

Perturbacje gwiazdowe i galaktyczne a źródło komet długookresowych - rozprawa habilitacyjna

Piotr A. Dybczyński

26 września 2006

Rozprawę tę dedykuję Mojej Mamie.

1 Lista prac stanowiących rozprawę

- P1. Piotr A. Dybczyński, 2001, **Dynamical history of the observed long-period comets**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 375, str. 643-650.
- P2. Piotr A. Dybczyński, 2002b, **Simulating observable comets I.: The effects of a single stellar passage through or near the Oort cometary cloud**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 396, str. 283-292.
- P3. Piotr A. Dybczyński, 2005a, **Simulating observable comets II.: Simultaneous stellar and galactic action**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 441, str. 783-790.
- P4. Piotr A. Dybczyński, 2005b, **Simulating observable comets III. Real stellar perturbers of the Oort cloud and their output**, *Astronomy & Astrophysics*, przyjęta do druku.

2 Wstęp - geneza zagadnienia

Hipoteza, że Układ Słoneczny otoczony jest rozległym obłokiem kometarnym sformułowana została przez Jana Oorta w roku 1950 [Oort, 1950]. Zaproponowany rezerwuar komet może być źródłem obserwowanego strumienia komet długookresowych, ale jedynie pod warunkiem istnienia mechanizmów modyfikujących odległości peryhelium tak, by ulegały zmniejszeniu do wartości pozwalających na zaobserwowanie komety. Taką granicę obserwowalności (*OL*) przyjmuje się dziś powszechnie na poziomie 3 - 5 AU. W swojej klasycznej już dziś pracy, Oort jako jedyny mechanizm sprowadzający komety w sferę widzialności rozważał perturbacje od gwiazd przechodzących w pobliżu Słońca.

W ciągu ponad 50 lat od opublikowania hipotezy Oorta nasze poglądy na ewolucję orbit komet w obłoku znacznie się zmieniły. Zauważono [Byl, 1983, 1986, Harrington, 1985, Matese and Whitman, 1989], że oprócz perturbacji gwiazdowych na komety w obłoku oddziałuje Galaktyka, a w szczególności materia dysku galaktycznego, która działając zarówno na Słońce jak i komety wywołuje silne, długookresowe zmiany jej orbity. Zdaniem wielu autorów (np. Heisler and Tremaine [1986], Bailey et al. [1990]) perturbacje galaktyczne są znacznie efektywniejsze w „dostarczaniu”

obserwowalnych komet długookresowych. Perturbacji gwiazdowych nie można wszakże pominąć. Jak pokazano [Dybczyński and Prętka, 1996, Breiter et al., 1996], perturbacje galaktyczne mogą uczynić obserwowalnymi zaledwie niewielką część (rzędu 10%) spośród komet zawartych w obłoku. Przy braku innych perturbacji ta część obłoku zostałaby już dawno opróżniona na skutek perturbacji planetarnych w trakcie przechodzenia komet przez peryhelium poniżej OL oraz na skutek ich fizycznego „starzenia się”. Tak więc rola perturbacji gwiazdowych nie ogranicza się jedynie do bezpośredniego sprowadzania komet w sferę widzialności, ale co być może istotniejsze, perturbacje te systematycznie „odświeżają” obserwowalną dzięki pływom dyskowym część obłoku kometarnego.

Perturbacje gwiazdowe mogą być również przyczyną asymetrii i zgęszczeń w rozkładzie kierunków peryhelii obserwowanych komet długookresowych. Rozkłady takie badano już na wiele lat przed opublikowaniem hipotezy Oorta (np. Carrington [1861]), najczęściej poszukując korelacji z apeksem Słońca jako dowodu na międzygwiazdowe pochodzenie komet. Zagadnienie to badane było przez wielu autorów [Tyror, 1957, Hurnik, 1964, Hasegawa, 1976, Yabushita, 1979a,b, Boggart and Noerdlinger, 1982, Khana and Sharma, 1983, Biermann et al., 1983, Lüst, 1984, Matese et al., 1998, Matese et al., 1999, Matese and Lissauer, 2002], wśród których np. Biermann et al. [1983] i Lüst [1984] wiążą wykryte zagęszczenia z niedawnymi przejściami gwiazd. W ostatnich latach pojawiły się prace [Matese et al., 1998, Murray, 1999, Matese et al., 1999, Matese and Lissauer, 2002] wskazujące na inne przyczyny obserwowanych asymetrii. Innym, ważnym wnioskiem z badań rozkładu kierunków peryhelii komet długookresowych jest potwierdzenie przewidzianej teoretycznie charakterystyki sposobu działania pływów od dysku galaktycznego, dostarczających do wnętrza układu planetarnego znacznie mniej komet z kierunkami peryhelium w pobliżu równika i biegunów Galaktyki [Delsemme, 1987, Matese and Whitmire, 1996].

Poszukiwania gwiazd, które kiedyś przeszły lub w przyszłości mogą pojawić się blisko Słońca uwarunkowane są w zasadniczy sposób naszą wiedzą o odległościach i prędkościach przestrzennych gwiazd. We wcześniejszych pracach [Matthews, 1994, Mullari and Orlov, 1996] korzystano głównie z danych zawartych w Katalogu Bliskich Gwiazd [Gliese and Jahreiss, 1991]. W późniejszych pracach [Dybczyński and Kankiewicz, 1999, García-Sánchez et al., 1999, 2001], dzięki wykorzystaniu katalogu HIPPARCOS [ESA, 1997] znacznie poprawiono kompletność i precyzję rezultatów. Jednakże zarówno mała liczba zmierzonych prędkości radialnych gwiazd HIPPARCOS-a jak i mało dokładne ruchy własne zawarte w tym katalogu powodowały, że uzyskane listy gwiazd potencjalnie zaburzających ruch komet w obłoku Oorta pozostawiały wiele do życzenia.

Komety długookresowe, pojawiające się po raz pierwszy w Układzie Planetarnym nazywamy powszechnie kometami „dynamicznie nowymi”. Określenia tego użył już Oort i za jego sugestią wszystkie komety o wielkich półosiach większych niż 10 000 AU były dotąd traktowane przez innych autorów jako „dynamicznie nowe”. Dysponując wiedzą o perturbacjach galaktycznych i gwiazdowych można jednak pokusić się o zbadanie przeszłego ruchu tych komet i sprawdzenie, czy rzeczywiście pojawiły się one pomiędzy planetami po raz pierwszy. Badania takie wymagają precyzyjnego wyznaczenia tak zwanych „orbit pierwotnych” wszystkich komet długookresowych a następnie prześledzenia ich ruchu o jeden obieg orbitalny wstecz, tak by wyznaczyć poprzednią odległość peryhelium. Jako źródło danych o oskulacyjnych orbitach komet służą najczęściej kolejne edycje Katalogu Orbit Kometarnych [Marsden and Williams, 2003].

Celem niniejszej rozprawy było zbadanie metodami symulacyjnymi skutków pojedynczych i wielokrotnych przejść gwiazd poprzez i w pobliżu obłoku Oorta z jednoczesnym uwzględnieniem perturbacji galaktycznych. Opracowane początkowo dla fikcyjnych zbliżeń gwiazdowych metody i modele zostały następnie wykorzystane do analizy efektów przejść rzeczywistych gwiazd, wyszukanych pośród obiektów o znanych pozycjach, ruchach własnych, paralaksach i prędkościach radialnych. Otrzymana w ramach tych badań lista „perturberów” gwiazdowych pozwoliła również na weryfikację powszechnie przyjmowanej definicji komet „dynamicznie nowych” i zaproponowanie poprawionej definicji, opartej na przeszłym ruchu komety z uwzględnieniem zaburzeń od gwiazd i Galaktyki. Wyselekcjonowanie spośród wszystkich obserwowanych komet długookresowych tych, które po raz pierwszy wchodzi w sferę widzialności bezpośrednio z obłoku Oorta ma istotne znaczenie dla wnioskowania o powstaniu i historii tego rezerwuaru obiektów na podstawie dynamicznych i fizycznych cech zaobserwowanych komet.

W pracy P1 uzyskano komplet orbit pierwotnych komet długookresowych a następnie prześle-

dzono przeszły ruch tych komet o jeden obieg wstecz z uwzględnieniem perturbacji galaktycznych, pokazując, że połowa z nich przeszła pomiędzy planetami podczas poprzedniego przejścia peryhelium i w związku z tym nie może być traktowana jako komety pojawiające się w otoczeniu Słońca po raz pierwszy.

Praca P2 poświęcona jest szczegółowemu zbadaniu efektów pojedynczego przejścia gwiazdy pod nieobecność innych perturbacji. Pokazano asymetrię rozkładu kierunków peryhelium komet obserwowanych i zmienną w czasie strukturę strumienia komet generowanych przez gwiazdę. Badania metodami Monte Carlo prowadzono przy użyciu dwóch różnych, opracowanych przez autora, modeli numerycznych obłoku.

