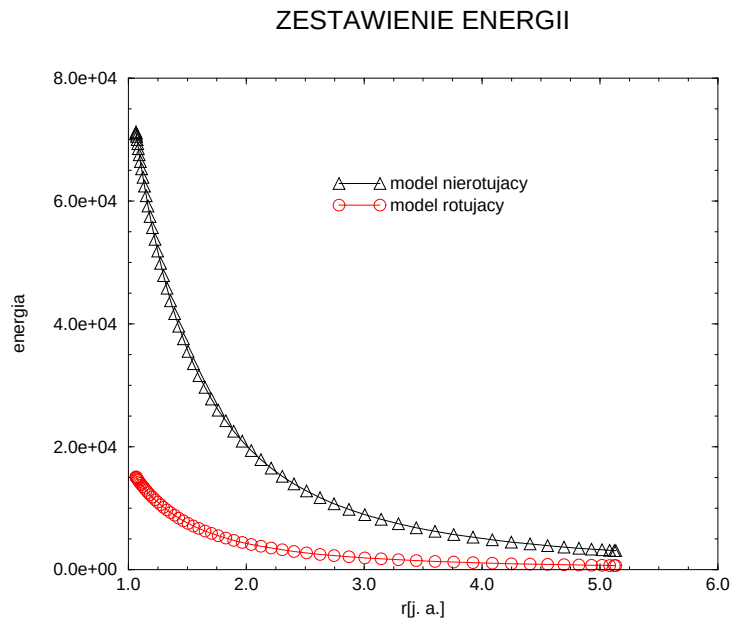
Rysunek 5.12: Bilans energetyczny $[W \cdot m^{-2}]$ w funkcji temperatury [K] dla $z = 45°$; model jądra szybko rotującego



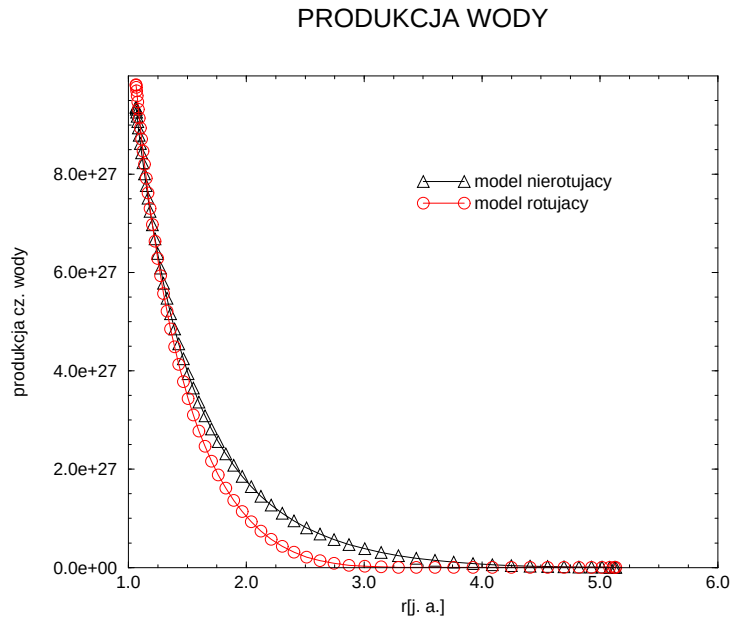
Rysunek 5.13: Ewolucja poszczególnych członów bilansu energetycznego i ich sumy $[W]$ w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla całego jądra; model jądra nierotującego



Rysunek 5.14: Ewolucja poszczególnych członów bilansu energetycznego i ich sumy $[W]$ w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] dla całego jądra; model jądra szybko rotującego



Rysunek 5.15: Bilans energii [W] dla całej powierzchni, w funkcji odległości heliocentrycznej [j.a.] — porównanie rozważanych modeli



Rysunek 5.16: Całkowite tempo produkcji cząsteczek wody w ciągu jednej sekundy w zależności od odległości heliocentrycznej [j.a.] — porównanie

