

# Mikrosatelita MOST: Walizka pełna gwiazd

Sławomir RUCIŃSKI\*

## Historia

Mija właśnie 10 lat od chwili, gdy autor, z małym zespołem naukowym – ale obejmującym całą Kanadę – i zespołem technicznym, głównie z Toronto, złożył do Kanadyjskiej Agencji Kosmicznej (CSA) propozycję zbudowania małego satelity do obserwacji astronomicznych.

Kanada miała wspaniałe wczesne sukcesy w badaniach satelitarnych. W latach 1960., jako trzeci kraj na świecie, wysłała na orbitę satelitę naukowego do badania przestrzeni wokółziemskiej *Alouette*. Ale w latach 1970–1990 nie budowano w Kanadzie własnych satelitów, tylko intensywnie uczestniczono w naukowych programach amerykańskich. W latach 1995–1997 zorganizowano nową Agencję Kosmiczną i postanowiono wrócić do własnych, ale raczej skromnych programów.

*Announcement of Opportunity* ogłoszone przez Kanadyjską Agencję Kosmiczną sugerowało skalę przedsięwzięcia na poziomie poniżej 10 milionów dolarów, co jest bardzo małą sumą, jeżeli chodzi o satelity naukowe do celów astronomicznych: Teleskop Kosmiczny Hubble'a (HST) kosztował (zależnie od tego, co się wlicza do pełnych kosztów) od 4,5 do 6 miliardów dolarów, zaś małe satelity do obserwacji np. świecenia gwiazd w ultrafiolecie czy promieniach Roentgena kosztują zazwyczaj 100–300 milionów dolarów.

Satelita opisany poniżej jest pierwszym całkowicie kanadyjskim (jeżeli nie liczyć rosyjskiej rakiety, która go wyniosła) satelitą naukowym po 30 latach przerwy. Jest też pierwszym w historii mikrosatelitą do obserwacji astronomicznych z pełną, trójosiową stabilizacją orientacji w przestrzeni.

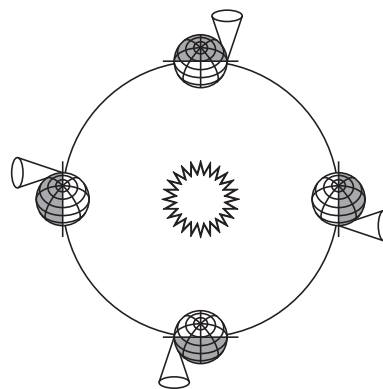
## Pomysł

Wysłaniem na orbitę małego, prostego teleskopu do prowadzenia ciągłych obserwacji fotometrycznych gwiazd interesowałem się od dawna. Gdy pierwszy sztuczny satelita Sputnik-1 został umieszczony na orbicie w 1957 roku (jeszcze jedna, ważna rocznica znacznego osiągnięcia technologicznego), byłem zapalonym obserwatorem gwiazd zmiennych. Za pomocą lornetki oceniałem względne jasności gwiazd, co jest dość łatwe i to z dokładnością do kilku procent. Tego typu obserwacje są bardzo użyteczne i nadal wykonywane przez miłośników astronomii ze względu na kolosalną liczbę gwiazd, których nie są w stanie „obsłużyć” astronomowie zawodowi. Wiedziałem wtedy, że satelita mógłby obserwować wybrany punkt na niebie przez około połowę czasu każdego okresu obiegu wokół Ziemi; przez pozostałą połowę orbity musiałby być wyłączony, bo patrzyłby w Ziemię. Ale i tak, możliwość obserwacji bez długich, wielogodzinnych

przerw dziennych wydawała się czymś wspaniałym. Tak właśnie działa HST, obserwując przez około 35 minut z 96-minutowego okresu obiegu wokół Ziemi. W 1957 roku marzyłem: „gdyby tak można było wynieść na orbitę piętnastocentymetrowy teleskop amatorski”.