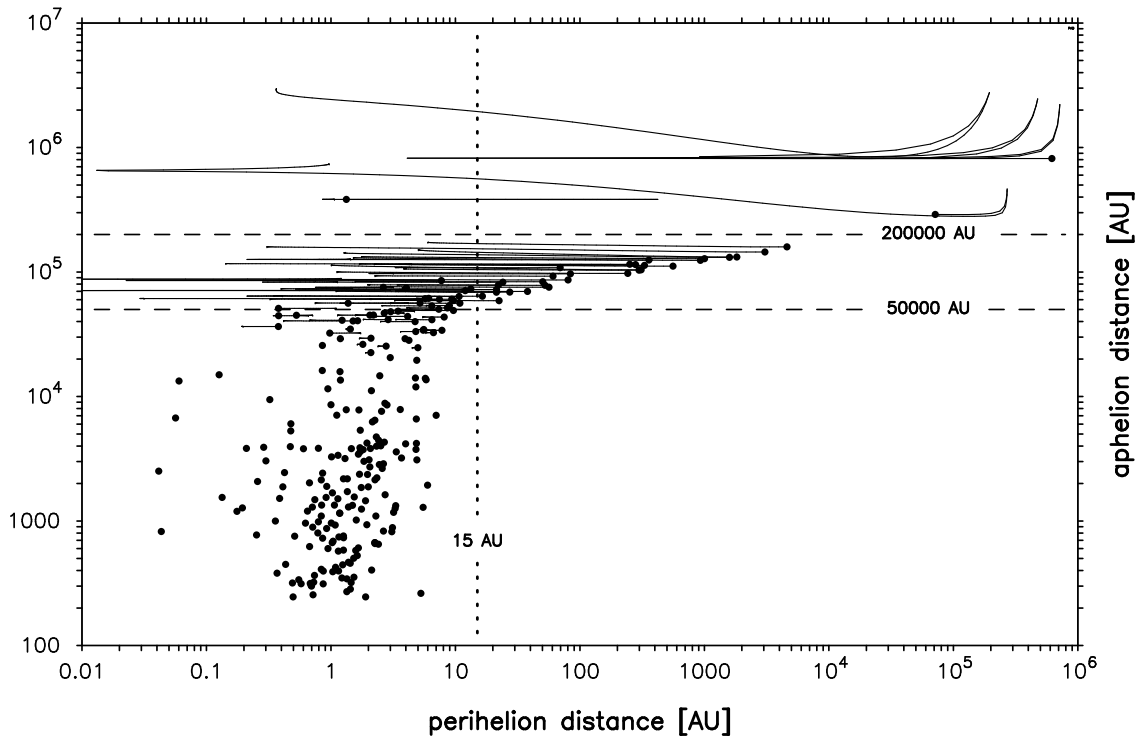
W pracy P3 rozbudowano model dynamiczny o dodatkowe, jednoczesne uwzględnienie perturbacji galaktycznych. Spowodowało to znaczny wzrost złożoności obliczeniowej zmuszając do stosowania specjalnych algorytmów symulacji, korzystających z tzw. „filtrów dynamicznych”. Porównanie niektórych wyników symulacji z obserwacjami doprowadziło do wniosku o konieczności uwzględniania podczas symulacji również perturbacji planetarnych. Ponieważ bezpośrednio ich uwzględnienie w rachunkach nie jest możliwe, zastosowano opracowaną przez autora metodę przybliżoną, opartą o współczynnik nieprzezroczystości Układu Słonecznego dla komet długookresowych.

W pracy P4 dokonano rozległego przeglądu danych katalogowych, wyszukując spośród gwiazd o znanym położeniu i prędkości przestrzennej te, które w przeszłości zbliżyły się lub przyszłości mogą zbliżyć się do Słońca i zaburzać ruch komet w obłoku Oorta. Po szczegółowej analizie i weryfikacji otrzymano listę 21 „perturberów gwiazdowych”, wpływających w niedawnej przeszłości lub obecnie na ruch tych komet. Przeprowadzono analizę wpływu tych obiektów na strumień obserwowanych komet oraz przeprowadzono ponownie badania przeszłego ruchu komet długookresowych, tym razem z uwzględnieniem tak perturbacji galaktycznych jak i gwiazdowych. Otrzymane w pracy P1 wyniki i wyprowadzona z nich nowa definicja komety „dynamicznie nowej” została potwierdzona również w tym rozbudowanym modelu dynamicznym.

3 Dynamiczna historia komet długookresowych, uwzględniająca wpływ dysku galaktycznego - praca P1

W kolejnych wydaniach wspomnianego wyżej Katalogu Orbit Komet [Marsden and Williams, 1997, 2003] zamieszczone są elementy orbit oskulacyjnych wszystkich obserwowanych komet, zarówno krótko- jak i długookresowych. W katalogu tym, poza odwrotnościami wielkiej półosi dla tzw. orbit pierwotnych (przed wejściem komety w strefę perturbacji planetarnych) i przyszłych (gdy kometa opuszcza przestrzeń międzyplanetarną) nie podano innych elementów tych orbit. Badanie przeszłego ruchu tych komet wymaga jednak znajomości kompletu elementów orbit pierwotnych, tak więc wobec braku takich danych w literaturze, pierwszym etapem omawianej pracy było uzyskanie kompletu orbit pierwotnych komet długookresowych. Jako granicę zauważalnych perturbacji planetarnych, korzystając z wyników podanych przez Todorovic-Juchniewicz [1981] i dodając pewien „margines bezpieczeństwa”, przyjęto odległość heliocentryczną równą 250 AU. Elementy oskulacyjne komet zaczerpnięto z XII wydania katalogu Marsdena [Marsden and Williams, 1997], ograniczając się do komet długookresowych klas 1 i 2, czyli do podzbioru komet o najlepiej wyznaczonych orbitach [Marsden et al., 1973]. Ponieważ od publikacji katalogu upłynęło ponad dwa lata, dane wyjściowe uzupełniono o elementy oskulacyjne 20 komet długookresowych odkrytych w latach 1998 i 1999, ostatecznie przeprowadzając rachunki dla 327 obiektów.

Precyzyjne śledzenie przeszłego ruchu tych komet w przestrzeni międzyplanetarnej aż do odległości 250 AU przeprowadzono w ramach heliocentrycznego, post-newtonowskiego modelu dynamicznego, współrzędne ciał perturbujących czerpiąc z najnowszej efemerydy JPL DE406 [Standish, 1998]. Użyto w tym celu oryginalnego oprogramowania opracowanego przez autora niniejszej rozprawy, zawierającego między innymi procedury dostępu do efemeryd JPL, udostępnione jako 'public domain' (<ftp://ftp.astro.amu.edu.pl/pub/jpleph>). Ze względu na konieczną precyzję takich obliczeń szereg parametrów programu dobierano porównując wyniki z rezultatami testowych cał-



Rysunek 1: Przeszła ewolucja odległości perihelium i aphelium komet długookresowych w czasie jednego obiegu orbitalnego (Rys.1, P1).

kowań w poczwórnej precyzji (27 cyfr znaczących). Otrzymany zestaw orbit pierwotnych dostępny jest publicznie pod adresem http://main2.amu.edu.pl/~dybol/DH/org_elem.dat. Warto zwrócić uwagę, że 44 spośród badanych komet nie dociera do 250 AU od Słońca, co eliminuje je z dalszych rozważań. Ponieważ interesowało nas poprzednie przejście przez perihelium, pominięto też 28 komet o hiperbolicznych orbitach pierwotnych.

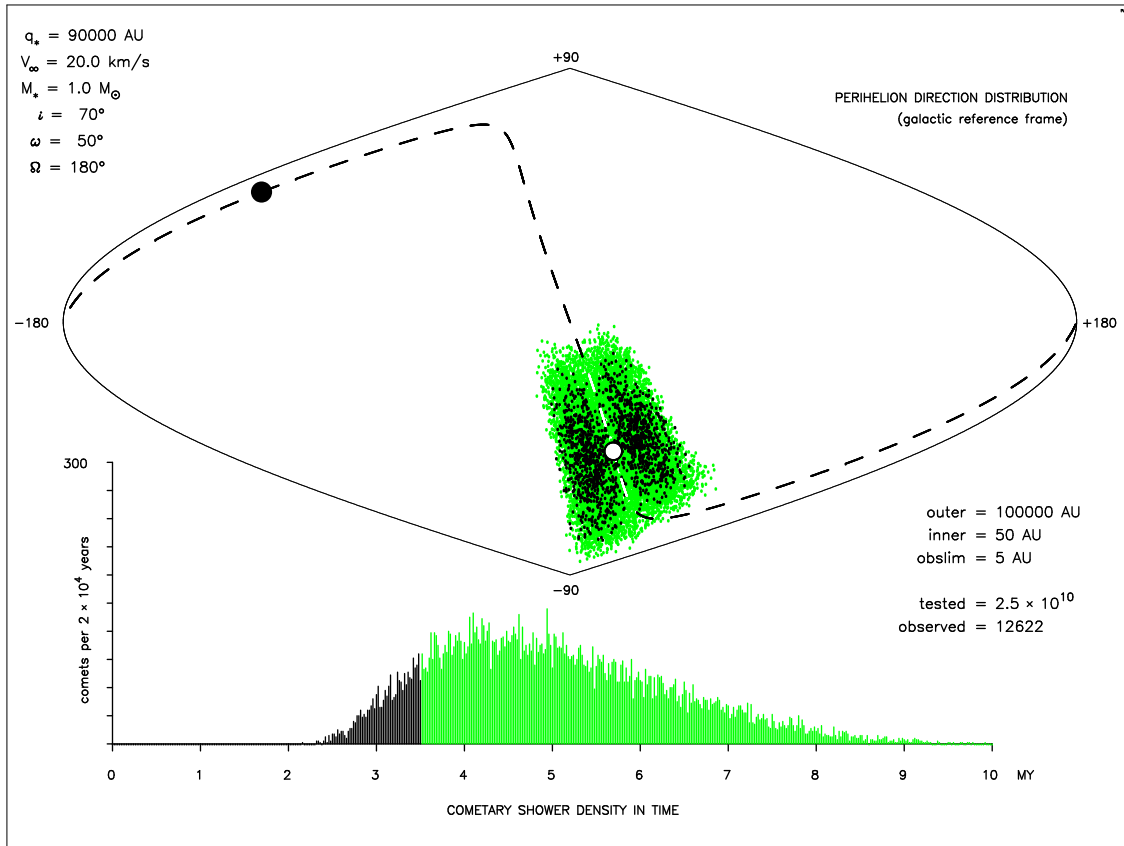
Ruch pozostałych 255 komet całkowano numerycznie wstecz do poprzedniego perihelium z uwzględnieniem perturbacji pływowych od materii dysku galaktycznego. Całość tych obliczeń ilustruje najlepiej Rysunek 1, zaczerpnięty z pracy P1.