Rozdział 6

Porównanie z obserwacjami

6.1 Techniki obserwacyjne

Bezpośrednie obserwacje cząsteczek wody w komie z powierzchni Ziemi, na podstawie spektroskopii są niemożliwe z powodu obecności pary wodnej w ziemskiej atmosferze. Istnieją jednak liczne metody szacowania produkcji cząsteczek wody na powierzchni jądra kometarnego. Jedną z nich jest ocena produkcji rodnika OH i atomowego wodoru (produktów fotodysocjacji cząsteczki wody), przy pomocy fotometrii wąskopasmowej. Inną metodą jest analiza fotometryczna emisji Lyman-α w otoczce wodorowej jądra. Badania takie były realizowane przez aparaturę SWAN z pokładu sondy kosmicznej SOHO. Kolejną metodą jest szacowanie produkcji cząsteczek wody (Q_{H_2O}) na podstawie empirycznej zależności pomiędzy Q_{H_2O} i jasnością heliocentryczną komety m_h (Jorda 1995):

$$log(Q_{H_2O}) = 30.78(\pm 0.25) - 0.265 m_h. \tag{6.1}$$

6.2 Wyniki obserwacji i porównanie z modelem

Obserwacje rodnika OH przeprowadzone przez A'Hearna w 1991 (A'Hearn *et al.* 1996), w zależności od zastosowanego modelu, dla odległości bliskich peryhelium dają następujące wyniki (Rickman, Jorda 1998):

- model Hasera — $Q_{H_2O} = 1.2 \cdot 10^{28}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$]
- model Combi i Delsemme — $Q_{H_2O} = (1.3 - 2.5) \cdot 10^{28}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$].

Produkcja molekuł H_2O, oceniana na podstawie emisji Lyman-α w otoczce wodorowej, w odległości 1.6 j. a. od Słońca, instrumentem SWAN z pokładu SOHO w 1997 roku wynosiła:

$$Q_{H_2O} = 1.6 \cdot 10^{28}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}] \text{ (Bertaux } \textit{et al.} \text{ 1997).}$$

Pomiary jasności heliocentrycznej podczas kolejnych przejść przez peryhelium dały następujące rezultaty (Schwehm, Möhlmann 1998):

- 1986 rok — $Q_{H_2O} = 5 \cdot 10^{28}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}]$
- 1991 rok — $Q_{H_2O} = 4 \cdot 10^{28}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}]$
- 1997 rok — $Q_{H_2O} = (1 - 2.7) \cdot 10^{28}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}]$.

Rezultaty uzyskane podczas symulacji, dla momentu przejścia przez peryhelium wynosiły:

- $Q_{H_2O} = (9.4 \pm 0.3) \cdot 10^{27}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}]$ dla modelu jądra nierotującego
- $Q_{H_2O} = (9.8 \pm 0.3) \cdot 10^{27}[\text{cząsteczek}\cdot s^{-1}]$ dla szybko rotującego jądra.

Porównanie obu modeli pozwala stwierdzić, że energia przypadająca na jednostkę powierzchni jest blisko cztery razy większa dla modelu jądra nierotującego. Jednak w przypadku przybliżenia szybko rotującego jądra mniejsza energia jest rekompensowana dwukrotnie większą powierzchnią sublimacji. Nieznaczna różnica w produkcji molekuł H_2O jest wynikiem innego rozkładu energii na powierzchni rozważanych modeli.

Dane obserwacyjne wykazują jednak zbyt dużą rozbieżność z rezultatami symulacji, zwłaszcza wyniki z lat 1986 i 1991, kiedy to miały miejsce dwa kolejne powroty komety po skróceniu peryhelium przez grawitacyjne perturbacje od Jowisza.

6.3 Wnioski

Obserwacje komety 46P/Wirtanen wskazują, że promień jądra wynosi około 600 m. Produkcja cząsteczek wody oszacowana na podstawie jasności heliocentrycznej daje rezultaty znacznie odbiegające od wynikających z fizycznego modelu jądra kometarnego. Wyniki pomiarów nie mogą być zatem rezultatem sublimacji lodu wodnego z powierzchni jądra o promieniu rzędu 600 metrów. Pomimo wielu uproszczeń zastosowanych w modelowych obliczeniach, m. in. jednorodny skład chemiczny (H_2O), czy aktywność całej powierzchni jądra, fizyka zastosowana do opisu ilościowego sublimacji jest zgodna z doświadczeniem i można stwierdzić, że symulacja w przybliżeniu określa górną granicę produkcji cząsteczek wody dla jądra o promieniu 600 m. Rozbieżność ta może być zatem wyjaśniona tylko w jeden sposób — istnieje inny mechanizm powodujący znaczny wzrost sublimacji cząsteczek wody.

Wyjaśnienia tego mechanizmu można doszukać się w teorii, która niedawno została częściowo potwierdzona przez odkrycia dysków protoplanetarnych wokół młodych gwiazd.