Przez wiele lat usiłowałem zainteresować tym prostym pomysłem wielu ludzi, na ogół bez skutku. Zwykle uprzejmie wskazywano mi nikły moment bezwładności małego satelity, który chciałby raczej koziółkować, niż zachowywać stałą orientację w stosunku do gwiazd. Wskazywano mi brak małych systemów trójosiowej stabilizacji satelitów. Na szczęście, około 1995 roku, spotkałem w Toronto inżyniera Carrola Kierana. Jego zespół w małej firmie Dynacon pracował nad stabilizacją robotów przemysłowych i miał już prawie gotowy system do stabilizacji małych satelitów. I on właśnie był pierwszym słuchaczem, który potraktował serio moje marzenia.

Chyba jednak najważniejszy pomysł dla satelity MOST (poniżej wytłumaczę ten skrót), do którego doszliśmy we wspólnych dyskusjach z Carrollem Kieranem w latach 1995–1997 polegał na umieszczeniu satelity na orbicie pokrywającej się z linią zmierniczą.

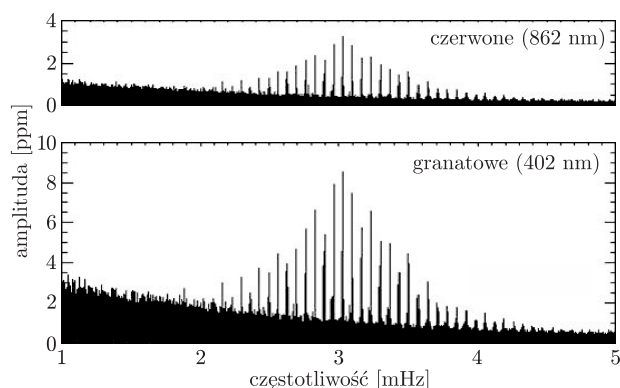


Rys. 1. Orbita satelity MOST dokonuje precesji ściśle w tempie jeden obrót na rok, tak że zawsze ustawiona jest prostopadle do kierunku ku Słońcu. W ten sposób pokrywa się z linią zmierniczą.

Satelita taki jest cały czas oświetlony przez Słońce z jednej strony i może patrzeć w przestrzeń kosmiczną w stronę odsłoneczną bez przerwy. Ale orbita taka musi być doskonale dobrana. Wykorzystuje się do tego naturalną precesję orbit w nieco niesymetrycznym potencjale grawitacyjnym Ziemi. Wszystkie orbity satelitarne podlegają precesji. Wybierając nachylenie orbity nieco różne od 90 stopni względem równika (tzw. orbita biegunowa) oraz odpowiednią wysokość nad powierzchnią Ziemi (około 900 km), można osiągnąć takie tempo precesji orbity, że jej okres wynosi dokładnie jeden rok. Taka orbita jest zawsze ustawiona prostopadle do kierunku ku Słońcu, z wysokości zaś 900 km otwiera się duży, około 57-stopniowy stożek ciągłej widoczności gwiazd z nieba przeciwsłonecznego. Tak więc przez około miesiąc można obserwować gwiazdę w sposób ciągły, bez żadnych przerw dziennych. Istnieje wielka potrzeba obserwacji fotometrycznych gwiazd nie tylko bez przerw dziennych, ale też

\*Department of Astrophysics, University of Toronto

z równomiernym rozkładem obserwacji w czasie. Jest to potrzebne do wykrycia sejsmicznych drgań gwiazd o typowych okresach rzędu kilku minut, lecz z mikroskopijnymi amplitudami rzędu kilku milionowych normalnego poziomu jasności. W przypadku Słońca fale sejsmiczne mogą być badane z wielką dokładnością, ponieważ są widoczne na powierzchni Słońca, lecz w przypadku gwiazd widzimy sumaryczny efekt drgań na całej powierzchni. Słońce obserwowane w ten sposób ukazuje serię charakterystycznych drgań.



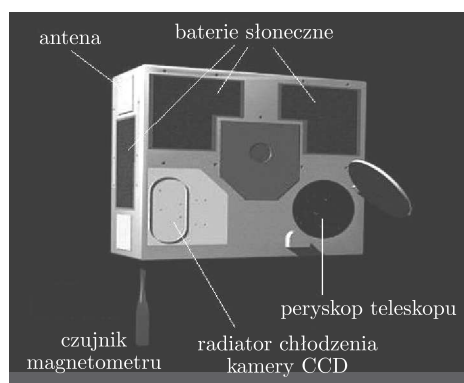
Rys. 2. Oscylacje sejsmiczne Słońca obserwowanego jak gwiazda, czyli przy wykorzystaniu całkowitego strumienia światła. Drgania są bardzo małe – zazwyczaj kilka milionowych części (ppm, ang. parts per million) średniej jasności Słońca.