Powstał on w ten sposób, że na początku całkowania ruchu komety wstecz stawiana była mała kropka, taka sama po każdym kroku całkowania, natomiast na końcu, czyli w poprzednim perihelium, rysowana była duża kropka. Z rysunku widać od razu, że żadna z komet o wielkich półosiach poniżej 25 000 AU, wbrew przyjmowanej wcześniej definicji, nie może być uważana za „dynamicznie nową”, ponieważ ich poprzednie perihelia leżały głęboko w obszarze perturbacji planetarnych (przybliżoną granicę znaczących perturbacji od pełniących tu dominującą rolę Jowisza i Saturna, równą 15 AU, zaznaczono pionową, przerywaną linią). Jest to najważniejszy wynik tej pracy. Szczegółowa analiza pokazuje, że spośród komet uważanych dotychczas za „dynamicznie nowe” prawie połowa przechodziła podczas poprzedniego pojawienia bliżej niż wspomniane 15 AU. W końcowej części omawianej pracy poddano weryfikacji powtarzany często pogląd, że komety „dynamicznie nowe” są bardziej aktywne. Zgromadzone dane nie potwierdziły tej tezy.

W pracy P1 pokazano też, że być może istotnym, dodatkowym czynnikiem będą tu perturbacje od pobliskich gwiazd, co zostało uwzględnione i szczegółowo przedyskutowane w pracy P4.

Najważniejszym wynikiem pracy P1 jest pokazanie, że:

- wiele komet, uważanych dotąd powszechnie za „dynamicznie nowe”, przeszło w poprzednim perihelium pomiędzy planetami,
- definicja komety „dynamicznie nowej” powinna uwzględniać jej przeszły ruch.



Rysunek 2: Rozkład kierunków periheliów i przebieg zmian w czasie strumienia komet obserwowalnych po przejściu gwiazdy w odległości 90 000 AU od Słońca. Pozostałe parametry przejścia gwiazdy są pokazane w lewym, górnym rogu. Po prawej u dołu podano główne parametry obłoku: zewnętrzną i wewnętrzną jego granicę, granicę obserwowalności komet oraz liczebność obłoku i liczbę otrzymanych komet obserwowalnych. (Rys.9, P2)

4 Wpływ pojedynczego przejścia gwiazdy poprzez lub w pobliżu obłoku Oorta na ruch komet - praca P2

Punktem wyjścia do badania za pomocą symulacji Monte Carlo skutków bliskiego przejścia gwiazdy na ruch komet w obłoku Oorta jest numeryczny model samego obłoku. W pracy P2 przedstawiono dwa takie modele skonstruowane przez autora. Prezentują one jakby dwie skrajności: model DQT, oparty o klasyczną już pracę Duncan et al. [1987], charakteryzuje się symetrią sferyczną i dużą przewagą komet w wewnętrznej części obłoku, podczas gdy model DLDW, oparty o nowe, nieopublikowane jeszcze wyniki symulacji powstania obłoku Oorta [Dones et al., 1998, 2000a,b], jest w swojej wewnętrznej części wyraźnie spłaszczony a zdecydowana większość komet znajduje się w części zewnętrznej obłoku.

Do wyliczania wpływu perturbacji od przechodzącej gwiazdy na ruch konkretnej komety, wylosowanej z obłoku używano tzw. poprawionego przybliżenia impulsowego, opracowanego przez autora [Dybczyński, 1994]. Ponieważ badane zjawiska, takie jak skierowanie komety na orbitę obserwowalną lub wyrzucenie jej z obłoku w przestrzeń międzygwiazdową są generalnie mało prawdopodobne, dla uzyskania wiarygodnych wyników przeprowadzono symulacje dla $10^8 - 10^{10}$ komet. W pracy P2 przedstawiono oszacowanie prawdopodobieństw przejścia komety na orbitę obserwowalną lub ucieczki po hiperboli dla różnych parametrów dynamicznych i różnych geometrii przejścia gwiazdy, zarówno poprzez jak i w pobliżu obłoku Oorta. Warto podkreślić, że każdy

punkt krzywych przedstawionych na rysunkach 4, 5 i 6 z pracy P2 to wynik odrębnej, czasochłonnej symulacji.

W przeciwieństwie do rozpowszechnionego poglądu [Weissman, 1996], że nawet bliskie przejście gwiazdy nie powoduje asymetrii w strumieniu komet obserwowalnych, Dybczyński [2002a,c] pokazał, że asymetrie takie występują i są znaczące. W pracy P2 pokazano, że nawet stosunkowo słaba (a w związku z tym bardziej prawdopodobna) perturbacja, wywołana przez przejście gwiazdy o masie równej $1 M_{\odot}$ w odległości 90 000 AU od Słońca z prędkością 20 km/s daje bardzo silną koncentrację kierunków peryhelium na sferze niebieskiej. Widać to wyraźnie na Rysunku 2, zaczerpniętym z pracy P2.

Na rysunku tym, w jego górnej części przedstawiono rozkład na sferze niebieskiej kierunków peryhelium komet obserwowalnych na skutek przejścia gwiazdy w heliocentrycznym układzie galaktycznym. Przerywaną linią zaznaczono położenie płaszczyzny hiperbolicznej orbity gwiazdy, pełnym kółkiem jej peryhelium a pustym kółkiem anty-peryhelium, wokół którego koncentrują się kometarne linie apsyd. Widać, że koncentracja jest największa dla komet pojawiających się w otoczeniu Słońca jako pierwsze (czarne kropki). W dolnej części Rysunku 2 mamy histogram gęstości strumienia komet obserwowalnych w ciągu 10 milionów lat od przejścia gwiazdy.

W końcowej części pracy P2 przedstawiono także rozkłady wielkich pósoi komet obserwowalnych na skutek przejścia gwiazdy, dla obu modeli obłoku i dla różnych minimalnych odległości gwiazdy od Słońca. Maksimum tych rozkładów silnie zależy od odległości przejścia gwiazdy, są one jednak silnie poszerzone na skutek oddziaływania gwiazdy na cały obłok.

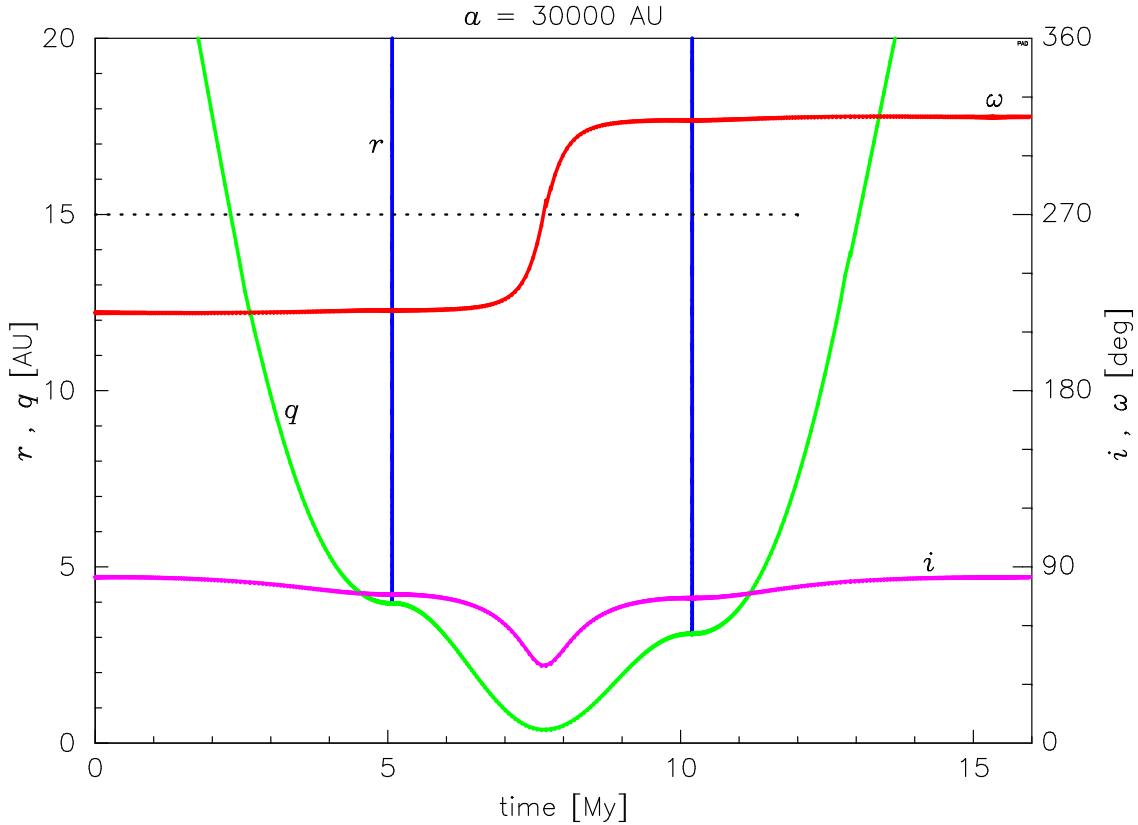
Główne wnioski z pracy P2 to stwierdzenie, że:

- spłaszczenie centralnej części modelu DLDW nie wpływa zarówno na prawdopodobieństwa obserwowalności jak i na rozkład kierunków peryhelium,
- przewaga komet w zewnętrznej części modelu DLDW czyni go wyraźnie bardziej czułym na perturbacje gwiazdowe w porównaniu do modelu DQT,
- prawdopodobieństwo usunięcia komety z obłoku, niezależnie od modelu i parametrów przejścia gwiazdy, jest około dwa rzędy większe od prawdopodobieństwa skierowania komety na orbitę obserwowalną,
- strumień komet obserwowalnych bezpośrednio na skutek przejścia gwiazdy jest bardzo mały,
- poszukiwania zagęszczeń kierunków peryhelium komet skierowanych do Słońca przez konkretną gwiazdę należy prowadzić głównie wśród komet pojawiających się w sferze widzialności jako pierwsze.

5 Jednoczesne gwiazdowe i galaktyczne perturbacje w ruchu komet z obłoku Oorta - praca P3

Przedstawiona w pracy P2 analiza skutków pojedynczego przejścia gwiazdy poprzez lub w pobliżu obłoku Oorta nie uwzględniała perturbacji galaktycznych. Pozwoliło to klarownie opisać skutki takiego przejścia i strukturę zbioru komet skierowanych do Słońca bezpośrednio przez oddziaływanie gwiazdy. Jeśli jednak chcemy zbadać wpływ rzeczywistych gwiazd na populację obserwowanych dziś komet, co uczynimy w pracy P4, należy najpierw opisać skutki jednoczesnego działania perturbacji gwiazdowych i galaktycznych na ruch komet w obłoku Oorta, i temu poświęcona jest praca P3.

Takie rozszerzenie modelu dynamicznego niesie ze sobą poważne utrudnienie rachunkowe: efekty perturbacji gwiazdowych liczone są jako jednorazowy efekt zmiany prędkości komety, podczas gdy perturbacje galaktyczne działają stale, dając pożądaną efekt niejednokrotnie po bardzo długim czasie, co oznacza konieczność całkowania numerycznego ruchu każdej komety wylosowanej z obłoku dla przeprowadzenia symulacji. Jakkolwiek istnieje rozwiązanie analityczne uśrednionych równań ruchu komety pod wpływem perturbacji galaktycznych, to ze względu na uśrednienie zagadnienia po anomalii średniej i wynikającą z tego utratę informacji o położeniu samej komety na

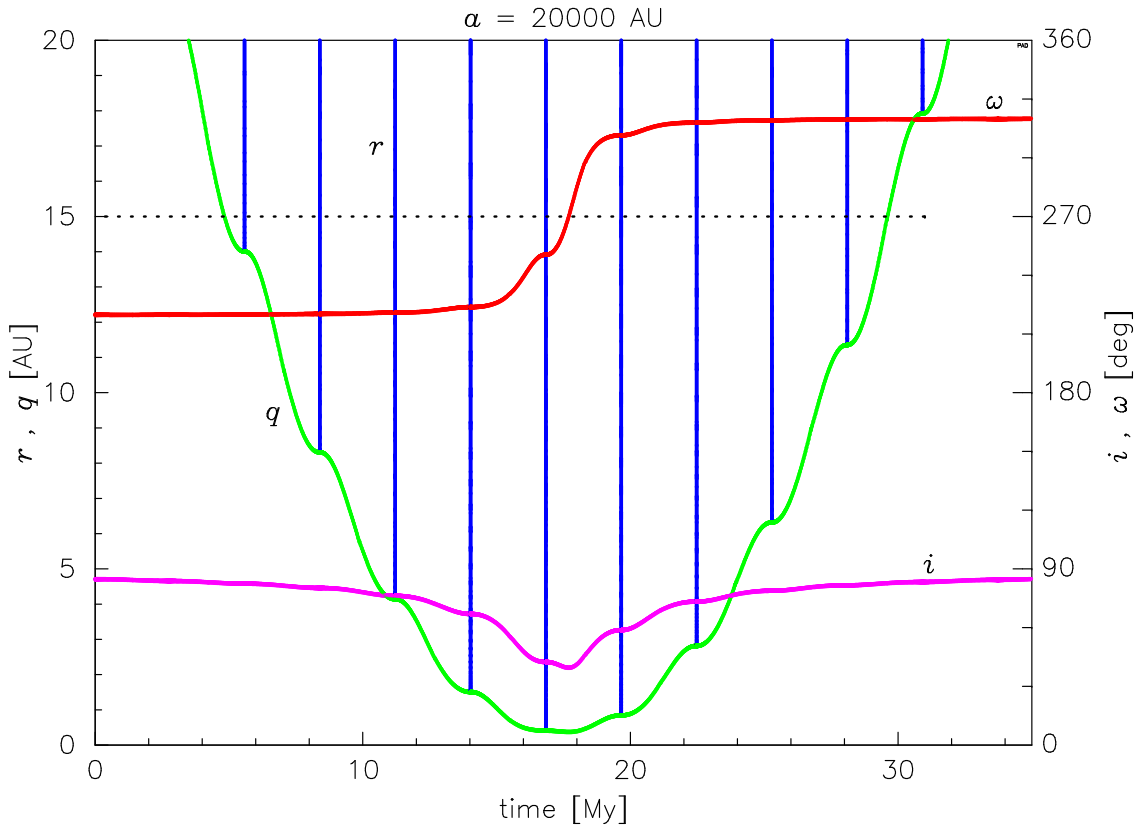


Rysunek 3: Przykład długookresowej ewolucji orbity komety z obłoku Oorta pod wpływem perturbacji Galaktycznych. Zauważmy, że gdy oskulacyjna odległość perihelium osiąga maksimum, kometa jest w aphelium, nie może więc być zaobserwowana.

jej orbicie, skorzystanie z tej znacznie szybszej metody rachunkowej nie jest możliwe. Ilustruje to dobrze Rysunek 3, zaczerpnięty z pracy [Dybczyński, 2005].

Na rysunku tym przedstawiony jest przykład długookresowych zmian elementów oskulacyjnych orbity komety z obłoku Oorta pod wpływem perturbacji od materii dysku galaktycznego. Pionowe, niebieskie linie pokazują zmianę odległości heliocentrycznej tej komety. Warto zwrócić uwagę na ściśle synchroniczną ewolucję elementów orbity: odległość perihelium q (linia zielona) oraz nachylenie i (do płaszczyzny dysku galaktycznego, linia różowa) osiągają minimum dokładnie w tym samym momencie, dodatkowo argument perihelium ω (linia czerwona) przechodzi wtedy przez 90° lub 270° . Rozwiązanie analityczne zagadnienia uśrednionego po anomalii średniej komety dobrze opisuje przebieg zmian elementów, informacja o pozycji komety na jej orbicie jest jednak utracona. Nieznajomość pozycji komety spowoduje, że pokazany na Rysunku 3 przypadek byłby zakwalifikowany jako kometa przechodząca poniżej 1 AU od Słońca (tyle wynosi minimum q) podczas gdy w rzeczywistości kometa jest w tym czasie w aphelium!

Im półoś wielka komety jest mniejsza tym wolniejsza jest ewolucja orbity pod wpływem Galaktyki i tym więcej przejść przez perihelium „zmięści” się w jednym minimum q , co widać na Rysunku 4. Włączenie wszystkich tych pojawień komety do wyników symulacji prowadzi do rezultatu sprzecznego z obserwacjami [Dybczyński, 2004, 2005]. W rzeczywistości podczas kolejnych pojawień ruch komety jest zaburzany przez planety i dopiero rozszerzenie modelu dynamicznego o perturbacje planetarne pozwala uzyskać zgodność z obserwacjami. Wobec niemożliwości bezpośredniego wyznaczenia tych perturbacji na interwałach rzędu milionów lat w pracy P3 zastosowano opracowane specjalnie w tym celu przez autora niniejszej rozprawy przybliżenie, oparte o współczynnik nieprzezroczystości Układu Słonecznego [Dybczyński, 2004].