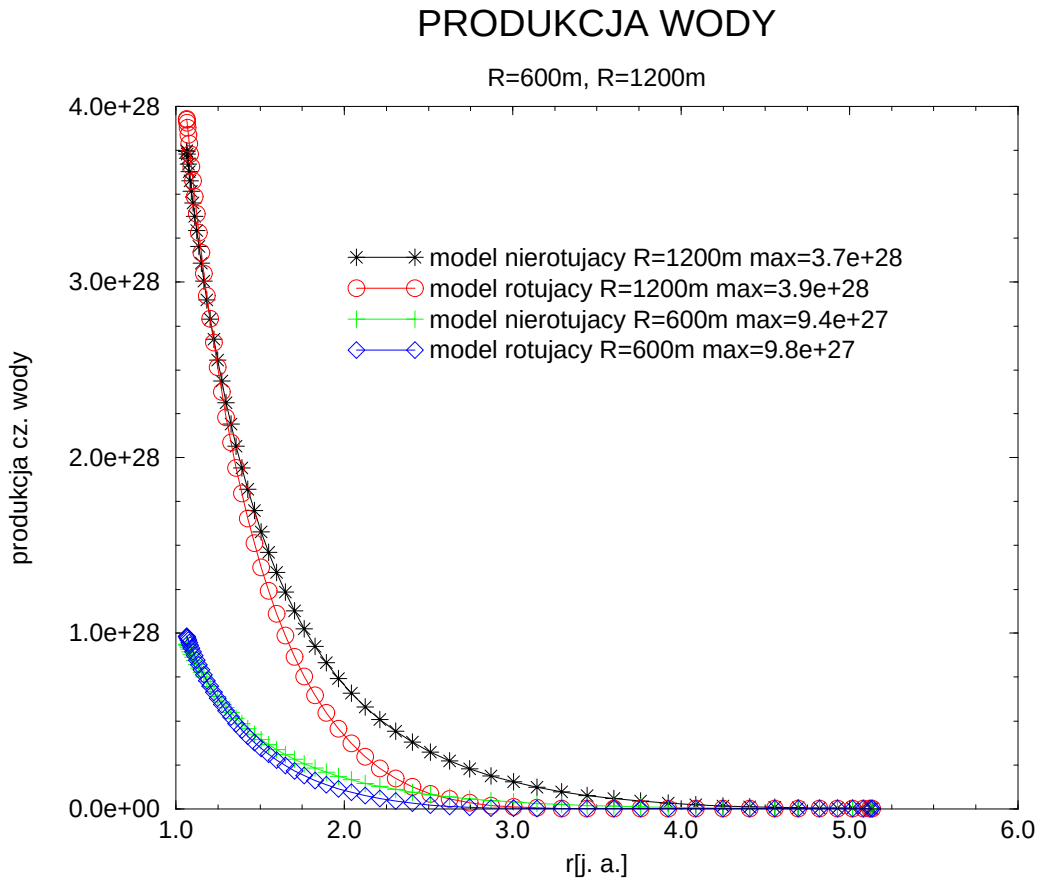
Dysk protoplanetarny składa się z gazu i ziaren pyłu międzygwiezdnego. Ziarna pyłu zbudowane są z krzemowego jądra pokrytego lodem wodnym i innych substancji lotnych (Greenberg 1996). Teoria nazywana BPCA (Balistic Particules Cluster Aggregation) tłumaczy powstawanie jąder kometarnych poprzez akrecję takich ziaren i kondensację lotnych substancji aż do utworzenia tzw. agregatu o rozmiarach charakterystycznych dla komet. Inna teoria — BCCA (Balistic Cluster Cluster Aggregation) tłumaczy powstawanie mniejszych agregatów w procesie akrecji, które następnie łączą się ze sobą aż do osiągnięcia rozmiarów jąder kometarnych.

Podczas zbliżania się do Słońca, pod wpływem strumienia energii słonecznej, jądro zbudowane z pyłu uwalnia pojedyncze ziarna bądź większe agregaty, które stają się źródłem cząsteczek wody, zwiększając efektywnie powierzchnię sublimacji (Benkhoff 1999).

Aby wyjaśnić obserwowany wzrost liczby sublimujących cząsteczek i określić skalę takiego mechanizmu została przeprowadzona dodatkowo symulacja dla dwukrotnie większego promienia komety (Rys 6.1). Proces ten musi być zatem bardzo wydajny, gdyż w zgodzie z obserwacjami kometa o jądrze wielkości 600 m produkuje tyle materii, co modelowa kometa o promieniu 1200 m przy sublimacji zachodzącej tylko na powierzchni. Dla wartości promienia komety równego 1200 m produkcja cząsteczek wody wynosi:

- $Q_{H_2O} = (3.7 \pm 0.3) \cdot 10^{28}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$] dla modelu jądra nierotującego
- $Q_{H_2O} = (3.9 \pm 0.3) \cdot 10^{28}$[cząsteczek$\cdot s^{-1}$] dla szybko rotującego jądra.