Przez rozszyfrowanie zawartej w nich informacji można było potwierdzić modele budowy wewnętrznej (w tej chwili dokładność na poziomie 0,1% wielkości takich jak gęstość czy ciśnienie), poznać rozkład prędkości wirowania wewnątrz Słońca jak również rozkład zmian energii z głębokością generowanego przez Słońce spontanicznie pola magnetycznego. Problem w przypadku gwiazd polega na małej amplitudzie drgań. Ale jeżeli obserwacje są dostatecznie długo prowadzone (powiedzmy przez miesiąc), można je „poskładać” (stosując formalizm Fouriera), tak że indywidualne obserwacje co kilka sekund, z dokładnością kilku dziesięciotysięcznych, mogą pozwolić na wykrycie drgań o amplitudzie zaledwie kilku milionowych. To jest właśnie cel satelity MOST, czyli w pełnej nazwie Micro-Oscillations of STars.

## Realizacja

Orbita typu „zmiernik – świt” od razu sugerowała dalsze rozwiązania MOSTa: teleskop patrzyłby w przestrzeń ze swojej „ciemnej” strony, gdzie umieszczony byłby radiator do chłodzenia detektora CCD. Od jasnej strony satelity byłyby tylko baterie słoneczne (rys. 3).

Satelita mógł być mały, wielkości dużej walizki (60 × 60 × 24 cm). MOST ma masę 54 kg i jest stabilizowany systemem czterech kół reakcyjnych (*reaction wheels*, rodzaj żyroskopów), z których trzy ustawione są wzajemnie prostopadle, a czwarte jest „na zapas”, bo w końcu są to jedyne ruchome części satelity i pierwsze się zużyją (łożyska nie są smarowane, bo smary odparowują). Koła te wirują bez przerwy, a zmiana tempa ich rotacji powoduje reorientację



Rys. 3. Tak wygląda MOST od swojej „ciemnej” strony. Cała druga strona pokryta jest bateriami słonecznymi. Baterie z tej strony są „na wszelki wypadek”, aby satelita miał energię nawet po utracie stabilności.

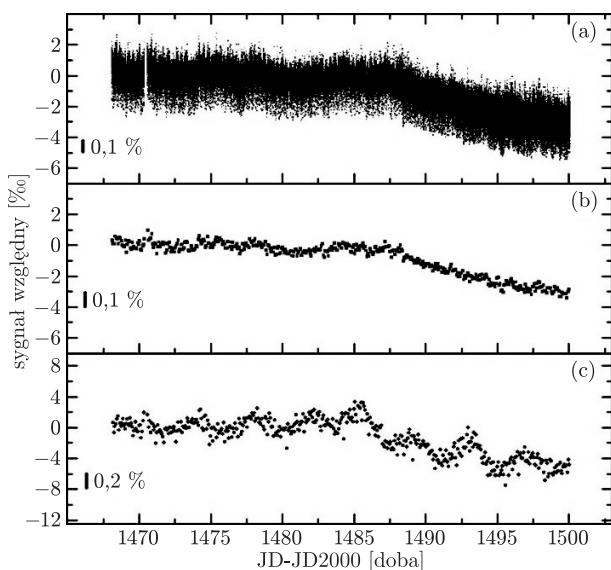
satelity na zasadzie zachowania momentu pędu. Dodatkowo satelita ma magnetometry, które pozwalają automatycznie ocenić natężenie ziemskiego pola i przez oddziaływanie z nim zmiennych prądów w dużych cewkach wokół całego satelity (zintegrowany system stabilizacji) może wytlumiać tendencję do koziołkowania satelity. Prąd elektryczny pochodzący z baterii słonecznych o całkowitej mocy około 30 W. Na pokładzie jest kilka komputerów kontrolujących stabilizację satelity, zbieranie informacji z dwóch detektorów CCD, stabilizację termiczną oraz przesyłanie informacji na Ziemię. Aby uniknąć kosztownych (i biurokratycznych) zabiegów o własną częstotliwość w paśmie radiowym, łączność radiowa odbywa się na falach krótkich w paśmie amatorskim, za pomocą modemu 9600 bps. Jest to zresztą najsłabsza strona systemu, bo przesyłanie jest wolne i ograniczone do małych części całych obrazów CCD (ale za to odczytywanych często, co 1–30 sekund). Pomimo ograniczeń związanych z małymi rozmiarami udało się uzyskać szereg technologicznych osiągnięć. Pierwotne plany przewidywały stabilizację kątową z dokładnością do około 0,004 stopnia. Przez stopniowe ulepszenia programów komputerowych udało się to poprawić aż 10-krotnie, do poziomu 0,0004 stopnia. Rosyjska rakietka *Eurokot* (dawniej rakietka balistyczna SS-19) z doskonałym manewrującym trzecim członem *Breeze* umieściła MOST dokładnie na oczekiwanej orbicie. Było to 30 czerwca 2003 roku, na dzień przed świętem narodowym Kanady.