Rysunek 4: Komety o mniejszej wartości wielkich półosiach wielokrotnie przechodzą przez Układ Planetarny w czasie jednego minimum q .

W algorytmie symulacji Monte Carlo jednoczesnych perturbacji gwiazdowych i galaktycznych w pracy P3 użyty został tzw. „filtr dynamiczny”, pozwalający na ok. dziesięciokrotne przyspieszenie rachunków. Wykorzystuje on analityczne rozwiązanie uśrednionych równań ruchu do oszacowania najmniejszej możliwej wartości odległości peryhelium. Pozwala to natychmiast po wyliczeniu skutków przejścia gwiazdy zdecydować, czy dana kometa może stać się obserwowalna, a tym samym na uniknięcie ok. 90% długotrwałych całkowań numerycznych komet, które nigdy nie zbliżą się do Słońca.

Taki rozbudowany program symulacyjny, uwzględniający perturbacje gwiazdowe, galaktyczne i planetarne pozwala na uzyskanie znacznie bardziej realistycznego obrazu ewolucji orbit komet w obłoku Oorta oraz umożliwia szczegółową analizę strumienia komet obserwowalnych. Ponieważ perturbacje galaktyczne są bardziej efektywne w kierowaniu komet do sfery obserwowalności niż perturbacje gwiazdowe i maskują generowane przez gwiazdy asymetrie w strumieniu tych komet część symulacji przeprowadzono używając modeli obłoku pozbawionych komet możliwych do zaobserwowania tylko pod wpływem Galaktyki. Używano w tym celu tego samego „filtru dynamicznego”, pomijając jeszcze przed wyliczeniem perturbacji od gwiazdy te komety, którym Galaktyka może zmniejszyć odległość peryhelium poniżej granicy obserwowalności. Wynik takich symulacji przedstawiono na rysunkach 5,6 i 7 w pracy P3. Widać na nich nadal silną asymetrię kierunków peryhelium obserwowalnych komet wygenerowanych przejściem gwiazdy.

Główne wyniki tej pracy to pokazanie, że:

- przejście gwiazdy nie zwiększa liczebności obserwowalnej części obłoku Oorta, tym samym na dłuższych interwałach czasu średni strumień tych komet nie zmienia się,
- perturbacje gwiazdowe powodują natomiast wymianę kilku procent komet części obserwowalnej i nieobserwowalnej obłoku, co zapewnia stałe kompensowanie ubytku spowodowanego

perturbacjami planetarnymi w czasie przechodzenia komet przez peryhelium,

- jedynymi śladami niedawnego przejścia gwiazdy mogą być asymetrie rozkładu kierunków peryhelików i krótkookresowe wahania strumienia komet obserwowalnych, szczególnie wyraźnie widoczne dla komet pojawiających się w otoczeniu Słońca jako pierwsze po przejściu gwiazdy,
- model DLDW jest bardziej czuły na perturbacje gwiazdowe gdyż większa część komet jest w nim zawarta w części zewnętrznej.

6 Perturbacje od rzeczywistych gwiazd z otoczenia Słońca oraz komety „dynamicznie nowe” - praca P4

Stale rosnąca nasza wiedza o położeniach i prędkościach przestrzennych gwiazd oraz dostęp do coraz liczniejszych internetowych baz danych (The NASA Astrophysics Data System, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Centre de Données astronomiques de Strasbourg, Database for Nearby Stars, Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg, The Nearby Stars Database Project at NASA-Ames, Research Consortium on Nerby Stars) pozwoliła w pracy P4 na przedstawienie listy 21 gwiazd (Tabela 1) mogących wpływać na ruch komet w obłoku Oorta. Lista ta jest końcowym wynikiem szeroko zakrojonych poszukiwań, przeprowadzonych wśród ponad stu tysięcy gwiazd o znanych paralaksach, głównie z katalogu HIPPARCOS-a. Wstępna selekcja, oparta na założonej z góry wartości prędkości radialnej (100 km/s) pozwoliła wybrać kilka tysięcy kandydatów, mogących potencjalnie zbliżyć się do Słońca. Następnie dla tych gwiazd poszukiwano opublikowanych pomiarów prędkości radialnej [Nordström et al., 2004, Nidever et al., 2002, Grenier et al., 1999b,a, Wielen et al., 2001, Maxted and Marsh, 1999, Barbier-Brossat and Figon, 2000, Wilson, 1953], pozwalających na wyliczenie rzeczywistej, najmniejszej odległości gwiazda-Słońce. Wśród znalezionych gwiazd zbliżających się do Słońca wiele obiektów wskazano po raz pierwszy, bądź to dzięki niedawnym pomiarom prędkości radialnej lub na skutek wykorzystania nowych, dokładniejszych ruchów własnych, zawartych w katalogu ARIHIP [Wielen et al., 2001]. Uwzględniono przy tym prace, wskazujące na znalezione błędy w katalogu HIPARCOS-a, np. Fabricius and Makarov [2000], Gray et al. [2003]. Produktem ubocznym tych poszukiwań jest lista „obiecujących” gwiazd, dla których nie znaleziono zmierzonej prędkości radialnej [Dybczynski and Kwiatkowski, 2003]. Ostatecznie wybrano 21 gwiazd, dla których otrzymane wyniki utrzymują się w przyjętych granicach akceptowalnych niepewności, i które w ciągu ostatnich 10 milionów lat zbliżyły się do Słońca na mniej niż 2,5 parseka. Wyjątek uczyniono dla systemu Algola, który przeszedł obok Słońca w odległości 2,65 parseka około 7 milionów lat temu, ale z powodu jego wielkiej sumarycznej masy, $5.8 M_{\odot}$, już wcześniej sugerowano że mógł wpływać na ruch komet w obłoku Oorta [García-Sánchez et al., 2001]. W Tabeli 1 podano nazwy i podstawowe parametry 21 gwiazd, dla których możliwe są przeszłe bądź przyszłe ciasne zblizenia do Słońca.

Zbadanie wpływu rzeczywistych gwiazd z otoczenia Słońca na ewolucję orbit komet wymagało kolejnej, znaczącej modyfikacji modelu dynamicznego. W pracach P2 i P3 badane były zawsze skutki pojedynczego przejścia gwiazdy. W pracy P4 rozbudowano model tak, by można było w trakcie symulacji uwzględniać (jednocześnie z perturbacjami galaktycznymi i planetarnymi) skutki wielu, następujących nieregularnie po sobie (a czasami nakładających się w czasie) przejść gwiazdowych. Wymagało to całkowania numerycznego ruchu każdej wylosowanej komety, jednocześnie z ruchem 21 gwiazd w przestrzeni wokół Słońca. W ruchu gwiazd (newtonowskie zagadnienie n-ciał) uwzględniano również oddziaływanie Galaktyki. Wyniki symulacji obejmującej wpływ wszystkich wymienionych wyżej efektów przedstawione są na Rysunku 5. Jak łatwo zauważyć, zblizenie którejkolwiek z 21 rozpatrywanych gwiazd nie spowodowało zauważalnego wzrostu strumienia komet pojawiających się w sferze widzialności, co wynika ze zbyt dużej odległości przejść i/lub zbyt małej masy tych gwiazd. Z tego samego powodu w rozkładzie kierunków peryhelików komet obserwowalnych, przedstawionym w górnej części Rysunku 5 nie widać żadnych asymetrii spowodowanych przejściami gwiazd, wbrew wcześniejszym sugestiom [Biermann et al., 1983, Lüst,