Wyniki te są zbliżone do danych wynikających z obserwacji i określają wielkość powierzchni sublimacji, jaka jest niezbędna aby wyjaśnić fakty obserwacyjne.



Rysunek 6.1: Symulacja aktywności komety w cząsteczkach na sekundę jako funkcja odległości heliocentrycznej [j. a.] dla jądra o promieniu R=1000 m i porównanie z rozważanym modelem

Rozdział 7

Podsumowanie

Przez długie stulecia wiedza o kometach była bardzo ograniczona. Nawet po udowodnieniu, że są ciałami niebieskimi i poruszają się po ustalonych torach, zgodnie z prawami fizyki, długo jeszcze pozostawały w ludzkich umysłach zwiastunami wszelkich nieszczęść.

Do lepszego poznania składu chemicznego komet przyczynił sie rozwój XIX wiecznej spektroskopii, a później w XX wieku mechaniki kwantowej. Coraz dokładniej poznawany skład chemiczny i dynamika komet przyczyniły się do sformułowania w połowie XX wieku przez Freda Whipple'a obecnie uznawanego modelu jądra kometarnego.

Liczne misje do komety Halleya w 1982 roku dały pierwsze obrazy jądra komety, potwierdziły model „brudnej kuli śniegu" i dostarczyły wielu nowych informacji. Pomimo dużego postępu nauki i technik obserwacyjnych, jądra ciągle skrywają przed obserwatorem wiele tajemnic. Nieprzewidziane pojawienia nowych komet i niedokładna znajomość ich trajektorii uniemożliwiają ich bezpośrednie badania. Misje do komet mogą być zaplanowane tylko przy bardzo dobrej znajomości orbity, co ogranicza badania do komet krótkookresowych.

Kometa 46P/Wirtanen jest celem przyszłej misji Rosetta. Liczne zespoły naukowców pracują nad zadowalającym modelem warunków panujących w najbliższym otoczeniu jądra i na powierzchni. Opracowany i przedstawiony w tej pracy model jest próbą oceny rozmiaru sublimacji i porównaniem otrzymanych wyników z faktami obserwacyjnymi.

Praca nad stworzeniem tego modelu obejmowała kilka etapów. W pierwszej kolejności należało zgromadzić potrzebne dane dotyczące komety 46P/Wirtanen. Po zapoznaniu się z różnymi opracowaniami dotyczącymi m.in. modeli termodynamicznych jądra, zostały wybrane stosowne parametry, niezbędne do opisu modelu. Pierwszym praktycznym krokiem w pracy było obliczenie orbity komety. Następnie zostały stworzone dwa proste modele jądra kometarnego, opisane w rozdziale 4. W oparciu o te modele napisano program obliczający takie parametry

fizyczne, jak: temperatura, tempo sublimacji, czy rozkład energii na powierzchni założonych modeli komety. Otrzymane wyniki zostały następnie porównane z danymi obserwacyjnymi. Opracowując wnioski, podjęto próbę wyjaśnienia rozbieżności modelu z obserwacjami przez wykonanie symulacji dla zwiększonego promienia jądra komety. Wyniki tej próby, przedstawione w rozdziale 6, pozwalają na oszacowanie efektywnej powierzchni sublimacji potrzebnej do wyjaśnienia faktów obserwacyjnych.

Praca ta może być wstępem do opracowania modelu bardziej skomplikowanego i lepiej odpowiadającego realnej sytuacji. Rezultat symulacji wskazuje na istnienie dodatkowego źródła sublimujących cząsteczek wody, którego prawdopodobne pochodzenie zostało naszkicowane w poprzednim rozdziale. Dokładne rozstrzygnięcie problemu rozbieżności obserwacji z modelem przyniosą być może dopiero wyniki misji Rosetta, której plany obejmują m. in. lądowanie na komecie oraz przeprowadzenie licznych eksperymentów na powierzchni i w atmosferze komety.

Bibliografia

A'HEARN, M. F., BERTAUX, J. L., FELDMAN, P. D., PARKER, J. WM., SCHULZ, R., STERN, S. A., WEINTRAUB, A. D. (1996). HST/FOS UV Observations of Chiron and Wirtanen. *American Astronomical Society* **28**, 1083.

BENKHOFF, J. (1999). Energy balance and the gas flux from the surface of comet 46P/Wirtanen. *Planet.Space Sci.* **47**, 735–744.