## Program naukowy i wyniki

Po kilku miesiącach prób (i błędów) zespół naukowy zaczął otrzymywać wyniki. W tej chwili mamy już kilkadziesiąt publikacji, które można znaleźć w Internecie po prostu poprzez wyszukanie słów „satellite MOST”. Ograniczę się tylko do bardzo małej próbki.

Jednym z pierwszych obserwowanych obiektów była jasna gwiazda Procyon. Jest to gwiazda typu Słońca, ale bardziej masywna, więc większa i jaśniejsza. Oczekiwano, że drgania sejsmiczne Procyona będą szczególnie intensywne, ale z nieco dłuższymi okresami niż dla Słońca (gdzie typowe oscylacje mają okresy

około 5 minut). Ku naszemu wielkiemu zaskoczeniu, miesiąc obserwacji w styczniu 2004 r. (rys. 4) dał niespodziewany wynik. Procyon... nie wykazuje oscylacji! Nie tylko nie są one silne, ale ich w ogóle nie ma, przynajmniej na poziomie około 3–5 części na milion. Publikacja w *Nature* zrobiła prawdziwą furorę, ale też przyniosła nam nieco niechęci tych obserwatorów, którzy poprzednio „wykryli” (błędnie) oscylacje Procyona za pomocą obserwacji naziemnych (takie obserwacje cierpią głównie z powodu przerw dziennych i przerw wywołanych złą pogodą).

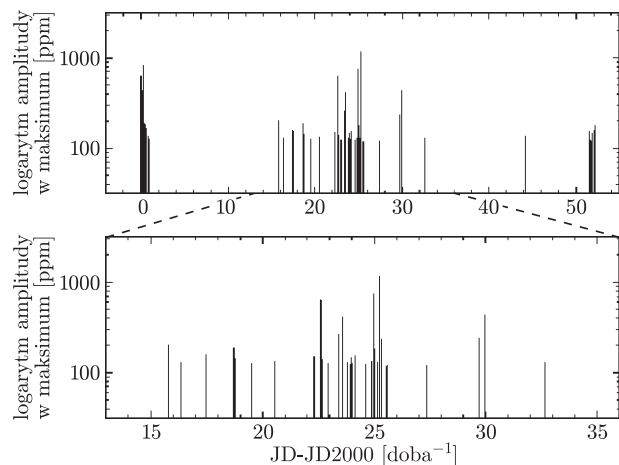


Rys. 4. Zmiany jasności Procyona podczas pierwszej serii obserwacji w roku 2004. Części (a) i (b) rysunku pokazują wszystkie obserwacje i obserwacje uśrednione w przedziałach kilkuminutowych. Stopniowa zmiana jasności przez miesiąc wywołana była efektami instrumentalnymi we wczesnej fazie projektu. Widać identyczną zmianę w innej gwiazdzie, u której wykryliśmy wyraźne pulsacje – część (c).