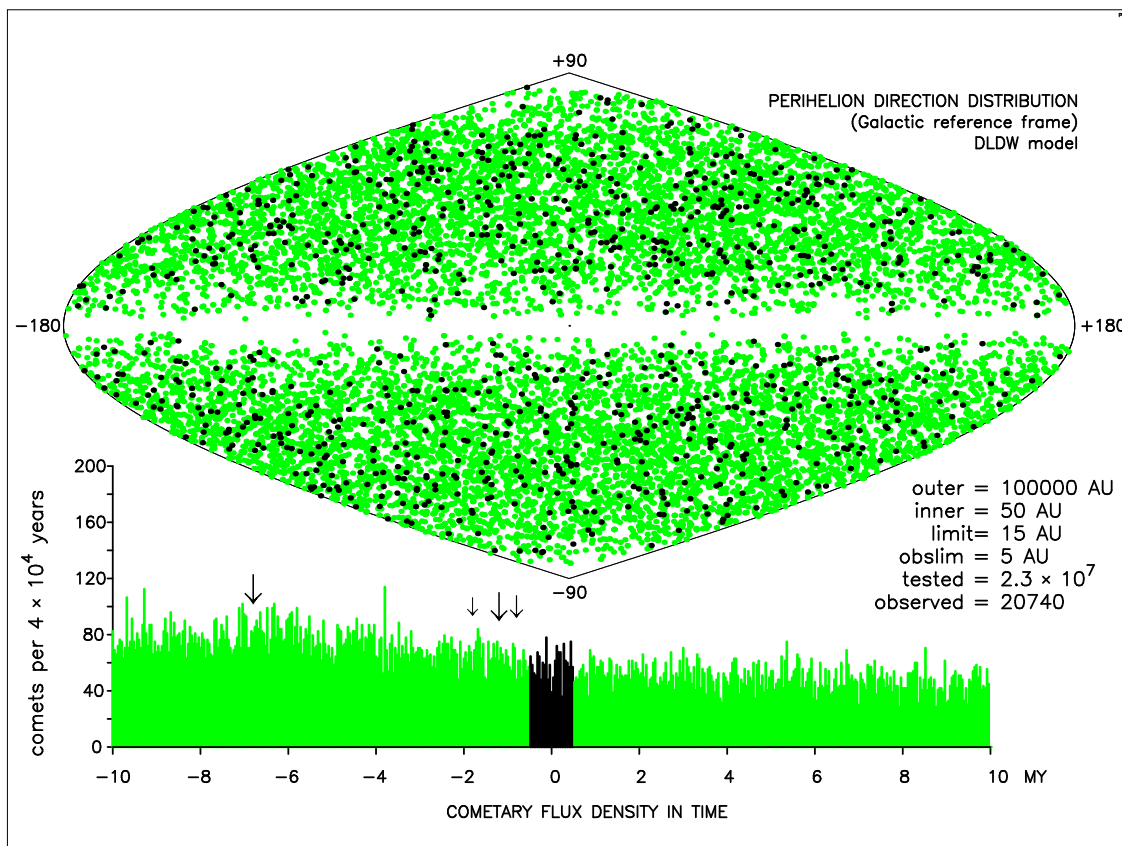
Tablica 1: Lista 21 niedawnych i obecnych „perturberów” gwiazdowych, wpływających na ruch komet w obłoku Oorta, przedstawiona w kolejności ich pojawiania się w pobliżu Słońca. W trzeciej kolumnie zamieszczamy dodatkowo ich oszacowane masy w masach Słońca. Kolumna czwarta zawiera najmniejszą odległość na jaką dana gwiazda zbliża się do Słońca (w parsekach). Ostatnia kolumna to moment czasu największego zbliżenia w tysiącach lat (zero odpowiada terażniejszości, ujemne epoki oznaczają przejścia w przeszłości). Wiersze wydrukowane czcionką pogrubioną oznaczają gwiazdy wskazane po raz pierwszy jako zbliżające się do Słońca. (Tabela 5, P4)

HIP	Nazwa gwiazdy	M_*	D_{min}	T_{min}
14576	Algol	5.8	2.655	-6896.00
30344	HD44821	0.92	1.852	-1987.48
26624	HD 37594	1.5	1.725	-1801.42
93506	HD 176687	5.63	2.299	-1205.6
27288	GJ 217.1	2.0	1.316	-822.51
26373	HD 37572	0.76	2.058	-719.36
30067	HD 43947	0.94	1.998	-660.70
12351	GJ 1049	0.7	1.466	-611.92
13769	GJ 120.1C	0.1	2.271	-504.24
26335	GJ 208	0.7	1.587	-495.18
13772	GJ 120.1	1.0	2.230	-431.78
27887	GJ 2046	0.75	2.008	-402.52
22738	GJ 2036	0.5	2.202	-261.97
14754	GJ 127.1A	0.61	0.803	-149.13
16537	ϵ Eridani	0.85	2.171	-105.21
24186	Gwiazda Kapteyna	0.281	2.148	-10.93
54035	GJ 411	0.464	1.444	+20.02
70890	Proxima	0.107	0.954	+26.70
71681	α Centauri B	0.916	0.975	+27.66
71683	α Centauri A	0.925	0.975	+27.76
32349	Syriusz	2.5	2.299	+65.74

1984].

Zgromadzone w trakcie realizacji pracy P4 dane potwierdziły wcześniejsze wyniki [Mullari and Orlov, 1996, Dybczyński and Kankiewicz, 1999, García-Sánchez et al., 1999, 2001], wskazujące, że w niedalekiej przyszłości nastąpi wyjątkowo ciasne zbliżenie gwiazdy do Słońca. Będzie to przejście gwiazdy Gliese 710 w odległości 43 000 AU od Słońca za ok. 1,3 mln lat. Przeprowadzono symulację tego przejścia, uzyskując rozkłady parametrów powstałego w ten sposób strumienia komet obserwowalnych (Rys. 3, praca P4). Pokazano, że związany z tym przejściem strumień komet będzie niemal całkowicie „ukryty” w znacznie liczniejszej populacji komet sprowadzanych w sferę widzialności przez perturbacje galaktyczne (Rys.4, praca P4).

W ostatniej części pracy P4 przeprowadzono gruntowną weryfikację zaproponowanej w pracy P1 definicji komety „dynamicznie nowej”. Wykonane wtedy obliczenia wskazywały, że perturbacje od pobliskich gwiazd mogą w niektórych przypadkach modyfikować otrzymane wartości odległości perihelium w poprzednim przejściu komety. Dysponując listą potencjalnych gwiazdowych „perturberów” (Tablica 1) można było powtórzyć wykonane wtedy rachunki, tym razem uwzględniając jednocześnie perturbacje galaktyczne i gwiazdowe. Do obliczeń wzięto też większą liczbę komet długookresowych, opierając się na najnowszej edycji Katalogu Orbit Kometarnych [Marsden and Williams, 2003], co zwiększyło liczbę obiektów o ok. 20%. Dla 386 komet klas 1 i 2 wyliczono orbity pierwotne. Po odrzuceniu komet o hiperbolicznych orbitach pierwotnych oraz komet, które nie sięgają w swoim ruchu odległości 250 AU od Słońca, prześlędzono numerycznie ruch 308 komet o jeden obieg wstecz, uwzględniając perturbacje galaktyczne i gwiazdowe. Wyniki tej analizy (Rysunek 2, praca P4) pokazują, że podstawowe wnioski z pracy P1 pozostają całkowicie słuszne.



Rysunek 5: Obraz symulowanego strumienia obserwowalnych komet długookresowych, otrzymanych z obłoku Oorta (model DLDW) pod wpływem perturbacji Galaktycznych i jednoczesnego oddziaływania 21 gwiazd z otoczenia Słońca. Górna część rysunku zawiera rozkład kierunków periheliów tych komet na sferze niebieskiej, kolorem czarnym wyróżniono komety pojawiające się w układzie planetarnym na odcinku miliona lat wokół chwili obecnej. W dolnej części mamy obraz zmian strumienia obserwowalnych komet jednopojawieniowych w czasie 20 milionów lat. Ponad histogramem, strzałkami zaznaczono momenty przejścia czterech najsilniej oddziałujących perturbatorów. Zero osi czasu odpowiada chwili obecnej. Powolny spadek strumienia komet jest wynikiem stopniowego usuwania ich przez perturbacje planetarne (Rysunek 1, praca P4).

Spośród komet uważanych dotąd za „dynamicznie nowe” (108 komet o $a > 10\,000$ AU) ponad połowa (64) przeszła w poprzednim perihelium poniżej granicy znaczących perturbacji planetarnych (15 AU), nie mogą być więc uważane za obiekty przychodzące po raz pierwszy bezpośrednio z obłoku Oorta. Wykonane obliczenia pozwoliły na utworzenia listy 44 komet (Tabela 7, praca P4), o których w świetle dzisiejszej wiedzy o ich ruchu można twierdzić, że przywędrowały do nas bezpośrednio z obłoku Oorta, czyli zasługują na miano „dynamicznie nowych”.

Do najistotniejszych wniosków z pracy P4 należą stwierdzenia, że:

- Dzisiejszy stan wiedzy o gwiazdach z otoczenia Słońca pozwala na skompletowanie listy jedynie 21 gwiazd, które w niedawnej przeszłości wpływały lub w niedalekiej przyszłości będą wpływać na ruch komet w obłoku Oorta.
- Znane dziś „perturbery” gwiazdowe przechodzą zbyt daleko i/lub mają zbyt małą masę by wywołać zauważalny wzrost strumienia komet obserwowalnych lub widoczne asymetrie w rozkładzie kierunków periheliów tych komet. Oznacza to, że wskazywane przez niektórych autorów zagęszczenia kierunków periheliów zaobserwowanych komet długookresowych mu-

szą mieć inne wytłumaczenie, np. Murray [1999], Matese et al. [1999], Matese and Lissauer [2002].

- Powszechnie przyjęta definicja komety "dynamicznie nowej" powinna być zrewidowana przez uwzględnienie jej przeszłego ruchu, w szczególności informacji o jej poprzedniej odległości peryhelium. Więcej niż połowa komet uważanych za „dynamicznie nowe” doznała podczas poprzedniego przejścia peryhelium znaczących perturbacji planetarnych.
- Przejście gwiazdy Gliese 710 w odległości 43 000 AU od Słońca za ok. 1,3 miliona lat nie spowoduje znaczącego wzrostu strumienia komet obserwowalnych a asymetria tego strumienia będzie niemal całkowicie „ukryta” w znacznie liczniejszym tle komet obserwowalnych dzięki oddziaływaniu dysku galaktycznego.