BERTAUX, J.C., COSTA, J., MÄKINEN, T., QUÉMERAIS, E., LALLEMENT, R., KYRÖLÄ, E., SCHMIDT, W. (1997). Lyman-alpha Observations of 46 P/Wirtanen (1998) with SWAN on SOHO: H_2O Production rate near 1997 perihelion. *Presented at Workshop on the Rosetta Targets, Napoli, 1997.*

COMBI, M. R., DELSEMME, A. H. (1980). Neutral cometary atmospheres. I - an average random walk model for photodissociation in comets. *Astrophysical Journal* **237**, 633–640.

DELSEMME, A. H., MILLER, D. C. (1971). Physico-chemical phenomena in comets III. The continuum of comet Burnham (1960 II). *Planet.Space Sci.* **19**, 1229–1257.

DELSEMME, A. H. (1982). Chemical composition of cometary nuclei, in *Comets*, Wilkening, L. L. 85-130, *The University of Arizona Press, Tucson.*

DESVOIVRES, E. (1999). Modélisation de la dynamique des fragments cométaires - Application à la comète C/1996 B2 Hyakutake. *Doctoral thesis, Univ. Joseph Fourier, Grenoble I.*

ENZIAN, A. (1997). Modélisation multidimensionnelle du comportement thermodynamique des noyaux de comètes. *Doctoral thesis, Univ. Joseph Fourier, Grenoble I.*

ENZIAN, A., KLINGER, J., SCHWEHM, G., WEISSMAN, P. R. (1999). Temperature and Gas Production Distributions on the Surface of a Spherical Model Comet Nucleus in the Orbit of 46P/Wirtanen. *Icarus* **138**, 74–84.

FESTOU, M. C., RICKMAN, H., WEST, R. M. (1993). Comets. Scientific preprint. *European Southern Observatory.* No. 960.

GREENBERG, J. M. (1996). Comet as samplers of interstellar dust. *NATO Summerschool on Interstellar Dust. Kluwer Academic Publishers*, 443–458.

HAMILTON, C. J. (1995). Views of the Solar System. *Privacy Statement http://www.solarviews.com*

HASER, L. (1957). Distribution d'intensité dans la tête d'une comète. *Bull. Acad. R. Sci. Liège* **43**, 740–750.

HAYNES, D. R., TRO, N. J., GEORGE, S. M. (1992). Condensation and evaporation of H_2O on ice surfaces. *J.Phys.Chem.* **96**, 8502–8509.

JORDA, L. (1995). Atmosphères cométaires: interprétation des observations dans le visible et comparaison avec les observations radio. *Doctoral thesis, Observatoire de Paris-Meudon, Université de Paris VII.*

JORDA, L., RICKMAN, H. (1995). Comet P/Wirtanen, summary of observational data. *Planet. Space Sci.* **43**, 575–579.

KELLER, H. U., DELAMERE, W. A., HUEBNER, W. F., REITSEMA, H. J., SCHMIDT, H. U., WHIPPLE, F. L., WILHELM, K., CURDT, W., KRAMM, R., THOMAS, N., ARPIGNY, C., BARBIERI, C., BONNET, R. M., CAZES, S., CORADINI, M., COSMOVICI, C. B., HUGHES, D. W., JAMAR, C., MALAISE, D., SCHMIDT, D., SCHMIDT, W. K. H., SEIGE, P. (1987). Comet Halley's nucleus and its activity.*Astron. and Astrophys.* **187**, 807–823.

KUCHLING, F. (1985). Taschenbuch der Physik. *Verlag Harri Deutsch, Thun and Frankfurt.*

LAMY, P. L. (1996). Comet 46P/Wirtanen. *IAU Circ.*, 6478.

LEVASSEUR-REGOURD, A. C. (1998). Zodiacal light, certitudes and questions. *Earth, Planet. Space* **50**, 607–610.

MOUILLET, D., LARWOOD, J. D., PAPALOIZOU, J. C. B., LAGRANGE, A. M. (1997). A planet on an inclined orbit as an explanation of the warp in the β-Pictoris disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **292**, 896.

RICKMAN, H., JORDA, L. (1998). Comet 46P/Wirtanen, the target of the Rosetta mission. *Adv. Space Res.* **21**, No. 11, 1491–1504.

SAMARASINHA, N. H., MUELLER, B. E. A., BELTON, M. J. S. (1996). Comments on the rotational state and non-gravitational forces of comet 46P/Wirtanen. *Planet. Space Sci.* **44**, No. 3 275–281.

SCHWEHM, G. H., MÖHLMANN, D. T. F. (1998). *Space Science Dept.* Published by ESA/ESTEC.

YEOMANS, D. K. (1999). Komety *Prószyński i S-ka, Warszawa.*