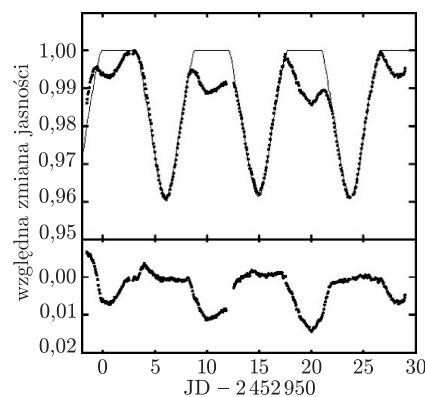
W tej chwili, po dalszych obserwacjach w 2005 i 2006 roku, wiemy, że bardzo słabe oscylacje pojawiają się i zanikają w skali kilku dni, co jest pewnym zaskoczeniem, ale też uniemożliwia stosowanie formalizmu Fouriera do znajdowania okresów oscylacji. Teoretycy myślą teraz, jak ulepszyć teorię wzbudzenia oscylacji w masywnych gwiazdach przez konwekcyjną turbulencję. W polu widzenia Procyona wykryliśmy gwiazdę pulsującą typu Delta Scuti i przeprowadziliśmy analizę jej stosunkowo silnych oscylacji. W gwiazdach tych pulsacje są silne i bardzo złożone ze względu na sprzężenie się dynamicznych własności całej gwiazdy z reakcją cieplną zewnętrznych warstw (rys. 5).

To co widać na rys. 4(c) to „dudnienie” kilku takich oscylacji.

Przykładem przydatności ciągłych obserwacji MOSTem jest wykrycie dwóch systemów plam na powierzchni bliskiej, stosunkowo młodej (1/6 wieku Słońca) gwiazdy Kappa 1 Ceti. Po odjęciu wkładu stabilnej plamy, odpowiadającej za zmiany o amplitudzie około 4% średniej jasności, regularnie powracającej wskutek rotacji gwiazdy co 8,9 dnia, pozostaje druga, słabsza (amplituda około 1%) plama wskazująca na rotację gwiazdy w 9,3 dnia (rys. 6).



Rys. 5. Analiza oscylacji gwiazdy HD 61199 w polu Procyona. Na skali osi poziomej jest częstotliwość oscylacji w cyklach na dzień, na (logarytmicznej) skali pionowej jest amplituda w ppm.



Rys. 6. Obserwacja młodej gwiazdy Kappa 1 Ceti sugeruje istnienie na jej powierzchni dwóch plam (albo systemów plam) z różnymi okresami rotacji. Jest to pierwszy tak wyraźny przejaw rotacji różniczkowej odkrytej nie na Słońcu. Powierzchnie gwiazd są nadal niedostępne do bezpośrednich obserwacji i widoczne są jako punkty nawet przez największe teleskopy.

Prosty model wskazuje, że widzimy rotację różniczkową, podobną jak na Słońcu, z obszarami w wyższych szerokościach rotującymi wolniej. Jest to pierwszy tak klarowny dowód istnienia tego typu rotacji. Przy okazji warto wspomnieć, że te plamy są bardzo duże; na Słońcu w maksimum aktywności sumaryczny efekt osłabienia światła nie przekracza 0,1%.

### Co dalej?

W tej chwili MOST jest w czwartym roku swego działania. Orbita powoli rozsynchronizowuje się, ale nawet gdy zaczną następować okresowe zakrycia gwiazd przez brzeg Ziemi, będziemy mogli dalej prowadzić obserwacje. Gorzej, jeżeli popsuje się któreś z kół reakcyjnych, ale jest ciągle jeszcze jedno w zapasie. W sumie przewiduje się działanie satelity przez dalszych kilka lat. W tempie około 12–15 dokładnie badanych obiektów na rok, będziemy mogli jeszcze poczynić wiele obserwacji.

Strona Web o MOST: [www.astro.ubc.ca/MOST](http://www.astro.ubc.ca/MOST)

Strona autora: [www.astro.utoronto.ca/~rucinski](http://www.astro.utoronto.ca/~rucinski)

Artykuły wspomniane w tekście:

Procyon: J.M. Matthews i inni *Nature* **430**(2004)51

Kappa 1 Ceti: S.M. Rucinski i inni *Publ. Astr. Soc. Pacific* **116**(2004)1093