7 Podsumowanie

Składające się na niniejszą rozprawę prace zawierają kompletną analizę skutków bliskich przejść gwiazd przez lub w pobliżu obłoku Oorta z uwzględnieniem jednoczesnych perturbacji od dysku galaktycznego i perturbacji planetarnych. Wykonano kilkadziesiąt symulacji Monte Carlo takich przejść dla pełnego zakresu dynamicznych i geometrycznych parametrów zagadnienia. W obliczeniach wykorzystywano wymiennie dwa różne, numeryczne modele obłoku Oorta oparte o prace odtwarzające jego powstanie wraz z całym Układem Słonecznym.

Wobec wielkiej czasochłonności takich symulacji konieczne było opracowanie specjalnych technik optymalizacji rachunków, w tym efektywnego „filtru dynamicznego”. Na użytek tych badań opracowano też nową, bardzo szybką, przybliżoną metodę uwzględniania perturbacji planetarnych na ruch komet. Całość rachunków i graficznej prezentacji wyników wykonano z użyciem oryginalnego oprogramowania, opracowanego i udoskonalanego na przestrzeni wielu lat przez autora niniejszej rozprawy.

Obszerny przegląd aktualnych informacji o gwiazdach z otoczenia Słońca pozwolił na skompletowanie listy 21 gwiazd mogących wpływać na ruch komet w obłoku Oorta. Wskazano też na obiekty, które powinny znaleźć się w planach obserwacji prędkości radialnych, bowiem pozostałe parametry kwalifikują je jako potencjalne „gwiazdowe perturbery”. Przeprowadzono symulację galaktycznych i gwiazdowych perturbacji na protokomety z obłoku Oorta, odpowiedzialnych za ich transfer do wnętrza układu Słonecznego, gdzie obserwowane są jako komety długookresowe. Pozwoliło to na weryfikację poglądów na źródła asymetrii w rozkładach kierunków peryheliów komet jednopojawieniowych oraz umożliwiło stwierdzenie, że obecny strumień komet długookresowych nie jest zmodyfikowany niedawnym przejściem gwiazdy.

Po raz pierwszy przeprowadzono też kompleksową analizę przeszłego ruchu zaobserwowanych dotąd komet długookresowych z uwzględnieniem perturbacji od dysku galaktycznego i sąsiednich gwiazd. Pokazano w ten sposób, że przyjmowana dotąd definicja komety „dynamicznie nowej”, oparta wyłącznie o wartość jej pólności wielkiej, jest niewłaściwa.

Główne wyniki niniejszej rozprawy można podsumować następująco:

- Wbrew dotychczasowym poglądom pokazano, że silna perturbacja gwiazdowa generuje strumień komet obserwowalnych o wyraźnej asymetrii rozkładu kierunków peryheliów. Potwierdzono też możliwy znaczny wzrost liczebności takiego strumienia w przypadku ciasnego przejścia masywnej gwiazdy.
- Znane dziś w bezpośrednim otoczeniu Słońca gwiazdy wpływają na ruch komet w obłoku Oorta zbyt słabo, by efekty te mogły być zauważone w populacji zaobserwowanych dotąd komet długookresowych. Efekty te są maskowane liczniejszym strumieniem komet napływającym do wnętrza Układu Słonecznego w efekcie ciągłych perturbacji galaktycznych.
- Również przewidywane w przyszłości, stosunkowo bliskie przejście gwiazdy Gliese 710 nie będzie źródłem zauważalnej modyfikacji strumienia nowych komet.

- Stosowana powszechnie definicja komety „dynamicznie nowej” ignoruje jej historię dynamiczną. Pokazano, że ponad połowa komet o wielkiej półosi $a > 10\,000$ AU w swoim poprzednim peryhelium przeszła poniżej granicy znaczących perturbacji planetarnych, co prowadzi do konieczności modyfikacji wspomnianej definicji.

Ten ostatni punkt wydaje się szczególnie ciekawy w zestawieniu z oryginalną hipotezą Oorta z roku 1950. Oparł on swoje rozważania o istnieniu odległego rezerwuaru proto-komet na analizie 19 najdokładniejszych wówczas orbit pierwotnych komet jednopojawieniowych. W świetle przedstawionych w niniejszej rozprawie badań można stwierdzić, że tylko 9 spośród tych 19 wziętych przez Oorta do analizy komet rzeczywiście pojawiło się bezpośrednio z postulowanego obłoku!

Podziękowania

Przedstawione w niniejszej rozprawie wyniki zostały uzyskane dzięki pomocy szeregu osób.

Prof. dr hab. Hieronim Hurnik pobudził moje zainteresowanie problemem pochodzenia komet. Będąc kiedyś zwolennikiem międzygwiazdowego pochodzenia komet [Hurnik, 1959, 1964], dążył do szczegółowego zweryfikowania poszczególnych tez hipotezy Oorta. Prof. dr hab. Grzegorz Sitarski bezpośrednio zasugerował tematykę niniejszej rozprawy jako naturalną kontynuację wyników otrzymanych przez autora w ramach pracy doktorskiej i wielokrotnie zachęcał do kontynuacji przedstawionych tu badań. Nieocenioną pomoc stanowiła możliwość dyskusowania niektórych pojawiających się problemów i trudności z koleżankami i kolegami, w szczególności z dr hab. Tadeuszem Jopkiem, dr hab. Sławomirem Breiterem, dr Haliną Prętką-Ziomek, prof. dr hab. Edwinem Wnukiem i wieloma innymi. Również „zdalne” i bezpośrednie rozmowy z Paulem Wiesmanem, Johnem Matese’em, Hansem Rickmanem, Lukiem Dones’em, Julio Fernandezem, Halem Levisonem i Brianem Marsdenem wiele wniosły do otrzymanych wyników i ich interpretacji.

Wszystkim wymienionym i niewymienionym składam serdeczne podziękowania. Dziękuję też mojej żonie i dzieciom za pomoc i wyrozumiałość towarzyszące powstawaniu niniejszej rozprawy.

Literatura

- M. E. Bailey, S. V. M. Clube, and W. M. Napier. *The Origin of Comets*. Pergamon Press, 1990.
- M. Barbier-Brossat and P. Figon. Catalogue général de vitesses radiales moyennes pour les étoiles galactiques. Mean radial velocities catalog of galactic stars. *A&AS*, 142:217–223, March 2000.
- L. Biermann, W. F. Huebner, and Rh. Lüst. Aphelion Clustering of “New” Comets: Star Tracks Through Oort’s Cloud. *Proc.Natl.Acad.Sci.USA*, 80:5151–5155, Aug. 1983.
- Richard S. Bogart and Peter D. Noerdlinger. On the distribution of orbits among long-period comets. *AJ*, 87(6):911–917, June 1982.
- S. Breiter, P. A. Dybczyński, and A. Elipe. The action of the Galactic disk on the Oort cloud comets. Qualitative study. *A&A*, 315:618–624, November 1996.
- John Byl. Galactic perturbations on nearly-parabolic cometary orbits. *The Moon and the Planets*, 29:121–137, 1983.
- John Byl. The effects of the galaxy on cometary orbits. *Earth, Moon and Planets*, 36:263–273, 1986.
- R. C. Carrington. On the distribution of the perihelia of the parabolic and hyperbolic comets in relation to the motion of the Solar System in space. *Mem. R. Astron. Soc.*, XXIX:355–367, 1861.
- Centre de Données astronomiques de Strasbourg. *SIMBAD and Vizier databases*. <http://cds.u-strasbg.fr>, 2005.

- Database for Nearby Stars, Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg. *ARICNS database*. <http://www.ari.uni-heidelberg.de/aricns/>, 2005.
- A. H. Delsemme. Galactic tides affect the Oort cloud - an observational confirmation. *A&A*, 187: 913–918, November 1987.
- L. Dones, M. J. Duncan, H. F. Levison, and P. R. Weissman. Simulations of the formation of the Oort cloud of comets. In *AAS/Division of Planetary Sciences Meeting*, volume 30, page 5107, September 1998.
- L. Dones, H. Levison, M. Duncan, and P. Weissman. Formation of the Oort cloud revisited. In *AAS/Division of Planetary Sciences Meeting*, volume 32, page 3602, October 2000a.
- L. Dones, H. Levison, M. Duncan, and P. Weissman. Formation of the Oort cloud, 2000b. pers. comm.
- Martin Duncan, Thomas Quinn, and Scott Tremaine. The formation and extent of the Solar System comet cloud. *AJ*, 94(5):1330–1338, Nov. 1987.
- P. A. Dybczynski and T. Kwiatkowski. Radial velocities of 'slow movers' - call for observations. *ArXiv Astrophysics e-prints*, July 2003.
- Piotr A. Dybczyński. On the asymmetry of the distribution of observable comets induced by a star passage through the oort cloud. *A&A*, 383(3):1049–1053, March 2002a.
- Piotr A. Dybczyński. Long term dynamical evolution of the Oort cloud comets: galactic and planetary perturbations. In Z. Knežević and A. Milani, editors, *IAU Colloq. 197: Dynamics of Populations of Planetary Systems*, pages 335–340, 2005.
- Piotr A. Dybczyński. Simulating observable comets, I. The effects of a single stellar passage through or near the Oort cometary cloud. *A&A*, 396:283–292, 2002b.
- Piotr A. Dybczyński. Simulating observable comets, II. Simultaneous stellar and galactic action. *A&A*, 441:783–790, 2005a.
- Piotr A. Dybczyński. Simulating observable comets, III. Real stellar perturbers of the Oort cloud and their output. *accepted for publication in A&A*, 2005b.
- Piotr A. Dybczyński. Dynamical history of the observed long-period comets. *A&A*, 375(2):643–650, Aug. 2001.
- Piotr A. Dybczyński. Impulse approximation improved. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 58:139–150, February 1994.
- Piotr A. Dybczyński. Directional distribution of observable comets induced by a star passage through the Oort cloud. *Earth Moon and Planets*, 90:483–488, 2002c.
- Piotr A. Dybczyński. The transparency of the solar system to the oort cloud comets. *A&A*, 428 (1):247–253, December 2004.
- Piotr A. Dybczyński and P. Kankiewicz. Approaches of stars to the Sun. In J. Svoreň and E. M. Pittich, editors, *IAU Colloq. 173: Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets*, pages 345–352, Tatranská Lomnica, 1999. Astron. Inst. Slovak Acad. Sci.
- Piotr A. Dybczyński and H. Prętko. The statistical effects of Galactic tides on the Oort cloud. *Earth Moon and Planets*, 72:13–18, 1996.
- ESA. *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues, ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission*. ESA Publications Division, ESA SP Series vol no: 1200, Noordwijk, Netherlands, 1997.

- C. Fabricius and V. V. Makarov. Hipparcos astrometry for 257 stars using Tycho-2 data. *A&A Suppl.*, 144:45–51, May 2000.
- J. García-Sánchez, R. A. Preston, D. L. Jones, P. R. Weissman, J. .; Lestrade, D. W. Latham, and R. P. Stefanik. Stellar encounters with the Oort cloud based on HIPPARCOS data. *AJ*, 117:1042–1055, February 1999.
- J. García-Sánchez, P. R. Weissman, R. A. Preston, D. L. Jones, J. .; Lestrade, D. W. Latham, R. P. Stefanik, and J. M. Paredes. Stellar encounters with the solar system. *A&A*, 379:634–659, 2001.
- W. Gliese and H. Jahreiss. Preliminary Version of the third catalogue of nearby stars. In *Nearby Stars, Preliminary 3rd Version (1991)*, 1991.
- R. O. Gray, C. J. Corbally, R. F. Garrison, M. T. McFadden, and P. E. Robinson. Contributions to the Nearby Stars (NStars) Project: Spectroscopy of Stars Earlier than M0 within 40 Parsecs: The Northern Sample. I. *AJ*, 126:2048–2059, October 2003.
- S. Grenier, M.-O. Baylac, L. Rolland, R. Burnage, F. Arenou, D. Briot, F. Delmas, M. Duflot, V. Genty, A. E. Gómez, J.-L. Halbwachs, M. Marouard, E. Oblak, and A. Sellier. Radial velocities. Measurements of 2800 B2-F5 stars for HIPPARCOS. *A&AS*, 137:451–456, June 1999a.
- S. Grenier, R. Burnage, R. Faraggiana, M. Gerbaldi, F. Delmas, A. E. Gómez, V. Sabas, and L. Sharif. Radial velocities of HIPPARCOS southern B8-F2 type stars. *A&AS*, 135:503–509, March 1999b.
- R. S. Harrington. Implications of the observed distribution of very long period comets orbits. *Icarus*, 61:60–62, 1985.
- Ichiro Hasegawa. Distribution of the aphelia of long-period comets. *PASJ*, 28:259–276, 1976.
- J. Heisler and S. D. Tremaine. The influence of the Galactic tidal field on the Oort comet cloud. *Icarus*, 65:13–26, 1986.
- H. Hurnik. The distribution of the directions of perihelia and of the orbital poles of non-periodic comets. *Acta Astron.*, 9:207–221, 1959.
- Hieronim Hurnik. Zagadnienie ruchu Słońca względem statystycznej chmury komet. In *Prace Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii*, number 1 in Seria Astronomia, pages 1–29. Uniwersytet im. A.Mickiewicza, Poznań, 1964.
- Manju Khana and Shakti D. Sharma. Perihelion distribution of long-period comets and solar apex. *PASJ*, 35:559–564, 1983.
- Rhea Lüst. The distribution of the aphelion directions of long-period comets. *A&A*, 141:94–100, 1984.
- B. G. Marsden and G. V. Williams. *Catalogue of Cometary Orbits 12th Edition*. Minor Planet Center, Cambridge, Mass., 1997.
- B. G. Marsden and G. V. Williams. *Catalogue of Cometary Orbits 15th Edition*. Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Mass., 2003.
- B. G. Marsden, Z. Sekanina, and D. K. Yeomans. Comets and nongravitational forces. V. *AJ*, 78: 211–225, March 1973.
- J. Matese and D. Whitmire. Tidal Imprint of Distant Galactic Matter on the Oort Comet Cloud. *APJ*, 472:L41, November 1996.

- J. J. Matese and J. J. Lissauer. Continuing evidence of an impulsive component of Oort cloud cometary flux. In *ESA SP-500: Asteroids, Comets, and Meteors: ACM 2002*, pages 309–314, November 2002.
- J. J. Matese and P. G. Whitman. The Galactic disk tidal field and the nonrandom distribution of observed Oort cloud comets. *Icarus*, 82:389–401, December 1989.
- J. J. Matese, P. G. Whitman, and D. P. Whitmire. Cometary Evidence of a Massive Body in the Outer Oort Clouds. *Icarus*, 141:354–366, October 1999.
- John J. Matese, Patrick G. Whitman, and Daniel P. Whitmire. Oort cloud comet perihelion asymmetries: Galactic tide, shower or observational bias? *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 69:77–87, 1998.
- R. A. J. Matthews. The Close Approach of Stars in the Solar Neighborhood. *QJRAS*, 35:1+, March 1994.
- P. F. L. Maxted and T. R. Marsh. The fraction of double degenerates among DA white dwarfs. *MNRAS*, 307:122–132, July 1999.
- A. A. Mullari and V. V. Orlov. Encounters of the Sun with Nearby Stars in the Past and Future. *Earth Moon and Planets*, 72:19–23, 1996.
- J. B. Murray. Arguments for the presence of a distant large undiscovered Solar system planet. *MNRAS*, 309:31–34, October 1999.
- D. L. Nidever, G. W. Marcy, R. P. Butler, D. A. Fischer, and S. S. Vogt. Radial Velocities for 889 Late-Type Stars. *A&AS*, 141:503–522, August 2002.
- B. Nordström, M. Mayor, J. Andersen, J. Holmberg, F. Pont, B. R. Jørgensen, E. H. Olsen, S. Udry, and N. Mowlavi. The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood. Ages, metallicities, and kinematic properties of 14 000 F and G dwarfs. *A&A*, 418:989–1019, May 2004.
- J. H. Oort. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bull.Astron.Inst.Nether.*, 11:91–110, 1950.
- Research Consortium on Nerby Stars. *RECONS database*. <http://www.chara.gsu.edu/RECONS>, 2005.
- E. M. Standish. JPL planetary and lunar ephemerides. Interoffice Memorandum IOM 312.F – 98 – 048, Jet Propulsion Laboratory, August 1998.
- The NASA Astrophysics Data System, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. *ADS database*. <http://adswww.harvard.edu>, 2005.
- The Nearby Stars Database Project at NASA-Ames. *NSTARS database*. <http://nstars.arc.nasa.gov>, 2005.
- B. Todorovic-Juchniewicz. When we may and need to use barycentric orbit of a comet? *Acta Astron.*, 31:192–196, 1981.
- J. G. Tyror. The distribution of the directions of perihelia of long-period comets. *MNRAS*, 117 (4):370–379, 1957.
- P. R. Weissman. Star passages through the Oort cloud. *Earth Moon and Planets*, 72:25–30, 1996.
- R. Wielen, H. Schwan, C. Dettbarn, H. Lenhardt, H. Jahrei, R. Jhrling, and E. Khalisi. Astrometric Catalogue ARIHIP. Containing stellar data selected from the combination catalogues FK6, GC+HIP, TYC2+HIP and from the HIPPARCOS Catalogue. *Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg*, 40:1–36, 2001.

- R. E. Wilson. *General Catalogue of Stellar Radial Velocities*. Carnegie Institute, Washington D.C. Publication 601, 1953.
- S. Yabushita. Statistical tests of distribution of perihelion points of long-period comets. *MNRAS*, 189:45–56, 1979a.
- S. Yabushita. On some characteristics of the distribution of perihelia of long-period comets. In R. L. Duncombe, editor, *Dynamics of the Solar System*, pages 283–287, Dordrecht-Holland, 1979b. IAU, D. Reidel Publ. Co.